

# LHC AL 3° RUN

## PER SPOSTARE I CONFINI DELLA CONOSCENZA!

### PREFAZIONE

Era Ottobre 2022, quando proposi nella chat Rotolantica una serie di argomenti sui quali fare un approfondimento. La maggioranza relativa scelse un aggiornamento sul potenziamento degli apparati dell’LHC del CERN di Ginevra, con lo scopo di ricevere anche una visione sui progressi più recenti della scienza e sui confini attuali della conoscenza.

Avevo avvisato che era stato scelto l’argomento più “ostico”, quello che mi avrebbe obbligato a maggiori integrazioni e ripassi delle mie conoscenze. Non pensavo di metterci 16 mesi, ma mi è piaciuto farlo; questo numero di approfondimento dovrebbe rispondere alla richiesta, sperando che si riveli adeguato alle attese. Comunque, se qualcosa non dovesse risultarvi chiaro ... meglio! Avremo ulteriori nuovi spunti di dibattito nei prossimi incontri.

Buona lettura!

Cesare Dolcin

La moderna Fisica delle Particelle si basa su esperimenti nei quali particelle atomiche o, più spesso, subatomiche, vengono accelerate a grandissime velocità, prossime a quelle della luce, e poi fatte collidere (cioè scontrare) dentro a giganteschi, complicatissimi, geniali rivelatori.

La “magia” che ancora affascina i fisici che vi lavorano, che solletica l’estasi miracolistica del bambino che è in loro (figura 1), è che (trasportando l’esempio nel mondo macroscopico che ci è più familiare) è come se accelerando a velocità relativistiche<sup>1</sup> un’auto ed un camion e facendoli scontrare emergessero, per alcuni milionesimi di miliardesimi di secondo, non dei rottami, ma una portaerei ed un Boeing 747, per poi vedere la portaerei dividersi in due treni ed una nuvola di ciclomotori e furgoni, alcuni dei quali si scontrano a loro volta per sparire in lampi di luce, mentre il 747 origina un escavatore, un bulldozer ed altri ciclomotori!

Tornando nel regno quantistico del micromondo, lo studio del comportamento di queste particelle “pesanti” e dalla vita brevissima apre le porte alla comprensione degli eventi estremi dell’universo, quindi consente di percorrere una parte del percorso verso

LHC AL 3° RUN	
L’LHC	Pag. 2
IL 3° RUN	Pag. 7
IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE	Pag. 13
... IL BISOGNO DI UNA NUOVA FISICA	Pag. 34
I NUOVI TEST AL CERN, PER SPOSTARE I CONFINI DELLA CONOSCENZA	Pag. 40
UNA VISIONE EURISTICA	Pag. 46
ACKNOWLEDGEMENTS	Pag.49

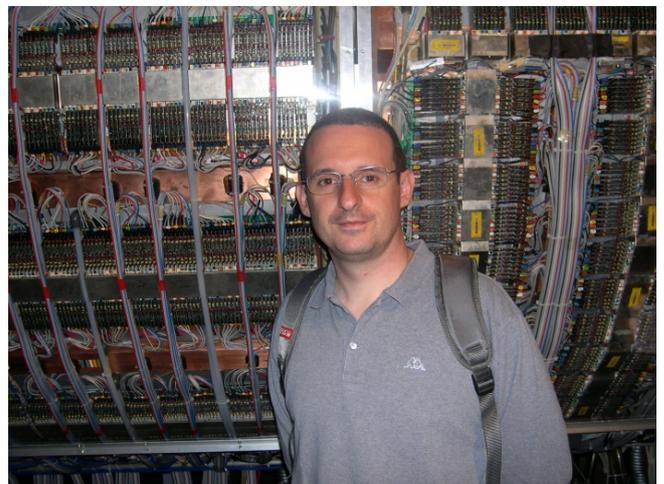


Figura 1: L’autore in visita al CERN, nel 2005.

<sup>1</sup> Prossime a quelle della luce (“c”), cioè circa  $3 \cdot 10^8$  m/s, o 299.792,458 km/s, o oltre 1 miliardo di km/h, o quasi 10.000 miliardi di km all’anno (il famoso “anno-luce”). Nell’LHC i protoni vengono accelerati ad oltre il 99,99% di c.

la conoscenza delle cosiddette “leggi fondamentali” della Natura.

Nessuno sa ancora verso cosa porteranno questi esperimenti, dal punto di vista della rivoluzione della nostra concezione del mondo, dell’universo, del tempo, dell’energia, della materia, della vita o della nostra stessa esistenza, ma tant’è: è in questi laboratori, e in quelli dove si studia l’Entanglement<sup>2</sup>, e nei megatelescopi spaziali<sup>3</sup> e terrestri<sup>4</sup>, e nei laboratori biologici BSL-4<sup>5</sup> o nei quali si pratica il CRISPR-Cas9<sup>6</sup> che si è spostata la frontiera della ricerca delle risposte alle domande fondamentali che da sempre la nostra specie si pone ... <<Chi siamo?>>, <<Da dove veniamo?>>, <<Di cosa siamo fatti?>>, <<Dove andiamo?>>, <<Come funziona il mondo che ci circonda?>>.

## L’LHC

Il “Large Hadron Collider” (LHC, Grande Collisore di Adroni<sup>7</sup>) è la più grande e complicata macchina che l’umanità abbia concepito, frontiera tecnologica in molteplici discipline, nonché il posto più freddo dell’Universo: è l’acceleratore di particelle più grande e potente esistente sulla Terra. Si tratta di un acceleratore di adroni con una ener-



Figura 2: Veduta aerea rielaborata con la disposizione geografica dell’anello dell’LHC, a Nord di Ginevra, al confine tra Francia e Svizzera, tra la catena del Giura ed il Lago Lemano. Nord a sinistra.

<sup>2</sup> Definito da Einstein come “sinistro effetto a distanza” delle implicazioni matematiche e filosofiche della Fisica Quantistica, e da lui enunciato come paradosso, insieme a due collaboratori, nel 1935, venne in seguito matematicamente formalizzato da Bell nel 1964 ed investigato sperimentalmente negli anni ’80 e ’90 principalmente da Aspect e Zeilinger (premi Nobel 2022 per la Fisica per queste ricerche), per rivelarsi inaspettatamente un fenomeno reale, che contraddice la nostra esperienza e la nostra concezione del mondo e degli eventi; le implicazioni fisiche e filosofiche di ciò sono ancora in discussione.

<sup>3</sup> Lanciato a fine 2021 e dispiegato nel 2022, il JWST (James Webb Space Telescope), il gigantesco telescopio spaziale ad infrarossi con specchio principale da 6,5 m di diametro, fornirà materiale per scoperte rivoluzionarie per le prossime generazioni di astronomi.

<sup>4</sup> Telescopi terrestri da 30 m (TNT) o 39 m (ELT) di diametro sono in fase di costruzione, così come radiotelescopi ed interferometri sempre più grandi e potenti.

<sup>5</sup> Laboratori “Bio-Safe Level 4”, dove si fa ricerca su patogeni dagli effetti letali e potenzialmente devastanti.

<sup>6</sup> Potentissima e rivoluzionaria tecnologia di manipolazione genetica, messa a punto da Doudna e Charpentier nel 2012 (entrambe Nobel per la Chimica nel 2020 per questo lavoro), che ha consentito di alzare dal 30% al 99% il successo nelle procedure di editing genetico, nel quale il DNA di viventi è tagliato, modificato e ricucito con estrema precisione. Gli effetti di questa invenzione sui prossimi decenni sono di portata talmente ampia da essere imprevedibili.

<sup>7</sup> Gli adroni sono particelle subatomiche non fondamentali, cioè a loro volta formate da sotto-particelle, che, nel caso degli adroni, devono tutte essere sensibili all’Interazione Nucleare Forte, cioè i “quark” (prossime sezioni dell’articolo); nella fattispecie gli adroni si dividono in particelle formate da tre quark (come il protone ed il neutrone) o da tre antiquark, dette complessivamente “barioni”, oppure da un quark e da un antiquark, dette complessivamente “mesoni”. Gli adroni hanno sempre “carica di colore” (la “carica” sensibile all’Interazione Nucleare Forte) complessivamente nulla.

gia<sup>8</sup> di circa 14 teraelettronvolt<sup>9</sup> (TeV), costruito alla periferia di Ginevra (a cavallo del confine franco-svizzero, figura 2) all'interno di un tunnel sotterraneo avente una circonferenza di quasi 27 km, a circa 100 m di profondità. Si trova nello stesso tunnel (figure 3 e 4) realizzato negli anni '80 per l'acceleratore LEP, molto meno potente, ma che permise di svolgere importanti esperimenti. Di fatto l'LHC è un gigantesco microscopio, necessario per investigare come si comporta la materia su scale delle dimensioni di un milionesimo di milionesimo di metro ( $10^{-18}$  m): i limiti dei particolari che si possono "risolvere" (cioè distinguere, in terminologia grossolana, ma corrente) dipendono dalle dimensioni dell'oggetto utilizzato per "illuminarlo", così se la luce visibile (fotoni aventi lunghezza d'onda dell'ordine dei  $5 \cdot 10^{-7}$  m) fatica a discernere dettagli di  $10^{-7}$  m, con un microscopio a scansione elettronica si scende a  $10^{-10}$  m e con uno ad effetto tunnel a  $10^{-11}$  m, ma con LHC si scende di altri 7 ordini di grandezza!



Figura 3: Il tunnel del CERN, con l'LHC in costruzione (2005).

Le misure che si effettuano con l'LHC sono così precise da essere sensibili a cambiamenti di lunghezza di meno di un millimetro sull'anello di 26,7 km, dovuti alle "maree" che la Luna provoca nella roccia contenente la struttura due volte al giorno. Quando si effettuano misure che devono avere 10÷12 cifre significative, anche prendere in considerazione le alterazioni magnetiche indotte dal passaggio del TGV Parigi-Ginevra, 100 m di roccia più su e ad 1 km di distanza, diventa necessario!

Il tunnel ha un diametro di 3,7 m e, oltre ai criostati dipolari che contengono i due fasci di particelle controrotanti, deve alloggiare tutta l'impiantistica di supporto, come l'andata e ritorno dell'elio liquido, gli asservimenti elettrici e la sensoristica di supporto.

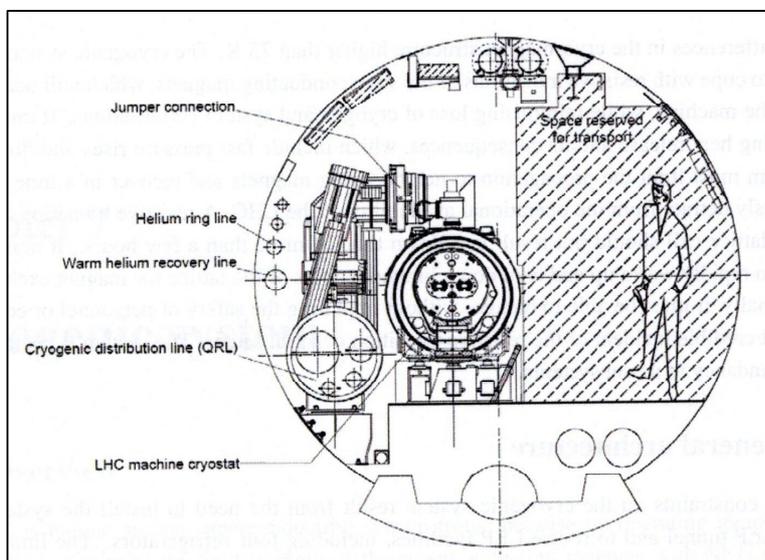


Figura 4: Sezione trasversale del tunnel dell'LHC.

La struttura è sostanzialmente progettata come un collisore protone-protone nel quale due fasci di particelle viaggiano dentro a due tubi vuoti, paralleli per lunghi tratti curvi, ma che si incrociano in 4 rivelatori aventi tratti rettilinei lunghi tra i 126 ed i 140 metri. L'anello è diviso in 8 "ottanti", di circa 3,3 km ciascuno (schema in figura 5).

La macchina accelera due fasci che circolano in direzioni opposte, all'interno dei tubi a vuoto, completando l'anello di 26,659 km per 11.245 volte al secondo. I fasci collidono in quattro punti lungo il percorso, dove il tunnel si allarga per lasciare spazio a grandi vani che ospitano i rivelatori. I quattro principali rivelatori di particelle sono ATLAS (di forma toroidale), CMS (solenoido compatto per muoni), LHCb, e ALICE (un collisore di ioni). I rivelatori utilizzano tecnologie diverse e operano intorno al punto in cui i fasci collidono. Nelle collisioni vengono pro-

<sup>8</sup> La potenza di un acceleratore è misurata nell'energia che riesce a conferire alle particelle lanciate al suo interno.

<sup>9</sup> L'elettronvolt (eV) è un'unità di misura dell'energia molto utilizzata in fisica atomica, nucleare e delle particelle; viene definito come l'energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, che si muove nel vuoto tra due punti di una regione tra i quali vi è una differenza di potenziale elettrostatico di 1 Volt. Come per le altre grandezze (di uso comune quelle informatiche),  $1.000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$  (kilo-elettronvolt),  $1.000 \text{ keV} = 1 \text{ MeV}$  (mega-elettronvolt),  $1.000 \text{ MeV} = 1 \text{ GeV}$  (giga-elettronvolt),  $1.000 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV}$  (tera-elettronvolt). L'energia di 1 eV è minuscola, circa 4 millesimi di milionesimo di milionesimo ( $4 \cdot 10^{-21}$ ) dell'energia necessaria ad aumentare di  $1^\circ \text{C}$  una quantità di acqua di  $1 \text{ cm}^3$  (1 g), ma in tale quantità d'acqua ci sono ben  $3 \cdot 10^{22}$  molecole d'acqua, ossia circa  $9 \cdot 10^{23}$  particelle subatomiche (neutroni, protoni, elettroni). Ecco quindi che fornendo l'energia di 1 eV ad una particella le si conferisce 130 volte più energia di quanta se ne dà ad una intera molecola d'acqua per incrementarne la temperatura di  $1^\circ \text{C}$ ; 14 TeV sono 14.000 miliardi di volte questa già ragguardevole energia!

dotte numerose particelle, le cui proprietà vengono misurate dai rivelatori e inviate al centro di calcolo. Tra gli scopi principali degli studi vi è la ricerca di tracce dell'esistenza di nuove particelle.

I fasci di protoni (in certi esperimenti sostituiti da nuclei di piombo, estremamente massicci) vengono accelerati nel vuoto spintissimo dei due anelli ( $10^{-14}$  bar) fino a velocità prossime a quelle della luce, viaggiando in pacchetti confinati magneticamente costituiti ciascuno da circa 100 miliardi di particelle transitanti in 1,06 ns (nanosecondi, cioè miliardesimi di secondo) e divisi tra loro da intervalli di 25 ns che, alla velocità della luce, corrispondono a pacchetti di 31 cm intervallati da vuoto per circa 7,5 m, controllati dalla modulazione dei campi magnetici effettuata con una frequenza di 400 MHz (400 milioni di volte al secondo). Riassumendo, a regime l'LHC deve controllare 400 milioni di volte al secondo circa 5.600 pacchetti da circa 100 miliardi di particelle ciascuno che viaggiano a quasi 300.000 km/s dentro a due anelli lunghi 26,7 km, aventi sezione diametrale di 56 mm ed i cui assi distano 194 mm, nei quali viene realizzato vuoto spinto a  $10^{-14}$  bar e le cui pareti vengono tenute a  $-271$  °C, benché le particelle tendano a disperdersi calore!!!

I componenti più importanti dell'acceleratore sono i 1.232 criostati dipolari (magneti superconduttori) a bassa temperatura, lunghi 16,5 m e pesanti 27,5 tonnellate ciascuno, costituiti da un tubo circolare avente diametro di 914 mm e spessore di parete di 12 mm, all'interno del quale scorrono i due tubi che contengono i fasci di particelle, "abbracciati" dagli elementi superconduttori che generano un campo magnetico intenso circa 8,3 tesla<sup>10</sup>. La parte superconduttiva che genera il campo magnetico è realizzata in lega di niobio e titanio ed è raffreddata alla temperatura di circa 1,9 K (circa  $-271$  °C), utilizzando elio liquido<sup>11</sup>. Veri prodigi tecnologici (figure 6 e 7), devono mantenere raffreddati a  $-271$  °C zone in cui passano correnti da 11.850 A (Ampere; 0,1 A sono sufficienti ad uccidere un uomo) che tenderebbero a scaldarsi enormemente, se non fossero in "modalità" superconduttive (cioè a bassissima resistenza), consentendo nel frattempo il passaggio dei due fasci di particelle e l'alimentazione per i sensori, il tutto con sforzi strutturali importantissimi.

Ogni tratto del supermagnete presenta un angolo tra le estremità di 5,1 mrad<sup>12</sup>, corrispondente ad un raggio di curvatura<sup>13</sup> di 2.812 m e ad una freccia ("spanciamento" al centro) di 9,14 mm.

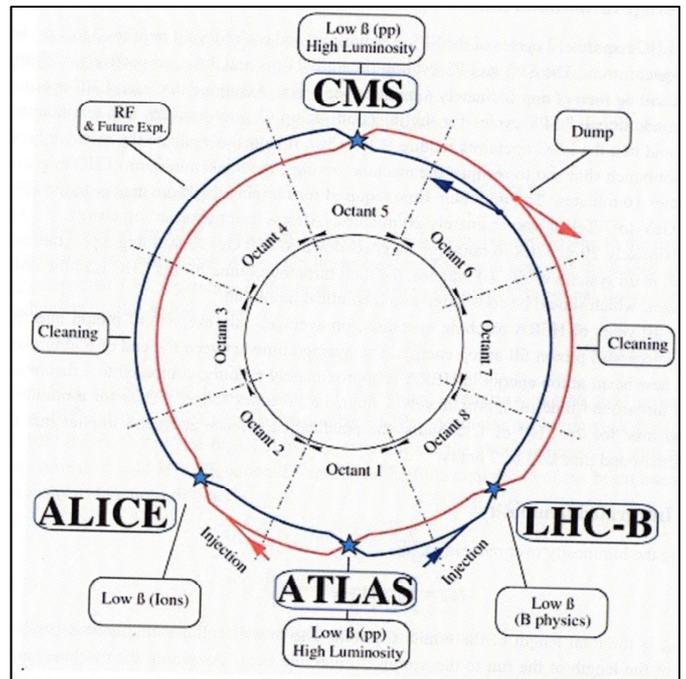


Figura 5: Layout schematico dell'LHC.

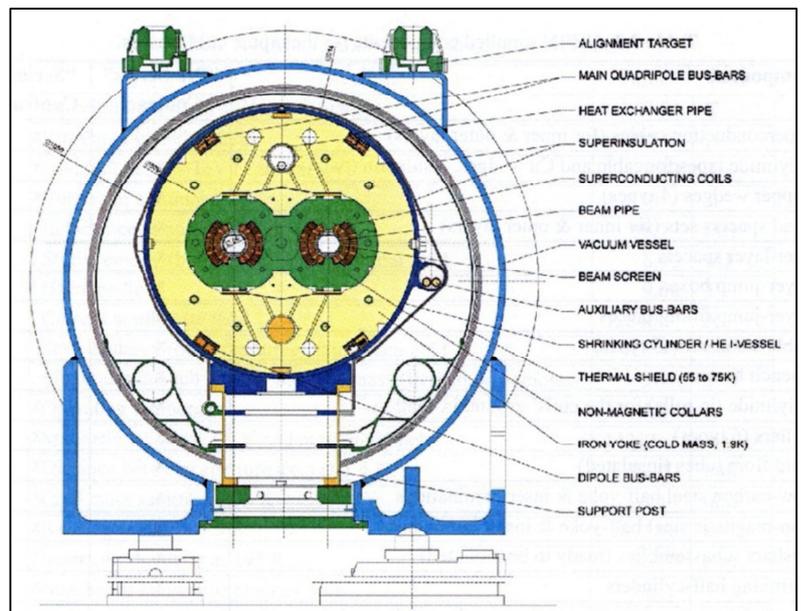


Figura 6: Sezione trasversale del criostato dipolare.

<sup>10</sup> Il tesla (T) è l'unità di misura dell'induzione magnetica, ossia dell'intensità del flusso magnetico; questo valore è circa 200.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre, circa 1.000 volte più intenso di quello delle migliori calamite commerciali e comunque 4 volte superiore ai macchinari medici che effettuano l'imaging tramite NMR (Risonanza Magnetica Nucleare). I supermagneti dell'LHC possono produrre fino a 9,7 T di picco, ma 8,3 T è la potenza nominale sufficiente ad avere margine operativo durante il funzionamento.

<sup>11</sup> La radiazione cosmica di fondo (eco elettromagnetico del Big Bang), che permea lo spazio profondo, è a 2,7 K; per questo l'interno dell'LHC è il posto stabilmente più freddo dell'Universo (alcuni esperimenti hanno prodotto temperature inferiori, ma per pochi secondi).

<sup>12</sup> "milliradianti"; il rad (radiante) è l'unità di misura standard degli angoli nel Sistema Internazionale, e corrisponde a  $180/\pi$  gradi (cioè 57,3°). L'angolo formato da ogni criostato dipolare è quindi di circa 0,2922°.

Il campo magnetico è generato dalle bobine superconduttive (“superconductive coils”, marroni, in figura 6). Per ciascun fascio è presente un dipolo, ciascuno dei due poli del dipolo è formato da due strati di trefoli: il primo strato di ciascun polo è formato da 28 trefoli trapezoidali aventi dimensioni medie di 1,9 x 15,1 mm, ciascuno formato da circa 8.900 filamenti aventi diametro di 7 µm (micron, cioè millesimi di millimetro), mentre lo strato esterno è costituito da 36 trefoli trapezoidali aventi dimensioni medie di 1,48 x 15,1 mm, ciascuno formato da circa 6.500 filamenti aventi diametro di 6 µm.

Per provare a concepirne minimamente l’incommensurabile complessità, dobbiamo considerare che oltre ai citati 1.232 criostati dipolari, l’anello di LHC è costituito anche da circa altri 550 elementi di complessità anche maggiore, di 26 tipologie differenti, con lunghezze variabili dai 3 ai 10 m, aventi da 4 a 12 poli, necessari per immettere i pacchetti di particelle, correggere le traiettorie, deviare i fasci in prossimità dei rivelatori, sopprimere le dispersioni, ecc.: se i numerosi dipoli si occupano di incurvare la traiettoria del fascio, determinando quella di riferimento, i quadrupoli devono occuparsi dell’accoppiamento betatronico<sup>14</sup> ed i sestupoli della soppressione dell’aberrazione di cromaticità<sup>15</sup> indotta dai quadrupoli, fino ai 12-poli di collimazione prima dei rivelatori.

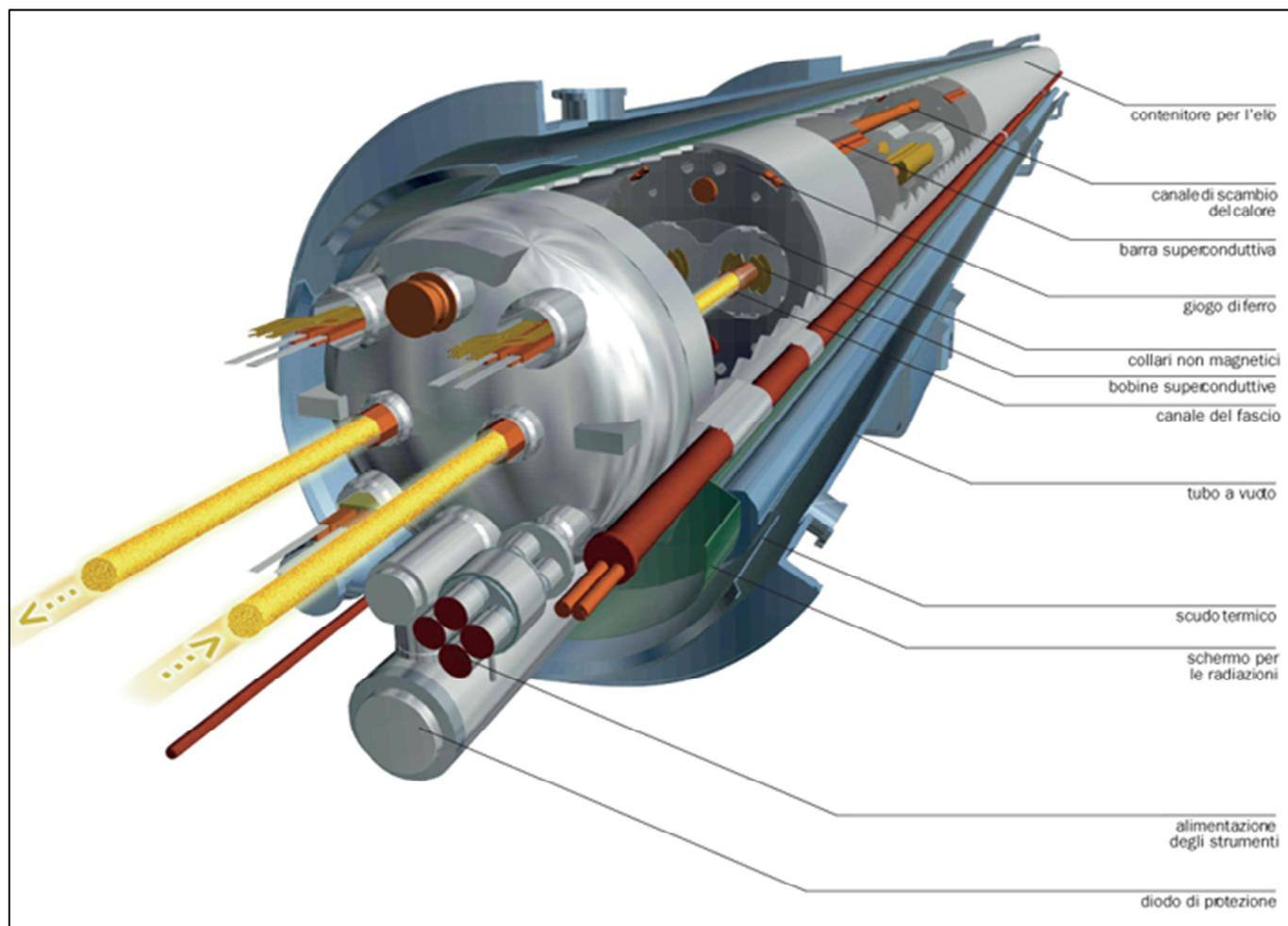


Figura 7: Sezione prospettica di uno dei 1.232 "magneti superconduttori", tecnicamente dei "criostati dipolari".

La cavità che alloggia le bobine è formata dai “collari”, laminazioni di un particolare acciaio inox di grande qualità, detto “austenitico”, tale da non diventare magnetico neanche a basse temperature. Oltre ad assicurare la precisione voluta, i collari devono sostenere gli sforzi elettromagnetici. Il campo magnetico, infatti, genera una pressione di circa 400 atmosfere, corrispondente a una forza di circa 4 MN (4 meganewton, pari al peso di un corpo di

<sup>13</sup> A 1,9 K si riduce a 2.803,98 m.

<sup>14</sup> Le equazioni di Hill descrivono le forze elettriche di Lorentz che agiscono sulle particelle del fascio sul piano perpendicolare alla traiettoria, inducendo oscillazioni, dette “betatroniche”, del fascio stesso attorno al centro della traiettoria, che sono contenute e “gestite” dai criostati quadrupolari.

<sup>15</sup> Non centra niente con i colori, però così come nell’ottica i diversi colori della luce (dovuti a diverse lunghezze d’onda della radiazione elettromagnetica), quando deviata o focalizzata, generano il fenomeno dell’aberrazione cromatica, allo stesso modo nei sincrotroni le particelle di uno stesso pacchetto non hanno tutte esattamente la stessa energia, quindi hanno velocità leggermente diverse, e vengono quindi focalizzate in modo leggermente diverso dai quadrupoli, cosa poi corretta nei sestupoli.

400 tonnellate) per ogni metro di lunghezza: una forza simile potrebbe anche indurre le bobine ad aprirsi. Anche il più piccolo movimento, tuttavia, deve essere impedito per evitare ogni causa di dissipazione di energia. Alle temperature di operazione di 1,9 K, infatti, è sufficiente 1 mJ (un millijoule) di energia rilasciata (l'energia acquisita da una massa di un grammo dopo una caduta libera di dieci centimetri) per fare "transire"<sup>16</sup> il cavo superconduttore, facendogli perdere le peculiari caratteristiche e portandolo a dissipare per effetto Joule<sup>17</sup> come un qualsiasi conduttore. Questo fenomeno di improvviso ritorno dallo stato superconduttore allo stato normale viene chiamato "quench".

Il design del magnete è fatto in modo da evitare il quench incrementando la stabilità del cavo. Nonostante i diversi accorgimenti, tuttavia, il quench non è raro nei magneti di tipo dipolare. Essi devono essere così protetti da pericolosi eccessi di tensione elettrica e danneggiamenti meccanici dovuti alle variazioni brusche e non omogenee di temperatura. Il quench deve essere individuato nel tempo massimo di 0,01 secondi e il segnale, di pochi millivolt, deve essere distinto dal rumore elettrico di fondo. Una volta scoperto il quench, è necessario azionare i riscaldatori inseriti nelle bobine e scaricare l'energia, ossia la corrente, del magnete. Un ritardo anche di soli 0,1 secondi può essere fatale per il magnete.

Tutta questa complessità viene gestita tramite l'impiego di 1.612 circuiti elettrici di potenza, connessi ed alimentati attraverso 3.286 terminali ad alta capacità, tra i quali i 1.070 da 13.000 A hanno quasi le dimensioni di una persona. Monitoraggio e controllo avvengono tramite una rete di 2.070 centraline elettroniche multicanale, capaci di acquisire, tra i tanti segnali, anche i 1.032 "monitoraggi" analogici della posizione del fascio nell'anello, acquisiti a 40 MHz (40 milioni di volte al secondo).

Oltre agli apparati elettrici, anche la complicazione dei sistemi che generano il vuoto è lontana dalla quotidianità e dalla banalità. Come detto, negli anelli dei due fasci si raggiungono valori unici di  $10^{-14}$  bar, ma esistono altri due circuiti di pompaggio, uno per creare un vuoto isolante per la distribuzione dell'elio criogenico e l'altro per creare vuoto di isolamento per i criomagneti superconduttori, entrambi a  $10^{-6}$  bar.

Anche per l'apparato di raffreddamento ad elio liquido si sono dovute superare sfide tecnologiche senza precedenti: ciascuno degli 8 ottanti gestisce un circuito di raffreddamento a 4 stadi contenente ben 12 tonnellate di elio per settore, per portare all'inedita temperatura di 1,9 K a 1,3 bar i criomagneti sui 27 km dell'anello. L'apparato ha dovuto anche tenere conto della inclinazione<sup>18</sup> dell'anello, che comportava diversi livelli di pressione lungo i tubi di distribuzione.

## IL CERN



Fondato il 29 Settembre 1954 con l'accordo tra 12 nazioni europee, il *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* nasce con l'intento di porre l'Europa all'avanguardia nella ricerca sulla fisica nucleare, rivaleggiando con i centri presenti negli USA e con quelli emergenti in Unione Sovietica. Vi partecipano oggi 23 nazioni (18 della UE più UK, Norvegia, Svizzera, Serbia ed Israele) e 10 paesi "osservatori". La Germania fornisce il maggior contributo assoluto, la Norvegia quello pro-capite. L'Italia è quarta in assoluto (10,4% del budget) e 13° pro-capite (2 €/cad.), ma è il paese ad aver "fornito" il maggior numero di Direttori, tra i quali l'attuale (**Fabiola Gianotti**, prima donna, in carica dal 2016, e prima rielezione per un intero secondo mandato). Vi lavorano circa 2.700 persone, mentre circa altri 13.000 ricercatori di 70 paesi vi trascorrono annualmente dei periodi o vi collaborano a distanza. In 68 anni di attività il CERN ha portato alla scoperta delle correnti deboli neutre come forma di interazione tra particelle soggette alla Forza Nucleare Debole, dei bosoni W e Z (mediatori della Forza Nucleare Debole), della violazione diretta della simmetria CP (carica-parità), del Bosone di Higgs, alla determinazione del numero di famiglie di neutrini, alla produzione dei primi atomi stabili di antimateria, all'invenzione del World Wide Web, nato per permettere analisi condivise dell'immane quantità di dati generati dai rivelatori: un anno di attività del CERN produce 50 PB di dati (1 PB –petabyte– corrisponde ad 1 milione di gigabyte).

<sup>16</sup> La transizione ("quench") che ne determina la cessazione dello status di "superconduttore" ed il ritorno a conduttore normale. Per le leghe Niobio-Titanio (Nb-Ti) utilizzate è a circa 9 K.

<sup>17</sup> Effetto dovuto, semplicisticamente, alla generazione di calore per "attrito" che la corrente di elettroni produce nell'avanzamento nelle nuvole elettroniche dei metalli che sta attraversando. Dette "V" la differenza di potenziale elettrico (in Volt) che genera la corrente ed "R" la resistenza del mezzo da attraversare (in Ohm, data da caratteristiche fisiche e geometriche del mezzo stesso), si genera una corrente "I" (in Ampere) che la legge di Ohm fissa in  $I = V/R$ ; la potenza "W" (in Watt) dissipata per effetto Joule è  $W = V \cdot I = R \cdot I^2$ , quindi, con le gigantesche correnti "I" circolanti nei dipoli, si capisce perché la resistenza "R" debba assumere valori infinitesimi, necessitando quindi di materiali nello stato di superconduttori.

<sup>18</sup> L'anello dell'LHC non è orizzontale, ma inclinato dell'1,41%, con una differenza di quota di 120 m tra la parte verso la catena del Giura e quella verso il Lago Lemano.

Le particelle vengono generate ed impacchettate fuori dall'LHC, che rappresenta la fase finale dell'esperimento: i protoni vengono generati ed accelerati fino a 50 MeV in due LINAC<sup>19</sup>, poi inseriti nei 4 sincrotroni<sup>20</sup> sovrapposti di 50 m di diametro del PSB<sup>21</sup>, che li accelera all'energia di 1,4 GeV. Il PSB passa i pacchetti di protoni al PS<sup>22</sup>, di 200 m di diametro, che accelera i protoni fino a 28 GeV. Il PS, finalmente, passa le particelle agli 8,4 km di diametro dell'LHC, che accelera ciascun fascio fino a 7 TeV, realizzando urti fino a 14 TeV di energia (per ora 13,6 TeV). Ma tutto quanto descritto altri non è che l'insieme di apparati che gestiscono i fasci adronici, la vera complessità, da far pensare alla fantascienza, si raggiunge là dove i fasci vengono incrociati e fatti collidere, generando i "boeing" e le "portaerei" richiamati in apertura: i citati rivelatori LHCb, ALICE, CMS ed ATLAS. Analizzeremo con maggior dettaglio l'LHCb, non solo per le dimensioni (è comunque il più piccolo dei 4 rivelatori) e la ragguardevole complessità, ma perché è stato quello maggiormente modificato e potenziato durante il fermo preliminare al "3° run" del collisore adronico; ma qui comincia un altro capitolo ...

## IL 3° RUN

Prima di introdurre alcuni dettagli sul 3° run della macchina è opportuno riassumere un minimo di storia della genesi e dell'evoluzione della stessa, che ha portato all'attuale configurazione.

Approvato nel 1995 e costruito tra il 1998 ed il 2008, dopo un iniziale guasto che ha compromesso l'impianto di raffreddamento e provocato un fermo di circa un anno, LHC ha cominciato la sua prima campagna sperimentale alla fine del 2009. Tutto il 2010 è passato per le messe a punto e le regolazioni fini del sistema, ed è col 2011 che inizia la piena attività di ricerca. Già durante l'anno gli "eventi favorevoli" alla scoperta per la quale era stato principalmente realizzato (l'identificazione del Bosone di Higgs) andarono accumulandosi, tanto che già il 13 Dicembre 2011 gli italiani Fabiola Gianotti (Portavoce dell'esperimento ATLAS) e Guido Tonelli (Portavoce dell'esperimento CMS) riferirono di aver trovato la cosiddetta "Particella di Dio" tra i 124 ed i 126 GeV con una probabilità quasi del 99%. Per i Fisici questa probabilità è ancora largamente insufficiente, quindi nei mesi successivi vennero prodotti milioni di eventi con collisioni ad 8 TeV, che confermarono la scoperta (Figura 8) con un livello di significatività osservato oltre i 5  $\sigma$  ("5 sigma", vedere approfondimento nelle pagine successive) richiesti dalla comunità scientifica internazionale per confermare una scoperta scientifica, con comunicazione "Urbi et Orbi" del 4 luglio 2012 (e Nobel ad Higgs e qualche collega l'anno successivo).

Ottenute ulteriori conferme fino alla Primavera del 2013, LHC venne poi fermato per due anni per un primo potenziamento, al quale sono seguiti tre anni e mezzo di attività quasi ininterrotta, prima di un fermo altrettanto lungo, durante il quale si sono intraprese le modifiche necessarie al 3° run (maggiori dettagli nella cronologia di figura 9), in corso dal 5 Luglio 2022 (Figura 10).

Prima di entrare in dettagli tecnici e scientifici, voglio sottolineare come l'esperimento LHCb sia non solo un generatore di conoscenze, ma anche un promotore di pace e cooperazione tra i popoli: a Marzo 2022 la collaborazione LHCb per la raccolta ed analisi dei dati dell'esperimento contava 1.565 ricercatori, afferenti a 79 istituti di 18 paesi, di questi, solo 32 istituti provengono da 7 paesi UE dei 18 che aderiscono al CERN, ai quali si aggiungono un istituto sloveno ed uno irlandese (UE, non CERN), 11 britannici e 3 svizzeri (soci CERN, non UE), poi ben 31 istituti di 7 paesi di 5 continenti, non-UE e non-CERN. Ho scritto "promotore di pace" perché tra questi istituti ve ne sono 10 russi come 2 ucraini, 6 statunitensi come 8 cinesi, 5 francesi come 1 algerino, fino ai 12 istituti italiani che tirano le fila, devo dire con orgoglio, come rappresentanza più nutrita, a conferma del secolare livello di eccellenza che la scienza italiana raggiunge nella fisica di base.

Prima di entrare in dettagli tecnici e scientifici, voglio sottolineare come l'esperimento LHCb sia non solo un generatore di conoscenze, ma anche un promotore di pace e cooperazione tra i popoli: a Marzo 2022 la collaborazione LHCb per la raccolta ed analisi dei dati dell'esperimento contava 1.565 ricercatori, afferenti a 79 istituti di 18 paesi, di questi, solo 32 istituti provengono da 7 paesi UE dei 18 che aderiscono al CERN, ai quali si aggiungono un istituto sloveno ed uno irlandese (UE, non CERN), 11 britannici e 3 svizzeri (soci CERN, non UE), poi ben 31 istituti di 7 paesi di 5 continenti, non-UE e non-CERN. Ho scritto "promotore di pace" perché tra questi istituti ve ne sono 10 russi come 2 ucraini, 6 statunitensi come 8 cinesi, 5 francesi come 1 algerino, fino ai 12 istituti italiani che tirano le fila, devo dire con orgoglio, come rappresentanza più nutrita, a conferma del secolare livello di eccellenza che la scienza italiana raggiunge nella fisica di base.

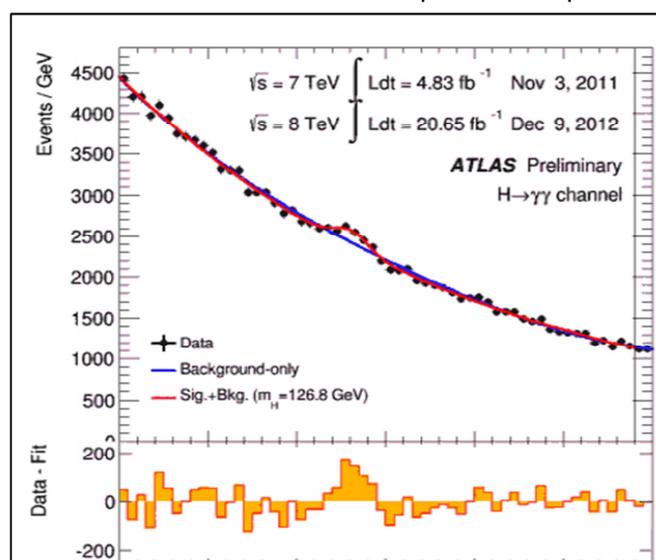


Figura 8: La "gobbetta" con la quale la linea rossa di interpolazione dei dati dei test si discosta dalla linea blu rappresenta la conferma della scoperta del Bosone di Higgs.

<sup>19</sup> Generatori di protoni ed acceleratori lineari lunghi alcune decine di metri.

<sup>20</sup> Il sincrotrone è un tipo di acceleratore di particelle circolare e ciclico, in cui il campo magnetico (necessario per curvare la traiettoria delle particelle) e il campo elettrico variabile (che accelera le particelle) sono sincronizzati con il fascio delle particelle stesse.

<sup>21</sup> "Proton Synchrotron Booster", acceleratore sincrotronico di protoni.

<sup>22</sup> "Proton Synchrotron", sincrotrone per protoni.

# LHC ieri, oggi e domani

Il Large Hadron Collider (LHC) sarà ulteriormente potenziato dal 2026 al 2029 per ottenere un numero ancora più grande di collisioni di particelle, a energie più elevate. Il suo funzionamento è previsto per un altro decennio.

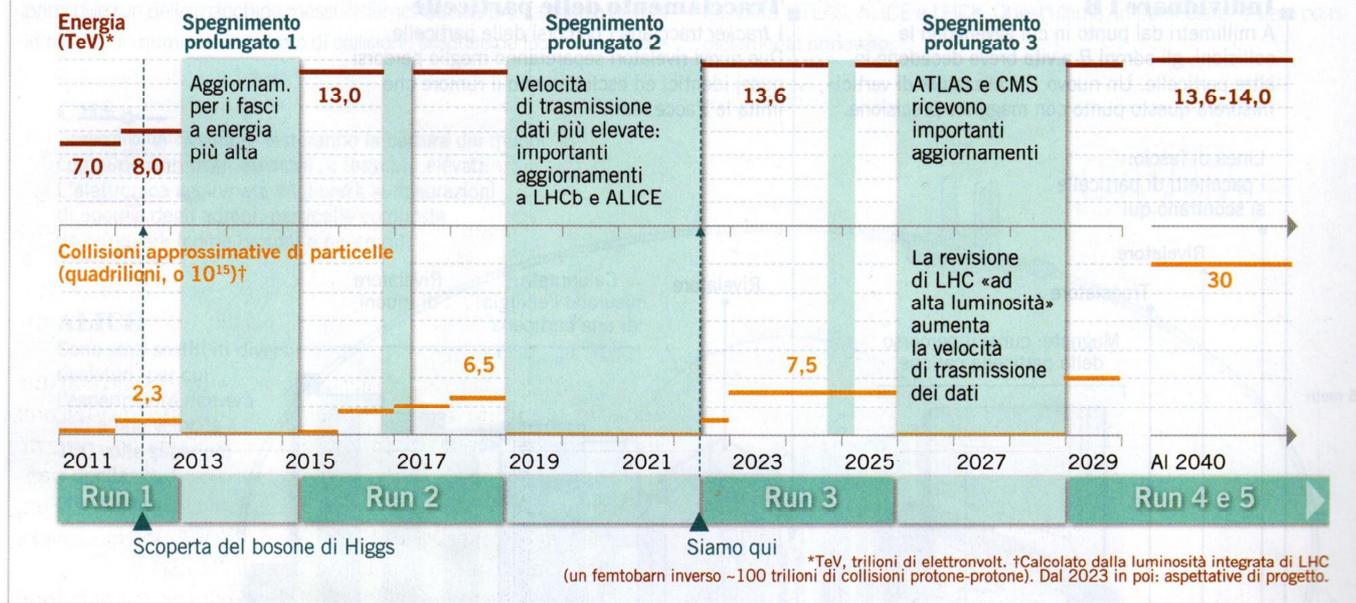


Figura 9: Cronologia di LHC, con energia delle collisioni, in TeV, e numero annuo di collisioni, in milioni di miliardi, calcolati dalla luminosità integrata di LHC, in femtobarns inversi.



Figura 10: il 5 Luglio 2022 l'equipe della sala di controllo dell'esperimento Atlas applaude all'arrivo dei dati delle prime collisioni protone-protone del terzo run; la paperella è stata molto brava!

Se poi pensiamo che l'esperimento è finanziato anche dagli altri 14 paesi partecipanti al CERN e che la composizione etnica dei ricercatori provenienti dagli istituti britannici e statunitensi è tipicamente estremamente variegata, si realizza come questa ricerca rappresenti veramente uno sforzo globale.

Come si può notare in figura 11, tutti i rivelatori di LHC sono stati potenziati in vista del terzo run: il potenziamento dell'elettronica dei CMS permetterà di rilevare più semplicemente gli adroni, oltre ai muoni per cui è nato; la velocità di trasmissione dati di Alice è stata incrementata di 100 volte; in Atlas il potenziamento dei sistemi di acquisizione permetterà di tracciare molti più eventi di prima; in LHCb i rivelatori e la trasmissione dati sono stati notevolmente potenziati.

# Un incremento enorme di dati

Nel terzo run del Large Hadron Collider (LHC), i ricercatori prevedono di registrare un numero di dati sulle collisioni di particelle pari a quello dei primi due run della macchina messi insieme. Questa prestazione è dovuta in parte a un numero più elevato di collisioni, prodotte da fasci di particelle

più stabili e più compatti che circolano nell'anello. E in parte è dovuto anche ai miglioramenti apportati ai quattro rivelatori principali della macchina: CMS, ATLAS, ALICE e LHCb. Quest'ultimo, in particolare, è stato completamente rinnovato.

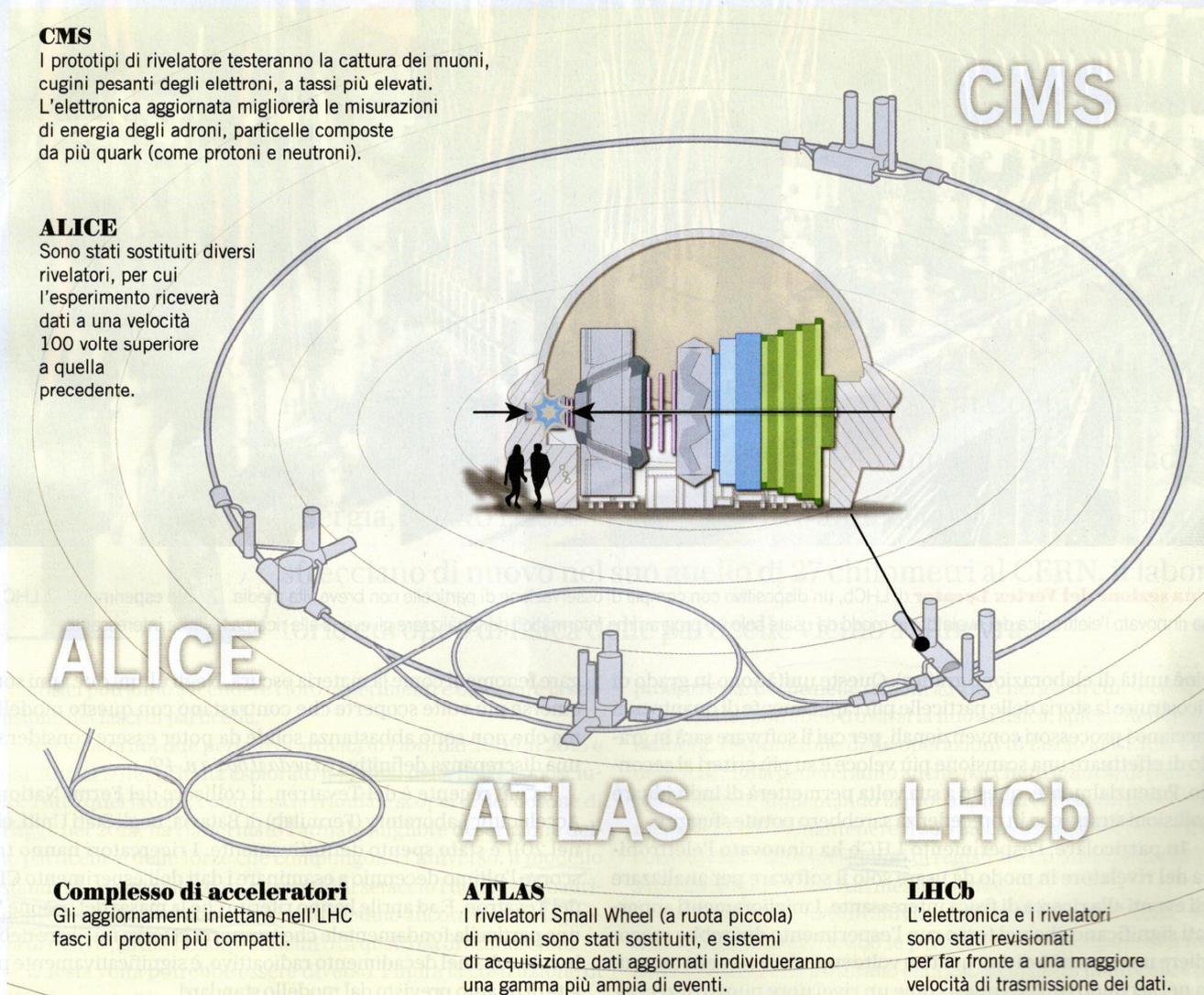


Figura 11: Principali modifiche apportate all'LHC ed ai suoi rivelatori per il 3° run.

Nel 2018 è stata avviata anche l'attuazione di un progetto di miglioramento delle prestazioni del fascio di LHC, in particolare di incremento di un fattore 10 della "luminosità" del fascio<sup>23</sup> (High luminosity LHC project), che ha portato alla ripresa delle attività nell'Estate del 2022.

Come visto, il rivelatore LHCb non è stato tra gli artefici della scoperta del Bosone di Higgs, questo perché è stato progettato per fare altro: il suo scopo principale è cercare evidenze indirette di nuova fisica nella violazione CP e nuovi percorsi rari dei decadimenti adronici dei quark "bottom" e "charm" (entrambe approfondite successivamente).

LHCb (figura 12) è un insieme di magneti, rivelatori e sensori pesante 5.600 tonnellate, lungo 21 metri, largo 13 ed alto 11 (come un piccolo condominio di 3 piani). Posto in uno dei punti in cui i due fasci protonici si incontrano,

<sup>23</sup> La luminosità "L" di un fascio di particelle di un acceleratore indica il numero di eventi utili (urti, "N") per unità di tempo ("t") per sezione d'urto ("σ"):

$$L = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{dN}{dt}$$

La "sezione d'urto" indica la probabilità che lo stato iniziale di una particella risulti alterato in un nuovo stato a seguito dell'interazione che si sta studiando. Si misura in "barn" e suoi sottomultipli (1 b = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>).

raccoglie le particelle che si generano negli urti (i “Boeing” e le “portaerei” di cui sopra), ma solo quelle che escono in una direzione (uno dei due coni di particelle che si generano dagli urti), in quanto la cavità che accoglie LHCb, pur enorme, non avrebbe potuto accoglierne due contrapposti.

Dopo gli urti, le particelle schizzano via in tutte le direzioni, ma la grande velocità fa sì che la componente assiale (lungo il fascio) sia dominante, quindi i rivelatori sono posti entro uno scostamento dal fascio di 250 mrad in verticale ( $\approx 14^\circ$ ) e di 300 mrad in orizzontale ( $\approx 17^\circ$ ), entro 20 m dal punto d’impatto.

Per distinguere le particelle generate dagli urti, queste vengono fatte passare entro potenti campi magnetici: la forza che tende ad incurvare la traiettoria delle particelle dipende dalla loro carica “q” (maggiore carica, maggiore effetto), la “resistenza” che esse oppongono ad essere deviate dipende dalla loro massa “m” (maggiore massa, maggiore inerzia, quindi minore effetto), quindi il raggio di curvatura delle traiettorie tracciate dalle particelle nei rivelatori è proporzionale al rapporto “m/q” delle loro caratteristiche fisiche, sostanzialmente diverso per ogni particella. È però fondamentale conoscerne la posizione, l’energia e l’istante dell’impatto sui rivelatori con estrema precisione, quindi i rivelatori stessi devono essere composti da elementi sensibili microscopici, tutti cablati ed acquisiti decine di milioni di volte al secondo.

Nato per scovare i modi di decadimento dei mesoni B, LHCb è stato dotato, in prossimità della zona d’urto, di un

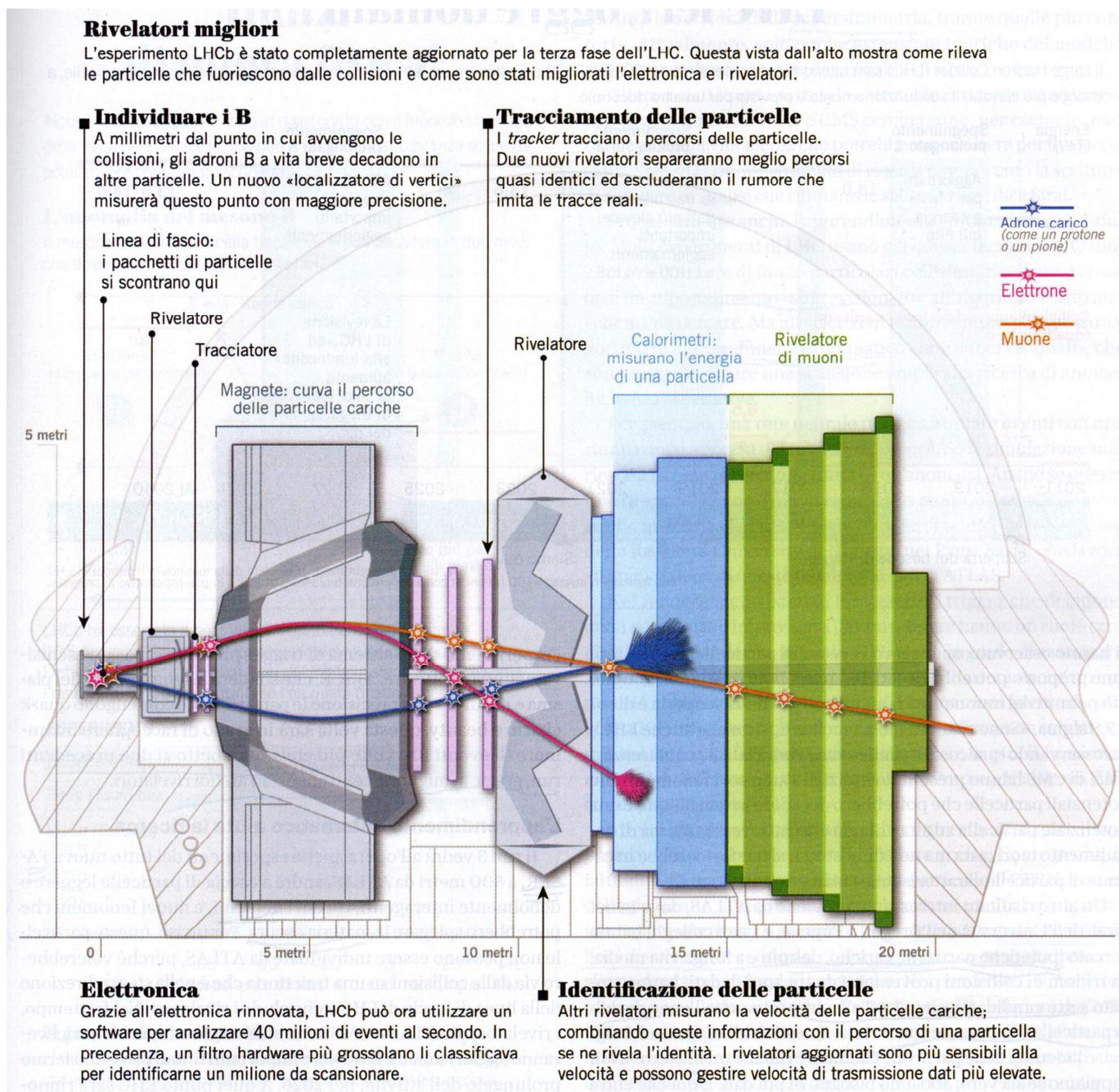


Figura 12: La complessa struttura dell’esperimento LHCb.

nuovo “localizzatore di vertici”, in grado di identificare con maggiore precisione il punto di partenza delle particelle generate dall’urto. Subito dopo vi è un rivelatore dotato di oltre 176.000 sensori (VELO) di alcune decine di micron di lato (pochi centesimi di millimetro), poi vi sono due tracciatori (“tracker”, lo “Interno” ed il “Taurinense”) costituiti da due tipologie di sensori diversi, per un totale di oltre 272.000.

Dopo il supermagnete da 1.600 tonnellate vi era il terzo (“esterno”) formato da oltre 55.000 sensori di un’altra tipologia. Nel terzo run si è riusciti ad inserire altri due tracker esterni, aumentando notevolmente il numero di sensori complessivo. Ovviamente ogni sensore è cablato al sistema tramite fibre ottiche, con una complessità architettonica e costruttiva veramente ardua.

Il successivo rivelatore si occupa di intercettare i fotoni ad alta energia, generati nell’impatto e decadimento delle particelle: un sistema di enormi specchi (oltre 7 tonnellate ciascuno) devia i fotoni verso i sensori, tutti immersi in gas dalle particolari caratteristiche rifrattive ( $CF_4$  e  $C_4F_{10}$ ). L’apparato ha una grande superficie sensibile ( $\approx 3,5 m^2$ ), tappezzata da quasi 360.000 sensori di  $2,5 \times 2,5 mm$  di dimensione, con un’efficienza di impacchettamento del 64%.

L’elemento successivo dell’LHCb è il calorimetro, così chiamato per la sua funzione, che è quella di misurare l’energia delle particelle. Si tratta in realtà di due sottosistemi differenti, il calorimetro elettromagnetico, costituito da tre schermi concentrici, tappezzati complessivamente da oltre 6.000 scintillatori<sup>24</sup>, ed il calorimetro adronico, pesante oltre 500 tonnellate e costituito da oltre 86.000 elementi sensibili.

Si arriva così ai 5 schermi e 4 filtri per il rilevamento muonico, costituiti da 1.380 camere sensibili e  $435 m^2$  di area sensibile.

Complessivamente, si arriva ad oltre un milione di sensori i cui valori vengono letti 40 milioni di volte al secondo, generando quindi quasi 40.000 miliardi di dati al secondo.

Per evitare problemi di disallineamenti temporali (come successo altrove per la nota e triste vicenda dei neutrini superluminali) tutti i sensori sono direttamente cablati, senza l’impiego di bus di campo.

Altri tre requisiti del sistema di acquisizione (DAQ) sono la semplicità, la scalabilità e l’impiego di componenti commerciali: un numero minimo di diversi componenti elettronici ed informatici,

## VERITÀ, COMUNICAZIONE, SCIENZA E “5 $\sigma$ ”

Nei test di verifica sperimentale di ipotesi, o tesi da verificare, il livello di significatività osservato è la probabilità, per un’ipotesi supposta vera, di ottenere col test risultati compatibili con la suddetta ipotesi. Tutti i fenomeni fisici complessi hanno una dispersione, riconducibile ad una curva di distribuzione a forma di campana (distribuzione Normale, o Gaussiana), ciò vale per l’altezza delle persone, per la resistenza di tondini di ferro aventi le stesse dimensioni, per la potenza di motori apparentemente identici che escono da una catena di montaggio, ecc. Nella Fisica delle Particelle (le particelle sono indistinguibili, quindi tutti i protoni, per esempio, sono uguali tra loro) la complessità, quindi la dispersione, si sposta sul processo di misura (complicato, indiretto, soggetto a mille rumori, interferenze e disturbi elettrici), quindi per poter affermare di aver fatto una certa scoperta, è necessario fare moltissime misure il più possibile coincidenti come risultato. Più le misure sono disperse, più aumenta l’apertura della distribuzione, data dal parametro “deviazione standard” (“sigma”,  $\sigma$ , per gli amici). Dato un “range di validità” di una affermazione, più  $\sigma$  si richiede di far rientrare in questo range, più si è esigenti e cautelativi nell’affermare che l’affermazione è vera. Posso fare alcuni esempi per esprimere il concetto matematico: ho visto politici spacciare per verità fatti che erano veri per meno del 20% degli elettori, o dei modelli di simulazione; questi politici stavano facendo affermazioni con livelli di significatività negativi, sul  $-0,85\sigma$ ; un venditore che spaccia per vera una cosa che in realtà avviene solo la metà delle volte sta lavorando intorno a  $0\sigma$ ; un venditore più serio, che per affermare una cosa aspetta che si verifichi almeno i  $\frac{3}{4}$  delle volte, sta facendo affermazioni a  $+0,68\sigma$ , valore attorno al quale si posiziona anche la percezione di realtà secondo il “senso comune” di molte persone; molti aspetti della farmacia e della medicina vengono oggi affermati (anche se con maggiore trasparenza) con validità che vanno dall’85% al 95% (da  $1,04\sigma$  a  $1,65\sigma$ ); in molti campi non critici dell’ingegneria si progetta con margini tra il 90% ( $1,28\sigma$ ) ed il 99% ( $2,38\sigma$ ), per arrivare a  $4,5\sigma$  nei settori aeronautico, aerospaziale e nucleare; in fisica non si può dire niente prima di arrivare a  $5\sigma$  (certezza maggiore del 99,99994%). Questo fatto comporta due cose: primo, la titubanza dei fisici in attesa della certezza viene spesso interpretata dalle folle, nella divulgazione dei risultati, come inadeguatezza di modelli, enunciati e, talvolta, financo persone, laddove la maggior parte degli stessi detrattori avrebbero già dato per vera l’affermazione ben prima; secondo, complicatissima la comunicazione tra politici e scienziati.

<sup>24</sup> La complessità degli scintillatori è notevole, realizzati come sono da elementi strutturali e sensibili multistrato, tecnologicamente avanzati e brevettati dai costruttori. Quelli del calorimetro elettromagnetico, per esempio, sono costituiti, tra l’altro, da TTYVEK® della Du Pont, Polistirolo 165H® della BASF, PTP® e POPOP® della Sigma-Aldrich.

facilmente programmabili, ed incrementabili in numero in modo relativamente semplice.

Oltre al DAQ, lo "Online System" dell'LHCb è costituito da altri 2 sistemi: il Timing & Fast Control system (TFC) e l'Experiment Control System (ECS).

Fino al secondo run, due livelli di Trigger di alto livello, costituiti da oltre 2.000 nodi computazionali, eliminavano tramite hardware oltre il 99,8% dei dati già prima di immetterli nella rete che li convogliava ai server del CERN, che li condivideva nel web. Quattro array programmabili (FPGA), ciascuno con 1.200 porte da 4 Gb/s, raccoglievano i dati; in caso di problemi di comunicazione, LHCb era comunque dotato di un buffer da 40 TB. Questa prima selezione lasciava comunque passare circa 100.000 eventi al secondo, in modo che in uno step successivo un software di controllo con modelli esistenti di decadimento ne selezionasse solo 1.000 di probabile interesse scientifico, da ricostruire integralmente con l'analisi.

Nel terzo run l'elettronica di acquisizione è stata completamente rinnovata, in modo da utilizzare solo software per analizzare gli eventi di interesse (rete neurale provvista di "machine learning"<sup>25</sup> per la selezione degli eventi).

Sia LHCb che gli altri 3 rivelatori dell'LHC mandano i dati acquisiti ai server del CERN, che in tempo reale li copia distribuendoli a 6 "centri di primo livello" in Europa (1 in Italia), che poi li ridistribuiscono a 25 centri di secondo livello, sparsi nel mondo.

Dall'analisi dei dati che arrivano in tempo reale dal milione abbondante di sensori, software di analisi e calcolo (i cui livelli di complessità sono semplicemente inimmaginabili per i non addetti ai lavori) cercano di ricostruire la traiettoria ed il tipo di particelle registrate, facendo risalire al tipo di evento. Ogni singolo urto origina una cascata di decine di particelle, che lasciano centinaia di traccia nei rivelatori, e questo avviene milioni di volte al secondo.

In figura 13 si vede la ricostruzione di un evento di decadimento primario  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S^0$ <sup>26</sup>, che ha coinvolto complessivamente la generazione di 72 particelle.

Ideato per rilevare con grande precisione particelle aventi tra i 12 ed i 25 MeV di massa a riposo<sup>27</sup>, individuandone la posizione con una precisione di 10 micron (un centesimo di millimetro) nelle due direzioni perpendicolari al fascio e di 60 micron lungo il fascio, con la risoluzione temporale del tempo di decadimento di 40 fs<sup>28</sup>, LHCb è pronto a scrivere nuove pagine della conoscenza umana, spostandone avanti i confini.

Ma prima di varcare i confini, bisogna raggiungerli, e questa è un'altra storia ...

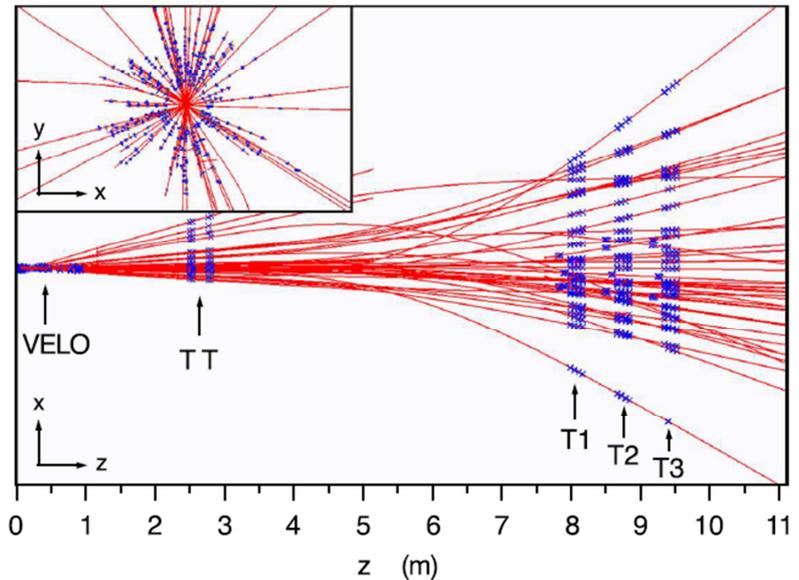


Figura 13: Ricostruzione di un decadimento di un mesone B neutro; l'asse z è lungo il fascio; il riquadro in alto riporta un ingrandimento sul piano x-y (perpendicolare al fascio) all'altezza del rivelatore VELO.

<sup>25</sup> L'apprendimento automatico è una variante alla programmazione tradizionale nel quale in una macchina si predispongono l'abilità di apprendere qualcosa dai dati in maniera autonoma, senza istruzioni esplicite; può avvenire "per rinforzo", grazie al miglioramento di prestazioni di "fitting" su target o campioni di riferimento, oppure "supervisionato", con correzioni apportate dai programmatori. L'apprendimento automatico utilizza metodi statistici ed ha pervaso molti aspetti della nostra vita, molto più di quanto ci si renda conto.

<sup>26</sup> Importante decadimento di un mesone B neutro (composto da un antiquark "bottom" e da un quark "down") in un mesone  $J/\Psi$  (composto da un quark "charm" e da un antiquark "charm") più un Kaone neutro-short (composto da un'oscillazione simmetrica di una coppia formata da un quark "down" e da un antiquark "strange" in una coppia formata da un antiquark "down" e da un quark "strange"). In frazioni di miliardesimi di secondi entrambe le particelle decadono poi in altre particelle.

<sup>27</sup> Per la teoria della Relatività Ristretta e per l'equivalenza massa - energia che ne consegue (il famoso  $E=mc^2$ ), quando un corpo si muove ha una certa energia cinetica, che quindi corrisponde ad una massa, la quale va ad incrementare la massa dell'oggetto, fino a farla tendere all'infinito quando ci si avvicina alla velocità della luce. La "massa a riposo" è la massa dell'oggetto senza l'energia cinetica che deriva dal suo moto. Un altro aspetto non secondario della Relatività Ristretta è che quando ci si avvicina alla velocità della luce il tempo scorre sempre più lentamente, così particelle che normalmente decadrebbero in frazioni di miliardesimi di miliardesimi di secondo possono allungare la loro esistenza di milioni di volte (misurata da orologi "esterni"), divenendo rilevabili per i rivelatori di LHC prima di scomparire.

<sup>28</sup> "femtosecondi", cioè  $10^{-15}$  s, ossia milionesimi di miliardesimi di secondo.

## IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE

Ogni ramo del sapere scientifico cerca di scovare modelli che spieghino con precisione sempre maggiore i comportamenti di quegli aspetti della natura di cui si occupa. È acclarato che i modelli, per funzionare, cioè per avere successo nel descrivere e prevedere i relativi fenomeni, devono avere un solido supporto matematico. Più la base matematica è profonda, più le previsioni sono accurate: la Geologia ha creato il modello della Tettonica a placche, che descrive (ma ancora fatica a prevedere con esattezza) terremoti ed eruzioni vulcaniche; la Chimica ha fatto passi da gigante grazie alla fisica quantistica nella capacità di descrivere e prevedere reazioni tra reagenti, ma le applicazioni a molecole complesse in Biologia, Genetica e, ancor più, in Medicina lasciano spazio a fattori esterni i cui influssi sono difficilmente quantificabili, quindi, per esempio, proprio in Medicina e Farmacia la descrizione delle curve epidemiologiche o delle reazioni ad un farmaco hanno buoni risultati statistici generali, ma sono spesso più carenti nell'applicazione a casi singoli (anche perché non esistono modelli accurati dei sistemi biologici complessi); l'Ingegneria si basa su centinaia di modelli specifici, spesso pieni di parametri correttivi per tener conto in qualche modo degli "incidenti" galileiani (atriti, scabrezze, dispersioni di prestazione, ecc.). Poi si arriva all'Astronomia, che da millenni affascina per la sua precisione nel poter prevedere fenomeni anche con decenni di anticipo (eclissi, transiti, pleniluni, ecc.). L'estensione dell'Astronomia alla Cosmologia ha portato al Modello Cosmologico Standard ed alla Relatività Generale, capaci di previsioni incredibili e talvolta controintuitive (unità dello spazio-tempo, curvatura della luce, Big Bang, radiazione cosmica di fondo, nucleosintesi) nonché dotate di un'accuratezza nel calcolo dei moti celesti che può raggiungere e superare le dieci cifre significative. La Fisica delle Particelle, nata solo poco più di un secolo fa, ha intaccato il plurimillenario dominio dell'Astronomia come "scienza più precisa", giungendo (grazie al Modello Standard), a previsioni con undici cifre significative!

Per arrivare a parlare del Modello Standard, però, bisogna fare un po' di storia ... un bel po' di storia (ma molto interessante!) per parlare prima di particelle e forze, e dei modi di descriverli.

L'idea (puramente speculativa e priva di supporto sperimentale, quindi priva di qualsivoglia validità scientifica) che la materia fosse costituita da particelle elementari indivisibili va fatta risalire al periodo d'oro della filosofia greca classica (600÷400 a.C.): evolvendosi dal pluralismo ontologico di Anassagora (in contrapposizione concettuale ai monismi religioso di Senofane e metafisico di Parmenide), l'atomismo di Leucippo sviluppò intorno al 460 a.C. concetti descrittivi della materia molto vicini a quelli poi evolutisi nella scienza moderna.

In esso la materia è costituita da elementi microscopici, indivisibili e impercettibili, qualificati da forma, disposizione e posizione, contenuti nello spazio infinito, considerato vuoto; nel vuoto essi si muovono casualmente e molto rapidamente, e il loro movimento determina le loro combinazioni e la formazione dei corpi materiali. Tali elementi sono sostanze elementari invisibili ed indivisibili, dette "atomi" (dal prefisso privativo greco "a" e dal verbo "temno", tagliare, quindi "non tagliabili").

Meno di 50 anni dopo un discepolo di Leucippo, Democrito, sostituirà la casualità cinetica di Leucippo come causa dell'essere con una "necessità", introducendo un determinismo per meglio spiegare le aggregazioni degli atomi nelle forme della natura, inclusi i viventi. La cosmogonia atomista ne soffrì, venendo poi duramente osteggiata da Platone, che arrivò a bandire da Atene tutti gli scritti di Leucippo e Democrito, con una censura con poche analogie nella Grecia classica<sup>29</sup>.

Sarà solo grazie ad Epicuro, cresciuto lontano da Atene, che intorno al 305 a.C. l'atomismo conoscerà un nuovo rilancio: questi introduce due nuove "qualità": gli atomi hanno un "peso" (che ne determina diverse velocità di caduta e di aggregazione) ed il vuoto ha delle "parenklisis", delle specie di resistenze che, interagendo con gli atomi in continuo movimento, ne determinano deviazioni dalla rettilinearità delle traiettorie, favorendo le aggregazioni.

In opposizione alla stoica austerità di Platonismo ed Aristotelismo, imperanti nel periodo, Epicuro introdurrà nell'etica del suo approccio un eudemonismo<sup>30</sup> che, come tratto distintivo, rivaluta le sensazioni, anche fisiche, come strumento di conoscenza e realizzazione, arrivando a legittimare un approccio "quasi sperimentale", sicuramente "esperienziale", allo studio della natura, da affiancare a quello meramente speculativo e razionale.

Sarà Lucrezio, poeta e filosofo romano (intorno al 60 a.C.), a rielaborare ed esaltare, tramandandolo, il pensiero di Epicuro nel suo poema in sei libri "De Rerum Natura"<sup>31</sup>: «... e dunque trionfò la vivida forza del suo animo e si spinse lontano, oltre le mura fiammeggianti del mondo. E percorse con il cuore e la mente l'immenso universo, da

---

<sup>29</sup> L'opera di distruzione dovette essere estesa e capillare, tanto che non ci sono pervenute opere dirette di Leucippo e Democrito, ma solo descrizioni delle loro filosofie operate da storici successivi o da detrattori ed oppositori.

<sup>30</sup> Dottrina che riconosce e propugna come legittima l'aspirazione dell'uomo alla felicità, e come scopo fondamentale della vita il suo raggiungimento.

<sup>31</sup> "La natura delle cose"

cui riporta a noi vittorioso quel che può nascere, quel che non può, e infine per quale ragione ogni cosa ha un potere definito e un termine profondamente connaturato. Perciò, a sua volta abbattuta sotto i piedi, la religione è calpestata, mentre la vittoria ci eguaglia al cielo!>>. Lucrezio, poeta sensibile e melancolico, traduce il *Parenklisis* col "clinamen", ma soprattutto sostituisce l'eudemonismo con l'atarassia<sup>32</sup>, introduce un pessimismo cosmico che non avrà eguali fino a Leopardi, e stigmatizza le religioni come mistificatrici per eccellenza e principali cause dell'ignoranza e dell'infelicità umana ("ottundimento gnoseologico e cieca ignoranza"), divenendo il primo alfiere e pilastro ante litteram di ateismo, materialismo ed antiprovidenzialismo.

Non sorprende dunque, che a partire circa dal 200 d.C., i Padri della Chiesa abbiano prontamente messo all'indice tutte le teorie atomistiche ("empie e demoniache"), relegandole all'oblio per oltre 12 secoli.

Ma il mondo non si ferma e nel Sec. XII il filosofo arabo andaluso Averroè reperisce frammenti di un'opera aristotelica nella quale sono introdotti i "minima naturalia", qualcosa che prevede la qualitatività degli elementi dell'essere come limite ultimo della sua divisibilità. Intanto gli alchimisti, nella loro accanita ricerca della pietra filosofale<sup>33</sup>, scoprono che alcuni elementi reagiscono in proporzioni fisse per generare determinati composti. Nel 1453 Costantinopoli cade in mano ai Turchi, causando una fuga di dotti (e relative biblioteche ed opere) verso l'Europa, in pieno Rinascimento. La rilettura critica dei testi antichi comincia ad incrinare la cieca fiducia nel costrutto aristotelico e nella cosmologia tolemaica, portando al 1543, l'anno di svolta in cui Copernico dà alle stampe il rivoluzionario "De revolutionibus orbium coelestium"<sup>34</sup> e Vesalio pubblica il primo atlante di anatomia umana, con disegni tridimensionali di incredibile dettaglio.

Nei decenni successivi le osservazioni di un'accuratezza senza precedenti compiute dall'astronomo Tycho Brahe spianeranno la strada a dotte sintesi di cotanto lavoro, e tra tanto fermento la Natura ci mette pure lo zampino, producendo nel 1572 e nel 1604 le uniche due supernovae visibili dalla Terra negli ultimi 900 anni. Basterà che Galileo, perfezionato il suo cannocchiale nel 1609, osservi le fasi di Venere, i monti sulla Luna e scopra 4 nuovi satelliti intorno a Giove, per far sì che entro il 1619 Keplero abbia abbastanza materiale per formulare le 3 leggi descrittive<sup>35</sup> che rivoluzioneranno l'Astronomia: il Cielo non è perfetto!

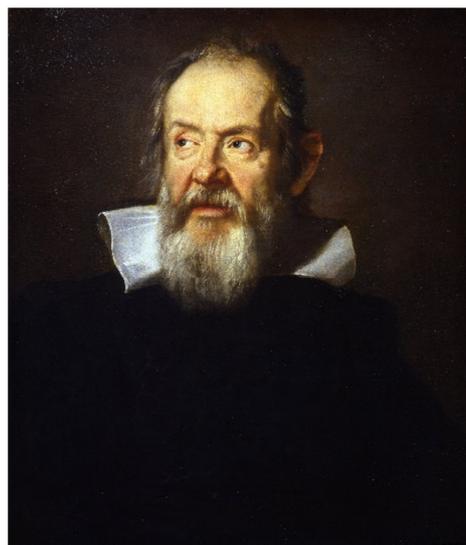


Figura 14: Galilei ritratto nel 1636 a 72 anni dal fiammingo Justus Sustermans.

E mentre Galilei negli anni '30 del '600 perfeziona il Metodo Scientifico, introducendo finalmente concetti come massa, accelerazione, attrito, inerzia e forza, ma anche i fondamentali principi di Inerzia e di Relatività, è ormai evidente che una spiegazione della materia basata su miscugli di aria, acqua, fuoco e terra non abbia più i requisiti minimi per essere soddisfacente.

Già nel 1417 l'umanista italiano Poggio Bracciolini aveva scoperto in un monastero svizzero frammenti dell'opera di Lucrezio, che però rimasero noti, tra timori e diffidenza, solo ad una ristrettissima cerchia di intellettuali. Solo nel 1524 Erasmo da Rotterdam tenta una riconciliazione tra Epicureismo e Religione, ma è con due opere di Pierre Gassendi (del 1647 e 1658) che si realizzerà un pieno recupero della filosofia epicurea, benché adattata per conciliarsi alla dottrina cristiana, cui può fornire quell'ontologia pluralistica che le serve per potersi accordare alla nascente Fisica.

Arriviamo al 1666, quando un 23-enne Isaac Newton si ritira dall'Università di Cambridge per alcuni mesi nella sua tenuta a 150 km a Nord di Londra per rifuggire la peste; annoiato dai testi classici di Aristotele, Euclide e Tolomeo, riesce invece a dedicarsi alle stimolanti e moderne opere di Cartesio, Copernico, Galileo e Keplero, fino a quando, ispirato dalla famosa mela, inanella una serie di scritti ed appunti che faranno di quello il suo "annus mirabilis": pone le basi matematiche dei 3 Principi della Dinamica e, soprattutto, della Legge di Gravitazione Universale che descrive matematicamente le 3 Leggi di Keplero come il risultato di una forza attrattiva (poi detta **Gravitazionale**) tra corpi ce-

<sup>32</sup> Stato di imperturbabilità: termine usato dagli epicurei e dagli scettici per indicare quello stato di perfetta tranquillità e serenità d'animo, raggiunto dal saggio una volta libero dalle passioni.

<sup>33</sup> La mistica pietra capace di risanare la corruzione della materia, donando onniscienza ed immortalità, oltre che tramutando in un sol tocco i metalli "vili" in oro.

<sup>34</sup> "Sulle rivoluzioni dei corpi celesti", nel quale propone come puro strumento di calcolo (per non irritare la Chiesa) un modello eliocentrico per calcolare il moto dei pianeti, più efficace e preciso delle sfere tolemaiche.

<sup>35</sup> #1: L'orbita descritta da un pianeta è un'ellisse, ed il Sole si trova in uno dei due fuochi. #2: Il raggio vettore che congiunge il centro del Sole col centro del pianeta spazza aree uguali in tempi uguali. #3: I quadrati dei periodi orbitali sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle orbite stesse.

lesti. Ma la Matematica che gli serve non esiste, quindi deve crearsela: scopre l'identità binomiale ed inventa il Metodo delle tangenti, approssima la serie armonica con i logaritmi ed inizia a sviluppare il calcolo infinitesimale. Sarà solo su sollecitazione di alcuni colleghi della Royal Society che i suoi sforzi verranno raccolti, formalizzati e condivisi in un'unica opera, pietra miliare della scienza moderna: i "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica" vanno in stampa oltre 20 anni dopo, nel 1687, dando a Newton immediata ed imperitura fama internazionale.

Dal 1670 si applica anche allo studio della luce, scindendo per primo la luce bianca nei colori tramite un prisma, inventando un nuovo tipo di telescopio (riflettore) e postulando una inedita teoria corpuscolare della luce, in contrapposizione alle teorie ondulatorie che cominciavano ad andare per la maggiore tra gli scienziati che si occupavano di luce ed ottica (Hooke, Huygens). Negli ultimi decenni della sua lunghissima vita (specialmente per quei tempi) Newton diviene anche Parlamentare e Direttore della Zecca, apportando fondamentali innovazioni al sistema monetario inglese. Un avvicinamento morboso all'alchimia e la crescente religiosità (benché teologicamente eretico rispetto all'ortodossia anglicana) lo portano ad una forte critica all'epicureismo e a ripetuti scontri con alcuni colleghi, benché l'ipotesi atomistica (corpuscolare) sia alla base sia delle sue concezioni di luce che di materia (sostenuto, in quest'ultima, dalla visione del connazionale Robert Boyle, precursore degli studi su Teoria dei gas e Termodinamica, ma soprattutto primo Chimico, col suo volume "Il Chimico scettico" del 1661).

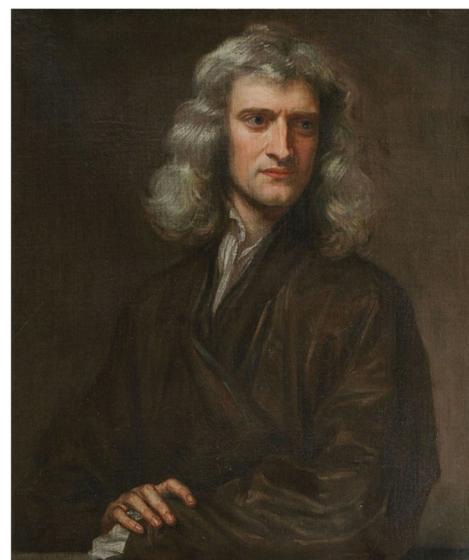


Figura 15: Newton ritratto nel 1689 a 46 anni da Sir Godfrey Kneller.

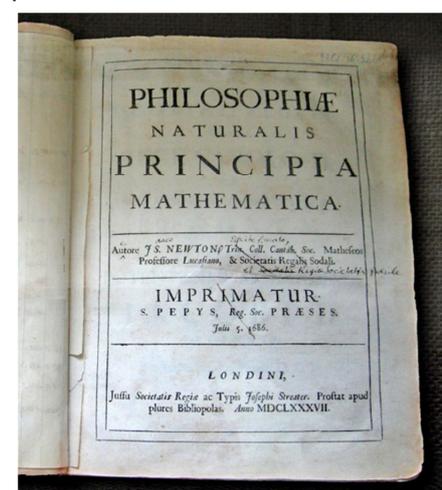


Figura 16: Prima pagina della copia della prima edizione dei "Principia" appartenuta a Newton.

Oltre alle leggi fisiche ed agli strumenti matematici, Newton lascia una descrizione dell'Universo in cui Spazio e Tempo assoluti sono il palcoscenico degli eventi spiegati dalla fisica. Ma se le onde del mare si propagano attraverso l'acqua, ed il suono attraverso l'aria, attraverso cosa si propagano la gravità e la luce da un astro all'altro? Ecco comparire l'etere<sup>36</sup>, che per 200 anni sarà misterioso compagno degli scienziati.

Inoltrandosi nel '700, la nascita di una letteratura libertina spiana la strada ad un recupero filosofico dell'epicureismo, ma è nelle opere di rivoluzionari pensatori materialisti ed atei come de La Mettrie e Diderot che il meraviglioso "Secolo dei Lumi", nel risveglio della ragione, può riproporre come centrali alcuni concetti dell'atomismo.

Il Metodo galileiano applicato all'alchimia porta, come anticipato, alla nascita della Chimica, che proprio a fine '700 conosce un'importante razionalizzazione dei suoi progressi, che marcheranno un profondo successo dei presupposti atomistici: nel 1789 Antoine Lavoisier dimostra la *Legge di conservazione della massa*<sup>37</sup>, nel 1799 Joseph Proust enuncia la *Legge delle proporzioni definite*<sup>38</sup> e nel 1804 John Dalton la *Legge delle proporzioni multiple*<sup>39</sup>.

Dalton risistema le basi della Chimica fondandola su 5 postulati:

- Un atomo è indivisibile e indistruttibile.
- Tutti gli atomi di una stessa materia sono uguali.
- Gli atomi di uno stesso elemento non possono essere trasformati in un altro elemento.
- Gli atomi di un elemento si combinano con atomi di altri elementi mediante una reazione chimica.
- Gli atomi non possono essere né creati né distrutti, ma si trasferiscono interi da un composto ad un altro.

Per Dalton, quindi <<Un atomo è la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche chimiche di quell'elemento!>> Oggi sappiamo tutti tranne il quarto postulato non sono sempre veri, in quanto reazioni nucleari ed isotopi possono violarli, ma nell'ambito delle reazioni chimiche sono sempre veri, e gli immensi progressi

<sup>36</sup> Anche l'etere luminifero riprende un concetto epistemologicamente introdotto dalla filosofia classica in modo puramente speculativo, ma che sarebbe superfluo approfondire in questo contesto.

<sup>37</sup> La massa dei reagenti è sempre uguale alla massa dei prodotti di reazione in un sistema chiuso, ovvero in una reazione chimica la massa si conserva: <<Nulla si crea, nulla si distrugge, ma tutto si trasforma.>>

<sup>38</sup> Quando due o più elementi formano un composto, le quantità che reagiscono sono in rapporto definito e costante.

<sup>39</sup> Quando due elementi formano più di un composto, le masse dell'uno che reagiscono con la stessa massa dell'altro stanno tra loro secondo rapporti esprimibili attraverso numeri piccoli e interi.

compiuti da Chimica, Biologia e Farmaceutica negli ultimi due secoli devono omaggiare la loro correttezza e visionaria validità.

La Chimica progredirà velocemente, con la sintesi di coloranti, fertilizzanti, composti di utilità industriale ed i primi polimeri, ma manca una visione d'insieme delle leggi matematiche che la governano. Nel 1868 il russo Mendeleev riunisce le informazioni note dei 63 elementi naturali conosciuti e nota delle ricorsività: pone i "cicli" come righe di una tabella, nota delle lacune e, tra lo scetticismo dei colleghi, prevede l'esistenza di tre elementi ancora sconosciuti ed aventi le caratteristiche indicate dalle celle vuote nella sua tabella. I tre elementi (scandio, gallio e germanio) verranno effettivamente scoperti nei 15 anni successivi, e quasi esattamente con le caratteristiche previste da Mendeleev. Era nata la Tavola Periodica degli Elementi: un modello con capacità descrittive e predittive, anche se matematicamente molto povero, e soprattutto

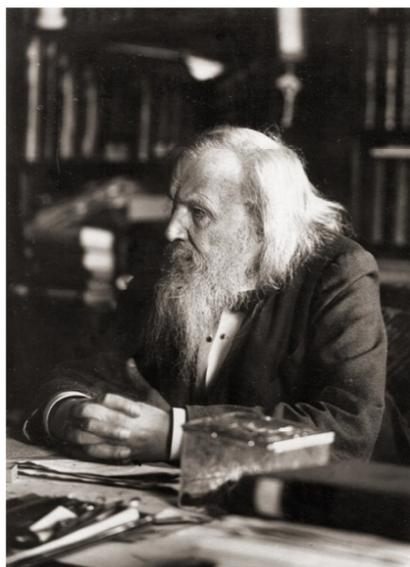


Figura 18: Dmitrij Mendeleev in una foto del 1897, a 63 anni.

ignaro del perché funzioni, ossia delle leggi che ne sottendono la validità.

Nel frattempo anche la "battaglia" tra le teorie corpuscolare ed ondulatoria sviluppate per descrivere la

luce evolve: se le leggi della Dinamica e della Gravitazione Universale hanno elevato Newton all'empireo delle scienze, la sua teoria corpuscolare della luce non gode di altrettanta fortuna. Se la teoria corpuscolare rende ben conto di fenomeni come la rettilineità dei raggi luminosi (traiettorie di corpuscoli) e riflessione (urti elastici di corpuscoli su superfici), la diffrazione (scoperta da Grimaldi nel 1665) e l'interferenza sono meglio descritte dalle teorie ondulatorie, ricavate a partire da quella formulata da Huygens nel 1678. Intanto, nel 1675, il danese Rømer scopre che la luce non si propaga istantaneamente, ma ha una velocità finita, benché elevatissima, che lui stima in circa 210.800 km/s, non lontanissima dai 299.792 km/s oggi noti. Bisogna aspettare il 1801 affinché Thomas Young dimostri, con i famosi esperimenti della doppia fenditura e con il consistente lavoro matematico di supporto, che la

teoria ondulatoria è vincente nella interpretazione di molti fenomeni luminosi, segnando una vittoria (temporanea) per l'interpretazione ondulatoria.

Nel frattempo anche i lavori su elettricità e magnetismo arrivano a formulazioni degne della scienza; si costruiscono pile e si generano correnti, si scopre che il movimento di magneti genera correnti e che la variazione di corrente in circuiti induce campi magnetici. Volta nel 1778 introduce il concetto di "tensione elettrica" (oggi "differenza di potenziale"), nel 1780 inventa il condensatore e nel 1800 la pila. Nel 1820 Ampère divulga un saggio sulle interazioni tra corrente elettrica e magnetismo, mentre nel 1831 Faraday compie esperimenti fondamentali sull'induzione elettromagnetica e, pochi anni dopo, Weber e Gauss lavorano sul magnetismo. Tutti questi progressi troveranno un adeguato inquadramento matematico con la meravigliosa sintesi operata dal fisico e matematico scozzese James Clerk Maxwell, che nell'articolo "Una Teoria Dinamica dei Campi Elettromagnetici", pubblicato nel 1865, riassume armonicamente secoli di progressi. Il suo monumentale "Trattato su Elettricità e Magnetismo" (1873) avrà effetti dirompenti sulla società in tempi ridottissimi, ma soprattutto unirà elegantemente elettrostatica, elettrodinamica, magnetismo ed onde elettromagnetiche, introducendo il concetto di "campo", che avrà un ruolo fondamentale nei successivi sviluppi delle scienze. Scopre che i campi elettrico e magnetico sono due aspetti della stessa cosa, sono generati da cariche elettriche e si muovono alla velocità della luce, il che implica che la luce altro non sia che una parte di quelle onde elettromagnetiche tramite le quali avviene la propagazione di tali campi. Le 4 equazioni di Maxwell divengono <<le parole usate da Dio per creare la luce ... e non solo!>>: elettricità, corrente, magnetismo, luce e tutte le onde elettromagnetiche che verranno scoperte in futuro (raggi X, gamma, onde radio, infrarossi, ecc.), sono tutte descritte da questa meravigliosa sintesi!



Figura 17: John Dalton ritratto da J. W. Allen negli anni '30 dell'800.

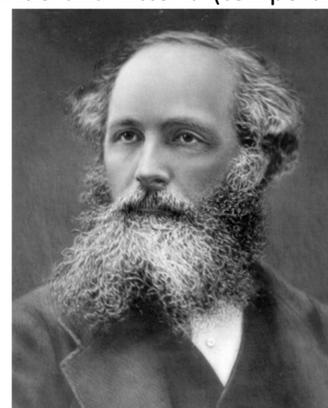


Figura 19: J. C. Maxwell fotografato nel 1879, pochi mesi prima di morire a 48 anni.

Forma locale	Forma globale
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_{\partial V} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV$
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_{\partial V} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$
$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$

Figura 20: le 4 Equazioni Maxwell, in forma differenziale ed integrale.

Newton in poi, sono riassumibili in equazioni. Al Creatore non resta affidato che il compito di aver impresso all'Universo il "primo moto", di averlo avviato, ma poi questo procede sicuro, governato da regole meccanicistiche, come un immenso orologio. Note le regole e le condizioni iniziali, niente indeterminazione, niente arbitrio, solo il determinismo, ben riassunto da Laplace già nel 1814.

Ai congressi scientifici di fine '800 molti scienziati ritengono che ormai non vi siano da scoprire che cose marginali, o aumentare di qualche decimale la precisione con cui sono note le più importanti costanti naturali (la velocità della luce, la costante gravitazionale "G", gli "ε<sub>0</sub>" e "μ<sub>0</sub>" delle equazioni di Maxwell, ecc.)!

Ma il meraviglioso costruito e le incrollabili certezze stavano per essere spazzate via dalla più inattesa e profonda rivoluzione della storia della scienza. La concezione meccanicistica della Natura aveva ancora qualche tassello mancante, qualche minuscola crepa, investigando le quali non si rinforzò la costruzione, ma si posero le basi per il suo (distruttivo) superamento. Diamo un'occhiata a queste "crepe".

La fisica e la chimica non erano le uniche branche della scienza ad evolversi: nel 1858 Snider-Pellegrini propose per primo l'antica unione di Americhe con Africa ed Europa, a seguito di accurati rilievi paleontologici e geologici sulle contrapposte coste atlantiche (proponendo però come causa il biblico "diluvio universale"), mentre nel 1859 Darwin pubblica i risultati di oltre vent'anni di scrupolose osservazioni nel rivoluzionario libro "L'Origine delle Specie", nel quale propone l'evoluzione delle specie, con la conseguenza di antenati comuni tra esseri umani e primati superiori. Queste osservazioni trovano l'opposizione dei fisici e degli ingegneri, in primis (in una nota dissertazione del 1862) di uno dei massimi esponenti della termodinamica, quel William Thomson divenuto Lord Kelvin per la rivoluzionaria importanza delle sue scoperte: accurati calcoli su qualsiasi ipotesi di come il Sole generi calore (contrazione gravitazionale, combustione, ecc.) in nessun caso portano a valori superiori ai 100 milioni di anni come limite per la sua esistenza, fornendo nella cifra di 20 milioni il dato più probabile per la sua età, così come

per la Terra, che i calcoli termodinamici facevano ritenere avesse un'età di circa 40 milioni di anni, mentre le prime stime sulla velocità di speciazione facevano ritenere necessarie parecchie centinaia di milioni di anni per arrivare all'attuale biodiversità, analogamente a quanto richiesto dalle mutazioni geologiche. Ciò a meno di non considerare forme di generazione di calore ignote e sfuggite fino ad allora alle attente indagini umane<sup>40</sup>.

Su di un altro fronte, nel 1887 i fisici americani Michelson e Morley, con un brillantissimo esperimento interferometrico, cercano di determinare la velocità della Terra rispetto all'etere luminifero: niente da fare... l'etere non

Lo studio e le applicazioni di queste leggi porta ai brevetti di Edison, Tesla e Ferraris, con la rapidissima diffusione dell'energia elettrica per l'illuminazione e la generazione di forza motrice: l'aspetto delle città e delle industrie cambia, rendendo entrambe più sicure.

Si entra nel pieno Positivismo della Seconda Rivoluzione Industriale e della fiducia cieca nella scienza e nel progresso tecnologico di fine '800. La Natura sembra rispondere a regole relativamente semplici, governata da formule che, dalle leggi del moto di Galileo e

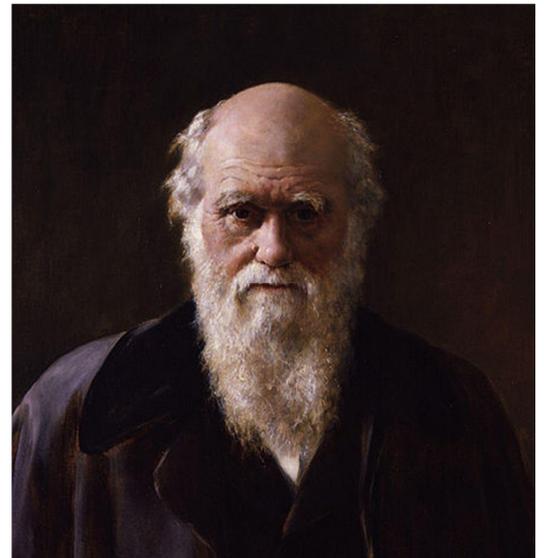


Figura 21: Charles Darwin ritratto da John Collier nel 1881, a 72 anni, un anno prima della morte.

<sup>40</sup> Tale ipotesi, ridicolizzata allora e considerata assurda, era in realtà corretta: il calore in eccesso della Terra deriva dal decadimento radioattivo dei radioisotopi nel suo nucleo, mentre il Sole genera calore grazie alla fusione nucleare, entrambi fenomeni allora ignoti e spiegabili solo successivamente con la Meccanica Quantistica. La frattura della Pangea, dalla quale si sono originati gli odierni continenti, ha avuto inizio circa 180 milioni di anni fa, mentre l'ampia differenziazione della vita multicellulare ha avuto inizio con la "Esplosione del Cambriano", circa 540 milioni di anni fa. Benché fisica ed astronomia fossero molto più avanzate e strutturate, biologi e geologi avevano ragione. La cocciuta intransigenza dei colleghi rallentò la penetrazione e l'accettazione delle rivoluzionarie idee (peraltro già osteggiate dai principi teologici della creazione e dal senso comune sull'unicità della specie umana e sulla "terraferma"), contribuendo per oltre mezzo secolo al rallentamento della loro diffusione. Oggi sappiamo che la Terra ha circa 4.560 milioni di anni.

c'è! Ma allora, attraverso cosa si propagano la luce delle stelle e la forza di gravità che lega pianeti, stelle ed intere galassie?

Sempre nel 1887 Hertz investiga più approfonditamente l'effetto fotoelettrico, ossia la scarica di conduttori elettrizzati stimolata da scintille elettriche avvenute nelle vicinanze (scoperta casualmente da Schuster pochi anni prima): la teoria ondulatoria fornisce la previsione per la quale più intensa è la luce, più l'effetto dovrebbe aumentare in numero ed in velocità delle "particelle emesse", indipendentemente dalla frequenza della luce, invece gli esperimenti evidenziano che solo per certe alte frequenze (con una soglia che cambia da un materiale all'altro) l'effetto ha luogo, e che l'incremento di intensità (superata la soglia in frequenza) aumenta la quantità di eventi, ma non la loro energia specifica, che invece dipende ancora una volta dalla frequenza della luce incidente. Strano! Da quando Newton aveva scisso la luce bianca nell'arcobaleno (più correttamente, nello spettro di radiazione elettromagnetica di diverse frequenze, cioè, nella banda del visibile, di diversi colori) con un prisma, si erano accumulate le prove dell'esistenza di righe "nere" dovute all'assorbimento causato a determinate frequenze dall'attraversamento di certi materiali; cambiando materiali cambiava la posizione delle righe; questi fenomeni erano inspiegabili.



Figura 22: Righe di assorbimento in uno spettro di emissione.

Già dal 1860 erano stati evidenziati fenomeni di strane fluorescenze quando alcuni materiali venivano sottoposti ad intensi campi elettrici; inizialmente si pensa a qualche particolare comportamento di alcuni materiali in relazione alla radiazione elettromagnetica, che quindi emettono una qualche forma di radiazione in determinate condizioni, ma poi ci si accorge che il tipo di radiazione ha sempre le stesse caratteristiche, pensando quindi a nuove forme di onde di radiazione, finché raffinati esperimenti dell'inglese J. J. Thomson nel 1896 determinano che questi "raggi catodici" sono in realtà composti da corpuscoli, che hanno sempre le stesse caratteristiche indipendentemente dal materiale da cui si originano, e che erano circa 2.000 volte meno massicci di quello che si ritiene essere il più leggero degli atomi, l'idrogeno (sempre che gli atomi esistano davvero, cosa della quale ancora si dibatte).

Sempre nel 1896 Becquerel scopre il primo fenomeno radioattivo: sali di Uranio chiusi in un cassetto con una lastra fotografica, la impressionano; emettono dunque energia senza essere più caldi, né raffreddandosi nell'emetterla. Tale fenomeno, benché comprovato da altri scienziati, rimaneva inspiegabile con le affermate e venerate leggi della fisica classica.

Infine, a inizio 1900, Lord Rayleigh evidenzia un limite nell'applicazione alla termodinamica delle equazioni del campo elettromagnetico: nel descrivere la "radiazione di corpo nero" (ossia, semplificando, il calore emesso da un oggetto caldo) i contributi della radiazione a corte lunghezze d'onda (cioè alte energie) forniscono valori divergenti che fanno rapidamente "esplodere" la quantità di calore emesso a valori infiniti, in ovvia contrapposizione con qualsiasi rilievo sperimentale.

Questo paradosso diviene noto come "catastrofe ultravioletta" e tiene per alcuni mesi col fiato sospeso la comunità scientifica internazionale (al tempo, poche migliaia di addetti a livello mondiale), fino al Dicembre dello stesso anno, quando, ad un congresso in Germania, un diligente accademico tedesco 42-enne, Max Planck, propone una soluzione matematica, un "artificio" per risolvere il problema: Planck impone una relazione tra l'energia di una radiazione elettromagnetica e la sua frequenza ( $E = h\nu$ )<sup>41</sup>, "come se" la luce venisse emessa in "pacchettini" minimi, che dipendono dalla frequenza. Poiché nella teoria della radiazione del corpo nero vi è una distribuzione equilibrata sulle varie frequenze, quando la "quota" per una certa frequenza è inferiore al pacchetto minimo per quella frequenza, il contributo non può avere luogo, si azzerà, e la catastrofe ultravioletta non avviene<sup>42</sup>.

Gli applausi per la brillante intuizione matematica coprono l'assordante silenzio sulle sue implicazioni scientifiche e filosofiche: cosa significa che la radiazione elettromagnetica (ormai concepita come rigorosamente ondulatoria, per le meravigliose ed efficacissime equazioni di Maxwell) viene emessa in "pacchettini"?

Vi è un'ultima incongruenza soggiacente alle grandi teorie scientifiche consolidate di allora, più subdola in quanto teorica: il principio di relatività galileiana dei moti e le leggi di Newton sulla gravitazione prevedevano una diffusione "istantanea" delle forze e dei loro effetti, mentre nelle equazioni di Maxwell per il campo elettromagnetico vi era un limite invalicabile costituito dalla velocità della luce. Come possono conciliarsi questi due aspetti in una visione armonica delle leggi naturali?

$$I(\nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Figura 23: equazione di Planck per l'emittanza specifica.

<sup>41</sup> "E" è l'energia, "ν" la frequenza, "h" una costante di proporzionalità, in seguito denominata "costante di Planck", il cui minuscolo valore ( $6,626... \cdot 10^{-34}$  J·s) ne ha celato gli effetti fino all'età contemporanea.

<sup>42</sup> Planck descrive con una formula la "emittanza spettrale" "I(ν)", cioè l'intensità dell'emissione ad una certa frequenza "ν", per unità di superficie e nell'unità di tempo, in funzione della stessa frequenza "ν" e della temperatura assoluta "T" del corpo radiante, col supporto di costanti universali quali la velocità della luce "c", di Planck "h" e di Boltzmann "k".

Il tedesco Voigt nel 1887 e l'irlandese Larmor nel 1897 hanno impostato delle equazioni per affrontare il problema; negli anni successivi importanti contributi vengono dal matematico francese Poincaré, fino all'armonica sintesi operata dall'olandese Lorentz nel 1904, che, con le "trasformazioni" che ora portano il suo nome, introduce le trasformazioni lineari di coordinate che permettono di descrivere come varia la misura del tempo e dello spazio tra due sistemi di riferimento inerziali, cioè sistemi in cui l'oggetto della misura è in moto rettilineo uniforme rispetto all'osservatore.

Tutti gli ingredienti sono sul piatto, ma le poche migliaia di laureati in discipline scientifiche, tra le quali poche centinaia di ricercatori a livello mondiale, non riescono a trovare il bandolo della matassa; forse accecati dagli indubbi successi della fisica classica di Galileo, Newton e Maxwell, forse influenzati dal conservatorismo degli ambienti accademici, ancora dominati da chi ha contribuito a scriverne le regole, non riescono a concepire la necessaria visione d'insieme, semplicemente perché troppo rivoluzionaria per quegli ambienti e quelle menti. Servirebbero un punto di vista esterno, una mente superbamente brillante ed uno studioso aggiornato su tutti i più avanzati settori della ricerca, ma che non ne faccia parte. Fortunatamente, il più grande genio della storia dell'umanità stava lavorando all'Ufficio Brevetti di Berna, dove doveva tenersi aggiornato sui progressi scientifici richiamati dai brevetti che doveva analizzare, e dove godeva anche di un po' di tempo libero. Laureatosi a 21 anni in "Matematica e Fisica" al Politecnico di Zurigo, Albert Einstein fin da adolescente voleva capire cosa si sarebbe visto "cavalcando un raggio di luce", e, mentre lavorava, stava portando avanti anche il Dottorato di Ricerca in Fisica, una relazione con l'unica ragazza iscritta al Politecnico (la fisica serba Mileva Marič), ed un circolo ("Accademia Olimpia"), nel quale si trovava a discutere delle tematiche di frontiera di scienza e filosofia con la stessa Marič e gli amici più intimi: il matematico italiano Michele Besso, il matematico tedesco Habicht ed il filosofo e matematico rumeno Solovine, il matematico svizzero Grossmann. Queste fruttuose discussioni, unite al lavoro di dottorato, agli approfondimenti imposti dal lavoro, alla sua insaziabile curiosità ed alla sua mentalità scevra da preconcetti (ebreo tedesco non praticante, con adolescenza spesa tra Italia e Svizzera), creano i presupposti per la rivoluzione, facendolo divenire l'uomo giusto al posto giusto, quando, nel Marzo 1905, appena compiuti i 26 anni, entra nel suo "annus mirabilis" grazie alla pubblicazione di un suo articolo sul prestigiosissimo "Annalen der Physik": in "*Un punto di vista euristico sulla produzione e trasformazione della luce*" Einstein propone una semplice e brillante interpretazione dell'effetto fotoelettrico, nel quale i "pacchettini" di luce usati pochi anni prima da Planck per risolvere la catastrofe ultravioletta colpiscono una superficie metallica e solo se hanno una certa energia (quindi maggiore di una certa frequenza) riescono a rompere il legame che vincola i "corpuscoli" al metallo; l'intensità della luce è proporzionale al numero di pacchettini che arrivano, che strapperanno più corpuscoli, mentre l'energia di questi ultimi dipenderà dall'energia in eccesso del "pacchettino di luce" rispetto a quanto serve per strappare il corpuscolo dal metallo. È la descrizione di un urto tra corpi; tutte le evidenze sperimentali sono brillantemente spiegate, per tutti i materiali, ma la conseguenza è che, se anche la luce ha proprietà ondulatorie (come dimostrato dai successi delle applicazioni che hanno visto coinvolto l'elettromagnetismo di Maxwell), ne ha ANCHE di corpuscolari, ossia, in certi casi, la luce si comporta come composta da particelle!

Apri il cielo! Scoperchiato il vaso di Pandora!

La comunità scientifica è ancora frastornata dai risultati pubblicati da questo sconosciuto fisico, che questi, alla discussione della Tesi di Dottorato, il mese successivo, mette la lapide sulla disputa circa l'esistenza degli atomi, col lavoro "*Nuova determinazione delle dimensioni molecolari*".

Ho appositamente trascurato l'evoluzione delle teorie atomiche per qualche pagina, per presentarne una sintesi ora, alla sua soluzione. Benché i chimici, da Dalton in poi, considerassero gli atomi come "strumento di lavoro" per le loro reazioni, il dibattito fisico e filosofico sulla loro reale esistenza era rimasto aperto per tutto il XIX secolo. Maxwell (lo stesso dell'elettromagnetismo) aveva compiuto avanzati calcoli sulla teoria cinetica dei gas, poi ripresi ed approfonditi nel monumentale lavoro di Ludwig Boltzmann, che era riuscito a correlare l'entropia (il degrado della qualità energetica di un sistema) al disordine di sistemi con miliardi di miliardi di miliardi di particelle, cioè alla probabilità dei vari stati, con calcoli talmente arditi e complessi da rimanere incomprensibili anche alla maggior parte degli addetti ai lavori, tanto



Figura 24: Einstein nel 1905, a 26 anni, nell'annus mirabilis.

che era ancora forte, se non maggioritario, il “partito” di chi sosteneva che i rapporti di combinazione chimica tra gli elementi dipendessero da caratteristiche della materia, non dalla sua reale costituzione in elementi indivisibili. D'altra parte, già nel 1785 il botanico olandese Ingenhousz aveva notato al microscopio lo strano moto incessante di pollini e microparticelle disperse in un liquido, fenomeno poi descritto ed approfondito dal botanico inglese Brown nel 1827. Solo nel 1885 Loschmidt, con considerazioni matematiche fatte a partire dai calcoli teorici di Maxwell e Boltzmann, determina che le molecole di acqua, se esistono, devono avere dimensioni inferiori a  $10^{-9}$  m, ponendole al di fuori del campo di osservabilità utilizzando la luce<sup>43</sup>.

$$h(v_z) = \left( \frac{m}{2\pi T} \right)^{1/2} e^{-mv_z^2/2T}$$

Figura 25: la distribuzione di Maxwell-Boltzmann nel caso semplificato di moto monodimensionale lungo il solo asse "z".

Nella sua tesi (e nell'articolo pubblicato il mese successivo: *“Il moto di piccole particelle sospese in liquidi in quiete, secondo la teoria cinetico-molecolare del calore”*) Einstein applica magistralmente i lavori di Boltzmann al moto di queste particelle, incessantemente colpite da qualcosa di invisibile che le sposta e ne cambia sistematicamente la traiettoria: applicando le dispersioni statistiche a direzione e velocità dei “proiettili” invisibili, Einstein ritrova mirabilmente i valori raccolti dagli esperimenti; gli atomi e le molecole esistono, e sono loro a colpire le microparticelle in sospensione!

Ignaro del lavoro di Einstein, che sancisce il trionfo della sua visione, isolato e depresso per lo scarso apprezzamento ottenuto dalla comunità internazionale, nel 1906 Boltzmann si suiciderà a Trieste. La distribuzione statistica che descrive la velocità di particelle ad una certa temperatura è oggi detta “di Maxwell-Boltzmann”, e la costante universale che lega disordine molecolare ed entropia è la costante di Boltzmann, mentre il moto delle particelle in sospensione è detto “moto browniano”. Ad Einstein resta l'onore della sintesi.

Ma Einstein non si ferma, e a Giugno scrive la Storia: il suo articolo *“Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento”* sconvolge i concetti di moto, contemporaneità degli eventi, punti di vista di osservatori diversi! Pietra miliare della rivoluzione successivamente nominata **Teoria della Relatività Ristretta**, questo articolo parte dal presupposto che tempo e spazio non sono assoluti, ma che l'unica cosa sicura è la velocità della luce, e che questa non si può superare!

Le conseguenze sono devastanti: osservatori in moto relativo uniforme ad alta velocità effettueranno misure diverse delle lunghezze, dello scorrere del tempo, della contemporaneità degli eventi!

Se un'astronave che mi viene incontro ad alta velocità mi lancia un segnale luminoso, sia il suo equipaggio che io lo vedremo viaggiare alla velocità della luce: crolla la classica composizione delle velocità nei moti relativi, e con essa ciò che la definisce, cioè lunghezza e tempo!

Con una superba sintesi delle equazioni di Maxwell e delle trasformate di Lorentz, Einstein riesce a generalizzare ed estendere le leggi della dinamica scritte da Newton, pur ritrovandone gli stessi risultati quando le velocità relative sono piccole rispetto a quelle della luce.

A Settembre arriva una memoria, una breve postilla di 3 paginette: in *“L'inerzia di un corpo dipende dal contenuto di energia?”* Einstein ricava la celeberrima formula  $E = m \cdot c^2$ , icona scientifica per eccellenza. Il contenuto è tanto semplice quanto dirompente: massa ed energia sono due facce della stessa medaglia, e l'una è convertibile nell'altra e viceversa, seppur con un enorme rapporto di  $9 \cdot 10^{16}$ , valore che ha impedito di rilevarne prima gli effetti. Le leggi di conservazione della massa e dell'energia sono cancellate, o almeno riscritte.

Intanto nel 1904 il citato J. J. Thomson ed il giapponese Nagaoka avevano indipendentemente proposto delle sottostrutture per l'atomo: per spiegare l'emissione di raggi catodici in alcuni dei fenomeni precedentemente descritti, avevano ipotizzato la compresenza di particelle cariche negativamente e positivamente all'interno dell'atomo, proponendo il primo un modello “a panettone” con particelle elettricamente negative sospese in una nuvola di carica positiva, mentre il secondo, con un modello “saturniano”, poneva le cariche negative su di un anello rotante intorno alle cariche positive, ammassate al centro. Curioso come, prima ancora che gli atomi venissero definitivamente confermati, si pensasse già alla loro suddivisione, cioè al superamento del loro significato intrinseco, per spiegare fenomeni altrimenti inspiegabili.

Nel 1909 Rutherford, Geiger e Marsden (due neozelandesi ed un tedesco impiegati in una prestigiosa università inglese) conducono una serie di esperimenti bombardando con atomi di elio ionizzato (alfaelioni) sottilissime lamine d'oro, ed i risultati sono sconcertanti: negli atomi il 99,97% della massa (cioè della materia che lo costituisce) è concentrato nello 0,000000000007% del volume al centro di esso!!!

Siamo fatti di vuoto! Noi, gli animali, le piante, le rocce, il ferro, la terra, ... qualunque cosa è fatta di vuoto! Ed al centro degli atomi si trova qualcosa con densità assurde, inimmaginabili.

<sup>43</sup> 1 nanometro (= 1nm =  $10^{-9}$  m) è un milionesimo di millimetro; oggetti di queste dimensioni non sono visibili se illuminate dalla normale luce visibile, in quanto inferiori alla sua lunghezza d'onda, che varia dai circa 700 nm della luce rossa ai 400 nm del violetto. Si scoprirà che la molecola d'acqua misura circa 0,2 nm.

Rutherford propone allora un modello atomico planetario, con le cariche positive e la massa compattate in un nucleo estremamente concentrato, al centro dell'atomo, e gli elettroni dispersi intorno che, ruotando a gran velocità, costituiscono l'illusione della pienezza della materia.

Ma questo modello pone più domande di quante risposte fornisca!

Perché le cariche positive (che si respingono) non schizzano fuori dal nucleo? Quale incommensurabile forza le trattiene lì?

Come mai le cariche negative non collassano sulle cariche positive presenti nel nucleo, che le attirano?

Era già stato notato che cariche elettriche che si muovono dentro un campo magnetico emettono radiazione<sup>44</sup>, perdendo energia e rallentando di conseguenza; come mai le cariche negative che corrono vertiginosamente intorno al nucleo non emettono radiazione?

La palla passa agli sperimentali. Se già nel 1891 G. J. Stoney aveva proposto il nome "elettrone" per l'eventuale "unità minima" di carica, e nel 1897 J. J. Thomson aveva misurato il rapporto tra carica e massa delle particelle che formavano le emissioni catodiche, solo nel 1909 un arditissimo ed estremamente raffinato esperimento di Robert Millikan riesce a calcolare la carica elettrica unitaria, nota la quale si può ricavare anche la massa: i rispettivi valori di  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C e  $9,109 \cdot 10^{-31}$  kg sono talmente minuscoli da suscitare incredulità.

Ancora una volta serve qualcuno che "tiri le somme": nel 1911 un brillante fisico danese, Niels Bohr, propone un modello atomico per l'atomo di idrogeno che è quasi "magicamente" in grado di risolvere la maggior parte dei quesiti aperti. Per farlo ipotizza che gli elettroni negativi stiano intorno al nucleo su orbite stabili "quantizzate", aventi determinati diametri, che gli altri diametri siano interdetti agli elettroni e che, su tali orbite, gli elettroni possano stare senza perdere energia<sup>45</sup>. L'energia della ionizzazione dell'idrogeno è ritrovata, mentre quando i "pacchetti di luce" di Planck ed Einstein urtano un elettrone dell'atomo, questo può assorbirne l'energia e spostarsi su una delle altre orbite consentite. Questo assorbimento può quindi solo avvenire a determinate energie<sup>46</sup> (la differenza tra i livelli energetici di due orbite diverse), che (miracolo) sono esattamente le righe nere presenti nello spettro di assorbimento dell'idrogeno!

La "Fisica Quantistica" sembra l'unica strada per trovare modelli matematici che interpretino i fenomeni fisici del "micromondo", ma ancora non si capisce né come, né perché.

Lo scoppio della Prima Guerra Mondiale limita i fruttuosi scambi ed incontri di scienziati in un periodo di fibrillazione intellettuale, distogliendo anche molti giovani dalla ricerca per riposizionarli nelle trincee.

Nel generale rallentamento, ancora una volta è Einstein a spiccare il volo, dischiudendo nuove frontiere della conoscenza: ottenuto il Dottorato nel 1906, nel 1908 lascia l'Ufficio Brevetti per iniziare ad insegnare all'Università di Berna; nel 1911 gli viene offerta la cattedra di fisica all'Università di Praga, mentre nel 1914 è lo stesso Planck ad offrirgli la stessa cattedra, alla prestigiosa Università di Berlino. In una serie di articoli, culminati nel 1909 in "*Sullo sviluppo delle nostre opinioni sulla natura e la costituzione delle radiazioni*", Einstein riordina quanto emerso dai modelli di quantizzazione della luce, introduce il concetto di "fotone" (seppur con diversa denominazione<sup>47</sup>) ed ispira la nozione di "dualità onda-particella", che si rivelerà fondamentale per la nascente Meccanica Quantistica. Ma Einstein già da un paio d'anni è assorbito sempre più dal tarlo della generalizzazione della Relatività: ciò che ha sviluppato per i sistemi inerziali, è generalizzabile a quelli accelerati?

Nel 1907 un imbianchino di Berna cade da un'impalcatura, ma sopravvive; nella narrazione dell'evento dice di "aver provato una strana sensazione durante la caduta, di essersi sentito privo di peso"!

Il racconto ha per Einstein l'effetto della mela per Newton: gli appare evidente che un campo gravitazionale è indistinguibile da un moto uniformemente accelerato generalizzato<sup>48</sup>; la generalizzazione della relatività dei moti,



Figura 26: Bohr nel 1922, a 37 anni, al ritiro del Premio Nobel per la Fisica.

<sup>44</sup> Emettono radiazione elettromagnetica, nota come "Radiazione di Sincrotrone"; elettroni e positroni che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce e vengono incurvati in acceleratori di particelle di qualche decina o centinaio di metri di diametro solitamente hanno picco di emissione nella banda dei Raggi X.

<sup>45</sup> Tecnicamente, il postulato afferma che "il valore del momento angolare dell'elettrone orbitante deve essere multiplo della costante di Planck".

<sup>46</sup> Tecnicamente, il postulato afferma che "un atomo, nel cambiare stato di eccitazione, scambia quantità di energia sotto forma di un'unica particella di radiazione di Einstein".

<sup>47</sup> Sarà Gilbert Lewis nel 1926 a coniare il termine "fotone".

<sup>48</sup> "Principio di Equivalenza".

per includere quelli accelerati, deve comprendere anche e soprattutto l'altra pietra miliare della fisica newtoniana, la legge di gravitazione universale.

La complessità matematica appare da subito insormontabile, ogni passaggio è di una complicazione inaudita. Per mesi Einstein teme che la matematica che gli serve non esista. Per superare alcuni ostacoli analitici deve appoggiarsi al suo amico Grossmann, nel frattempo divenuto Professore di Matematica presso il Politecnico di Zurigo e (per fortuna di Einstein) specializzatosi in geometrie non euclidee<sup>49</sup>. Einstein viene introdotto alle più avanzate tecniche di calcolo tensoriale (recentemente sviluppato dalla scuola italiana di Eugenio Beltrami e, soprattutto, Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi-Civita, consiste in calcolo differenziale assoluto con coordinate, successivamente elaborato in termini geometrici con l'introduzione della derivazione covariante), necessario per calcolare la deformazione della metrica che descrive lo spazio in presenza di masse.

Nel 1913 Grossmann ed Einstein pubblicano un articolo che esplicita la geometria necessaria per studiare il fenomeno; Einstein resta poi isolato a Berlino dalla Grande Guerra, da solo, nel tentativo di arrivare alla formulazione definitiva della teoria. Sono mesi di lavoro durissimo, nei quali, per mantenere la concentrazione che gli serve per proseguire, Einstein dimentica di nutrirsi e riposare, arrivando più volte alle soglie dello svenimento. Finalmente, nel 1915, propone un'equazione di campo che descrive la gravità come curvatura dello spazio-tempo, coerente con la relativizzazione della forza di gravità e con la generalizzazione dei moti relativi in presenza di accelerazione; le conseguenze di questa visione sono apocalittiche: lo Spazio ed il Tempo assoluti di Newton scompaiono, l'etere non serve più, spazio e tempo sono due aspetti della stessa matrice di uno spaziotempo quadridimensionale; la materia dice allo spazio come curvarsi e la curvatura dello spazio dice alla materia come muoversi; la curvatura dello spaziotempo deflette la materia dalle sue traiettorie rettilinee, ponendola su geodetiche di minimo percorso; siccome massa ed energia sono la stessa cosa, anche i raggi luminosi sono deflessi dalle masse che incurvano lo spazio; la presenza di masse influisce sullo scorrere del tempo!

Nei mesi successivi in molti si cimentano nella ricerca di soluzioni particolari delle equazioni di campo einsteiniane; il primo a trovarne una è il fisico tedesco Karl Schwarzschild, risolvendo il caso dei corpi massicci a simmetria sferica: lo scienziato dimostra che in certi casi neppure la luce può sfuggire dallo spazio incurvato, inoltre verifica che le orbite della nuova teoria non sono le ellissi newtoniane, ma delle "rosette" che tengono naturalmente conto della precessione del perielio; tra l'altro, la precessione secolare del perielio di Mercurio, calcolato con metodi variazionali nel secolo precedente in  $1^{\circ}32'37''$ , risulta con la nuova teoria essere di  $1^{\circ}33'20''$ , in ottimo accordo con i rilievi sperimentali!

Questo è un grande successo per la **Teoria Generale della Relatività**, definitivamente consacrata quando Arthur Eddington nel 1919, durante un'eclisse di Sole, rileva effettivamente una variazione della posizione delle stelle del fondo cielo in prossimità del Sole: la massa del Sole incurva lo spaziotempo, che deflette i raggi luminosi facendo apparire spostate le stelle distanti. Einstein diventa una star mondiale ed il paradigma del genio.

Il russo Fridman ed il belga Lemaître forniscono nuove soluzioni di casi particolari delle equazioni di Einstein, dalle quali emerge che l'universo dovrebbe collassare, richiudendosi in se stesso, sotto l'azione della gravità. Einstein, pur avendo scardinato i concetti primordiali di spazio e tempo, materia ed energia, non è pronto ad accettare che l'universo non sia stabilmente stazionario, quindi nel 1917 introduce un termine additivo nella sua formula, una "energia del vuoto" (dovuta verosimilmente a fluttuazioni quantistiche) che denomina "costante cosmologica" (indicata dalla lettera greca " $\Lambda$ ", lambda maiuscola). Quando nel 1929 Edwin Hubble scoprirà che in realtà l'universo è in veloce espansione (è che quindi proviene da un inizio estremamente caldo e denso, a seguito del quale si è espanso, malgrado il rallentamento indotto dall'attrazione gravitazionale), Einstein descriverà la costante cosmologica come il suo più grande errore; non poteva sapere che la storia l'avrebbe richiamata dall'oblio 70 anni più tardi.

$$R_{ab} + g_{ab} \cdot \left( \Lambda - \frac{1}{2} R \right) = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{ab}$$

Figura 27: formulazione della Relatività Generale, nella forma con la costante cosmologica.

Ma gli effetti delle Relatività generale, per quanto concettualmente spettacolari, erano troppo lontani dal vissuto quotidiano e dalle esigenze tecniche del periodo; ormai le sfide di attualità riguardavano la nascente fisica quantistica.

Una formulazione di **teorie di campo quantistiche e relativistiche** richiede matematiche che ancora non ci sono, ma un manipolo di matematici tedeschi dell'Università di Gottinga sta letteralmente creando gli spazi entro cui muoversi: con un lavoro pluridecennale l'ecclettico David Hilbert svi-

<sup>49</sup> Dal 300 a.C. la Geometria è quella "piana" (superfici a curvatura nulla) sviluppata a partire dai cinque postulati di Euclide. Nel 1867, a seguito della messa in discussione del 5° postulato (criticato da 2.000 anni), esce postumo un lavoro di Bernard Riemann nel quale si pongono le basi di una nuova geometria, costruita con un diverso 5° postulato, che implica la descrizione di superfici a curvatura positiva; contemporaneamente Eugenio Beltrami, con un 5° postulato ancora differente, pone le basi di una geometria con superfici a curvatura negativa, studiata indipendentemente anche da Bolyai, Gauss e Lobacevskij.

luppa l'analisi funzionale armonica e formula degli spazi euclidei generalizzati che ne conservano le proprietà anche in spazi di funzione infinito-dimensionali (che nel 1929 von Neumann chiamerà "Spazi di Hilbert").

Nel 1915 Emmy Noether (che lavorerà per 20 anni non pagata, in quanto donna, nelle Università tedesche, fornendo contributi fondamentali allo sviluppo della matematica e della scienza) dimostra che le leggi di conservazione delle grandezze fisiche (come energia, quantità di moto, momento angolare della quantità di moto, carica, ecc.) sono manifestazioni delle simmetrie fondamentali della natura (cioè applicazione di trasformazioni continue, come l'omogeneità ed anisotropia dell'universo, ecc.).



Figura 29: Emmy Noether (1882-1935).

È poi Hermann Weyl, dal 1918, a fornire strumenti sempre più potenti per investigare l'infinitamente piccolo ("Simmetrie di Gauge" e "Gruppi di Lie").

È in questo stimolante contesto che il francese Louis de Broglie nel 1924 pone le basi della universalità del dualismo onda-particella: non solo i quanti di luce, ma anche le particelle solitamente intese come corpuscolari devono manifestare proprietà ondulatorie, con lunghezza d'onda proporzionale al rapporto tra la costante di Planck e la quantità di moto della particella<sup>50</sup>.

Nel biennio 1925-'26 Werner Heisenberg pubblica alcuni lavori (in parte con Max Born e Pascual Jordan come coautori) nei quali pone le basi dello studio della fisica quantistica tramite un'innovativa Meccanica delle Matrici, nella quale sostituisce le orbite classiche con una serie ordinata di enti di una matrice e in seconda battuta applica il principio di conservazione dell'energia; questa condizione gli permette di derivare le energie degli stati stazionari applicando la sua regola di moltiplicazione

per gli elementi di matrice alle corrispondenti espressioni classiche.

Sempre nel 1926 l'austriaco Erwin Schroedinger espone in più articoli il lavoro "La quantizzazione come problema agli autovalori", esplicitando la celeberrima equazione ai numeri complessi della funzione d'onda, che gli dà immediata fama.

Nasce una profonda diatriba su quale delle due descrizioni, (quella matriciale e quella ondulatoria ai numeri complessi, apparentemente totalmente differenti) sia la più attinente al mondo quantistico.

Saranno lo svizzero-britannico Paul Dirac e l'ungherese-americano John von Neumann a dimostrare, già nel '27, che le due formulazioni sono perfettamente equivalenti.

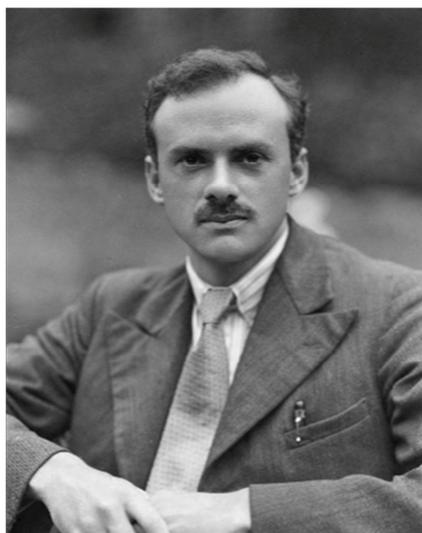


Figura 30: il genio timido e schivo Paul Dirac, nella trentina.

Ma entrambe le descrizioni sono non relativistiche, serve un'ulteriore sforzo: sarà ancora Dirac, in un delicato equilibrio tra genio e pazzia, a dare nel 1928 la prima descrizione relativistica della funzione d'onda. Nascono le "Teorie Quantistiche dei Campi"!

Tra le possibili soluzioni delle equazioni di Dirac ne emerge una che comprende delle particelle da fantascienza: un "antimondo" costituito da "antiatomi" con oggetti massicci e negativamente carichi al centro e particelle leggere che vi orbitano intorno, come gli elettroni, ma carichi positivamente; questi ultimi ipotetici "antielettroni" sono scherzosamente ribattezzati "positroni".

Dalla quantizzazione del campo elettromagnetico di Maxwell risulta che la radiazione si comporta come un insieme di particelle, i fotoni, in accordo con l'ipotesi dei quanti di luce formulata da Einstein nel 1905. Dopo questo esempio, le equazioni d'onda relativistiche sono studiate da un nuovo punto di vista: invece di interpretarle come funzioni d'onda, sono trattate con le regole di quantizzazione di un campo classico, ottenendo equazioni per particelle quantistiche che rispettano le leggi della relatività e sono consistenti.



Figura 28: David Hilbert ai tempi dell'insegnamento a Gottinga (1895-1929).

<sup>50</sup> A conferma di ciò, figure di interferenza saranno create nei decenni successivi in raffinati esperimenti con la doppia fenditura anche emettendo elettroni (anni '50), neutroni (anni '70), interi atomi (anni '80) ed addirittura molecole complesse come il fullerene (C<sub>60</sub>, anni '90).

Questo procedimento, conosciuto come seconda quantizzazione, viene ideato dai lavori di Heisenberg, Wolfgang Pauli, Vladimir Fock, Wendell Furry, Robert Oppenheimer e Victor Weisskopf tra il 1927 ed il 1932.

Sempre nel 1927 Heisenberg enuncia il famoso “**principio di indeterminazione**”, stabilendo dei limiti invalicabili alle possibilità di contemporanea misurazione (e quindi di conoscenza) di variabili fisiche “coniugate”<sup>51</sup>: è fisicamente impossibile conoscere contemporaneamente con precisione arbitraria la posizione e la quantità di moto di una particella, o il tempo e l’energia di un fenomeno. Esistono barriere invalicabili alla conoscenza!

Già ciò scuote il mondo della fisica, quando arriva la prima interpretazione “filosofica” (in senso lato) della meccanica quantistica (MQ): Max Born trova un senso ai numeri complessi presenti nelle equazioni d’onda di Schroedinger e Dirac: il quadrato dei valori della funzione è correlato alla probabilità che la particella rappresentata dall’onda compaia in un determinato punto dello spazio-tempo. Le basi della fisica delle particelle perdono il determinismo ed abbracciano la probabilità!

Bohr fonda la scuola di Copenaghen e vi chiama alcuni dei giovani scienziati più brillanti: con Heisenberg e Pauli amplia il lavoro di Born e pone le basi della “Interpretazione di Copenaghen” della MQ.

Einstein tuona <<Dio non gioca a dadi con l’Universo!>>, Bohr risponde <<Non dire a Dio come deve giocare!>>; è l’inizio di una profonda e proficua diatriba tra Einstein e Bohr, che per una quindicina d’anni non perderanno occasione di confrontarsi con incontri a latere di conferenze, lettere, viaggi, sostenendo il primo l’esistenza di “variabili nascoste”, sottese dalla MQ, che riporterebbero l’universo verso il determinismo newtoniano, il secondo la profondità e completezza della MQ nel descrivere le caratteristiche profonde di un mondo fisico intrinsecamente probabilistico. Va evidenziato che la riluttanza di Einstein nell’accettare le implicazioni della MQ trova le radici nella profonda comprensione che egli ne ha, tanto da avere ben chiaro che l’interpretazione di Copenaghen pone le basi per il superamento della località (premessa della Relatività) e, forse, persino della stessa realtà, ipotesi che Einstein, per quanto rivoluzionario, non riesce ad accettare a cuor leggero.

Ma la MQ non smette di sorprendere. Nel 1920 Satyendra Bose aveva applicato la statistica di Maxwell-Boltzmann ai pacchetti di luce di Planck ed Einstein, ed è lo stesso Einstein, nel 1924, ad estenderla a tutti gli atomi quantizzati. Sempre nel 1924 Paul Dirac ed Enrico Fermi hanno quantizzato la statistica di Maxwell-Boltzmann per le particelle.



Figura 31: Wolfgang Pauli, genio stakanovista, dinamico e sprezzante, fornì molteplici contributi alla Meccanica Quantistica, tutti di grande rilievo.

Ancora nel 1924 l’austro-svizzero Wolfgang Pauli nota stranezze nelle emissioni spettrali dei metalli alcalino-terrosi: è la scoperta dello “spin”, una proprietà quantistica delle particelle subatomiche che non ha equivalente nel mondo macroscopico (è assimilabile al momento angolare, ma senza implicare la rotazione della particella)! Poiché in ogni orbitale si trovano al massimo 2 elettroni, questi hanno spin opposto; da questo fatto Pauli deduce il “Principio di Esclusione” (al quale verrà poi dato il suo nome), per il quale due elettroni non possono condividere gli stessi numeri quantici. Nel 1925, indipendentemente, i tedeschi Ralph Kronig ed Alfred Landè e gli olandesi George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit, guidati da Paul Ehrenfest, pubblicano lavori nei quali presentano lo spin come auto-rotazione dell’elettrone. Inizialmente criticati da Pauli, che trova errori nei lavori, è con la revisione del britannico Llewellyn Thomas che i modelli divengono sostenibili e, ripresi dallo stesso Pauli, portano alle “matrici di Pauli” (praticamente, degli operatori di spin da applicare alla funzione d’onda), pubblicate nel 1927. Tale visione è ancora non-relativistica, ma, l’anno successivo, Dirac ricava la sua formula, già precedentemente menzionata, che non solo risolve i precedenti dissidi, ma contiene anche una trattazione relativistica dello spin. È la summa di quanto noto in MQ nel 1928.

Nel frattempo, nel 1927, Llewellyn Thomas ed Enrico Fermi, indipendentemente, allargano all’intero atomo con più elettroni il modello atomico dell’idrogeno di Bohr e Sommerfeld.

Solo dopo un decennio di lavoro lo svizzero Markus Fierz e lo stesso Pauli enunciano nel 1940 il “Teorema Spin-Statistica”, che dimostra come le particelle a spin semintero ( $\pm 1/2$ ,  $\pm 3/2$ ,  $\pm 5/2$ , ecc.) rispondono al Principio di Esclusione di Pauli, possiedono sempre massa, possono contribuire alla costituzione della materia ordinaria e rispondono alla statistica di Fermi-Dirac, quindi vengono nominate “**Fermioni**” in onore di Fermi. Al contrario, le particelle a spin intero (0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ , ecc.) non rispettano il Principio di Esclusione di Pauli, possono non possedere massa, non contribuiscono alla costituzione della materia ordinaria e rispondono alla statistica di Bose-Einstein, quindi sono dette “**Bosoni**”, in onore di Bose. Da subito le due statistiche si rivelano fondamentali nella compren-

<sup>51</sup> Sono “coniugati” due osservabili “A” e “B” rappresentati da matrici tra loro non commutanti, cioè:  $AxB-BxA \neq 0$ .

sione di molti fenomeni naturali, come la descrizione delle stelle “nane bianche” o lo studio dei semiconduttori, ponendo le basi per la nascita dell’elettronica.

Si stanno ponendo le basi del Modello Standard!

Se la fisica teorica sta facendo passi da gigante, quella sperimentale non sta certo a guardare: dopo i pionieristici lavori di Becquerel di fine ‘800, sono i suoi allievi (sposi) Pierre e Marie Curie a coniare il termine “radioattività” ed a dominare tale ambito di ricerca per un ventennio, trasmettendo poi la passione alla figlia Irène ed al genero Frédéric Joliot, conquistando complessivamente ben cinque Premi Nobel in famiglia. I coniugi Curie, tra il 1895 ed 1906 (anno della morte di Pierre) riescono a studiare la radioattività naturale e a scoprire nuovi elementi, più radioattivi dell’uranio, come il radio ed il polonio, fornendo utili informazioni a chi, in quel periodo, sta cercando di sviluppare un modello dell’atomo. Marie Curie nel 1906 diventa la prima donna ammessa ad insegnare alla Sorbona, ove rimane per un altro quarto di secolo. Tra il 1928 ed il 1934 i coniugi Joliot-Curie brillano invece nello studio della radioattività artificiale, riuscendo a trasmutare artificialmente elementi naturali, quali boro, alluminio e magnesio, ponendo le basi per le scoperte del positrone da parte di Carl Anderson e del neutrone da parte di James Chadwick, entrambe avvenute nel 1932. La sorprendente scoperta del positrone (ricordate ... il ridicolo “antielettrone”) fa da altisonante conferma alla formula di Dirac ed alla potenza predittiva dei modelli matematici che descrivono la MQ.

Quella del neutrone, invece, comincia a chiarire qualcosa di più sulla struttura interna dell’atomo: descritti (si fa per dire) gli orbitali, ove si trovano gli elettroni negativi, si intuisce che nel massiccio centro dell’atomo, detto **nucleo**, le controparti positive (protoni) sono intervallate da particelle elettricamente neutre (neutroni) trattenute le une alle altre da una forza più potente della pur potentissima interazione elettromagnetica. Su quale sia questa forza e su come descriverla è ancora notte fonda, ma è chiaro che le forze sono due: una, forte ed attrattiva, che tiene assieme il nucleo; l’altra, più debole, che causa il decadimento radioattivo degli isotopi con emissione di radiazione beta. Dopo i fenomeni gravitazionali e quelli elettromagnetici, i cui effetti sono stati percepiti fin dall’antichità, sono state scoperte due nuove forze: la **Forza Nucleare Forte** e la **Forza Nucleare Debole**.

Nel 1933 Fermi propone un primo modello per l’interazione debole, descritta come una forza di contatto a distanza nulla implicante l’interazione simultanea di 4 fermioni.

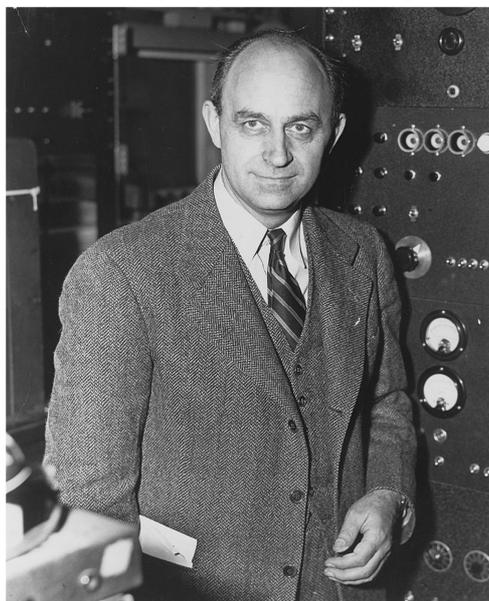


Figura 33: Enrico Fermi nel 1943, a 42 anni.

Fermi è un caso più unico che raro nella scienza moderna: è un geniale teorico con grande capacità di astrazione, è un valente sperimentatore meticoloso ed accorto, è un capace leader ed organizzatore! Laureato alla Normale di Pisa a 21 anni, dopo semestri di studio a Gottinga (da Max Born) ed a Leida (da Ehrenfest), riceve a 25 anni, nel 1926, la prima cattedra in Fisica Teorica istituita nelle Università italiane; nei primi anni ‘30 crea il gruppo di sperimentazione noto come “I ragazzi di via Panisperna”, con i fisici Segrè, Pontecorvo, Amaldi, Rasetti, Majorana e col chimico D’Agostino, che manda in stage all’istituto Curie di Parigi proprio mentre i Joliot-Curie stanno scoprendo la radioattività artificiale. Al suo ritorno applicano quanto appreso alle tecniche di termalizzazione dei neutroni (appena scoperti), con lo scopo di produrre neutroni lenti, più efficaci nel generare fissioni nei nuclei atomici più pesanti. Questa tecnica ed i risultati conseguiti varranno a Fermi il Nobel nel 1938, dopo il ritiro del quale Fermi si rifugerà negli USA per permettere alla moglie di non essere coinvolta nelle conseguenze delle leggi razziali appena emanate in Italia. Oltreoceano Fermi diventerà leader del gruppo che a Chicago realizzerà la prima reazione nucleare controllata nel 1942, per

entrare poi nel Progetto Manhattan a Los Alamos come “Direttore Tecnico” di uno dei gruppi di lavoro.

Intanto Einstein, travolto dal successo della MQ, continua a cercare crepe che ne rivelino la non completezza, ma lotta anche per ricavare una ToE, una “Teoria del Tutto” che comprenda tutte le forze note in una descrizione relativistica. Vi dedicherà, senza significativi progressi, gli ultimi 30 anni della propria esistenza. Nel 1935, però, fornisce un ultimo importante contributo alla MQ, scrivendo con Boris Podolsky e Nathan Rosen l’articolo che descrive il fenomeno che diverrà noto come “Paradosso EPR”. In un elaborato esperimento mentale, i tre dimostra-



Figura 32: 1904 - Marie Skłodowska Curie (37 anni), tra il marito Pierre (45), la figlia Irène (7) ed il suocero Eugène (77).

no che dall'interpretazione di Copenaghen della MQ deriva teoricamente il fenomeno dell'**entanglement**<sup>52</sup>, considerato paradossale perché ritenuto incompatibile con la relatività ristretta (che considera la velocità della luce la massima alla quale può viaggiare qualunque tipo d'informazione) e, più in generale, con il principio di località<sup>53</sup>. La perdita di località può implicare la perdita di significatività delle leggi fisiche, da cui il paradosso.

La strada che porta al Modello Standard si articola ora su binari paralleli, che riguardano la descrizione delle due forze nucleari, la caccia all'entanglement, la descrizione cosmologica dell'universo e la convergenza di queste strade in un'unica descrizione completa e profonda della realtà. Per non saltare di pane in frasca, su argomenti così complessi, preferisco presentare le evoluzioni dei singoli argomenti, riavvolgendo poi il nastro della storia per presentare il successivo, fino alla sintesi finale (e tralasciando le immense evoluzioni avvenute in altre scienze, quali l'elettronica, la genetica, la chimica molecolare, l'astronomia, ecc.).

Partiamo dall'**entanglement**. La pubblicazione dell'articolo EPR toglie il sonno a Bohr, che sospende tutte le attività della Scuola di Copenaghen e mette tutti i collaboratori a lavorare letteralmente giorno e notte sull'argomento. Dopo pochi mesi di attività febbrile esce un articolo che ha, provocatoriamente, lo stesso titolo di quello EPR. La risposta di Bohr non è però che un sommario del suo concetto di complementarità. Egli mette in discussione non la correttezza dell'argomentazione EPR, ma le premesse stesse sulle quali essa si sviluppa. Secondo Bohr, il paradosso EPR "svela solo l'essenziale inadeguatezza del punto di vista ordinario della filosofia naturale circa la spiegazione razionale dei fenomeni fisici di cui ci interessiamo nella meccanica quantistica". La nuova teoria impone una rinuncia definitiva all'idea classica di causalità e un cambiamento radicale della nostra nozione di realtà fisica. Nel 1932 il genio John von Neumann aveva pubblicato un libro nel quale dimostrava, tra le altre cose, l'impossibilità dell'esistenza delle "variabili nascoste" invocate da Einstein. Ancora nel 1935 la tedesca Grete Hermann trova una falla nella dimostrazione di von Neumann, ma essendo donna e semiconosciuta, il suo contributo viene praticamente ignorato. La MQ funziona, e la diatriba tra Einstein e Bohr, dopo la risposta di quest'ultimo, si sposta più verso l'epistemologia che la scienza, scemando durante la Seconda Guerra Mondiale.

Nel 1946 l'americano John Archibald Wheeler propone esperimenti sull'annichilazione elettrone-positrone per verificare alcune irregolarità della forza nucleare debole; condotti nel 1949 al Caltech dalla sino-americana Chien Shiung Wu e da Irving Shakhov, questi esperimenti portano alla prima generazione di fotoni entangled, anche se non immediatamente riconosciuti come tali. Sono i pionieristici lavori sperimentali dell'americano David Bohm e dell'israeliano Yakir Aharonov nel 1959 a dimostrare che l'entanglement è un fatto reale, e a postulare che per verificare propriamente il comportamento di "particelle EPR" bisognerebbe realizzare apparati sperimentali con meccanismi a "scelta ritardata", come già proposti da Wheeler.

Ma è nel 1964 che si squarcia il velo sui fondamenti della MQ: al nascente CERN lavora il nordirlandese John Stewart Bell, che ritrova l'errore di von Neumann e dimostra che la MQ non ammette stati a dispersione nulla, eliminando la possibilità delle variabili nascoste care ad Einstein (e allo stesso Bohm). Bell, con argute deduzioni, riesce a riscrivere l'incompatibilità tra MQ e località sotto forma di disuguaglianza: se i dati sperimentali violano la disuguaglianza allora la MQ è vera ed il presupposto di località (cardine della visione einsteiniana) erroneo.

Nel 1966 Bell enuncia anche la prima versione del teorema BKS (Bell-Kochen-Specker), che esprime l'impossibilità di assegnare valori alle osservabili quantistiche prima dell'atto di misurazione in maniera indipendente dal contesto sperimentale.

Inizia così la caccia all'esperimento in grado di valutare se in natura la disuguaglianza di Bell è violata o no. Nel 1969 gli americani John Clauser, Michael Hor-

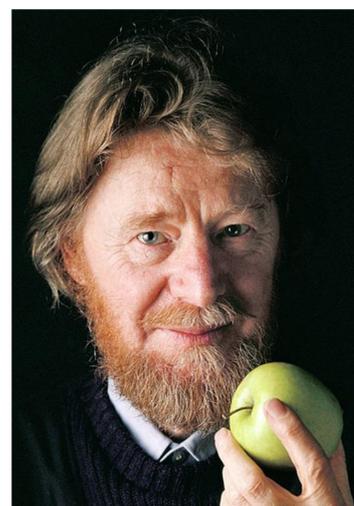


Figura 34: John S. Bell (1928-1990) nel 1987.

<sup>52</sup> L'**entanglement quantistico** (o correlazione quantistica) è un fenomeno quantistico, non riducibile alla meccanica classica, per il quale, nella condizione, prevista dal principio di sovrapposizione della meccanica quantistica, in cui due o più sistemi fisici (tipicamente due particelle) rappresentano sottosistemi di un sistema più ampio (il cui stato quantico è rappresentato da una combinazione dei loro singoli stati), la misura di un'osservabile di un sistema (sottosistema) determina *simultaneamente* anche il valore della stessa osservabile degli altri. Poiché lo stato di sovrapposizione quantistica è indipendente da una separazione spaziale di tali sistemi (sottosistemi), l'entanglement implica in modo controintuitivo la presenza tra essi di correlazioni a distanza (per Einstein una "sinistra azione a distanza") e, di conseguenza, il carattere non locale della realtà fisica.

<sup>53</sup> Come descritto da Einstein: <<La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti molto lontani nello spazio (A e B): un'influenza esterna su A non ha un'influenza diretta su B; ciò è noto come Principio di Azione Locale, usato regolarmente solo nella teoria di campo. Se quest'assioma fosse completamente abolito, l'idea dell'esistenza di sistemi quasi-chiusi, e perciò la postulazione di leggi che possano essere verificate empiricamente nel senso accettato, diverrebbe impossibile.>>

ne, Abner Shimony e Richard Holt descrivono un esperimento per verificare la disuguaglianza di Bell. Nel 1972 lo stesso Clauser e Stuart Freedman pubblicano risultati sperimentali nei quali la disuguaglianza è violata di  $5\sigma$ : la MQ è intimamente non-locale; il realismo di Einstein è sconfitto! Tra il 1974 ed il 1976 ancora Clauser a Berkeley, Holt e Pipkin ad Harvard, Faraci e Notarrigo a Catania e la Wu con Kasday e Ullman a New York conducono altri esperimenti che confermano validità e completezza della MQ.

Alla fine degli anni '70 e nella prima metà degli anni '80 importanti contributi teorici e sperimentali arrivano dal francese Alain Aspect, che idea 3 esperimenti: uno a singolo canale, uno a doppio canale ed il terzo, finalmente, a scelta ritardata; il primo decreta la vittoria della MQ a  $9\sigma$ , il secondo a  $40\sigma$ , il terzo stabilisce inequivocabilmente che l'entanglement è un fenomeno non-locale.

Dal 1983 al 2001 è il cinese Shih Yuin Lin a dare ulteriori contributi, applicando il nuovo metodo di generazione di fotoni entangled (SPDC – Conversione Parametrica Spontanea verso il Basso), più efficiente del vecchio metodo a Cascata Atomica. Ulteriori sviluppi, parallelamente, arrivano dai risultati del pluridecennale lavoro dell'austriaco Anton Zeilinger: nel 1985, con Horne e Daniel Greenberger elabora il teorema GHZ; nel 1990 i tre, insieme a Shimony, pubblicano l'articolo "Il teorema di Bell senza disuguaglianze", sull'entanglement a 3 particelle, preludio del teletrasporto quantistico<sup>54</sup> dello stato di una particella, mirabile esperimento poi realizzato da Zeilinger nel 1999. Poco dopo lo svizzero Nicholas Gisin conferma il teletrasporto tra particelle entangled a 10 km di distanza, poi, nei due decenni successivi, il gruppo di Zeilinger e università ed istituzioni americane e cinesi hanno portato la distanza record per il teletrasporto quantistico fino a centinaia di chilometri.

Decenni di sforzi hanno decretato che gli "elementi della realtà" di Einstein (tutte quelle concezioni della realtà che ci siamo costruiti sulla base della nostra esperienza sensoriale) semplicemente non esistono; le particelle entangled non si comportano come effettivamente fanno perché sono state pre-programmate da variabili nascoste, ma perché rispondono ad influenze reciproche istantaneamente, qualunque sia la distanza che le separa, in modo da soddisfare le predizioni della teoria dei quanti, che è la migliore descrizione della realtà che abbiamo, ed è incredibilmente precisa. Clauser, Aspect e Zeilinger hanno condiviso il Nobel per la Fisica 2022 per i loro contributi.

Abbiamo lasciato la comprensione della **Forza Nucleare Debole** (o Interazione Debole) al tentativo di descrizione del decadimento beta operato da Fermi nel '33. Sembra funzionare, ma la fisica delle particelle ha in serbo notevoli sorprese: ancora nel 1935 Anderson (lo stesso che nel '32 aveva scoperto il positrone) scopre nelle tracce dei decadimenti radioattivi una nuova particella, avente la stessa carica dell'elettrone, ma massa 207 volte maggiore. La scoperta è così sorprendente che Isidor Rabi<sup>55</sup> esclama <<E questo chi l'ha ordinato?>>. La particella viene chiamata "muone".

Durante e dopo la Seconda Guerra Mondiale iniziano le analisi di cascate di particelle che si trovano in alta quota, chiaramente derivanti da effetti di fenomeni astronomici all'incontro col campo magnetico terrestre e con gli strati esterni dell'atmosfera, ma il cui rilevamento a terra è inficiato dalla presenza degli strati più densi dell'atmosfera e dai brevissimi tempi di decadimento delle particelle create in queste interazioni. Queste cascate di particelle sono dette "raggi cosmici", e tra il '46 ed il '47 vi si trova di tutto, nello sconcerto generale: particelle neutre e cariche, sia positivamente che negativamente, modi di decadimento "fantasiosi". L'alfabeto greco viene saccheggiato per denominare i "pioni", i "kaoni", gli "psi", i "theta", ecc., e decine di scienziati legano i loro nomi alle scoperte di una o più particelle; è evidente che c'è ancora molto da scoprire sulle due interazioni nucleari.

Tale proliferazione di particelle risulterà spiegabile solo attraverso una migliore comprensione anche dell'interazione forte, ma è in questo contesto che si sviluppano gli studi teorici sulle rotture di simmetria, in particolare dell'importante "Simmetria CPT", la simmetria fondamentale delle leggi fisiche sotto trasformazioni che comportano le inversioni simultanee di carica, parità e tempo. Ancora oggi è considerata l'unica simmetria discreta esatta della natura. La simmetria CPT implica che un'immagine speculare del nostro universo come riflessa da uno specchio immaginario, con tutti gli oggetti aventi momenti e posizioni opposte (corrispondente all'inversione della parità), con tutta la materia sostituita da antimateria (corrispondente all'inversione della carica) e il tempo che scorre all'indietro (inversione temporale), evolverà esattamente come il nostro universo. In ogni istante i due universi risultano identici e l'inversione CPT può trasformare l'uno nell'altro.

Il teorema CPT viene introdotto per la prima volta, implicitamente, nel lavoro di Julian Schwinger del 1951 per dimostrare la connessione tra spin e statistica. Nel 1954, Gerhart Lüders e Wolfgang Pauli ricavano delle dimo-

---

<sup>54</sup> Procedura che permette di trasferire lo stato fisico caratteristico di una particella ad un'altra particella, anche molto distante, trasportando effettivamente la prima nella posizione della seconda, istantaneamente. Purtroppo, per il teorema di "Non-Clonazione" di Woiters e Zurek, la particella iniziale, per essere copiata, non può rimanere inalterata.

<sup>55</sup> Scopritore delle risonanze tra i dipoli magnetici degli atomi ed i campi magnetici esterni, fenomeno che sta alla base dei macchinari di analisi (medica e scientifica) detti NMR (Risonanza Magnetica Nucleare) e del forno a microonde.

strazioni più esplicite; contemporaneamente ed indipendentemente, questo teorema viene dimostrato anche da un giovane John Stewart Bell (dieci anni prima di ricavare la citata disuguaglianza).

Benché per alcuni anni sembri che la Simmetria CPT resti invariata in tutti i processi, già nel 1952 due cinesi emigrati a Chicago nel team di Fermi, Chen Ning Yang e Tsung-Dao Lee, dimostrano che la conservazione della Parità è comprovata per le interazioni forti ed elettromagnetica, ma non necessariamente per l'interazione debole. La febbrile attività sperimentale di Chien Shiung Wu (la stessa dei primi fotoni entangled del '49 e della verifica della disuguaglianza di Bell nel '75) porta nell'inverno '56-'57 alla scoperta della violazione di Parità<sup>56</sup> da parte del decadimento beta nel cobalto-60.

Nel 1954 è lo stesso Chen Ning Yang, con Robert Mills, a formare le basi della Teoria di Yang-Mills, una teoria di gauge (cioè una teoria dei campi in cui la lagrangiana del sistema rimane invariata dopo l'applicazione di trasformazioni delle coordinate a simmetrie locali) definita su un gruppo unitario speciale, che sarà la base matematica per spiegare le interazioni forte e debole e per realizzare il Modello Standard.

La piena descrizione dell'interazione debole avviene solo con la generalizzazione dell'equazione di campo ricavata da Dirac nel 1928. Egli propose la quantizzazione del campo elettromagnetico come se fosse un insieme di oscillatori armonici, introducendo il concetto di operatori di creazione e distruzione di particelle.

Negli anni seguenti, grazie ai lavori di Wolfgang Pauli, Eugene Wigner, Pascual Jordan, Werner Heisenberg e ad un'elegante formulazione della teoria dell'**elettrodinamica quantistica (QED)** da parte di Enrico Fermi, ci si convince della possibilità, in linea di principio, di calcolare qualsiasi processo coinvolgente fotoni e particelle cariche.

Ma i lavori successivi, del 1936 e '37, di Victor Weisskopf, Felix Bloch e Arnold Nordsieck, evidenziano come tali calcoli risultino affidabili solo limitandosi alle approssimazioni al primo ordine della teoria delle perturbazioni; problema peraltro già accennato da Robert Oppenheimer. Agli ordini successivi (dello sviluppo in serie), infatti, compaiono quantità infinite che rendono i calcoli senza senso, instillando il dubbio sulla fondatezza delle basi stesse della teoria. Poiché non si trova una soluzione a questo problema, per un certo periodo sembra esistere una incompatibilità di fondo tra relatività ristretta e meccanica quantistica e non si intravedeva alcuna via per sanarla completamente.

Le difficoltà si acuiscono sul finire degli anni quaranta. Il perfezionamento delle tecniche di indagine con microonde rende possibile misure così precise da evidenziare (Lamb e Retherford, 1947) un sensibile spostamento, noto come spostamento di Lamb, fra i livelli energetici dell'atomo di Idrogeno calcolati e quelli misurati. In un secondo tempo, nel 1948, anche la misura del momento magnetico dell'elettrone evidenzierà discrepanze con i dati previsti dalla teoria.

La prima indicazione di una possibile via di uscita viene elaborata quasi immediatamente da Hans Bethe: il calcolo, in approssimazione non-relativistica, si accorda con i risultati sperimentali in maniera eccellente. L'artificio per ottenere un valore finito dal calcolo è attribuire gli infiniti a errate correzioni di grandezze come la massa o la carica elettrica, che in realtà hanno valore finito. In tal modo gli infiniti finiscono riassorbiti in esse e il risultato finale del calcolo è finito e in accordo con gli esperimenti. Tale procedura fu chiamata "rinormalizzazione".

Sulla base di questa intuizione, e grazie ai lavori fondamentali di Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman e Freeman Dyson, diviene possibile ottenere formulazioni completamente covarianti e finite a ogni ordine dello sviluppo in serie della QED. I primi tre riceveranno il premio Nobel per la fisica nel 1965 per il loro contributo. La tecnica matematica di Feynman, basata sui suoi diagrammi<sup>57</sup>, sembrava fondamentalmente diversa dall'approccio di Schwinger e Tomonaga basata sugli operatori e tipico della teoria dei campi. L'equivalenza tra questi approcci fu dimostrata da Dyson. La procedura di rinormalizzazione, necessaria per attribuire un senso fisico ad alcune divergenze presenti negli integrali della teoria, diverrà successivamente uno degli

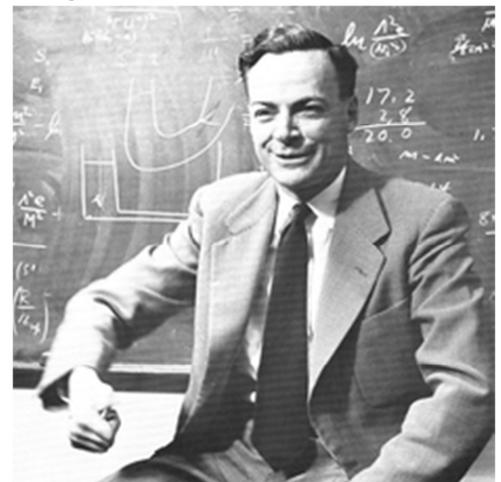


Figura 35: l'eclettico genio Richard Feynman nel 1959, a 41 anni.

<sup>56</sup> Tale scoperta consegnò il primo Nobel a cinesi, Lee e Yang, già nel 1957, ma curiosamente non alla Wu, che pur l'avrebbe ben meritato, che dovette aspettare fino al 1978 per vedersi assegnare la comunque prestigiosa medaglia Wolf per la Fisica. Per approfondimenti sull'esperimento ricercare "Esperimento Wu", "Kaone+" o "Enigma T-0".

<sup>57</sup> Nel 1942 Feynman aveva proposto una terza descrizione della MQ (dopo quelle matriciale ed ondulatoria, formulate negli anni '20), utilizzando gli "integrali sui cammini", considerando gli infiniti percorsi che una particella può effettuare *contemporaneamente* per andare da una posizione ad un'altra. Per la descrizione delle interazioni delle particelle Feynman introdusse un nuovo formalismo grafico che rese molto più immediata la comprensione delle interazioni.

aspetti essenziali delle teorie quantistiche dei campi e un loro criterio di accettabilità. La QED servirà come modello per tutte le successive teorie di campo quantistiche.

Basandosi sul lavoro pionieristico di Schwinger, Gerald Guralnik, Dick Hagen, Tom Kibble, Peter Higgs, Jeffrey Goldstone e altri, nel 1967 Sheldon Lee Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam mostrano indipendentemente che l'interazione debole e l'elettrodinamica quantistica possono unirsi in un'unica **interazione elettrodebole**, ricevendo per questa descrizione il Nobel per la Fisica nel 1979<sup>58</sup>.

È proprio Weinberg che, studiando la rottura spontanea di simmetria, trova un insieme di simmetrie che lo portano a formulare l'esistenza di mediatori di forza ("bosoni") necessari per le componenti dell'interazione elettrodebole: il noto fotone (privo di massa) per quella elettromagnetica, e tre bosoni massivi ( $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ ) per l'interazione debole.

Nel 1971 Gerardus 't Hooft dimostra che le simmetrie di gauge spontaneamente rotte sono rinormalizzabili anche con bosoni di gauge massivi.

L'esistenza dell'interazione elettrodebole viene verificata sperimentalmente in due fasi: la prima nel 1973 con la scoperta delle correnti neutre negli scattering di neutrini dalla collaborazione Gargamelle (al CERN), la seconda nel 1983 con la scoperta dei bosoni W e Z dalle collisioni protone-antiprotone nell'acceleratore Super Proton Synchrotron del CERN, da parte delle collaborazioni UA1 e UA2, guidate da Carlo Rubbia, che dividerà con Simon van der Meer<sup>59</sup> il Nobel già l'anno successivo. Queste scoperte sono un'incredibile conferma della validità del Modello Standard in fase di sviluppo in quegli anni.

Se la descrizione dei mediatori dell'interazione elettrodebole (il fotone ed i tre bosoni massivi  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ ) si è completata con la QED, altrettanto non si può dire per le particelle che risentono dell'interazione debole, ma non di quella forte, identificate complessivamente col nome di **leptoni**.

Come l'elettrone, anche il muone scoperto da Anderson nel 1935 non risente dell'interazione forte. Già il primo tentativo di descrizione del decadimento beta operato da Fermi nel 1933 prevedeva delle particelle a massa nulla o quasi ed a carica nulla, ma portatrici di energia (necessarie per equilibrare i bilanci energetici delle reazioni di decadimento beta), già teorizzate indipendentemente da Wolfgang Pauli nel 1930. Fermi ed Amaldi, in una accezione scherzosa, nel 1934 li chiamarono "neutrini", per via delle caratteristiche simili al neutrone, ma con una massa centinaia di milioni di volte inferiore.

Rimasti nel campo delle belle ipotesi per oltre due decenni, nel 1956 Clyde Cowan e Frederick Reines ideano un brillante esperimento per rilevarli, posizionando una vasca con liquido scintillatore (opportunamente addizionato di cloruro di cadmio) e dei fotomoltiplicatori in prossimità di un reattore nucleare di uso civile: vengono registrati una media di 3 eventi all'ora per tre mesi, corrispondenti al rilievo di antineutrini<sup>60</sup>, solo quando il reattore era in funzione.

Ma se i neutrini sono emessi dalle reazioni di decadimento che coinvolgono elettroni, cosa avviene nei fugaci decadimenti che coinvolgono i "massicci" muoni?

Ecco nel 1962 Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger scoprire il neutrino muonico.

Alla fine degli anni '60 John Bahcall calcola il flusso di neutrini prodotti dalle reazioni termonucleari all'interno del Sole e transitanti sulla Terra (l'incredibile cifra di 66 miliardi di neutrini al secondo per centimetro quadrato), ma Raymond Davis, con un arguto esperimento condotto pochi anni dopo a 1.500 metri di profondità in una miniera abbandonata, ne conta poco più di un terzo. Nasce il "Problema dei neutrini solari", che terrà i fisici col fiato sospeso per 3 decenni. Quanti tipi di neutrini esistono? I neutrini possono trasmutare da un tipo all'altro? Per farlo devono avere massa, ma non si è ancora sicuri che ne siano forniti, perché i modelli, anzi, non lo prevedono (a parte una trattazione di Bruno

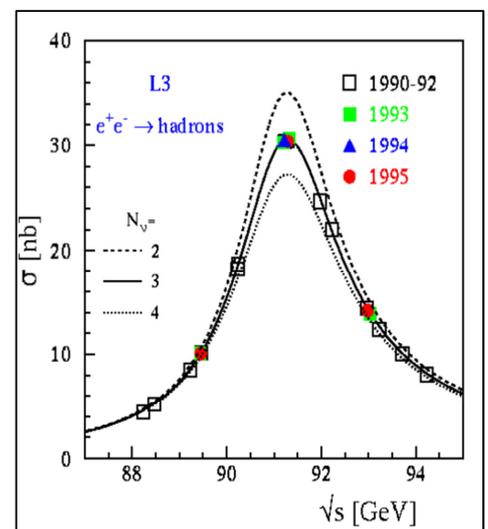


Figura 36: i risultati degli esperimenti condotti al CERN per capire quante fossero le famiglie di neutrini.

<sup>58</sup> Sto riferendo solo i Nobel che hanno segnato una svolta nell'evoluzione teorica e sperimentale di queste descrizioni della Natura, ma più della metà degli scienziati citati hanno vinto un Nobel per i loro contributi per l'avanzamento del sapere.

<sup>59</sup> Ha ideato il metodo di "Raffreddamento stocastico" che ha reso possibile la realizzazione dell'esperimento di Rubbia.

<sup>60</sup> Può apparire insensato definire l'antiparticella di una particella neutra (infatti sia il neutrino che l'antineutrino hanno carica nulla ed uguale massa), ma in realtà le due particelle hanno diversa **elicità**, ossia la proiezione del vettore di spin sul vettore impulso della particella. Il brillante esperimento condotto nel 1957 da Maurice Goldhaber al Brookhaven National Laboratory ha rivelato che i neutrini sono "levogiri" (ossia che il vettore di spin "ruota" in modo sinistrorso lungo il moto), mentre gli antineutrini sono "destrigiri" (ossia che il vettore di spin "ruota" in modo destrorso lungo il moto).

Pontecorvo del 1969)!

Dopo aver scoperto i bosoni massivi della teoria elettrodebole, dal 1988 al 1998 l'esperimento L3 del LEP del CERN, che coinvolge svariate centinaia di ricercatori, viene dedicato alla determinazione del numero di "famiglie" leptoniche (figura 36), fornendo, tramite esperimenti estremamente complessi e raffinati, l'inequivocabile risposta: <<Esistono 3 famiglie di neutrini!>>

Infatti già nel 1975 Martin Perl e la sua equipe dello SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) avevano scoperto il "Tauone", un terzo leptone avente le caratteristiche dell'elettrone, ma 3.477 volte più massiccio di questo, e circa 17 volte più massiccio anche del muone.

Dal 1997 è invece la collaborazione DONUT al Tevatron del Fermilab di Chicago a dare la caccia al neutrino tauonico, la cui esistenza viene poi confermata nel 2000, dando una fenomenale conferma alla validità dei modelli sviluppati all'interno del Modello Standard.

Nel 1998, intanto, il gigantesco esperimento giapponese Super-Kamiokande conferma la "oscillazione dei neutrini solari" nei loro 3 "sapori", confermata negli anni successivi dall'esperimento canadese Sudbury Neutrino Observatory.

Dal 2007 è attivo ai Laboratori del Gran Sasso, in Italia, l'esperimento Opera, ideato per rilevare i neutrini muonici emessi nella sua direzione dal CERN di Ginevra, e dal 2010 al 2012 vengono rilevati 2 neutrini tauonici e 19 neutrini elettronici "oscillati" da quelli neutronici emessi.

La parte di Modello Standard che riguarda l'interazione elettrodebole e le 3 famiglie leptoniche di diversi livelli energetici è quindi descritta e sperimentalmente confermata.

L'incredibile successo della QED ne ha fatto il modello per tutte le successive teorie di campo quantistiche. Una di queste è la **Cromodinamica Quantistica** (QCD), il cui sviluppo comincia all'inizio degli anni '60 e viene completato nei '70 grazie al lavoro di David Politzer, Sidney Coleman, David Gross e Frank Wilczek. Sarà proprio la complicata QCD a porre le basi della comprensione dell'**interazione forte**, necessaria per spiegare lo "zoo delle particelle"<sup>61</sup> emerso dall'analisi dei raggi cosmici nei secondi anni '40 e dai primi acceleratori di particelle negli anni '50 del XX secolo.

Anche se già nel 1935 Hideki Yukawa aveva predetto l'esistenza di particelle (poi dette "**mesoni**"), successivamente effettivamente scoperte nei raggi cosmici, la strada per arrivare a descriverla sarà tutt'altro che semplice e lineare!

Risulta ormai evidente che, così come la variabilità degli elementi atomici della tavola periodica aveva implicato l'esistenza di particelle subatomiche, con il centinaio di elementi esistenti poi elegantemente spiegato dalle combinazioni di sole tre particelle (neutroni e protoni nel nucleo atomico ed elettroni intorno ad esso), così la proliferazione di particelle "esotiche"<sup>62</sup> implica l'esistenza di un livello di particelle subnucleari, sperabilmente fondamentali, a formare neutrone, protone e le loro stravaganti ed effimere compagne.

Inizialmente si nota che alcune regolarità nelle interazioni di queste particelle possono essere spiegate come conseguenza della conservazione di un numero quantico, poi detto "isospin", o spin isotopico, una quantità fisica matematicamente analoga allo spin. Nel 1953 si rende necessario introdurre un ulteriore numero quantico, la "stranezza", proposto da Murray Gell-Mann e Kazuhiko Nishijima in particolare per spiegare la vita media insolitamente lunga di alcune particelle.

Nel 1962, finalmente, tra le centinaia di fisici che cercano da anni un'armonia e delle ricorsività nello "zoo delle particelle" emergono lo statunitense Murray Gell-Mann e l'israeliano Yuval Ne'eman, che notano "periodicità" e "ricorsività" nelle caratteristiche di alcune particelle, che vengono raggruppate per livelli di carica elettrica e "stranezza", con procedimento analogo a quello adottato da Mendeleev quasi un secolo prima per inquadrare le caratteristiche degli elementi chimici allora noti. Il modello schematico che ne esce (figura 37) è detto "via dell'ottetto", in manifesta allusione al "Nobile Ottuplice Sentiero" della dottrina buddhista (e questo la dice lunga sul livello di "crisi mistica" raggiunto dai fisici delle particelle in quegli anni).

Nel 1963 Gell-mann e George Zweig propongono che almeno alcuni degli **adroni** (cioè le particelle sensibili all'interazione forte, come protone e neutrone) devono essere costituiti da almeno tre particelle subnucleari, per potere spiegare tutte le loro caratteristiche; inoltre, di queste particelle ne devono esistere di almeno tre tipi diversi. Facendo il verso al gabbiano ubriaco del Finnegan's Wake di Joyce, nel 1964 Gell-Mann chiama "**quark**" queste particelle subnucleari, definendo "up", "down" e "strange" le tre tipologie.

---

<sup>61</sup> Negli anni '50 lo sconcerto e la confusione sul crescente numero di "particelle fondamentali" erano tali che entrò in voga anche tra gli addetti ai lavori la locuzione "zoo di particelle", per definirne l'inattesa variabilità e quantità.

<sup>62</sup> Da segnalare, tra le più rilevanti, la scoperta dell'antiprotone, effettuata nel 1955 a Berkeley dall'italiano Emilio Segrè e dall'americano Owen Chamberlain, entrambi poi Nobel nel 1959.

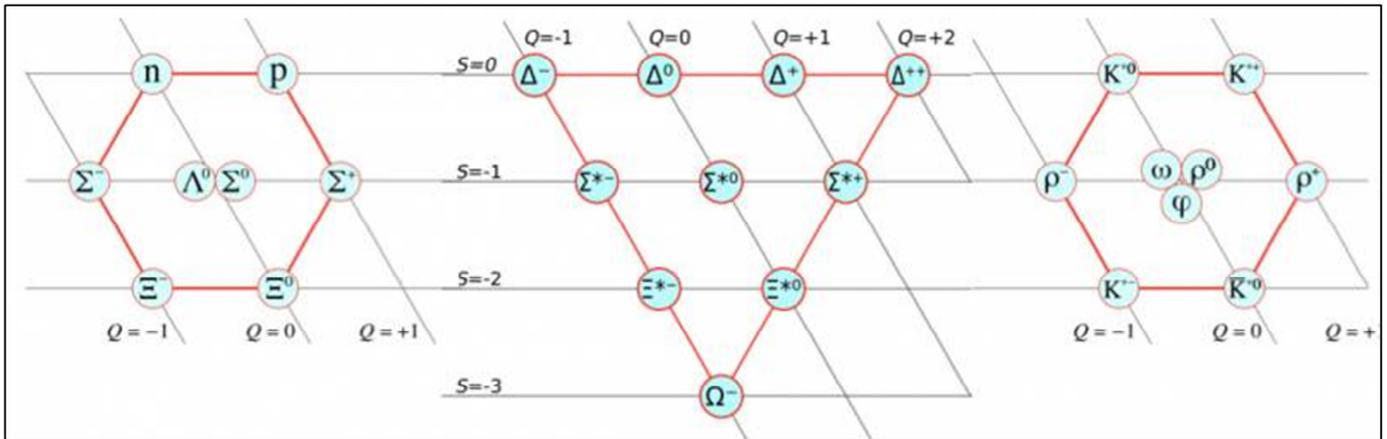


Figura 37: modello schematico della "via dell'ottetto" di Gell-Mann e Ne'eman (nell'ordine: l'ottetto barionico, il decupletto barionico e l'ottetto mesonico).

Rimane la sola particella  $\Delta^{++}$  a resistere al nascente inquadramento: apparentemente formata da tre quark up con spin parallelo, sembra violare apertamente il Principio di Esclusione di Pauli, pur essendo un fermione. Si rende necessaria l'introduzione di una ulteriore "carica", o caratteristica della interazione forte: mentre la suddivisione up/down/strange si riferisce alla carica di "sapore" dei quark, questi posseggono anche una carica di "colore", concepita ed introdotta matematicamente nel 1965 da Moo-Young Han e Yoichiro Nambu!



Figura 38: un quarantenne Murray Gell-Mann nel 1969, anno del premio Nobel.

Benché ovviamente le caratteristiche di queste particelle non abbiano niente a che vedere con le comuni accezioni di sapore e colore, quest'ultima caratteristica è stata scelta per l'analoga possibilità di annullare tra loro tre cariche "diverse", come avviene in teoria del colore sommando i 3 colori primari (rosso, verde e blu) ad ottenere il bianco.

I quark sembrano però ancora troppo strani per essere veri, oltre alle due cariche di sapore e colore, hanno anche la carica elettrica, ma frazionaria ... cosa mai vista in natura!!!

Un protone dovrebbe essere costituito da due quark "up" (avente carica  $+2/3$ ) ed un quark "down" (avente carica  $-1/3$ ), così da avere carica complessiva  $+1$ , mentre un neutrone dovrebbe essere costituito da un up e due down (carica elettrica complessiva nulla); in ciascun nucleone i 3 quark devono avere carica di colore differente, in modo da annullarsi complessivamente.

Una accelerazione nelle conferme sperimentali necessarie per il completamento del Modello Standard avviene dal 1968 nel già citato SLAC, dove esperimenti di scattering profondo (proposti come risolutivi da James Bjorken), realizzati sparando elettroni ad altissima energia contro protoni (tanto da destabilizzarne la struttura e rilevarne la composizione interna grazie al modo in cui gli elettroni sono "rimbalzati via"), rilevano i tanto attesi quark: nel 1968 i quark "up"

(massa di  $2,3 \text{ MeV}/c^2$ , carica  $2/3$  e spin  $1/2$ ), "down" (massa di  $4,8 \text{ MeV}/c^2$ , carica  $-1/3$  e spin  $1/2$ ) e "strange" (massa di  $95 \text{ MeV}/c^2$ , carica  $-1/3$  e spin  $1/2$ ).

La struttura a "famiglie" di classi energetiche diverse comincia a delinearsi, e l'esistenza di un quark "strange" con le stesse caratteristiche del "down", ma massa 20 volte superiore, induce a pensare che debba esistere un quarto quark, avente le caratteristiche di "up", ma molto più massivo. Il quark "charm" viene descritto matematicamente da Sheldon Glashow, John Iliopoulos e Luciano Maiani nel 1970 e rilevato sperimentalmente nel 1974 dai team di Burton Richter allo SLAC e di Samuel Ting al Brookhaven National Laboratory (massa di  $1.275 \text{ MeV}/c^2$ , carica  $2/3$  e spin  $1/2$ ).

Intanto già nel 1963 Nicola Cabibbo aveva posto le basi dello studio dei modi di decadimento degli adroni, cioè la loro relazione con l'interazione debole. Generalizzata nel 1973 da Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa, la matrice CKM (Cabibbo – Kobayashi – Maskawa)<sup>63</sup> è la matrice unitaria che contiene le informazioni per il cambio di sapore nei decadimenti dei quark causati dall'interazione debole. Unico imprevisto, il modello prevede l'esistenza di tre famiglie di quark, quindi devono esistere altri due quark, nominati "bottom" e "top" da Haim Harari, che ne predice l'esistenza nel 1974!

<sup>63</sup> Kobayashi e Maskawa Nobel nel 2008, Cabibbo no ...

“Bottom” (massa di 4.180 MeV/c<sup>2</sup>, carica -1/3 e spin 1/2) viene scoperto già nel 1977 dal team di Leon Lederman (che 15 anni prima aveva scoperto il neutrino muonico), mentre per il quark “top” bisognerà attendere la piena potenza del Tevatron al Fermilab, dove le collaborazioni CDF e DØ nel 1995 finalmente lo trovano ad altissime energie (massa di 173.070 MeV/c<sup>2</sup>, carica 2/3 e spin 1/2).

La scoperta della *libertà asintotica* (proprietà di alcune teorie di gauge secondo cui le interazioni tra alcune particelle, ad esempio i quark, diventano arbitrariamente deboli a distanza molto basse) effettuata nel 1973 da David Gross, David Politzer e Frank Wilczek, ha permesso di effettuare previsioni precise riguardo ai risultati di molti esperimenti ad alte energie utilizzando le tecniche della teoria perturbativa della MQ.

Trovati i primi quark, alla descrizione che la QCD fa dell’interazione forte mancano i bosoni, mediatori della forza stessa. L’estensione della QCD nel Modello Standard porta alla previsione dell’esistenza di “**gluoni**”, bosoni vettoriali mediatori della forza forte, quindi sensibili alla carica di colore dei quark. L’esistenza dei gluoni (in 8 combinazioni di “colori” differenti) viene dimostrata nel 1979 durante esperimenti con l’acceleratore HERA di Amburgo. Questi esperimenti sono divenuti sempre più precisi, culminando nella conferma della QCD perturbativa ad un livello di errore di pochi punti percentuali per opera del LEP del CERN.

All’estremo opposto della libertà asintotica vi è la *confinamento*: poiché la forza tra le cariche di colore non diminuisce con la distanza, si ritiene che i quark ed i gluoni non possano mai essere separati dagli adroni.

A metà degli anni ’70 il **Modello Standard delle Particelle** è sostanzialmente pronto: rappresenta un paradigma di teoria quantistica dei campi, esibendo una vasta gamma di fenomeni, tra cui la rottura spontanea di simmetria, le anomalie e comportamenti non perturbativi; sotto l’aspetto matematico, è una teoria di Yang-Mills, ovvero una teoria di gauge non abeliana, rinormalizzabile e coerente con la relatività ristretta.

La materia comune e stabile è costituita da atomi, formati da un nucleo di adroni (neutroni e protoni), a loro volta costituiti di quark “up” e “down”, e da una nuvola di elettroni; queste 3 particelle (col neutrino elettronico) costituiscono la prima di tre “generazioni” di particelle, nelle quali le generazioni successive sono costituite da particelle di massa superiore ed estremamente instabili. Ogni generazione è costituita da 2 quark e 2 leptoni (una particella come l’elettrone ed un neutrino corrispondente).

I bosoni vettoriali sono mediatori delle forze: i gluoni dell’interazione forte, i fotoni di quella elettromagnetica e W e Z di quella debole. Lo schema di fig. 39 riassume efficacemente quali particelle fondamentali sono sensibili a quali forze.

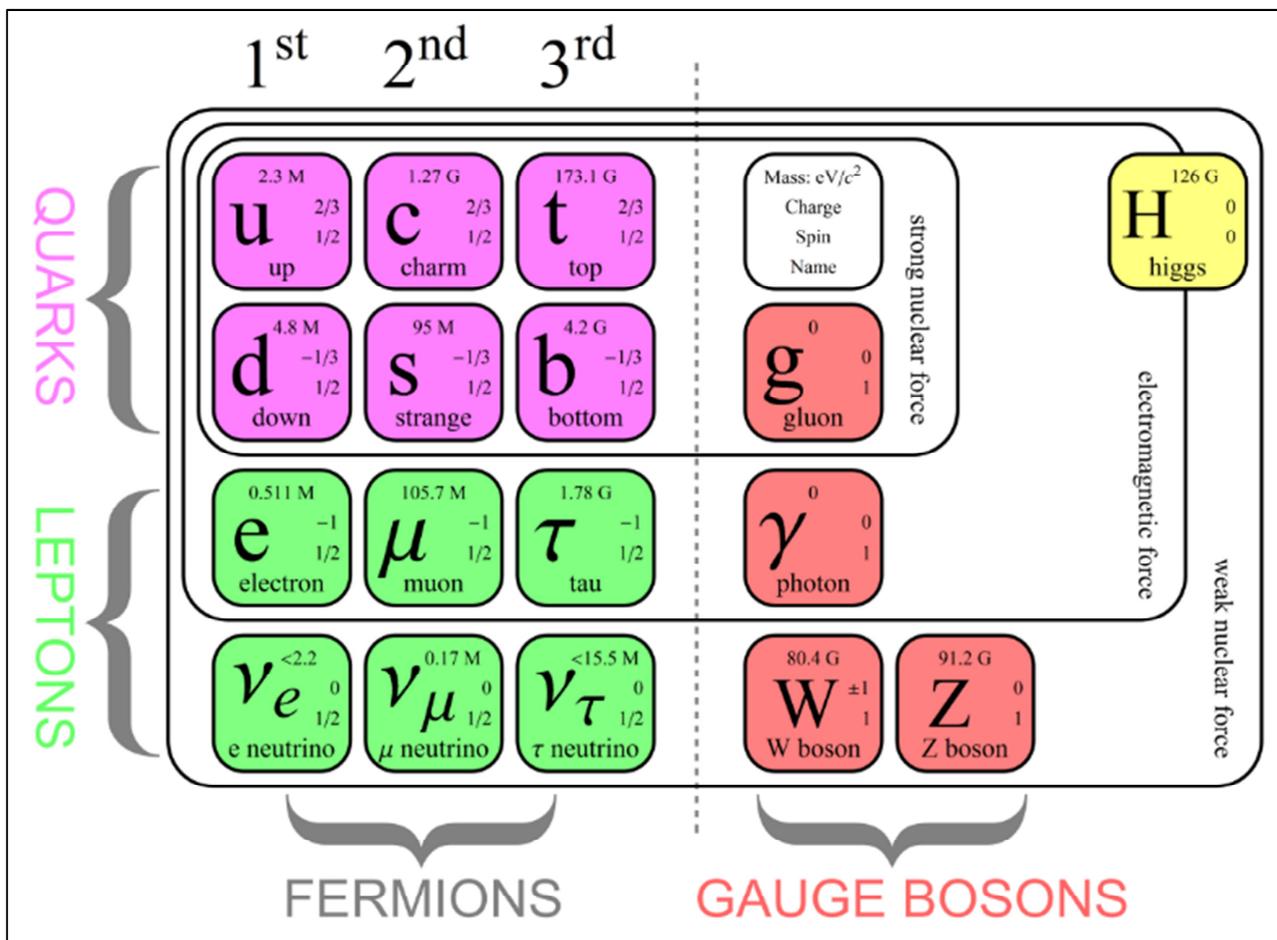


Figura 39: Il Modello Standard delle Particelle

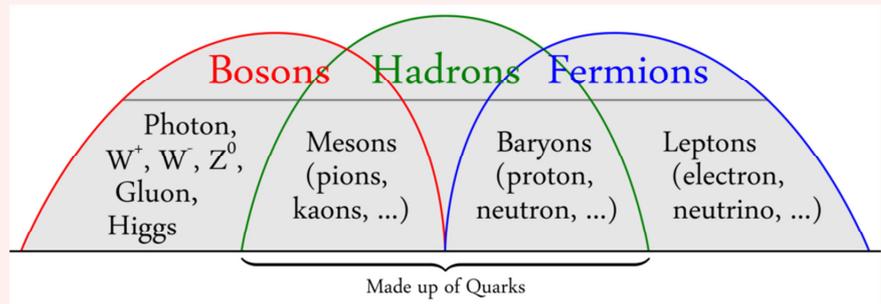
Infine, il bosone scalare H (Higgs), predetto a vario titolo nel 1964 da Peter Higgs, François Englert, Robert Brout, Philip Anderson, Gerald Guralnik, Carl Hagen e Thomas Kibble, conferisce la massa alle particelle elementari tramite la rottura spontanea di simmetria, con un campo scalare che permea lo spaziotempo. Come precedentemente anticipato, il Bosone di Higgs è stato scoperto nel 2012 al CERN con la collaborazione di migliaia di ricercatori (capigruppo i citati italiani Fabiola Gianotti e Guido Tonelli).

A seguito delle previsioni effettuate dal modello, le citate scoperte del tauone nel 1975, del quark "bottom" nel 1977, dei gluoni nel 1979, dei bosoni W e Z nel 1983, del quark "top" nel 1995, del neutrino tauonico nel 2000 e del Bosone di Higgs nel 2012 fanno del Modello Standard il più grande successo della storia della scienza. E questo è tutto?

Una ventina di pagine fa, completata la descrizione sommaria del CERN, anticipavo la necessità di ripercorrere la strada che aveva portato al Modello Standard delle Particelle per comprendere la necessità di nuovi, complicati e costosi esperimenti per ampliare i limiti della conoscenza. Ancora otto pagine fa enunciai come avrei riproposto l'avanzamento dei risultati della ricerca scientifica su binari paralleli per entanglement, interazione debole, interazione forte e descrizione cosmologica dell'universo; abbiamo seguito i primi tre e lo scenario è completo. Dunque, qual è l'apporto della cosmologia?

La cosmologia ci dice a gran voce che manca qualcosa, che la ToE (Teoria del Tutto) alla quale ha lavorato Einstein per gli ultimi 30 anni della sua vita è ancora di là da venire; in buona sostanza, ci dice che c'è ...

## BOSONI E FERMIONI, ADRONI CON MESONI E BARIONI, POI LEPTONI, FOTONI, ... UN PO' DI CHIAREZZA!



Almeno per tutta la durata della laurea triennale, anche agli studenti di Fisica capita di fare confusione fra le proprietà di tutti i gruppi nei quali sono classificate le particelle: i vari "-oni" dai prefissi fantasiosi.

Cerchiamo qua di fare un po' di ordine, sfruttando quella che ritengo essere l'immagine più immediata tra quelle proposte con l'intento di riassumere l'argomento!

Senza timore di ripetermi, anzi, proprio in ottica di ripasso, riporto quanto scritto a pag.24: <<... Markus Fierz e lo stesso Pauli enunciano nel 1940 il "Teorema Spin-Statistica", che dimostra come le particelle a spin semintero ( $\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \text{ecc.}$ ) rispondono al Principio di Esclusione di Pauli, possiedono sempre massa, possono contribuire alla costituzione della materia ordinaria e rispondono alla statistica di Fermi-Dirac, quindi vengono nominate "**Fermioni**" in onore di Fermi. Al contrario, le particelle a spin intero ( $0, \pm 1, \pm 2, \text{ecc.}$ ) non rispettano il Principio di Esclusione di Pauli, possono non possedere massa, non contribuiscono alla costituzione della materia ordinaria e rispondono alla statistica di Bose-Einstein, quindi sono dette "**Bosoni**", in onore di Bose.>>

La prima distinzione è quindi tra il gruppo racchiuso dall'arco blu e quello racchiuso dall'arco rosso, e si basa su di una differenziazione delle proprietà di base delle varie particelle.

All'estrema sinistra, fra i Bosoni, tutti i mediatori delle forze fondamentali, quali il fotone (dal greco "fos", luce), il gluone (dall'inglese "glue", colla, perché incolla i quark dentro gli adroni), il "W", lo "Z", ecc.

All'estrema destra, fra i Fermioni, i "**Leptoni**" (dal greco "leptos", leggero), ossia le particelle leggere, come elettrone e neutrini, che non risentono della forza forte.

Al centro le particelle formate dai quark, gli "**Adroni**" (dal greco "hadròs", forte, in quanto soggetti alla Forza Nucleare Forte), i quali però possono rispondere ad entrambe le statistiche, a seconda di come si aggregano: le particelle formate da 3 quark (o 3 antiquark) rispondono alla statistica di Fermi-Dirac e sono dette "**Barioni**" (dal greco "baros" pesante, in quanto vi rientrano il protone ed il neutrone, che formano il nucleo atomico e che sono quasi 2.000 volte più massicci del leptone elettrone), mentre quelle formate da un quark ed un antiquark rispondono alla statistica di Bose-Einstein e sono dette "**Mesoni**" (dal greco "mésou", media, in quanto le prime particelle scoperte con queste caratteristiche avevano massa a riposo intermedia tra quelle dei Barioni e quelle dei Leptoni), e tra queste, numerose, rientrano il pione, il kaone, i mesoni B, D ed eta, ecc.

## ... IL BISOGNO DI UNA NUOVA FISICA

Abbiamo lasciato la descrizione dell'Universo ai successi delle Relatività Generale, nel 1915, all'introduzione della Costante Cosmologica nel 1917 ed al suo "diniego" nel 1929, all'inaspettata scoperta dell'espansione dell'Universo, compresa grazie alla misura del redshift cosmologico<sup>64</sup> della luce proveniente da tutte le galassie, spiegabile solo con un reciproco allontanamento.

Anche se quasi tutti gli sforzi furono concentrati sulle implicazioni della nascente Meccanica Quantistica, il dibattito teorico rimase acceso anche in ambito cosmologico, anche se le implicazioni erano principalmente filosofiche e le applicazioni sicuramente meno immediate.

Il tentativo di conciliazione di soluzioni esatte delle equazioni di campo di Einstein con l'osservazione dell'espansione dell'Universo porta alla fine degli anni '20 ad un paio di formulazioni matematiche simili della geometria dello spazio tempo: la "Metrica FLRW" (dalle iniziali dei cognomi degli scienziati Aleksandr Fridman, Georges Lemaître, Howard Percy Robertson e Arthur Geoffrey Walker) e lo "Spazio EdS" (da Albert Einstein e Willem de Sitter), formulato autonomamente, contemporaneamente ed indipendentemente anche da Tullio Levi-Civita.

A questi modelli di universo in espansione "rallentata" dalla gravità, con la materia che si diluisce progressivamente, viene successivamente contrapposta una visione di universo in espansione stazionaria con progressiva creazione di materia. Nel 1948 sono Fred Hoyle, Hermann Bondi e Thomas Gold a formulare il modello concorrente denominato "Stato Stazionario". È lo stesso Hoyle a ridicolizzare l'idea che tutta la materia sia stata creata in un istante iniziale (da lui battezzato col nomignolo "Big Bang"), trovando molto più allettante e plausibile una lenta creazione di materia a seguito della continua espansione dello spazio.

Proprio nel 1948, però, Ralph Alpher, Hans Bethe e George Gamow (in uno storico articolo passato alla storia come "Articolo  $\alpha\beta\gamma$ "<sup>65</sup>) correlano magistralmente le abbondanze relative di idrogeno ed elio nell'universo con l'evoluzione dello stesso a partire dal "Big Bang"<sup>66</sup>.

Già nel 1920 Eddington (quello che l'anno prima aveva confermato la Relatività Generale misurando lo spostamento delle stelle prospetticamente prossime al Sole durante un'eclisse) aveva ipotizzato che le stelle fornissero luce e calore tramite la fusione nucleare; primi calcoli approssimativi forniscono tempi di esaurimento del combustibile nucleare in circa 13 miliardi di anni, dando finalmente al pianeta Terra un'età sufficiente per lo svolgimento dei processi geologici e biologici verificativi.

Nel 1928 è Gamow a studiare le condizioni affinché due nuclei atomici (che si respingono, in quanto carichi positivamente) arrivino a collidere e a fondere in un unico nucleo più massiccio.

Nel 1939 Bethe applica i calcoli di Gamow alla fusione di idrogeno in elio e trova due diverse "strade" per ottenere la reazione: la "catena protone-protone" ed il "ciclo carbonio-azoto-ossigeno".

Il citato lavoro comune del 1948 segna un punto a favore della teoria del Big Bang, ma in molti osservano che se l'universo si fosse evoluto da un

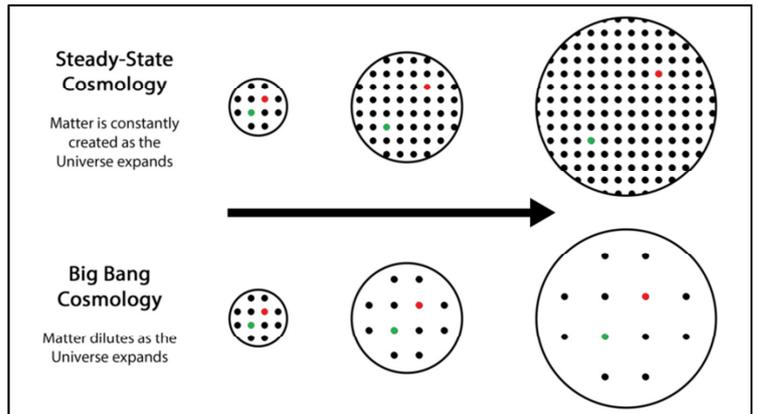


Figura 40: confronto delle previsioni della distribuzione di materia nei modelli del Bi Bang e dello Stato Stazionario.



Figura 41: George Gamow, sempre pronto allo scherzo.

<sup>64</sup> Per la Relatività Ristretta la radiazione luminosa che ci arriva da galassie lontane giunge sempre alla velocità della luce, ma le linee di assorbimento spettrale appaiono spostate verso il rosso, indice del fatto che, da quando sono state generate, la lunghezza d'onda che le caratterizza si è allungata. Ciò può essere dovuto solo alla dilatazione dello spazio.

<sup>65</sup> Gamow, affermato scienziato e noto burlone, capì la fondamentale importanza del lavoro che stava portando avanti col suo dottorando Alpher; gli propose quindi (sapendo che Alpher non poteva rifiutare) di far "correggere" l'articolo al noto fisico nucleare Bethe (che, benché poco coinvolto in argomenti cosmologici, apportò alcune revisioni in passaggi rilevanti di fisica nucleare), in modo che l'articolo fosse poi facilmente memorizzabile per assonanza alle prime tre lettere dell'alfabeto greco: Alpher-Bethe-Gamow =  $\alpha\beta\gamma$ .

<sup>66</sup> Il 75% dei nucleoni usciti dal Big Bang sono protoni che formano il nucleo di atomi di idrogeno, il rimanente 25% (a parte tracce di litio) forma nuclei di elio (numericamente, quindi, il 92% degli atomi sono di idrogeno).

punto ad infinite densità e temperatura, sarebbe passato da una condizione in cui era opaco e pieno di plasma a migliaia di gradi ad una condizione meno calda nella quale atomi neutri avrebbero preso il posto del plasma ionizzato e nel quale la radiazione luminosa avrebbe finalmente potuto “vagare” in uno spazio trasparente; questa transizione avrebbe dovuto generare un’immensa quantità di fotoni (tutti gli elettroni catturati dai rispettivi nuclei ne avrebbero emessi) nelle bande del visibile e degli ultravioletti, ma poi, a causa dell’espansione dell’universo, questa radiazione avrebbe subito una estensione della lunghezza d’onda, portandosi ... dove? Presupposti diversi portano a soluzioni diverse, che spaziano dal rosso, all’infrarosso, alle microonde alle onde radio. Ma della radiazione di fondo che dovrebbe essere ubiqua non v’è traccia.



Figura 42: foto del 1971 che ritrae gli autori dell’articolo B<sup>2</sup>FH, di 14 anni prima; Margaret Peachey Burbidge (52), Geoffrey Burbidge (46), William Fowler (60) e Fred Hoyle (56).

Nel frattempo, nel 1957, Fred Hoyle completa un altro lavoro storico: insieme ai coniugi Margaret e Geoffrey Burbidge ed al futuro Nobel William Fowler pubblica il monumentale lavoro B<sup>2</sup>FH (dalle iniziali degli autori), nel quale, con calcoli quantitativi di rara complessità e completezza, arrivano a determinare i processi che portano alla formazione di tutti gli elementi e dei loro isotopi, tramite processi di fusione nucleare che si instaurano nelle stelle fino a formare i nuclei dell’ossigeno (stelle piccole) o di nickel e ferro (stelle giganti), nonché quelli più pesanti nelle supernove. Le stelle sono le fucine degli atomi oltre il litio, grazie ad otto diversi tipi di fusione nucleare<sup>67</sup> che si instaurano nelle stelle, trovando equilibrio alla contrazione gravitazionale a temperatura via via sempre maggiori. Siamo inequivocabilmente “polvere di stelle”! Senza le generazioni di stelle che ci hanno preceduto, i pianeti e la vita non esisterebbero.

Parallelamente si sprecano i tentativi di stimare la temperatura di corpo nero della supposta radiazione cosmica di fondo: Robert Dicke la stima a 20 K<sup>68</sup> nel ’46 e a 40 K nel ’60, Gamow a 50 K nel ’48, a 7 K nel ’53 e a 6 K nel ’56, Alpher e Robert Herman a 5 K nel ’48 e a 28 K nel ’50, Émile le Roux a 3 K nel ’55 e Tigran Shmaonov a 4 K nel ’57. Nel 1964, mentre a Princeton (New Jersey) Robert Dicke sta cercando di migliorare la sua stima, insieme ai ricercatori del suo team Jim Peebles e David Wilkinson, a circa 50 km di distanza due brillanti ingegneri dei Bell Laboratories (Arno Penzias e Robert Wilson) stanno realizzando la più grande e sensibile antenna “a corno” mai costruita (figura 43), progettata per ricevere le onde radio riflesse dai palloni satellitari del progetto Echo della NASA. Con sconcerto e sgomento, in fase di collaudo, registrano un rumore di fondo circa cento volte superiore alle attese, concentrato a 282 GHz (1,063 mm di lunghezza d’onda), proveniente da tutte le direzioni in qualsiasi ora del giorno e giorno dell’anno, quindi non ascrivibile a sorgenti terrestri, del sistema solare e neanche della galassia. Rifanno calcoli e misure più volte, tolgono i nidi di piccione e ne puliscono accuratamente le deiezioni ... ma non c’è niente da fare. Con la carriera ormai appesa ad un filo, è solo parlando casualmente con un amico dell’MIT che Penzias viene a sapere di un articolo di Peebles in fase di revisione. Coordinate le osservazioni, nel 1965 escono due articoli congiunti, uno con la previsione teorica ed uno con le osservazioni sperimentali: la radiazione cosmica di fondo (CMB – Cosmic Microwave Background), firma del Big Bang, è svelata, e corrisponde alla radiazione di un corpo nero a 2,725 K! Penzias e Wilson riceveranno il Nobel nel 1978, Peebles (unico sopravvissuto degli autori della ricerca) solo nel 2019.

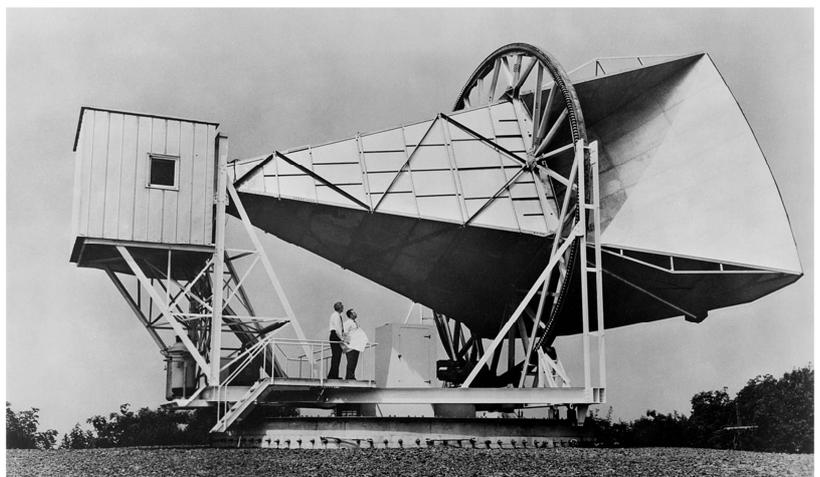


Figura 43: Penzias e Wilson osservano sconsolati la loro antenna.

La scoperta della CMB conferma una previsione fondamentale della cosmologia del Big Bang. Da quel momento in poi viene gene-

<sup>67</sup> ... e grazie a due tipi di cattura neutronica, ad un tipo di cattura protonica ed alle due “strade” di decadimento, per emissione di particelle alfa o beta (queste ultime positive o negative).

<sup>68</sup> “K” sta per “Kelvin”, la scala delle temperature assolute, il cui zero corrisponde a -273,15 °C; 20 K = -253,15 °C.

ralmente accettato che l'universo sia nato in uno stato caldo e denso e che si sia espanso nel tempo. La velocità di espansione dipende dai tipi di materia e di energia presenti nell'universo e, in particolare, se la densità totale è superiore o inferiore alla cosiddetta densità critica.

Durante gli anni '70, la maggior parte dell'attenzione si concentra sui modelli barionici puri (ossia su modelli che considerano la sola materia "tradizionale", fatta di neutroni, protoni e, con incidenza nettamente inferiore, per via della piccola massa, elettroni), ma si sono trovate serie sfide per spiegare la formazione delle galassie, data l'estrema uniformità<sup>69</sup> della CMB.

Per risolvere il problema si ripescava una sagace intuizione dell'astronomo svizzero Fritz Zwicky, che aveva osservato lungamente le velocità relative delle galassie, stimandone la forza di attrazione gravitazionale e quindi la massa, poi ne aveva stimato la massa anche contando le stelle. In un articolo del 1933 rivela un'incredibile discrepanza: la materia luminosa (che si vede) deve essere circa un quattrocentesimo della materia necessaria ad incurvare lo spaziotempo tanto da giustificare le velocità relative delle galassie negli ammassi considerati. C'è *qualcosa* che non si vede, che non interagisce coi campi elettromagnetici (non scambia fotoni, quindi niente luce, né emissione termica negli infrarossi), ma che interagisce gravitazionalmente con stelle, pianeti, galassie, ecc., incurvando lo spaziotempo. Nasce la **materia oscura**.

Nei decenni successivi si cerca di identificare questa fantasmagorica materia giustificandola in più modi, sempre senza successo: non può essere polvere interstellare, perché altrimenti la diffusione sarebbe molto superiore a quanto osservato; non possono essere i neutrini, perché, se anche hanno una massa, esiste un limite superiore a tale massa, quindi non possono giustificare che qualche milionesimo della massa mancante; c'è l'energia dei fotoni, ma incide in modo risibile; ci sono sicuramente le nane brune, ma le prime osservazioni negli infrarossi pongono limiti superiori al loro numero tali da minimizzarne il contributo; non è antimateria, altrimenti ci sarebbero degli infuocati fronti d'onda esplosivi ai confini tra le bolle di materia e quelle di antimateria.

Negli anni '70 ci si rende conto che per giustificare l'isotropia della CMB è necessario che già alla nascita l'universo avesse molta più materia di quella che poi ha formato le galassie, e che per essere così uniforme dovesse aver avuto un momento nel quale le sue parti potevano influenzarsi reciprocamente, sempre senza violare la velocità della luce ("problema dell'orizzonte"). Ne consegue che all'inizio l'universo doveva essere estremamente piccolo e caldo, per poi essere passato da una fase di espansione estremamente accelerata, dovuta ad un teorico "campo inflatonico" che ne ha accelerato in modo smodato l'espansione per una frazione di secondo, di fatto "congelando" ed allontanando le piccole oscillazioni locali di temperatura, dalle quali si sarebbero poi formati i superammassi di galassie poche centinaia di milioni di anni dopo.

All'inizio degli anni '80, ci si rende conto che i problemi dei modelli cosmologici avrebbero potuto essere risolti se la materia oscura fredda (Cold Dark Matter – CDM) avesse dominato i barioni come quantità, e la teoria della "inflazione cosmica" avesse prodotto modelli con densità critica (cioè quella densità di materia-energia che appiattisce la geometria dello spaziotempo su vasta scala, rendendolo uno spazio "euclideo").

È lo statunitense Alan Guth a presentare, nel 1981, un modello cosmologico inflazionario che riesce a dar conto della piattezza della geometria dell'universo, a risolvere il problema dell'orizzonte e a giustificare l'assenza di difetti topologici (per esempio i monopoli magnetici, previsti invece dai modelli puramente barionici).

In quegli anni nascono svariati tentativi, sia teorici che sperimentali, per "trovare", o almeno definire cosa fosse questa materia oscura. Sono principalmente riconducibili a due tipologie di elementi: i WIMP (Weakly Interacting Massive Particles, particelle estremamente massive debolmente interagenti) ed i MACHO (MASSive Compact Halo Objects, oggetti massicci compatti d'alone, sottinteso, galattico); in quasi 40 anni di esperimenti dedicati nessuna particella "speciale", esterna al Modello Standard delle Particelle, è stata reperita, così come la caccia a nane brune, microbuchi neri, pianeti erranti esterni alla galassia, ha determinato limiti superiori tali da renderne il contenuto alla massa mancante scarsamente significativo.

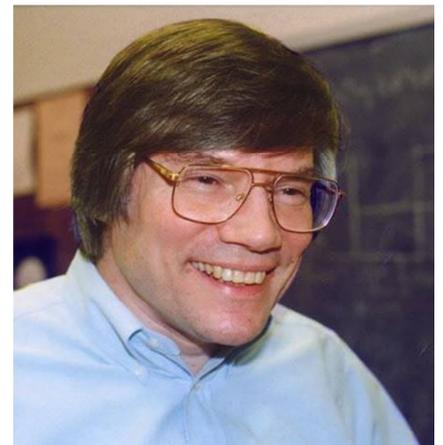


Figura 44: Alan Guth negli anni '80.

<sup>69</sup> La CMB è estremamente omogenea ed isotropa: depurata dagli effetti doppler della rotazione e della rivoluzione terrestre e da quelli, più significativi, della rivoluzione del Sistema Solare attorno alla Via Lattea, restano differenze inferiori ad una parte su 10.000 su angoli visuali dell'ordine della decina di gradi, e di meno di una parte su 100.000 su angoli di frazioni di grado; le galassie si sono formate nelle zone "più calde" (maggiore densità di materia), ma l'Universo primordiale deve essere uscito dal Big Bang spaventosamente omogeneo, e di questo le teorie che ne spiegano l'evoluzione devono tenerne conto e darne ragione.

A fine anni '80 nasce quindi la “materia oscura fredda”, che resta tale in senso sia letterale che figurato. Durante gli anni '80 la maggior parte della ricerca si concentra sulla materia oscura con densità critica nella materia (ossia quella necessaria ad “appiattire” lo spazio tempo), formata da un 95% di CDM e da un 5% di materia barionica: questi mostrano successo nella formazione di galassie e ammassi di galassie, ma alcuni problemi rimangono; in particolare, il modello richiede una costante di Hubble inferiore a quella preferita dalle osservazioni, e le osservazioni intorno al 1988-1990 hanno mostrato un raggruppamento di galassie su larga scala maggiore del previsto.

Queste difficoltà si sono acuite con la scoperta dell’anisotropia della CMB da parte del team che seguiva i dati del satellite COBE nel 1992<sup>70</sup>, e diversi modelli CDM modificati, tra cui  $\Lambda$ CDM (Lambda – Cold Dark Matter) e materia oscura mista fredda e calda, sono stati presi in considerazione attivamente per tutti gli anni '90.

A confondere le carte, creando sorpresa e scompiglio, è la pubblicazione dei dati relativi alla osservazione di molte supernove 1a, compiute dagli statunitensi Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess, che nel 1998 constatano che l’espansione dell’universo non sta rallentando, ma addirittura accelerando<sup>71</sup>: deve esistere una teorica “energia del vuoto” (**energia oscura**), proporzionale al volume del cosmo, che tende a dilatarlo; le caratteristiche fisiche di questa energia sono del tutto assimilabili a quelle della Costante Cosmologica  $\Lambda$  abiurata da Einstein 70 anni prima.

Si perfeziona quindi il modello cosiddetto  $\Lambda$ CDM, che viene rapidamente supportato anche da altre osservazioni: nel 2000 l’analisi del fondo a microonde tramite l’esperimento BOOMERanG<sup>72</sup> ha misurato che la densità totale (materia-energia) era vicina al 100% del valore critico; considerando che nel 2001 l’indagine 2dFGRS sul redshift delle galassie ha misurato una densità di materia prossima al 25 %, la grande differenza tra questi valori supporta un  $\Lambda$  positivo o energia oscura, che dovrebbe quindi contare per circa il 75% della densità di energia totale dell’Universo. Misurazioni molto più precise del fondo a microonde da parte di sonde spaziali effettuate da WMAP nel 2003-2010 e da Planck nel 2013-2015 (figura 46) hanno continuato a supportare il modello e a definire i valori dei parametri, la maggior parte dei quali sono vincolati al di sotto dell’1% di incertezza.

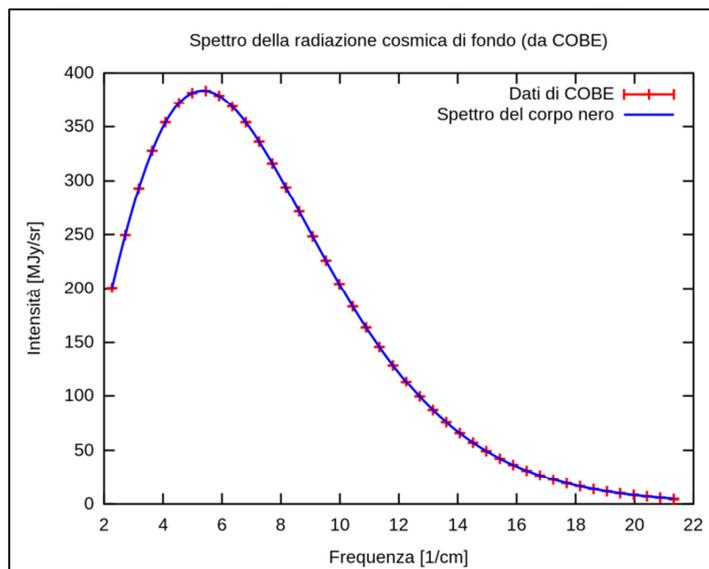


Figura 45: la radiazione cosmica di fondo rilevata dal satellite COBE nel 1992, perfettamente assimilabile alla radiazione di un corpo nero a 2,72548 K.

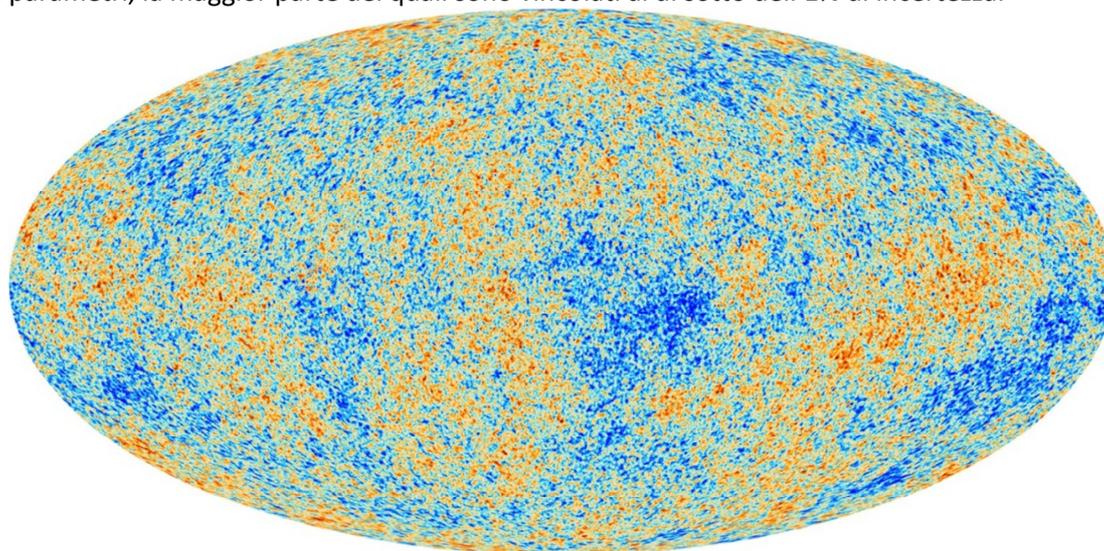


Figura 46: le anisotropie della CMB, al netto dei moti della Terra, come misurate dal satellite Planck nel 2015.

<sup>70</sup> Con conseguente Nobel nel 2006 ai team leader di COBE, George Smoot e John Mather.

<sup>71</sup> Una efficace sintesi dell’importante scoperta venne tempestivamente e magistralmente presentata alle pagine 7, 8 e 9 del numero di Ottobre 2001 dell’Ex Grege!!! I 3 scopritori riceveranno poi il Nobel nel 2011.

<sup>72</sup> Esperimento economico e riuscitissimo, ottenuto tramite rilevazioni stratosferiche in Antartide, grazie alla collaborazione tra i team del Caltech (Andrew Lange) e di Roma La Sapienza (Paolo de Bernardis).

Il Modello  $\Lambda$ CDM, ormai messo a punto al volgere del millennio, produce alcune previsioni di effetti altrimenti non pronosticabili, quali le “oscillazioni acustiche barioniche”<sup>73</sup> (BAO), gli effetti di “lente gravitazionale” e la “Polarizzazione della CMB”.

Già rilevati con misure pionieristiche nel 1979 e nel 1996, effetti di lensing gravitazionale divengono di facile identificazione dopo il 2000. La polarizzazione della CMB viene rilevata già nel 2002 dalla collaborazione antartica DASI, mentre le BAO sono rilevate dallo Sloan Digital Sky Survey nel 2005.

Manca un’ultima verifica ai dettagli della Relatività Generale di Einstein e del Modello Cosmologico del Big Bang Inflazionario che ne consegue: nel 1916, controllando le sue equazioni di campo, Einstein aveva trovato soluzioni ondulatorie per il tensore metrico, increspature dello spazio tempo che si sarebbero generate in condizioni estreme di collassi gravitazionali, simili alle oscillazioni del campo elettromagnetico nelle equazioni di Maxwell. Bisogna aspettare il 1974 perché Russell A. Hulse e Joseph H. Taylor, con misure veramente estreme, rilevino il decadimento orbitale di due pulsar di un sistema binario. Se decadono è perché la loro energia diminuisce, ed il modo in cui diminuisce è consistente con la previsione di emissione di onde gravitazionali. Sicuramente è un’osservazione molto indiretta, ma sufficiente a fruttare il Nobel ai due astrofisici nel 1993.

Bisogna pazientare fino al 2015, quando nella comunità scientifica (ancora eccitata per le misure del satellite Planck) si comincia a vociferare di rilievi diretti di onde gravitazionali. Infatti nel 2016, a 100 anni esatti dalla previsione di Einstein, le molte centinaia di ricercatori che lavorano agli osservatori interferometrici LIGO (due rivelatori negli USA) e Virgo (rivelatore europeo presso Pisa, in Italia) possono congratularsi per aver effettuato la prima misura diretta di onde gravitazionali, premiata già l’anno successivo con il Nobel a Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry C. Barish.

Il modello cosmologico è consistente e suffragato da decisive osservazioni ed importanti previsioni confermate. Il Big Bang (figura 47) non è un’esplosione, ma l’improvvisa comparsa di una singolarità, di uno spaziotempo infinitamente piccolo, denso e caldo, avvenuta circa 13,7 miliardi di anni fa. Il Modello Standard delle Particelle racchiude le tre forze elettromagnetica, nucleare debole e nucleare forte, che in principio erano tutt’uno tra loro e con la forza gravitazionale; durante l’espansione ed il conseguente “raffreddamento” a livelli energetici molto inferiori, alcune simmetrie si sono rotte e le forze disaccoppiate.

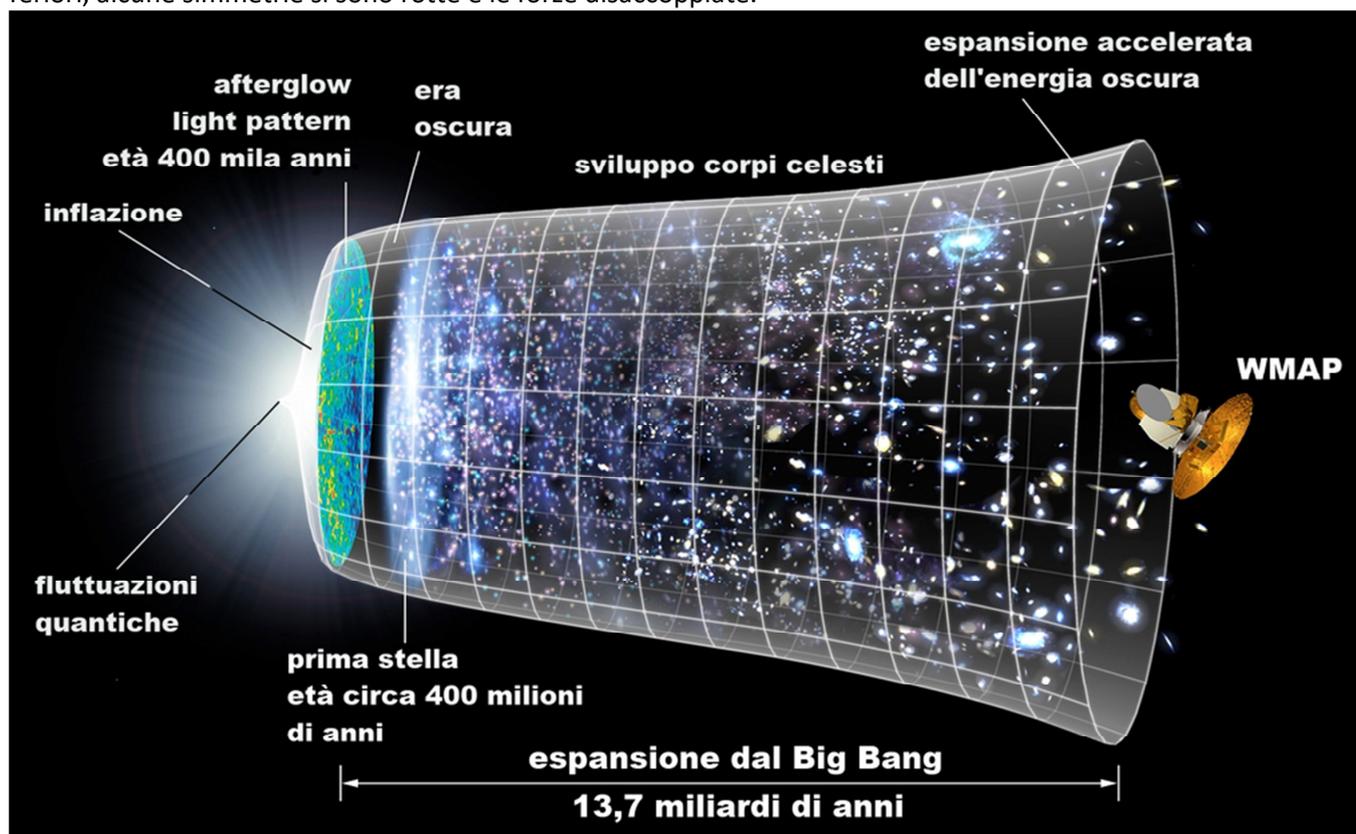


Figura 47: rappresentazione grafica dell'espansione dell'universo secondo il Modello Cosmologico Standard  $\Lambda$ CDM.

<sup>73</sup> Le BAO sono oscillazioni nella densità di materia barionica nel plasma primordiale, “congelate” nell’era della ricombinazione, quando l’universo è diventato trasparente e la CMB è stata emessa. Queste deboli oscillazioni di densità hanno poi generato i superammassi di galassie e la loro lunghezza d’onda può essere utilizzata come “righello” universale per valutare grandi distanze cosmiche. Nell’universo attuale questa lunghezza d’onda misura circa 490 milioni di anni luce (o, circa, 4.650 miliardi di miliardi di km).

Nessun modello ci dice cosa è successo nell'istante del Big Bang e fino a  $10^{-40}$  secondi dopo, ma in quel momento ("Era della Grande Unificazione") il diametro dell'universo era di circa  $10^{-35}$  m e la temperatura di  $10^{30}$  K; subito dopo la gravità si dissocia dalle altre forze ed ha inizio l'inflazione (dopo  $10^{-35}$  secondi), l'universo balza da  $10^{-27}$  m di diametro a 10 m in  $10^{-32}$  secondi, mentre la temperatura scende a  $10^{27}$  K. La forza nucleare forte si disaccoppia dalla elettrodebole.

A  $10^{-27}$  secondi anche la forza debole e quella elettromagnetica si separano, mentre l'inflazione continua a dilatare molto rapidamente l'universo, ormai grande un miliardo di km e sceso a  $10^{15}$  K.

Si arriva al primo microsecondo di vita dell'universo ( $10^{-6}$  secondi) dominati dal plasma quark-gluonico, con la formazione dei primi adroni (universo di 100 miliardi di km a  $10^{13}$  K); è in questo periodo che si genera lo squilibrio tra materia ed antimateria, a favore della prima (ma ancora non si sa perché).

Nei successivi tre minuti i protoni ed i neutroni si stabilizzano, ma prima che la temperatura scenda abbastanza da permettere a protoni e neutroni di formare nuclei di elio, la maggioranza dei neutroni fa in tempo a decadere in protoni, influenzando l'esito della nucleosintesi primordiale, che emerge con i citati 92% di nuclei di atomi di idrogeno (protoni liberi), 8% di nuclei di elio e tracce di litio, in un universo di qualche migliaio di anni luce di diametro a 100 milioni di gradi.

Sono serviti circa 380.000 anni perché la temperatura scendesse ai circa 3.000 K necessari affinché la radiazione elettromagnetica non ionizzasse più gli atomi, strappando con la sua energia gli elettroni dai nuclei. È in questo istante che l'universo diventa trasparente e la CMB viene emessa.

Nei successivi 7 miliardi di anni la gravità rallenta l'espansione dell'universo, ma poi l'energia del vuoto, proporzionale alle dimensioni dell'universo, prende il sopravvento e l'espansione, lentamente, accelera.

I fotoni della CMB che ci raggiungono oggi hanno viaggiato per 13,7 miliardi di anni, ma i punti di spazio da cui sono partiti oggi si trovano a circa 46 miliardi di anni luce da noi (misura che rappresenta il raggio del nostro universo osservabile), ma l'universo si estende molto oltre, teoricamente all'infinito, se la sua geometria è veramente piatta.

Oggi circa il 4,9% della massa che appiattisce la geometria dell'universo è rappresentato da materia barionica (con quote frazionarie per radiazione elettromagnetica e neutrini), il 26,8% da materia oscura, mentre il rimanente 68,3% dovrebbe essere costituito da energia oscura.

Quindi? Abbiamo due modelli meravigliosi, probabilmente le massime realizzazioni concettuali della mente umana, frutto degli sforzi di migliaia di geni nell'arco di secoli. Spiegano praticamente tutti i fenomeni, dalle scale infinitamente piccole a quelle infinitamente grandi, dalla nascita dell'universo al futuro più remoto; forniscono entrambi previsioni verificabili in esperimenti fino a 10-12 cifre significative; entrambi hanno previsto effetti totalmente controintuitivi superando qualsiasi immaginazione e fantasia umane ... non potremmo sederci soddisfatti e godercene i successi?

C'è un piccolo dettaglio, che cruccia però milioni di scienziati: i due modelli sono tra loro INCONCILIABILI!

Gli eleganti tensori della metrica einsteiniana descrivono uno spaziotempo che si incurva, liscio, in obbedienza alla concentrazione di materia, trascurando gli effetti della schiuma quantistica indotta anche nello spazio vuoto a piccolissime scale ( $10^{-43}$  m) dal Principio di Indeterminazione di Heisenberg; i numeri complessi della Meccanica Quantistica probabilistica mal si alloggiano tra i numeri reali delle matrici relativistiche deterministiche; la Relatività Generale descrive un campo relativistico, ma non quantistico, che non riesce proprio a coniugarsi con le teorie dei campi relativistici e quantistici di Higgs, della QED e della QCD.

Come detto, già Einstein spese gli ultimi 30 anni della sua vita nel vano tentativo di conciliare Relatività Generale e MQ in una Teoria del Tutto (ToE).

Oltre ad Einstein, già negli anni '20 alcuni dei massimi scienziati dell'epoca si cimentarono nel tentativo: oltre ai citati matematici tedeschi David Hilbert ed Ermann Weyl ed all'astronomo inglese Arthur Eddington, degni di menzione i tentativi del fisico finlandese Gunnar Nordstrom e, soprattutto, del matematico e fisico tedesco Theodor Kaluza e del fisico svedese Oskar Klein, che postularono per primi l'esistenza di dimensioni extra oltre alle 4 dello spaziotempo di Einstein, con progressi riassunti nella Teoria di Kaluza-Klein (1926).

Nei decenni successivi significativi i tentativi di John A. Wheeler e di Stephen Hawking.

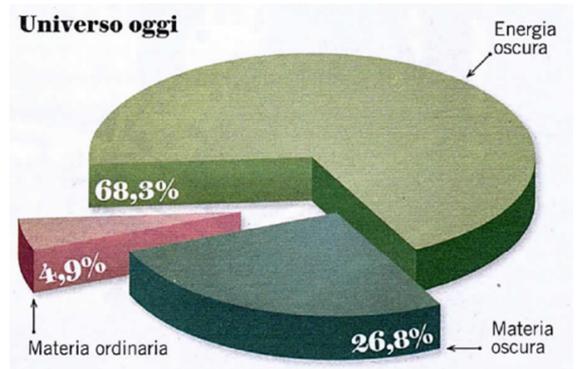


Figura 48: Nell'universo odierno la materia ordinaria, cioè tutto ciò di cui abbiamo esperienza, costituisce meno di 1/20 del totale.

Nell'ultimo quarto del secolo XX nascono svariati modelli per integrare MQ e relatività: nel 1974 Bruno Zumino, Julius Wess e Sergio Ferrara propongono una versione completa della cosiddetta Supersimmetria, che agevola l'integrazione postulando che per ogni bosone e fermione esistano rispettivamente un fermione ed un bosone di uguale massa (purtroppo mai emersi in 50 anni di ricerca); nel 1976 sono Daniel Z. Freedman, Peter van Nieuwenhuizen e Sergio Ferrara a proporre la Supergravità, che integra Supersimmetria e Relatività Generale.

Nel 1968 Gabriele Veneziano aveva impostato un modello a "stringhe"<sup>74</sup> per spiegare le caratteristiche degli adroni; perfezionato nel 1970 da Yoichiro Nambu, Holger B. Nielsen e Leonard Susskind, il modello viene poi accantonato a seguito del successo della QCD. Nella teoria i modi di vibrare delle stringhe comportano le caratteristiche di particelle diverse. Nel 1984 John Schwarz e Michael Green riescono ad annullare alcune anomalie teoriche nella descrizione di alcuni tipi di stringhe; nel 1994 Edward Witten dimostra che le 5 Teorie delle Stringhe (a 10 dimensioni) esistenti sono tutte espressioni di una teoria sovrastante a 11 dimensioni ("M-Teoria delle Superstringhe"), balzata agli onori della cronaca nel 1999 grazie al best seller di Brian Greene "L'universo elegante". Malgrado l'estrema eleganza (e complessità) della teoria, ad oggi non vi sono conferme sperimentali alle sue previsioni, e gli entusiasmi sulla sua veridicità si sono alquanto smorzati.

Nel 1986 il fisico indiano Abhay Ashtekar applica i "loop" sviluppati da Kenneth Wilson nel 1974 per riformulare le equazioni di campo della Relatività con connessioni complesse ed effettuare una quantizzazione non perturbativa della gravità. Nel 1990 sono l'italiano Carlo Rovelli e lo statunitense Lee Smolin ad ottenere una base esplicita di stati di geometria quantistica, denominata "rete di spin". È l'embrione della "Gravità Quantistica a Loop", cui contribuiscono significativamente anche l'inglese Roger Penrose, l'argentino Jorge Pullin, lo statunitense Ted Jacobson ed il polacco Jerzy Lewandowski. Anche questo modello di quantizzazione della gravità non ha portato a conferme sperimentali di nessun tipo.

In figura 49 si vede come l'elettricità ed il magnetismo siano stati unificati nel 1865 da Maxwell nelle interazioni elettromagnetiche, confluite con l'interazione debole nella QED nel 1967, grazie a Glashow, Weinberg e Salam. L'interazione forte è stata descritta dalla QCD, che insieme alla QED forma il Modello Standard delle Particelle, ma che non sono ancora unificate in una descrizione armonica, in un'unica trattazione matematica, tanto agognata e denominata Grande Teoria di Unificazione (GUT). La gravità è descritta dalla Relatività Generale, che andrà quantizzata ed unificata alla GUT in una ToE (Theory of Everything) che sia capace di descrivere tutto ciò che c'è in natura, al suo stato fondamentale. La strada è tracciata, ma ce n'è ancora un bel pezzo da percorrere.

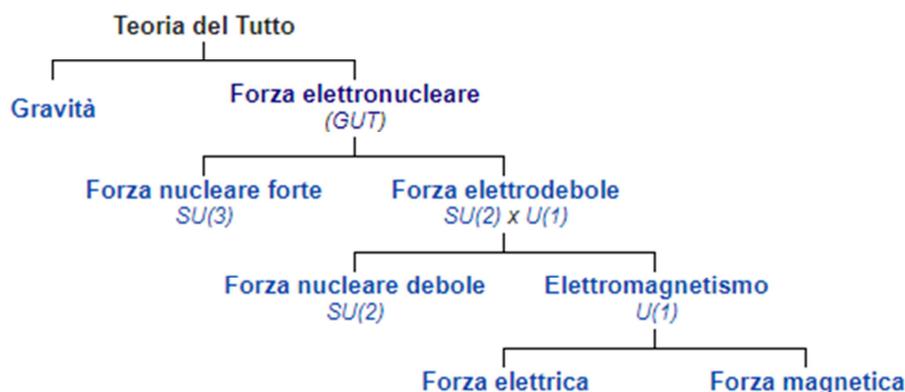


Figura 49: unificazioni di forze, rotture di simmetrie e gruppi unitari

Inoltre, non abbiamo ancora idea di cosa siano tante cose, che formano il 95% dell'universo, o di come funzionano nel dettaglio cose che abbiamo appena intuito:

- Di cosa è fatta la materia oscura?
- Che proprietà ha l'energia oscura?
- Perché la densità di energia e materia dell'universo è quasi esattamente quella critica che ne appiattisce la geometria?
- Possono esistere forme topologiche dell'universo che rispettano le attuali conoscenze e ne limitano le dimensioni senza imporgli confini (come per la superficie terrestre, finita ma illimitata)?
- Perché l'universo abbonda di materia, mentre non v'è quasi antimateria, quando nelle reazioni note queste si creano ed annichilano sempre insieme?
- Quali sono le implicazioni della "non località" della realtà confermata dalla violazione della disuguaglianza di Bell da parte dell'Entanglement?
- La realtà, dunque, esiste realmente?
- Perché i neutrini hanno massa (e quale), se il modello standard non lo prevede?

<sup>74</sup> Le particelle elementari che costituiscono la materia non sarebbero puntiformi, ma piccolissime stringhe.

- Che ruolo può avere l'eventuale soluzione del Paradosso dell'Informazione del buco nero<sup>75</sup> nella quantizzazione della Relatività Generale?
- Il Principio Olografico<sup>76</sup> può essere dimostrato sperimentalmente ed avere un ruolo importante nel conciliare Relatività Generale e Meccanica Quantistica?

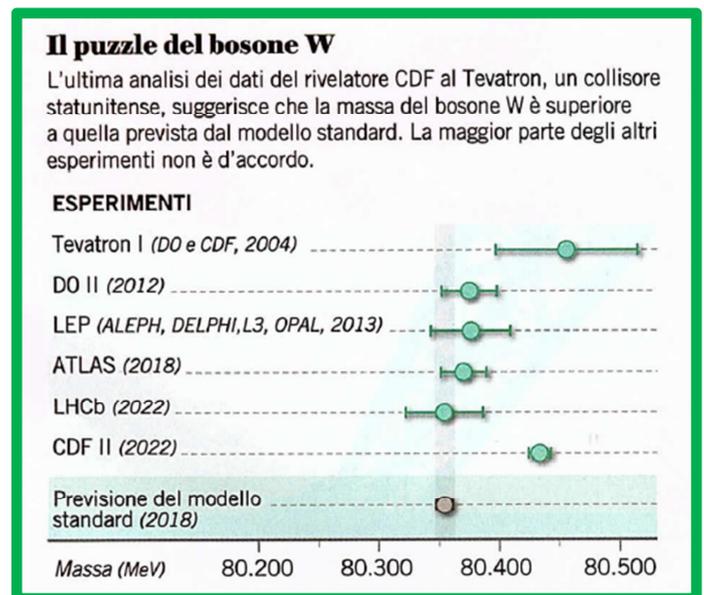
Quindi ... sì, c'è un disperato bisogno di nuove scoperte, di conferme e di rivoluzioni, di proposte teoriche fuori dagli schemi, di nuove particelle, nuove formule, nuovi esperimenti, nuova matematica, nuova fisica, qualsiasi cosa apra crepe nei Modelli Standard e sveli spiragli di nuove entità fisiche, dia nuove idee, ispiri nuove intuizioni ... ed il CERN ha qualcosa da dire (si spera) a riguardo.

## I NUOVI TEST AL CERN, PER SPOSTARE I CONFINI DELLA CONOSCENZA

Vediamo dove si concentrerà l'attenzione delle migliaia di ricercatori che analizzeranno i dati degli esperimenti del CERN, da quali osservazioni sperano di estrapolare indizi di una nuova fisica, spiragli per ampliare la conoscenza.

### Discrepanze nella misura della massa del bosone W

Il bosone W, il mediatore dell'interazione debole scoperto dal team di Rubbia nel 1983, dovrebbe avere per il Modello Standard delle Particelle una massa di 80,357 MeV/c<sup>2</sup>, confermata in molteplici esperimenti al CERN con l'SPS nel 1983 e nei collisori dell'LHC dal 2013 al 2022. Viceversa nel 2004 i rivelatori DO e CDF del Fermilab di Chicago hanno fornito una valutazione superiore a 80,45, seppur piuttosto grossolana; il DO II, migliorato nel 2012, ha fornito valori in linea con le attese e con le rilevazioni del CERN, ma il CDF II, campagna di misure estremamente accurate compiute nel 2022, ha fornito un valore di 80,433 MeV/c<sup>2</sup>. Nel riquadro qua a lato sono riportati i valori rilevati, con la barra d'errore che si estende di 1σ dai due lati del valore centrale: anche considerando 5σ per la campagna di misure CDF II, la probabilità che la misura ricada nel range del valore atteso è ormai remotissima. Le misurazioni di CMS, ATLAS ed LHCb serviranno a capire se questo scostamento è reale e se può dipendere dall'interazione con campi sconosciuti, o se manca un affinamento del Modello.



### Il decadimento del mesone B<sup>+</sup> e la violazione dell'universalità leptonica

Il mesone B<sup>+</sup> è un adrone e, come tutti i mesoni, è formato dall'unione di un quark ed un antiquark; in particolare è formato da un antiquark bottom e da un quark up.

Il B<sup>+</sup> è una particella di transizione nelle "cascate" di particelle che si formano nelle collisioni. A sua volta decade rapidamente con due diverse modalità di decadimento, che hanno in comune la creazione di un Kaone carico po-

<sup>75</sup> Proposto da Stephen Hawking e Jacob Bekenstein nel 1975, è uno dei paradossi che emergono dal tentativo di dover far "lavorare" contemporaneamente MQ e RG sull'orizzonte degli eventi di un buco nero (e analogamente, negli istanti iniziali di vita dell'universo). Trasformando tutto ciò che inghiotte in una singolarità gravitazionale, il buco nero distruggerebbe ingenti quantità di "informazione", contravvenendo alla reversibilità di svariate leggi della fisica e ad alcuni principi della Termodinamica.

<sup>76</sup> Si suppone che il Principio Olografico sia una parte integrante della Teoria delle Stringhe e, verosimilmente, di qualsiasi descrizione quantistica della gravità: consiste nella possibilità che il contenuto di informazione di un sistema sia proporzionale alla sua superficie, non al suo volume (come si sarebbe portati a pensare), e quindi che la descrizione di uno spazio n-dimensionale possa essere codificata in un suo sottospazio superficiale (n-1)-dimensionale. Il padre della Teoria dell'Informazione, Claude Shannon, ha scoperto che la descrizione dell'informazione contenuto in un sistema ha formule analoghe a quelle trovate da Maxwell per l'entropia. Il Principio Olografico viene proposto negli anni '70 da Gerardus 't Hooft e Charles Thorn, poi matematizzato con le stringhe da Leonard Susskind (<<Il mondo tridimensionale di cui abbiamo esperienza non è che un ologramma, l'immagine di una realtà codificata su di una distantissima superficie bidimensionale!>>). Recuperando un'idea di John A. Wheeler del 1990 (<<It from a bit!>>, ossia "la realtà origina dall'informazione", quindi non esiste realtà fisica senza una struttura informativa sottostante, che detiene quindi la priorità ontologica), Bekenstein nel 2003 scrive che <<... dovremmo cominciare a considerare il mondo come costituito da informazione, che incidentalmente diviene materia od energia>>.

sitivamente ( $K^+$ ), ma si differiscono per la generazione di due diversi leptoni: un elettrone ed un positrone in un caso, un Muone ed un Antimuone nell'altro caso.

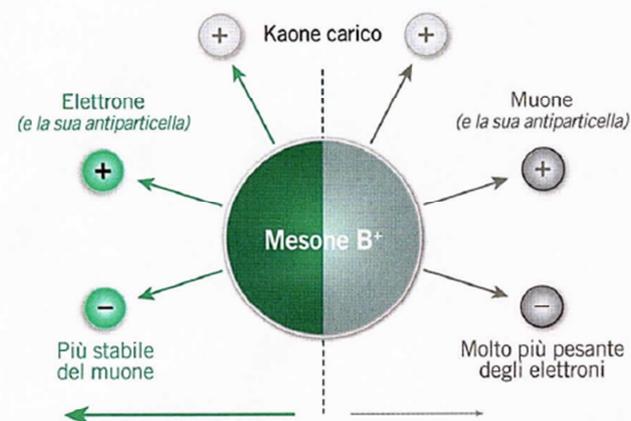
Per i principi di equivalenza e simmetria richiesti dal Modello Standard, esiste un presupposto, chiamato "universalità leptonica" che implica che due decadimenti alternativi aventi come sottoprodotti dei leptoni di generazioni diverse, dovrebbero avvenire con la stessa probabilità. Le campagne di misura portate avanti nel secondo run dell'LHCb, tra il 2015 ed il 2019, avevano fornito accadimenti di decadimento coinvolgenti il Muone inferiori di un 15-20% rispetto alla distribuzione uguagliata tra le due vie di decadimento. Le prime misure del 2021 hanno confermato una carenza del 15%, con la parità (scostamento dello 0%) che ormai si trova a  $3,1\sigma$  dalla misura rilevata. Resta ormai meno dello 0,3% di possibilità che questo non sia l'indizio di una falla del modello Standard nel predire le statistiche di decadimento di alcune particelle.

### Il decadimento dell'antimesone<sup>77</sup> $B^0$ e gli indizi di nuove particelle

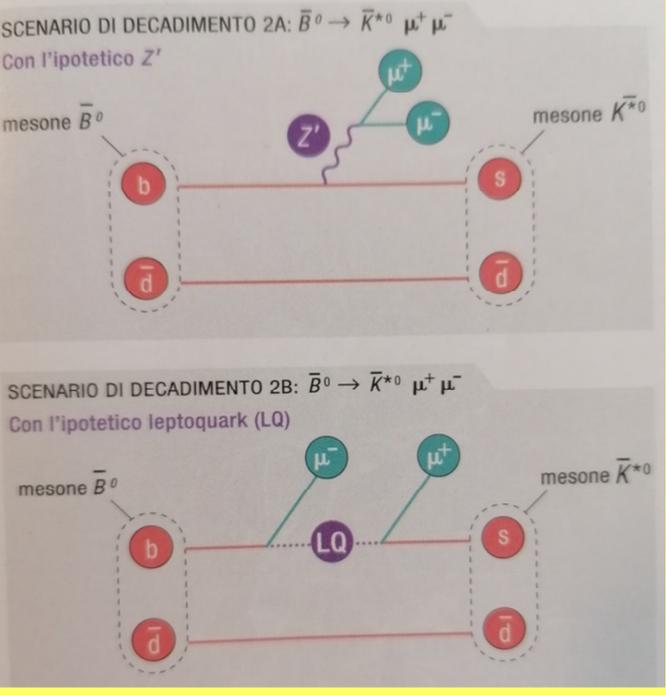
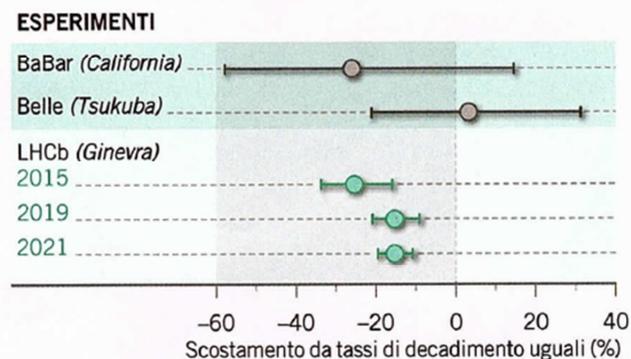
Anche l'antimesone  $B^0$  ha due metodi di decadimento (casella di testo arancione): nel primo caso decade in un mesone  $D^{*+}$ , un tauone ed un antineutrino tauonico (giustificabile passando attraverso la mediazione di un bosone W, benchè più massiccio dell'antimesone  $B^0$  iniziale), nel secondo caso in un antimesone  $K^{*0}$ , un muone ed un antimuone (giustificabile in un complicato scenario che richiede la contemporanea generazione di un quark top, estremamente massivo, e di

### L'anomalia del mesone B

Il mesone  $B^+$  – una particella transitoria – può decadere in due modi che dovrebbero essere ugualmente rari.



LHCb ha osservato il percorso di decadimento dell'elettrone il 15 per cento in più rispetto a quello del muone. Ciò suggerisce l'influenza di particelle al di fuori del modello standard. Ecco come i risultati di LHCb si confrontano con quelli di altri esperimenti.



<sup>77</sup> Il termine "antimesone" non è proprio dell'ambiente della fisica, ma, una volta definiti i mesoni B quelli costituiti da un antiquark bottom e da un altro quark, quelli costituiti da un quark bottom e da un antiquark andrebbero identificati da una linea sopra alla lettera B (così:  $\bar{B}$ ), ma per non appesantire il testo con l'inserimento di svariate formule, lo chiamo impropriamente "antimesone"; chiedo venia, ma ipotizzo che il contesto divulgativo di questo articolo me lo consenta.

bosoni W e Z, che richiederebbero energie decine di volte superiori a quelle disponibili inizialmente nella reazione di decadimento; quantisticamente possibile, benché improbabile).

Questo secondo tipo di decadimento potrebbe essere spiegabile anche appoggiandosi a nuovi tipi di particelle: due diversi scenari (box giallo) si appellano rispettivamente ad un bosone Z' estremamente massivo e ad una ipotetica classe di nuove particelle dette "leptoquark" (LQ). Si spera di raccogliere abbastanza dati per poter avere riscontri significativi di uno di questi scenari (test preliminari nel 2021 e 2022 sembrano poter suffragare l'esistenza dei leptoquark, ma è presto per dirlo). Questo porta al prossimo test ...

**Esistono i "Leptoquark"?**

Se esistono, i leptoquark dovrebbero rispondere alla statistica di Bose-Einstein (cioè essere bosoni, come i mediatori delle forze e come i mesoni), avere i numeri quantici sia dei quark che dei leptoni, e decadere sempre in un quark ed un leptone, o nelle loro antiparticelle. La massa attesa per queste ipotetiche particelle è superiore ad 1 TeV/c<sup>2</sup>, ossia oltre 1.000 volte il protone ed almeno 6 volte il quark top.

Negli scontri a 14 TeV previsti nel 3° run dell'LHC potrebbero emergere nel rivelatore LHCb.

I leptoquark potrebbero fornire un ausilio teorico anche nella risoluzione dell'integrazione in un unico quadro concettuale matematico di QED e QCD, utile anche per affinare il calcolo della previsione del momento di dipolo magnetico del muone, prossimo spunto di ricerca.

**Anomalie nella misura del momento di dipolo magnetico del Muone**

Nell'elettrodinamica classica una particella puntiforme, elettricamente carica, orbitante (per esempio. in moto lungo una traiettoria circolare), possiede un momento di dipolo magnetico  $\mu_L = (e/2m) L$ , dove "e" è la carica elettrica della particella, "m" è la sua massa e "L" è il suo momento angolare orbitale. Questo significa che la particella orbitante si comporta come un piccolo magnete. Tuttavia anche particelle puntiformi in quiete (non orbitanti) possono avere un momento di dipolo magnetico  $\mu \neq 0$ , a causa del loro momento angolare intrinseco "S" (detto spin): esse, sebbene puntiformi, si comportano come se "ruotassero" attorno al proprio asse. Il momento magnetico di spin,  $\mu_S$ , risulta allineato con il momento angolare di spin **S**, e risulta:  $\mu_S = g (e/2m) S$ , dove "g" è il cosiddetto fattore-g, o rapporto giromagnetico adimensionale. Paul Dirac, utilizzando la teoria della meccanica quantistica relativistica, nel 1928 predisse che il fattore-g delle particelle elementari di spin-1/2, come l'elettrone o il muone, fosse esattamente  $g = 2$  (da confrontarsi col valore  $g = 1$ , corrispondente al momento angolare orbitale). Inizialmente questa predizione sembrò in accordo con gli esperimenti di fisica atomica.

Nel 1947 si osservarono tuttavia piccole deviazioni, rispetto a quanto previsto da Dirac, nello studio della struttura iperfine dell'idrogeno e del deuterio. Si propose, come spiegazione, una piccola deviazione del fattore-g dell'elettrone dal valore  $g = 2$ . Nel 1948 Julian Schwinger, utilizzando la teoria dell'elettrodinamica quantistica (QED), calcolò effettivamente una piccola deviazione di "g" dal valore  $g = 2$ , causata dall'emissione e dal riassorbimento di un fotone virtuale da parte dell'elettrone. Il calcolo di Schwinger condusse al famoso risultato  $a_e = (g - 2)/2 = \alpha/2\pi$ , dove  $\alpha \approx 1/137$  è la costante di struttura fine (da cui  $a_e = 0,0011617...$ ). La quantità  $a_e = (g - 2)/2$  fu denominata momento magnetico anomalo dell'elettrone. Gli sviluppi successivi della QED condussero a una determinazione ancora più accurata di  $a_e$ , utilizzando la teoria perturbativa. Oggi lo stato dell'arte è l'inclusione di un numero, che arriva fino a 5 cosiddetti loop, ovvero scambi virtuali di fotoni e fermioni (laddove il calcolo di Schwinger era limitato a un solo loop, nel quale era scambiato un fotone). Nel 2012, dopo molti anni di lavoro (con il contributo essenziale di E. Remiddi e S. Laporta, dell'Università di Bologna), T. Kinoshita e collaboratori terminarono il calcolo di 12 672 diagrammi di Feynman; il contributo dei diagrammi a 5 loop è proporzionale ad  $(\alpha/\pi)^5$ , che è una quantità molto piccola, tuttavia ancora rilevante quando si confronta la teoria con l'esperimento. Il momento magnetico anomalo dell'elettrone calcolato dalla teoria è attualmente  $a_e(th) = 1.159\ 652\ 180\ 252\ (95) \times 10^{-3}$ , mentre è  $a_e(exp) = 1.159\ 652\ 180\ 73\ (28) \times 10^{-3}$  il rilievo sperimentale. L'accordo tra teoria ed esperimento è eclatante: la precisione è circa 0,4 parti per miliardo ( $10^9$ ), con le prime 10 cifre significative uguali.

Assai peggiore è invece l'accordo tra teoria ed esperimento nel caso del muone (disaccordo di 2,4 parti per milione). Il motivo è che il momento magnetico anomalo del muone,  $a_\mu$ , non è soltanto un effetto della QED, ma contiene anche contributi significativi da parte delle forze deboli e forti del Modello Stan-

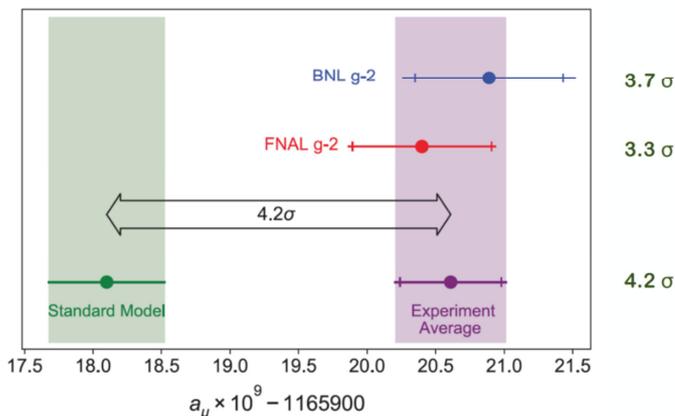


Figura 50: valori recentemente misurati del momento di dipolo magnetico del muone e scostamento col valore teorico calcolato.

dard delle Particelle. Inoltre ogni particella o forza sconosciuta in natura potrebbe contribuire in aggiunta a quelle già conosciute. Il momento magnetico del muone è una delle grandezze fisiche misurate con maggiore precisione (più di una parte per miliardo). Essa è anche calcolabile con una precisione estremamente elevata nel Modello Standard, per cui costituisce una delle verifiche più stringenti per la teoria. Attualmente la predizione del Modello Standard è  $a_{\mu}(\text{th}) = 1.165\,918\,10(43) \times 10^{-3}$ , mentre la prima misura sperimentale accurata ha condotto al valore  $a_{\mu}(\text{exp}) = 1.165\,920\,89(63) \times 10^{-3}$ , con una discrepanza di circa 3.7 deviazioni standard. Misure successive (figura 50) hanno fornito valori simili, con discrepanze comunque significative (anche se non ancora determinanti) di  $3,3\sigma$  e  $4,2\sigma$ . Questa è forse la sola chiara deviazione dal Modello Standard nel panorama della fisica delle alte energie. Sono state formulate ipotesi che tentano di spiegare questa deviazione come un effetto quantistico di nuove particelle esotiche. Tuttavia è ancora possibile che la discrepanza sia il risultato di un errore sistematico nelle misure sperimentali oppure nel calcolo teorico.

Per progredire nella comprensione dell'origine della discrepanza, sul lato sperimentale, è in corso una nuova misura al Fermilab, che ha come obiettivo la riduzione dell'errore di un fattore 4. Un'analoga riduzione dell'errore sarebbe auspicabile anche sul lato teorico, ma non è per nulla semplice. La maggiore sorgente di errore sul lato teorico è la determinazione del contributo adronico alla polarizzazione del vuoto, che non è calcolabile con metodi perturbativi. L'approccio attuale alla determinazione di tale contributo consiste nell'utilizzo di un gran numero di misure sperimentali da dalle quali viene ricavato mediante un sofisticato fit combinato. L'alternativa sarebbe un calcolo non-perturbativo di QCD su reticolo, ma quest' tecnica non riesce ancora a raggiungere la precisione necessaria.

I migliori dati sperimentali oggi disponibili sono stati ricavati nell'esperimento "Muon g-2" del Fermilab, ma nel 2021 al CERN è cominciata la raccolta dati preliminare per la messa a punto del sistema di rilevamento dell'esperimento "MUonE" (MUon ON Elastic scattering), approvato nel 2016 sull'anello SPS e con una forte partecipazione italiana dell'INFN e dell'Università di Bologna (Figura 51).

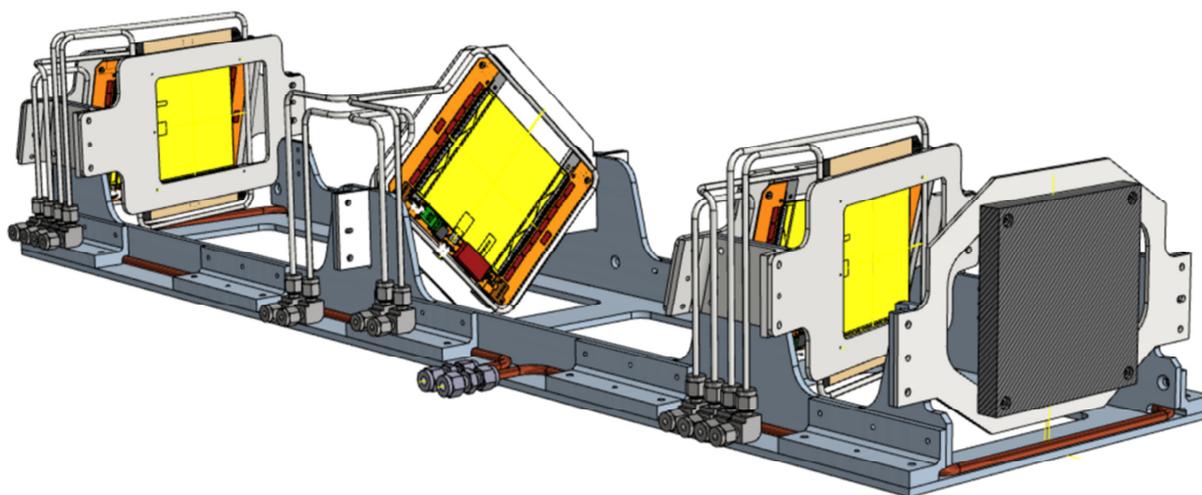


Figura 51: Struttura dei rivelatori del progetto MUonE all'anello SPS del CERN.

### Un nuovo leptone oltre il Modello Standard

In una conferenza del 2022 i ricercatori del rivelatore CMS dell'LHC del CERN hanno rivelato dati emersi in una ricerca i cui risultati lascerebbero presagire l'esistenza di una particella di tipo leptonic che andrebbe oltre il Modello Standard. Tale particella, interagendo con i leptoquark, decadrebbe in quark bottom e tauoni, proprio particelle delle quali si è notato un leggero eccesso sulle previsioni. Pare che anche nell'esperimento LHCb stia emergendo un analogo andamento di dati.

### Indizi di particelle cariche, pesanti, a lunga vita media

Nel secondo run, su migliaia di miliardi di eventi di collisioni, sono emersi gli "echi" di 7 eventi che sembrano coinvolgere particelle da  $1,4 \text{ TeV}/c^2$ , cioè otto volte più pesanti della più pesante particella conosciuta, il quark top. I dati sono ancora assolutamente inconsistenti, ma è un indizio intrigante che va investigato ed approfondito.

### Più informazioni sul plasma quark-gluonico

Quando non accelera protoni ed antiprotoni da far collidere, LHC può fare altrettanto con ioni di piombo. L'esperimento ALICE è predisposto per lo studio della "zuppa" che si forma nei violentissimi urti tra questi nuclei pesanti, in grado di riprodurre localmente le condizioni esistenti un microsecondo dopo il Big Bang, utili per verificare le condizioni in cui alcune forze fondamentali erano ancora accoppiate, compiendo ulteriori passi verso la definizione delle Teorie di Grande Unificazione e del Tutto.

## A caccia di candidati per la materia oscura

L'esperimento FASER, posizionato a 500 m da ATLAS, è predisposto per la caccia di particelle leggere debolmente interagenti, possibili candidate per la materia oscura. Tra queste la massa dei neutrini e gli eventuali "fotoni oscuri", partner dei fotoni, ma interagenti con la materia oscura invece che con la materia barionica. Il range di energie preferenziali ove si concentra la ricerca dei fotoni oscuri è tra  $1 \text{ MeV}/c^2$  e  $1.000 \text{ MeV}/c^2$ .

Anche le particelle teoriche "assioni" sono potenziali candidati ad un contributo alla materia oscura. Essendo mutuata dalla QED in molti aspetti, anche la QCD dovrebbe poter violare la simmetria CP, ma ciò non è mai stato osservato sperimentalmente. Nel 1977 l'italiano Roberto Peccei e l'australiana Helen Quinn proposero che la mancata violazione della simmetria CP dovesse dipendere dalla presenza di un campo quantistico, portatore di una particella molto leggera, denominata assione da Frank Wilczek l'anno successivo.

Se esistono, gli assioni dovrebbero permeare lo spazio sotto forma di condensato di Bose-Einstein, ed avere massa ridottissima, tra  $10^{-12}$  e  $10^{-9} \text{ MeV}/c^2$ .

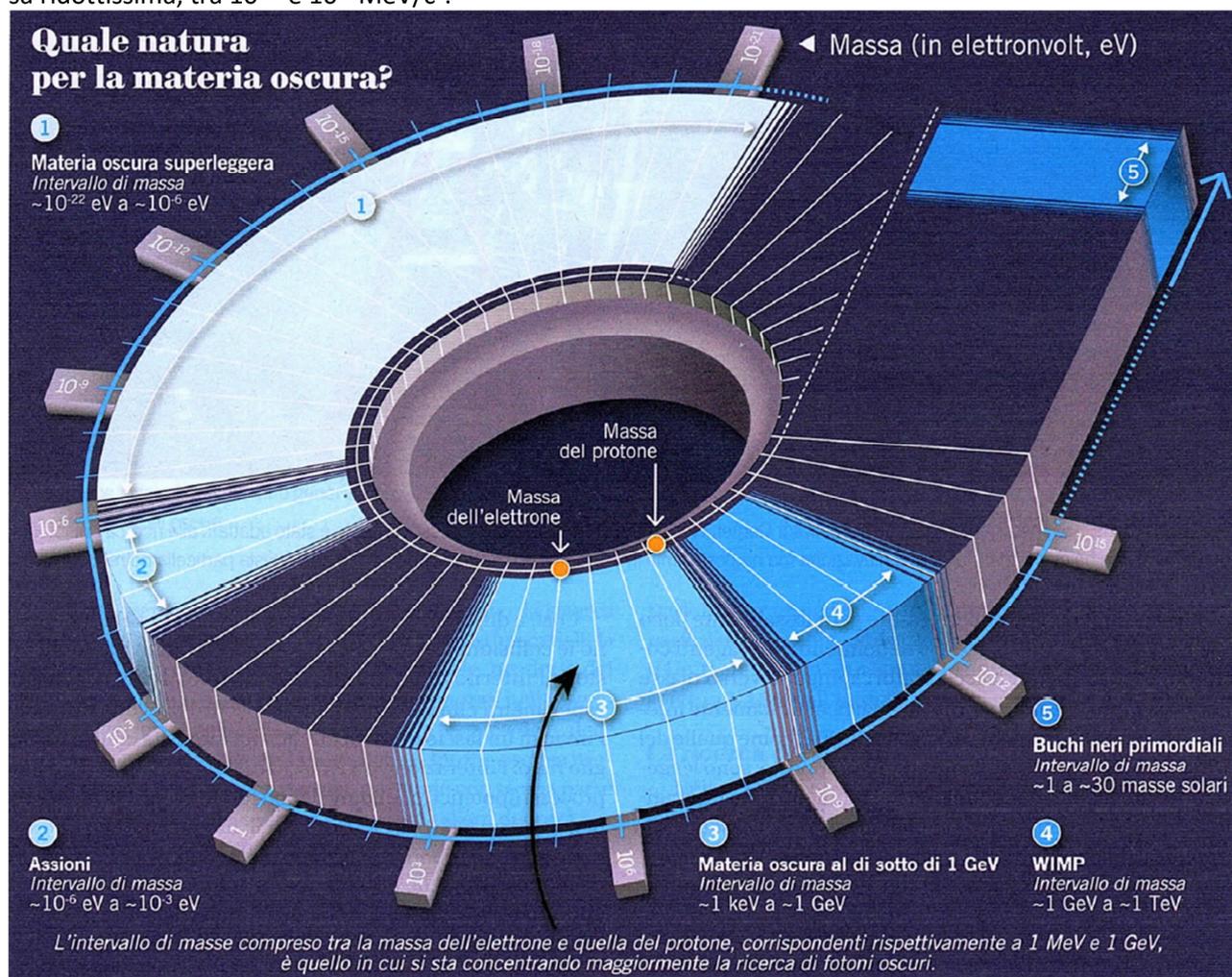


Figura 52: da  $10^{-21} \text{ eV}/c^2$  a 30 masse solari, la caccia alla materia oscura deve poter spaziare alla ricerca di oggetti aventi masse potenzialmente sparse su 88 ordini di grandezza!!! Inimmaginabile!

## La massa dei neutrini: quanta e perché

Abbiamo visto che i leptoni neutri detti neutrini, esistenti nei 3 autostati elettronico, muonico e tauonico, non dovrebbero avere massa secondo il Modello Standard, ma devono averla per poter "oscillare" tra i tre autostati nel loro viaggio dal Sole alla Terra, o da Ginevra al Gran Sasso.

Benché LHC non sia costruito per rilevare neutrini, ne genera molti nelle sue reazioni di decadimento, che poi possono essere rilevati da FASER o ai laboratori del Gran Sasso. Decenni di esperimenti hanno fornito un limite superiore alle masse delle tre tipologie di neutrini:  $0,0000008 \text{ MeV}/c^2$  per il neutrino elettronico<sup>78</sup>,  $0,17 \text{ MeV}/c^2$  per il neutrino muonico,  $15,5 \text{ MeV}/c^2$  per il neutrino tauonico,

Il fatto che i neutrini abbiano massa è il principale indizio dell'esistenza di leggi fisiche destinate ad ampliare il Modello Standard.

<sup>78</sup> Valore aggiornato ai risultati dell'esperimento Katrin, del Karlsruhe Institute of Technology, pubblicati a inizio 2022, che hanno abbassato dai precedenti  $2,2 \text{ eV}/c^2$  a  $0,8 \text{ eV}/c^2$  il limite superiore per la massa del neutrino elettronico.

## UNA VISIONE EURISTICA

Un avviso per i pochi lettori che avranno retto fino a questo punto: quella che segue non è la descrizione di una comprovata teoria scientifica, né un modello matematico avanzato che aspiri ad esserlo, in attesa di conferme sperimentali; non è neppure una seria bozza di lavoro ... è più assimilabile ad una chiacchiera da bar, magari il bar di un campus universitario, o di un centro di ricerca, dove un giovane ricercatore con un tasso alcolico superiore al solito, dopo i festeggiamenti per una giornata positiva, presenta ad amici e colleghi, con eloquio eccessivamente fluido e sciolto, una visione, il confuso concretizzarsi di una serie di sensazioni, di intuizioni, di opinioni, per quanto fondate su solide ed ampie basi, di quella che è una pura bozza di sviluppo, euristica appunto, una traccia di quella che potrebbe essere la continuazione del percorso fin qui descritto su quanto già scoperto, azzardando ipotesi su quello che manca da percorrere.

Il primo punto è lo spaziotempo, la cui curvatura nulla su ampia scala implica infinitezza di dimensioni.

Nella storia della scienza tutte le volte che ci si è trovati di fronte a degli infiniti si è dovuto cambiare approccio, per scoprire che infinita era solo la nostra ignoranza, che i modelli che utilizzavamo erano stati "strattonati" al di fuori degli ambiti di validità nei quali erano stati sviluppati, che servivano nuovi modelli, nuovi esperimenti, nuova scienza.

L'infinito può esistere solo in Matematica ed in Teologia; l'infinito è brutto ed assurdo, intollerabile per i paradossi estremi che inevitabilmente genera: un corpo umano è composto da circa  $7 \cdot 10^{28}$  particelle, le cui combinazioni di posizionamento casuale sono talmente tante da essere un numero tanto enorme da risultare inimmaginabile ed indescrivibile, ma non infinito, ciò significa che in un universo infinito prima o poi la combinazione di particelle che ci caratterizza si ripeterà, e quindi da qualche parte c'è un altro *me* che sta scrivendo questo articolo, e da un'altra parte c'è un altro *te* che lo sta leggendo, esattamente uguali, con la stessa storia e lo stesso carattere; e tra noi e loro miliardi di altre copie non esattamente identiche, tutte che fanno la stessa cosa, ma una con una felpa di un colore un po' diverso, una senza un neo, una con sei dita, una con ricordi un po' diversi, una con gli occhi gialli.

Per quanto lo si riduca, l'infinito resta sempre infinito, quindi col Big Bang dovrebbe essere uscito dal nulla un infinito infinitamente grande ed infinitamente caldo, che poi ha cominciato a crescere ulteriormente.

La superficie terrestre è poco più di mezzo miliardo di chilometri quadrati, ma non ha limiti: per quanto si viaggi non si trova mai una fine (con buona pace dei terrapiattisti), ma a chi nel medioevo non usciva dalla vallata in cui abitava per tutta la vita la Terra poteva sembrare piatta, creandosene una visione distorta. Dobbiamo uscire dalla nostra vallata di 92 miliardi di anni luce e concepire una topologia che possa descrivere uno spazio piatto (o debolmente incurvato) ma chiuso, finito ma illimitato. L'universo sarà anche grandissimo, forse anche migliaia di miliardi di anni luce, ma non può essere infinito, e questa è un'importante direzione di ricerca.

Un'altra considerazione: fino a una manciata di secoli fa eravamo tranquilli (si fa per dire), creati ad immagine del divino, con una vasta terra ben piatta e ferma a nostra disposizione per agricoltura ed allevamento, ben piantati al centro dell'universo, indaffarati nelle cose terrene, mentre il cielo perfetto, con le stelle fisse e le orbite circolari, si ergeva sopra di noi in varie sfere concentriche.

Se ci pensate, ogni significativo progresso è avvenuto quando abbiamo sradicato una delle convinzioni ataviche che caratterizzavano la nostra percezione immediata, semplificata ma intuitiva, del mondo: la terra non è ferma, le stelle non sono fisse, le orbite non sono circolari, il cielo non è perfetto ed immutabile, né fatto di sfere concentriche; abbiamo dovuto togliere la Terra dal centro dell'universo per metterci il Sole, poi abbiamo sostituito il Sole con la Via Lattea, poi abbiamo capito che l'universo un centro non ce l'ha proprio. Abbiamo scoperto che non siamo stati creati belli e puri, ma che siamo cugini degli scimmioni e, con loro, pronipoti di un topo, a sua volta disceso da una specie di salamandra, originata da un pesce, derivato da un simil-verme disceso da un gruppo di microbi. Infine abbiamo dovuto accettare che la materia di cui siamo fatti e di cui sono fatte tutte le cose di cui abbiamo esperienza non è che una piccola parte di ciò che esiste, e che il resto, la maggioranza, ci sfugge.

Se l'uomo vuole progredire deve umiliare la propria alterigia!

A cosa possiamo rinunciare ancora per arrivare ad una comprensione più profonda dell'universo? Fatti di polvere di stelle, di materia minoritaria, confinati su di un pianetino instabile che gira attorno ad una stella come tante altre decine di miliardi, alla periferia di una galassia a sua volta marginale nel superammasso di appartenenza, tra centinaia di miliardi di altre galassie, di cosa possiamo ancora privare la nostra presunzione?

Cerchiamo spunti dalla violazione della disuguaglianza di Bell e dal Principio Olografico.

La disuguaglianza di Bell si basa su tre assunti:

- a) Esistono fenomeni reali indipendentemente dalla presenza di osservatori;
- b) È legittimo trarre conclusioni logiche generiche sulla base di esperimenti ed osservazioni validi;
- c) Non c'è segnale (portatore di informazione) che possa viaggiare al di sopra della velocità della luce.

Il fatto che la disuguaglianza sia violata implica che almeno uno dei tre è falso!

Il #b è il motivo stesso per cui esiste la scienza e noi possiamo trovare risposte: gli esperimenti sono ripetibili e le osservazioni fatte migliaia di anni fa sono consistenti con quelle odierne, così come quelle di eventi avvenuti oltre 10 miliardi di anni fa ai limiti dell'universo sono consistenti con i modelli sviluppati qui ed ora; la natura risponde sempre ed ovunque alle stesse leggi nell'universo, ed ha senso cercare di ricostruire queste leggi; la #b è vera! Tutti pronti a rinunciare alla #c, come apparentemente confermato dall'azione a distanza dell'Entanglement, se non fosse che negli ultimi vent'anni esperimenti e studi teorici hanno abbondantemente confermato che <<... non c'è modo di servirsi della non-località per inviare informazioni utili a velocità superiori a quelle della luce>>; si può usare la non-località per effettuare un teletrasporto quantistico di proprietà fisiche, ma per avere accesso alle informazioni devo disporre di una chiave di lettura che deve per forza viaggiare su di un canale ordinario, col limite superiore della velocità della luce<sup>79</sup>.

Dunque, malgrado i dubbi e lo scetticismo dei più, anche la #c è vera!

Oh, non ne restano molte ... ma tutti hanno timore di addentrarsi nei significati intrinseci della falsificazione del presupposto #a.

Cerchiamo di riassumere cosa abbiamo scoperto: sia quelle che noi consideriamo particelle che le onde elettromagnetiche possono in realtà manifestarsi sia come onde che come particelle, e lo fanno in base all'esperimento che noi impostiamo; se facciamo l'esperimento della doppia fenditura sia le une che le altre formano figure di interferenza, come le onde che passano simultaneamente da entrambe le fenditure, ma se cerchiamo di capire da che fenditura passano, istantaneamente la figura di interferenza sparisce e sia la luce che le particelle si comportano come corpuscoli!

Il Principio Olografico ci suggerisce inoltre che quella di cui noi abbiamo esperienza e che chiamiamo realtà, in realtà potrebbe essere solo l'ologramma di una realtà diversa che avviene altrove.

Introduciamo il condizionale, e vediamo come potrebbero svolgersi le cose. Immaginiamo lo spaziotempo costituito da un reticolo, dei "punti di spazio" discreti molto piccoli, ma non infinitesimi, diciamo dell'ordine di grandezza della Lunghezza di Planck<sup>80</sup>, continui ma distinti, quantizzati (come deve essere in una teoria quantistica, ed analogamente a quanto previsto in alcune forme di Gravità Quantistica a Loop), occupanti tre dimensioni spaziali ed una temporale, esprimibili però in coordinate complesse multidimensionali, non in semplici coordinate espresse da numeri reali; lasciandoci aperta la possibilità che abbiano ulteriori dimensioni "arrotolate e compattate" al loro interno (similmente a quanto previsto dalla Teoria delle Stringhe, anche se è improprio parlare di "interno", immaginiamo che in condizioni "estreme" possano "esprimersi" in ulteriori dimensioni, aggiuntive rispetto alle attuali tre spaziali ed una temporale).

Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg ci dice che questi granuli di spaziotempo non possono stare fermi, non possono avere energia nulla, quindi abbiamo il ribollire di schiuma quantistica (figura 53), un movimento simile al moto delle molecole di fluidi nella Teoria Cinetica dei Gas, o al frenetico Moto Browniano descritto molte pagine fa. La somma di questa energia ci potrebbe rendere conto dell'energia oscura.

Ma i granuli di spazio non dovrebbero poter circolare, ma solo agitarsi localmente, stretti gli uni contro gli altri come atomi nel reticolo cristallino di un minerale che viene scaldato o percosso, soggetti al campo scalare di Higgs che può fornire loro energia o massa quando soggetti ad una interazione, o a una perturbazione. Il manifestarsi di energia (fotoni) o particelle non sarebbe altro che il manifestarsi di uno stato più o meno eccitato di uno o più granuli di spaziotempo, perturbati dal loro stato di minima energia (non nulla).

L'arrivo di una perturbazione potrebbe manifestarsi come l'eccitazione dello stato energetico di questi granuli, dovuto all'interazione con altri campi quantistici, ma tutte le interazioni con campi e particelle altro non sarebbero che il propagarsi nel reticolo spaziotemporale di perturbazioni, analogamente a quanto avviene con la diffusio-

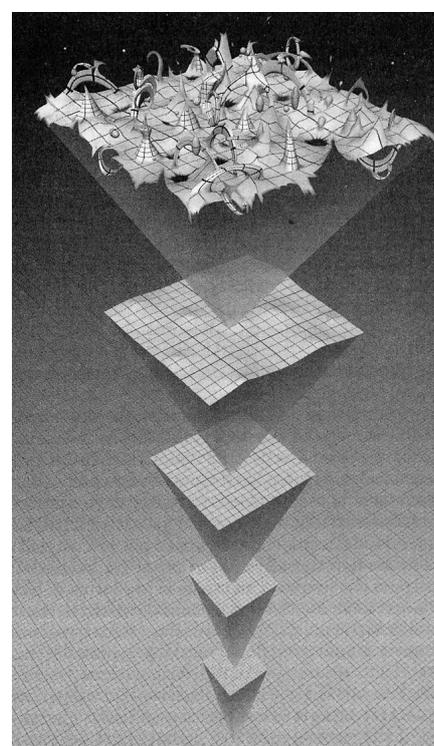


Figura 53: l'effervescente schiuma quantistica che si manifesta alla scala della lunghezza di Planck è l'ostacolo principale alla conciliazione di Meccanica Quantistica e Relatività Generale.

<sup>79</sup> Dal citato "Teorema di non-clonazione" (nota #54), discende, non banalmente, il "Teorema di non-comunicazione", dimostrato in più fasi all'inizio del XXI secolo e fondamentale anche nella crescente Crittografia Quantistica, in crescita esplosiva a partire dalla pionieristica pubblicazione di Arthur Ekert del 1991.

<sup>80</sup> Secondo la più recente revisione CODATA, del 2006, corrispondente a  $(1,616199256 \pm 0,000081) \cdot 10^{-35}$  m.

ne delle onde che increspano la superficie marina (figura 54) o alla propagazione del rumore con onde sonore che si propagano nell'aria facendone oscillare le molecole (figura 55).

Allo stesso modo in cui il suono e le onde marine si propagano e portano energia lasciando inalterate, dopo il loro passaggio, le posizioni delle molecole attraverso le quali si sono propagate, così il passaggio di una particella altro non sarebbe se non la propagazione di uno stato di eccitazione di granuli di spaziotempo.

Ci sarebbe però una conseguenza importante: la particella, il quanto di luce, o qualsiasi altra cosa, cesserebbero di esistere nel senso proprio del termine, come entità autonome e distinte che si muovono nello spazio, ma sarebbero solo il manifestarsi della propagazione di uno stato di eccitazione di granuli spaziali.

Ecco lo scotto definitivo: per poter accedere alla conoscenza finale, alla comprensione della Teoria del Tutto, dovremmo rinunciare alla nostra stessa, intima, esistenza come soggetti reali! Non la meravigliosa creazione ad immagine e somiglianza di un'ultraterrena e perfetta divinità, ma altro non saremmo che la volgare propagazione di uno stato perturbativo di granuli di spaziotempo energeticamente eccitati.

E l'esperimento di Michelson-Morley sull'etere luminifero? Semplicemente la velocità della luce sarebbe la frequenza propria del reticolo spaziotemporale: le perturbazioni non possono propagarsi più rapidamente di quella velocità.

E la dualità onda-particella? E la dipendenza dei fenomeni dagli osservatori? Il fenomeno da osservare e gli apparati di misura, fino allo stesso "osservatore" umano, altro non sarebbero che diffusioni di diverse perturbazioni, le quali, interagendo tra loro, darebbero luogo ad interferenze ed interazioni che metterebbero di volta in volta in evidenza una risultante interpretabile come diffusione ondulatoria o come diffusione corpuscolare della perturbazione complessiva. In alcuni casi le perturbazioni si sommerebbero a generare una singola perturbazione che si propaga in modo "più lineare e semplice" e viene interpretata come particella, in altri casi le perturbazioni resterebbero più diffuse, conservando proprietà complessive interpretabili come ondulatorie.

E la non-località? Attraverso la parte immaginaria delle coordinate spaziotemporali complesse potrebbe avvenire un collegamento istantaneo: due particelle entangled potrebbero avere coordinate reali diverse ma coordinate immaginarie uguali, oppure, attraverso il Principio Olografico, essere distanti come proiezioni olografiche nello spazio tridimensionale, ma essere ancora avvinghiate e vicine nello spazio bidimensionale originario, "reale".

E la materia oscura? La massa mancante, in assenza di particelle aggiuntive cercate per decenni e mai trovate, potrebbe in realtà essere altrove ... ma sempre qua, e far sentire comunque il suo effetto, almeno quello gravitazionale. In un universo in coordinate immaginarie potremmo avere che le coordinate siano esprimibili nella forma polare dei numeri complessi, con le parti reali corrispondenti al modulo e le parti immaginarie nell'argomento (angolo), che potrebbe essere sfasato di un angolo fisso tra le perturbazioni del nostro universo e quello di un altro coesistente nelle stesse coordinate reali, con le sole interazioni gravitazionali che però si manifestano anche attraverso la "sfasatura". La stessa cosa potrebbe avvenire su base temporale, con il tempo quantizzato che scorre da un "cronone" all'altro (scorrimento rallentato dalla presenza di perturbazioni gravitazionali), descritti da numeri immaginari sfasati di un angolo fisso tra due universi coesistenti nelle stesse coordinate.

Ma come si sarebbe evoluto l'universo?

Immaginiamo un universo bidimensionale, simile a quello descritto nel 1884 da Abbott nel bel libro *Flatland*: i granuli di spazio hanno due dimensioni complesse sviluppate. Una concentrazione di perturbazioni assimilabili a particelle dotate di massa (analoghe a quelle tridimensionali del nostro universo, ma bidimensionali) si attraggono gravitazionalmente e si raggruppano in una grande stella (bidimensionale) che innesca la fusione nucleare. In un universo bidimensionale la gravità cala solo linearmente con la distanza (e non proporzionalmente alla distanza al quadrato, come nel nostro universo), quindi la stella continua facilmente ad attrarre nuova materia e continua ad

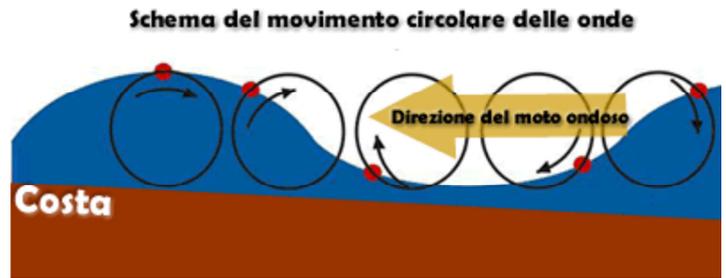


Figura 54: la propagazione di un'onda marina in mare aperto non comporta lo spostamento delle molecole d'acqua, ma solo un loro movimento circolare su di un piano verticale lungo la direzione di propagazione dell'onda.

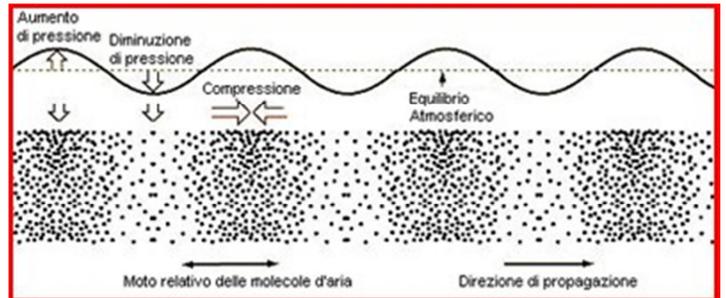


Figura 55: la propagazione di un'onda sonora nell'aria non comporta lo spostamento delle molecole d'aria, ma solo una loro oscillazione lungo la direzione di propagazione dell'onda.

accrescersi. Alla fine della sua vita la stella ha grande massa, ed esplose, ma al suo centro la concentrazione di materia è tale da portare i granuli di spazio al massimo stato di eccitazione tollerabile. Quando il combustibile idoneo alla fusione nucleare bidimensionale finisce, la stella appunto esplose, ma solo dopo che il suo nucleo è implso, formando nell'universo bidimensionale l'analogo di quello che noi chiamiamo buco nero nel nostro universo tridimensionale.

Cosa potrebbe essere successo? Potrebbe essere che i granuli bidimensionali attraverso i quali transita la perturbazione estrema che rappresenta il centro della stella collassato debbano raggiungere uno stato di eccitazione tale da farli transire in qualcosa di nuovo, che resta lì, ancora accanto ai granuli accanto ai quali si trovava prima, ma che subisce un "passaggio di fase" a causa della grandissima energia disponibile, similmente all'evaporazione di una molecola d'acqua, o alla ionizzazione di un atomo, che perde un elettrone quando colpito da un fotone sufficientemente energetico.

Travolto da tanta energia, ciascun granulo spaziotemporale bidimensionale potrebbe temporaneamente "srotolare" in modo macroscopico una delle microdimensioni supplementari di cui dispone, una terza dimensione nella quale dilatare cotanta "eccitazione"; ecco che la circonferenza che costituisce l'orizzonte degli eventi del buco nero nel cosmo bidimensionale racchiude al suo interno non una singolarità, ma un cerchio di granuli spaziotemporali bidimensionali degenerati in tridimensionali. La geometria spaziale bidimensionale piana si deforma fino a diventare localmente la superficie di una sfera, che è ancora una superficie bidimensionale, ma che contiene uno spazio tridimensionale ... che sarebbe il nostro universo!

L'istante in cui il nucleo stellare bidimensionale ha superato il livello critico di eccitazione dei granuli che lo stavano costituendo ed è avvenuta la transizione di fase sarebbe quello che noi abbiamo ricostruito come Big Bang; la "transizione" durante la quale i granuli bidimensionali hanno "srotolato" la dimensione supplementare costituirebbe l'espansione accelerata da noi chiamata inflazione.

Nell'universo bidimensionale il buco nero continua ad ingurgitare materia e ad espandersi, causando l'incremento della superficie deformata a sfera, e quindi del volume al suo interno, causando di conseguenza quella che noi percepiamo come l'espansione del nostro universo tridimensionale. Ciò che avviene all'interno del nostro universo sarebbe strettamente correlato a quanto avviene sulla superficie degenerare del buco nero nell'universo bidimensionale, da cui la centralità del Principio Olografico e della Teoria dell'Informazione.

I buchi neri del nostro universo genererebbero universi quadridimensionali, che prima o poi genererebbero buchi neri che a loro volta svilupperebbero universi pentadimensionali. Il processo continuerebbe, con la gravità che si "diluisce" sempre più all'aumentare del numero di dimensioni macroscopiche, fino a diventare una forza locale estremamente debole e scarsamente additiva, incapace di aggregare abbastanza materia per formare stelle o generare buchi neri, una volta "srotolate" 10 o 11 dimensioni.

Se fosse così, sarebbe una bella descrizione, completa e coerente ... invece sono solo chiacchiere da bar, per quanto erudito, e la natura è sempre pronta a sorprenderci e smentirci in modi inimmaginabili e sorprendenti. Però, mi piacerebbe che la perturbazione che mi costituisce tra due o trecento anni fosse ancora integra per vedere che strada ha preso il percorso verso la conoscenza e la comprensione della natura che ci circonda.

## AKNOWLEDGEMENTS

L'articolo di **Elizabeth Gibney** "La terza volta di LHC", comparso sul numero 649 di Le Scienze, di Settembre 2022, mi aveva colpito per la profondità delle tematiche trattate, malgrado le poche pagine, e per l'ottimo riassunto di modifiche apportate all'LHC e conseguenze sugli esperimenti da affrontare per svelare cosa si celi dietro ad alcune incongruenze tra risultati sperimentali preliminari e previsioni del Modello Standard delle Particelle.

È a seguito della lettura di questo articolo che misi quest'argomento tra quelli sui quali proporre un articolo per l'Ex Grege, poi inaspettatamente scelto.

Quindi un primo ringraziamento ai Rotolantes che, scegliendolo, mi hanno motivato a questo approfondimento, utile come riassunto e riorganizzazione sistematica delle mie conoscenze sul tema, e sicuro spunto per un loro ampliamento, ma senza dimenticare la Gibney (figura 56), il cui articolo è stata fonte di ispirazione e sorgente di materiale che ricompare in questa monografia in più punti.

Un riconoscimento alla pazienza di mia moglie e mio figlio, che hanno tollerato le conseguenze di centinaia di mie ore di lettura e scrittura al PC, con pile di libri e riviste malamente impilate aperte in giro per casa.



Figura 56: Elizabeth Gibney, comunicatrice scientifica con esperienze al CERN e per Nature, premiata nel 2020 con l'Angela Croome Award.

Come non citare la rivista **Le Scienze**, alla quale sono abbonato da quasi un quarto di secolo, per il puntuale e capillare lavoro di analisi e riproposizione di illuminanti articoli riguardanti gli aspetti più disparati del sapere, fondamentali per avere a disposizione un'ampia e continua scelta dei più aggiornati articoli divulgativi di alto livello in campo scientifico. Dei circa 2.500 articoli scientifici divulgativi letti ed inseriti nel mio database personale, ben più della metà sono tratti da **Le Scienze**!

Tra tutti questi voglio ricordare in particolare *"L'era delle anomalie"*, di Andrea Capocci, e *"Una nuova mappa dell'universo"*, di Kyle Dawson e Will Percival, entrambi apparsi sul numero 635 di **Le Scienze**, di Luglio 2021; importante fonte di dati ed immagini anche *"Oltre il Modello Standard?"*, di Guy Wilkinson, comparso a Gennaio 2018 su **Le Scienze** 593, insieme all'interessante *"L'universo in scala"*, di Caleb Scharf. Spazio anche per *"Fotoni dal lato oscuro dell'universo"*, di Matteo Serra (**Le Scienze** 661, Settembre 2023), *"Buchi neri, wormhole e entanglement"*, di Ahmed Almheiri (**Le Scienze** 651, Novembre 2022), *"Enigma cosmico"*, di Clara Moskowitz (**Le Scienze** 632, Aprile 2021), *"Le particelle più oscure"*, di William C. Louis e Richard Van de Water (**Le Scienze** 625, Settembre 2020), *"Una crisi cosmica"*, di Richard Panek (**Le Scienze** 621, Maggio 2020) e *"Cristalli nel tempo"*, di Frank Wilczek (**Le Scienze** 617, Gennaio 2020); come non citare, infine, il sempreverde *"La forma dell'universo: 10 possibilità"*, di Colin Adams e Joey Shapiro (**Le Scienze** 414, Febbraio 2003).

Le immagini ed i dati dell'LHC e dei suoi esperimenti sono resi possibili grazie alla possibilità di consultare online e scaricare come pdf veri e propri libri, dettagliatissime note tecniche stese a centinaia di mani da scienziati e tecnici del CERN che li condividono in rete. Le informazioni contenute sono per addetti ai lavori, con dettagli e livelli di difficoltà veramente consistenti. È stato abbastanza arduo estrarre i dati più significativi e convertirli in un linguaggio divulgativo, scandagliando in mezzo a centinaia di pagine contenenti informazioni approfondite in inglese, su di argomenti estremamente specifici. Comunque un grande grazie al **CERN** ed alle sue equipe per condividere gratuitamente questo vastissimo e profondo sapere.

Una comprensione approfondita di una gamma di argomenti così ampia come quella proposta in questo numero monografico deve però per forza basarsi anche su due ampie fonti di approvvigionamento di informazioni, alternative e complementari, tali da creare i presupposti per avere una formazione culturale che consenta un adeguato livello di approfondimento delle tematiche, malgrado la loro multidisciplinarietà: queste sono una formazione universitaria in ambito scientifico ed un solido background di buoni libri di divulgazione di alto livello.

Per quanto concerne la prima, voglio riconoscere il valido ausilio conseguente all'aver studiato alcuni selettivi corsi dei primi tre anni del corso di laurea in Ingegneria Meccanica all'Università di Bologna, tra i quali voglio ricordare Algebra e Geometria, Analisi Matematica I, Analisi Matematica II, Chimica (col mitico libro *"Fondamenti di Chimica"* di Paolo Chiorboli, 1980), Fisica I, Fisica II (da menzionare *"Campi e Onde"* di M. Alonso ed E. J. Finn, 1983), Fisica Tecnica (come non ricordare il bel *"Termofisica Generale ed Applicata"*, di Alessandro Cocchi, del 1990) e Meccanica Razionale. Ovviamente fondamentali, per fornire solide basi per la comprensione degli argomenti trattati, anche alcuni degli esami del corso di laurea in Fisica affrontato successivamente all'Università di Modena, quali Metodi Matematici per la Fisica (col grande classico *"Mathematics for Physicists"*, di P. Dennery e A. Krzywicki, del 1969), Meccanica Statistica (con l'illuminante *"Thermal Physics"*, di Ralph Baierlein, 1999), Fisica Quantistica (con l'ermetico *"Meccanica Quantistica Moderna"* di J. J. Sakurai, 1990), *"Cosmologia e Gravitazione"* (col profondo *"Foundations of Modern Cosmology"*, J. F. Hawley e K. H. Holcomb, 2005), Struttura della Materia e Fisica Nucleare e Subnucleare (col tomo *"Introductory Nuclear Physics"* di Kenneth S. Krane, 1988).

Per quanto concerne una buona divulgazione scientifica sugli argomenti trattati, tra le troppo poche centinaia di libri che ho avuto il tempo e la voglia di leggere negli ultimi trent'anni sugli argomenti qui presentati, voglio dare maggiore rilievo a quattro di questi come ad assegnare un podio condiviso ex-aequo, per la magnificenza e la profondità della visione comunicata:

- Brian Greene, *"L'universo elegante"*, (1999)
- Stephen Hawking, *"L'universo in un guscio di noce"*, (2002)
- Amir D. Aczel, *"Entanglement"*, (2004)
- Roger Penrose, *"La strada che porta alla realtà"*, (2005)

Un altro terzetto di libri da citare riguarda invece pubblicazioni di carattere enciclopedico, utili compendi per approfondimenti, col tipico indice alfabetico a sostituire un intreccio con una presentazione degli argomenti che segue uno sviluppo ed un'evoluzione logici:

- Patrick Moore, *"il Guinness dell'Astronomia"*, (1990)
- John Gribbin, *"Enciclopedia di Astronomia e Cosmologia"*, (1998)
- John Gribbin, *"Q come Quanto"*, (2004)

Un ultimo terzetto di libri da porre in risalto prima degli altri sono invece accumulati dal fatto di non fornire una profonda descrizione teorica discorsiva delle scoperte avvenute tramite la narrazione delle teorie scientifiche che

hanno spiegato o previsto tali scoperte, ma di rifare la storia dell'evoluzione scientifica attraverso la minuziosa descrizione degli esperimenti che ne hanno permesso l'avanzamento, tramite conferme o negazioni di quanto atteso, balzando dai piani inclinati ed i pendoli di Galileo e dal prisma di Newton alla doppia fenditura di Young, dal pendolo di Foucault alla vana ricerca dell'etere compiuta per via interferometrica da Michelson e Morley, dalla gocciolina d'olio elettricamente carica di Millikan alla lamina d'oro bombardata con particelle alfa da Rutherford; storie di genialità e metodica al servizio dell'avanzamento del sapere:

- Peter Atkins, "Il dito di Galileo", (2004)
- John Gribbin "L'avventura della scienza moderna", (2004)
- Robert Crease "Il prisma ed il pendolo", (2007)

Dopo di questi, riporto un'altra ventina di libri che "hanno lasciato il segno", che ricordo con piacere, che hanno aggiunto qualcosa in più, rispetto alle molte decine che tralascio, magari anche solo perché ci sono arrivato io dopo averne letti altri sul medesimo argomento, quindi non mi hanno "aggiunto" niente di particolare. Li riporto in pura sequenza cronologica di edizione, senza nessuna pretesa di classifiche:

- Richard P. Feynman, "QED", (1983)
- James Trefil, "Il Lato Oscuro dell'Universo", (1989)
- John A. Wheeler, "Gravità e Spaziotempo", (1993)
- Piero Bianucci, "Nati dalle stelle", (1997)
- B. W. Jones, R. J. A. Lambourne, D. A. Rothery, "Images of the Cosmos", (1998)
- R. Mackintosh, J. Al-Khalili, B. Jonson, T. Peña, "Nucleus", (2001)
- John Gribbin, "Polvere di stelle", (2002)
- Stephen Hawking, "La Teoria del tutto", (2003)
- David Darling, "Teletrasporto", (2003)
- Frank Close, "A very short introduction to Particle Physics", (2004)
- Sander Bais, "Equazioni", (2005)
- Robert Oerter, "La Teoria del Quasi Tutto", (2006)
- Manjit Kumar, "Quantum", (2011)
- Corrado Lamberti, "Il Bosone di Higgs", (2012)
- Jim Baggott, "Il Bosone di Higgs", (2013)
- Carlo Rovelli, "La realtà non è come ci appare", (2014)
- David Bianco, "Il Bosone di Higgs", (2015)
- Alberto P. Izquierdo, "La teoria del caos", (2016)
- Arturo Quirantes, "Lo Spaziotempo quantistico", (2016)
- Mario E. Gómez Santamaria, "Il Modello Standard delle Particelle", (2017)

Ma se i testi universitari ed i libri divulgativi citati hanno fornito il substrato, l'humus culturale sul quale si è inserito ed è potuto crescere questo numero di Ex Grege, un ausilio fondamentale alla sua realizzazione operativa è arrivato da Internet, ormai insostituibile strumento di reperimento di informazioni, dati, testi, immagini, video, grafici.

Delle svariate centinaia di siti consultati, voglio porre in immediato rilievo ed offrire un meritato tributo alle oltre 200 pagine di **Wikipedia** visitate; vi si possono trovare alcuni refusi e qualche imprecisione, o eccessiva semplificazione, ma il livello di attendibilità offerto è molto alto, ed i libri elencati prima sono il necessario filtro per soppesare la veridicità delle informazioni ritrovate nelle sue pagine.

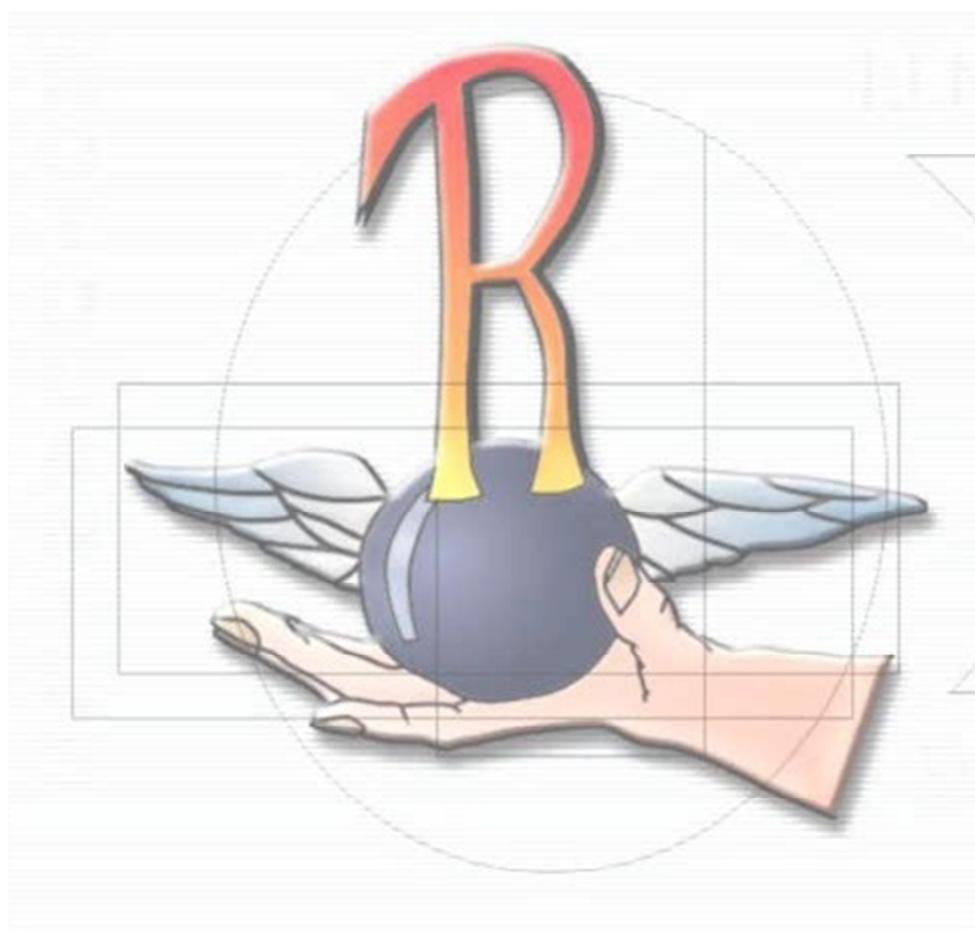
Dopo un primo riscontro con le informazioni già in mio possesso, altre verifiche possono venire dall'effettuazione di calcoli di prima approssimazione, dal confronto con la medesima pagina Wikipedia in altre lingue, o infine con la ricerca di informazioni aggiuntive su file di testi o appunti di lezioni universitari o su siti istituzionali, con pazienza e dedizione. L'opportunità di poter spaziare in tempo zero da una pagina su di una teoria scientifica a quella sugli esperimenti che l'anno validata, a quelle sulle biografie degli scienziati coinvolti nella sua formulazione e riprova, costituisce un plus impagabile ed irrinunciabile.

Tra le pagine dalle quali ho attinto maggiormente, sia in italiano che in inglese, quelle, sull'atomismo, sul Modello Standard, sul Big Bang, sulla QED, sulla QCD, sulla Relatività Generale, sui modelli inflazionari, sulla fisica delle particelle, sui neutrini, sui quark, sui leptoni, sui bosoni, oltre al centinaio di pagine sulle biografie degli scienziati e a quelle sugli esperimenti scientifici specifici, menzionati qua e là nel testo, per finire con tutte le pagine delle varie

teorie ancora in fase di sviluppo, quali la Supersimmetria, la Teoria delle Superstringhe, la Gravità Quantistica a Loop, la MOND<sup>81</sup>. Grazie Wikipedia!

Come accennavo, per le necessarie controprove, fondamentale aver avuto accesso alle pagine di siti di **istituti di ricerca pubblici italiani**, in primis quello dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), ma anche alle versioni digitali delle dispense delle lezioni di materie inerenti la Fisica e la Cosmologia, reperite gratuitamente in Internet e relative a corsi tenuti nelle Università di Bologna, Trento, Padova, Pavia, Roma La Sapienza, Roma Tor Vergata e Napoli Federico II, oltre che nei Politecnici di Milano e Torino.

Grazie a tutti.



---

<sup>81</sup> Non presentata nel testo, la MOND (Dinamica Newtoniana MODificata), propone una diversa relazione della gravità lontano dalle sorgenti massive, giustificando così l'eccesso di velocità orbitale delle stelle e delle galassie senza dover invocare la presenza di materia oscura. La prima versione venne proposta da Mordehai Milgrom nel 1983.