

CERN. Accelerating science.

Lorenzo Meneghini

In queste note presenteremo un'introduzione alle attività di ricerca in fisica particellare che si svolgono al CERN di Ginevra da oltre sessant'anni.

Com'è nata questa importante istituzione internazionale? Per quale motivo è stato istituito? Quale ricerca vi si svolge? Quali importanti scoperte

Queste sono solo alcune delle domande cui cercheremo di dare risposta.

LA FONDAZIONE

Dopo la 2° Guerra Mondiale alcuni fisici straordinari hanno sentito l'esigenza di riportare il "baricentro" della ricerca in fisica delle particelle in quell'Europa che aveva già visto i successi – tra gli altri – di Enrico Fermi e dei ragazzi di via Panispagna.

È così che, per la caparbia ostinazione e la lungimiranza di Raoul Dautry, Pierre Auger, Lew Kowarski, Edoardo Amaldi e Niels Bohr, nel 1954 nasce il C.E.R.N., Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, che attualmente è il più grande laboratorio al mondo per la ricerca in fisica delle particelle.

La prima proposta ufficiale per la costituzione di un laboratorio internazionale europeo fu presentata da Luis de Broglie nel dicembre del 1949 alla Conferenza Culturale Europea di Losanna; la proposta fu ribadita dal premio Nobel Isidor Rabi¹ alla quinta conferenza generale dell'UNESCO, tenutasi a Firenze nel giugno dell'anno successivo.

In un incontro intergovernativo dell'UNESCO, tenutosi a Parigi nel dicembre del 1951, undici nazioni, tra cui l'Italia, hanno siglato l'accordo che stabiliva la nascita del CERN.

Tra gli obiettivi dichiarati c'era non solo l'unione degli scienziati europei in un progetto comune dopo la devastazione della guerra, ma anche la condivisione delle ingenti spese che lo sviluppo della tecnologia legata alla ricerca sul nucleare richiedeva.

¹ La risoluzione presentata da Rabi autorizzava, di fatto, l'UNESCO ad assistere ed incoraggiare la formazione di laboratori di ricerca, con l'intento di sviluppare la collaborazione scientifica internazionale ("assist and encourage the formation of regional research laboratories in order to increase international scientific collaboration...")

La scelta del luogo in cui costruire il laboratorio non è stata facile; la parola “nucleare” lasciava disorientati, dopo la drammatica conclusione del conflitto in Giappone. Si riteneva importante, inoltre, trovare una collocazione in territorio che fosse considerato neutrale e transnazionale. La decisione di impiantare il laboratorio nella campagna alle porte di Ginevra arrivò nella terza seduta del Consiglio provvisorio nel 1952 e fu ratificata con una netta maggioranza mediante un referendum indetto nel cantone di Ginevra nell’anno successivo. La prima benna di terra fu sollevata, alla presenza delle autorità ginevrine e dei membri dello staff del CERN il 17 maggio del 1954 a Meyrin, vicino al confine francese.



Fig. 1 – Veduta aerea del sito di Meyrin, foto d’epoca

LA RICERCA FONDAMENTALE IN FISICA DELLE PARTICELLE

Come abbiamo detto, il CERN nasce dalla cooperazione scientifica internazionale con lo scopo di riportare in Europa almeno una parte della ricerca di punta sulla fisica particellare, che ci aveva visto all’avanguardia nel periodo tra le due guerre mondiali.

La ricerca fondamentale in fisica delle particelle si occupa di studiare i costituenti elementari della materia (come, ad esempio, elettroni, neutrini e quarks) per comprendere quali forze ne regolino le mutue interazioni.

L’obiettivo è quello di comprendere l’origine, il contenuto e la storia dell’Universo in cui viviamo e di cui conosciamo, in realtà, ancora molto poco.

Basti pensare che le stime attuali mostrano (vd. Fig. 2) che circa l’1% della massa dell’Universo conosciuto è dovuta alle stelle ed un ulteriore 4% corrisponde ai pianeti ed ai gas, mentre il 26% è costituito dalla cosiddetta **materia oscura**.

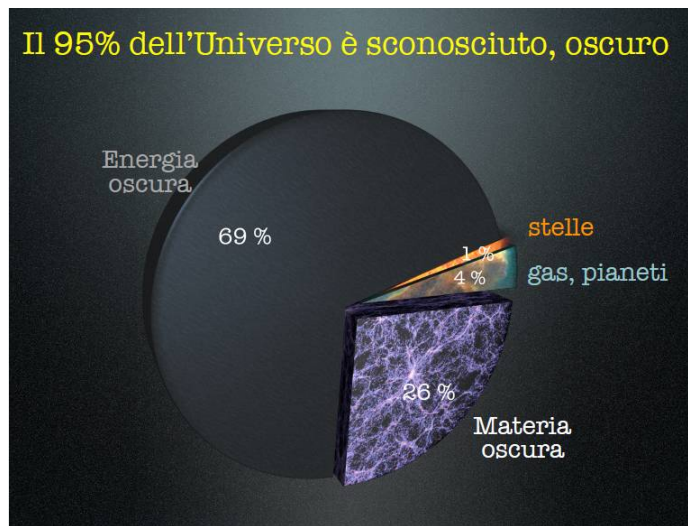


Fig. 2 – L'Universo conosciuto ad oggi

Ora, non si sa molto bene cosa sia la materia oscura, dal momento che non interagisce – se non molto debolmente – con la materia ordinaria e non emette onde elettromagnetiche. È noto, però, che si tratta di particelle “stabili” (in quanto presenti dall’origine dell’Universo) e “pesanti”, e che sono ben più abbondanti della materia ordinaria.

Della sua esistenza abbiamo, però, diverse prove indirette; vediamo alcune:

- Gli astronomi ritengono che le galassie a forma di disco siano composte per la maggior parte di materia oscura, che rappresenterebbe il parametro chiave che controlla la rotazione delle galassie.
«Le curve di rotazione “piatte” delle galassie a spirale», afferma Federico Lelli², «rappresentano una delle principali evidenze osservative sulla presenza di materia oscura nell’Universo o, più precisamente, di discrepanze tra la massa dinamica e quella luminosa. Negli ultimi 20 anni, però, lo studio dettagliato e sistematico delle curve di rotazione ha suggerito che vi deve essere una relazione molto stretta tra la distribuzione di materia oscura e quella luminosa. [...] Ora pensiamo di aver trovato un metodo ottimale per quantificare questa relazione tra la materia oscura e quella luminosa».
- Gli ammassi di galassie sono gli oggetti legati gravitazionalmente più grandi dell’Universo. La loro massa è pari alla somma di qualche milione di miliardi di stelle simili al nostro Sole ed hanno tipicamente un diametro di 25 milioni di anni luce. Si stima che solo il 5 per cento della loro massa totale sia dovuto alle stelle contenute nelle decine o centinaia di galassie che li compongono. Una quantità doppia di massa è fornita dal gas intra-ammasso che

² Ricercatore del Dipartimento di Astronomia presso la Case Western Reserve University, Cleveland – Ohio.

permea lo spazio tra una galassia e l'altra. La componente di gran lunga dominante è la materia oscura.

Attualmente gli studi sulla materia oscura hanno preso due direzioni distinte; da un lato si cerca di rivelarne la presenza (direttamente, in laboratori di fisica sotterranea, o indirettamente in esperimenti di fisica spaziale come AMS, esperimento costruito in un laboratorio del CERN, che ha mantenuto qui la sua centrale di controllo) e dall'altro di produrla tramite gli acceleratori di particelle (se ne cerca la presenza studiando i prodotti delle collisioni di particelle).

Se della materia oscura si sa poco, dell'energia oscura si sa ancor meno, se si esclude il fatto che costituirebbe circa il 70% del nostro Universo.

Vi sono, però, molte teorie al vaglio dei fisici sperimentali, e la ricerca continua.

SEMPRE PIÙ VELOCI

Da quando è stato costruito il primo acceleratore, la tecnologia ha fatto passi da gigante. Basti pensare che dai circa 90 GeV di energia³ del centro di massa cui venivano portati i fasci di elettroni e positroni che circolavano nel LEP nel 1989 si è passati ai 7 TeV dei fasci di protoni che viaggiano in LHC.

A questi livelli di energia, le particelle si muovono a velocità prossime a quella della luce; per stimarla servono, però, formule relativistiche che ci accingiamo a ricordare.

Indicata con c la velocità della luce nel vuoto e con m_0 la massa a riposo del protone, la sua energia cinetica è espressa dalla formula relativistica

$$K = (\gamma - 1)m_0c^2 \quad (1)$$

ove si è indicato con γ il fattore di Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (2)$$

Per semplicità di scrittura, poniamo $\beta = \frac{v}{c}$ in modo che la (2) si possa riscrivere:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

³ Vale certamente la pena ricordare che l'energia può anche essere espressa in termini di *elettronvolt* (eV), che rappresenta l'energia potenziale posseduta da un elettrone, sottoposto ad una d.d.p. di 1 Volt. Considerata la massa a riposo dell'elettrone, risulta: $1eV = 1.602176565 \cdot 10^{-19} J$. Ricordiamo anche che il prefisso Giga vale 10^9 mentre Tera vale 10^{12} .

Chiaramente, allora:

$$\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2} \Leftrightarrow 1-\beta^2 = \frac{1}{\gamma^2} \Leftrightarrow \beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

da cui ricaviamo:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3)$$

Procediamo ora ad una stima della velocità⁴ del pacchetto di protoni che viaggiano nelle *beam pipes*⁵ di LHC quando l'energia del centro di massa è 7 TeV.

MASSA A RIPOSO DEL PROTONE	VELOCITÀ DELLA LUCE
$m_0 = 1.672631 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938.28 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tab. 1 – Valori di costanti fisiche importanti

La Tab. 1 mostra i valori della massa a riposo del protone⁶ e della velocità della luce; dal momento che l'energia a riposo del protone vale $m_0 c^2 = 938.28 \text{ MeV}$, per la (1), otteniamo:

$$\gamma - 1 = \frac{K}{m_0 c^2} = \frac{7 \text{ TeV}}{938.28 \text{ MeV}} = \frac{7 \cdot 10^{12} \text{ eV}}{938.28 \cdot 10^6 \text{ eV}} \approx 7.4605 \cdot 10^3,$$

da cui

$$\gamma \approx 7.4615 \cdot 10^3$$

e quindi, per la (3):

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{7.4615^2 \cdot 10^6}} \approx 0.999999991$$

Pertanto la velocità del pacchetto di protoni corrisponde al 99.9999991% della velocità della luce nel vuoto.

Come avevamo anticipato, la velocità dei fasci di protoni è praticamente uguale alla velocità della luce. Una stima della differenza si può calcolare agevolmente, assumendo ancora una volta i dati necessari dalla Tab. 1:

⁴ Il discorso sarebbe, in realtà, un po' più sofisticato; per semplicità immagineremo che ciascun protone del pacchetto abbia la medesima velocità degli altri.

⁵ Le *beam pipes* sono i condotti dell'acceleratore in cui viaggiano i fasci di particelle.

⁶ Il fatto che la massa a riposo del protone sia espressa in termini di MeV/c^2 non ci deve stupire. Se partiamo dalla nota equazione $E = mc^2$, è facile osservare che $m = \frac{E}{c^2}$; pertanto, la massa è dimensionalmente equivalente al rapporto tra l'energia della particella ed il quadrato della velocità della luce.

$$\Delta v = c - v \approx c(1 - 0.9999999991) = 9 \cdot 10^{-9} c \approx 2.698 \frac{m}{s}$$

che corrispondono a poco meno di $10 \frac{km}{h}$. Davvero un'inezia!

Concludendo, con LHC si riescono a far collidere due fasci di particelle ad energie elevatissime e, studiando i prodotti di queste collisioni, ad individuare molte particelle nuove, tra cui il bosone di Higgs, di cui parleremo più avanti.

ENERGIE ELEVATISSIME

Dopo quanto detto finora, una domanda sorge spontanea: davvero 14 TeV sono un'energia elevatissima?

Su scala macroscopia certamente no.

Proviamo ad analizzare la situazione con un piccolo esempio.

Se un giovane atleta di massa $m_0 = 60 kg$, durante la fase di riscaldamento, corre a $3 \frac{m}{s}$, corrispondenti a $10.8 \frac{km}{h}$, la sua energia cinetica è:

$$K = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 9 = 270 J$$

Per confrontarla con l'energia delle particelle, esprimiamola in eV:

$$K = \frac{270 J}{1.602176565 \cdot 10^{-19} \frac{J}{eV}} \approx 168.5 \cdot 10^{19} eV = 1.685 \cdot 10^9 TeV,$$

che è un valore decisamente superiore a quello dei fasci di protoni in LHC.

Viceversa, se l'energia cinetica dello stesso atleta fosse di 7 TeV, la sua velocità sarebbe:

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7 \cdot 10^{12} \cdot 1.602176565 \cdot 10^{-19}}{60}} \approx \sqrt{3.7384 \cdot 10^{-8}} \approx 1.93 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$$

che equivalgono a circa 70 cm all'ora, inferiore a quella delle lumache da giardino, che in un'ora di metri ne percorrono 50.

Cos'è, quindi, che fa la differenza?

Innanzitutto dobbiamo tener presente la piccola massa dei protoni rispetto a quella degli oggetti macroscopici, lumache comprese. Dopodiché bisogna ricordare che una tale quantità di energia è estremamente concentrata. Basti pensare che le dimensioni trasversali di un protone sono stimate nell'ordine di $10^{-13} cm$. La densità di energia è, quindi, enorme.

Infine non va dimenticato che i pacchetti di protoni che vengono fatti collidere contengono un numero di particelle dell'ordine di 10^{11} e che si stima che avvengano circa 40 milioni di interazioni al secondo; pertanto l'energia che entra in gioco, ogni secondo, nelle collisioni che avvengono in LHC è decisamente maggiore di 14 TeV.

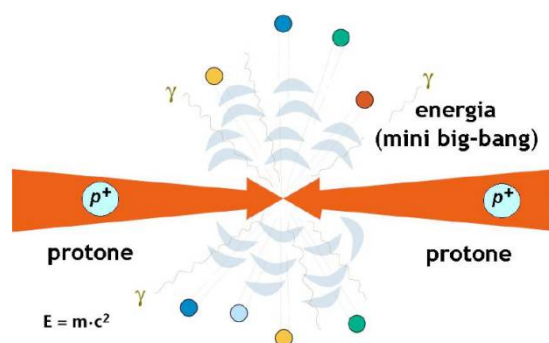


Fig. 3 – Rappresentazione della collisione protone/protone in LHC

QUANDO L'UNIVERSO ERA OPACO

In *cosmologia* la *radiazione cosmica di fondo*⁷ è una radiazione elettromagnetica che permea l'Universo, considerata come prova del modello del Big Bang. Di cosa si tratta?

Se osservato mediante un telescopio ottico tradizionale, lo spazio tra stelle e galassie appare nero ; se, però, utilizziamo un radiotelescopio, possiamo rilevare una debole radiazione che non risulta associata ad alcun corpo celeste, la cui intensità è maggiore nella regione delle microonde dello spettro elettromagnetico. Come possiamo interpretarla?

Nelle fasi iniziali, si pensa che l'Universo avesse dimensioni molto più contenute di quelle attuali, e fosse molto più caldo e permeato da una radiazione uniforme in stretta interazione con il plasma di idrogeno.

I fotoni di questa radiazione erano talmente energetici da impedire agli elettroni di legarsi ai protoni, impedendo così la formazione degli atomi. Man mano che l'Universo si espandeva, sia il plasma che la radiazione iniziarono a raffreddarsi fino a raggiungere una temperatura a cui la minore energia dei fotoni non riusciva più ad impedire la formazione dei primi atomi stabili, che – a loro volta – non erano più in grado di assorbire la radiazione termica. L'Universo, che fino a quel momento era stato una sorta di nebbia opaca, diventò trasparente alla

⁷ La radiazione di fondo è stata scoperta nel 1964 dagli astronomi statunitensi A. Penzias e R. W. Wilson, al termine di uno studio iniziato nel 1940; per questa scoperta furono insigniti del Premio Nobel nel 1978.

radiazione. I fotoni della radiazione termica iniziarono a propagarsi, riempiendo un Universo via via più grande, perdendo progressivamente energia.

TECNOLOGIE ALL'AVANGUARDIA PER UN TUFFO NEL PASSATO PIÙ LONTANO

La teoria della relatività generale prevede che l'Universo abbia avuto inizio con una *singolarità gravitazionale*⁸. Il termine deriva dal fatto che i parametri che descrivono le proprietà fisiche associate a questo punto iniziale dello spazio-tempo presentano una *singolarità matematica*. È bene sottolineare che, ogni qual volta si verifichi una singolarità matematica all'interno di una teoria fisica, questo comporta l'insorgere di fenomeni aggiuntivi i cui effetti non possono più essere trascurati. In questo caso i fenomeni gravitazionali sono alterati dagli effetti quantistici.

La teoria tuttavia ha dei limiti. Se l'aumento della distanza fra gli ammassi di galassie a causa dell'espansione implica che in passato essi fossero più vicini, continuando idealmente a ritroso nel tempo densità e temperatura aumentano fino a un istante in cui questi valori tendono all'infinito mentre il volume tende a zero. Così facendo le attuali teorie fisiche perdono validità.

Per questi motivi si è soliti affermare che la teoria non è adeguata a descrivere la condizione iniziale, ma fornisce un'ottima descrizione dell'evoluzione dell'Universo da un determinato momento in poi.

Per poter ricreare, almeno in piccolo, le condizioni in cui si trovava la materia qualche istante dopo il Big Bang e cercare di comprendere ancor meglio come siano nate le particelle di cui oggi è composto l'Universo e le interazioni che ne regolano il comportamento, oggi studiamo i prodotti delle collisioni che avvengono negli acceleratori di particelle.

Utilizzando tecnologie di ultima generazione, come ad esempio i magneti a superconduttore, si è riusciti a costruire LHC all'interno del tunnel che ospitava il vecchio LEP, ma questo ha richiesto di superare notevoli ostacoli dal punto di vista della progettazione.

La figura 4 rappresenta la storia dell'Universo, dal Big Bang ai giorni nostri, analizzata sulla base della radiazione cosmica di fondo di cui abbiamo fatto cenno al paragrafo precedente.

⁸ Si tratta di una condizione fisica ideale in cui l'intero Universo è contenuto in singolo un punto geometrico, chiaramente privo di dimensioni. In questa situazione l'Universo sarebbe caratterizzato da valori infiniti di temperatura e densità.

Facendo crescere l'energia delle particelle negli acceleratori si è riusciti a “vedere” la fase di formazione degli atomi, che si stima essere avvenuta circa 300 mila anni dopo il Big Bang.

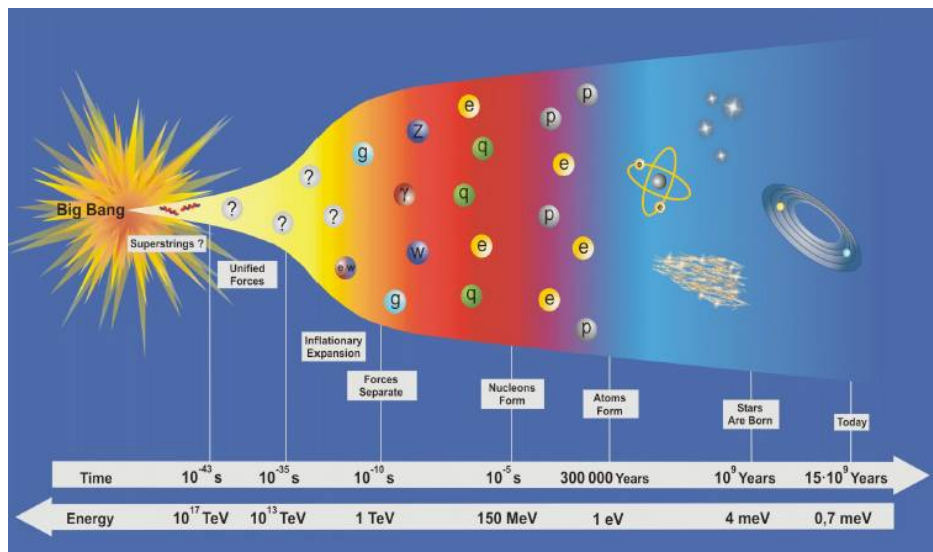


Fig. 4 – L'Universo in espansione, dal Big Bang ai giorni nostri

Aumentando ulteriormente l'energia di collisione fino ai 150 MeV si è potuta studiare la fase in cui si sono formati i *nucleoni* (protoni e neutroni), avvenuta 10^{-5} secondi dopo il Big Bang.

Attualmente in LHC avvengono collisioni a 14 TeV; siamo quindi in grado di studiare come si presentava la materia circa 10^{-10} secondi dopo il Big Bang, nell'era in cui sono nate le quattro interazioni fondamentali (gravitazionale, elettromagnetica, forte e debole).

Allo stato attuale è tecnicamente impossibile effettuare esperimenti con energie che abbiano un ordine di grandezza 12 volte maggiore; non possiamo quindi avere conferme sperimentali dell'esistenza di un'unica “forza fondamentale” che le raggruppi tutte e quattro.

Vi sono, poi, anche limiti concettuali che ci impediscono di tornare ancor più indietro nel tempo, dal momento che nessuna delle attuali teorie fisiche riesce a descrivere correttamente cosa sia accaduto nell'era di Planck, che rappresenterebbe la fase iniziale di vita dell'Universo, la cui durata è incredibilmente breve⁹. Questo, però, invece che frenare la ricerca, fornisce nuova spinta per indagini sempre più accurate su ciò che si può trovare con gli strumenti in nostro possesso, oltre che per cercare di migliorare la tecnologia e spingere sempre più lontano il limite della conoscenza.

⁹ Il tempo di Planck corrisponde a 10^{-43} secondi.

UNA SCOPERTA RECENTE

Uno dei più importanti risultati sperimentali degli ultimi decenni è stato certamente la rilevazione del bosone di Higgs, teorizzata nel 1964 e “vista” dagli esperimenti ATLAS e CMS del CERN nel 2012.

La sua rilevanza è dovuta al fatto di essere la particella associata al campo di Higgs, un campo scalare che permea tutto l’Universo; come ha detto Fabiola Gianotti, in un’intervista del 2013:

«Il bosone di Higgs è una particella molto speciale che non appartiene alle due classi in cui si suddividono le altre particelle: quelle di materia, [...] che sono i costituenti fondamentali dell’atomo, e quelle di interazione, che trasmettono l’interazione elettromagnetica, quella debole e quella forte. Il bosone di Higgs è diverso perché ha il compito di dare massa a tutte le altre particelle e, se così non fosse, il nostro universo non esisterebbe e ovviamente non esisteremmo neppure noi.»

Così continua la direttrice generale del CERN:

«Il meccanismo di Higgs entrò in azione dopo un centesimo di milionesimo di secondo dalla esplosione del Big Bang e diede massa ad alcune particelle lasciandone altre senza massa. Dal Modello Standard, che è l’insieme delle nostre conoscenze che finora meglio descrivono la composizione della materia e le forze che fanno interagire le particelle, sapevamo che ci sono particelle come il fotone che non hanno massa ma sono pura energia e viaggiano alla velocità della luce e altre invece che hanno massa. La ragione era un mistero. Adesso abbiamo capito che questo fatto dipendeva dalle differenti interazioni che queste particelle avevano con il bosone.»

Per provare a comprendere meglio il significato di queste parole, proviamo ad utilizzare una famosa analogia, dovuta a John Ellis¹⁰, che paragona il campo di Higgs ad un’infinita distesa di neve, un campo esteso lungo tutto lo spazio.

«Il campo di Higgs è come questo, che è fatto di fiocchi di neve. Allo stesso modo il campo di Higgs è composto di piccoli quanti. Noi li chiamiamo Bosoni di Higgs. [...] Il bosone svolge il lavoro di dare massa a tutte le altre particelle elementari. Le equazioni del modello standard sono molto simmetriche. Le particelle appaiono tutte allo stesso modo, non si distingue tra quelle di massa diversa. Questa simmetria dev’essere spezzata; ci dev’essere qualcosa che ci permetta di differenziare. Questo è il bosone di Higgs: a seconda di come le particelle interagiscono con lui, acquisiscono masse differenti; così la simmetria è rotta.»

¹⁰ John Ellis, docente di Fisica Teorica presso il Kings College di Cambridge, è stato insignito della medaglia Maxwell e del premio Paul Dirac. Il suo contributo è stato fondamentale per capire come usare il LEP per prevedere la massa del bosone di Higgs.

Per illustrare ancor meglio il funzionamento del meccanismo di Higgs, Ellis riprende il paragone con la distesa di neve.

«Immaginate di attraversarla. [...] Uno sciatore passa sopra la neve, non interagisce con il campo, scorre via, come una particella senza massa che viaggia alla velocità della luce. [...] Se invece si cammina con gli scarponi si affonda nella neve, si viaggia meno velocemente, come una particella dotata di massa che interagisce con il campo. Se infine si affonda nella neve, si va molto più piano come una particella dotata di massa più grande. »

In base a quanto detto fin qui, il meccanismo di Higgs riuscirebbe a spiegare la massa delle particelle elementari; la scoperta del bosone di Higgs darebbe, quindi, consistenza al Modello Standard.

A questo punto, alcune domande sorgono spontanee: il campo di Higgs è in grado di spiegare la massa di qualsiasi particella? La massa del protone è spiegata interamente dall'interazione con il campo di Higgs?



Fig. 5 – Massa delle particelle a confronto

La figura 5 fornisce una parziale risposta alle domande precedenti; le dimensioni delle particelle che vi sono raffigurate è proporzionale alle loro masse.

Com'è noto, il protone non è una particella elementare poiché è costituito da due *quark up* ed un *quark down*; se il meccanismo di Higgs fosse sufficiente a spiegare la massa di tutte le particelle, la rappresentazione in figura 5 dovrebbe essere necessariamente diversa.

In realtà si stima che solo l'1% della massa del protone sia spiegato dall'interazione con il campo di Higgs. La parte rimanente è dovuta al fatto che il *campo gluonico*¹¹ – che mantiene legati i tre quark nominati in precedenza a formare il protone – fornisce un legame altamente energetico.

L'energia di tale legame verrebbe poi trasformata in massa mediante la nota relazione $E = mc^2$, spiegando il restante 99% della massa del protone.

CONCLUSIONI E POSSIBILI RILANCI

In queste note abbiamo cercato di introdurre il lettore alle tematiche che costituiscono la ricerca di frontiera nella fisica delle alte energie. Siamo consci che, in realtà, abbiamo appena scalfito la superficie di un argomento che si presenta complesso, ma affascinante, lasciando aperte tante questioni che potranno essere approfondite in una prossima occasione.

ACKNOWLEDGMENTS

Un grazie particolare va a tutti i membri dello staff del CERN che hanno organizzato il corso ITP cui ho partecipato a novembre 2017, in particolare ad Antonella Del Rosso, Silvia Miozzi e Jeff Wiener, oltre ovviamente agli speakers che ci hanno introdotto alla fisica particellare, un mondo del tutto nuovo per me, che sono un matematico di formazione. Le immagini presenti in queste note sono estratte dalle slides che ci hanno lasciato.

¹¹ In questo articolo non ci prefiggiamo di entrare nei dettagli tecnici di questo tipo di interazione, poiché troppo complicati; il seguente video propone una descrizione abbastanza intuitiva del fenomeno:
<https://www.youtube.com/watch?v=Ztc6QPNUqls>

RIFERIMENTI

- www.pd.infn.it/cern/index.htm
- www.miur.gov.it/cern
- https://indico.cern.ch/event/507260/contributions/2316025/attachments/1354475/2046246/presentazione_italian_teachers.pdf
- <http://cern60.web.cern.ch/en/history>
- Morgia, "Cosmologia di Precisione: una rivoluzione scientifica!"
<https://it.emcelettronica.com/cosmologia-di-precisione-una-rivoluzione-scientifica>
- Ruscica, "Legge universale per la rotazione delle galassie", <http://www.media.inaf.it/2016/11/07/cosiruotano-le-galassie/>
- Rasia, "Ammassi di galassie, più grandi non si può", <http://www.media.inaf.it/2017/05/05/ammassi-di-galassie/>
- <http://cosmo.fisica.unimi.it/assets/IntroAstro/IntroAstro1011/Caccianiga4.pdf>
- <http://w3.Inf.infn.it/problema-della-materia-oscura/>
- https://it.wikipedia.org/wiki/Cronologia_del_Big_Bang
- <https://home.cern/topics/higgs-boson>
- https://www.ilmessaggero.it/tecnologia/scienza/bosone_higgs_fabiola_gianotti_intervista/notizie/258614.shtml
- <https://www.youtube.com/watch?v=TAdVYrDG4ik>