Al CERN la scienza, un ponte tra culture

Al CERN la scienza, un ponte tra culture

a cura di Marilena Streit-Bianchi

Ginevra
2018

Il presente libro è disponibile anche in inglese (v.o.), francese, tedesco e portoghese.

Illustrazioni di copertina:
“Pushing particles near to the speed of light” Justino António Cardoso 2015, Inchiostro di china (fronte)
“Geneva Switzerland” Justino António Cardoso 2015, Inchiostro di china a colori (retro)

© 2018 Libro Open Access:
Articoli disponibili secondo la licenza **CC BY** (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Opere degli artisti disponibili secondo la licenza **Attribution-Non Commercial-ShareAlike 4.0 International license** (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).
Referenze articoli o opere d’arte: [[Nome dell’autore o artista]], [[Titolo dell’articolo o dell’opera]] in: “Al *CERN la scienza, un ponte tra culture”* a cura di Marilena Streit-Bianchi, 2018, pp. [[numero della pagina]]
DOI: 10.5281/zenodo.1196808

Questo libro è dedicato al Dottor Karl-Peter Streit fisico, assistente del Professore Volker Soergel, che fu membro dell'Università di Heidelberg e partecipò alle esperienze WA2, WA42 e WA46, dedicandosi allo studio degli iperoni. In particolare, nel 1983 la collaborazione WA62, di cui Karl-Peter fu portaparola, dimostrò l'esistenza del barione con stranezza e charm A^+ (csu) a 2.46 GeV/c^2 e, nel 1984, del barione charm con doppia stranezza T^0 (csu) a 2.74 GeV/c^2. Dopo diverse esperienze professionali nell'industria, il Dottor Streit ha lavorato nel gruppo del Professore Allan Clark al Dipartimento di fisica nucleare e corpuscolare (*Département de physique nucléaire et corpusculaire)* dell'Università di Ginevra sulla resistenza alle radiazioni del rivelatore a pixel di silicio per i futuri upgrade del tracker dell'esperimento ATLAS (IBL, Insertable B layer, e HL-LHC, High Luminosity LHC). Per molti anni Karl-Peter Streit è stato un utilizzatore del CERN che ha rappresentato il suo luogo di appartenenza professionale e intellettuale dal punto di vista scientifico, culturale e umano.

Marilena Streit-Bianchi e Rolf Heuer

Prefazione

Il CERN, come lo conosco personalmente, è stato ed è il luogo in cui la conoscenza, le competenze tecniche e la comprensione trovano la loro dimora. È stato così fin dall'inizio della fondazione dell'Organizzazione negli anni '50 e continuerà ad essere la motivazione principale che spinge le persone, che lavorano nel settore della ricerca e delle varie attività operative, ad avanzare le frontiere della propria comprensione delle forze fondamentali che agiscono in natura, indipendentemente dai loro confini geografici o dalle loro idee preconcette.

Questo libro permette di dare uno sguardo anche ad aspetti meno conosciuti ma non meno importanti delle attività che si svolgono al CERN e che contribuiscono allo svolgimento della ricerca fondamentale in fisica delle alte energie. Il CERN non solo rappresenta la principale espressione di ricerca, tecnologia ed innovazione, ma è anche un vero e proprio crogiolo di diversità di competenze umane.

La scienza e l'arte hanno come comune denominatore: la creatività e la voglia di esplorare. Il presente libro vuole riunificare questi due mondi, così come erano un tempo, e dimostrare come artisti di diverse origini culturali percepiscono il CERN*. In particolare, il lavoro dell'artista grafico mozambicano Justino António Cardoso dona a questo manoscritto un tocco africano inconfondibile e unico.

Per concludere, colgo l'occasione per ringraziare calorosamente tutti coloro che, nonostante fossero assorbiti dal proprio lavoro quotidiano di ricerca scientifica o artistica, hanno trovato il tempo di contribuire benevolmente alla realizzazione di questa pubblicazione nelle sue diverse versioni linguistiche.

Rivolgo inoltre un sentito ringraziamento a:

- Sergio Bertolucci, Professore dell'Università di Bologna e già Direttore della Ricerca e dell'Informatica al CERN, per il sostegno dato a Justino António Cardoso durante la sua permanenza al CERN.
- João Penedones Fernandes, Professore di fisica all'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) per le spiegazioni date a Justino António Cardoso sulle finalità scientifiche e le attività che si svolgono al CERN.
- José Carlos Rasteiro Da Silva, ingegnere elettronico del LIP (Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas) di Lisbona per l'esperienza CMS, che ha guidato Justino António Cardoso mostrandogli le varie zone sperimentali e dell'acceleratore del CERN.

Sono infine profondamente grata a Beatrice Bressan, Melissa Gaillard, James Gillies, Paulo Gomes, Bettina Hamoudi, Jean-Michel Laurent, João Antunes Pequenão, Pascale Pessy, Délio Duartes Ramos e Klaus Michael Streit per il loro contributo alle traduzioni e alle revisioni del libro.

Marilena Streit-Bianchi

* Davide Angheleddu (Italia), Justino António Cardoso (Mozambico), Margarita Cimadevila (Spagna), Angelo Falciano (Italia), Michael Hoch (Austria), Karen Panman (Olanda), Islam Mahmoud Sweity (Palestina).

Indice

Prefazione *Marilena Streit-Bianchi* IV

CERN, il Laboratorio europeo per la fisica delle particelle *Marilena Streit-Bianchi* 3

CERN, la scienza per la pace *Emmanuel Tsesmelis* 5

Il Modello Standard e la ricerca nella nuova fisica fondamentale *John Ellis* 9

Acceleratori: come e perchè *Lucio Rossi* 13

I fisici e gli esperimenti *Ana Maria Henriques Correia e João Martins Correia* 23

Il CERN e le tecnologie dell'informazione *Frédéric Hemmer* 31

Trasferimento della conoscenza e delle tecnologie *Giovanni Anelli* 35

ClearPEM *João Varela* 37

ARTSCI al CERN *Arthur I. Miller* 39

Scienza, politica e società *Rolf Heuer* 41

Artisti e titoli delle opere

Justino António Cardoso (Mozambico):

Pushing particles near to the speed of light ..... copertina del libro (fronte)

Geneva Switzerland ..... copertina del libro (retro)

CERN, the largest particle physics laboratory in the world 1

The evolution of our Universe 2

How to extend the Standard Model 4

The forces 8

Strings propagate through space and interact 11

The search is open 12

CERN's accelerator complex 15

Energetic protons in a circular collider 16

Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe 17

Tanks of liquid helium to cool the LHC 17

A look into the future 20

Chameleon a hypothetical scalar particle 27

Accelerators and detectors to understand the Universe 30

A clinical application: ClearPEM 35

An innovative technology 36

The gravitation law I know 38

Gargamelle and the neutral currents 44

Knowledge and black holes 45

Angelo Falciano *(Italia):*

Congetture circolari 15

Margarita Cimadevila *(Spagna):*

Quarks 21

Islam Mahmoud Sweity *(Palestina):*

François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012 22

Davide Angheleddu *(Italia):*

ATLAS Remeshed-Higgs Boson (scultura). 24

ATLAS Remeshed-Higgs Boson (fotoprint) 24

Michael Hoch *(Austria):*

Matter-Anti-Matter, symmetry 4 25

Karen Panman *(Olanda):*

Strings at the horizon of a black hole 40

Fotografie

Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN (CERN-PHOTO-8410523) 22

Justino António Cardoso al CERN 46-47

Il più grande Laboratorio del mondo
per la fisica delle particelle
è un'Organizzazione modello
per la creazione della conoscenza

"The evolution of our Universe" Justino António Cardoso *2015, Inchiostro di china*

La vita sulla terra è un processo che si è svolto durante i miliardi di anni di evoluzione del nostro universo. A LHC i fisici studiano cosa accadde 10^{-12} secondi dopo il Big Bang. L'idrogeno e gli atomi di elio si formarono circa 380.000 anni dopo il Big Bang.

CERN, il Laboratorio europeo per la fisica delle particelle

Marilena Streit-Bianchi

Il CERN, l'Organizzazione europea per la ricerca nucleare, è il più grande laboratorio al mondo di fisica delle particelle e rappresenta da lunga data l'esempio europeo di ricerca, educazione e trasferimento della conoscenza. Fondata nel 1954 a cavallo del confine franco-svizzero vicino a Ginevra questa Organizzazione aveva come obiettivo non solo quello di creare un centro di ricerca di fisica a livello mondiale che potesse frenare la fuga dei cervelli negli Stati Uniti d'America ma anche quello di federare l'Europa attorno ad un progetto di ricerca che non poteva essere effettuato da una singola nazione. Il gruppo di scienziati e politici lungimiranti fondatori del CERN favorirono in tal modo il dialogo tra molte persone indipendentemente dalla loro nazionalità o dalle loro convinzioni politiche e religiose.

Il CERN è oggi a tutti gli effetti un laboratorio internazionale: nelle collaborazioni di ricerca ci sono oltre 600 istituti e università appartenenti a tutto il mondo che ne utilizzano le infrastrutture.

Il CERN è un centro di eccellenza riconosciuto a livello mondiale, che ha contribuito a importanti scoperte nel campo della fisica delle particelle e che continua ad essere una organizzazione leader nella creazione della conoscenza.

Il ruolo e l'importanza che riveste per l'educazione e la formazione di fisici, ingegneri, scienziati e tecnici informatici è in continua crescita. Circa un migliaio di giovani ogni anno ricevono titoli di studio per il lavoro svolto al CERN.

Nel corso degli anni, i risultati positivi dell'acquisizione e trasferimento della conoscenza si sono rivelati essenziali. Il Laboratorio, il cui fine è la ricerca nonché la comprensione delle leggi fondamentali della natura, è fonte di continui sviluppi tecnologici.

I risultati dalla ricerca fondamentale ottenuti al CERN sono pubblicati, scambiati liberamente e disponibili per tutti a livello mondiale. Fin dall'inizio, gli scienziati del CERN, ossia i giovani ricercatori, ingegneri o studenti, hanno sviluppato naturalmente uno spirito di condivisione dell'informazione. Di conseguenza tutti possono esercitare e scambiare le loro curiosità, interagendo con persone di diversa origine, formazione e livello di competenza.

Le infrastrutture gigantesche del Laboratorio e l'atteggiamento aperto dei gruppi di lavoro in relazione all'apprendimento e alla condivisione della conoscenza rappresentano un'incredibile sorpresa per ogni nuovo arrivato. Nelle grandi collaborazioni il ruolo di direzione e coordinamento sono la chiave per il successo della ricerca scientifica.

Il CERN ha una lunga tradizione nella promozione delle relazioni con l'industria per sviluppare le tecnologie innovative necessarie alla costruzione degli acceleratori e dei rivelatori. Dopo aver istituzionalizzato il trasferimento tecnologico e della conoscenza e aver aumentato gli sforzi per garantirne l'impatto rapido ed efficace, il CERN ha oggi un ruolo d'avanguardia nell'impatto sulla società dell'innovazione generata dalla ricerca fondamentale.

"How to extend the Standard Model?" Justino António Cardoso *2015, Inchiostro di china*

CERN, la scienza per la pace

Emmanuel Tsesmelis

Alla fine della seconda guerra mondiale, la scienza europea non si trovava più in una posizione di leadership. Alcuni scienziati e diplomatici lungimiranti proposero di creare un laboratorio europeo di fisica nucleare seguendo l'esempio di altre organizzazioni internazionali. Si trattava di un laboratorio che oltre a connettere tutti gli scienziati europei doveva mettere a loro disposizione le costose strutture necessarie a fare ricerca nonché condividerne i costi.

La prima proposta ufficiale per la creazione di un tale laboratorio europeo fu presentata dal fisico francese Louis de Broglie alla conferenza culturale europea che venne inaugurata a Losanna il 9 dicembre del 1949. Un'ulteriore sollecitazione venne dalla quinta conferenza generale dell'UNESCO tenutasi a Firenze nel giugno del 1950 dove il fisico americano e premio Nobel Isidor Rabi presentò una possibile risoluzione. Tale risoluzione autorizzava l'UNESCO ad *"assistere e incoraggiare la formazione di laboratori regionali di ricerca per aumentare la collaborazione scientifica interna-zionale ..."*. Nella sesta sessione del Consiglio del CERN, svoltasi a Parigi tra il 29 giugno e il primo luglio del 1953, venne adottata e firmata la convenzione che istituì poi l'Organizzazione. La convenzione fu gradualmente ratificata dai seguenti 12 Stati membri fondatori: Belgio, Danimarca, Francia, Repubblica Federale della Germania, Grecia, Italia, Paesi Bassi, Norvegia, Svezia, Svizzera, Regno Unito e Jugoslavia. Fu così che il 29 settembre del 1954 nacque ufficialmente il CERN, ovvero l'Organizzazione europea per la ricerca nucleare.

La Convenzione del CERN, scritta più di 60 anni fa, ha resistito all'usura del tempo fornendo all'Organizzazione i mezzi necessari per adattarsi ai cambiamenti politici e alle continue sfide scientifiche e tecnologiche. La Convenzione è la testimonianza della saggezza e della lungimiranza dei padri fondatori del CERN in linea con la visione di ricostruire la pace in Europa: ovvero creare un punto di riferimento unico per la promozione della collaborazione scientifica ad una scala senza precedenti tra tutte le nazioni che avevano combattuto una guerra solo pochi anni prima.

Da allora il CERN è stato capace di contribuire alla creazione della fiducia e comprensione reciproca oltre le frontiere. Durante gli anni della guerra fredda nel 1968 il CERN è stata la prima organizzazione a concludere un accordo con l'Unione Sovietica, stabilendo una collaborazione con IHEP (in inglese **I**nstitute for **H**igh **E**nergy **P**hysics), il grande laboratorio nazionale che si trova a Protvino, nei pressi di Serpukhov. Nel 1956 fu fondato a Dubna, a nord-est di Mosca, dagli Stati del Patto di Varsavia al di là della cortina di ferro, JINR (in inglese **J**oint **I**nstitute for **N**uclear **R**esearch), un laboratorio internazionale costruito sul modello del CERN. La collaborazione tra JINR e il CERN ha rappresentato uno dei rari legami di cooperazione tra i fisici dell'ovest e quelli dell'est durante la guerra fredda. In particolare, ha svolto un ruolo determinante nella cooperazione tra gli scienziati provenienti dalla Germania occidentale e quelli provenienti dalla Germania orientale, essendo in quel periodo l'unico punto d'incontro per gli scienziati delle due parti tedesche per poter lavorare insieme. La cooperazione tra JINR e il CERN si è rafforzata negli ultimi decenni fino ad un accordo reciproco grazie al quale il CERN è diventato membro osservatore del JINR e JINR è diventato membro osservatore del Consiglio del CERN. Un altro esempio è la cooperazione tra il CERN e la Repubblica popolare cinese. Cominciò negli anni '70, inizialmente nella tecnologia degli acceleratori e nella fisica teorica, e fu presto seguito dalla partecipazione al programma di fisica sperimentale del CERN. Basandosi su accordi di cooperazione internazionale firmati con la Repubblica popolare cinese negli anni '90, le università della Repubblica popolare cinese partecipano oggi a quattro esperimenti di LHC (ALICE, ATLAS, CMS e LHCb), a LHC Computing Grid e allo studio di CLIC. Il CERN ha anche sviluppato una cooperazione con la Palestina. Dopo che l'Università Nazionale An-Najah ha firmato una manifestazione di interesse con ATLAS, la Palestina ha compiuto un passo importante verso il consolidamento della sua collaborazione con il CERN firmando un accordo di cooperazione internazionale nel dicembre 2015. Successivamente, sono state lanciate numerose iniziative in Palestina tra cui delle Masterclasses, una scuola di fisica presso l' Università Arabo-Americana di Jenin e la parte-

cipazione di insegnanti palestinesi al programma speciale per insegnanti delle scuole superiori dedicato a SESAME (in inglese **S**ynchrotron-light for **E**xperimental **S**cience and **A**pplications in the **M**iddle **E**ast). Infine il CERN è servito anche come modello per altre organizzazioni scientifiche di successo, la piu recente delle quali SESAME.

Oggi LHC (**L**arge **H**adron **C**ollider, ovvero Grande Collisore di Adroni) è il progetto scientifico di punta del CERN che ha iniziato una nuova era di ricerche e scoperte nella fisica delle particelle. Gli esperimenti di LHC hanno portato all'osservazione del bosone di Higgs, convalidando il meccanismo di Brout-Englert-Higgs che rappresenta una delle scoperte più significative nella storia della fisica fondamentale. Le aspettative di LHC sono importanti e possono generare prospettive rivoluzionarie nell'ambito della comprensione dell'infinitamente piccolo nonché cambiare completamente la visione attuale sull'origine dell'Universo.

Il CERN e i suoi grandi progetti scientifici, come LHC, richiedono la costruzione ed il mantenimento di infrastrutture giganti e di collaborazioni a lungo termine su scala globale. Le grandi collaborazioni internazionali di LHC offrono un ambiente in cui i ricercatori imparano a lavorare in condivisione e hanno l'opportunità di conoscere, accettare e rispettare le differenze. Il CERN rappresenta un esempio dello sforzo congiunto di diversi settori di competenza. Gli ingegneri, i tecnici e gli amministratori realizzano insieme attrezzature tecnologiche all'avanguardia e forniscono i servizi e il supporto necessario alle infrastrutture di ricerca e ai sistemi ausiliari correlati. Costruire e mantenere un'infrastruttura di ricerca di tale complessità come LHC (si pensi alle componenti basilari come i magneti, i sistemi di radiofrequenza, il vuoto, la criogenia, e l'elettricità) comprende molte responsabilità come la radioprotezione, la sicurezza e la salute dei dipendenti, nonché il servizio legale, i vigili del fuoco, gli acquisti, la gestione delle risorse umane e via dicendo. I professionisti che rappresentano la grande maggioranza del personale del CERN oggi sono circa 2500. A loro si aggiungono oltre 1000 impiegati provenienti da società esterne che forniscono i servizi che non fanno parte delle competenze fondamentali del CERN.

Negli anni a venire i risultati ottenuti con LHC e con l'aumento di energia indirizzeranno il cammino della ricerca e del CERN verso una posizione unica in grado di contribuire su lungo termine ad una maggiore comprensione della fisica delle particelle. A questo proposito il CERN sta esplorando due possibili strade molto impegnative: CLIC (in inglese **C**ompact **L**inear **C**ollider) e FCC (in inglese **F**uture **C**ircolar **C**ollider).

Le strutture necessarie alla fisica delle alte energie (e ad altri campi della scienza) sono sempre più grandi e costose. I finanziamenti internazionali non aumentano e il calendario dei progetti sta diventando sempre più fitto. Tutto ciò comporta la realizzazione di sempre meno strutture spingendo la fisica delle particelle verso una maggiore collaborazione mondiale. La competenza in fisica delle particelle deve essere mantenuta a livello locale per assicurarne la stabilità a lungo termine. È necessario l'impegno di paesi dotati di comunità in fisica delle particelle nonché l'integrazione delle comunità emergenti di altri paesi. Le agenzie di finanziamento dovrebbero fornire a loro volta una visione generale. La pianificazione e l'esecuzione dei progetti di fisica delle alte energie richiedono partenariati a livello mondiale per la realizzazione su vasta scala e partenariati regionali e nazionali per la realizzazione dell'intero programma della fisica delle particelle. La ricerca deve adeguarsi a tali realtà in modo da promuovere una maggiore coordinazione a livello globale.

Il CERN si fonda su una lunga tradizione di impegno internazionale in campo scientifico. L'Organizzazione ha rapporti formali con gli Stati non membri tramite accordi bilaterali di cooperazione internazionale attualmente in vigore con una cinquantina di paesi. La partecipazione degli utenti degli Stati non membri rappresenta ormai quasi il 40 per cento (si tratta per la maggior parte di ricercatori provenienti dagli Stati Uniti d'America e dalla Federazione Russa che lavorano a LHC) su un totale di circa 13.000 utenti del CERN. La partecipazione complessiva degli Stati non membri al programma di ricerca non relativo a LHC è attualmente di circa il 20 per cento. Le risorse finanziarie per i programmi di ricerca, in particolare per i costi di manutenzione e di funzionamento degli esperimenti LHC, sono condivisi tra gli Stati membri, gli Stati membri associati e gli Stati non membri. Inoltre l'interesse

per le collaborazioni di ricerca e sviluppo nel settore degli acceleratori (i magneti ad alto campo, le strutture acceleratrici e le tecnologie ad essi correlate, l'aumento della luminosità di LHC, gli studi su CLIC e FCC, ecc.) è in crescita. Il numero di Stati coinvolti in tali attività supera quello degli Stati non membri che hanno contribuito alla costruzione dell'acceleratore LHC. L'interesse crescente per il CERN si traduce in una continua domanda di programmi di istruzione e formazione che fanno parte integrante della missione del CERN. Tali programmi servono a costruire le competenze nei paesi in via di sviluppo nelle comunità della fisica delle particelle.

I risultati scientifici del CERN nel corso degli anni sono andati di pari passo con la politica del CERN di aumentare il networking globale e la collaborazione scientifica, tecnologica ed educativa con i partner mondiali. Per questo motivo nel 2010 il Consiglio ha approvato quello che fino ad oggi è considerato il cambiamento più radicale di paradigma della politica di appartenenza del CERN, ovvero una politica di allargamento geografico che ha permesso la piena adesione anche agli Stati non europei, indipendentemente dalla loro posizione geografica. Allo stesso tempo il Consiglio ha introdotto un nuovo strumento di affiliazione associativa per facilitare l'adesione di nuovi Stati membri, compresi i paesi emergenti extraeuropei, che potrebbero non avere risorse sufficienti per sostenere una piena adesione nell'immediato futuro.

Oggi il CERN comprende 22 Stati membri[1], otto Stati membri associati[2] e sei osservatori[3]. Nel 2014 Israele e nel 2016 la Romania sono diventati rispettivamente il 21mo e il 22mo Stato membro del CERN. Cipro, Serbia e Slovenia sono attualmente Stati membri associati in fase preliminare di adesione, mentre India, Lituania, Pakistan, Turchia e Ucraina sono Stati membri associati. Il Brasile, e la Croazia hanno fatto domanda per diventare Stati membri associati. Contemporaneamente ad attirare nuovi Stati membri e Stati membri associati, il CERN sviluppa relazioni formali con altri Stati non membri, ad esempio attraverso la conclusione di nuovi accordi di cooperazione internazionale (in inglese **I**nternational **C**ooperation **A**greements, ICA). A tuttora sono in vigore circa 50 accordi che hanno una diversa e ampia diffusione geografica e sono stati stabiliti contatti scientifici anche con molti altri paesi[4].

La politica di allargamento geografico varata nel 2010 offre importanti opportunità al futuro dell'Organizzazione. Il CERN ha sviluppato tale politica presentando al Consiglio una strategia specifica nel marzo del 2016 in modo da assicurare che l'ampliamento geografico ne consolidi la base istituzionale e quindi rafforzi a lungo termine le aspirazioni scientifiche del Laboratorio. L'allargamento non è un obiettivo in sé e per sé. Il punto centrale consiste piuttosto nel rafforzare i rapporti con i paesi capaci di apportare competenze scientifiche e tecnologiche al CERN i quali possano, a loro volta, trarre vantaggio da un tale impegno reciproco. In questo modo sarà possibile costruire e far crescere le capacità nei paesi in via di sviluppo in seno alle comunità della fisica delle particelle. È essenziale che essere Membro o Membro associato del CERN sia vantaggioso per la fisica delle particelle nei singoli paesi e che i governi continuino a investire nella crescita delle comunità nazionali. Allo stesso tempo, tale ampliamento non deve ostacolare l'efficienza operativa del Laboratorio.

In conclusione, guardando al futuro, l'impegno del CERN verso la comunità internazionale

[1] Stati Membri: Austria, Belgio, Bulgaria, Repubblica Ceca, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Israele, Italia, Norvegia, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Romania, Repubblica Slovacca, Spagna, Svezia, Svizzera e Ungheria.

[2] Cipro, Serbia e Slovenia sono Stati membri associati in stadio di pre-adesione agli Stati membri. India, Lituania, Pakistan, Turchia e Ucraina sono Stati membri associati.

[3] Giappone, Russia, Stati Uniti d'America, Unione Europea, JINR e UNESCO sono Stati osservatori.

[4] http://international-relations.web.cern.ch/stakeholder-relations/Associate-Non-Member-State-Relations
Stati non membri, regioni e aree che collaborano con il CERN: Albania, Algeria, Arabia Saudita, Argentina, Armenia, Australia, Azerbaigian, Bangladesh, Bielorussia, Bolivia, Brasile, Canada, Cile, Cina, Colombia, Corea, Costa Rica, Croazia, Cuba, Ecuador, Egitto, Emirati Arabi Uniti, Estonia, Filippine, Georgia, Ghana, Giordania, Hong Kong, Islanda, Indonesia, Iran, Irlanda Kazakistan, Lettonia, Libano, Madagascar, Malesia, Malta, Marocco, Messico, Mongolia, Montenegro, Mozambico, Nepal, Nuova Zelanda, Oman, Palestina, Perù, Qatar, ex Repubblica iugoslava di Macedonia, Ruanda, Singapore, Sudafrica, Sri Lanka, Taiwan, Tailandia, Tunisia, Uzbekistan, Vietnam.

della fisica delle particelle su scala globale è chiaramente orientato al perseguimento degli obiettivi fissati dalla Convenzione del CERN verso una politica di allargamento geografico. A questo si aggiunge la considerazione che l'indagine dell'unificazione delle forze fondamentali della natura richiede l'unione degli sforzi scientifici a lungo termine a beneficio di tale disciplina.

"The forces" Justino António Cardoso *2015, Inchiostro di china*

Le forze, dette anche interazioni fondamentali, sono quattro: l'interazione nucleare forte che permette la coesione dei quark tra di loro, i gluoni sono i mediatori di questa forza; l'interazione elettromagnetica che lega gli elettroni al nucleo dell'atomo e gli atomi in molecole, i mediatori di tale forza sono i fotoni; l'interazione nucleare debole che è responsabile della radioattività e delle reazioni nucleari nel centro delle stelle, i mediatori di questa forza sono i bosoni deboli W^+, W^- e Z; e l'interazione gravitazionale che è la forza che determina la caduta degli oggetti sulla terra e l'attrazione dei pianeti e delle stelle nonché delle stelle nelle galassie, il mediatore di questa forza è il gravitone (non ancora scoperto).

Il Modello Standard e la ricerca nella nuova fisica fondamentale

John Ellis

Da dove veniamo?

"Da dove veniamo?" "Che siamo?" "Dove andiamo?" Sono le domande universali e senza tempo che l'uomo si pone da migliaia di anni. Tali domande sono anche contenute in un noto dipinto di Paul Gauguin del 1897, lo stesso anno in cui è stato scoperto l'elettrone, la prima particella elementare. Piuttosto di: "che siamo" (ovvero della seconda domanda contenuta nel dipinto di Gauguin) i fisici delle particelle si chiederebbero: "di cosa siamo fatti?" E la risposta a tale domanda sarebbe rappresentata dal Modello Standard, la teoria che descrive la materia visibile dell'Universo. Il successo straordinario del Modello Standard è dovuto alla scoperta del bosone di Higgs (l'ultima particella prevista da tale modello) tramite gli esperimenti di LHC del CERN. Questa scoperta ci ha permesso tra l'altro di intuire ciò che è accaduto nei primi attimi di esistenza dell'Universo e di farci delle domande sul possibile futuro dell'Universo, svelando gli altri due quesiti del dipinto di Gauguin.

Tuttavia il Modello Standard è incompleto. Ad esempio, non spiega l'origine della materia nell'Universo così come non spiega la misteriosa materia oscura che permette la formazione delle galassie e le tiene insieme. Gli esperimenti si susseguono a LHC per cercare di rispondere a queste domande, ma i fisici delle particelle stanno anche discutendo su quelli che potrebbero essere i prossimi passi della ricerca universale articolata da Gauguin. Le collisioni possibili a LHC e con macchine simili, che ricreano i processi verificatisi all'origine della storia dell'Universo, e le collisioni ad energie superiori a LHC ci permetterebbero di guardare ancora più indietro nel tempo. Una delle possibilità è di costruire una versione più potente di LHC in un tunnel circolare ancora più grande. All'interno di LHC i protoni (ovvero i nuclei di idrogeno) si scontrano ad energie che sono circa 14.000 volte maggiori della loro energia di massa a riposo. Un collisore circolare ad alta energia potrebbe addirittura essere in grado di fornire collisioni ad un'energia 100.000 volte maggiore dell'energia di massa a riposo del protone permettendoci di svelare l'origine della materia oscura che riempie l'Universo. Un'altra possibilità potrebbe essere quella di far collidere gli elettroni con le loro antiparticelle. Tali collisioni avverrebbero ad energie più modeste, ma potrebbero in linea di principio fornire informazioni più precise sulle particelle prodotte, come ad esempio sul bosone di Higgs. Tali dati e misure di alta precisione aiuterebbero a capire meglio il ruolo che tali particelle hanno avuto nella storia iniziale dell'Universo fornendo indirettamente spunti sulla nuova fisica al di là del Modello Standard.

Il passo successivo per la fisica delle particelle è rappresentato da una sfida veramente globale, che richiede lo sviluppo di diverse nuove tecnologie, come l'ingegneria civile, la criogenia, la scienza dei materiali, l'elettronica e l'informatica, nonché la formazione di molti ingegneri e scienziati, risorse finanziarie significative ed un ampio sostegno politico. Molte delle tecnologie elencate, oltre ad avere applicazioni pratiche, potrebbero finalmente rispondere alle domande di Gauguin. Ora il è giunto il momento di pensare tutti insieme a come affrontare una tale sfida alla curiosità umana.

Il Modello Standard e i nuovi campi di ricerca

Il Modello Standard è la teoria della fisica delle particelle che descrive con successo tutta la materia visibile nell'Universo. Tuttavia, oltre alla materia visibile, con l'ausilio dei telescopi, astrofisici, cosmologi e astronomi, hanno dimostrato che l'Universo contiene molto di più di ciò che è visibile.

Nel 1930 l'astronomo svizzero Fritz Zwicky scoprì che le galassie in vicinanza dell'Ammasso della Chioma vengono spostate da un campo gravitazionale molto più forte di quello che potrebbe essere generato dalla materia visibile nell'ammasso. Zwicky suggerì che un tale campo gravitazionale potesse essere causato da un'ulteriore invisibile materia oscura che non emette luce. Nonostante

quest'idea radicale sia stata lenta ad affermarsi, le misure effettuate nel 1970 dall'astronoma americana Vera Rubin e altre misure sui moti delle stelle nelle diverse galassie furono determinanti. A differenza di ciò che avviene nel sistema solare, in cui i pianeti che sono più lontano dal Sole si muo-vono più lentamente in accordo con le leggi di Keplero, si è scoperto che le stelle più distanti dai centri delle galassie si muovono molto più velocemente del previsto a causa della gravità dovuta alla materia visibile, raggiungendo velocità simili a quelle delle stelle più vicine. Queste osservazioni hanno dimostrato che, oltre alla materia visibile, deve esistere una materia oscura invisibile che circonda le galassie. Molte osservazioni successive hanno poi comprovato l'ipotesi dell'esistenza della materia oscura.

Alla fine degli anni 1990 e nei primi anni del 2000 la scoperta da parte degli astronomi che oltre alla materia oscura accumulata nelle galassie e negli ammassi (i cluster) doveva esistere una quantità aggiuntiva di energia nello spazio 'vuoto' tra di esse suscitò grande sorpresa. La cosiddetta 'energia oscura' fa sì che l'Universo si espanda con un ritmo accelerato, mentre l'attrazione gravitazionale della materia ordinaria e oscura porterebbe al rallentamento dell'espansione dell'Universo. Nel complesso la densità dell'energia oscura dovrebbe essere circa tre volte maggiore di quella della materia.

Di cosa è composta la materia oscura? Un'idea comunemente diffusa è quella che ci sia un qualche tipo sconosciuto di particella massiccia ad interazione debole, non contenuta nel Modello Standard, che potrebbe essere una possibile candidata prevista solo nelle estensioni di tale modello. Si pensa che la particella di materia oscura potrebbe avere tra una massa tra 100 e 1000 volte maggiore della massa del protone. Questo permetterebbe la produzione di tale particella e sarebbe alla portata di LHC. Gli esperimenti di LHC stanno cercando collisioni in cui una grande quantità di energia sia prodotta da particelle di materia oscura invisibile. Anche se le ricerche svolte a LHC continuano ad un'energia sempre più elevata, la scoperta della materia oscura potrebbe avvenire solo grazie ad un nuovo collisore funzionante ad un'energia ben superiore. Anche gli esperimenti di astrofisica stanno cercando direttamente la materia oscura. Ad esempio l'esperimento AMS (**A**lpha **M**agnetic **S**pectrometer) sulla Stazione Spaziale Internazionale, la cui sala di controllo si trova al CERN, ricerca le particelle che potrebbero essere state prodotte dalle particelle di materia oscura che si sono annientate nello spazio interstellare.

E che dire allora dell'energia oscura? La possibilità dell'esistenza dell'energia oscura è stata ventilata da Einstein nel 1917 con quella da lui definita costante cosmologica. Tutte le teorie di fisica fondamentale prevedono possibili contributi alla densità dell'energia oscura, come ad esempio attraverso il bosone di Higgs contenuto nel Modello Standard. Quindi confermarne la presenza non sarebbe una sorpresa. Tuttavia tutte le teorie in genere prevedono l'esistenza di una quantità di energia oscura maggiore della quantità scoperta dagli astronomi. Ma il puzzle si fa ancora più oscuro in quanto non si capisce perché la densità dell'energia oscura sia così piccola. Lo studio del bosone di Higgs con LHC e con i collisori futuri potrebbe delucidare un tale enigma. Una possibile spiegazione potrebbe essere che l'energia oscura sia imitata da una nuova particella la cui massa dipenderebbe dalla densità locale della materia, ovvero da una possibile particella 'camaleonte' molto difficile da individuare sperimentalmente, proprio come l'omonima lucertola dal colore cangiante!

“Strings propagate through space and interact” Justino António Cardoso *2015, Inchiostro di china*

Molti fisici teorici pensano che i costituenti fondamentali della materia siano stringhe soggette a vibrazioni e, basandosi su tale idea, hanno sviluppato una teoria che descrive tutte le forze fondamentali. (John Ellis)

“The search is open” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostrro di china*

Acceleratori: come e perché

Lucio Rossi

Secondo il Dizionario della lingua inglese Oxford il significato del verbo 'accelerare' è: guadagnare velocità. Da quando apparve il manifesto del Futurismo nel 1909, l'accelerazione è diventata il marchio dell'epoca contemporanea. Gli acceleratori di particelle, inventati nel XX secolo, sono il prodotto tipico di quel periodo quando oltrepassati gli ostacoli si aprirono nuove frontiere alla conoscenza.

Rutherford fu il primo a capire che la struttura atomica può essere svelata bombardando la materia con particelle nucleari, aprendo in tal modo la via agli acceleratori di particelle. Nel suo celebre discorso di apertura del 1927 da Presidente della Royal Society dichiarò: *"L'avanzata della scienza dipende in larga misura dall'elaborazione di nuovi metodi tecnici e dalla loro applicazione... Dal punto di vista puramente scientifico l'interesse è principalmente incentrato sull'applicazione di questi alti potenziali e tubi a vuoto per ottenere una grande quantità di elettroni e atomi ad alta velocità ... Ciò aprirà un campo di indagine straordinariamente interessante che non mancherà di fornire informazioni di grande valore, non solo sulla costituzione dei nuclei dell'atomo ma anche in molti altri campi ."*

Oggi è facile riconoscere quanto le sue parole furono profetiche!

Breve descrizione di un acceleratore.

Gli acceleratori possono avere due configurazioni:

a) *Acceleratori lineari (Linac*)*,* con una serie allineata di cavità a radiofrequenza (in breve RF) che forniscono un'accelerazione multipla. Più sono le cavità più elevata sarà l'energia raggiunta, comportando dunque un aumento nella dimensione dell'acceleratore e del suo costo.

b) *Acceleratori circolari*, dove il fascio passa attraverso le stesse cavità milioni di volte, fino a raggiungere l'energia stabilita. In tali macchine, come in LHC, la parte delle cavità è molto breve, una decina di metri su una lunghezza totale dell'anello di circa 27 km, mentre la parte magnetica è nettamente più lunga.

In generale un acceleratore di particelle è costituito da quattro componenti principali:

a) Una camera a vuoto, in cui molecole e atomi vengono evacuati, a livello di 10^{-7} a 10^{-11} mbar (cioè un numero di molecole di circa quasi un milione di miliardi di volte inferiore a quelle presenti nell'aria)

b) Un campo elettrico che accelera le particelle (particelle con carica elettrica).

c) Un campo magnetico che curva le particelle (campo dipolare, generato da un magnete a due poli)

d) Altri campi magnetici generati dai quadrupoli (magneti quadripolari) che focalizzano il fascio di particelle, evitando che le particelle si disperdano e di conseguenza urtino il tubo a vuoto.

Le minuscole particelle subatomiche formano come una nuvola lineare sottile e lunga, il cosiddetto 'fascio di particelle'. Nel fascio, che in genere non è continuo, le particelle sono raggruppate in pacchetti. Il fascio di particelle accelerate può essere utilizzato per bombardare un bersaglio fisso (generalmente un foglio solido sottile, o una camera a gas, oppure un bersaglio solido o liquido denso). Negli anni '60 Bruno Touschek propose e costruì a Frascati in Italia il primo collisore AdA (**A**nello **d**i **A**ccumulazione) in cui il fascio di particelle accelerato veniva fatto scontrare contro un altro fascio circolante in direzione opposta. Da allora in poi, quasi tutti gli acceleratori che hanno stabilito nuovi record di energia funzionano nella modalità detta 'Collider'.

I *campi elettrici* servono a dare velocità (o meglio impulso) alle particelle: solitamente si tratta di onde elettromagnetiche con frequenza compresa tra quella delle onde radio / TV e quella delle microonde. Sono generalmente denominati campi di radiofrequenza, in quanto inizialmente negli acceleratori si utilizzavano frequenze tra 10 e 200 MHz.

Nei moderni acceleratori si usano frequenze fino a decine di GHz (la gamma delle microonde). Queste onde elettromagnetiche vengono intrappolate all'interno di una scatola metallica vuota, detta 'cavità RF', un po' come le onde acustiche vengono intrappolate nei tubi di un organo. Ogni volta che il fascio passa attraverso la cavità, ogni particella, a condizione che entri con la giusta fase, riceve una spinta. È una situazione molto simile a quella di un surf che, se riesce a rimanere sulla cresta dell'onda, viene spinto in avanti. Una cavità può fornire una tensione tra 1 e 10 MV (in energia 1-10 MeV). Per ottenere GeV o TeV di energia (l'energia di LHC) è necessario far passare il fascio attraverso la cavità da migliaia a milioni di volte.

I *campi magnetici* permettono di guidare le particelle. Il primo tipo di campo magnetico è il campo dipolare, un campo magnetico uniforme che permette di curvare la traiettoria delle particelle. Una serie di dipoli mantengono dunque le particelle in traiettoria circolare. Più potente è il campo magnetico generato dal dipolo, più alta sarà la forza centripeta (o forza di Lorentz) sulla particella e dunque più alta sarà l'energia da esse raggiunta. In un acceleratore circolare l'energia del fascio delle particelle è descrivibile con una semplice relazione in approssimazione relativistica: $E_{fascio} = 0{,}3\ BR$, dove E_{fascio} è l'energia del fascio, B è il valore del campo di induzione magnetica e R è il raggio della circonferenza percorsa dalla particella. Quando si inseriscono i parametri di LHC, quali il campo magnetico B = 8.3 tesla ed il raggio R = 2.8 km, si ottiene l'energia dei protoni di LHC pari a 7 TeV per fascio che equivale all'accelerazione fornita da una tensione di ben 7 milioni di milioni di Volt! Tuttavia le cavità RF di LHC forniscono circa 10 MV, per cui il fascio deve transitare in esse milioni di volte prima di raggiungere l'energia massima, grazie alla forza di incurvamento dei 1232 dipoli, ognuno dei quali è lungo 15 metri, che occupano 18 dei 27 km di lunghezza del tunnel di LHC. I campi magnetici hanno anche il compito di stabilizzare il fascio contro qualsiasi piccola deviazione dalla traiettoria ideale. Così come un pilota mantiene il veicolo in pista con piccoli continui aggiustamenti del volante, tra i dipoli si inseriscono degli elementi magnetici detti quadrupoli (ovvero con quattro poli magnetici) per combattere le inevitabili imperfezioni della traiettoria. Senza quadrupoli nessuna macchina acceleratrice, neanche un Linac, può funzionare perché il fascio divergerebbe rapidamente andando a urtare la camera a vuoto. In LHC la dimensione del fascio, ottenuta grazie ai suoi 400 quadrupoli, è di circa 1 mm. Si può dire che il fascio di LHC è composto da una serie di pacchetti cilindrici di 1 mm di diametro e con 20-30 cm di lunghezza, distanti l'uno all'altro 7,5 metri ad un intervallo temporale di 25 nanosecondi. In totale 2800 pacchetti percorrono in senso contrario ciascuno dei due tubi a vuoto dei 27 km di lunghezza dell'acceleratore.

Esistono anche molti altri tipi di magneti, dai sestupoli (con sei poli) ai dodecapoli (con 12 poli), ognuno dei quali serve a eliminare specifiche instabilità.

Il complesso degli acceleratori di LHC

LHC rappresenta l'ultimo anello di un complesso di acceleratori che lavorano congiuntamente. Le molecole di idrogeno, estratte in forma di gas da una bombola, vengono ionizzate da una scarica elettrica, formando così un plasma, ovvero un gas di particelle cariche, proprio come avviene all'interno del sole. I nuclei di idrogeno, cioè i protoni a carica positiva separati dagli elettroni da campi statici, formano un fascio che viene accelerato a 50 MeV da un Linac di circa 30 metri di lunghezza. Il fascio viene poi immesso nel Booster, ovvero un sincrotrone con 150 metri di circonferenza che lo accelera fino a 1400 MeV (1,4 GeV) di energia. Il fascio viene quindi guidato nel più antico degli acceleratori in funzione al CERN (inaugurato nel 1959), il Proton Synchrotron (abbreviato PS), con una circonferenza di 600 metri, che porta l'accelerazione del fascio protonico fino a 25 GeV. Il fascio di particelle viene poi immesso nel Super Proton Synchrotron (SPS)[5] di 7 km di circonferenza dove raggiunge i 450 GeV. Infine, dopo l'acceleratore SPS, i protoni vengono iniettati in LHC, in due

[5] L'acceleratore SPS fu per un breve periodo uno speciale collisore protoni-antiprotoni che permise di osservare i bosoni Z e W, scoperta per cui nel 1984 Carlo Rubbia e a Simon van der Meer del CERN sono stati insigniti del premio Nobel di Fisica.

“Congetture circolari” Angelo Falciano 2011, *Acrilico su malcartone*

Nell’acceleratore le particelle corrono velocemente nel passaggio dal noto all’ignoto.

“The accelerator complex of CERN” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china a colori* (ispirato a foto di Fabienne Marcastel: OPEN-PHO-CHART-2013-001-1)

Il complesso di acceleratori di LHC comprende: il Linac2, il PS Booster (PSB), il Proton Synchrotron (PS) e il Super Proton Synchrotron (SPS) che collega LHC attraverso i tunnel TI2 e TI8.

"Energetic protons in a circular collider" Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

“Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

“Tanks of liquid helium to cool LHC” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

fasci che ruotano in direzione opposta, e sono poi accelerati fino a 7000 GeV, cioè 7 TeV, per poter liberare nella collisione testa-a-testa ben 14 TeV di energia nel loro centro di massa. Tutta la catena di acceleratori, compresi i 27 km del tunnel di LHC, è lunga più di 40 km. Le prime macchine si trovano in superfice mentre SPS si trova in un tunnel a 40 metri di profondità. I due tunnel di iniezione che collegano SPS con LHC, ciascuno lungo più di 3 km (vedi TI2 e TI8), portano il fascio protonico da 40 a 100 metri sottoterra. Ogni singolo pezzo di questa macchina complessa è una meraviglia in cui decine di migliaia di impianti sofisticati devono lavorare congiuntamente per portare i protoni dalla bottiglia di idrogeno fino a scontrarsi negli esperimenti di LHC a 14 TeV di energia e generare così il bosone Higg!

Una tecnologia innovativa: la superconduttività

La ricerca di valori di energia sempre più elevati non può essere soddisfatta con dimensioni sempre maggiori: esiste infatti un limite pratico alle dimensioni di un acceleratore. Un modo per limitarne le dimensioni consiste nell'aumentare il valore del campo magnetico secondo la relazione che intercorre tra energia e dimensione, precedentemente descritta. Grazie al fatto che in un superconduttore la resistenza elettrica viene azzerata, è possibile inviare in un cavo superconduttore una corrente enorme senza dissipare energia. Infatti in LHC i magneti vengono alimentati con correnti di 12000 A senza che la bobina venga surriscaldata. Grazie a questa tecnologia i magneti di LHC hanno un campo cinque volte più intenso dei magneti degli acceleratori classici. Il cuore superconduttore di LHC è composto da 300000 km di filo superconduttore dal diametro di un millimetro. Il filo è formato da un composito in cui, in una matrice di rame molto puro, migliaia di filamenti sottili della preziosa lega niobio-titanio (Nb-Ti) generano la superconduttività. Nei magneti di LHC ci sono 2100 milioni di km di tali filamenti superconduttori, abbastanza per fare sette volte andata e ritorno dal Sole! Questa meraviglia ha tuttavia un costo. Infatti per generare la superconduttività nella lega Nb-Ti è necessaria una temperatura estremamente bassa, pari a -271 °C. Si tratta di una temperatura molto più fredda di quella esistente negli spazi profondi, che è raggiungibile solo utilizzando l'elio superfluido. LHC rappresenta il più grande impianto di criogenica esistente composto di enormi sistemi di raffreddamento che consumano circa 50 MW. La realizzazione di impianti di questo tipo ha un costo molto elevato. Costruire LHC senza la superconduttività, cioè utilizzando le tecnologie classiche per i magneti, avrebbe richiesto la realizzazione di un anello tra i 100 e i 120 km di circonferenza, con un consumo elettrico di circa 1000 MW, ovvero pari ad una potenza erogata da un impianto nucleare abbastanza grande. Decisamente l'utilizzo della superconduttività ha permesso di fare un buon investimento da molti punti di vista: tecnologico, economico e ambientale!

La fisica moderna all'opera

1-Relatività

Una caratteristica interessante degli acceleratori è la manifestazione macroscopica degli strani effetti previsti dalla fisica moderna. Quando si spingono le particelle a velocità molto vicine a quella della luce si può osservare macroscopicamente tutto ciò che è stato previsto da Einstein. Infatti, quando le particelle approssimano la velocità della luce accelerano sempre meno. La velocità satura alla velocità della luce mentre il valore della massa inizia a crescere (più precisamente aumenta l'impulso o la quantità di moto). Questo effetto viene tenuto sotto controllo facilmente con le contromisure necessarie per evitare la perdita delle particelle. Infatti, aumentando la loro massa, le particelle si sposterebbero dall'orbita grazie alla fine sincronicità che intercorre tra la velocità, la massa e il campo, secondo le osservazioni fatte dal fisico Ernest O. Lawrence quando costruì il primo acceleratore circolare di particelle, ovvero il ciclotrone. Un altro effetto interessante è il fatto che quando le particelle instabili 'a vita breve' sono accelerate, la loro vita viene allungata, come previsto dalla teoria della relatività di Einstein nell'*Annus mirabilis 1905*.

2- I microscopi e la meccanica quantistica

Gli acceleratori possono essere considerati come dei super-microscopi che permettono di rivelare il mondo dell'infinitamente piccolo. La risoluzione di un microscopio, trascurando i limiti tecnici e le imperfezioni, è condizionata dagli effetti di diffrazione della lunghezza d'onda della luce. È per questo che con la luce visibile siamo limitati a circa 500 nanometri (nm). Tuttavia, se si impiegano i raggi X, ovvero le onde elettromagnetiche della stessa natura della luce ma di lunghezza d'onda molto più corta (da 0,1 a 1 nm) è possibile visualizzare gli atomi. La meccanica quantistica insegna che le particelle si comportano come onde con una lunghezza d'onda λ data dalla formula hc/E, dove h è la costante di Planck e c è la velocità della luce: ovvero più grande è l'energia della particella, più piccola è la lunghezza d'onda ad essa associata. Quando una particella viene accelerata a 7 TeV, LHC usa una lunghezza d'onda pari a 10^{-19} metri, cioè pari a un miliardesimo di 0,1 nm visibile solo con i microscopi elettronici. LHC con i suoi esperimenti indaga all'interno degli atomi a dimensioni ancora più microscopiche, visualizzando particelle dieci mila volte più piccole del protone! Per questo LHC permette di veder l'Universo così come era all'inizio della sua esistenza circa un millesimo di un miliardesimo di secondo dopo il Big Bang!

Quale futuro per gli acceleratori HEP

Gli acceleratori non vengono utilizzati solo per la fisica ad alta energia (**H**igh **E**nergy **P**hysics, o HEP, in inglese). Migliaia di acceleratori vengono utilizzati anche dall'industria e in medicina e centinaia per le ricerche applicate, si tratta principalmente di quelli che producono luce di sincrotrone. Solo qualche decina sono gli acceleratori in uso per la ricerca di particelle elementari e nucleari. Senza dubbio la fisica delle particelle è il principale motore tecnologico di innovazione nel campo degli acceleratori. Quale sarà il passo successivo a LHC? In primo luogo c'è HL-LHC (**H**igh **L**uminosity **LHC**, ovvero LHC ad Alta Luminosità). Si tratta di un progetto, basato su nuovi magneti superconduttori circa 50 per cento più potenti di quelli di LHC, che consiste in una nuova configurazione della macchina che mira ad aumentare considerabilmente il numero di collisioni. È come se si accendesse una luce più potente capace di illuminare una stanza per vedere molto più chiaramente e scoprire dettagli che altrimenti sarebbero nascosti nel rumore di fondo. HL-LHC, in fase di costruzione, sarà installato tra il 2024 e il 2025 ed il suo funzionamento è previsto fino a circa il 2040.

Nel frattempo una grande rete di laboratori e istituzioni mondiali collabora con il CERN allo studio di nuove macchine per l'epoca post LHC e HL-LHC, tra cui:

1) *Il collisore lineare elettroni-positroni* (o antielettroni) che vede due progetti in competizione: *ILC* (**I**nternational **L**inear **C**ollider), ovvero una macchina lunga 30 km basata su cavità superconduttrici, e *CLIC* (**C**ompact **Li**near **C**ollider) basato su cavità RF resistive ad alta frequenza (12 GHz) con apertura millimetrica e precisione di allineamento di nanometri sulla lunghezza di un tunnel di 50 km. Mentre ILC è limitato ad un'energia tra 0,5 e 1 TeV, il CLIC può raggiungere 3 TeV di energia nel centro di massa, comportando però un consumo elettrico molto elevato pari a 600 MW (senza la superconduttività!).

2) *Il collisore circolare del futuro FCC* (Future Circular Collider), un anello circolare di 100 km, con potenti magneti superconduttori due volte più potenti dei magneti di LHC per generare collisioni protoni-protoni fino a 100 TeV. Raggiungere questa energia incredibile dipende fortemente dallo sviluppo di nuove tecnologie superconduttive per i magneti dell'acceleratore che debbono essere due volte più potenti di quelli di LHC. Lo sviluppo della tecnologia dei magneti per FCC è appena iniziata e si basa sui risultati di HL-LHC.

Quale tra questi acceleratori vincerà la gara? Difficile dirlo.

Per preparare l'aggiornamento della strategia europea per la fisica delle particelle del 2020, un processo che coinvolge tutti i principali laboratori europei, il CERN ha lanciato uno studio completo di FCC che comprende la geologia e l'ingegneria civile per affrontare la formidabile sfida di poter passare sotto il lago di Ginevra e le varie catene montuose.

La fine di questo decennio è il momento ideale per ilprocesso decisionale, dato che i risultati

del secondo run LHC (2015-2018) saranno già disponibili. Non è troppo presto per pensare già agli acceleratori di futura generazione (dopo il 2040), considerando che tali progetti prevedono un ciclo di venti anni. Nel frattempo si spera che le nuove tecnologie che si stanno sviluppando ora per LHC ad alta luminosità entrino rapidamente nel campo dell'applicazione, come ad esempio nel settore medico e in quello delle energie rinnovabili.

"A look into the future" Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

“Quarks” Margarita Cimadevila 2006, *Acrilico e tecnica mista su tela*
www.cimadevila.tk

Secondo il Modello Standard, detto anche Modello a quark, le particelle dell’interazione forte (adroni) si aggregano in gruppi di due e tre coppie quark-antiquark (mesoni) o di tre quark (barioni). Le particelle che non possono essere classificate secondo tale schema sono dette particelle esotiche, tetraquark e pentaquark. Nel 2016 l’esperimento LHCb ha confermato l’esistenza del pentaquark annunciata nel luglio del 2015.

"Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN" (CERN-PHOTO-8410523)
Il Premio Nobel per la Fisica nel 1984 fu assegnato congiuntamente a Carlo Rubbia e Simon van der Meer *"per il contributo decisivo al grande progetto che ha portato alla scoperta delle particelle W e Z, mediatori dell'interazione debole."*

"François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012" Islam Mahmoud Sweity 2014, *Disegno a carboncino (ispirato a una foto di Maximilian Brice)*
Il Premio Nobel per la Fisica 2013 fu assegnato congiuntamente a François Englert e Peter Higgs *"per la scoperta teorica del meccanismo che permette di comprendere l'origine della massa delle particelle elementari, recentemente confermato dalla scoperta della particella fondamentale prevista, da parte degli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN."*

I fisici e gli esperimenti

Ana Maria Henriques Correia e João Martins Correia

La storia raccontata qui brevemente riguarda il CERN, il Laboratorio europeo per la fisica delle particelle con i suoi giganteschi acceleratori e rivelatori di particelle. È la storia degli esperimenti che si effettuano a LHC, ovvero l'acceleratore più grande del CERN dove le particelle ad alta energia (un'energia davvero molto alta!), vengono fatte collidere tra loro. Tali particelle rompendosi liberano i costituenti fondamentali della materia.

Il CERN ricrea i processi che si verificarono nei primi istanti dell'origine dell'Universo utilizzando macchine e rivelatori sofisticati come **ATLAS** (in inglese **A T**oroidal **L**HC **A**pparatu**S**) e **CMS** (in inglese **C**ompact **M**uon **S**olenoid). ATLAS e CMS, i due più grandi esperimenti tra i quattro principali di LHC, sono stati progettati per sfruttare appieno il potenziale di scoperte offerto da LHC. ATLAS è il più grande rilevatore in volume fino ad oggi costruito per un collisore di particelle. È costituito da un cilindro di 46 metri di lunghezza, 25 metri di diametro, un peso di 7000 tonnellate (comparabile a quello della Torre Eiffel) e si trova all'interno di una caverna situata 100 metri sotto terra. Il rivelatore CMS è invece lungo solamente 21 metri, ha un diametro di 15 metri ed è costruito attorno ad un enorme magnete solenoide che genera un campo di 4 tesla, un campo equivalente a circa 100000 volte il campo magnetico della Terra. Il campo magnetico è circoscritto all'interno del giogo in acciaio che rappresenta la maggior parte del peso totale del rivelatore, ovvero 14000 tonnellate (cioè il doppio della Torre Eiffel!). I rivelatori sono strumenti a più strati che sono stati progettati per individuare alcune delle particelle più piccole e con energia più elevata create sulla terra. I diversi sottosistemi di rilevamento che formano CMS, disposti a strati intorno al punto di collisione, registrano la traiettoria, il momento e l'energia delle particelle, consentendone l'individuazione e la misura di ciascuna di esse, mentre i potenti sistemi magnetici all'interno dell'acceleratore, piegando il percorso delle particelle cariche, ne misurano con alta precisione il momento.

Prima di eseguire le collisioni, le particelle nei fasci sono accelerate e stoccate in pacchetti all'interno dell'acceleratore, un anello di 27 km in modo da aumentarne la velocità fino al 99,999999 per cento della velocità della luce. Di volta in volta, le traiettorie delle particelle vengono curvate per scontrarsi esattamente al centro dei rilevatori ATLAS e CMS. Quando questo accade, l'energia della collisione si trasforma in massa e in particelle mai osservate prima a breve durata di vita che si sparpagliano in tutte le direzioni nei diversi strati del rivelatore e così facendo potrebbero fornire indizi sul comportamento della natura a livello fondamentale. Al centro del rilevatore avvengono oltre un miliardo d'interazioni di particelle ogni secondo. Questa quantità di dati equivale a 20 conversazioni telefoniche simultanee effettuate da ogni persona presente sulla terra. Solo una su un milione di tali collisioni è considerata potenzialmente interessante e viene registrata per un'analisi dei dati più approfondita. Il 4 luglio 2012 ATLAS e CMS hanno annunciato la scoperta del bosone di Higgs con un'energia a riposo pari a 126,5 GeV. Attualmente gli esperimenti di LHC stanno analizzando ulteriormente le proprietà e le caratteristiche del bosone di Higgs attraverso l'esplorazione di energie d'interazione più elevate ed eventi derivanti dalle collisioni protone-piombo. I bosoni di Higgs hanno una vita molto breve, una volta creati esistono solo per un miliardo di miliardesimo di miliardesimo di secondi prima di decadere in particelle più leggere. Tuttavia ci si pone la domanda se esistano particelle cosiddette 'esotiche' a lunga vita media. Tali particelle potrebbero essere infatti le messaggere di una nuova fisica che va al di là del Modello Standard ed interagirebbero raramente con la materia ordinaria.

LHCb (in inglese **LHC**-**b**eauty) è un altro esperimento di LHC che studia ciò che è successo nei primi secondi dopo il Big Bang quando l'antimateria scomparve lasciando posto alla materia che costituisce il mondo in cui viviamo e che ci circonda. Il mondo e l'esistenza quotidiana rappresentano tuttora un mistero cosmico incredibile, sicuramente sconosciuto alla maggioranza...! Quando l'antimateria e la materia entrano in contatto, quello che avviene è avvincente. Nel lampo di un batter d'occhio entrambe, materia ed antimateria, svaniscono, distruggendosi

“ATLAS Remeshed-Higgs Boson” Davide Angheleddu 2016, *Fibre di vetro e acrilico lunghezza 1.5 m*

Rappresentazione 3D del Bosone di Higgs a partire dalla simulazione grafica fornita dall’esperimento ATLAS. Il Bosone di Higgs materializzato dai 2 muoni e dai 2 elettroni rappresentati in blu. La scultura è stata realizzata in 3 fasi:
1) Simulazione attraverso un procedimento grafico e un algoritmo remeshing per creare una scultura su modello virtuale;
2) Sintetizzazione laser per ottenere un modello ad alta precisione in nylon;
3) Utilizzazione dell’antico metodo a cera persa per realizzare la scultura finale nel materiale prescelto.

Progetto presentato nel luglio 2016 alla mostra “Extreme-alla ricerca di particelle”, organizzata dal Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci di Milano in collaborazione con il CERN e INFN. La scultura e il video che mostra il processo di remeshing è stato presentato alla Galleria d’Arte Grunwald dell’Indiana University a Bloomington nel novembre 2016.

www.davideangheleddu.weebly.com.

“ATLAS Remeshed-Higgs Boson” Davide Angheleddu 2015, fotoprint

“Matter-Anti-Matter, symmetry 4” Michael Hoch, 2012 *composizione fotografica stampata su Alluminio Dibond 100 cm x 100 cm,* basata sul rivelatore CMS.

CMS è uno dei rivelatori di particelle di LHC. Ha le dimensioni di un edificio di sei piani e contiene elementi di rilevazione che hanno una larghezza equivalente a quella di un capello umano.

Michael Hoch è il fondatore di art@CMS. Durante la conferenza EPS-HEP 2017 a Venezia ha ricevuto il premio “Outreach 2017” dalla divisione di fisica delle particelle della European Physical Society per le sue iniziative volte a evidenziare la bellezza concettuale e materiale della fisica delle alte energie nonché per l’ispirazione delle sue opere che accomunano arte e scienza. Il comitato ha riconosciuto “l’eccezionale talento di Michael Hoch nel portare gli aspetti scientifici all’attenzione del pubblico ...”

Art@CMS è un programma educativo che agisce come una fabbrica di idee, volto a creare una piattaforma di apprendimento e condivisione per l’esperimento CMS di LHC al CERN e iniziato con l’intento di creare una connessione tra arte e scienza per far conoscere il lavoro di CMS e del CERN a un pubblico più ampio. Si tratta di una collaborazione tra la comunità scientifica della fisica delle alte energie e le comunità artistiche, i musei, gli insegnanti d’arte e gli insegnanti di scienze. Il programma è composto di 2 moduli complementari:

• art@CMS exhibitions, ovvero la realizzazione di mostre per creare un dialogo tra la comunità scientifica della fisica delle alte energie e le comunità artistiche, con l’obiettivo di creare e presentare le opere d’arte degli artisti che fanno parte di tale collaborazione e facilitare le mostre collettive e individuali a livello mondiale.

• SciArt Workshops (Science & Art @ School), ovvero la realizzazione di un laboratorio interdisciplinare per avvicinare, attraverso l’indagine artistica, studenti d’arte e di scienza di istituti scolastici e universitari al mondo scientifico della fisica delle particelle e della ricerca fondamentale.

https://artcms.web.cern.ch

l'una con l'altra e lasciandosi dietro solo polvere d'energia. Questa relazione esplosiva suscita diverse domande intriganti, quali: "perché viviamo in un universo fatto solo di materia? Materia e antimateria sono state create in quantità uguali durante il Big Bang? Quale meccanismo sconosciuto è entrato in gioco per impedire che materia e antimateria si annichilassero completamente?" LHCb è stato costruito per studiare le lievi asimmetrie esistenti tra materia e antimateria attraverso le particelle chiamate 'quark di bellezza'. Anche se attualmente assenti nell'universo, i quark di bellezza erano presenti dopo il Big Bang e oggi vengono osservati in ingenti quantità all'interno di LHCb insieme ai loro rispettivi quark di antimateria, gli 'antiquark di bellezza'. Attraverso lo studio con una precisione senza precedenti della lieve differenza di decadimento tra il quark di bellezza e la sua antiparticella, LHCb sta svelando uno dei misteri fondamentali dell'Universo. LHCb ha recentemente confermato l'esistenza di una nuova particella, chiamata 'Ξcc^{++} ($Xicc^{++}$)', che contiene due quark incanto (dall'inglese charm) e un quark up. La massa di questa nuova particella, un barione costituito da due quark pesanti, è quattro volte superiore a quella del protone ed è pari a 3621 MeV.

ALICE (in inglese **A L**arge **I**on **C**ollider **E**xperiment), un altro esperimento di LHC, cerca di capire come si forma il plasma quark-gluone attraverso l'investigazione dell'esistenza e delle proprietà della fusione tra protoni e neutroni che in condizioni estreme possono liberare quark e gluoni dal loro legame. La materia ordinaria è fatta di atomi costituiti da un nucleo circondato da una nuvola di elettroni. I nuclei sono fatti di protoni e neutroni che a loro volta sono fatti di quark. Nei protoni ed nei neutroni i quark sono legati insieme da una forza nota come interazione forte che viene mediata dallo scambio di particelle chiamate 'gluoni'. I quark così come i gluoni non sono mai stati osservati isolati ma sembrano essere legati indissolubilmente insieme e confinati all'interno di particelle composite, quali i protoni ed i neutroni. Questo fenomeno è conosciuto con il nome di 'confinamento '. Due sono le questioni fondamentali della fisica delle interazioni, ormai per la maggior parte nota, che restano tuttavia ancora irrisolte: l'origine del confinamento ed il meccanismo di generazione della massa. Come è noto, i protoni e i neutroni sono costituiti da tre quark, tuttavia addizionando le masse dei tre quark il valore che si ottiene è pari solo a circa l'uno per cento della massa del protone o del neutrone. Allora la domanda è: "da dove proviene il restante 99 per cento della massa?"

La teoria che oggi descrive l'interazione forte (conosciuta come 'cromodinamica quantistica') prevede che i quark e i gluoni possano non essere più confinati all'interno di particelle composite solo a temperature e densità molto elevate. I quark e i gluoni potrebbero esistere liberamente in uno stato di materia conosciuto come 'plasma di quark e gluoni'. Tale transizione avverrebbe ad un valore critico stimato di temperatura circa 100 mila volte maggiore della temperatura esistente nel nucleo del Sole! Tali valori di temperatura non esistono più in natura sin dalla nascita dell'Universo. Le collisioni che avvengono in LHC tra nuclei pesanti (come per esempio quelle dei nuclei degli atomi di piombo) accelerati fino ad una velocità vicina a quella della luce dovrebbero essere in grado di ottenere, sebbene in piccoli volumi delle dimensioni di un solo nucleo e per brevissimi istanti, una goccia di tale materia primordiale e di osservare, attraverso l'espansione e il raffreddamento, il ritorno alla materia ordinaria. ALICE sarebbe quindi in grado di esplorare in profondità la fisica del confinamento, di sondare la generazione della massa nelle interazioni forti e di vedere il comportamento della materia subito dopo il Big Bang.

Inoltre, quando i protoni si scontrano frontalmente in LHC, le collisioni ricreano un microlaboratorio capace di esplorare molti altri fenomeni tra cui quelli relativi ai protoni stessi. Questa è la parte della fisica che studia l'esperimento **TOTEM** (in inglese **Tot**al, **E**lastic and diffractive cross-section **M**easurement). Attraverso misure di precisione delle particelle che emergono dalle collisioni molto prossime alla direzione dei fasci di LHC (ovvero le direzioni cosiddette 'in avanti'), TOTEM analizza una parte della fisica che non è facilmente accessibile agli altri esperimenti di LHC. Inoltre, questo esperimento misura la probabilità totale, conosciuta come 'sezione trasversale', delle interazioni protone-protone (ovvero la dimensione che un protone presenta se preso come bersaglio), nonché i fenomeni di dispersione analoghi a quelli della diffrazione della luce.

Circa un'altra ventina di installazioni e diversi progetti sperimentali sui protoni accelerati si

avvalgono delle competenze e dell'innovazione tecnologica del CERN. Tra questi, si conta la lunga tradizione del Laboratorio nella fisica dei neutrini con i progetti di ricerca e sviluppo dei rilevatori dei futuri esperimenti mondiali. Da molti anni il CERN fa ricerca sull'antimateria con l'impianto **AD** (in inglese **A**ntiproton **D**ecelerator). Recentemente è stato inaugurato **ELENA** (in inglese **E**xtra **L**ow **E**nergy **A**ntiprotons), un anello che decelera gli antiprotoni erogati da 5,3 MeV fino a 100 KeV. Grazie a AD, i fisici potranno non solo produrre e intrappolare gli atomi di antimateria , ma anche studiare con maggiore precisione le proprietà fondamentali e le interazioni degli ioni anti-idrogeno, dell'elio antiprotonico e degli ioni anti-idrogeno allo stato libero o in legame, per scoprire se un mondo fatto interamente di antimateria sarebbe esattamente uguale (ad immagine speculare) al mondo attuale. Nella sala nord (NA64) dell'acceleratore SPS (in inglese Super Proton Synchrotron) si ricerca il decadimento visibile e invisibile dei fotoni cosidetti 'scuri', ovvero le particelle elementari ipotetiche portatrici della forza elettromagnetica nella materia oscura. Con il telescopio ad assioni solari **CAST** (in inglese **C**ERN **A**xion **S**olar **T**elescope) si cerca di individuare le ipotetiche particelle dette 'assioni' e i 'camaleonti solari'. Queste particelle teoriche potrebbero provenire dal plasma nel cuore del Sole (a ben 16 milioni di gradi centigradi) e, se se ne prova l'esistenza, sarebbero responsabili rispettivamente della materia oscura e dell'energia oscura, ovvero di circa il 95 per cento dell'Universo.

"Chameleon a hypothetical scalar particle" Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

Camaleonti: particelle proposte nel 2003 da Justin Khoury e Amanda Weltman.

Un campo di ricerca meno ampio ma comunque importante è rappresentato dai circa 50 esperimenti all'anno effettuati da **ISOLDE** (in inglese Isotope mass Separator On-Line facility). Si tratta di un impianto unico al mondo che produce una panoplia di nuclei radioattivi a partire dall'urto su un bersaglio dei protoni energetici forniti dall'acceleratore Booster del CERN. Dopo un'accelerazione, ISOLDE fornisce nuclei radioattivi "esotici" per studiare la fisica nucleare e atomica, la fisica dello stato solido, la fisica dei materiali e le scienze della vita. I valori di energia a ISOLDE sono stati recentemente incrementati. La produzione di nuclei atomici radioattivi esotici, di stati eccitati e di condizioni di reazione simili a quelle che avvengono nelle stelle, permettono a ISOLDE di essere all'avanguardia nella ricerca nucleare fondamentale e nelle applicazioni di tecniche nucleari radioattive. Grazie alla costruzione della struttura **CERN-MEDICIS** (in inglese **Med**ical **I**sotopes **C**ollected from **IS**OLDE), le funzionalità di ISOLDE, dedicate specialmente all'ottimizzazione della radio-diagnostica e della terapia del cancro, sono state estese. In particolare, nell'ambito della collaborazione MEDICIS-PROMED (MEDICIS-**Pro**duced radioisotope beams for **Med**icine), dedita alla formazione di una nuova gene-razione di scienziati imprenditori capaci di mettere in relazione varie discipline attraverso istituti di ricerca, aziende private e ospedali. Questo porterà a sua volta a un'azione per una rapida implementazione di nuovi tipi di attrezzature nelle aziende e di nuovi radiofarmaci per il trattamento del cancro negli ospedali. Fasci di ioni radioattivi mai utilizzati fino ad ora produrranno lotti specifici ad uso medico di radiofarmaci. Nel 2017 CERN-MEDICIS ha prodotto per la prima volta radioisotopi per la ricerca medica.

Infine, l'esperimento **CLOUD** (in inglese **C**osmics **L**eaving **Ou**tdoor **D**roplets) studia come i raggi cosmici, ovvero le cariche di particelle che bombardano l'atmosfera terrestre dallo spazio, influenzino la copertura delle nuvole attraverso la formazione di nuovi aerosol (cioè le piccole particelle sospese nell'aria che possono accrescersi e formare i germi delle nuvole dette 'Gocce') o direttamente le nuvole stesse. Le nuvole hanno un forte impatto sull'equilibrio energetico della Terra. I loro cambiamenti, in percentuale anche piccoli, producono importanti effetti sul clima. Tuttavia, la formazione di aerosol è ancora poco compresa. Le misure relative di microfisica, effettuate in condizioni di laboratorio controllate, sono importanti per capire meglio l'aereosol atmosferico e offrono la chiave per svelare le possibili connessioni tra i raggi cosmici e le nuvole. Il PS (in inglese **P**roton **S**ynchrotron) del CERN fornisce una fonte artificiale di raggi cosmici che permette di simulare le condizioni esistenti in natura tra il livello del suolo e la stratosfera. Un fascio di particelle viene fatto passare attraverso una camera di nuvole per registrare e analizzare gli effetti relativi sulla produzione di aerosol e sulle nuvole liquide o ghiacciate che si trovano all'interno della camera.

Un altro esempio che illustra l'utilità del CERN a livello globale è la griglia di calcolo di LHC. Sin dalle prime collisioni, i dati sono stati prodotti a un tasso temporale senza precedenti, pari a decine di petabyte all'anno (1 petabyte equivale a un biliardo, ovvero un milione di miliardi, in cifre 1.000.000.000.000.000 di byte che corrispondono a circa 2000 dischi rigidi da 500 gigabyte di un PC). Si è trattato di una sfida importante per l'epoca che prevedeva l'analisi dati attraverso un'infrastruttura computerizzata in rete che collegasse entro il 2012 ben 140 centri di calcolo di 35 paesi. La griglia WLCG (in inglese LHC Worldwide Computing) è la più grande rete di elaborazione distribuita esistente al mondo. Oggi collega più di 170 strutture informatiche in una rete mondiale distribuita in 42 paesi. La missione del progetto WLCG è quella di fornire risorse globali di calcolo per memorizzare, distribuire e analizzare i petabytes di dati generati da LHC. Nel 2017 sono stati memorizzati ben 12,3 petabyte in un mese. Oggi le attività della rete si estendono a molti progetti pubblici tra cui la protezione civile, le scienze della terra, la chimica computazionale, e le scienze della vita per la gestione e l'analisi di dati medici.

L'unico modo per realizzare progetti così impegnativi, con le risorse intellettuali e finanziarie necessarie, e per massimizzare la produzione scientifica, è attraverso grandi collaborazioni internazionali composte da migliaia di persone. La nave ammiraglia di tale impegno lavorativo è la natura universale degli esperimenti di LHC che hanno attirato partecipanti di oltre 100 nazionalità da tutti i continenti, tra cui l'Africa.

Una gran parte dei fondi per progetti di tali dimensioni provengono dagli investimenti delle agenzie di finanziamento dei paesi partecipanti. Per esempio i contributi per ATLAS e CMS, le collaborazioni scientifiche più grandi, provengono dal CERN e dalle risorse messe a disposizione dalle singole università.

Per fare il loro lavoro ATLAS e CMS selezionano la propria leadership con una struttura organizzativa che consente ai diversi gruppi di ricerca di gestirsi autonomamente e che coinvolge direttamente i propri membri nei processi decisionali. Gli scienziati di solito lavorano in piccoli gruppi, scegliendo le aree di ricerca e i dati da analizzare che li interessano maggiormente. I risultati della collaborazione sono condivisi tra tutti i membri e sono soggetti a rigorosi processi di revisione e di controllo prima che vengano resi pubblici. Il successo della collaborazione è quindi legato all'impegno individuale nella fisica e alla prospettiva di nuovi risultati emozionanti raggiungibili solo attraverso un vero e proprio sforzo collettivo tra scienziati, ingegneri, tecnici e personale amministrativo.

Pur essendo un mondo unico di conoscenza, diversità e complementarità che contribuisce in gran parte all'accademia, all'educazione e alla sensibilizzazione sullo stato dell'arte della scienza e della tecnologia, il CERN è interamente rivolto al futuro. Il Laboratorio esplora continuamente le proprie capacità nell'uso delle esistenti strutture di ricerca e definisce nuove strategie da adottare per la futura fisica delle alte energie. Tra i diversi studi, vale la pena di citare quello fatto sulla prospettiva scientifica della fisica oltre i collisori (ovvero Physics Beyond Colliders Study in inglese). Questi studi permettono di esplorare ciò che il Modello Standard ancora non può spiegare, come ad esempio, l'esistenza della materia oscura, la prevalenza della materia sull'antimateria o la massa del neutrino.

Come la stessa Fabiola Gianotti, Direttore generale del CERN, ha affermato nel gennaio del 2017: *"Sappiamo che una nuova fisica esiste, non sappiamo dove sia in termini di scala energetica e/o d'interazione, ma il nostro approccio esplorativo deve essere il più ampio possibile, poiché la diversità scientifica è fondamentale. Bisogna sfruttare le capacità uniche del complesso e dell'infrastruttura degli acceleratori del CERN che a livello mondiale sono complementari ad altri progetti e ottimizzare le risorse del nostro settore."*

La creatività e l'innovazione sono necessari per sviluppare ulteriormente la fisica, stabilire i parametri necessari dell'acceleratore e realizzare esperimenti senza precedenti. Il tempo di attuazione è significativo, sono necessari circa venti anni per la progettazione e la costruzione di un acceleratore su larga scala che richiede uno sforzo coordinato. L'obiettivo è quello di garantire la continuità del programma della fisica delle particelle a livello mondiale dopo l'era LHC. Lo studio sul Futuro Collisore Circolare (FCC) sta esplorando la fattibilità dei diversi scenari dei collisori di particelle con l'obiettivo di espandere in modo significativo le frontiere energetiche e la luminosità attuale. LHC ad alta luminosità è uno strumento unico al mondo che permette di esplorare le frontiere energetiche disponibili fino al 2035.

Si tratta di una finestra temporale che definisce la preparazione dell'infrastruttura di ricerca per la fisica delle alte energie del dopo LHC.

“Accelerators and detectors to understand the Universe” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

Il CERN e le tecnologie dell'informazione

Frédéric Hemmer

Uno sguardo al passato

La storia dell'informatica al CERN risale più o meno a quando l'Organizzazione è stata creata. La proposta di acquistare un "computer elettronico" fu discussa nel lontano novembre del 1955 in occasione della terza riunione del comitato di politica scientifica del CERN, presieduto allora da Werner Heisenberg, uno dei fondatori della meccanica quantistica. Il Ferranti Mercury, che gli ingegneri Ferranti impiegarono ben due anni a costruire, fu il primo computer installato al CERN nell'estate del 1958; occupava l'intera sala computer dell'epoca ed aveva un ciclo di velocità operativa di 60 microsecondi. Pensare che oggi le unità di elaborazione centrale (in inglese **C**entral **P**rocessing **U**nit, o brevemente CPU) sono centinaia di migliaia di volte più veloci!

Il secondo passo significativo nella storia del calcolo al CERN fu l'acquisizione di IBM 709, una macchina installata nel 1961 che usava ancora le valvole (basate su tubi a vuoto) come componenti elettronici. Si trattava di fatto del primo vero computer con un linguaggio di programmazione, il cosiddetto FORTRAN (dall'inglese **For**mula **Tran**slation, ovvero traduzione di formula). Il 709 nella sua versione con i transistor si trasformò poi in 7090, ovvero un computer di seconda generazione installato nel 1963. Durante lo stesso periodo cominciarono ad apparire anche i mini computer generalmente collegati direttamente alle apparecchiature nelle sale sperimentali. I mini computer potevano registrare su nastro i dati che venivano poi portati al centro informatico per l'analisi. Alla fine degli anni '60 più di 50 mini computer furono installati su tutto il sito del CERN.

È da notare che già a quel tempo si tentò di collegare i computer centrali alle zone sperimentali attraverso dei sistemi di rete domestica destinati a sostituire il metodo denominato 'bicicletta on-line' per il trasporto al centro informatico dei nastri con priorità di elaborazione in modo da dare una rapida risposta agli esperimenti.

Nello stesso periodo furono installate le prime macchine della CDC (**C**ontrol **D**ata **C**orporation) che, a causa della mancanza di un sistema operativo stabile, necessitarono un lungo tempo di commissionamento. L'inizio degli anni '70 fu caratterizzato dall'installazione del primo supercomputer: il CDC 7600. Durante i quindici anni a seguire, il 7600 fu potenziato con diversi modelli di Cyber e l'aggiunta dei sistemi IBM (370/168, 3081, 3050, ES9000, etc.) per poter soddisfare le capacità di calcolo necessarie agli esperimenti. Nel 1988 le macchine CDC furono sostituite dal supercomputer Cray XMP. Dal 1982 in poi, la società DEC penetrò il centro informatico del CERN fornendo servizi centralizzati basati sui VAX (dall'inglese **V**irtual **A**ddress e**X**tension) grazie all'istallazione di 100 PDP (**P**rogrammed **D**ata **P**rocessor) e VAX stessi su tutto il sito del Laboratorio.

L'inizio degli anni '90 vide l'apparizione delle postazioni di lavoro basate sull'architettura del computer con istruzioni ridotte, dette RISC, dall'inglese **R**educed **I**nstruction **S**et **C**omputer, (Apollo, DEC, HP, SGI e SUN) che alcuni anni dopo sostituirono i supercomputer perché dotate di processori veloci, capaci di archiviare i dati su disco a minor costo. Lentamente e progressivamente il numero di computer nel centro di calcolo del CERN crebbe da qualche decina negli anni '70 a diverse centinaia alla fine degli anni '90.

Al tempo stesso le velocità di elaborazione dei personal computer desktop e portabili, dotati di microprocessori Intel, divennero tali (200 Mhz nel 1997) da poter essere utilizzate per l'elaborazione dei dati di fisica. I computer connessi monopolizzarono poco a poco l'intero centro informatico che oggi è costituito da più di 14000 server, 200000 CPU core e 200 petabyte di dati su nastro.

Verso il presente

La rete informatica

Il CERN ha iniziato lo sviluppo della comunicazione tra computer già negli anni '60. A tale sco-

po prima di adottare lo standard industriale Ethernet, dotando ogni ufficio, acceleratore e rivelatore secondo il protocollo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), il Laboratorio sviluppò diversi sistemi (tra cui FOCUS, OMNET, CERNET, ecc.).

È stata però l'evoluzione del networking esterno a permettere la svolta decisiva. All'inizio degli anni '80 la trasmissione dei dati viaggiava a migliaia di bit per secondo (Kbps) collegando solamente una manciata di siti tra di loro. Negli anni '90 con il raggiungimento dei 100 megabit per secondo (Mbps) il CERN riuscì a coprire l'80 per cento della capacità Internet europea diventando il più grande punto di scambio Internet in Europa. Oggi gli istituti di fisica delle alte energie sono connessi al CERN con velocità di gigabit per secondo (Gbps). In alcuni siti si raggiungono addirittura più di 100 Gbps al secondo!

In assenza di una presenza fisica la capacità della rete di computer è essenziale per il lavoro della comunità della fisica delle alte energie connessa al CERN. I dati di LHC vengono riprodotti ininterrottamente (24 ore per 7 giorni) agli altri centri sparsi nel mondo in modo da avere una copia aggiornata sempre a disposizione.

Il WEB

Non si può parlare di calcolo al CERN senza menzionare il Web. Al di là della visione del suo creatore, Tim Berners-Lee, è stata la necessità di migliaia di scienziati della fisica delle alte energie in tutto il mondo, nonché l'emergere di nuove tecnologie (si pensi alla rapida crescita dei protocolli globali Internet con TCP/IP e all'avvento delle postazioni di lavoro grafiche MAC e PC accessibili a tutti), ha permettere al World Wide Web (WWW) di compiere una vera e propria rivoluzione mondiale.

La GRID

La rete mondiale di LHC Computing Grid (in sigla WLCG, ovvero Worldwide LHC Computing Grid) è il più grande sforzo scientifico che mira a condividere le risorse di calcolo in tutto il mondo. Si tratta di un progetto che è iniziato all'inizio del secolo a Argonne e all'Università di California Santa Cruz grazie anche agli importanti contributi della Commissione Europea e di vari istituti della fisica delle alte energie. Il WLCG si è poi evoluto in un robusto e resiliente sistema distribuito su oltre 170 siti, tutti interconnessi con collegamenti ad alta velocità (Gbps) in grado di creare ben mezzo milione di core e 500 petabyte di dati relativi a LHC disponibili per l'analisi.

Oggi la rete mondiale di LHC Computing, detta 'Grid', collega in modo sistematico simultaneamente mezzo milione di posti di lavoro. Si tratta di un miglioramento decisivo rispetto al singolo calcolo del Ferranti Mercury di quasi 60 anni fa.

La conservazione dei dati

Negli ultimi cinquant'anni la sfida è stata rappresentata dalla gestione e dall'elaborazione dei dati prodotti dagli acceleratori e dagli esperimenti. Cosa succederà quando gli esperimenti finiranno e i rivelatori verranno smantellati? I dati potranno restare per sempre sul nastro? I programmi FORTRAN del 1960 saranno ancora in grado di gestire e comprendere dati? Potremo ancora capire cosa faceva un programma e quali erano le ipotesi relative assunte dall'autore? Per la fisica delle alte energie queste sono questioni ancora aperte che richiedono la conservazione dei dati digitali nel tempo. In realtà il problema è molto più ampio e, a mio parere, spesso sottovalutato. E ancora, potremo vedere i film dei nostri figli registrati da fotocamere digitali di 10 anni fa? O leggere i supporti su cui sono stati memorizzati immagini e suoni? Potremmo ancora ritrovare e leggere i documenti scritti in Word alla metà degli anni '90?

Open Access (pubblicazioni, dati e codici)

Il CERN adotta la politica di accesso aperto (Open Access) che riflette i valori sanciti nella

Convenzione più di sessant'anni fa e che sta diventando sempre più importante per gli Stati membri, la Commissione Europea e gli altri partner istituzionali mondiali. Da più di vent'anni la maggior parte delle pubblicazioni di fisica del CERN viene resa immediatamente e apertamente accessibile online sotto forma di preprint (prestampato) prima ancora di essere pubblicata in giornali o riviste. Si tratta del cosiddetto 'Green' Open Access.

Fino al 2013 il servizio d'informazione scientifica del CERN ha finanziato la tassa di pubblicazione per articolo (APC in breve, dall'inglese **A**rticle **P**rocessing **C**harge) per alcune delle riviste "Gold" Open Access, ovvero per quelle riviste che mettono a disposizione gratuita ai lettori i lavori ancora in fase di approvazione. Grazie al partenariato con alcune case editrici dal 2010 vengono pubblicati sistematicamente anche gli articoli con gli esiti sperimentali delle collaborazioni di LHC nelle riviste Gold Open Access dove gli autori del CERN sono tenuti a rendere noti tutti i loro risultati.

Diverse tecnologie CERN vengono sviluppate in Open Access. Ad esempio "Invenio" è un pacchetto di gestione di librerie software in Open Source (che significa sorgente aperta, ovvero quando il codice sorgente è reso pubblico per permettere ad altri di apportarvi modifiche) che oggi beneficia dei contributi internazionali di istituti di collaborazione tipicamente utilizzati per le biblioteche digitali. Da tempo il CERN e la Commissione Europea investono in "Zenodo", l'archivio dati gratuito Open Access per le pubblicazioni e i dati di tutti i ricercatori del mondo.

Partenariato con l'industria: l'openlab del CERN

L'openlab del CERN, creato nel 2001, è un partenariato tra pubblico e privato, unico nel suo genere, che premette uno sviluppo più rapido di soluzioni dall'avanguardia per la comunità mondiale di LHC nonché una ricerca scientifica più ampia. Attraverso openlab, il Laboratorio collabora con le principali società di informatica (IT) e con altri istituti di ricerca.

L'openlab del CERN entra nella sua sesta fase di tre anni nel 2018. Come nella quinta fase continuerà ad affrontare sfide ambiziose in relazione ai rigorosi requisiti delle infrastrutture IT nei diversi settori, quali l'acquisizione dati, le piattaforme di calcolo, le architetture di archiviazione dati, lo stoccaggio e la gestione di calcolo, la rete, le comunicazioni e l'analisi dati.

Attraverso openlab il CERN può accedere alla propria complessa infrastruttura IT nonché esperienza ingegneristica che spesso si estende anche agli istituti di collaborazione nel mondo. La sperimentazione in un luogo esigente come quello del Laboratorio permette ai partner dell'industria delle tecnologie dell'informazione di avere un feedback accurato sui loro prodotti e, al tempo stesso, al CERN di valutare i meriti delle nuove tecnologie nella fase iniziale dello sviluppo in vista di un possibile utilizzo futuro. Openlab offre anche un terreno neutro per la realizzazione della ricerca e sviluppo avanzato con più di una società.

Educazione

La scuola di calcolo del CERN è aperta agli studenti post-laurea e ai ricercatori del Laboratorio o di istituti esterni con qualche anno di esperienza in fisica delle particelle elementari, in informatica o in settori correlati. Si tratta di una vera e propria "università estiva" che per due settimane l'anno fornisce una serie di lezioni, esercizi pratici e un diploma ufficiale CSC (**C**ERN **S**chool **C**omputing) a completamento di un esame finale basato sul sistema europeo per l'accumulazione e il trasferimento di crediti ECTS (**E**uropean **C**redit **T**ransfer and Accumulation **S**ystem).

La frequenza di partecipazione conta ogni anno tra 60 e 80 studenti provenienti da 15 a 30 nazionalità diverse (60 negli ultimi 10 anni), di cui circa l'80 per cento da paesi europei. I partecipanti, che possono anche far parte di altre comunità scientifiche al di fuori di quella della fisica delle particelle, sono generalmente attratti dai temi all'avanguardia che vengono insegnati.

Guardando al futuro

Con il Computing oramai in piena funzione la collaborazione WLCG guarda al futuro e si concentra sulle due fasi di sviluppo previste per LHC: la prima (2019-2020) relativa agli importanti

aggiornamenti degli esperimenti ALICE e LHCb (nonché ad una maggiore luminosità per LHC) e la seconda (2024-2025) relativa al progetto LHC ad alta luminosità (**H**igh **L**uminosity **L**arge **H**adron **C**ollider, in breve HL-LHC) volto ad aumentare la precisione dei rilevatori ATLAS e CMS per migliorali sostanzialmente.

I requisiti per la raccolta dati e per il calcolo previsti per HL-LHC cresceranno drasticamente fino a raggiungere valori pari a 500 petabyte. La necessità per l'elaborazione dei dati dovrebbe aumentare di un fattore oltre 10 volte maggiore di quello attuale senza contare l'apporto dovuto all'evoluzione tecnologica. Il Computing di LHC affronterà senza dubbio altre sfide significative ed emozionanti ed in una diecina d'anni evolverà in una collaborazione molto diversa da quella attuale, sempre mantenendo le caratteristiche necessarie alla cooperazione globale.

Gli specialisti del computer, i fisici e gli ingegneri hanno già iniziato a lavorare insieme intensamente per valutare le esigenze a lungo termine della potenza di calcolo e di rete del Futuro Collisore Circolare (FCC), un progetto complesso che implica una pianificazione manageriale, finanziaria e amministrativa specifica. Molte delle soluzioni relative a determinati settori tecnici, dai controlli di installazione all'analisi dei dati, compresa l'informatica, rimangono infatti ancora da sviluppare.

Trasferimento della conoscenza e delle tecnologie

Giovanni Anelli

Per perseguire i suoi ambiziosi obiettivi di ricerca, il CERN ha da sempre sviluppato strumenti all'avanguardia e applicato soluzioni tecnologiche innovative, soprattutto nei settori che riguardano i rivelatori di particelle, le tecnologie per gli acceleratori e l'informatica. Questi sviluppi coprono molte discipline, quali la microelettronica, la superconduttività, la criogenica e i materiali avanzati.

Queste tecnologie e, soprattutto, le conoscenze ad esse associate, sono attività chiave per l'Organizzazione ed è di fondamentale importanza che la società nel suo insieme possa beneficiarne.

Da molti anni il CERN promuove attivamente le applicazioni delle proprie innovazioni in campi che esulano dalla fisica delle alte energie, e ha sviluppato diversi strumenti per facilitare il trasferimento del suo know-how e competenza sia ad aziende che ad altri istituti di ricerca. Esempi di strumenti messi in opera sono la licenza Open Hardware (hardware libero) del CERN, il partenariato con l'industria, le licenze, gli accordi di consulenza e di servizio, e una rete di incubatori d'impresa negli Stati membri del CERN per aiutare le start-up che ambiscono adottare le tecnologie del CERN.

Il trasferimento della conoscenza all'industria è un processo generato inoltre attraverso l'acquisizione di componenti high-tech e associato alla mobilità delle persone: molti studenti e giovani ricercatori che hanno lavorato all'inizio della loro carriera al CERN vanno a lavorare in seguito nell'industria, che approfitta dunque della ricchezza della conoscenza da essi acquisita nell'Organizzazione.

La relazione con l'industria è vitale per l'Organizzazione. Il CERN ha bisogno dell'industria per la sua strumentazione avanzata, e allo stesso tempo aiuta l'industria a sviluppare nuovi prodotti e servizi, svolgendo contemporaneamente il ruolo di cliente e quello di fornitore di tecnologie e know-how.

Molti sono gli esempi di come la conoscenza generata al CERN ha avuto un impatto nella società, in campi ben diversi tra loro come le tecnologie di "imaging" medico avanzato, il trattamento dei tumori, la dosimetria, le applicazioni aerospaziali, la produzione di energia, e l'archiviazione e analisi dei dati.

Nella pagina seguente viene descritto un esempio di un'applicazione recente oggi in test preclinico in alcuni ospedali detta "ClearPEM" per la mammografia ad emissione di positroni (dall'inglese PEM, **P**oziton **E**mission **M**ammography).

"A clinical application: ClearPEM" Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

"An innovative technology" Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

Clear-PEM è un nuovo tipo di apparato per la scansione mammografica ad alta risoluzione sviluppato dalla collaborazione Crystal Clear del CERN capace di visualizzare le lesioni cancerose del seno. Questo apparato si basa sulle diverse tecnologie sviluppate per l'esperimento CMS di LHC.

ClearPEM

João Varela

ClearPEM (dall'inglese PEM, **P**ositron **E**mission **M**ammography) è un apparato di scansione ad emissioni di positroni per la mammografia ad alta risoluzione spaziale (1,4 mm) ed alta specificità sviluppato dalla Collaborazione Crystal Clear del CERN. Si tratta di un apparato che permette di visualizzare le lesioni provocate dal cancro al seno utilizzando una tecnica di bioimmagine basata sull'iniezione di un radioisotopo tracciante ad emissione di positroni nel flusso sanguigno. Grazie alla concentrazione del tracciante sulle lesioni tumorali è possibile ricostruire un'immagine della distribuzione spaziale nel corpo tramite la rilevazione delle coppie di fotoni prodotte dall'annichilazione degli elettroni con le loro relative antiparticelle, i positroni, nei tessuti interni. Quando positrone ed elettrone si annichilano creano due fotoni energetici che vengono emessi in direzioni opposte casuali. Nella tomografia a emissione di positroni, comunemente detta 'Positron Emission Tomography' o 'PET' in inglese, molti di questi eventi sono registrati da rivelatori di fotoni esterni che consentono di ricostruirne la direzione di emissione e di creare un'immagine 3D del tumore tramite l'uso di algoritmi sofisticati. La PET è un'efficiente ed innovativa applicazione pratica dell'antimateria che è stata realizzata quasi un secolo dopo la scoperta dell'antimateria stessa.

Lo scanner ClearPEM è il risultato degli sviluppi di lunga durata realizzati sui rivelatori di cri-stalli, i fotosensori, e l'elettronica di lettura necessari all'esperimento CMS di LHC. La collaborazione CMS ha costruito il calorimetro elettronico ECAL (**E**lectromagnetic **Cal**orimeter in inglese), un rivelatore di fotoni che utilizza circa ottantamila cristalli di tungstato di piombo utilizzato dal 2009 per misurare con alta precisione i fotoni prodotti nelle collisioni dei protoni in LHC. Le coppie di fotoni dovrebbero essere prodotte dal decadimento del bosone di Higgs, la particella scoperta nel 2012 e osservata, tra l'altro, negli eventi a due fotoni. La grande grande differenza sta nel fatto che i fotoni del decadimento del bosone di Higgs sono ben centomila volte più energetici dei fotoni di annichilazione tra positroni e elettroni! Di conseguenza il rivelatore dei fotoni di annichilazione può essere molto più piccolo di ECAL e quindi adatto per la scansione del seno.

La conoscenza e l'esperienza acquisita dai fisici ha permesso di creare un consorzio per l'utilizzo delle nuove tecnologie di questa importante applicazione tecnologica che permette la concezione e la costruzione di una raffinata strumentazione. Tale apparato è costituito da teste di rivelatori realizzati con 6144 cristalli scintillanti di Ortosilicato di Lutezio e Ittrio (LYSO) di dimensioni 2x2x20 mm capaci di rivelare i fotoni emessi dal radioisotopo accumulato nella lesione. Per la prima volta i fotodiodi a valanga (in inglese **A**valanche **P**hoto**d**iodes o APD), ovvero i fotosensori al silicio sviluppati per ECAL, sono stati utilizzati al posto del tradizionale fotomoltiplicatore in uno scanner PET per registrare la luce scintillante ge-nerata nei cristalli. Gli APD, associati ad un nuovo specifico microchip, hanno permesso di fabbricare teste di rivelatori molto compatte che possono essere posizionate attorno al seno. Questo sistema ha un'elevata sensibilità di rivelazione che consente non solo di determinare l'ubicazione della lesione ma anche la relativa attività metabolica, permettendo quindi una valutazione più accurata della portata della malattia nonché una migliore definizione tra le lesioni benigne e quelle maligne. Questo naturalmente costituisce un fattore determinante per la pianificazione successiva del trattamento della malattia e per i risultati sul paziente.

Sono state costruite due macchine ClearPEM: una per l'ospedale universitario di Coimbra all'istituto ICNAS (**I**nstituto de **C**iências **N**ucléares **A**plicadas à **S**aúde) e l'altra per l'ospedale San Gerardo di Monza. Le prestazioni di queste due macchine sono state convalidate in pazienti affetti da carcinoma mammario diagnosticato con procedure standard, esami e trattamenti. Il confronto tra le immagini dei pazienti prodotte rispettivamente dagli scanner commerciali PET e dalla ClearPEM ha messo in evidenza i netti vantaggi dovuti all'alta risoluzione spaziale ottenuta con la ClearPEM stessa.

Un semplice progetto di applicazione tecnologica come quello della ClearPEM, realizzatosi all'interno di un laboratorio di ricerca dove i fisici studiano niente di meno che l'origine dell'Universo

e cercano di capire l'asimmetria tra materia e antimateria nonché di svelare il mistero della materia oscura, è riuscito a stimolare l'immaginazione di tutti. Questo è uno dei tanti esempi di trasferimento tecnologico che illustra come la ricerca fondamentale nella fisica delle particelle genera diverse e importanti ricadute innovative che permettono di migliorare la qualità della vita quotidiana.

"The gravitation law I know" Justino António Cardoso 2015, *Indian Ink*

Nel 1687 Isaac Newton publica "Principia" dove formula la legge di gravitazione universale. La gravità è la più debole delle quattro interazioni fondamentali che esistono in natura. L'esistenza di dimensioni extra potrebbe spiegare il motivo per cui la gravità sia così debole. Attraverso la teoria del tutto i fisici cercano di spiegare l'unificazione delle quattro interazioni fondamentali della natura: la gravità, l'interazione forte, l'interazione debole e l'interazione elettromagnetica.

ARTSCI al CERN

Arthur I. Miller

Il CERN non solo è il leader mondiale nella ricerca del misterioso mondo scientifico delle particelle elementari ma anche un sito privilegiato nel fiorente campo dell'arte dove artisti e scienziati possono lavorare insieme per trovare nuovi modi di rappresentare l'universo in cui viviamo. Il connubio tra arte e scienza è iniziato intorno al 2000 quando l'artista londinese Ken McMullen portò al CERN un gruppo di affermati artisti europei. Dopo aver visitato più volte il Laboratorio per brevi periodi, tali artisti hanno lavorato nei propri atelier sulle idee originate dai loro scambi con gli scienziati dando vita a risultati straordinari, tra cui la realizzazione della mostra itinerante di dipinti e sculture "Signatures of the invisible" (Firme dell'Invisibile), inaugurata nel 2001 alla galleria Atlantis di Londra e esibita poi in diverse città tra cui Stoccolma, Lisbona, Parigi e al MOMA PS1 di New York, per citare solo alcune tappe.

Negli anni successivi questa peculiare collaborazione tra arte e scienza al CERN è divenuta oggetto di varie rappresentazioni artistiche. Ad esempio, nel 2009 nel film "Angeli e Demoni", tratto dall'omonimo romanzo best-seller di Dan Brown, il CERN compare, assieme a riferimenti a società segrete e a diversi simbolismi, come il laboratorio dove viene fabbricata una bomba ad antimateria. Si tratta di un'idea assolutamente inverosimile, frutto di pura finzione, così come è stato ribadito a diverse riprese dal Laboratorio stesso. Qualche anno dopo, il CERN rientra in scena nel thriller "The Fear Index" di Robert Harris dove il protagonista è uno scienziato che aveva precedentemente lavorato nel Laboratorio.

Il 2009 rappresenta anche l'anno di svolta dell'arte al CERN grazie all'arrivo Ariane Koek, una produttrice di programmi culturali alla BBC di Londra, che lanciò il programma di residenza artistica "Collide@CERN"(Entrare in Collisione al CERN) finanziato in parte dal centro artistico Ars Electronica di Linz in Austria. Tale programma (ben diverso da quello di McMullen in cui gli artisti passavano diversi brevi periodi al CERN lavorando in seguito nei loro atelier), dava la possibilità ad artisti selezionati tramite un concorso di trascorrere due mesi al CERN ed un mese a Ars Electronica per realizzare delle opere ispirate alla scienza che si fa nel Laboratorio. Collide@CERN era basato sul modello dello "speed dating", ovvero di incontri veloci tra gli artisti selezionati e ricercatori scelti che in poche parole dovevano spiegare il loro lavoro scientifico. Il programma è gestito attualmente dalla curatrice e critica d'arte spagnola Monica Bello, La sfida era ed è per entrambi, per gli scienziati che troppo spesso si trovano a disagio con il mondo dell'arte e per gli artisti che più concretamente sanno molto poco di scienza.

Tra gli artisti che hanno partecipato a questo programma cito solo Ikeda Ryoji, un artista giapponese specializzato nella tecnica di visualizzazione tramite l'uso di algoritmi capaci di immagazzinare enormi quantità di dati per poi rappresentarli esteticamente. Come gli scienziati, gli artisti specializzati in questa tecnica cercano modelli ricorrenti, ovvero cercano di tracciare il DNA intrinseco dei dati, che rappresentano il core business dell'attività nonché il sangue vitale del CERN. Ikeda ha saputo muoversi e respirare in tale ambiente con destrezza, come testimoniano le sue installazioni basate sulla programmazione computerizzata in tempo reale. Tali installazioni rappresentano l'enorme quantità di dati attraverso la combinazione di punti di luce scintillanti in modelli variegati e di una traccia sonora ipnotica, dando vita ad un risultato letteralmente mozzafiato che cattura l'eccitazione dei dati del mondo sub-microscopico quando viene raccolta dai rivelatori grandi come mammut.

Grazie al suo prestigio il CERN attira continuamente artisti di alto livello. In un futuro prossimo, a mio parere, si potrebbe immaginare il Laboratorio come un luogo dove a tali artisti venga offerta la possibilità di svolgere un'attività remunerativa per produrre opere d'arte da istallare sul sito. Immaginatevi, per esempio, una vera e propria galleria d'arte al CERN.

Dal momento che la ricerca si sforza di rendere visibile l'invisibile, si potrebbero selezionare proprio gli artisti specializzati in astrazione, come l'inglese Keith Tyson, vincitore nel 2002 del pre-

stigioso premio “Turner “ con il suo capolavoro di sistemi di arte generativa, tra dipinti e sculture, capaci di abbracciare la complessità e l’interconnessione dell’esistenza. Durante una visita al CERN, grazie al suo talento, Keith ha saputo conquistare l’ammirazione dei fisici teorici. Artisti come lui dovrebbero essere liberi di incontrare gli scienziati che rappresentano l’elite del Laboratorio ogni volta che lo desiderano.

Nel mio libro “Colliding Worlds: How Cutting-Edge Science Has Redefined Contemporary Art”[6], oltre a descrivere dettagliatemene il programma Collide@CERN, menziono un lavoro basato su più di cento interviste con artisti del XXI secolo da cui è emerso che l’arte, la scienza e la tecnologia così come le conosciamo oggi stanno scomparendo per fondersi in quello che definisco la terza cultura. Si tratta di un’avanguardia in cui i residenti rappresentano la nuova generazione di artisti, scienziati and tecnici fusi in un tutt’uno. Queste ibride creature, che vivono nel campo entusiasmante e dibattuto dell’arte generato dall’intelligenza artificiale, dovrebbero essere invitate regolarmente al CERN.

[6] Per ulteriori informazioni: www.arthurimiller.com e www.collidingworlds.org; o scrivere a: a.miller@ucl.ac.uk

“Strings at the horizon of a black hole” Karen Panman 2014, *Ceramiche dipinte e corde di plastica*

Scienza, politica e società

Rolf Heuer

Il progresso di per sé è un fenomeno complesso e per certo scaturisce dalla curiosità umana, senza la quale gli esseri umani si troverebbero ancora nella Grande Rift Valley. Grazie alla curiosità l'uomo ha imparato a conoscere il mondo e ad esplorarne altri. Ha avuto la possibilità di osservare la natura del nostro universo e di migliorare la qualità della propria vita in modo inimmaginabile.

Nonostante siano solo pochi decenni che la scienza si sia diffusa nella società e nella cultura, viviamo già in un'epoca in cui la curiosità scientifica tocca oramai quasi tutti gli aspetti della nostra vita. Ognuno di noi viene esortato sempre più spesso a prendere decisioni di tipo scientifico e la comunità scientifica non compie il proprio dovere quando non è in grado di fornirci le informazioni corrette. Se come scienziati rimaniamo chiusi nella nostra torre d'avorio non stiamo facendo il nostro lavoro. La scienza ha la responsabilità di aiutare tutti a prendere scelte razionali nel corso della vita quotidiana.

Chi come me lavora nella ricerca scientifica finanziata da fondi pubblici ha un ulteriore obbligo morale nei confronti del pubblico. Al CERN si fa ricerca fondamentale con l'obiettivo di conoscere l'Universo. Nel corso delle loro attività scienziati e ingegneri sviluppano diverse tecnologie, come il World Wide Web, i rivelatori per la scansione medica, le tecniche di vuoto ultra-spinto e via dicendo. Tutte queste tecnologie trovano applicazioni in settori più diversi come quello dello stoccaggio dell'energia solare o degli acceleratori di particelle ad uso diagnostico e per la terapia del cancro.

È grazie alla conoscenza che esistiamo. In base alla mia esperienza, è proprio la conoscenza che offriamo a soddisfare uno dei bisogni fondamentali dell'essere umano, quello di imparare. La ricerca fondamentale alimenta la mente. Tengo inoltre a sottolineare che sono i cittadini a finanziare tale ricerca ed è per questo motivo che hanno il diritto di sapere cosa facciamo noi scienziati e se investiamo bene i loro soldi.

Si tratta di una responsabilità che il CERN prende molto seriamente. Quando è stato messo in funzione LHC, l'acceleratore di particelle più potente al mondo, la visibilità del CERN ha raggiunto ogni tipo di pubblico: i bambini della scuola primaria, i decisori pubblici, gli artisti, le persone di diverso credo religioso e via dicendo. Questo ha permesso di creare un nuovo modo di dialogare.

Il primo messaggio chiave che vorrei trasmettervi dopo tale premessa è basato proprio su questa responsabilità: oggi più che mai è vitale che la scienza si impegni nella società. Gli esseri umani ed il loro futuro dipendono dall'investigazione scientifica e di conseguenza gli scienziati hanno l'obbligo morale di impegnarsi.

Il mio secondo messaggio chiave, di importanza altrettanto vitale, è che la scienza sia fatta in collaborazione e non isolatamente. Dopo la seconda guerra mondiale è stato proprio un piccolo gruppo di scienziati e diplomatici lungimiranti in Europa a capire questo fondamentale messaggio unificando la scienza all'istruzione. Un'unione che il 29 settembre del 1954 ha dato alla luce il CERN, un innovativo progetto di collaborazione scientifica internazionale a lungo termine creando una risonanza tale da cambiare per sempre il modo di fare ricerca tra le nazioni.

I padri fondatori del CERN hanno realizzato un sistema stabile nel settore pubblico capace di sostenere la scienza fondamentale. Da allora la ricerca di base al CERN è all'opera malgrado gli alti e bassi economici mondiali. Se ogni scienza fondamentale potesse funzionare seguendo l'esempio del CERN, ovvero quello di un modello internazionale, collaborativo e aperto, con una struttura stabile di finanziamento pubblico, il progresso sarebbe garantito ed il mondo sarebbe a prova di recessione più di quanto non lo sia oggi.

Il CERN è un'organizzazione europea fondata sui principi di apertura nei confronti di tutti i paesi del mondo e sul principio di equità verso i propri Stati membri, con un modello di governance che dà ad ognuno di loro (grande o piccolo) la giusta voce ed un modello di finanziamento che gli consente di contribuire in maniera proporzionale rispetto ai propri mezzi. Si tratta di un modello di ricerca che accoglie scienziati da tutto il mondo in grado di contribuire ai programmi di

ricerca del Laboratorio. Attraverso tali principi fondamentali, il CERN rappresenta un modello di leadership nel campo della fisica delle particelle e fornisce un modello di stabilità anche alle collaborazioni transfrontaliere in Europa così da poter loro permettere di coordinarsi con il resto del mondo. In sostanza, oggi il CERN rappresenta senza dubbio il fulcro di una comunità globale di scienziati capace di avanzare le frontiere della conoscenza nonché un esempio brillante di ciò che le persone sono in grado di fare quando lavorano insieme in armonia.

Oggi bisogna allargare questo modello perché la scienza si fa sempre più globale e la fisica delle particelle sempre più all'avanguardia. Questa evoluzione permette al CERN di ingrandirsi giorno dopo giorno. Già nel 2010 il Laboratorio ha oltrepassato i confini europei dando la possibilità di adesione o di appartenenza in qualità di membro associato ad ogni Stato, indipendentemente dalla relativa posizione geografica. L'ideale che il CERN potesse diventare un centro di pace e comprensione reciproca tra le nazioni di tutto il mondo attraverso la mediazione del linguaggio universale della scienza è oggi un fatto tangibile. La condivisione della curiosità umana ha reso possibile di creare un ambiente gioioso ed anche di beneficiare di quei vantaggi pragmatici derivanti dall'educazione, l'innovazione e la collaborazione.

Un'istituzione come il CERN svolge un ruolo essenziale nell'ambito dell'istruzione. Secondo alcuni dati statistici l'industria, recentemente diventata oggetto di interesse da parte del Laboratorio, va incontro sempre più a una carenza di scienziati e ingegneri. Come affrontare questa difficoltà? Secondo il mio parere una possibile soluzione è quella di suscitare entusiasmo nei giovani. Anche i risultati di un sondaggio fatto nel 2009 nella regione di Ginevra per testare l'opinione locale sul CERN non furono una sorpresa. Benché ben diffidenti, ai nostri vicini era ben chiaro l'impatto economico legato alla vicinanza prossima di una grande organizzazione intergovernativa come il CERN. Alla domanda su cosa il Laboratorio potesse fare per migliorare le relazioni di buon vicinato quello che emerse fu la possibilità di introdurre la scienza nelle aule delle classi delle scuole primarie. Di conseguenza, in collaborazione con le autorità scolastiche in Francia e nel Cantone di Ginevra e con l'Università di Ginevra è stato sviluppato un progetto di ricerca per le scuole presentato poi a diverse conferenze, tradotto in altre lingue e testato anche in Messico. In poche parole il progetto consiste nella realizzazione di una scatola sigillata che viene distribuita agli studenti nelle varie classi. I bambini, attraverso un ragionamento scientifico e aiutati nel loro percorso da alcuni indizi, devono intuirne il contenuto senza sbirciare. È ancora troppo presto per sapere se questo progetto porterà i suoi frutti e se sarà in grado di incoraggiare questi giovanissimi allievi ad iscriversi a facoltà scientifiche in modo da diventare i futuri professionisti utili all'industria. In ogni caso una cosa è certa, anche se l'unico risultato sarà quello di incoraggiare i bambini stimolando la loro curiosità, ne sarà valsa la pena.

Per quanto riguarda la politica, il mio terzo messaggio chiave esorta la comunità scientifica a stringere relazioni forti con le sfere politiche e i decisori pubblici.

Quante volte è successo che i politici hanno preso una decisione sbagliata a causa di un ragionamento scientifico male interpretato? Pensiamo ad esempio a fenomeni importanti come il cambiamento climatico che richiedono un intervento urgente. È fondamentale che coloro cui affidiamo la facoltà di decidere siano in grado di valutarne tutti gli aspetti scientifici relativi. Questa è una delle ragioni per le quali il CERN ha richiesto e ottenuto lo statuto di membro osservatore permanente presso l'ONU dove abbiamo promosso chiaramente il seguente messaggio alla comunità politica: in quanto custodi della borsa pubblica è vostro compito conservare una sana base di scienza fondamentale.

Si tratta dello stesso motivo per il quale più di 60 anni fa l'Europa ha deciso di fondare il CERN. Da allora si sono formate altre sette organizzazioni di ricerca intergovernative europee leader a livello mondiale. Lavorare per assicurare una classe dirigente scientifica competente e formare un sano flusso di ricercatori e di ingegneri sono gli obiettivi del CERN. Tuttavia, che dire di altri settori al di là della scienza, come per esempio l'arte o la religione?

Durante il mio mandato come Direttore Generale del CERN è stato lanciato un programma di

residenza artistica che in poco tempo è stato in grado di realizzare un notevole connubio tra due aspetti dello spettro culturale apparentemente opposti. Quello che abbiamo scoperto è che artisti e scienziati hanno molto in comune: sono entrambi curiosi rispetto al mondo che li circonda e sono molto creativi. Quando l'artista mozambicano Justino Cardoso ha realizzato le sue opere presentate in questo libro era la prima volta che visitava un paese al di fuori dell'Africa. Non aveva mai avuto contatti né con la fisica, né con i fisici e i suoi disegni qui illustrati, concorderete con me, rappresentano la dimostrazione lampante di un risultato straordinario scaturito dalla collisione tra la creatività artistica e la creatività scientifica.

Il partenariato con l'arte consente al CERN di interessare un tipo di pubblico altrimenti non raggiungibile. Quando al CERN viene messo in scena uno spettacolo di danza ispirato alla scienza arrivano spettatori che non si sarebbero mai sognati di mettere piede in un laboratorio di fisica. Quando c'è una serata dedicata alla commedia, per citare qualcosa di alternativo in ambito artistico, abbiamo constatato che più della metà dei visitatori non è mai stata al CERN prima, ma la cosa bella è che, grazie all'arte, probabilmente torneranno.

E qui si innesca il mio ultimo messaggio chiave: la scienza e l'arte hanno bisogno per esprimersi di una società dove vi sia un'atmosfera aperta.

Per agire, pensare ed esprimerci, abbiamo bisogno di libertà e di fiducia, così come è per la scienza e l'arte. È esattamente quello che è successo a Tim Berners-Lee che, grazie alla libertà e alla fiducia conferitagli dall'istituto per cui lavorava, tra tutto quello che avrebbe potuto sviluppare ha inventato qualcosa altrettanto creativo come un'opera d'arte: il World Wide Web.

In conclusione, la scienza ha la responsabilità di immettersi nel filone principale della cultura popolare, di impegnarsi a fondo e di realizzare dibattiti pubblici sulle principali questioni che si fondano sulla scienza. Non solo, la scienza deve anche rendersi garante dei più alti valori etici, specialmente se finanziata col denaro pubblico. L'investigazione scientifica è alla base di quasi tutti gli aspetti della vita moderna, siano essi economici, sociali, culturali o umanitari, e non fa discriminazioni etniche, di genere, lingua o religione.

In poche parole, la scienza rappresenta il meglio dell'umanità.

“Gargamelle and the neutral currents” Justino António Cardoso 2015, *Indian Ink*

Nel luglio del 1973 André Lagarrigue annuncia all’auditorio del CERN una scoperta rivoluzionaria per quel tempo. Lagarrigue e i suoi colleghi, utilizzando un fascio del sincrotrone a protoni, il PS del CERN, erano infatti riusciti a dimostrare l’esistenza delle correnti neutre nelle immagini registrate dalla camera a bolle, detta “Gargamelle”. Tale scoperta confermava la teoria dell’unificazione elettrodebole. Gargamelle, che ora si trova al CERN nel giardino dell’esibizione “Microcosmo”, è una camera a bolle dal peso di circa 1000 tonnellate che veniva riempita con 18 tonnellate di freon liquido.

“Knowledge and black holes” Justino António Cardoso 2015, *Inchiostro di china*

Secondo le teorie attuali sui buchi neri, quando la materia precipita in un buco nero si perde tutta l’informazione. È possibile recuperare questa conoscenza perduta? (John Ellis)

Justino António Cardoso durante la visita all'esperimento CMS (foto: José Carlos Rasteiro da Silva)

Justino António Cardoso al CERN con Sergio Bertolucci e Marilena Streit-Bianchi (foto: Bettina Hamoudi)

Justino António Cardoso al CERN con John Ellis (foto: Marilena Streit-Bianchi)

Justino António Cardoso al CERN con João Penedones Fernandes (foto: Marilena Streit-Bianchi)

Justino António Cardoso al CERN alla sua destra Jack Steinberger (Premio Nobel di Fisica nel 1988 con Leon Lederman e Melvin Schwartz) e alla sua sinistra Jean Michel Laurent, fisico dell'esperimento CAST (foto: Marilena Streit-Bianchi)

SUIÇA
GENEBRA
//<WISTIKO CARVOSO 15//