[strumenti]

anno 16 numero **31** / 12.21

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

Quest'anno si celebra il settantesimo anniversario dell'Infn. Alle nostre spalle abbiamo una storia costellata di grandi risultati; davanti a noi, un futuro che si preannuncia eccitante e ricco di sorprese. Tutto questo grazie alla determinazione, all'intelligenza e al lavoro di una comunità di donne e di uomini che hanno contribuito al progresso culturale e sociale del nostro paese e, giorno dopo giorno, rinnovano l'eccellenza della fisica italiana.
Le eclatanti scoperte compiute negli ultimi decenni e il lavoro scientifico di tutti i giorni non sarebbero possibili senza una strategia ben precisa che l'Infn ha messo in campo sin dalla sua nascita, quella di dotarsi di infrastrutture di ricerca e di laboratori all'avanguardia. Tutto cominciò a Frascati alla fine degli anni '50, dove furono fondati i Laboratori Nazionali in cui fu installato un elettrosincrotrone, tra gli acceleratori di particelle più avanzati dell'epoca. Successivamente, l'Infn ha costruito i Laboratori Nazional del Gran Sasso, i più grandi laboratori sotterranei al mondo per lo studio dei neutrini e delle astroparticelle, e quelli di Legnaro, nei pressi di Padova, e del Sud, a Catania, per gli studi di fisica nucleare. Con il passare degli anni sono poi stati costruiti l'interferometro per la rivelazione di onde gravitazionali Ego, nella campagna di Cascina, a Pisa, e un'infrastruttura di calcolo distribuita sul territorio nazionale tra le più avanzate al mondo, per l'analisi dei dati prodotti al Large Hadron Collider del Cern di Ginevra. Questa strategia continuerà anche negli anni a venire, prova ne sono, ad esempio, le due infrastrutture di ricerca proposte dall'Infn e che quest'anno sono entrate a far parte della *roadmap* di Esfri (il Forum Europeo per le Infrastrutture di Ricerca), ovvero l'Einstein Telescope per lo studio delle onde gravitazionali ed Eupraxia, per sviluppare nuove tecniche di accelerazione di particelle attraverso onde di plasma.
Negli anni, in questi laboratori e in queste infrastrutture l'Infn ha realizzato una straordinaria collezione di strumenti, piccoli e grandi, dal minuscolo chip ai giganteschi rivelatori di particelle. Strumenti collocati nei laboratori, ma anche nello spazio, nelle profondità della terra, dei ghiacci, delle acque; strumenti che affinano i nostri sensi permettendoci di esplorare l'infinitamente piccolo, di captare segnali debolissimi, di osservare fenomeni rari, di scoprire che cosa si cela nella parte oscura dell'universo. La galleria di apparecchi, dispositivi, macchine che si dipana nelle pagine che seguono è ricchissima, e mostra come il connubio tra ingegno umano e tecnologie avanzate sia la chiave per penetrare i segreti della natura.
Tra i "ferri del mestiere" del fisico ci sono anche gli strumenti di calcolo, necessari per gestire le enormi quantità di dati prodotti negli acceleratori e per effettuare previsioni teoriche di alta precisione alla ricerca di evidenze di nuova fisica. In particolare, a questo settore ha dato un contributo fondamentale il collega e amico Lele Tripiccione, che ci ha improvvisamente lasciati mentre la rivista era in bozze. A lui va il nostro ricordo più affettuoso e la nostra stima, e un sentito ringraziamento per il contributo che ha dato alle ricerche dell'Infn, ma anche e soprattutto per il tempo trascorso insieme a discutere di fisica e di qualsiasi problema interessante, per l'amicizia e per il sorriso con cui affrontava la vita.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente Infn

asimmetrie
Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 16,
numero 31, dicembre 2021

direttore editoriale
Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile
Catia Peduto

direttore comitato scientifico
Vincenzo Barone

comitato scientifico
Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione
Matteo Massicci

hanno collaborato
Carla Aramo, Nicolò Cartiglia, Francesca Cavallari, Cecilia Collà Ruvolo, Angelica Facoetti, Fernando Ferroni, Giuliana Fiorillo, Giuliana Galati, Andrea Ghigo, Alessia Giampaoli, Adriano Lai, Nadia Pastrone, Umberto Petrin, Sara Pirrone, Giuseppe Politi, Massimiliano Razzano, Lucio Rossi, Raffaele Tripiccione

contatti redazione
Infn Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione
Hylab

stampa
Tmb Stampa srl

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m2

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di gennaio 2022.
Tiratura 22.000 copie.

come abbonarsi
L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare
la redazione all'indirizzo
comunicazione@presid.infn.it

sito internet
Asimmetrie 31 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine
Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

crediti iconografici
Foto copertina ©Hayo/AdobeStock // foto p. 4 ©Nito/AdobeStock; foto a p.5 ©LNF-INFN; foto b p. 6 ©Paolo Lombardi/LNGS-INFN; foto c p. 7 ©CERN; foto d p. 8 ©NASA; foto e p. 9 ©Km3net // foto a p. 10 ©CERN; fig. b p. 11 ©Asimmetrie-Infn(Hylab); foto c p. 12 ©CERN// fig. a p. 13 ©Asimmetrie-Infn(Hylab); foto b p. 14 ©ASG; fig. c p. 15 ©Asimmetrie-Infn(Hylab); foto d p. 16 ©LNF// fig. a p. 17 ©M. Tornago; fig. b p. 18 ©Asimmetrie-Infn(Hylab); foto c p. 19 ©Mark Williamson - Wikipedia // foto a p. 20 ©INFN; fig. b p. 21 ©Asimmetrie-Infn(Hylab) // foto a p. 22 ©CERN; fig. b p. 23 ©Asimmetrie-Infn(Hylab)// foto a p. 24 ©CERN; fig. b p. 25 ©Asimmetrie-Infn(Hylab); foto 1 p. 26 ©CERN // foto a p. 27 ©CERN; foto b p. 28 ©Augusto Brigatti; foto 1 p. 29 ©LNF // foto a, b pp. 30-31 ©M. Perciballi; foto c p. 32 ©Astrium UK // foto a p. 33 ©Bettmann/Getty Images; foto b p. 34 ©INFN // foto a, b pp. 36-37 ©LNF // foto a, b p. 38-39 ©CNAO // foto a p. 40 ©Museo Giovanni Poleni, Università di Padova ; foto b p. 41 ©C. Sirignano // foto b p. 43 ©Alca Technology // foto a p. 44 @R. Cifarelli; foto b p. 45 ©A. Catocci // foto a p. 46 ©INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

31 / 12.21
[strumenti]

La cassetta degli attrezzi 4
di Fernando Ferroni

L'anello delle meraviglie 10
di Nadia Pastrone

Megamacchine per il microcosmo 13
di Lucio Rossi

Disegnare percorsi invisibili 17
di Nicolò Cartiglia

Particelle in cerca di identità 20
di Sara Pirrone e Giuseppe Politi

Flash and chips 22
di Adriano Lai

Vedere oltre la luce 24
di Francesca Cavallari

Mostra le tue debolezze 27
di Giuliana Fiorillo
approfondimento di Claudio Gatti

Ascoltando la sinfonia dell'universo 30
di Massimiliano Razzano

Strumenti informatici 33
di Raffaele Tripiccione

[as] radici 36
Tu mi fai girar.
di Andrea Ghigo

[as] intersezioni 38
La fisica va dal medico.
di Angelica Facoetti

[as] traiettorie 40
Parola alle emulsioni nucleari.
di Giuliana Galati

[as] riflessi 42
Sinergie.
di Matteo Massicci

[as] con altri occhi 44
Dissonanze.
di Umberto Petrin

[as] spazi 46
Fisica tra le onde.
di Cecilia Collà Ruvolo

[as] illuminazioni 48
Un'app cosmica!
di Carla Aramo e Alessia Giampaoli

La cassetta degli attrezzi

Strumenti per la fisica fondamentale

di Fernando Ferroni

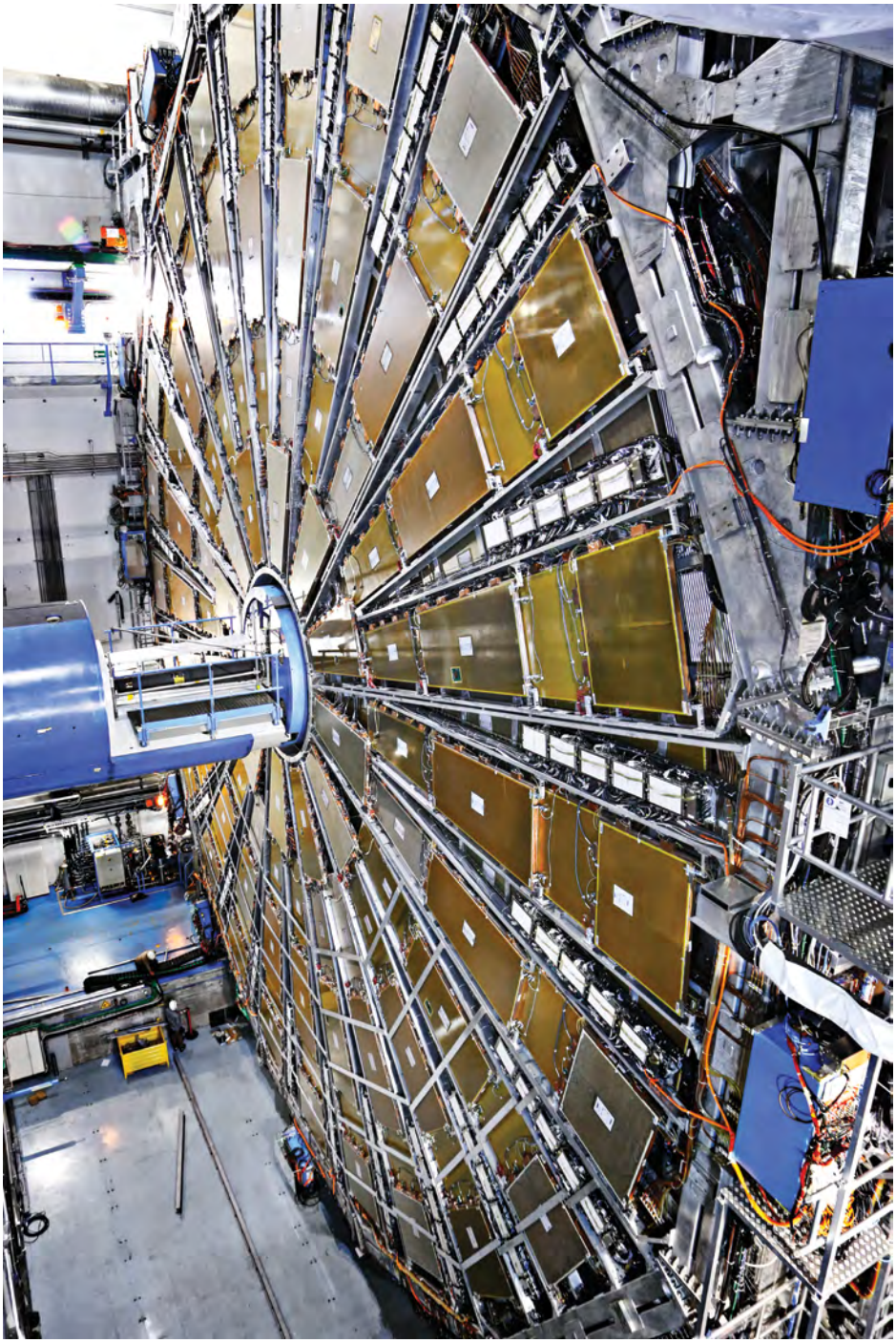
a.
Ada (Anello di Accumulazione) è stato il primo anello a far circolare elettroni e le loro antiparticelle, i positroni, in senso opposto lungo la stessa traiettoria, tra i poli di un unico elettromagnete. Costruito a Frascati nel 1960, è stato il capostipite di tutti i collisori, incluse le attuali, gigantesche macchine di alta energia, sia pure con un diametro di appena 1,3 m, che consentiva di raggiungere l'energia massima di 0,25 GeV, e con un fascio circolante costituito da soli 10 milioni di particelle.

La ricerca in fisica fondamentale ha per oggetto alcuni aspetti della natura che sfuggono totalmente ai nostri sensi e ci sembrano persino evanescenti: le particelle elementari, le interazioni del mondo subatomico, i messaggeri dell'universo profondo. Essa, tuttavia, ha un lato materiale ineliminabile e cruciale: quello degli strumenti – dai più piccoli ai più giganteschi – che ci consentono di scoprire tutto ciò e di andare ben oltre la nostra esperienza ordinaria. La storia della fisica fondamentale degli ultimi decenni – e di un ente di ricerca come l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn), che ne è stato, e ne è, protagonista – è quindi anche la storia dei progressi tecnologici e delle idee brillanti che stanno dietro ogni singolo componente delle macchine e degli apparati che usiamo per esplorare il microcosmo e il macrocosmo. Questa storia non è stata lineare: l'evoluzione degli strumenti, infatti, è determinata tanto dalla necessità di affrontare le sfide che la ricerca, di volta in volta, pone, quanto da improvvise spinte in avanti, in nuove e inaspettate direzioni.
La fisica contemporanea non sarebbe possibile senza le grandi infrastrutture, ed è da queste che partiamo per il nostro breve viaggio attraverso gli aspetti materiali della ricerca. Nel dopoguerra l'Italia si è subito impegnata a rimuovere quell'ostacolo che l'aveva resa periferica sul piano scientifico nei decenni precedenti (nonostante le straordinarie individualità che l'avevano illustrata nel mondo, come il celebre gruppo di via Panisperna), e cioè l'assenza di infrastrutture dove poter fare ricerca di punta e formare i giovani. Da qui la decisione, mai ricordata abbastanza, di avere un primo laboratorio nazionale, quello di Frascati, dove ospitare una macchina,

l'elettrosincrotrone da 1000 MeV, che, quando entrò in funzione, nel 1959, era tra le più competitive al mondo (vd. p. 36, ndr). Il successo di questa iniziativa, straordinario in sé, va poi messo nel contesto di quello che sarebbe stato il contributo dei Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) alla storia delle macchine acceleratrici di particelle: Ada (Anello di Accumulazione, 1960), la madre di tutti i collisori, nata da un'idea di Bruno Touschek (vd. fig. a); Adone (1969), il primo collisore elettrone-positrone, che per mera sfortuna (il 3% di energia massima mancante) mancò la scoperta delle particelle con quark charm nella cosiddetta "rivoluzione di novembre" del 1974; infine, Dafne (1997), il collisore che ha coperto una parte impressionante della fisica dei mesoni K.
Ora, una nuova fase è all'orizzonte, con gli studi condotti su Sparc-Lab e il progetto Eupraxia: l'idea è di accelerare le particelle tramite campi prodotti in un plasma da un laser o dalle particelle stesse, passando da campi elettrici di 30 megavolt/metro delle attuali cavità superconduttrici – un settore tecnologico in cui il Laboratorio di Superconduttività (Lasa) dell'Infn, a Milano, è all'avanguardia – ai gigavolt/metro. Una rivoluzione che, una volta completata, sarà paragonabile a quella determinata dall'invenzione di Ada.
L'idea delle grandi infrastrutture nazionali, concretizzatasi per la prima volta negli anni '50 a Frascati, ha avuto in seguito ulteriori e importanti sviluppi, con la creazione nel 1961 dei Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl, nei pressi di Padova), con una forte caratterizzazione tecnologica, nel 1976 dei Laboratori Nazionali del Sud (Lns) a Catania, dove agli inizi degli anni '90 fu installato un ciclotrone superconduttore costruito al Lasa ed è stata sviluppata la prima terapia a fasci di protoni per curare alcuni tipi di tumori, e, soprattutto, dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs), la cui realizzazione nel 1988 di fatto coincide con la nascita della fisica delle astroparticelle. Ai Laboratori del Gran Sasso – gli unici in Italia in cui il numero di scienziati stranieri superi quello degli italiani – è stato osservato il neutrino tau grazie al fascio di neutrini proveniente dal Cern, si cerca attualmente la materia oscura e si prova a dimostrare l'ipotesi, formulata da Ettore Majorana, sulla natura del neutrino. Uno degli esperimenti condotti al Gran Sasso, Borexino, ha fornito un contributo mirabile alla comprensione

b.
Borexino, esperimento dedicato allo studio delle proprietà dei neutrini, in particolare quelli di bassa energia provenienti dal Sole, è stato operativo nel Laboratorio sotterraneo del Gran Sasso a partire dal 2007. Nella sua sfera di acciaio erano contenute 300 tonnellate di scintillatore liquido radio-puro. All'interno della sfera sono visibili i fotomoltiplicatori utilizzati per rivelare la luce di scintillazione prodotta dall'interazione dei neutrini.

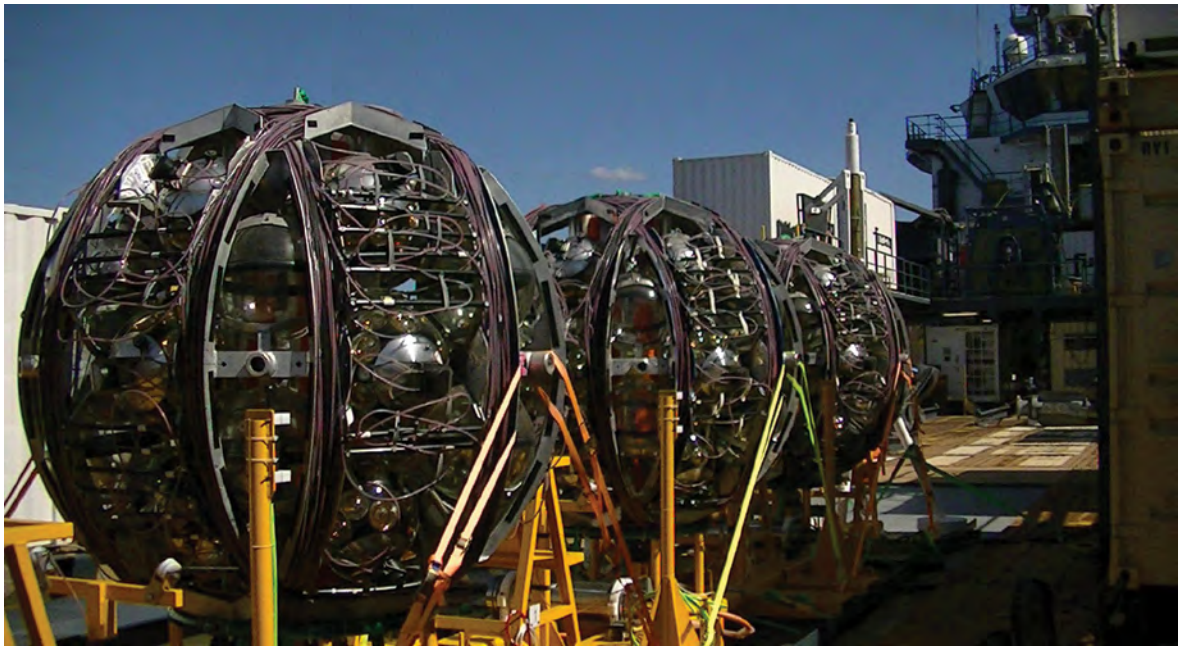
del funzionamento del Sole (compreso l'elusivo ciclo Cno, vd. p. 20 in Asimmetrie n. 24, ndr) e del meccanismo delle oscillazioni di neutrino, e con un altro importante esperimento, Icarus, è stata sviluppata la tecnologia dell'argon liquido che sarà la base di un futuro gigantesco esperimento negli Usa (l'esperimento Dune del Fermilab di Chicago).
Ciò che non bisogna dimenticare è che un rivelatore con la sensibilità di Borexino non sarebbe mai stato possibile se non fosse stato ideato e messo in opera un sistema di purificazione dello scintillatore liquido dalle capacità straordinarie (basti pensare che i parametri di purificazione per l'uranio e il torio sono a livello di una parte su 10^{20}). Sempre ai Laboratori del Gran Sasso è in funzione Cuore, dove una tonnellata di cristalli di tellurite è mantenuta a 10 millikelvin e la misura dell'energia depositata è fatta in maniera puramente calorimetrica nel senso più proprio del termine, con un termometro di germanio capace di misurare le centinaia di microkelvin con precisioni superiori all'1% .
Dal metro e mezzo di diametro (e dai 250 MeV di energia) di Ada agli attuali 8 kilometri (e 7 TeV) di Lhc (Large Hadron Collider) del Cern, nella seconda metà del Novecento la fisica è assurta a "*big science*", e una delle sue capitali mondiali è certamente il Cern di Ginevra. Sin dall'inizio il contributo dei fisici sperimentali italiani al Cern è stato enorme. Tre soli esempi: i rivelatori al silicio per la ricostruzione dei punti di decadimento delle particelle a vita media breve, che furono un marchio dell'esperimento italiano Na1 (lanciato negli anni '70), ora ampiamente sfruttati in Lhc; i rivelatori a piatti resistivi, una tecnologia tutta italiana alla base dei rivelatori a muoni dei grandi esperimenti di Lhc; i calorimetri a liquidi nobili sviluppati per gli esperimenti del Lep (il predecessore di Lhc) e poi usati in diverse edizioni degli esperimenti per lo studio della violazione di CP nei mesoni K e ancora in Lhc. Stiamo facendo torto a tanti altri sviluppi, ma quello che è importante sottolineare è che una costante della partecipazione dei fisici, tecnologi e tecnici dell'Infn nei grandi esperimenti (negli anni ci siamo di molto allargati, frequentando i laboratori Fermilab e Slac, negli Usa, nel campo della fisica degli acceleratori, oggi anche Kek in Giappone



c.
Particolare del rivelatore Atlas, uno dei grandi esperimenti del Large Hadron Collider del Cern di Ginevra. Sono visibili i rivelatori dedicati alla rivelazione dei muoni, le particelle che riescono a raggiungere la parte più esterna dell'apparato, in particolare uno dei due "endcap", ovvero la zona attorno alla camera da vuoto cilindrica nella quale vengono trasportati i fasci di protoni.

e nel passato Dubna e Serpukhov in Urss) è di andare con le mani piene di tecnologia. Non solo nel campo dei rivelatori, ma anche in quello degli acceleratori: i dipoli superconduttori di Lhc rappresentano un altro settore in cui la collaborazione dell'Infn con l'industria nazionale è stata una chiave del successo del progetto (ma nulla nasce dal nulla e il terreno era stato preparato dall'impegno precedente nell'acceleratore tedesco Hera).
Ci sono poi dei "ponti" tecnologici che hanno permesso ai fisici delle particelle di poter essere protagonisti anche nella ricerca nello spazio. La capacità di costruire sofisticati rivelatori al silicio ha costituito la base di satelliti come Agile, Fermi, Pamela, Dampe e Ams. Altri sono in progetto. Sono state acquisite le tecnologie che permettono la qualificazione per lo spazio, ben più complessa di quella richiesta per strumenti alla fin fine accessibili alle riparazioni come quelli dei laboratori terrestri.
Un altro tema è stato posto dalla abbondanza e complessità di dati raccolti dai moderni esperimenti, soprattutto ma non esclusivamente ai collisori adronici come Lhc. Qui si è dovuto cambiare un paradigma del calcolo scientifico, affrontando la condivisione delle risorse su scala globale con il progetto pilota di Grid che si è evoluto poi nella Cloud, di cui oggi tutti fanno uso. Il calcolo parallelo, lo sguardo sul futuro del *Quantum Computing* disegna un sistema molto più complesso nel quale l'Infn, che colse sin dall'inizio i segni della trasformazione necessaria, oggi diviene protagonista anche con il suo supercentro (il Tecnopolo) a Bologna che sarà sinergico con il Cineca.
Se la fisica degli acceleratori ha costituito il *mainstream* fino agli anni '80-'90, ci sono attualmente alcuni ambiti di frontiera che richiedono strumenti particolarmente innovativi e pongono formidabili sfide. Un esempio – cui abbiamo già accennato – è la fisica dei neutrini, che rappresenta un cavallo di battaglia storico per la scienza italiana: prima gli esperimenti al Cern, poi quelli al Gran Sasso e in Giappone, nel futuro prossimo a Dune negli Usa, sempre con un contributo tecnologico e di competenze importante. Non potevamo tirarci indietro dalla sfida di osservare i neutrini provenienti dalle profondità del cosmo, di enorme energia, che ci permetterebbero di identificare le loro sorgenti e confrontarle con quelle indicate dai fotoni. Ed ecco Km3net, un chilometro cubo di Mediterraneo

d.
L'esperimento Ams-02, installato a partire dal 2011 a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (visibile come forma approssimativamente cilindrica, di colore bianco, posizionato verticalmente sulla parte superiore del braccio del modulo della Iss). Lo scopo principale di Ams, guidato dal premio Nobel Samuel Ting, è quello di misurare il flusso di antiparticelle e investigare quindi il mistero dell'antimateria nel cosmo attraverso lo studio della composizione e della provenienza dei raggi cosmici.



profondo al largo della Sicilia attrezzato con "occhi" elettronici che ci permetteranno di osservare questi piccoli mostri (oltre che di spiare con opportuni microfoni le conversazioni delle balene).
Km3net farà concorrenza a un esperimento simile, IceCube (che ha scelto il Polo Sud per queste ricerche), ma avrà il conforto di un ambiente più gradevole...
Un secondo attualissimo esempio è rappresentato dagli interferometri gravitazionali: gli strumenti che veramente ci permettono di dire che studiamo tutte le interazioni fondamentali, gravità inclusa.
Le ricercatrici e i ricercatori dell'Infn sono stati capaci, assieme ai colleghi francesi del Cnrs-In2p3, di costruire e far funzionare – nell'ambito del laboratorio internazionale Ego – l'interferometro Virgo (collocato vicino a Pisa) e di raccogliere i frutti di questa impresa con la scoperta delle onde gravitazionali (annunciata nel 2016) e del fantastico evento in cui due stelle di neutroni si sono fuse emettendo, oltre alle onde gravitazionali, un lampo gamma osservato in coincidenza da satelliti e osservatori astronomici: l'evento fondante dell'astronomia multimessaggera.
Insomma, bisogna essere protagonisti a livello mondiale. Lo si può essere solo se in casa si hanno le infrastrutture con cui prepararsi alle sfide globali in termini di formazione delle risorse umane e di sviluppo di tecnologie. L'Infn lo ha saputo fare, al di là delle difficoltà del sistema paese, perché è stato costruito con questo Dna e ha saputo mantenere, attraverso un sistema di selezione interna dei progetti, una qualità molto alta. I laboratori nazionali sono stati le chiavi vincenti, ma il legame con il Cern è stato altresì insostituibile. Il coinvolgimento dell'industria nazionale è anche da annoverare tra i fattori di successo. Alla fine, comunque, è la qualità delle persone che fa la differenza, e in questo dobbiamo riconoscere il valore del nostro sistema formativo.

e.
Km3net rappresenta la prossima generazione di telescopi per neutrini: costituito da una serie di rivelatori di fotoni, disposti a intervalli regolari su lunghe colonne immerse verticalmente nelle acque profonde e limpide del Mar Mediterraneo, che diventa così un enorme rivelatore di diversi kilometri cubi e milioni di tonnellate di massa. Nella foto sono visibili i 31 grandi fotomoltiplicatori disposti nelle sfere di vetro che costituiscono i moduli del rivelatore, le quali devono essere in grado di sopportare l'enorme pressione del fondo del mare. I segnali di ciascun modulo vengono poi trasmessi da una rete di fibre ottiche a una stazione ricevente a terra.

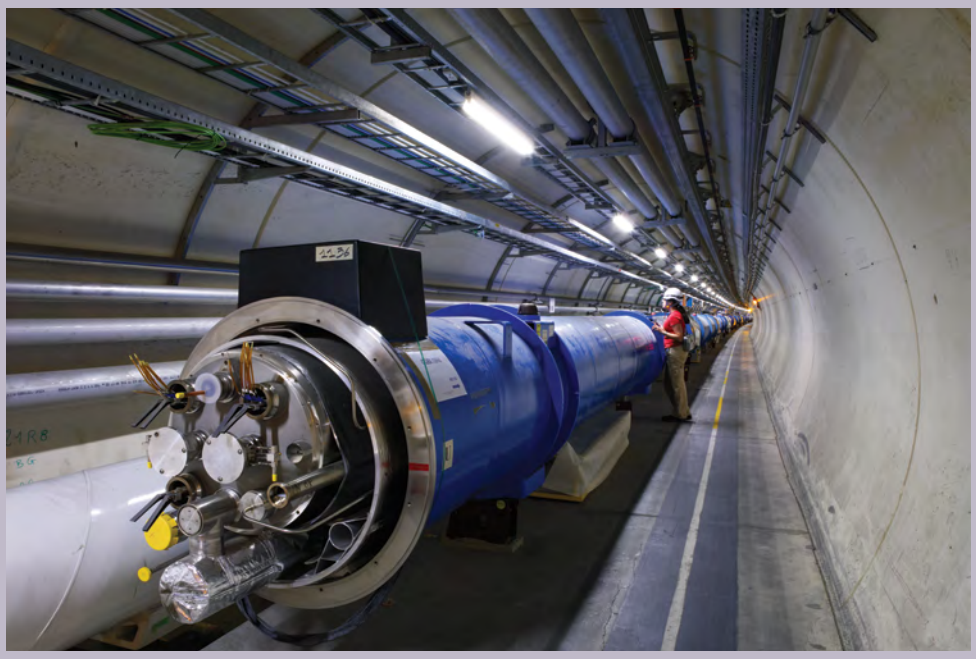
Biografia
Fernando Ferroni è professore al Gran Sasso Science Institute e già presidente dell'Infn. È stato anche membro del Consiglio del Cern e del Governing Board di Science Europe.
Ha partecipato a esperimenti di fisica delle particelle al Cern, allo Stanford Linear Accelerator Center e poi ai Laboratori sotterranei del Gran Sasso. È consigliere di amministrazione di PalaExpo a Roma e dal 2021 è alla direzione del progetto Einstein Telescope.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.1

L'anello delle meraviglie

I successi del Large Hadron Collider

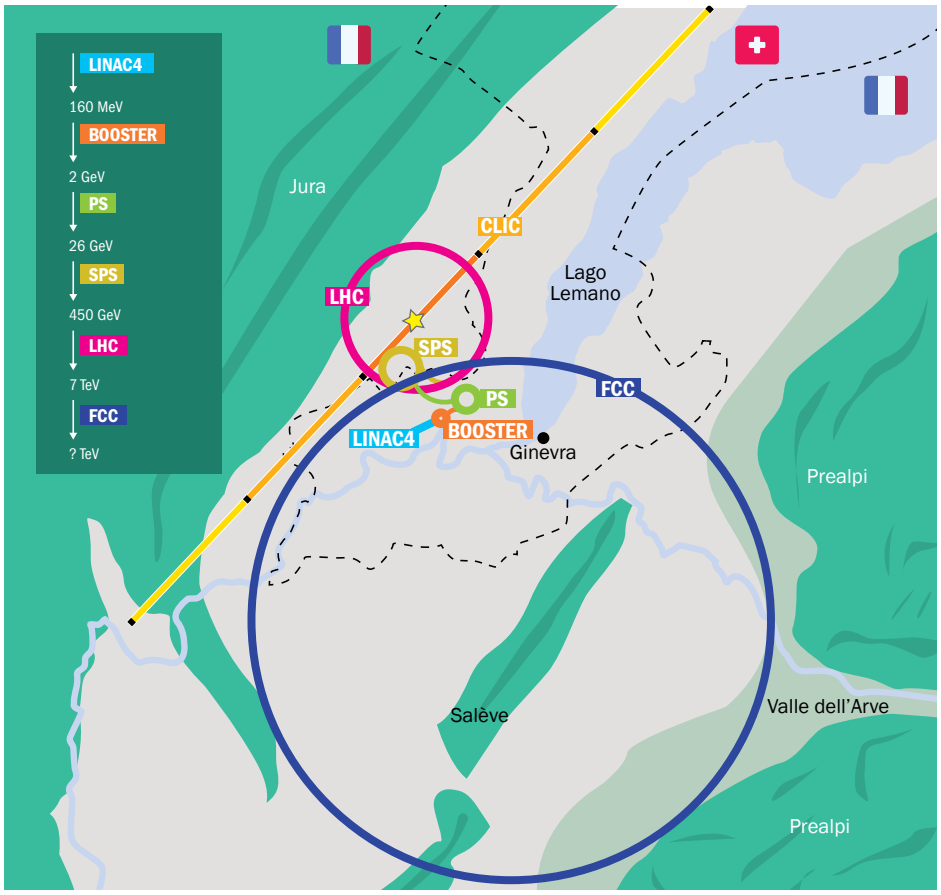
di Nadia Pastrone



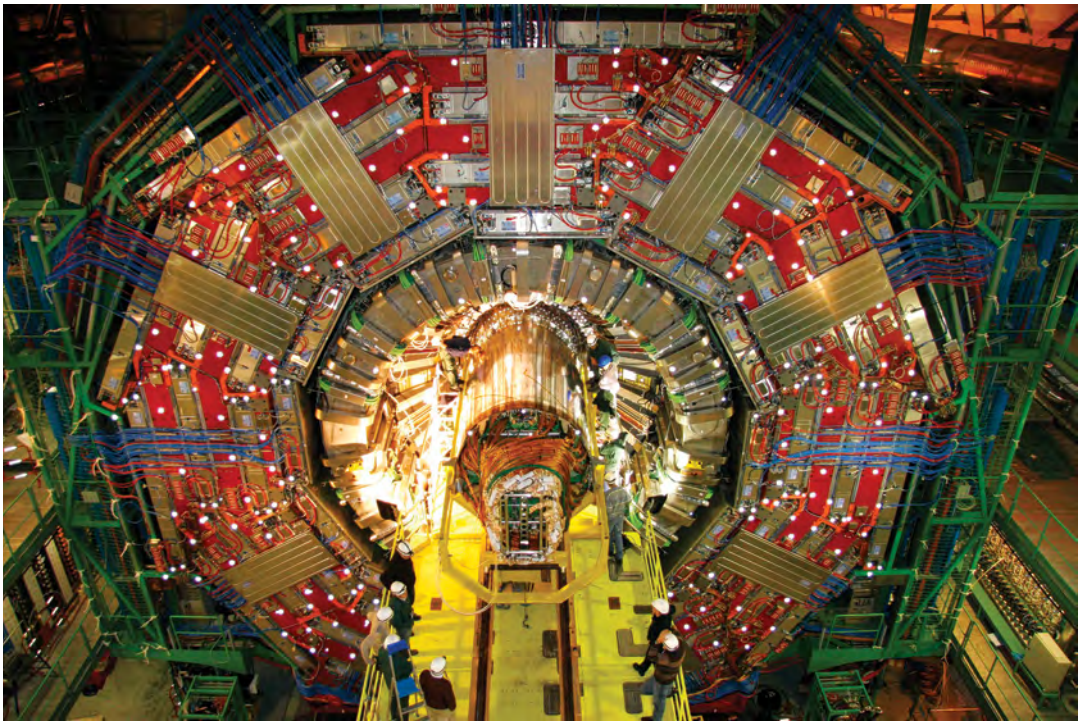
a.
Uno dei 1232 dipoli superconduttori che permettono di curvare fino a 7 TeV di energia la traiettoria dei protoni, che circolano lungo tutti i 27 km dell'anello di Lhc. Dall'esterno verso l'interno sono visibili il tubo da vuoto (in blu), lo schermo termico cilindrico, al cui interno è collocato il criostato vero e proprio, che permette di raggiungere la temperatura dell'elio liquido. All'interno del criostato si trova il giogo di ferro dentro il quale sono integrati i due avvolgimenti superconduttori che creano il campo magnetico dipolare (nella foto non visibili, in quanto coperti dal coperchio metallico). All'interno dei due avvolgimenti corrono le due camere da vuoto parallele, in cui circolano i fasci di particelle. Nella foto sono visibili solo i terminali delle due camere del fascio, che escono dal tappo del criostato, e una serie di tubi per l'ingresso e dei cavi dei sistemi di alimentazione e ausiliari.

Nel luglio 2012 si raccontò a tutto il mondo l'impresa straordinaria e globale che aveva portato alla scoperta del bosone di Higgs. Poche persone avevano ben chiaro perché fosse tanto importante qualcosa di così lontano dalla nostra vita di tutti i giorni. Per i fisici delle particelle rappresentava invece una meta cruciale, anzi l'inizio di una nuova era: non solo avevano catturato il segnale dell'esistenza di una nuova particella, ma avevano anche trovato l'anello mancante nella teoria del modello standard delle particelle elementari: la particella speciale prevista dai fisici teorici quasi cinquant'anni prima, tanto da guadagnare il premio Nobel per la Fisica già nel 2013! Ma non solo...
Questa storia affascinante è stata scritta, giorno per giorno, per almeno due decenni, da migliaia di donne e uomini: giovanissimi alle prime armi e grandi esperti, fisici e ingegneri di nazionalità diverse, che hanno lavorato insieme per pensare, disegnare, costruire e mettere in funzione lo strumento di indagine più sofisticato costruito dal genere umano: il Large Hadron Collider (Lhc) del Cern di Ginevra. L'acceleratore di particelle più potente al mondo progettato appunto per indagare i costituenti fondamentali della materia e comprendere le forze della natura che ne governano le interazioni e hanno creato l'universo in cui viviamo.
Raggiungere in laboratorio la frontiera dell'energia ci permette di ricreare lo stato di materia dell'universo primordiale fino a un millesimo di miliardesimo di secondo dal Big Bang e di ripercorrerne la storia all'indietro nel tempo. Due fasci di particelle – protoni o ioni (particelle o nuclei pesanti) – vengono accelerati da potenti campi elettromagnetici fino a raggiungere velocità prossime a quelle della luce nell'anello sotterraneo di

27 chilometri (a circa 100 metri di profondità) di Lhc, costruito con tecnologia d'avanguardia in continuo potenziamento. Migliaia di miliardi di protoni, guidati sulle loro orbite da magneti superconduttori ad alto campo collidono al centro di quattro giganteschi apparati sperimentali che ne rivelano e misurano i segnali prodotti dalle collisioni.
La sfida è raggiungere nella collisione un'energia ($E=mc^2$) tale da generare particelle massive in numero sufficiente da poterne studiare le loro caratteristiche: ad esempio "vedere" il bosone di Higgs, che ha la probabilità di essere formato in una collisione protone-protone una sola volta ogni mille miliardi di interazioni. In realtà, alle energie altissime raggiunte in Lhc, l'interazione avviene tra i costituenti fondamentali dei due protoni: i quark e i gluoni. Questo consente di studiare la composizione intima della materia sulla scala di un miliardesimo di miliardesimo di centimetro.
Un'altra importante conferma ottenuta con questi straordinari strumenti è che anche a queste scale (altissime energie ovvero piccolissime distanze) i costituenti fondamentali della materia sono i quark, da cui è formato il protone e tutti gli adroni, e i leptoni, come l'elettrone. A queste particelle cosiddette "di materia", si aggiungono i portatori delle forze fondamentali, come il fotone per la forza elettromagnetica, e i gluoni tramite i quali la forza forte confina i quark all'interno del protone.
I fasci di Lhc sono costituiti da alcune migliaia di "pacchetti" in cui i protoni sono raggruppati e che circolano in due tubi a vuoto (uno per fascio) circa dodicimila volte al secondo e si consumano nelle collisioni in una decina di ore, prima di essere scartati per poi estrarne di nuovi dal sistema di acceleratori di iniezione. Questo complesso altamente sincronizzato prende il via da una semplice, piccola bombola di idrogeno da cui i protoni vengono estratti e via via accelerati da anelli sempre più grandi, prima di essere iniettati in Lhc, dove raggiungeranno l'ultimo stadio di accelerazione (da 0 a 6,8 teraelettronvolt). Lhc ha il più grande sistema di vuoto al mondo e, in particolare, nel tubo in cui circolano i fasci si lavora con pressioni così rarefatte come solo si hanno sulla superficie della Luna – questo per impedire qualsiasi perturbazione al percorso delle particelle. Il vuoto inoltre è un buon isolante e permette di garantire il sistema di refrigerazione dell'elio superfluido a 1,9 kelvin (-271,3°C) necessario al funzionamento delle migliaia di magneti superconduttori che indirizzano le traiettorie dei fasci lungo l'anello. Lhc è infatti il più grande sistema criogenico del mondo, ed è con questa temperatura eccezionale addirittura più freddo dello spazio. Per la prima volta, dopo anni di studio e svariati prototipi, sono stati costruiti migliaia di magneti unici al mondo: i 1232 dipoli lunghi 15 metri che permettono di mantenere il fascio su una traiettoria curva, i 392 quadrupoli di 5-7 metri che mantengono compatte le particelle nel loro "pacchetto". Solo prima della collisione i fasci vengono "strizzati" per massimizzare la possibilità di collisione: sono come due aghi distanti 10 chilometri, che si devono attraversare a metà strada!
Ed è proprio attorno al punto di collisione che si sono costruiti i



b.
Schema delle macchine acceleratrici presenti e pianificate per il prossimo futuro al Cern di Ginevra. Il complesso di acceleratori del Large Hadron Collider (Lhc) porta i protoni all'energia massima di 7 TeV per fascio tramite una catena costituita da un acceleratore lineare (Linac4, fino a 160 MeV), da due anelli più piccoli, Proton Synchrotron Booster (fino a 2 GeV) e Proton Syncrotron (Ps, che accelera da 2 a 26 GeV), seguiti dal più grande Super Proton Syncrotron (Sps), in grado di iniettare un fascio da 450 GeV per l'accelerazione finale in Lhc. I possibili acceleratori per il futuro sono molto diversi tra loro: il Future Circular Collider (Fcc) sarebbe un ulteriore anello, lungo 100 km (rispetto ai 27 di Lhc), che riceve il fascio dalla catena di macchine esistenti per portarlo a qualche decina di TeV, mentre il Compact Linear Collider (Clic) sarebbe costituito da due macchine lineari, di lunghezza tra gli 11 e 50 km, a seconda dei tre possibili stadi di accelerazione a 380 GeV, 1,5 TeV e fino a 3 TeV.



c.
Vista dell'esperimento Cms senza i rivelatori "*endcap*" che coprono le due basi del cilindro che costituisce il rivelatore, disposto attorno alle camere da vuoto lungo cui corrono i fasci di protoni: dall'esterno verso l'interno sono visibili i grandi rivelatori per muoni, inframmezzati al ferro del ritorno del campo magnetico (settori rossi più esterni), il criostato del magnete superconduttore, all'interno del quale si trovano i calorimetri (adronico ed elettromagnetico), e i tracciatori al silicio (cilindro più sporgente interno).

giganteschi apparati sperimentali: Atlas, più alto di un palazzo di sei piani e Cms, con il magnete solenoide più grande al mondo, costruito dall'Italia (vd. fig. c), hanno scoperto prima e continuano a studiare le proprietà del bosone di Higgs. L'esperimento Alice è invece dedicato allo studio del plasma di quark e gluoni della materia primordiale, mentre Lhcb è specializzato a capire le anomalie dei quark più pesanti. Tutti i principali esperimenti stanno ora completando il rinnovo dei loro apparati sperimentali, per adattarsi all'incremento delle prestazioni dell'acceleratore (la cosiddetta "luminosità") grazie alle recenti modifiche e miglioramenti apportati a Lhc. Ciascun esperimento tratta milioni di segnali da rivelatori sofisticati che permettono di rivelare le traiettorie, misurare l'energia e così ricostruire la particolare "firma" lasciata dagli eventi rarissimi che si producono nelle collisioni. Ciascun esperimento ha sviluppato tecniche innovative di rivelazione e di ricostruzione ed elaborazione dei dati, sfruttando una rete mondiale di calcolo senza precedenti. Gli innumerevoli risultati, frutto del lavoro di migliaia di persone, sono pubblicati in migliaia di articoli e hanno permesso di crescere scienziati che hanno applicato queste tecnologie alla medicina, ai beni culturali, alla nostra società.
Oggi e ancora per molti anni a venire Lhc resta il più potente acceleratore di particelle esistente al mondo, in attesa della prossima generazione di macchine che consentirà di lanciare la sfida al modello standard, cercando deviazioni inaspettate che segnalino nuovi fenomeni e nuove particelle, come l'anello lungo 100 km del progetto Fcc o il nuovo concetto del collisore lineare (Clic, vd. p. 13, ndr). Sarebbe ancora più straordinario riuscire a far collidere per la prima volta particelle massive e instabili come i muoni che permetterebbero di aprire nuovi scenari di scoperta, consentendo al contempo misure di altissima precisione. Le idee e la tecnologia per realizzarle sono in continuo sviluppo in questo campo di ricerca!
Lhc è quindi uno straordinario microscopio per studiare l'infinitesimamente piccolo e al tempo stesso un telescopio per capire il passato dell'universo e la sua evoluzione. Lhc contribuisce davvero a ricreare in laboratorio le condizioni dei primi istanti di vita dell'universo: come scrisse Milla Baldo Ceolin nel 1991, "è un nuovo modo di guardare il cielo, si porta il cielo in laboratorio".

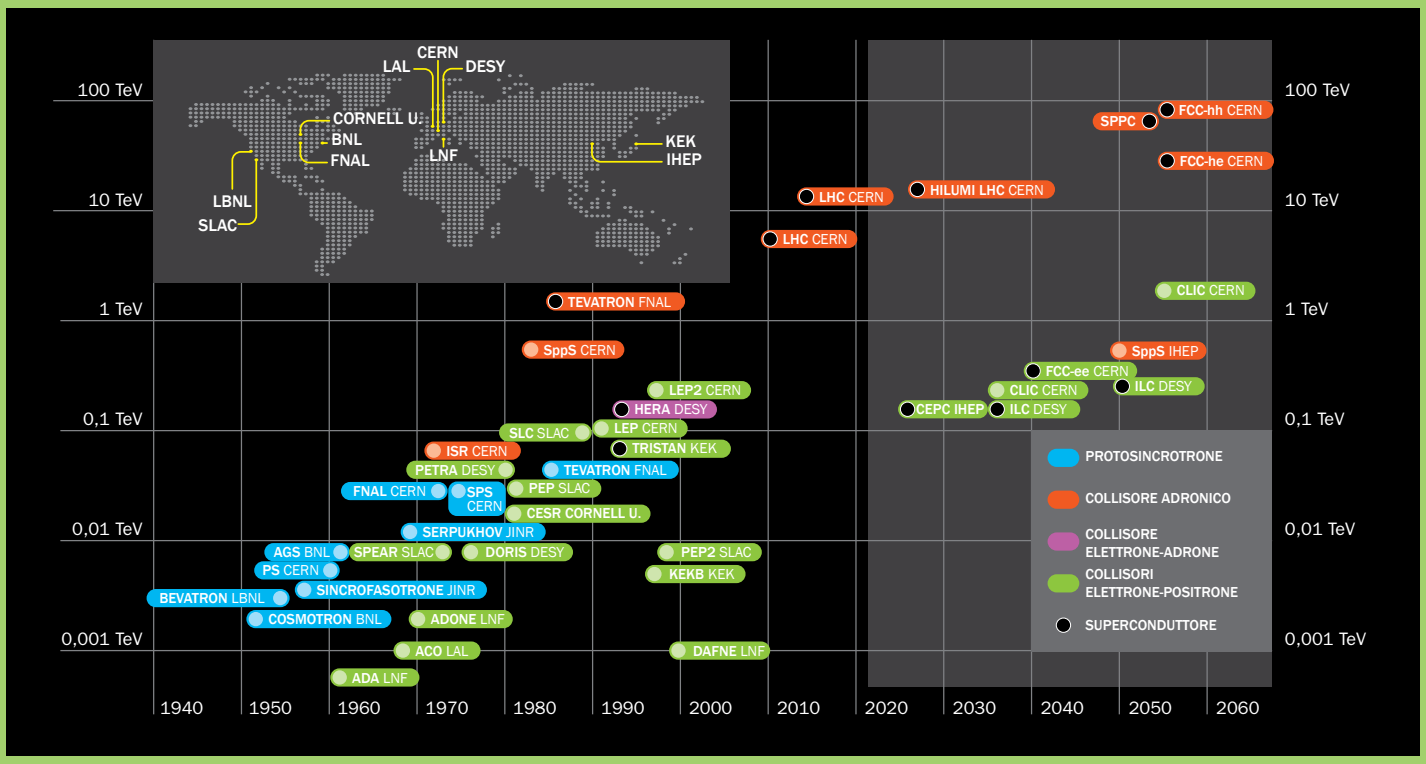
Biografia
Nadia Pastrone è dirigente di ricerca alla sezione Infn di Torino. Dal 2001 lavora all'esperimento Cms a Lhc e alla preparazione della nuova fase ad alta intensità. Partecipa agli studi internazionali per il disegno del nuovo collisore a muoni ad alta energia.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.2

Megamacchine per il microcosmo

Gli acceleratori del futuro

di Lucio Rossi



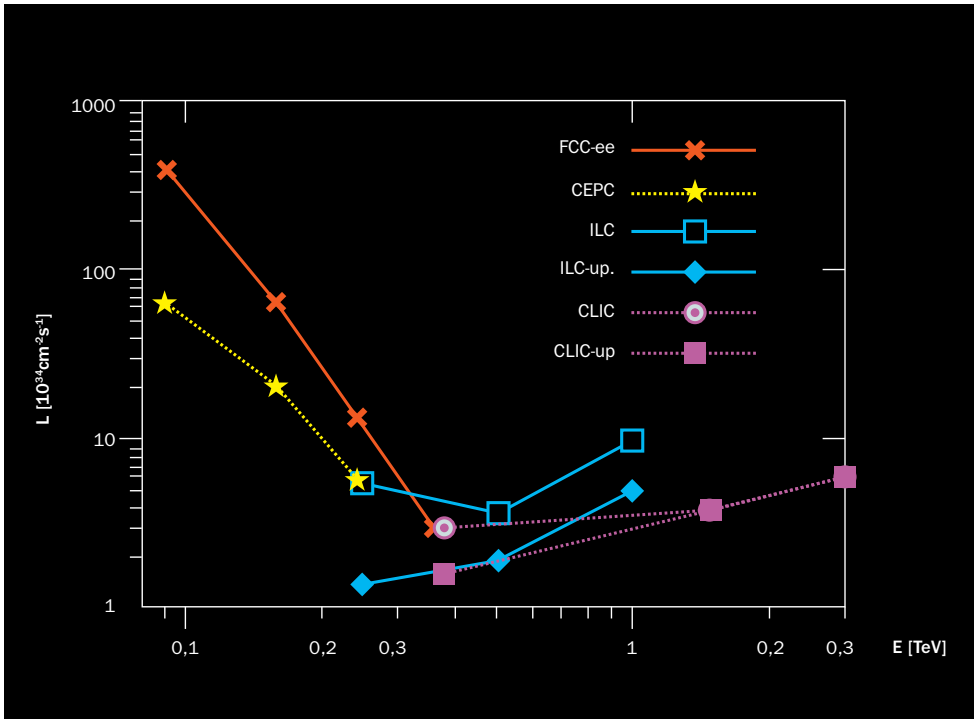
Da sempre gli acceleratori si caratterizzano per l'energia (o meglio il momento o quantità di moto) delle particelle accelerate: più l'energia è elevata e più la luce che illumina l'infinitamente piccolo è fine e ci permette di vedere dettagli sempre più strabilianti. Grazie alle energie di 13 TeV nelle collisioni protone-protone di Lhc (vd. p. 10, ndr.) gli esperimenti Atlas e Cms hanno stabilito che i quark sono puntiformi al meglio della decina di zeptometri (circa 10^{-20} m). Come riferimento, si tratta di un'energia pari a milioni di volte quella che tiene insieme i protoni all'interno del nucleo di un atomo, e di una lunghezza circa 100.000 volte più piccola delle dimensioni di un protone. Tuttavia, per "vedere" non basta avere una luce di lunghezza d'onda adeguata: ci vuole anche "abbastanza" luce. Insomma, dopo l'energia, "l'intensità" del fascio è il secondo parametro fondamentale per un acceleratore, che in un collisore si traduce in "luminosità", la grandezza che esprime il numero di eventi che si possono osservare in un secondo per un dato tipo di evento.
Uno degli scopi primari degli acceleratori di particelle rimane dunque quello di esplorare nuovi territori con energie sempre più elevate. Un grafico che mostra l'evoluzione storica dell'energia ottenuta negli acceleratori (una versione rivisitata del famoso "grafico di Livingston") è riportato in fig. a.

a.
Evoluzione degli acceleratori nel tempo. Gli acceleratori circolari per adroni (protoni o ioni) superano quelli in cui vengono accelerate particelle più leggere (i leptoni: elettroni e, in futuro, muoni), perché le particelle più pesanti non perdono quasi energia per radiazione, quando percorrono una traiettoria curva, e quindi l'energia ottenibile è data dalla semplice relazione, valida in condizioni relativistiche, E (espressa in GeV) ≈ 0,3Bρ, dove B è il campo dei dipoli magnetici (in Tesla) che guida le particelle cariche lungo la traiettoria e ρ è il raggio di curvatura (in metri). I collisori circolari, inoltre, grazie al fatto che gli stessi fasci si scontrano moltissime volte, raggiungono luminosità elevate sia in assoluto, sia in rapporto alla potenza dissipata. Oggi Lhc detiene il record di energia e luminosità, ma nei prossimi anni, anche dopo la prossima fase ad alta luminosità, di Hilumi Lhc, già in fase di realizzazione, per guadagnare significativamente occorrerà avanzare su due diversi fronti, che rappresentano entrambi delle formidabili sfide.

b.
Prototipo di lunghezza ridotta dei dipoli superconduttori necessari ad aumentare la luminosità di Lhc (Lhc Hilumi), durante la fase di test presso la Asg Superconductors (Genova). I nuovi dipoli saranno realizzati con un nuovo materiale, il niobio3-stagno, mai impiegato finora nella costruzione di acceleratori, ma che permette di raggiungere una corrente elettrica, e dunque un campo magnetico, più intensi rispetto alla lega niobio-titanio finora utilizzata.

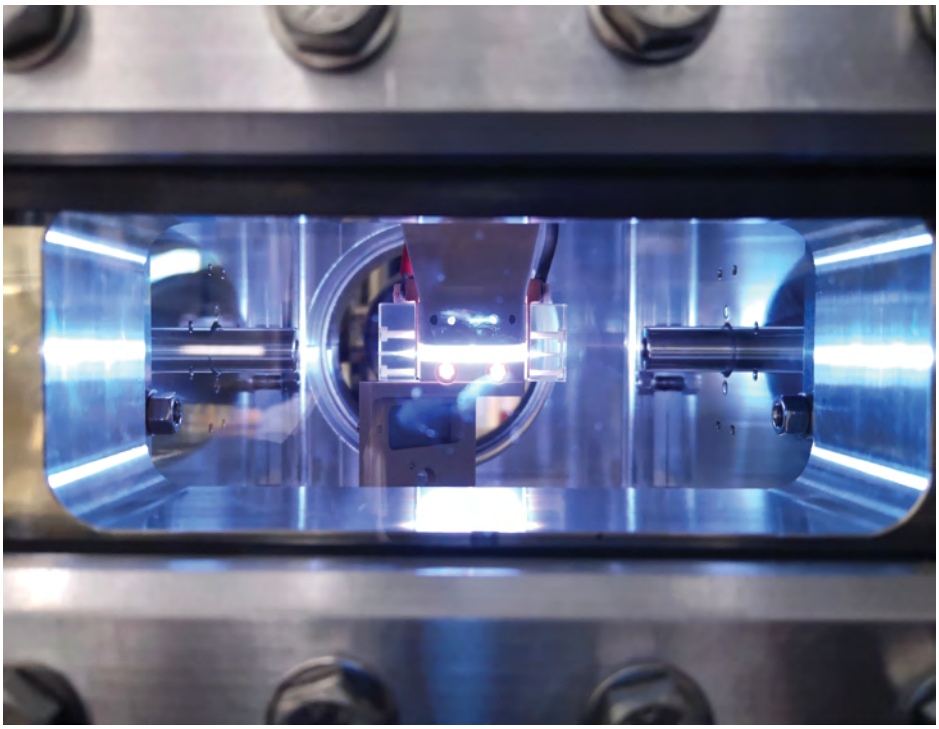
La prima, più ovvia possibilità è quella di aumentare il raggio effettivo dell'acceleratore. Con il Future Circular Collider (Fcc), il Cern propone di scavare un anello sotterraneo (a 400 m di profondità) di 100 km, quasi quattro volte più lungo rispetto a Lhc. Il problema è nei costi di costruzione ma anche nel gigantismo della infrastruttura e nella complessità della logistica: il Cern dovrebbe far nascere perlomeno un nuovo grosso terzo sito a circa 40-50 km dai due siti principali attuali a Meyrin (Svizzera) e Prevessin (Francia), distanti tra loro 2 km.
L'alternativa all'uso della forza bruta del gigantismo è di migliorare il cuore dello strumento. Fcc-hh (dove "hh" indica collisioni adroniche, protoni o ioni) mira a raddoppiare il campo dei dipoli di Lhc, da 8,3 tesla a 16 tesla. Se sono occorsi 20 anni perché piccoli dimostratori di 11-13 tesla si tramutassero in magneti producibili in serie per Hilumi, la frontiera dei 15-16 tesla per Fcc richiederà ancora una lunga fase di ricerca e sviluppo. Questo ha (re)spinto l'opzione Fcc-hh verso il 2050/60, invece del 2040, come inizialmente ipotizzato solo nel 2019. La frontiera dell'energia diventa quindi una montagna sempre più ardua da scalare ma... le sfide difficili sono le più interessanti!
Ma qual è l'energia "giusta" per tentare di scoprire nuova fisica con una macchina adronica come Fcc-hh? La strategia è quella di puntare, dopo Hilumi Lhc, su un collisore leptonico di tipo elettrone-positrone. I grandi progetti studiati negli ultimi vent'anni sono collisori leptonici lineari, Ilc e Clic, per il problema dell'enorme potenza persa per radiazione di sincrotrone. Questi progetti sono stati rimodulati a energie più basse, sia a causa dei costi, sia considerando il valore relativamente piccolo della massa dell'Higgs (125 GeV). Per esempio, nel caso di Ilc, anche iniziando con luminosità 10 volte inferiori a quella di Hilumi di 250 GeV, grazie alla "pulizia" dello scontro particella-antiparticella, si potrebbero esplorare possibili anomalie del modello standard. Limitandosi alle energie non troppo elevate di 250 GeV (*Higgs factory*) o 350 GeV (*Higgs-top*) rientra in gioco anche la possibilità di un collisore leptonico circolare, chiamato Fcc-ee. Nonostante l'enorme perdita per radiazione, una macchina di questo tipo terrebbe testa ai collisori lineari fino a 350 GeV, mentre a energie inferiori sarebbe una straordinaria "fabbrica" di particelle elettrodeboli *(EW factory)*, consentendo una moltitudine di studi di precisione e la ricerca di fenomeni rari.
In fig. c la luminosità in funzione dell'energia per i diversi collisori leptonici dimostra il vantaggio dell'opzione lineare rispetto alle macchine circolari oltre i 350 GeV. Il tunnel di Fcc sarebbe di 100 km, più costoso di quello per Ilc o Clic (15-30 km a seconda delle versioni), ma tunnel e infrastruttura criogenica potrebbero essere poi re-utilizzati per Fcc-hh riducendone il costo marginale e ripetendo lo schema virtuoso Lep/Lhc: un grande investimento ma graduale e sostenibile. Fcc diventerebbe così lo strumento completo: interazioni leptoniche, adroniche e adro-leptoniche.
Complementare alla frontiera dell'energia è quella dell'intensità: fasci sempre più intensi di protoni sono per esempio necessari per generare neutrini e raccogliere la promessa di nuova fisica che il loro studio potrebbe contenere. Si richiedono fasci con alte intensità a diverse energie, che possono sintetizzarsi in una potenza (prodotto tra energia e intensità) media di fascio di 1 MW od oltre. A differenza della frontiera in energia, in questo caso gli acceleratori lineari non sono sfavoriti rispetto ai circolari. Mentre il Kek con J-Parc ha puntato su un sincrotrone resistivo rapidamente pulsato per Superkamiokande, il Fermilab ha recentemente deciso di puntare su un lineare superconduttivo da

800 MeV, PipII, per aumentare l'intensità dei fasci per la *long baseline* degli esperimenti sui neutrini. Linac per protoni ad alta intensità, di circa 1 GeV, sono in uso anche per generazione di neutroni per spallazione, la Spallation Neutron Source (Sns) in Usa e la European Spallation Source (Ess) in Europa (a Lunde, Svezia), sempre in competizione con il sincrotrone da 50 GeV di J-Parc.
È possibile evitare il gigantismo dei futuri acceleratori circolari, come Fcc, o gli spaventosi consumi di energia di un Linac a elettroni-positroni? In realtà, nuove frontiere si stanno aprendo, seguendo due idee molto originali, ma estremamente difficili da realizzare. Una prima possibilità è quella di un collisore di muoni. Una macchina di questo tipo sembrerebbe essere la quadratura del cerchio: da una parte vengono accelerati leptoni – generando così collisioni molto pulite – e dall'altra si utilizzano particelle abbastanza pesanti da abbattere significativamente la perdita per radiazione, permettendo così di usare lo schema del collisore circolare, dove la luminosità e qualità di fascio sono più facili da ottenere.
L'idea di un *muon collider*, che circola da oltre vent'anni, ha recentemente ripreso quota come "*Higgs factory* a buon mercato" (proposta da Carlo Rubbia) per il settore di precisione o addirittura come alternativa a Fcc-hh per la frontiera in energia. In linea di principio si possono raggiungere circa 10 TeV con dimensioni delle decine di chilometri (10 TeV "leptonici" sono circa equivalenti a 100 TeV adronici). L'estrema difficoltà di questo schema risiede nel meccanismo di produzione dei muoni: questi vengono infatti generati "caldissimi" nelle collisioni di un fascio con un bersaglio, ovvero come una "nuvola" di particelle diffuse in tutte le direzioni. Occorre quindi raffreddarli, e molto rapidamente (nei pochi microsecondi della loro vita!). Questo è difficile ma possibile con tecniche molto sofisticate. Recentemente, un gruppo italiano ha proposto uno schema diverso (chiamato Lemma), in cui i muoni vengono generati già "freddi" nell'annichilazione di elettroni e positroni in coppie di muone-antimuone. Per ora le intensità sono sulla carta ancora troppo basse ma, se migliorato, il sistema potrebbe rappresentare un'autentica svolta. Uno schema alternativo, ancora più innovativo e sempre proposto in Italia, si basa invece su fasci di muoni eccezionalmente freddi generati in collisioni elettrone-fotone, tutto da sviluppare!



c.
La luminosità, grandezza proporzionale al numero di collisioni al secondo, in funzione dell'energia nel centro di massa per vari collisori leptonici.

Un'ulteriore idea, anche questa prepotentemente emersa negli ultimi anni, si fonda sul fenomeno delle onde di plasma (ovvero oscillazioni di densità di carica in un gas completamente ionizzato), che possono generare campi elettrici di centinaia di GV/m, cioè tali da far impallidire qualsiasi cavità convenzionale a radiofrequenza. Negli ultimi dieci anni si è dimostrato che possono essere effettivamente utilizzate per accelerare fasci di particelle, anche ben oltre il GeV, polarizzando il plasma o con impulsi ultra-brevi di potentissimi laser o utilizzando fasci di particelle (tipicamente elettroni). Quest'ultima è in particolare la tecnologia scelta dai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn dove, nell'ambito del progetto Eupraxia, si sta costruendo un'infrastruttura di classe mondiale, dedicata allo sviluppo di questa tecnologia. Si tratta di una grande sfida che coinvolge dinamica dei fasci, tecnologia degli acceleratori e progettazione di sistema. Queste ricerche alla frontiera dell'energia, della precisione e dell'intensità inducono innovazione tecnologica che non serve solo per la fisica fondamentale, per le nuove scoperte che sperabilmente gli acceleratori ci porteranno. Se solo un centinaio di acceleratori oggi è operativo nei vari laboratori di fisica fondamentale, particellare o nucleare, sono invece oltre 30.000 gli acceleratori funzionanti per tanti altri scopi applicativi: dal medicale all'industria metallurgica, dall'energia ai beni culturali. Gli acceleratori sono infatti strumenti fondamentali non solo della conoscenza ma anche del nostro benessere.



d.
Plasma prodotto all'interno di un sottile e lungo volume di idrogeno gassoso rarefatto, in un capillare di plastica, da un pacchetto di elettroni (detto "pilota") prodotto dall'acceleratore lineare a Sparc-lab, l'infrastruttura dedicata a questa innovativa tecnica presso i Laboratori di Frascati. L'intenso campo elettrico prodotto all'interno del plasma è in grado di aumentare l'energia dei pacchetti di elettroni che seguono, a breve distanza, il pacchetto pilota, dimostrando quindi la possibilità di realizzare, per la prossima generazione di acceleratori, macchine estremamente compatte. Questo è in particolare l'obiettivo del progetto Eupraxia.

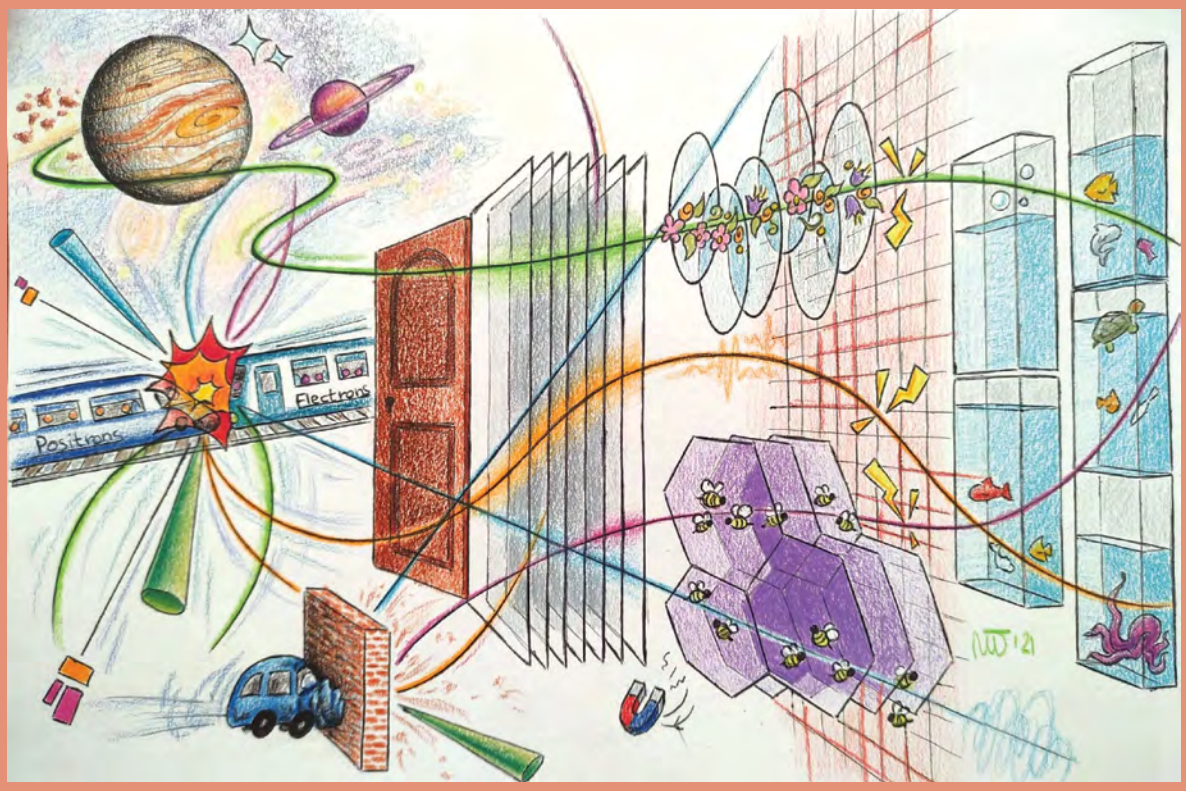
Biografia
Lucio Rossi è professore del Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano dal 1992. Esperto nel settore della superconduttività per acceleratori e rivelatori, dal 2001 al 2020 è stato al Cern di Ginevra, dove ha diretto ila ricerca sui superconduttori e i magneti per il progetto Lhc. Nel 2010, e fino al 2020, ha fondato e diretto High Luminosity Lhc. Da ottobre 2020 ha ripreso l'insegnamento e la ricerca all'Università di Milano, continuando con l'Infn gli studi per futuri collisori e per acceleratori per l'adroterapia.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.3

Disegnare percorsi invisibili

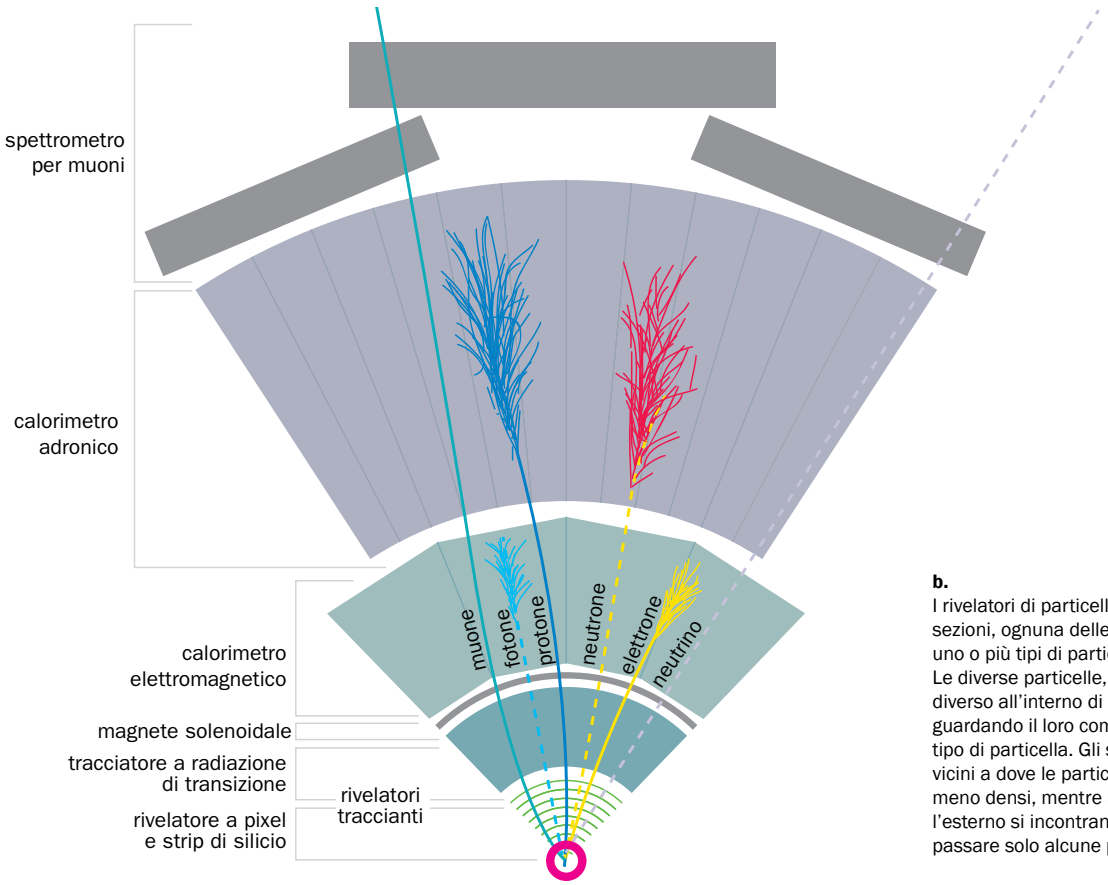
I tracciatori di particelle

di Nicolò Cartiglia



Come si può studiare il comportamento di particelle piccolissime, che si muovono a velocità altissime, spesso prossime a quelle della luce? Un primo modo è quello di vederne le traiettorie sfruttando alcuni processi fisici della materia.
Tra i vari tipi di rivelatori di particelle esistenti, i "tracciatori" sono quelli che hanno il compito di ricostruire il percorso compiuto dalle particelle cariche. Un compito semplice solo in apparenza, poiché si richiede di farlo con ottima precisione e senza alterare le proprietà cinematiche delle particelle.
Il tracciatore ideale ricostruisce il percorso di migliaia di particelle con una precisione spaziale di alcuni micrometri e con una precisione temporale di alcune decine di picosecondi, è sostanzialmente immateriale e richiede poca potenza elettrica per evitare problemi di raffreddamento. Il livello di complessità, in alcune applicazioni, è ulteriormente aumentato dalla richiesta di fare tutto questo decine di milioni di volte ogni secondo. In realtà, queste condizioni così estreme sono presenti solo in alcuni esperimenti particolarmente complessi, come ad esempio in Hilumi-Lhc. A seconda delle applicazioni, si hanno strumenti all'avanguardia per quanto riguarda la sensoristica, l'elettronica, il software di ricostruzione e le tecniche di raffreddamento.

a.
I tracciatori ricostruiscono il percorso delle particelle cariche. Le particelle possono essere create in molti processi, tra cui attività nucleari, collisioni tra fasci, e in esperimenti a bersaglio fisso. Illustrazione artistica ad opera di Marta Tornago.

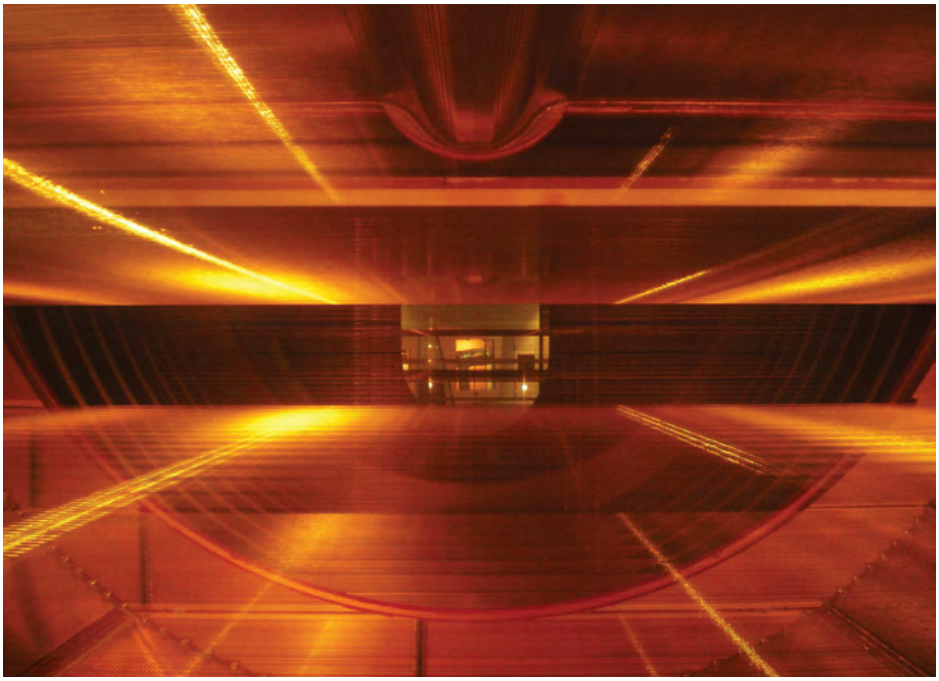


b.
I rivelatori di particelle sono costituiti da diverse sezioni, ognuna delle quali consente di distinguere uno o più tipi di particelle e di misurarne le proprietà. Le diverse particelle, infatti, interagiscono in modo diverso all'interno di ogni sezione del rivelatore e, guardando il loro comportamento, si può risalire al tipo di particella. Gli strati più interni del rivelatore, vicini a dove le particelle vengono generate, sono meno densi, mentre man mano che si va verso l'esterno si incontrano strati più densi che lasciano passare solo alcune particelle.

Il processo fisico alla base del funzionamento dei tracciatori è la ionizzazione. In questo processo, la particella incidente estrae degli elettroni dagli atomi del materiale, creando elettroni liberi e ioni positivi. I primi tracciatori, dalle camere a nebbia degli anni '30 alla Big European Bubble Chamber (1973-1984) del Cern, sfruttavano l'energia depositata dalla particella per visualizzarne il percorso. Il materiale attivo, un gas o un liquido, era tenuto in uno stato termodinamico tale per cui il passaggio di una particella creava una serie di piccole bollicine che consentivano di ricostruirne la traiettoria. Due premi Nobel hanno onorato lo sviluppo di questi tracciatori: quello a Charles Thomson Rees Wilson, nel 1927, per le camere a nebbia, e quello a Donald Arthur Glaser, nel 1960, per le camere a bolle. Nel periodo 1920-1930 la fisica viennese Marietta Blau introdusse l'uso delle emulsioni nucleari, nel caso specifico per la rivelazione di raggi cosmici, e, per prima, nel 1937 visualizzò urti nucleari. Sebbene sia stata candidata più volte al premio Nobel, questo onore non le venne mai conferito. Le emulsioni nucleari detengono ancora il primato per la precisione che consentono di ottenere – inferiore al micron – e vengono utilizzate ancora oggi, ad esempio nell'esperimento Opera dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (vd. anche p. 40, ndr).
Se i tracciatori sono posizionati in un campo magnetico, si possono misurare anche la carica e l'impulso (o quantità di moto) delle particelle, perché il moto diventa una traiettoria elicoidale con un raggio proporzionale alla loro velocità, mentre la direzione della deflessione dipende dal segno della carica.

I tracciatori a gas riescono anche a distinguere particelle differenti, per esempio a identificare pioni, kaoni, elettroni e protoni, misurando la quantità di energia rilasciata per unità di lunghezza (vd. p. 20, ndr).
La fine degli anni '60 vide una rivoluzione nel principio di funzionamento dei tracciatori: il passaggio delle particelle non veniva più visualizzato con bollicine o tracce in emulsioni nucleari, ma misurato elettricamente (vd. p. 22, ndr). Questa seconda generazione di rivelatori impiega, come mezzo di rivelazione, dei gas e forti campi elettrici per far muovere le coppie elettrone/ione prodotte dal passaggio della particella. Nel volume occupato dal gas sono posizionati una moltitudine di fili metallici, che, equipaggiati con circuiti elettrici, misurano il segnale in corrente generato dal moto di elettroni e ioni. La successione spaziale dei segnali nei fili indica la traiettoria. La fig. c mostra la camera a fili dell'esperimento Ua1, usata nella scoperta dei bosoni Z^0, W^+ e W^- (che è valsa il premio Nobel a Carlo Rubbia nel 1984). Proposta nel 1968 da Georges Charpak (insignito nel 1992 del premio Nobel), la Multi-Wire Proportional Chamber (Mwpc) segna l'inizio di questa rivoluzione. Da allora, lo sviluppo di nuovi rivelatori a gas non si è mai fermato: la Time Projection Chamber nel 1974 (da parte di David Nygren), la Resistive Plate Chamber nel 1981 (Rinaldo Santonico, Roberto Cardarelli), la MicroStrip Gas Chamber nel 1988 (Anton Oed), i Gas Electron Multipliers nel 1997 (Fabio Sauli), le MicroMegas nel 1996 (Ioannis Yannis Giomataris e altri colleghi a Saclay) e l'evoluzione delle MicroMegas. L'introduzione delle Mwpc portò una serie di vantaggi che rivoluzionarono gli

esperimenti di fisica: in particolare, la frequenza di acquisizione passò da alcuni hertz a parecchi kilohertz, si riuscì a selezionare quali eventi registrare, e gli eventi si registrarono direttamente in forma elettronica e non visiva, permettendo un'analisi dati fatta al calcolatore.
Contemporaneamente alla dismissione delle camere a bolle (l'ultima in operazione al Cern fu spenta nel 1985) e allo sviluppo dei rivelatori a gas, all'inizio degli anni '80 avvenne una seconda rivoluzione nel campo dei tracciatori: l'introduzione dei rivelatori al silicio. Questi sensori sono costruiti usando strati sottili di silicio (chiamati *wafer*), di circa 300 micrometri (μm), sui quali sono impiantati diodi di varie geometrie. Applicando ai diodi una tensione inversa di polarizzazione, il sensore si svuota dalle cariche libere e diventa una camera a ionizzazione a stato solido. La precisione spaziale dei tracciatori al silicio può essere anche inferiore ai 10 μm, a seconda della geometria dei diodi. Il primo esperimento a usare un tracciatore con piani di strip di silicio fu nel 1981 Na11/Na32.
Nei rivelatori al silicio il segnale generato dalla particella incidente è piccolo, circa un femtocoulomb (10^{-15} coulomb) per ogni 100 μm di spessore, qualcosa come appena 6000 elettroni, e pertanto l'elettronica di lettura deve avere rumore elettronico molto basso affinché il segnale si distingua chiaramente dal fondo. Per questa ragione, lo sviluppo dei rivelatori al silicio va di pari passo con lo sviluppo della loro elettronica di lettura. Dato il grande numero di diodi da leggere, sin dall'inizio degli anni '80 si capì che il modo naturale di leggere i sensori al silicio era mediante l'utilizzo di circuiti integrati in tecnologia Very Large Scale Integration (Vlsi) disegnati espressamente per questo scopo. La libertà nel disegno della forma dei diodi e la capacità di disegnare elettronica Vlsi portarono nel 1984 all'introduzione del concetto di sensore a pixel, dove una matrice di diodi è connessa a una equivalente matrice di canali elettronici di lettura attraverso delle palline conduttive (*bump-bonds*).
Dagli anni '80 a oggi, l'evoluzione dei tracciatori a semiconduttore non ha avuto pausa, passando dai 45 cm^2 del rivelatore di Na11 ai 214 m^2 del tracciatore di Cms.
Sfruttando la somiglianza nel processo costruttivo dei sensori e dell'elettronica, negli ultimi anni si sono imposti rivelatori al silicio monolitici Maps (Monolithic Active Pixel Sensor), nei quali il sensore e l'elettronica condividono lo stesso substrato. Questa tecnica semplifica la costruzione del rivelatore e permette il disegno di pixel molto piccoli, raggiungendo precisioni spaziali eccezionali. Il rivelatore Maps di Alice, il più grande del suo genere, 10 m^2, raggiunge una precisione spaziale di circa 5 μm.
Negli anni 2013-2014, un'importante innovazione venne introdotta nel campo dei rivelatori al silicio: la possibilità di misurare non solo la posizione ma anche il tempo di passaggio di una particella: è il cosiddetto "tracciamento a 4 dimensioni". Grazie all'introduzione del concetto di diodo a basso guadagno e all'evoluzione del disegno dei rivelatori, i sensori al silicio sono passati da essere considerati rivelatori con una pessima risoluzione temporale a essere gli unici rivelatori ritenuti adatti al tracciamento a 4D. Praticamente tutti i tracciatori al silicio proposti per i prossimi esperimenti includono qualche forma di tracciamento a 4D, i più complessi auspicano una precisione combinata di 5 μm e 10 picosecondi.
Come molte volte in passato, le richieste dei futuri esperimenti di avere rivelatori sempre più precisi sembrano di difficile realizzazione. Tuttavia, il passato ci ha insegnato che nuove idee unite all'innovazione tecnologica permettono di raggiungere risultati insperati. I prossimi anni di ricerca nel campo dei rivelatori a 4D si preannunciano interessantissimi: il talento dei giovani ricercatori e la tradizione decennale nell'arte dei rivelatori si fonderanno per dare forma a nuove idee.



c.
La camera a fili dell'esperimento Ua1.

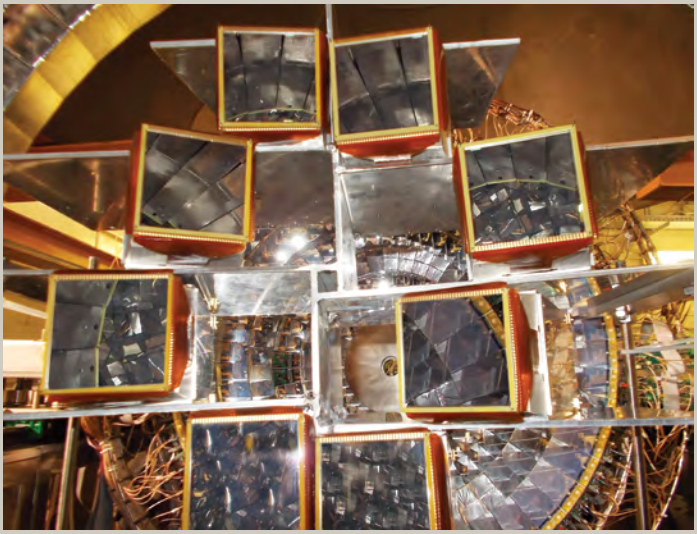
Biografia
Nicolò Cartiglia è ricercatore all'Infn presso la sezione di Torino e *visiting professor* all'Università della California. Ha lavorato in esperimenti a Desy (Amburgo), Bnl (NY) e al Cern (Ginevra). Per i suoi studi nel campo dei tracciatori al silicio ha ricevuto finanziamenti nazionali e internazionali, tra cui un Prin e un Erc Advanced Grant.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.4

Particelle in cerca di identità

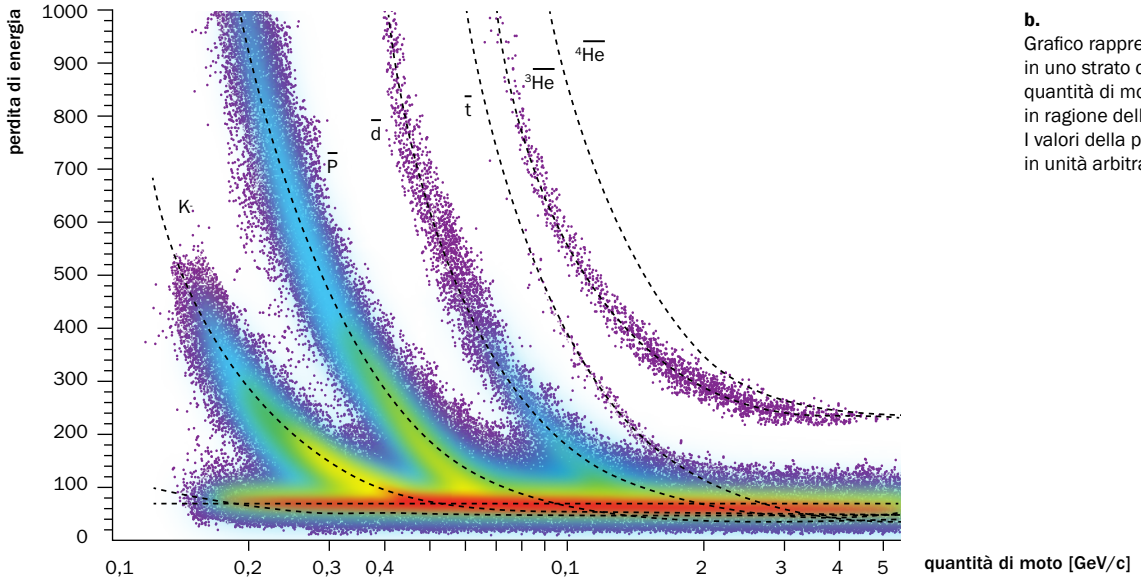
Metodi per identificare le particelle

di Sara Pirrone e Giuseppe Politi



a.
Foto di alcuni moduli dell'apparato Farcos, un rivelatore basato sull'utilizzo simultaneo di varie tecniche di identificazione, montati presso i Laboratori Nazionali del Sud. Farcos viene utilizzato per lo studio di reazioni nucleari fra ioni pesanti alle energie intermedie. È un rivelatore modulare, costituito da vari telescopi, ognuno con due rivelatori a silicio di diverso spessore (300 μm e 1500 μm), seguiti da rivelatori a scintillazione, con i quali è possibile applicare le tecniche di perdita di energia, tempo di volo e analisi in forma.

Non esistono strumenti ottici che ci consentono di "vedere" nuclei e particelle e il loro studio avviene quindi sempre in maniera indiretta, per esempio osservando le collisioni nucleari in cui particelle e nuclei sono prodotti. Per far questo abbiamo bisogno di acceleratori (vd. p. 13, ndr) e rivelatori di particelle.
I rivelatori ci permettono sia di catturare, e quindi contare, tutte le particelle emesse nella reazione, sia di misurarne, in vario modo, energia, velocità e quantità di moto. A tale scopo le particelle interagiscono con opportune sostanze in vari stati fisici (solido, liquido, gassoso), producendovi segnali di vario genere (fotoni, elettroni, ioni, lacune) che vengono poi tradotti in segnali elettrici legati all'energia, totale o parziale, rilasciata nella sostanza. L'interazione permette anche di tracciare le traiettorie percorse dalle particelle cariche (vd. p. 17, ndr), per ricostruire il cammino che hanno compiuto dall'istante in cui sono state prodotte sino alla loro rivelazione, e per misurare il raggio di curvatura in un eventuale campo magnetico appositamente generato nella regione attraversata.
La misura di tali grandezze specifiche delle particelle permette quindi di identificarle e dare loro un'identità, individuandone la carica e la massa. Per identificare le particelle esistono diverse tecniche, sviluppate e affinate nel corso degli anni, per ottenere informazioni sempre più precise. Queste tecniche sono fortemente dipendenti dalla reazione analizzata e permettono di identificare diverse classi di particelle e in differenti intervalli energetici. Per questo distinguiamo tecniche specifiche delle energie basse e intermedie o delle alte energie.
Una prima tecnica è quella della perdita di energia, che si ottiene utilizzando un rivelatore di spessore noto in cui la particella perda solo una parte della sua energia. Questa perdita di energia è una quantità misurabile e dipende dalla carica al quadrato e dalla massa. Incrociando questa informazione con l'energia delle particelle o la quantità di moto è possibile distinguere, entro certi limiti, i vari nuclei in funzione del loro numero atomico nel primo caso e le particelle subatomiche con carica unitaria in ragione della loro massa nel secondo.



b.
Grafico rappresentante la perdita di energia in uno strato di rivelatore in funzione della quantità di moto per varie particelle, distinte in ragione della loro massa e carica crescente. I valori della perdita d'energia sono espressi in unità arbitrarie.

La tecnica del tempo di volo, invece, si basa sulla possibilità che i sistemi di rivelazione hanno di fornire gli istanti di passaggio delle particelle in due punti definiti delle loro traiettorie, la cui differenza costituisce il cosiddetto "tempo di volo". La misura di questo intervallo di tempo fornisce, nota la lunghezza della traiettoria percorsa, la misura diretta della velocità, che permette poi di risalire alla massa della particella, partendo dalla relazione cinematica con l'energia cinetica o con la quantità di moto, misurate separatamente da altri rivelatori. Anche in questo caso, quindi, è possibile distinguere i vari nuclei e le particelle subatomiche in funzione della loro massa.
La misura del tempo di volo permette anche di distinguere in alcuni casi i fotoni gamma, che procedono alla velocità della luce, dai neutroni, che hanno invece una minore velocità.
Un altro fenomeno di interazione delle particelle con la materia, utilizzato nei processi identificativi, è quello che avviene nei cosiddetti scintillatori. In queste sostanze l'energia rilasciata dalle particelle si trasforma in un segnale di luce, la cui forma, per particolari scintillatori, dipende dalla carica e dalla massa della particella rivelata. Studiando la forma dei segnali come, ad esempio, il rapporto tra la loro parte rapida e quella lenta, è quindi possibile separare protoni, deutoni e trizio (gli isotopi dell'idrogeno), oltreché gli altri elementi leggeri (elio, litio, ecc), oppure è possibile discriminare i neutroni dai fotoni gamma o dalle particelle cariche leggere.
Questo metodo di identificazione è applicabile in casi particolari anche a rivelatori di tipo semiconduttore, come il silicio: il segnale elettrico da questo generato avrà infatti una forma, in termini di corrente massima e tempo di formazione, fortemente dipendente da massa e soprattutto carica del nucleo rivelato, dato che tali grandezze influenzano la traccia di energia rilasciata dentro il materiale durante la rivelazione.
L'identificazione di particelle può essere effettuata anche utilizzando il meccanismo di produzione di luce che si manifesta in particolari materiali trasparenti quando una particella carica li attraversa con una velocità superiore a quella che avrebbe in essi la luce. Il risultato è analogo al *bang* supersonico, in cui un oggetto, muovendosi più veloce delle onde sonore, produce dietro di sé un cono di sovrapposizione delle onde stesse che ha come effetto una udibile deflagrazione. In questo caso si produce un cono di luce, detto di Cherenkov, la cui apertura angolare è direttamente legata alla velocità della particella. Poiché quest'ultima, a parità di quantità di moto, varia in funzione della massa, riportando l'angolo di emissione misurato da appositi rivelatori in funzione della quantità di moto è possibile discriminare particelle subatomiche con massa differente.
Quelle qui illustrate ovviamente sono solo alcune delle tecniche possibili. Spesso più tecniche sono applicate in maniera complementare o incrociata per poter avere il maggior numero di informazioni. Ognuna, infatti, ha i suoi limiti di utilizzazione e di precisione e viene implementata negli apparati in funzione degli obiettivi dell'esperimento che si deve realizzare.

Biografia
Sara Pirrone è dirigente di ricerca dell'Infn e svolge la sua attività presso la sezione di Catania. La sua ricerca si sviluppa nell'ambito della fisica nucleare delle energie basse e intermedie e in particolare si occupa dello studio della dinamica delle reazioni nucleari. È responsabile nazionale dell'esperimento Chirone dell'Infn. È consigliera della Società Italiana di Fisica.

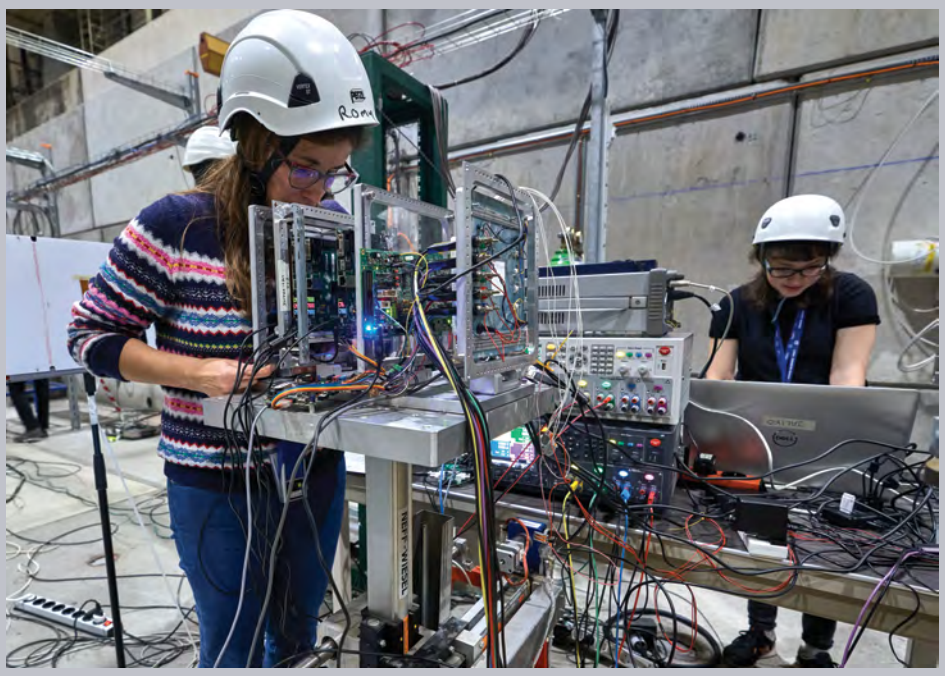
Giuseppe Politi è professore associato di fisica sperimentale presso l'Università degli Studi di Catania. Come associato alla sezione Infn di Catania conduce la sua attività di ricerca nel campo della fisica nucleare delle energie basse e intermedie, occupandosi di varie tematiche quali la dinamica delle reazioni, gli effetti di isospin e la struttura dei nuclei leggeri.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.5

Flash and chips

L'elettronica dei rivelatori

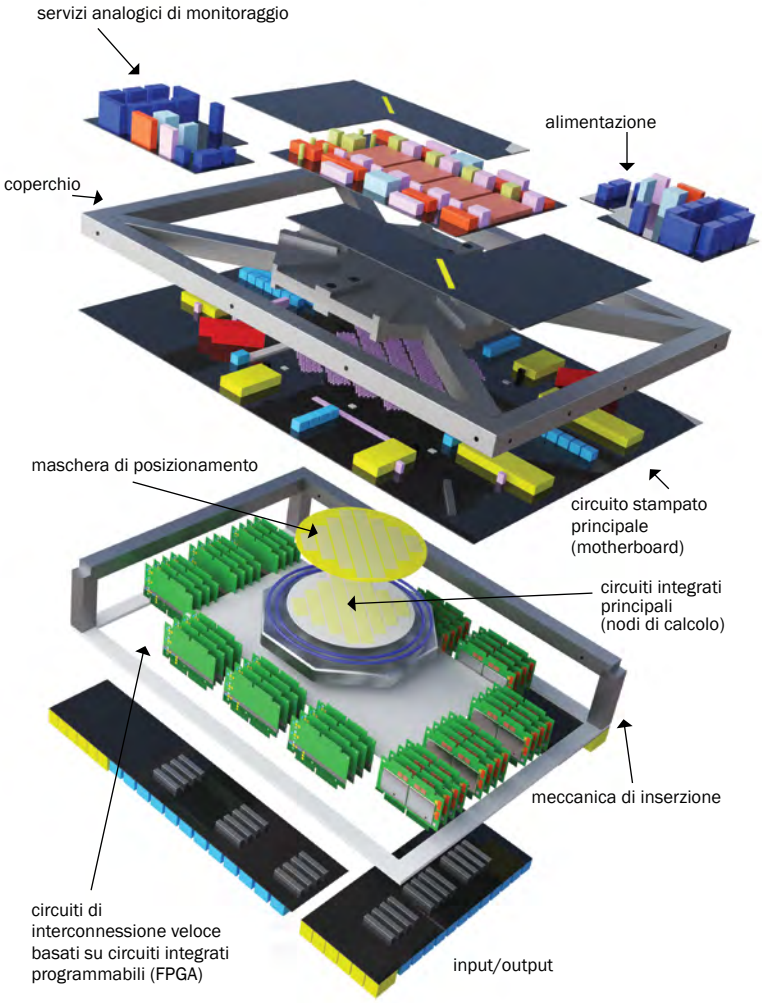
di Adriano Lai



a.
Foto relativa a una delle fasi della campagna di test condotta nel 2018 al Cern su Myriad 2 (Intel), chip di intelligenza artificiale dedicato all'integrazione grafica, per conto dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa). Il funzionamento dell'unità di processazione video viene verificato a seguito della sua esposizione a radiazione per comprenderne il possibile utilizzo in ambito spaziale.

Se guardassimo un complesso sistema di misura come un fantastico organismo vivente, potremmo dire che ogni suo rivelatore costituisce uno dei suoi organi sensoriali, ogni canale di lettura un suo recettore e che tutti i segnali generati da tali recettori, innumerevoli e di tipo diverso, sono trasformati in impulsi elettrici spediti dentro il suo complesso sistema nervoso verso un'unità di elaborazione, un cervello, capace di interpretarli. L'elettronica di un sistema sperimentale è paragonabile ai nervi e ai primi stadi di elaborazione cerebrale di questo ipotetico organismo: non avremmo un apparato di misura senza un sistema elettronico, così come non avremmo un essere vivente evoluto senza sistema nervoso.
Come il grado di evoluzione di un organismo vivente si riflette direttamente sulla complessità del suo sistema nervoso, così la complessità di un apparato sperimentale, fatto di sensori ed elettronica, può essere più o meno grande. In fisica delle alte energie, gli apparati sono composti da una decina di rivelatori diversi (i suoi "sensi") e da milioni di canali di lettura (i recettori e i "nervi" ad essi collegati). L'avanzamento della ricerca in fisica fondamentale richiede di concepire e realizzare apparati sempre più estesi e complessi, con un numero di canali di lettura e connessioni sempre maggiore e prestazioni in termini di accuratezza sempre più spinte.
Questo paragone ci aiuta a capire il ruolo dell'elettronica in un sistema di misura e la sua fondamentale importanza funzionale, ma come ogni similitudine non va spinto troppo avanti. Il sistema elettronico di un apparato sperimentale ha una struttura interna molto diversa da quella di un sistema percettivo ed elaborativo organico. Ripartendo dal singolo sensore del sistema sperimentale, l'interazione di una particella o di un'onda elettromagnetica di qualunque tipo produce in esso una variazione di carica o di corrente ai suoi elettrodi. Questa debole e repentina variazione è il segnale originario che il primo stadio del sistema elettronico deve rendere leggibile e misurabile. Ciò significa estrarre da esso tutta l'informazione che contiene con la massima precisione possibile: l'ampiezza del segnale è proporzionale all'energia rilasciata dalla particella, la posizione e il tempo in cui il segnale è rivelato ci permettono di misurare l'impulso della particella, di ricostruire la dinamica dettagliata di un'interazione sub-atomica e di stabilire l'identità delle particelle che a questa interazione partecipano.
Il primo stadio del sistema è un circuito che amplifica il debole segnale dal rivelatore e ne cambia opportunamente

la forma, perché possa essere più facilmente elaborato dagli stadi successivi, senza perdere le informazioni che interessano. Questo primo stadio è chiamato “stadio analogico” e l’elaborazione del segnale originario genera solo cambiamenti nella sua forma e ampiezza. Lo stadio successivo invece converte le informazioni di tempo e/o ampiezza in una sequenza di numeri binari, che possono essere memorizzati ed elaborati con algoritmi logici e numerici. Tale stadio è definito “digitale”, dall’inglese “*digit*”, cifra numerica. Un numero binario di senso compiuto viene chiamato “dato” e fornisce una misura del tempo di accadimento, o dell’ampiezza del segnale, oppure identifica la posizione del sensore che ha generato l’informazione.
La precisione nella misura finale prodotta dipende sia dalla qualità del sensore che da quella della sua elettronica di lettura. Gli esperimenti della presente generazione richiedono una precisione spaziale nella misura della traiettoria di una particella di una o due decine di millesimi di millimetro (micrometri) su superfici di svariati metri quadrati. La misura del tempo è limitata a una precisione di “solo” poche decine di miliardesimi di secondo (nanosecondi). In confronto, i ricercatori che oggi progettano gli apparati della prossima generazione, da installarsi fra una decina di anni, devono aggiungere alla misura della posizione micrometrica una misura del tempo circa mille volte più precisa (dell’ordine dei picosecondi).
Si prevede che il numero di eventi per secondo aumenti di quasi un ordine di grandezza e deve in proporzione aumentare la velocità di elaborazione dei segnali e la velocità di trasmissione della enorme quantità di dati che il sistema elettronico genera in ogni secondo. La prossima generazione di apparati sperimentali va così verso una transizione epocale: le prestazioni e la fattibilità di molti esperimenti alle alte energie sono limitate dalle prestazioni del suo sistema elettronico in termini di precisione e velocità piuttosto che dalla precisione ottenibile dai sensori.
Gli stadi analogico, di conversione analogico-digitale e quello di trasmissione dei dati generati vivono in intimo contatto col sensore, con la conseguenza che i gangli vitali del sistema elettronico sono costituiti da circuiti ad altissima integrazione (microchip). Un microchip che legga i sensori a pixel della prossima generazione integrerà centinaia di migliaia di canali su una superficie di alcuni centimetri quadrati e genererà un flusso di dati pari a centinaia di miliardi di bit per secondo. Inizia dunque a essere conveniente elaborare la copiosissima informazione generata dal rivelatore subito dopo la conversione digitale, piuttosto che inviarla all’esterno dell’apparato. I microchip, integrati con i sensori stessi, sono sempre più simili a un intero sistema su chip, composto da più microsistemi densamente interconnessi fra loro. L’apparato diventa “intelligente” e, con algoritmi di intelligenza artificiale, inizia a imparare a elaborare i dati “riconoscendo” gli eventi. Fra qualche generazione tecnologica avremo sistemi che interpretano da soli i dati e suggeriscono nuovi algoritmi di analisi? Questa è fantascienza, non è certo dietro l’angolo, ma è sicuramente lungo la strada che stiamo già percorrendo. Intanto il gigantesco tecno-organismo intelligente inizia a prender forma...



b.
Esempio di Sip (System In Package) con applicazioni di intelligenza artificiale. Il Sip è costituito integrando in un’unica struttura fortemente interconnesa (integrazione verticale) più microchip, facenti funzioni di microprocessori, memorie e interconnessioni ad alta velocità. Oltre che stadi di calcolo ad altissime prestazioni, i Sip possono integrare anche rivelatori di radiazione e stadi di elaborazione analogica dei segnali. Dispositivi di questo tipo possono essere capaci di centinaia di milioni di milioni di operazioni al secondo (centinaia di teraflops).

Biografia
Adriano Lai, dirigente tecnologo dell’Infn, ha sviluppato apparati sperimentali al Cern e per applicazioni mediche. Oggi dirige il progetto Timespot, dedicato a realizzare un sistema ad alta risoluzione spaziotemporale di prossima generazione.

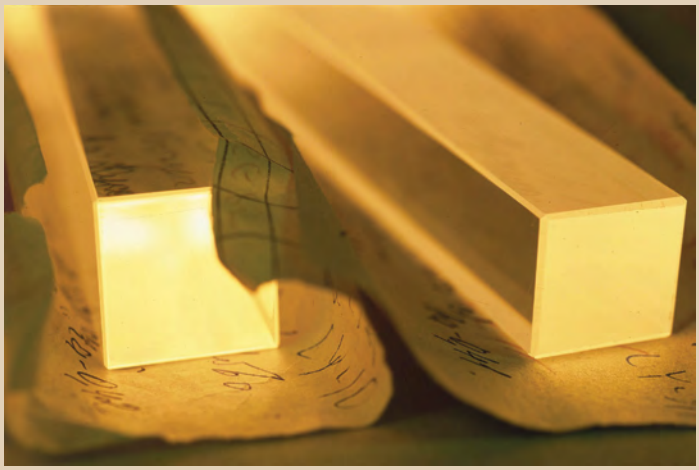
DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.6

Vedere oltre la luce

Occhi speciali per tutte le frequenze

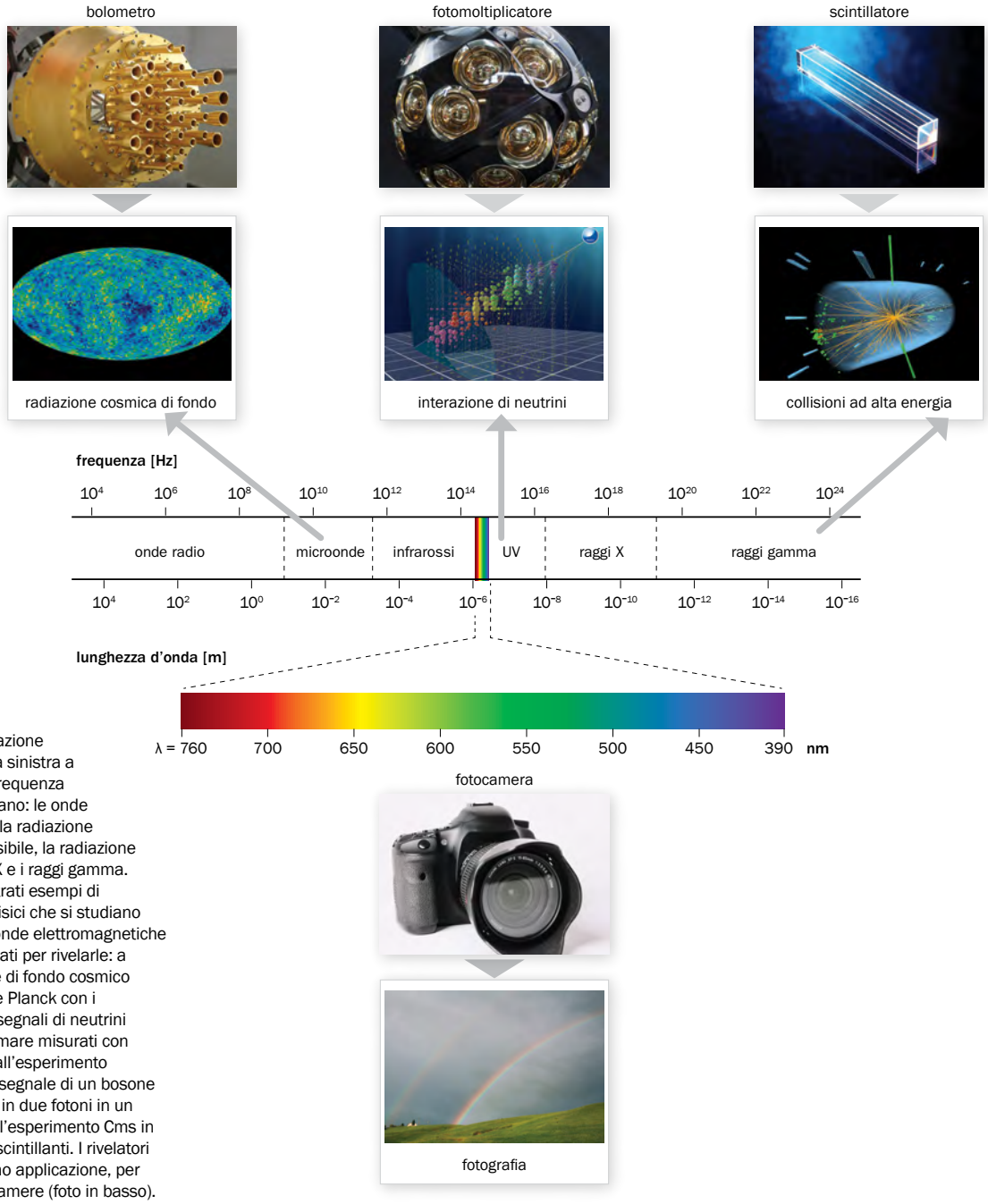
di Francesca Cavallari

Tra i rivelatori costruiti e usati nell'ambito della fisica fondamentale, quelli per la radiazione elettromagnetica (vd. fig. b) giocano un ruolo cruciale. Per rivelare le onde elettromagnetiche ci si serve di strumenti diversi a seconda della lunghezza d'onda in gioco. Vediamo in dettaglio come funzionano questi strumenti e a che cosa servono.
I rivelatori per le microonde sono utilizzati dai ricercatori dell'Infn principalmente per misurare la radiazione di fondo cosmico (vd. in Asimmetrie n. 28 p. 10, ndr). Misurarne l'energia e la provenienza ci permette di studiare l'evoluzione iniziale dell'universo.
Una piccola parte del rumore che si vedeva nei vecchi televisori, quando si cercava di sintonizzare un canale, era dovuto alla radiazione di fondo cosmico. Ciò nonostante, non è facile rivelare le microonde, perché tutti gli oggetti a temperatura ambiente emettono un po' di microonde, quindi i rivelatori devono essere raffreddati a temperature prossime allo zero assoluto. Inoltre, l'umidità dell'atmosfera assorbe le microonde: di conseguenza, la rivelazione della radiazione di fondo deve essere realizzata o in zone secche di alta montagna o in palloni aerostatici (esperimento Boomerang) o su satelliti (esperimenti Cobe, Wmap e Planck). I sensori sono di due tipi: "bolometri" e "transistor ad alta mobilità elettronica" (chiamati Hemt dall'inglese "*high electron mobility transistors*").
I bolometri sono termometri molto sensibili: la radiazione incidente riscalda leggermente un materiale assorbitore, facendo registrare una piccola variazione nella resistenza del rivelatore ad esso connesso. Gli Hemt, invece, sono dei transistor che amplificano il segnale e lo convertono in un segnale elettrico.



a.
Cristalli scintillanti di tungstato di piombo utilizzati per il calorimetro elettromagnetico di Cms.

I rivelatori per la luce visibile sono di due tipi: a vuoto e a stato solido. I fotomoltiplicatori sono i più comuni rivelatori a vuoto. Sono costituiti da un tubo sotto vuoto, con una finestra trasparente da cui entra la luce. Nel tubo c'è uno strato in cui la luce viene convertita in elettroni per effetto fotoelettrico. Gli elettroni prodotti vengono poi accelerati da un campo elettrico e spinti verso altri strati metallici e, sbattendoci contro, estraggono altri elettroni. Combinando vari stadi successivi si può raggiungere un fattore di amplificazione fino a un milione: si tratta quindi di strumenti in grado di rivelare anche segnali molto piccoli. Per gli studi sui neutrini, l'esperimento subacqueo Km3net, in fase di installazione nel Mediterraneo, utilizza dei fotomoltiplicatori molto grandi che misurano la luce emessa al passaggio nell'acqua dalle particelle cariche prodotte dai neutrini.
Negli ultimi decenni c'è stato un grande sviluppo dei rivelatori a stato solido, cioè fatti di silicio, spinto dalla richiesta sempre maggiore di rivelatori di luce per i mouse, le telecamere di sicurezza, i telefonini e da qualche anno anche per le automobili, nello sviluppo della guida autonoma. Esistono dispositivi di silicio di vario tipo, più o meno sensibili a determinati colori, con amplificazione interna, suddivisi o meno in cellette dette pixel, di grande o piccola superficie, che garantiscono una risposta al segnale da rivelare più o meno veloce, ecc. Il principio di funzionamento si basa sulla capacità di trasformare un segnale luminoso in uno elettrico. Alcuni di questi dispositivi hanno un'amplificazione interna, data da un campo elettrico molto forte che permette, a partire da un elettrone, di estrarre una piccola valanga di elettroni, formando così un segnale elettrico più grande. Nei dispositivi suddivisi in cellette ogni raggio di luce ne attiva una e, contando il numero di cellette attive, si può risalire a quanta luce è passata.
Negli esperimenti di fisica delle particelle negli acceleratori e nello spazio, per i fotoni di altissima energia si impiegano i calorimetri elettromagnetici. Si tratta di strumenti realizzati con materiali pesanti che assorbono completamente i fotoni e ne misurano l'energia. I fotoni di alta energia, infatti, attraversando un materiale possono produrre coppie di elettroni e positroni che a loro volta possono rimbalzare sugli atomi del



b.
Lo spettro della radiazione elettromagnetica. Da sinistra a destra, in ordine di frequenza crescente, si incontrano: le onde radio, le microonde, la radiazione infrarossa, la luce visibile, la radiazione ultravioletta, i raggi X e i raggi gamma. Nelle foto sono mostrati esempi di fenomeni e sistemi fisici che si studiano usando i vari tipi di onde elettromagnetiche e gli strumenti utilizzati per rivelarle: a sinistra la radiazione di fondo cosmico misurata dal satellite Planck con i bolometri; al centro segnali di neutrini nelle profondità del mare misurati con i fotomoltiplicatori dall'esperimento Km3net; a destra, il segnale di un bosone di Higgs che decade in due fotoni in un evento registrato dall'esperimento Cms in Lhc usando cristalli scintillanti. I rivelatori di luce visibile trovano applicazione, per esempio, nelle fotocamere (foto in basso).

materiale emettendo fotoni e così via, generando una cascata di particelle chiamata sciame elettromagnetico. Lo sciame può cominciare con un fotone, un elettrone o un positrone. I calorimetri elettromagnetici possono essere realizzati con un materiale omogeneo oppure essere a campionamento. I materiali omogenei più utilizzati sono i cristalli scintillanti. Si tratta di materiali che, quando vengono attraversati da una particella carica, emettono luce. Dispositivi simili sono impiegati per esami diagnostici come ad esempio la Pet (tomografia a emissione di positroni, vd. in Asimmetrie n. 7 p. 38, ndr). La luce emessa dai cristalli è misurata da sensori per la luce visibile.

I cristalli più impiegati sono materiali ad alta densità e alto numero atomico. Ad esempio, il calorimetro dell'esperimento Cms di Lhc contiene circa 75.000 cristalli di tungstato di piombo ($PbWO_4$) lunghi circa 22 cm e con una sezione di 2 cm x 2 cm. Questi calorimetri sono dotati di un sistema di monitoraggio della luce di scintillazione, che ne garantisce la stabilità, e permettono di raggiungere un'ottima precisione nella misura dell'energia delle particelle rivelate. Uno sviluppo recente è dato dalla possibilità di misurare il tempo di arrivo del fotone mediante l'utilizzo di cristalli in cui il processo di scintillazione avviene molto velocemente, accoppiati a sensori

[as] approfondimento

Calorimetri adronici

Gli adroni, come ad esempio i protoni e i neutroni, sono particelle costituite da quark. Negli esperimenti di fisica delle particelle che utilizzano acceleratori vengono prodotti molti adroni – alcuni dei quali sono stabili o a vita media lunga – che vengono rivelati utilizzando i calorimetri adronici. Quando un adrone entra in un materiale, urtando contro gli atomi, può produrre altri adroni di energia minore, i quali, dopo un breve percorso nel materiale, possono decadere o anch'essi urtare contro atomi e produrre altri adroni di energia via via inferiore. Si viene a creare quindi una specie di cascata di particelle chiamata "sciame adronico". Gli sciami adronici penetrano nei materiali molto più in profondità degli sciami generati da elettroni o fotoni, e richiedono pertanto rivelatori molto più pesanti e voluminosi. I calorimetri adronici sono fatti alternando strati di un materiale assorbitore pesante, che permette di far sviluppare lo sciame, con strati sottili di rivelatore in cui si misura l'energia delle particelle prodotte. Ad esempio, vengono utilizzati materiali come ottone, acciaio, ferro o tungsteno come assorbitori, alternati a strati di scintillatore plastico o fibre di quarzo o scintillanti, rivelatori di silicio o rivelatori a gas.
Gli sciami adronici, anche se generati dallo stesso tipo di particelle, possono essere molto diversi fra loro, a causa del gran numero di possibili combinazioni di interazioni che si possono verificare. Inoltre, negli sciami adronici possono essere prodotte anche particelle instabili che decadono emettendo fotoni, i quali generano nel calorimetro uno sciame elettromagnetico contenuto dentro lo sciame adronico. Quindi, a causa delle molteplici possibilità di sviluppo degli sciami adronici e il diverso numero di fotoni in essi contenuto, i calorimetri adronici possono dare misurazioni molto diverse da sciame a sciame. Questo fattore limita notevolmente la precisione di misura dei calorimetri adronici.
Una buona precisione nella misura degli adroni viene ottenuta con la tecnica del "*particle flow*", che combina l'informazione di tutti i rivelatori dell'esperimento, in particolare misurando l'impulso degli adroni carichi sulla base della curvatura delle tracce ricostruite nel tracciatore immerso nel campo magnetico, e l'energia degli adroni neutri nel calorimetro adronico. Per questa tecnica servono un tracciatore eccellente e un calorimetro adronico con una buona granularità, che permette di separare sciami adronici adiacenti.

1.
Un particolare delle procedure di assemblaggio di un modulo del calorimetro adronico dell'esperimento Atlas al Cern.

di luce anch'essi "veloci" e ad alta amplificazione e con un'elettronica di lettura anch'essa molto veloce. Questa caratteristica permette di ridurre gli effetti dovuti alla sovrapposizione di segnali vicini nello spazio, ma separati nel tempo. I calorimetri elettromagnetici a cristalli sono utilizzati anche in esperimenti nello spazio. Per esempio, il telescopio spaziale Fermi, il più grande osservatorio di raggi gamma nello spazio, utilizza un calorimetro composto da una matrice di barre di cristalli di ioduro di cesio per misurare raggi gamma con energie che vanno da 20 MeV a oltre 300 GeV (vd. p. 39 in Asimmetrie n. 10, ndr).
Nei calorimetri a campionamento, invece, strati di materiale assorbitore pesante, che serve a far sviluppare lo sciame, sono alternati a strati che permettono di misurare l'energia. Ad esempio, il calorimetro elettromagnetico dell'esperimento Atlas di Lhc è fatto di piombo alternato a elettrodi immersi in argon liquido, che permettono di misurare la carica rilasciata dallo sciame, e quindi la sua energia. Altri esempi sono i calorimetri che alternano tungsteno con rivelatori di silicio o il piombo con scintillatore plastico a lastre o a fibre (il cosiddetto "calorimetro a spaghetti"). Ultimamente si stanno sviluppando calorimetri con strati di campionamento suddivisi in tante cellette, che permettono di ottenere immagini tridimensionali dettagliate dello sciame e di separare due sciami molto vicini (calorimetri a *imaging*). In genere si estende il calorimetro per contenere anche adroni (vd. approfondimento). È proprio questo tipo di calorimetri che è stato proposto per l'upgrade del calorimetro "in avanti" di Cms (ovvero posizionato in maniera da rivelare le particelle emesse a piccoli angoli rispetto alla direzione di collisione dei fasci) e per uno degli esperimenti del Future Circular Collider (vd. p. 13, ndr). I calorimetri elettromagnetici di Cms e Atlas sono strumenti di grande precisione e hanno avuto un ruolo fondamentale nella scoperta del bosone di Higgs, rivelandone il decadimento in due fotoni. Chissà quante altre scoperte ci permetteranno di fare in futuro i rivelatori per le radiazioni elettromagnetiche.

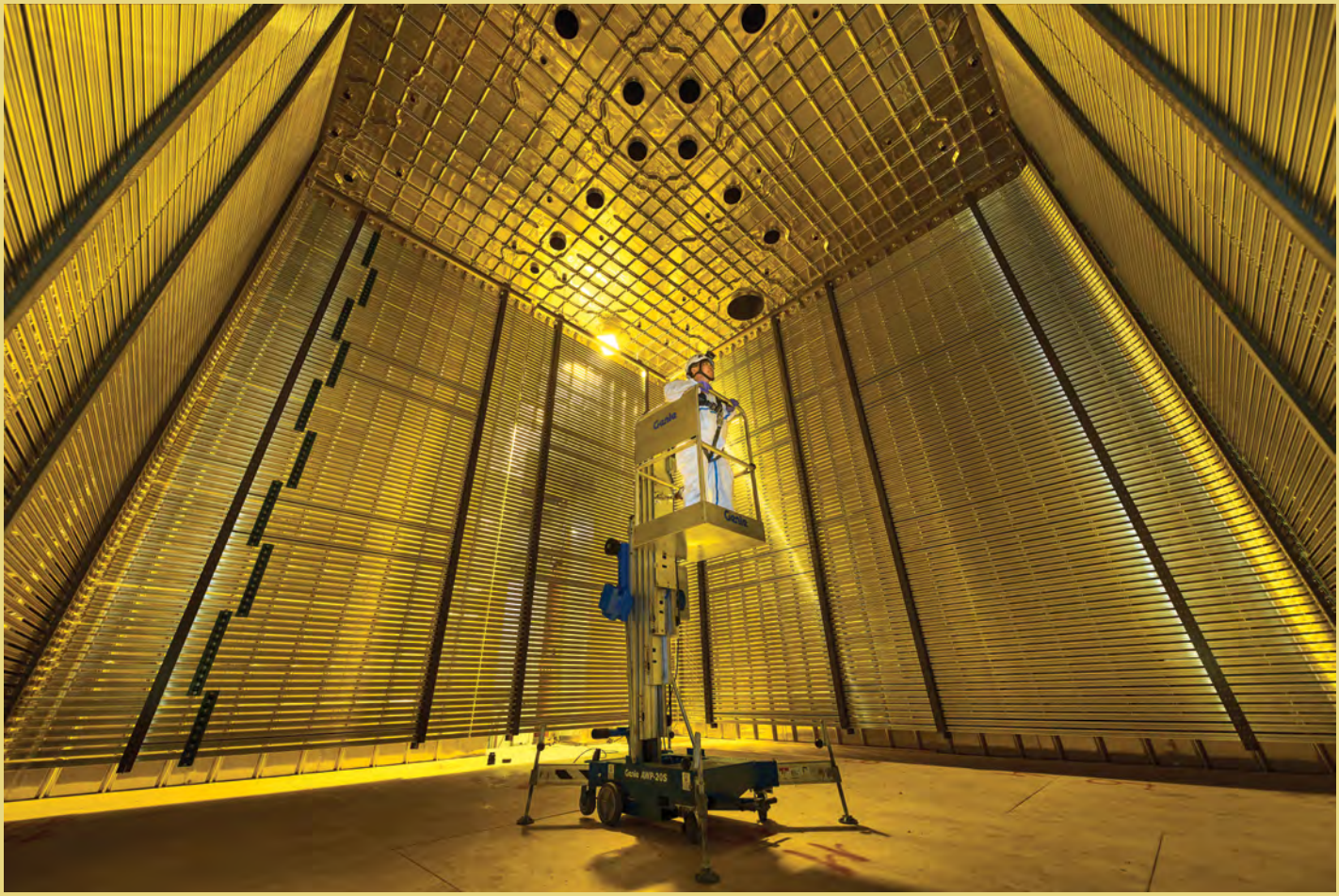
Biografia
Francesca Cavallari è ricercatrice presso l'Infn di Roma. Ha collaborato a due esperimenti ai collisori del Cern: L3 al Lep e Cms di Lhc, ricoprendo anche il ruolo di *project manager* del calorimetro elettromagnetico di Cms.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.7

Mostra le tue debolezze

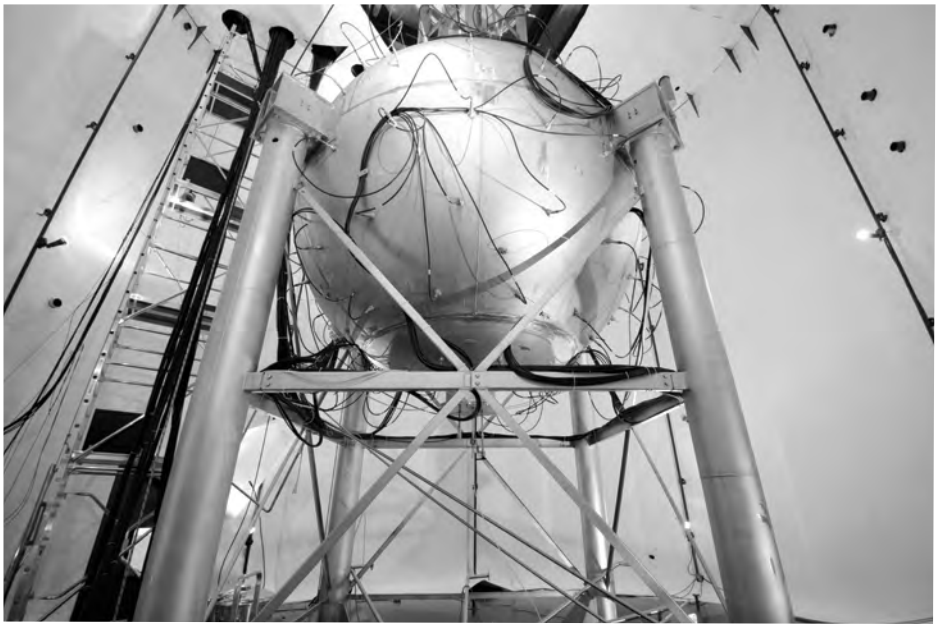
Rivelatori di neutrini e materia oscura

di Giuliana Fiorillo



a.
Il prototipo del rivelatore per l'esperimento Dune installato nella Cern Neutrino Platform.

Elusive. Sfuggenti. Invisibili. Così sono le particelle che non interagiscono, o che lo fanno solo debolmente. "Vedere", infatti, è sinonimo di "interagire". Più flebile è l'interazione, più è difficile vedere ciò che l'ha provocata. L'esempio principe è dato dal neutrino.
Per i neutrini di origine astrofisica, terrestre o artificiale, l'interazione più probabile è quella con i protoni e neutroni dei nuclei. La sezione d'urto che misura la probabilità di questo processo è mille miliardi di volte più piccola di quella relativa all'interazione protone-nucleo. Le interazioni con gli elettroni del mezzo sono ancora più rare. Un fascio di neutrini vede dunque la materia come se questa fosse una rete a maglia larga: la attraversa indisturbato e solo molto raramente la intercetta dando luogo a un'interazione, un "evento". La probabilità di intercettare il fascio cresce con il numero di nuclei bersaglio e dipende dall'energia dei neutrini. Per questo motivo i rivelatori per neutrini devono avere grandi dimensioni ed essere sensibili a energie tanto più piccole quanto minore è l'energia degli eventi che si vogliono osservare. Inoltre, devono essere schermati dalla radiazione cosmica, e spesso



b.
Vista esterna di DarkSide-50, esperimento dedicato alla ricerca diretta di Wimp. Il rivelatore ha una struttura a cipolla: un grande rivelatore Cherenkov ad acqua contiene una sfera riempita di scintillatore liquido che a sua volta contiene una Time Projection Chamber ad argon liquido. I due rivelatori esterni mostrati nella foto costituiscono un cosiddetto "veto attivo", volto a identificare ed eliminare i segnali di disturbo generati dalla radiazione ambientale.

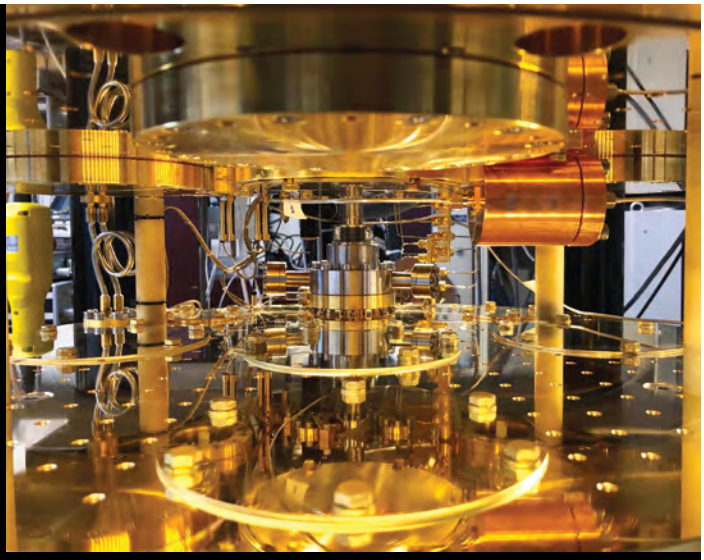
anche dalla radioattività naturale, per ridurre la probabilità di eventi cosiddetti "di fondo", eventi indesiderati che possono confondersi con quelli cercati. Il metodo classico per disegnare un rivelatore di neutrini è quello di realizzare un grande bersaglio di materiale "attivo", il cui volume è equipaggiato con sensori in grado di rivelare i segnali prodotti dalle interazioni dei neutrini con il mezzo. L'osservazione dei prodotti secondari della reazione permette lo studio delle proprietà dei neutrini usati come sonda-proiettile. La grande sfida globale in corso per lo studio delle oscillazioni di neutrino su lunga base vede sostanzialmente protagonisti due tipi di rivelatore, cui sono associate difficoltà tecnologiche tanto grandi quanto i rivelatori stessi. Hyper-Kamiokande utilizzerà un gigantesco rivelatore Cherenkov ad acqua, ottimizzato per la misura di precisione degli eventi quasi elastici in cui è emesso un elettrone o un muone. Più di 40.000 fotomoltiplicatori osserveranno il volume interno del rivelatore (un cilindro di circa 70 m di altezza per 70 m di diametro) e altre migliaia saranno installati nel volume esterno, dedicato all'identificazione del fondo. Dune ha selezionato invece la tecnologia ad argon liquido, in cui circa 70.000 tonnellate di argon alla temperatura di -184 °C costituiscono il bersaglio attivo di enormi camere a proiezione temporale, in grado di fornire l'immagine 3D dell'evento di interazione. Le due tecniche sono in qualche modo complementari, anche in combinazione con le caratteristiche specifiche dei fasci di neutrini per i quali i rivelatori sono disegnati. Entrambe permetteranno di studiare con grande accuratezza oltre ai neutrini del fascio, di energia attorno al GeV, anche quelli solari e da supernova, con energie dell'ordine del MeV o decine di MeV. Per ridurre il fondo, i rivelatori sono installati in gallerie sotterranee dove sono schermati da chilometri di roccia. Di dimensioni ancora maggiori sono i rivelatori Cherenkov disegnati per l'osservazione dei rari neutrini cosmici di altissima energia. Qui il bersaglio è costituito da mega tonnellate di ghiaccio, come nel caso di IceCube in Antartide, o di acqua, come per il telescopio Km3net/Arca installato nelle profondità del Mediterraneo. I neutrini provenienti dal basso con energie dalle centinaia di GeV al PeV interagiscono nel volume di oltre un chilometro cubo equipaggiato con stringhe di moduli ottici. Questi osservano la luce prodotta dalle particelle cariche secondarie e ne misurano la direzione. In tal modo è possibile ricostruire la direzione dei neutrini incidenti e identificarne le sorgenti astrofisiche. All'estremo opposto, i rivelatori disegnati per la ricerca di Wimp - particelle debolmente interagenti, che costituirebbero la materia oscura nella nostra galassia - devono essere ottimizzati per osservare eventi di bassa energia. Infatti, l'urto di queste particelle galattiche sui nuclei e sugli elettroni del bersaglio genererebbe rinculi (nucleari o elettronici) con un'energia massima di poche decine o centinaia di keV e questi a loro volta rilascerebbero la propria energia sotto forma di ionizzazione, eccitazione e, in ultima analisi, dissipazione termica. Le tecnologie utilizzate si basano sull'uso di scintillatori (cristalli o gas nobili liquefatti), sulla misura della carica di ionizzazione e anche sulla misura calorimetrica del calore prodotto (bolometri). Le strategie sperimentali si focalizzano su uno dei tre segnali o sulla combinazione di due di essi, che permette di discriminare gli eventi di rinculo nucleare da quelli di rinculo elettronico e abbattere in questo modo il fondo dovuto alla radioattività naturale. Quest'ultimo è certamente il nemico numero uno da combattere per i rivelatori di Wimp, che sono progettati e realizzati in modo da avere una sensibilità tale da rivelare un singolo evento occorso in tonnellate di materiale bersaglio in uno o più anni di osservazione. Per raggiungere questo obiettivo sono necessari materiali radiopuri, speciali tecniche di costruzione e assemblaggio e laboratori sotterranei dotati di infrastrutture adeguate (i più

grandi in Europa sono i Laboratori Nazionali del Gran Sasso). Il programma sperimentale dei prossimi anni prevede diversi progetti sulla scala delle tonnellate. In *pole position* i rivelatori basati sui liquidi nobili criogenici. Decine di tonnellate di xenon e argon purissimi sono utilizzati rispettivamente da Xenon e DarkSide, che hanno sviluppato tecniche industriali per la loro produzione e/o purificazione. I rivelatori sono ottimizzati per rivelare con alta efficienza sia la luce di scintillazione che la flebile carica di ionizzazione. Questa tecnologia garantisce di poter raggiungere una bassa soglia in energia nonostante la grande massa del rivelatore.

[as] approfondimento

Cavità risonanti

Pensando alle onde elettromagnetiche, a quelle radio o alla stessa luce visibile, le immaginiamo viaggiare nello spazio alla velocità di circa 300.000 km/s da una antenna all'altra o da una stella a un pianeta. Possiamo però costringerle in un volume, ripiegate come calzini in un cassetto, forzandole in una scatola al cui interno il campo elettrico e magnetico si agitano come tigri in gabbia. Le "cavità risonanti", questo il nome dello strumento in questione, sono regioni vuote delimitate da pareti metalliche su cui le onde elettromagnetiche rimbalzano avanti e indietro. Quando l'onda ha una lunghezza tale da ripiegarsi correttamente all'interno della cavità, essa "risuona" formando onde stazionarie che, come quelle su una corda di chitarra, hanno una frequenza ben definita.
Le cavità risonanti hanno un gran numero di applicazioni, dall'elettronica per le microonde agli acceleratori di particelle fino ai computer quantistici e alla ricerca di materia oscura. È quest'ultimo il caso della ricerca di particelle chiamate "assioni" o di particelle simili denominate Alps (da *axion-like-particles*). Si ritiene infatti che assioni e Alps interagiscano con il campo elettromagnetico, fatto che ne permetterebbe la produzione e la rivelazione all'interno di cavità risonanti. Grazie, infatti, alla loro capacità di far rimbalzare le onde elettromagnetiche milioni se non centinaia di miliardi di volte al loro interno, le cavità risonanti sono in grado di amplificare sia i meccanismi di produzione che di rivelazione. Si può, ad esempio, stimolare la produzione di Alps caricando una cavità di energia elettromagnetica e andare poi a cercare deboli segnali prodotti in una seconda cavità in base allo schema detto *light-shining-through-wall* ("luce attraverso il muro"): la radiazione elettromagnetica ("luce") si trasforma in assione nella prima cavità e poi, dopo aver attraversato "un muro", si trasforma di nuovo in radiazione nella seconda cavità. La radiazione elettromagnetica, infatti, non potrebbe da sola attraversare il muro, mentre la sua conversione in assione glielo permette.
Oppure si possono amplificare i segnali generati in una cavità risonante dagli assioni eventualmente presenti, in quanto particelle che formano la materia oscura della nostra galassia: è una tecnica utilizzata da strumenti chiamati *haloscope*, in ricerche condotte dall'Infn con l'esperimento Quax e i suoi due rivelatori situati presso i Laboratori Nazionali di Legnaro e di Frascati. [Claudio Gatti]



1.
Dettaglio del refrigeratore a diluizione del rivelatore di assioni di Quax ai Laboratori Nazionali di Frascati. In alto a destra, disposta orizzontalmente, si vede una cavità risonante a 10 GHz di forma cilindrica.

Biografia
Giuliana Fiorillo è professoressa di fisica nucleare e subnucleare all'Università Federico II di Napoli. Si occupa di fisica del neutrino e ricerca di materia oscura. Ha lavorato al Cern, in Giappone e negli Stati Uniti ed è stata responsabile Infn per l'esperimento DarkSide ai Lngs.

Claudio Gatti è ricercatore ai Laboratori Nazionali di Frascati, coordina il gruppo Lnf dell'esperimento Quax, è coordinatore nazionale del progetto Simp e responsabile Infn del progetto europeo Supergalax.

Link sul web:
http://www.lnf.infn.it/~gatti/homepage.html
http://coldlab.lnf.infn.it

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.8

Ascoltando la sinfonia dell'universo

Virgo e gli interferometri per onde gravitazionali

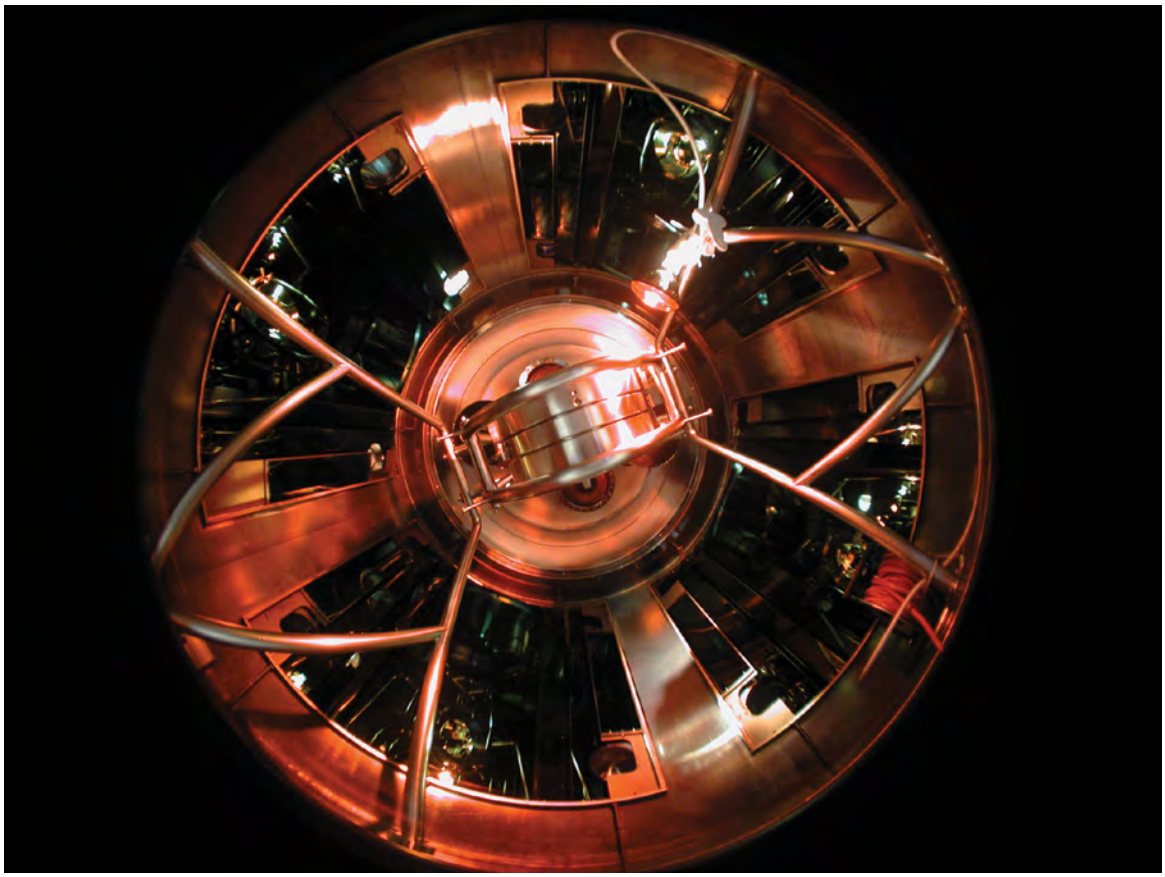
di Massimiliano Razzano

a.
L'Osservatorio Gravitazionale Europeo, situato presso Cascina in provincia di Pisa, dove sorge l'interferometro Advanced Virgo, contenuto nel lungo tubo azzurro visibile nella foto.

Siete appena arrivati alla festa. Entrati nel locale, iniziate a cercare i vostri amici ma vi rendete subito conto che non è così semplice. Fra le luci e la musica fortissima fate fatica a distinguere i volti e i suoni in tutta quella confusione. Sarebbe bello poter spegnere la musica per un momento, giusto in tempo per riconoscere la voce dei vostri amici. Ma sapete che non è possibile e quindi aguzzate la vista e vi concentrate sulle voci in mezzo al frastuono.
Quando diamo la caccia alle onde gravitazionali la situazione è altrettanto "rumorosa". Non cerchiamo la voce dei nostri amici, ma delle tenui increspature nella trama dello spaziotempo prodotte da fenomeni astrofisici catastrofici, come lo scontro fra buchi neri o stelle di neutroni. Questi eventi sono però lontanissimi, e ciò che arriva sulla Terra è poco più di un debolissimo sussurro immerso in un mare di rumori di fondo prodotti da fenomeni fisici più disparati. Grazie alla teoria della relatività generale di Einstein possiamo calcolare l'ampiezza delle onde gravitazionali e quanto possono far oscillare lo spaziotempo quando arrivano qui da noi, sulla Terra. Calcoli alla mano, i numeri sono davvero scoraggianti. Il passaggio di un'onda attraverso una cittadina come Pisa la farebbe "stiracchiare" di un millesimo delle dimensioni di un nucleo atomico. Un effetto troppo piccolo persino per un microscopio. Così piccolo che qualsiasi altro fenomeno, come le vibrazioni del terreno o l'agitazione termica delle molecole, produce un continuo frastuono di fondo, proprio come nella nostra festa.
In una situazione così complicata e "rumorosa", come possiamo sperare di rivelare questi segnali cosmici? La soluzione sono degli appositi rivelatori, chiamati interferometri laser. Non troppo lontano da Cascina, in provincia di Pisa, sorge l'Osservatorio Gravitazionale Europeo (Ego), dove si trova Advanced Virgo, il più grande e sensibile rivelatore di onde gravitazionali in Europa. Finanziato dall'Infn e dal Cnrs francese, Virgo ascolta il cosmo insieme ai rivelatori gemelli del Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (Ligo), progetto

americano costituito da due interferometri installati nello stato di Washington e della Louisiana. Gli scienziati di Ligo e Virgo lavorano da anni in collaborazione, per combinare i dati raccolti da questa rete di interferometri e ricostruire in modo più preciso i fenomeni estremi capaci di generare le onde gravitazionali. Recentemente si è unito a questa rete anche l'interferometro giapponese Kagra, e nei prossimi anni dovrebbe entrare in funzione un terzo rivelatore Ligo in India.
Come suggerisce il nome, questi strumenti sfruttano l'interferenza fra fasci luminosi, un fenomeno legato alla natura ondulatoria della luce. Nel 1887 i fisici americani Abraham Michelson ed Edward Morley utilizzarono un interferometro per dimostrare la non esistenza dell'etere "luminifero", un ipotetico mezzo richiesto per la propagazione della luce.
Virgo è un pronipote di quell'interferometro: è naturalmente più sofisticato ma sfrutta lo stesso principio di funzionamento. Nei rivelatori gravitazionali un fascio di luce laser viene inviato su uno specchio semiriflettente, detto "divisore di fascio" (*beam splitter)*, che separa la luce in due fasci che percorrono direzioni perpendicolari. Dopo aver percorso i bracci di Virgo, lunghi 3 chilometri, la luce incontra uno specchio, detto "terminale", e viene riflessa indietro. I due fasci, che hanno viaggiato in direzioni perpendicolari, si ricombinano nel *beam splitter* ed è così possibile osservare l'interferenza associata alla loro sovrapposizione.
Al passaggio di un'onda gravitazionale lo spaziotempo si deforma e i bracci si allungano e si accorciano di pochissimo, ma abbastanza da alterare il cammino dei raggi luminosi e la relativa interferenza. In altre parole, la luce è il nostro "metro" per misurare deformazioni così piccole.
Più lunghi sono i bracci e maggiore è la differenza di cammino luminoso, e questo spiega le dimensioni gigantesche di Virgo. Per aumentare ulteriormente il cammino del laser, in ciascun braccio si trova uno specchio di ingresso, che insieme allo specchio terminale costituisce una cavità ottica di Fabry-Perot, dove la luce rimbalza centinaia di volte prima di tornare al *beam splitter*.
Ma tutto ciò non basta ancora. Dobbiamo infatti ridurre le fonti di rumore, che possono originarsi nel rivelatore o nell'ambiente esterno. Ad esempio, per combattere il rumore legato ai movimenti del terreno, detto "rumore sismico", gli specchi di Virgo sono sospesi a un complesso meccanismo, detto "superattenuatore", formato da una catena di pendoli in cascata. Questo sofisticato sistema fu proposto da Adalberto Giazotto, uno dei due "papà" di Virgo, scomparso nel 2017. Per ridurre

b.
Immagine del *beam splitter* di Virgo.



invece l'effetto del rumore legato all'agitazione termica, gli specchi sono sospesi tramite sottilissimi fili di silice di 0,4 mm di diametro e saldati a livello molecolare sugli specchi stessi. La qualità degli specchi è poi altissima in termini di purezza e di forma, in modo da garantire con grandissima precisione le caratteristiche di riflessione richieste. Questi sono solo alcuni esempi delle tecnologie di frontiera di Virgo. Esistono sistemi ancora più sofisticati per combattere le sorgenti di rumore associate alla natura quantistica della luce e che permettono di migliorare la sensibilità soprattutto nel dominio delle alte frequenze.
Dopo Ligo e Virgo, quali saranno le future antenne gravitazionali?
Un progetto molto ambizioso, di cui l'Infn è capofila, è l'Einstein Telescope, un interferometro europeo con bracci di 10 km che potrebbe sorgere in una miniera dismessa in Sardegna (vd. in Asimmetrie n. 30 p. 31, ndr). Esiste poi il progetto per il Laser Interferometer Space Antenna (Lisa), missione dell'Agenzia Spaziale Europea dedicata alla rivelazione delle onde gravitazionali dallo spazio e prevista per il lancio intorno alla metà degli anni 2030 (vd. in Asimmetrie n. 30 p. 34, ndr).
Grazie a Ligo e Virgo la fisica delle onde gravitazionali è passata in pochi anni da un'era pionieristica a una fase più matura. Ma siamo appena agli inizi. La stupenda sinfonia gravitazionale dell'universo è ancora tutta da scoprire.

c.
Il modulo Lisa Pathfinder nei laboratori di test a Ottobrunn, in Germania. Il successo della missione Lisa Pathfinder ha dimostrato la fattibilità delle tecnologie alla base dell'ambizioso progetto spaziale Lisa.

Biografia
Massimiliano Razzano è professore al Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa. Membro delle collaborazioni Virgo e Fermi-Lat, si occupa di onde gravitazionali e fisica multimessaggera. Giornalista scientifico, scrive da anni di fisica e spazio.

Link sul web:
http://public.virgo-gw.eu/
https://www.ego-gw.it/
http://www.et-gw.eu/

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.9

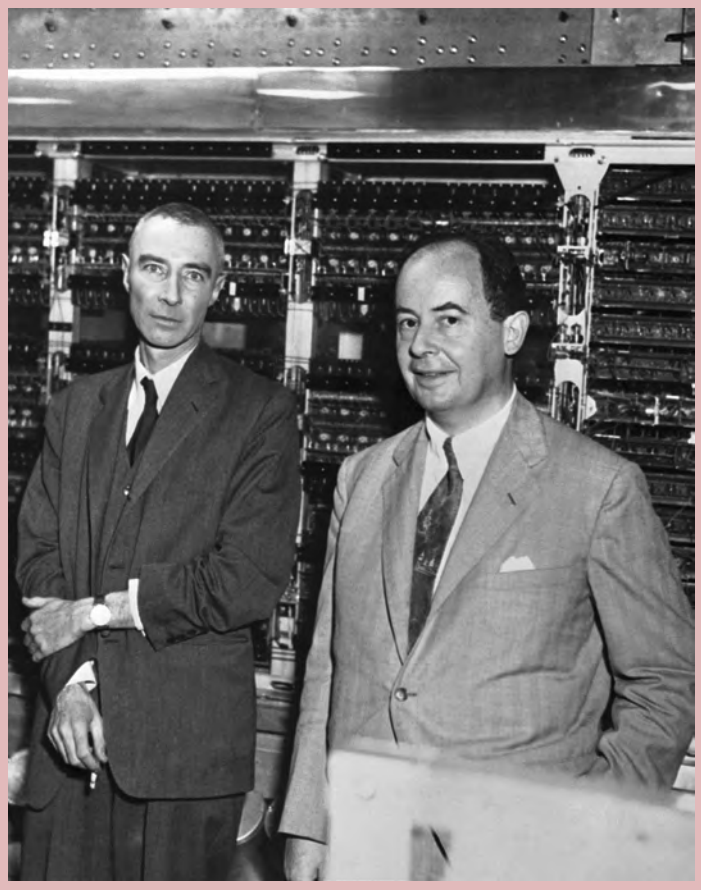
Strumenti informatici

Computer e reti in fisica

di Raffaele Tripiccione

Un'immagine un po' romantica e certamente oggi non corrispondente alla realtà vede il fisico impegnato a copiare su un taccuino una manciata di numeri che legge sui quadranti di qualche strumento connesso al suo apparato sperimentale, eseguire su tali numeri qualche semplice analisi di tipo statistico e confrontare i risultati con le previsioni (anch'esse derivate con limitate operazioni matematiche) del modello teorico che vuole verificare. Quello che non corrisponde alla realtà in questa immagine è l'assenza di uno "strumento" di lavoro, diventato negli anni fondamentale e costituito dal supporto che i calcolatori e il relativo software danno a tutte le fasi di una ricerca in fisica, sia essa teorica o sperimentale.
Quello che cercheremo di passare in rassegna qui è il ruolo che gli strumenti di calcolo e informatici svolgono, in maniera sempre più coinvolgente, nel lavoro quotidiano della ricerca in fisica. Metteremo in evidenza anche un aspetto forse poco noto, ma importante nel rapporto tra fisica e *computing*, legato al fatto che, se da un lato oggi il lavoro del fisico dipende imprescindibilmente dagli strumenti di calcolo, è anche vero che la fisica, nel corso degli ultimi sessant'anni, ha dato un contributo significativo di idee originali e di innovazione allo sviluppo dei sistemi di calcolo come li intendiamo attualmente. Infine, una questione di linguaggio: il significato del termine "*supercomputing*" ha subito una forte evoluzione negli anni. Qui lo intenderemo semplicemente come l'insieme dei più potenti strumenti di calcolo che, ad ogni istante, sono disponibili per la ricerca di base, date le risorse economiche ragionevolmente disponibili allo scopo.
Iniziamo con una veloce carrellata di alcune cruciali innovazioni che rappresentano il contributo dei fisici al *computing* a livello globale. Un fondamentale contributo è quello di John Von Neumann, uno dei padri della meccanica quantistica, che nel 1945 propose un modello concettuale dell'architettura dei calcolatori che è tuttora un importante strumento di inquadramento concettuale. Un modello che è sopravvissuto alla rivoluzionaria evoluzione tecnologica del transistor (inventato da tre fisici, John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley) e poi del circuito integrato (portato a maturazione dal lavoro di un altro fisico, Jack Kilby). Un ulteriore contributo importante della comunità dei fisici allo sviluppo del principio dei calcolatori è la dimostrazione che il calcolo computazionale parallelo (*parallel computing*) – l'idea che per migliorare le prestazioni di un sistema di calcolo è più conveniente eseguire tante operazioni in parallelo, magari più lentamente, piuttosto che una di seguito all'altra ma molto velocemente – era una strada perseguibile in pratica. Questa dimostrazione di fattibilità, cui l'Infn ha dato un significativo contributo negli anni '80 e '90 dello scorso secolo con lo sviluppo dei calcolatori Ape (vd. approfondimento), dedicati allo

a.
Robert Oppenheimer (a sinistra) e John Von Neumann di fronte alla macchina di calcolo più veloce dell'epoca (1952). Il computer era in grado di fare 2000 moltiplicazioni in un secondo e memorizzare 1024 numeri di 12 cifre decimali ciascuno.



studio teorico dell'interazione forte, ha prodotto un cambiamento drastico nelle architetture di calcolo, che oggi sono tutte fortemente parallelizzate. L'esperienza di Ape ci ricorda che l'utilizzo dei calcolatori per la ricerca in fisica è iniziato in ambito teorico. La prima significativa evidenza che il *computing* fosse uno strumento importante per la fisica è dei primi anni '50, quando Enrico Fermi e collaboratori (John Pasta, Stanislaw Ulam, Mary Tsingou) mostrarono non solo che i calcolatori, anche quelli primitivi degli anni '50, potevano essere utilizzati per simulare la dinamica dei sistemi fisici, ma anche – fatto ancora più importante e sorprendente – che da queste simulazioni si ottenevano risultati nuovi e del tutto inattesi. Enrico Fermi si chiese cosa succede se si introducono accoppiamenti non lineari tra i nodi di una catena di oscillatori armonici accoppiati. L'inaspettata risposta ottenuta dalla simulazione numerica è che l'approccio all'equilibrio del sistema, previsto dall'ipotesi ergodica, è molto più lento del previsto, un problema ancora oggi parzialmente aperto e che ha dato il via allo studio della fisica dei sistemi non lineari. Questa linea di evoluzione si è ampliata senza sosta e oggi, grazie a risorse di calcolo ingenti, sappiamo simulare l'evoluzione di sistemi fisici di grande complessità: abbiamo imparato a calcolare come si muovono tutti i corpi del sistema solare (inclusi i satelliti artificiali, che sappiamo guidare con precisione sui loro obiettivi) ma sappiamo anche predire cosa succede nella coalescenza di due buchi neri che producono le onde gravitazionali rilevate dagli esperimenti Virgo-Ligo. Il livello di accuratezza raggiunto da questo tipo di analisi, a fronte peraltro di un impegno di calcolo imponente (alcune simulazioni numeriche possono richiedere mesi di calcoli in supercomputer con decine di migliaia di processori), è impressionante. Per rimanere in un'area di interesse per l'Infn, le simulazioni reticolari permettono oggi di valutare gli elementi di matrice della corrente debole sugli stati adronici con un'accuratezza dell'ordine del percento. E questi numeri sono fondamentali per verificare a partire dai dati sperimentali la correttezza del modello standard e per porre limiti stringenti su possibili modelli di nuova fisica.
Un impatto altrettanto forte viene dai calcolatori a supporto dell'attività sperimentale, soprattutto nell'ambito della fisica delle interazioni fondamentali.

b.
Una delle sale macchine del Cnaf, il centro nazionale dell'Infn per la ricerca e lo sviluppo nelle tecnologie informatiche e telematiche, che ospita alcuni dei più potenti supercomputer italiani.

[as] approfondimento

L'Ape digitale

L'Infn ha avuto un ruolo importante nel campo del calcolo parallelo tra la metà degli anni '80 e il 2000, con lo sviluppo dei calcolatori paralleli Ape, ottimizzati per lo studio della cromodinamica quantistica – la teoria delle interazioni forti – con tecniche Monte Carlo su reticolo (vd. in Asimmetrie n. 11 p. 25, ndr). Il problema fisico era quello di ricavare predizioni quantitative per una teoria che non poteva essere trattata con un approccio perturbativo. Kenneth Wilson, già dieci anni prima, aveva riformulato la teoria in modo da poterla studiare con tecniche numeriche, ma l'enorme mole di calcolo richiesta era un ostacolo insormontabile. C'era però una nuova via da esplorare, offerta dal forte parallelismo dell'algoritmo: si dovevano eseguire esattamente le stesse operazioni matematiche sui dati associati a tutti i punti del reticolo e queste operazioni potevano essere eseguite contemporaneamente. Era una situazione forse troppo banale per destare l'interesse della ricerca informatica, ma troppo appetitosa per dei fisici che volevano calcolare le masse degli adroni. Da qui l'intuizione, in gran parte di Nicola Cabibbo e Giorgio Parisi (insignito lo scorso ottobre del premio Nobel per la fisica), di realizzare un sistema di calcolo molto semplice, ma fortemente parallelo. Nella prima versione della macchina c'erano ben 16 nodi di calcolo e ognuno di essi eseguiva contemporaneamente 8 operazioni matematiche su numeri reali. Il prototipo di Ape non era certo un esempio di *industrial design*, ma aveva una potenza di calcolo equivalente a un intero supercalcolatore Cray, il meglio del meglio all'epoca, ed era disponibile al 100% per la fisica. Generazioni successive della macchina hanno esteso il parallelismo a migliaia di processori. Lo scetticismo iniziale era palpabile, ma gli straordinari risultati scientifici ottenuti da Ape hanno avuto un ruolo non trascurabile nel convincere la comunità della ricerca e l'industria dei calcolatori che si potevano utilmente eseguire tante operazioni su un singolo processore e anche far lavorare insieme in modo efficiente tanti diversi processori. Il "modello standard" di supercomputer di oggi, con decine di migliaia di nodi, ognuno dei quali esegue contemporaneamente migliaia di operazioni matematiche, è l'evoluzione di Ape resa possibile da venti anni di ingenti investimenti industriali.

1.
1986, il primo Ape (denominato simpaticamente "Apetto"), con (da sinistra) Enzo Marinari, Pier Stanislao Paolucci, Nicola Cabibbo, (della sezione Infn di Roma Sapienza), in piedi, e Gaetano Salina (della sezione Infn di Tor Vergata), seduto.

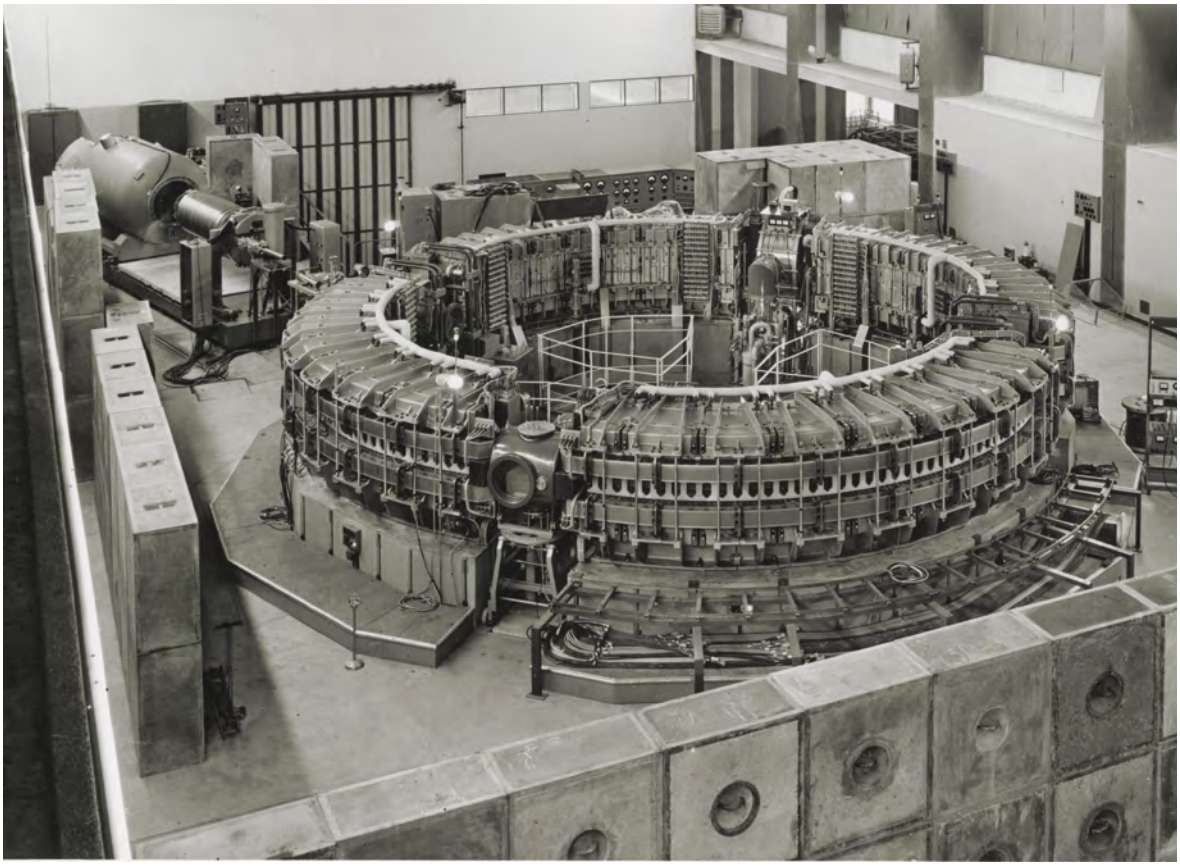
In questo contesto, il ruolo chiave svolto dai calcolatori è quello di gestire e analizzare l'enorme quantità di dati proveniente dagli apparati sperimentali: gli esperimenti di Lhc producono qualche decina di petabyte (10^{16} byte) di dati per anno, in modo da isolare gli eventi fisicamente interessanti e derivare da essi le quantità da confrontare con le predizioni teoriche. Una sfida che ha portato allo sviluppo della *Computing Grid*, oggi evoluta nel concetto di *Computing Cloud*, ormai adottato in modo universale (vd. Asimmetrie n. 13, ndr).
Da questo tipo di analisi emerge chiaramente una nuova direzione di sviluppo, caratterizzata dall'utilizzo sempre più significativo di tecniche di intelligenza artificiale. In particolare, il *machine learning* sta affiancando (e probabilmente soppiantando) tecniche di analisi tradizionali in aree come la classificazione degli eventi e l'identificazione di particelle (vd. p.15 in Asimmetrie n. 27, ndr). Vanno ancora chiariti alcuni aspetti legati alla stima degli errori, di fondamentale importanza in fisica, ma la strada è ormai chiaramente aperta.
Nel futuro più lontano, in fisica ma anche in altri campi della scienza e dell'ingegneria, si delinea lo sviluppo dei computer quantistici, calcolatori che seguono le leggi della meccanica quantistica. La sostituzione del bit (in grado di immagazzinare uno 0 oppure un 1) con il "*q-bit*" (che può essere contemporaneamente in una arbitraria sovrapposizione dello stato |0> e dello stato |1>) permette a un sistema di N *q-bit* di eseguire un'operazione contemporaneamente su 2N diversi valori numerici, incrementando esponenzialmente le prestazioni di calcolo. I problemi (sia concettuali che tecnologici) da risolvere sono ancora molti e richiederanno anni di lavoro e ingenti investimenti, ma l'aspettativa è di poter simulare realisticamente sistemi fisici in tutti i loro dettagli quantistici, come pure di risolvere problemi di ottimizzazione e di classificazione con una risoluzione estremamente più elevata di quella attuale.

Biografia
Raffaele Tripiccione, dopo aver studiato all'Università di Pisa e alla Scuola Normale Superiore, è stato ricercatore Infn fino al 2000 e poi professore all'Università di Ferrara, fino alla sua improvvisa scomparsa, nel novembre 2021. La sua attività di ricerca, inizialmente nell'area della fenomenologia delle particelle elementari e della teoria di campo, ha riguardato la fisica teorica computazionale, in particolar modo lo studio delle proprietà statistiche dei sistemi complessi. Tripiccione ha avuto un ruolo importante nelle iniziative Infn relative allo sviluppo di sistemi di calcolo dedicati per la fisica teorica.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.31.10

Tu mi fai girar.

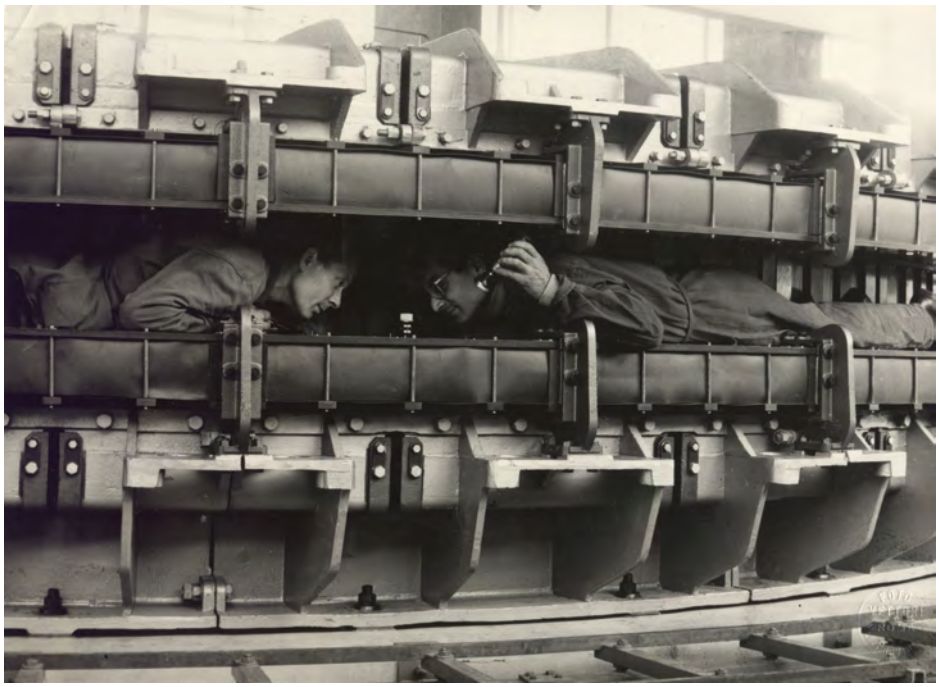
di Andrea Ghigo



a.
L'elettrosincrotrone di Frascati e il suo iniettore Van de Graaff (in alto a sinistra nella foto) al termine dell'installazione.

L'elettrosincrotrone di Frascati è stato il primo acceleratore di particelle di alta energia realizzato in Italia, precedendo la serie di collisori di particelle-antiparticelle che ha avuto il suo primo esemplare al mondo proprio nei Laboratori Nazionali di Frascati. Nell'immediato dopoguerra Enrico Fermi, che si era recato in America per evitare le persecuzioni razziali, suggerì a Edoardo Amaldi di costruire un acceleratore di particelle per produrre "in casa" in maniera più sistematica i fenomeni che venivano studiati con i raggi cosmici. Nonostante le insistenti richieste al governo di Amaldi e di Gilberto Bernardini, le ristrettezze economiche di quegli anni resero possibile solo la costruzione di un laboratorio in alta quota, per studiare meglio i raggi cosmici, sulla Testa Grigia nel massiccio del Cervino, nel quale fisici di diverse sedi universitarie crearono forti legami scientifici e personali che favorirono la nascita e lo sviluppo dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn).
Nei primi anni '50, nei neocostituiti Infn e Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari (Cnrn poi divenuto Cnen), si discusse la realizzazione di un acceleratore

di elettroni con energia compresa fra 500 e 1000 MeV. Grazie al supporto del ministro dell'industria Pietro Campilli, dopo una disputa sul luogo che avrebbe ospitato la nuova infrastruttura, fu deciso il sito di Frascati anche grazie a una donazione di un appezzamento di terreno da parte del comune alla "Sezione Acceleratore" romana. A Giorgio Salvini (che aveva appena 33 anni!) fu dato l'incarico di dirigere e formare una squadra di bravi giovani fisici e ingegneri reclutandoli nelle diverse università italiane.
L'elettrosincrotrone di Frascati venne costruito per accelerare elettroni fino a un'energia massima di 1 GeV, inviati poi su un bersaglio per produrre un fascio di raggi gamma (γ) di energia massima pari all'energia degli elettroni che li avevano generati. L'interazione di questi fasci γ con la materia permetteva di studiare le forze nucleari ed elettromagnetiche fra particelle elementari. Era chiaro che occorreva avere un fascio γ ad alta intensità per studiare anche i fenomeni più rari. Bisognava quindi decidere quale acceleratore costruire. Un acceleratore lineare avrebbe fornito alte intensità ma con durate temporali dei fasci γ molto brevi (qualche microsecondo), mentre il più consolidato betatrone era troppo grande e costoso per quelle energie. Alla fine si optò per il sincrotrone, che portava la durata dei fasci γ a qualche millisecondo e permetteva di condurre più agevolmente gli esperimenti previsti.
Il sincrotrone ha un principio di funzionamento abbastanza semplice concettualmente, ma la sua realizzazione è di una complessità spettacolare: un fascio di elettroni viene preaccelerato a energia moderata da un acceleratore elettrostatico e poi inviato in una camera a vuoto di forma anulare posta dentro il traferro di un elettromagnete a campo periodico. In particolare, la macchina di Frascati era costituita da quattro settori magnetici spaziati da sezioni dritte nelle quali venivano poste le cavità a radiofrequenza che acceleravano gli elettroni. Dal '53 al '56 si studiarono e realizzarono le varie componenti dell'acceleratore mentre a Frascati venivano costruiti gli edifici che avrebbero ospitato il sincrotrone e i suoi impianti: nel 1958, finalmente, il sincrotrone entrò in funzione con successo.
I fisici, gli ingegneri e i tecnici che costituivano lo staff si cimentarono con problematiche e apparecchiature mai viste prima e così il personale delle ditte, in gran parte italiane, che parteciparono alla costruzione (Ansaldo S. Giorgio, C.G.E., Ducati, Galileo, Guffanti, Passoni e Villa). Si stabilì uno spirito di collaborazione al di là delle normali relazioni commerciali, che proseguì fino al raggiungimento dell'energia prevista e un'intensità cinque volte superiore rispetto ai sincrotroni esistenti di pari dimensioni.
Gli esperimenti si susseguirono fino alla metà degli anni '70 con lo sviluppo di nuovi rivelatori adeguati alla copiosa produzione di eventi e lo studio di una grande varietà di processi e fenomeni: fotoproduzione di pioni carichi e neutri, processi elementari di elettrodinamica quantistica, studio dei fattori di forma nucleari, produzione elettromagnetica di coppie particella-antiparticella, fotoproduzione di particelle strane.
La nuova metodologia di lavoro fra fisici, ingegneri e tecnici fu la vera rivoluzione nel campo della fisica sperimentale che portò i Laboratori di Frascati a intraprendere negli anni a seguire la costruzione di acceleratori sempre innovativi rispetto al panorama mondiale: Ada, il primo collisore di materia e antimateria al mondo, Adone, il collisore elettrone-positrone di più alta energia all'epoca, Lisa, uno dei primi acceleratori superconduttori, Dafne, la prima "*factory*" di mesoni ϕ; e ancora l'innovativo fotoiniettore Sparc e, per il prossimo futuro, Eupraxia, un laser a elettroni liberi per lo sviluppo di acceleratori al plasma.



b.
Un ricercatore (Giampaolo Murtas) con un tecnico controlla i poli del magnete prima dell'installazione della camera da vuoto.

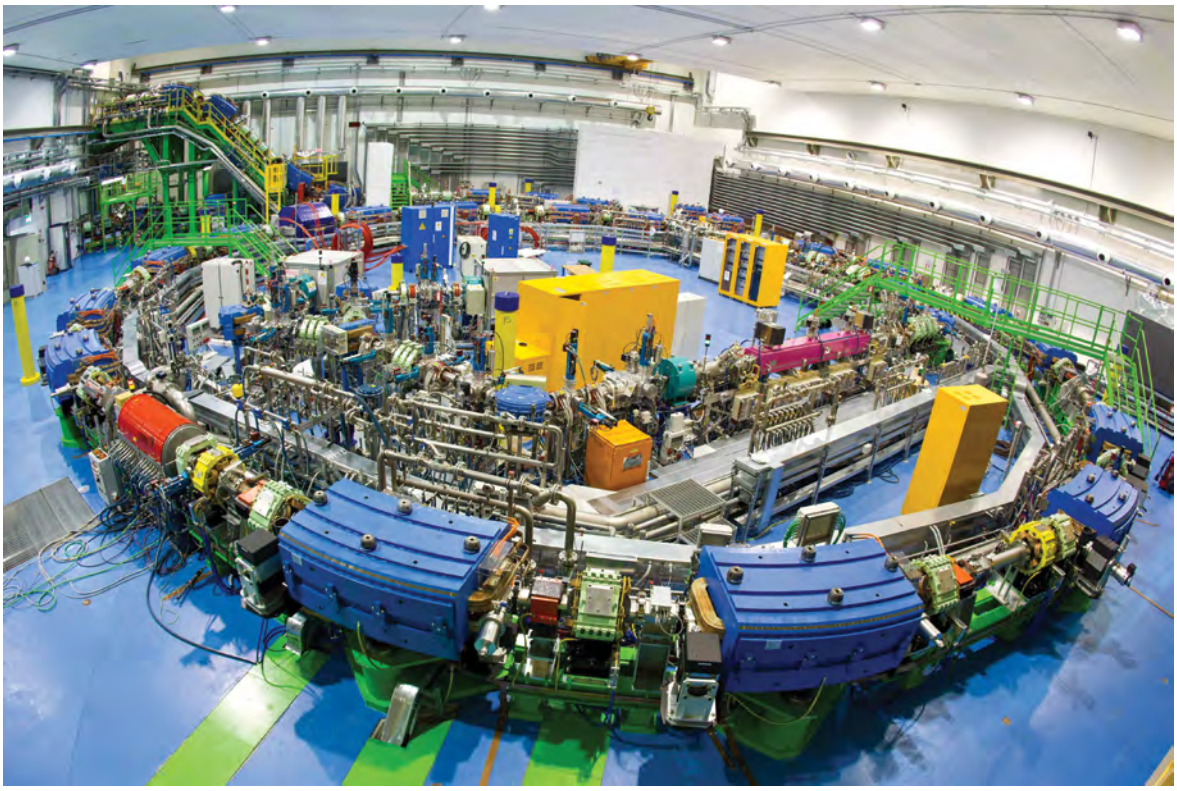
La fisica va dal medico.

di Angelica Facoetti

ricercatrice radiobiologa del Cnao

Sono solo sei i centri al mondo in grado di trattare tumori complessi con protoni e/o con ioni carbonio. Il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Cnao) di Pavia è, tra questi, l'unico in Italia.
L'adroterapia consente di trattare con estrema precisione tumori situati vicino a organi critici, utilizzando fasci di protoni o ioni carbonio generati da un acceleratore di particelle per danneggiare il Dna delle cellule e, quindi, distruggerle. Il principio di funzionamento, dunque, è simile a quello della radioterapia, ma protoni e ioni carbonio consentono di raggiungere tumori situati in profondità e di danneggiare meno i tessuti sani circostanti. In alcuni casi l'adroterapia può rappresentare l'unica opzione terapeutica per tumori non operabili o resistenti alla radioterapia convenzionale.

Per far funzionare un centro come il Cnao è necessario unire competenze di medicina, fisica, ingegneria e biologia. Ma non si tratta solo di far funzionare le cose: il progresso scientifico e tecnologico in questo campo è il frutto di una continua collaborazione, cooperazione e condivisione tra esperti di diverse discipline. Per studiare gli effetti delle radiazioni ionizzanti sulla materia bisogna infatti unire biologia molecolare, genetica, fisiologia, citologia, patologia, ecologia, fisica nucleare, dosimetria, biofisica, biochimica, radiochimica.
L'applicazione della fisica a un ambito che nulla ha a che vedere con le interazioni e le particelle elementari risale al 1895, con la scoperta dei raggi X, mediante un piccolissimo "acceleratore lineare", da parte di W. Roentgen, il quale diede inizio alla fisica applicata



a.
L'acceleratore di particelle (sincrotrone) del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Cnao) utilizzato per il trattamento dei tumori: un anello di 80 metri con diametro di 25, collegato alle sale del centro.

b.
Vista esterna dell'edificio che ospita a Pavia il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (Cnao).

alla medicina, una nuova era per la diagnostica medica e la cura dei tumori. In pochi mesi i raggi X cominciarono a essere utilizzati anche negli ospedali da campo militari, per radiografare i soldati feriti. Nel 1896 L. Freund ebbe l'intuizione di utilizzare i poco penetranti raggi X per curare un tumore superficiale di una bambina, che visse poi fino a settant'anni. La nascita dell'adroterapia, e quindi l'applicazione medica di acceleratori circolari, si deve a Bob Wilson, che nel 1946 sarà il primo a proporre l'uso degli acceleratori di protoni nella terapia dei tumori. L'adroterapia è oggi una forma avanzata di radioterapia, dove le nozioni acquisite in ambito radiobiologico rappresentano da sempre i punti di riferimento per ottimizzare i trattamenti radioterapici. A maggior ragione, dato il carattere innovativo di questa terapia, l'approfondimento delle conoscenze delle proprietà radiobiologiche degli adroni carichi è essenziale per valutare l'entità degli effetti biologici e sfruttare al meglio le sue potenzialità benefiche. Gli effetti biologici che vengono studiati in Cnao non si limitano alla sola sterilizzazione/morte delle cellule tumorali, ma comprendono anche gli effetti sulle cellule e sui tessuti sani irradiati, che sono altrettanto fondamentali per garantire un'adeguata qualità di vita dei pazienti trattati. Proprio l'importanza della ricerca radiobiologica è una delle basi su cui si poggia Inspirit, un progetto finanziato nel 2019 dalla Regione Lombardia che punta allo sviluppo di approcci radioterapici innovativi. In particolare, grazie a questo finanziamento, in Cnao verrà installata una nuova sorgente radiante di ioni che verrà messa a disposizione degli utenti per attività di ricerca e consentirà di testare e disporre di ioni sempre più precisi e adeguati per un trattamento radioterapico sempre più personalizzato. Al momento, infatti, la radioterapia con particelle cariche si basa sull'uso di protoni e ioni carbonio, ma nell'ultimo decennio si è riscontrato nella comunità scientifica un forte interesse nei confronti della possibilità di ampliare lo spettro di ioni usati e i recenti progressi tecnologici permetterebbero di sfruttare al meglio le peculiarità fisiche e radiobiologiche di altre specie ioniche. La disponibilità di una sorgente in grado di produrre fasci di ioni di elio, ossigeno, ferro, litio o boro costituisce un'occasione unica per poter sfruttare i vantaggi rispetto ai fasci convenzionali di fotoni, dovuti non solo a una migliore distribuzione della dose nei tessuti ma anche alle favorevoli caratteristiche radiobiologiche che determinano un maggiore effetto *killing* sulle cellule tumorali. L'obiettivo è quello di personalizzare al massimo il trattamento per ogni paziente, così da poter scegliere in futuro anche il tipo di ione più adatto alle caratteristiche del tumore e del paziente stesso. Oltre ad applicazioni alla ricerca clinica e radiobiologica, è noto l'interesse e il bisogno di una tale *facility* anche per le industrie (di rivelatori, di elettronica, dell'aerospazio). Un'ulteriore prova del valore internazionale dell'attività scientifica svolta dal Cnao è il fatto che il Centro sia il coordinatore del progetto Hitriplus (www.hitriplus.eu), finanziato nel 2021 dall'Unione Europea. Questo progetto, della durata di 4 anni, è dedicato alle infrastrutture di ricerca in Europa, e Cnao coordinerà l'attività scientifica di 22 Istituti di 14 diversi paesi europei, con l'obiettivo di creare una rete per integrare e promuovere la ricerca biofisica e medica per il trattamento dei tumori con fasci di ioni pesanti. Inoltre, nell'ambito di questo progetto, si svilupperanno nuovi strumenti dedicati a questa tecnica innovativa ed avanzata di radioterapia al fine di migliorarne le prestazioni e di favorire in Europa la diffusione dell'adroterapia con ioni pesanti. I quattro centri clinici europei di adroterapia condivideranno per la prima volta i loro dati e le loro esperienze per studiare più a fondo gli effetti radiobiologici degli ioni, per affinare la qualità e l'efficacia dei fasci di particelle estratti dagli acceleratori, con l'obiettivo generale di perfezionare ulteriormente il loro impiego in area clinica.

Per maggiori informazioni: www.cnao.it

Parola alle emulsioni nucleari.

di Giuliana Galati

a.
Lancio di palloni per lo studio dei raggi cosmici tramite emulsioni nucleari a Padova nel 1953.

Tra i rivelatori di particelle che hanno fatto la storia ci sono le emulsioni nucleari, speciali lastre fotografiche che consentono di ricostruire e misurare la traiettoria delle particelle in 3D con precisione inferiore al micron. Se potessero parlare ci racconterebbero oltre 75 anni di scoperte, e così abbiamo provato a interrogarle.

[as]: Partiamo dalle origini: quali sono stati i vostri primi successi?

[emulsioni nucleari]: Dobbiamo tantissimo alla scienziata Marietta Blau, che all'inizio del '900, insieme a Hertha Wambacher, mostrò come potevano essere usate le emulsioni nucleari per rivelare particelle cariche. Avrebbe meritato il Nobel, lo diceva anche Schrödinger... ma erano tempi difficili per le donne, ancora più difficili per le donne ebree come lei.
Nel 1946 Cecil Frank Powell decise di puntare su di noi per le ricerche sui raggi cosmici e sulle particelle elementari. Fu da subito un successo: nel giro di un anno, insieme a Cesare Lattes e Giuseppe Occhialini, furono scoperti il pione e il decadimento del muone. Powell vinse anche il premio Nobel per la fisica nel 1950 per le sue ricerche sulle emulsioni e per le scoperte fatte!
Grazie a noi si sono aperte tante strade...

[as]: Tante strade? Per esempio?

[e]: Eh sì, ci sono molti vantaggi nell'usarci! Ci si può portare ovunque, senza bisogno di elettricità, possiamo tenere traccia di particelle con vita media brevissima...
Nel 1955 l'Europa era ancora devastata dalla seconda guerra mondiale. La voglia di ricominciare e di ricostruire una solidarietà tra i vari paesi europei era tanta, ma i mezzi pochi. Bisognava unirsi in gruppi più grandi, che andassero oltre i confini nazionali. Il G-Stack (G per Giant, "gigante") era l'esperimento perfetto: un grande pallone aerostatico con un unico blocco di emulsioni nucleari, del volume di 15 litri, per risolvere il cosiddetto paradosso $\tau - \theta$, in modo da chiarire se le particelle τ e θ fossero diverse o la stessa con decadimenti differenti. Grandi anni quelli!

[as]: E come andò a finire?

[e]: Un'ansia! Al termine dell'esperimento avevamo paura che il paracadute non si aprisse e il carico andasse distrutto. E infatti il paracadute non si aprì! Ma per fortuna cademmo su un albero e dei contadini segnalarono la nostra presenza, così che qualcuno poté venire a recuperarci. Con i dati raccolti si capì che alcune particelle che sembravano diverse solo per i modi di decadimento erano in realtà uguali fra loro. Ma quello scientifico non fu l'unico risultato importante: per la prima volta si passò dalla "*little science*" alla "*big science*" a cui siamo abituati oggi, fatta da collaborazioni internazionali.

[as]: E oggi? Siete ancora presenti nel panorama della fisica?

[e]: Certamente! Da poco si è concluso l'esperimento Opera, il più grande che abbia fatto uso di emulsioni nucleari: eravamo in 9 milioni, racchiuse in 150.000 mattoncini che, insieme a rivelatori elettronici, formavano un rivelatore grande quanto un palazzo di quattro piani, posto al riparo dai raggi cosmici nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Eravamo l'unico rivelatore in grado di vedere il leptone tau, la cui vita media è dell'ordine di 10^{-13} secondi, prodotto da neutrini tauonici. Vedere il leptone tau indicava ai fisici che un neutrino, partito di tipo muonico dal Cern, si era trasformato in neutrino di tipo tauonico durante il tragitto per arrivare al rivelatore. In questo modo è stato confermato che i neutrini si possono trasformare da un tipo all'altro, scenario già ipotizzato da altri esperimenti.
Ma non è tutto: ci piace anche viaggiare!

[as]: Viaggiare? In che senso?

[e]: Funzionare senza elettricità ha molti vantaggi e ci permette di visitare posti bellissimi. C'è una tecnica chiamata "tomografia muonica" che sfrutta i muoni che arrivano dallo spazio per fare speciali radiografie. Siamo state alle pendici di vulcani come lo Stromboli oppure in Egitto a vedere la piramide di Cheope (vd. p. 28 in Asimmetrie n. 23, ndr). Grazie a questa tecnica, all'interno della Piramide è stata scoperta una camera segreta!

[as]: Cosa si prospetta nel vostro futuro?

[e]: Per ora stiamo partecipando a un esperimento chiamato Foot, che mira a ottenere dati per migliorare i piani di trattamento in adroterapia (vd. p. 38, ndr), tecnica molto promettente per la cura di alcuni tumori. Nel giro di un anno, invece, inizieremo a prendere dati per un esperimento al Cern: Snd@Lhc. Cercheremo neutrini e materia oscura ad alte energie e siamo molto emozionate all'idea di essere il nono esperimento che fa uso del grande acceleratore Lhc. Ma non è tutto! Stiamo anche cercando di evolverci e superare i nostri limiti.

[as]: Quali limiti?

[e]: Con una precisione inferiore al micron siamo già sul podio dei rivelatori più precisi dal punto di vista spaziale. Ma volevamo andare oltre e raggiungere la precisione del nanometro. Così sono state sviluppate delle emulsioni chiamate Nit. Ma non basta... Per vedere le tracce lasciate dalle particelle cariche al nostro interno bisogna usare appositi microscopi, e la risoluzione che i microscopi possono raggiungere è limitata dal criterio di Rayleigh: due punti troppo vicini tra loro non si riescono a distinguere e appaiono come un punto unico. Perciò, per analizzare le Nit sono state sviluppate nuove tecniche che fanno uso di luce polarizzata: i punti che con i microscopi standard non riescono a distinguersi sembrano accendersi uno per uno come lampadine!

[as]: Cosa si potrà fare con queste Nit?

[e]: L'obiettivo è cercare tracce di materia oscura. Chissà, se ci riuscissimo potremmo vincere un nuovo premio Nobel!

b.
Ricercatori e ricercatrici dell'Infn sul vulcano Stromboli, in Sicilia, alle prese con l'installazione di un rivelatore basato su emulsioni nucleari per effettuare una "tomografia muonica".

Sinergie.

di Matteo Massicci

La realizzazione dei complessi apparati sperimentali necessari per lo studio dei costituenti ultimi della materia non può prescindere dalle capacità del settore industriale. Alla luce della centralità dell'apporto industriale, istituti e centri di ricerca internazionali vengono coadiuvati nella gestione dei rapporti con le aziende dei vari paesi da figure specifiche, come Mauro Morandin, ricercatore Infn e *Industrial Liaison Officer* del Cern per l'Italia.

[as]: Che ruolo svolge oggi l'industria all'interno del processo di realizzazione degli strumenti della fisica?

[Mauro]: Il ruolo dell'industria è fondamentale. Non si potrebbero evidentemente realizzare i grandi acceleratori e i rivelatori estremamente complessi di cui ci serviamo oggi senza l'apporto di notevoli capacità e competenze industriali al servizio della ricerca. La cosiddetta *Big Science*, che la fisica fondamentale ha contribuito a creare, si basa di fatto sulla collaborazione continua fra ricerca e industria. Si tratta di una sinergia che si sviluppa su due binari principali: da una parte il mondo della ricerca sviluppa componenti innovative e interagisce con l'industria per trasformare soluzioni prototipali in prodotti che devono poi essere realizzati in serie, rispettando rigorosi standard qualitativi, dall'altra è talvolta l'industria che, in alcuni settori ad alto tasso di innovazione, come quello della microelettronica, fornisce al mondo della ricerca soluzioni tecnologiche con caratteristiche sempre più spinte.

[as]: Quali sono i rapporti che legano oggi la fisica all'industria e in che modo queste due realtà collaborano al fine di realizzare i dispositivi utili alla prima?

[M]: La gran parte delle interazioni fra industria e ricerca avviene sotto forma di commesse industriali, che vengono affidate tramite procedure competitive. A volte non è facile trovare aziende in grado di realizzare ciò che viene concepito dai ricercatori. Per questo laboratori come il Cern si servono, oltre che di un proprio albo fornitori, anche della collaborazione di una rete di *Industrial Liaison Officer*, uno per ciascuno stato membro, che possono più agevolmente ricercare e contattare partner industriali nei loro paesi. Inoltre, nell'ambito delle molte collaborazioni in atto, sono spesso gli istituti di ricerca, partner del Cern, che contribuiscono a coltivare e sviluppare i contatti con aziende del proprio paese, mettendole nelle condizioni di acquisire visibilità verso una comunità più vasta a livello europeo e, a volte, extra-europeo. Altri rapporti con l'industria si formano per attività di trasferimento tecnologico, quando aziende vengono create (*spin-off*) o coinvolte per sfruttare sviluppi suscettibili di originare nuovi prodotti, servizi o processi produttivi. Infine, i progetti di ricerca, in particolare quelli finanziati dall'Europa, stimolano la collaborazione con le aziende allo scopo di creare innovazione che spesso ha come finalità immediata il raggiungimento di obiettivi scientifici, ma presenta anche potenzialità di applicazioni al di fuori del mondo della ricerca.

[as]: Quali sono i benefici reciproci derivanti dalla collaborazione tra la fisica delle particelle e l'industria?

[M]: Come accennato in precedenza, la fisica beneficia grandemente dei progressi che avvengono in specifici settori industriali. D'altro canto, l'industria, interagendo con il mondo della ricerca, trova nuove opportunità di business e trae vantaggi per la propria competitività. L'esempio del Cern può essere illuminante a questo riguardo. Il Cern spende una cifra ragguardevole, oltre 500 milioni di franchi svizzeri all'anno per commesse industriali, un po' meno della metà del suo budget. Inoltre, studi effettuati negli ultimi anni evidenziano come l'interazione con il laboratorio abbia un impatto importante per le aziende, in particolare per quelle che sviluppano prodotti a elevato contenuto tecnologico. Un sondaggio effettuato nel 2017 ha evidenziato ad esempio che, a seguito dell'interazione con il Cern, il 48% delle aziende ha migliorato prodotti e servizi, il 55% ha migliorato le competenze tecniche nel proprio campo, il 62% ha potuto servirsi del laboratorio come riferimento per il marketing e così via.

[as]: Quali sono le ricadute nella produzione industriale ordinaria derivanti da queste collaborazioni? Può farci qualche esempio?

[M]: Uno dei settori in cui l'interazione con la ricerca in fisica dà origine con una certa continuità ad applicazioni e prodotti rivolti al mercato globale, è senz'altro quello della sanità. Basti pensare alle aziende che costruiscono acceleratori e strumentazioni per la medicina, che in molti casi hanno acquisito *know-how* proprio come fornitori di componenti per i laboratori di fisica. Lo stesso sviluppo di grossi magneti superconduttori, costruiti appositamente per la fisica delle particelle, ha favorito il consolidamento di conoscenze utili per creare, ad esempio, macchine per la risonanza nucleare. A volte, però, le ricadute importanti a livello industriale non sono solo quelle legate all'innovazione, ma anche quelle riguardanti l'internazionalizzazione e l'apertura di nuovi mercati. Ad esempio, la sottoscrizione di contratti quadro pluriennali per la fornitura di servizi di ingegneria civile o di manutenzione di impianti industriali al Cern è stata sfruttata da alcune aziende come testa di ponte per espandere la propria presenza sul territorio svizzero e francese.

b.
Criostato per il test di magneti superconduttori al Cern, prodotto da Alca Technology a Schio (VI).

[as] con altri occhi

Dissonanze.

di Umberto Petrin

pianista jazz, compositore, poeta

All'età di dieci anni decisi che sarei diventato un chimico. Mio cugino, più vecchio di me di qualche anno, preferiva l'astronomia. Parlava spesso dell'universo, delle orbite e di quei corpi celesti dai nomi il cui suono richiamava immagini ancestrali o avveniristiche. Leggeva testi di astronomia e il suo vocabolario comprendeva parole come quasar, pulsar, supernova, nana bianca. Ad ascoltarle mi accendevano l'immaginazione.
"Una stella di neutroni", disse una volta, e io, anni dopo, presi in prestito quella definizione per indicare certe ragazze che ti sembrano irraggiungibili, ma del cui splendore avverti il segnale a distanza. Non le vedi ma ti martellano la mente con flussi di frequenze che non riesci a contrastare. Con una "stella di neutroni" la partita era persa. Almeno per me.

Quando mi iscrissi all'Istituto tecnico per Chimici, mio cugino si trasferì a Padova per frequentare la facoltà di Astronomia. Le nostre strade si divisero. In seguito mi diplomai come perito chimico e lui fu assunto all'Osservatorio di Pino Torinese, dove attualmente lavora.
Nel frattempo, però, per me cambiarono molte cose: mi appassionai all'arte, alla poesia, alla musica. Iniziai a scrivere, preparai gli esami al conservatorio, mantenendo intatto il mio interesse parallelo per le materie che studiavo a scuola. Mi accorgevo di quanto l'arte rispondesse alla legge di Lavoisier sulla conservazione della massa, quella che tutti conosciamo, secondo cui "nulla si crea, nulla si distrugge, tutto si trasforma". Ne dedussi che in fondo nessun artista inventava davvero nulla, ma

b.
Umberto Petrin al pianoforte durante l'evento "Di arte e di scienza", una conferenza spettacolo organizzata dall'Infn come evento conclusivo della prima edizione di "Art&Science across Italy" (Napoli, Teatro Diana, 6 aprile 2017).

trasformava, riplasmava qualcosa di preesistente. Persino gli avanguardisti non distruggevano, ma trasformavano, nell'intento di forgiare un nuovo lessico. È eloquente la dedica che T.S. Eliot rivolge a Ezra Pound, definendolo "il miglior fabbro". E come la scienza, anche l'arte è ricerca e percezione. E intuizione. Credo che uno scienziato debba inevitabilmente possedere una buona dose di intuito, quell'attitudine che ti permette di ricavare da un sogno la struttura del benzene, come pare che sia accaduto a Kekulé dopo la metà del XIX secolo.
Mi hanno sempre affascinato i libri di fisica e la mia materia preferita a scuola era la chimica fisica. Anche dopo aver terminato l'Istituto Tecnico ed essermi avviato decisamente verso la musica e la poesia contemporanea, conservai un libro, che in realtà in aula era la nostra penitenza: si tratta del volume *Chimica Fisica* di Gordon M. Barrow. Un'ossessione, quasi una calamità.
Mi piaceva di tanto in tanto rileggerne alcune parti, perché riconoscevo in quel linguaggio scarno, essenziale ma estremamente preciso e denso una forma di poesia. Ogni parola era disposta in modo accurato, insostituibile, incontrovertibile. Possedeva un ritmo che rimandava alla musica contemporanea o a certo astrattismo analitico dell'arte visiva.
Nel linguaggio scientifico non c'è nulla di superfluo o di iperbolico, proprio come accade nelle sculture di Alberto Giacometti. Per rimanere in tema, quando mi appassionai alle opere dei grandi scultori contemporanei come Richard Serra o i nostri Giuseppe Spagnulo ed Eliseo Mattiacci, ritrovai nei loro lavori i concetti di materia, massa, spazio e gravità trasferiti a livello di forma e volume.
Più recentemente, a Venezia, ebbi l'occasione di ascoltare la resa sonora del segnale provocato dalla collisione di due buchi neri. Era ipnotico, ma mi fece riflettere sul fatto che molti suoni da noi prodotti sinteticamente con le tastiere elettroniche, in realtà sono già presenti nel cosmo allo "stato puro", come si dice per gli elementi chimici.
A volte mi chiedo quanto sarebbe diversa la mia vita se avessi proseguito con la chimica; mi piace credere che in qualche modo abbia informato parte del mio pensiero estetico. E quando mi guardo indietro è come se il tempo trascorso fosse breve, probabilmente perché il tempo, quello fisico come quello poetico, in fondo non è mai assoluto.

Fisica tra le onde.

di Cecilia Collà Ruvolo

a.
Fotogramma estratto dall'episodio "Come funzionano i pannelli fotovoltaici?" della prima serie di "La fisica tra le onde". Nina spiega che sulla barca che ospita il "Floating Lab" hanno tre gruppi di pannelli fotovoltaici che a bordo sono la principale fonte di energia elettrica.

Imparare dall'esperienza della vita quotidiana e dai racconti dei propri coetanei è lo spirito che accompagna "La fisica tra le onde", la rassegna video in cui la fisica è raccontata dai bambini ai bambini. L'idea è nata dall'Infn in collaborazione con la famiglia Barberis-Rossini, che da più di un anno sta vivendo un'avventura in barca a vela. Mamma creativa, papà tecnologo della sezione Infn di Milano, Iago (12 anni), Nina (9 anni) e Timo (4 anni): a ottobre 2020 hanno lasciato la terraferma e la loro barca "Shibumi" è salpata dal fiume Magra (La Spezia) alla volta di Capraia, Arcipelago della Maddalena, Stintino, Alghero e poi Minorca, Maiorca, Ibiza. Da gennaio 2021 sono rimasti bloccati dalla pandemia a Formentera fino ad agosto, quando si sono rimessi in viaggio verso sud.
Durante il loro viaggio, hanno incontrato online molte classi della scuola primaria e secondaria di I grado, per raccontare la loro avventura e la loro esperienza scientifica, sensibilizzando ragazze e ragazzi su produzione e consumo di energia, sulle fonti rinnovabili, su come vivere in modo sostenibile e sull'ambiente marino e la sua salvaguardia.
La barca a vela può essere un perfetto laboratorio sulla fisica che sta dietro la navigazione, o il luogo adatto per osservare il cielo lontani dalle luci delle città; ma questa barca offre anche uno spunto per parlare di un altro tema che intreccia la quotidianità con la fisica e che è molto attuale per la nostra società: l'energia, la sua produzione e il suo consumo. Tre gruppi di pannelli fotovoltaici, un generatore eolico e, giusto all'occorrenza, il motore della barca, rendono Shibumi autosufficiente dal punto di vista energetico e ne fanno gli elementi di un laboratorio

galleggiante, “Floating Lab”, per monitorare la produzione e il consumo dell'energia a bordo. La famiglia svolge misure e analisi sull’energia prodotta da sole e vento e analizza i consumi di cinque persone che non si fanno mancare i comfort che potrebbero avere a terra. Il monitoraggio energetico è reso pubblico e mostra in tempo reale i grafici sulla produzione di energia elettrica in base alle condizioni atmosferiche e il consumo dell’energia raccolta nelle batterie.
Dall’inizio di questa avventura l’Infn patrocina il Floating Lab su Shibumi e alcuni ricercatori delle sezioni Infn di Milano e Milano Bicocca collaborano ai contenuti tematici portati nelle scuole da Stefano e Sara e soprattutto dai bambini.
Il Floating Lab sulla barca è stato lo spunto per realizzare la prima serie di “La Fisica tra le onde”: 10 brevi puntate della durata di 3 o 4 minuti per raccontare ai bambini e alle bambine della scuola primaria e secondaria di I grado che cos’è l’energia e la fisica che si nasconde negli strumenti che usiamo per trasformarla. I narratori sono i bambini di Shibumi che, con il supporto del papà Stefano e dei disegni della mamma Sara, dialogano per scoprire e raccontare come funziona la produzione e il consumo di energia a bordo e sulla terraferma. Le puntate sono state pubblicate sui canali social dell’Infn durante l’estate scorsa per accompagnare i bambini alla scoperta dell’energia e fornire materiale per aiutare docenti e genitori a raccontare questo argomento, partendo da un’avventura e dall’esperienza pratica di altri bambini. Da settembre, con il rientro a scuola, la serie va in onda integralmente ogni lunedì pomeriggio su Rai Gulp durante la trasmissione “La Banda dei Fuoriclasse”, programma realizzato in collaborazione con il Ministero dell’Istruzione, nato nell’aprile 2020 per contribuire ad aiutare la scuola durante l’emergenza dovuta alla pandemia da Covid-19, quest’anno completamente dedicato alle Stem. A partire dalle puntate, inoltre, in collaborazione con il progetto Infn Kids è stata realizzata un’attività didattica con esperienze di laboratorio sull’energia portata al Festival della Scienza di Genova 2021.
“Pensiamo che avvicinare alla fisica i bambini grazie all’esperienza e ai racconti di altri bambini come loro sia un processo divertente e coinvolgente che aiuta a spiegare cosa accade nel mondo intorno a noi”, racconta Stefano Barberis.
Da agosto il viaggio è proseguito per Malaga e Gibilterra, verso la meta: le Canarie, che nell’isola di La Palma ospitano l’osservatorio Magic, i cui due telescopi puntano lo sguardo verso l’universo per vedere i raggi gamma ad alta energia provenienti da remote sorgenti cosmiche.
Proprio questa meta è l’occasione per la seconda serie di “La Fisica tra le onde” dedicata questa volta al tema dei raggi cosmici, che sarà pubblicata nel 2022 nell’ambito di un ciclo di dirette online per le scuole secondarie di I grado. Oltre al laboratorio di monitoraggio energetico, dall’estate scorsa Shibumi ospita, infatti, anche un piccolo rivelatore di raggi cosmici: il Cosmocube, progettato da Riccardo Paoletti e Fabio Morsani della sezione Infn di Pisa. È una composizione di scintillatori plastici a geometria variabile per fare misure sul flusso di particelle a seconda delle condizioni di pressione e temperatura, dell’altitudine e dell’angolo a cui avviene la misura. Questo strumento è lo spunto per far raccontare da Timo, Nina e Iago la fisica dei raggi cosmici, e per organizzare incontri online con ricercatori e ricercatrici dell’Infn che li studiano ogni giorno.

b.
Nina, Timo, Iago e il papà, Stefano Barberis, sulla barca “Shibumi” dopo aver ricevuto il “Cosmocube”, il rivelatore di raggi cosmici con cui scopriranno e racconteranno il mondo della fisica dei raggi cosmici.

La prima serie di “Fisica tra le onde”: https://collisioni.infn.it/evento/la-fisica-tra-le-onde-energia-bambini/

La seconda serie di “Fisica tra le onde”:
- canale YouTube: https://www.youtube.com/user/comunicazioneINFN
- pagina Facebook: https://www.facebook.com/IstitutoFisicaNucleare/

Un’app cosmica!

Cosmic Rays Live è un’app scaricabile su smartphone (Android e iOs) per la visualizzazione in tempo reale del passaggio di particelle contenute negli sciami di raggi cosmici che arrivano continuamente sulla terra. Particelle invisibili a occhio nudo, come i muoni, che possono essere osservate attraverso occhi elettronici come il rivelatore Cosmic Ray Cube (Crc) collegato all’app, con la possibilità di salvare sul cellulare interi set di dati raccolti selezionando uno dei siti dove sono dislocati i rivelatori.
Il laboratorio didattico, denominato “Misura della rate di muoni cosmici” nella sezione Laboratorio sul sito di Ocra (in inglese Outreach Cosmic Ray Activities) dell’Infn (vd. p. 46 in Asimmetrie n. 27, ndr), descrive in dettaglio il Crc e, nell’ottica di garantire diversi livelli di coinvolgimento degli studenti, affronta aspetti che spaziano dalla tecnologia, all’uso dell’app per l’acquisizione dei dati, fino a utilizzare programmi e software per l’apprendimento della matematica e della fisica, come Excel e Geogebra.
Il Crc è un telescopio di muoni progettato e realizzato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) da un’idea di Attanasio Candela, per essere utilizzato in attività di didattica e di *public engagement*, anche grazie alla sua struttura compatta e alla possibilità di essere alimentato a batteria. Dotato di led che si accendono al passaggio delle particelle che lo attraversano, consente di seguirne a occhio nudo la traiettoria. Dispositivi analoghi o di dimensioni maggiori sono stati realizzati, in collaborazione con i Lngs, presso altri centri di ricerca e università internazionali, come il Laboratorio Subterraneo di Canfranc (Lsc) in Spagna, la New York University di Abu Dhabi (Nyu-Abu Dhabi), il Laboratorio Snolab in Canada, il Laboratorio di Kamioka in Giappone, la sezione Infn di Napoli e la stazione Toledo della metropolitana di Napoli.
In particolare, il percorso didattico prevede la ricostruzione della traccia rivelata dal Crc a partire dai dati acquisiti con l’app *Cosmic Rays Live* attraverso uno dei telescopi collegati in rete. Ciò consente di poter coinvolgere gli studenti anche in occasioni di didattica a distanza o in eventi internazionali, come l’International Cosmic Day organizzato da Desy (vd. p. 26 in Asimmetrie n. 23, ndr).
Il laboratorio “Misura della rate di muoni cosmici” si inserisce all’interno di una serie di attività online disponibili sul sito di Ocra (https://web.infn.it/OCRA/), pensate non solo per essere svolte dagli studenti individualmente e in aula dagli insegnanti, ma anche per corsi di formazione per docenti.
[Carla Aramo e Alessia Giampaoli]

Link del laboratorio “Misura della rate di muoni cosmici”:
https://web.infn.it/OCRA/misura-della-rate-di-muoni-cosmici/

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
comedu@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
visiteguidate@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it

Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento

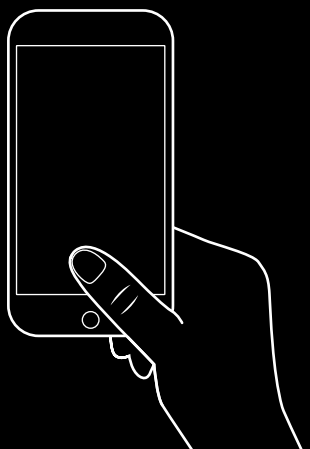
Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/faq

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.

DISPONIBILE SU App Store

DISPONIBILE SU Google Play



ISSN 1827-1383
9 771827 138009

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it