

Guido Cossu



Lo

ZEN

del Bosone
di Higgs

gcWare

Indice

[Frontespizio](#)

[Colophon](#)

[Il Modello Standard](#)

[Dialogo con un monaco zen](#)

[Simmetrie](#)

[Gli inizi](#)

[\(Storia delle\) Particelle](#)

[Le origini](#)

[Usa la forza](#)

[I coloratissimi quark](#)

[Il Modello Standard e il bosone di Higgs](#)

[I protagonisti](#)

[Il Large Hadron Collider: il cacciatore](#)

[La caccia](#)

[L'assedio finale](#)

[Oltre il Modello Standard](#)

[Conclusione](#)

[Glossario](#)

[Tavole, grafici e illustrazioni](#)

[Figura 1 Il tubo di Crookes](#)

[Figura 2 L'esperimento di Rutherford](#)

[Figura 3 Modello Standard delle particelle fondamentali e loro interazioni](#)

[Figura 4 Cronologia della scoperta delle 16 particelle del Modello Standard](#)

[Figura 5 Particolare della vasca del SuperKamiokande](#)

[Figura 6 Schema del LHC](#)

[Figura 7 Il rivelatore CMS](#)

[Figura 8 Collisione di particelle](#)

[Figura 9 Il detector di ATLAS](#)

[Figura 10 L'acceleratore circolare di particelle Tevatron](#)

[Figura 11 Schema del decadimento del bosone di Higgs in due fotoni](#)

[L'autore](#)

[Quarta di copertina](#)

[goWare <e-book team>](#)

[Altri e-book di goWare](#)

Guido Cossu



Lo **ZEN** del Bosone
di Higgs

goWare

Anno 2012

ISBN 978-88-97324-52-2

© goWare per l'edizione digitale

Hanno lavorato a questo e-book Elisa Baglioni, Maria Rosa Brizzi, Stefano Cipriani, Valeria Filippi, Mirella Francalanci, Francesco Guerri, Maria Ranieri, che fanno parte dell'<e-book team> di goWare.

Copertina di Lorenzo Puliti

Disegni di Lorenzo Puliti e John Akwood

Editing e revisione di Giulio Cossu

goWare è una startup del Polo Tecnologico di Navacchio, a pochi chilometri da Pisa, la città della Torre e di Galileo.

Fateci avere i vostri commenti a: info@goware-apps.it.

Blogger e giornalisti possono richiedere una copia saggio a Maria Ranieri: mari@goware-apps.com.

Made in Navacchio on a Mac.

三尺の
庭をながむる
春日かな

*Giorno di primavera:
si perde lo sguardo in un giardino
largo tre piedi*
Masaoka Shiki

Il Modello Standard

Come raccontare la storia di un'importante scoperta scientifica? Compito non facile, specie nel caso di una particella come il bosone di Higgs. La fisica delle particelle è un campo molto vasto, le regole fondamentali del gioco sono poche e la più importante è la *simmetria*.

Ma volgiamo brevemente il nostro sguardo verso un tempio nelle silenti montagne giapponesi, dove gesti antichi possono essere illuminanti.

Dialogo con un monaco zen

Seduto e avvolto dal silenzio osservo un monaco mentre traccia delle linee sulla sabbia del suo giardino. È il periodo della primavera giapponese e l'aria è punteggiata dai petali bianchi dei ciliegi, tutti sbocciati all'unisono. I gesti dell'uomo sono precisi ed eleganti, dettati da una lunga esperienza.

Lunghi tratti, cerchi e curve. Da vicino difficilmente se ne comprende il senso, ma dalla mia posizione s'intuisce il disegno dietro ogni movimento.

I petali, il silenzio, i tratti decisi. Avverto un ordine nell'ambiente che mi circonda.

Il monaco ha terminato. È soddisfatto. Si avvicina con passo tranquillo, forse vuole capire perché io sia così interessato. Rivolgendosi verso di me, con un ampio movimento del braccio, indica la sabbia che prima aveva accuratamente tracciato. Con un piccolo e impercettibile segno della testa mi chiede se è quello il motivo della mia ammirazione. Rispondo con un altro cenno. Un discorso fatto di silenzi.

Si siede accanto, vorrebbe porre delle domande, esita, e rimane anche lui in osservazione del proprio lavoro.

– Ogni segno è in rapporto con quello vicino e rappresenta l'armonia del mondo naturale, – sono le poche parole che mi dice.

Sorrido perché nella mia mente è un concetto che, in altri termini, mi è molto familiare; forse è proprio per questo che mi attrae tanto.

Trovare relazioni e collegamenti tra le cose che osserviamo in natura è il lavoro di ogni fisico. Cercare di ordinarli e trovare uno schema comune è il secondo passo.

In fondo quel giardino e quei gesti non sono poi così lontani dal mio mondo, penso.

Dopo alcuni minuti di contemplazione il monaco si alza e si accomiata con gentilezza, rimangono solo il giardino e i petali di ciliegio che cadono lentamente.

Simmetrie

Come per il giardino zen, guardare da lontano aiuta a capire meglio le relazioni tra le cose, così in fisica cercare di trovare uno schema generale che spieghi tante osservazioni è il motore del nostro lavoro. Specialmente nella

fisica delle particelle.

Sin dalla scoperta dell'elettrone, con gli anni i fisici sperimentali hanno individuato nuove particelle ed ognuna di queste ha richiesto uno sforzo dei teorici per poter essere inquadrata in uno schema più generale possibile.

Talvolta è avvenuto il contrario: i teorici prevedevano che dovesse esistere una particella ancora non osservata e dopo qualche anno gli esperimenti erano in grado di confermare quest'attesa. Ci sono stati numerosissimi esempi, ne vedremo alcuni, e uno di questi è proprio il *bosone di Higgs*.

In fisica delle particelle, i teorici hanno imparato negli anni Sessanta e Settanta che esisteva uno schema comune a tutte le osservazioni sperimentali.

Questo schema sono le *simmetrie* della teoria.

Come una palla perfettamente sferica ci appare sempre identica a se stessa se la ruotiamo in qualunque verso, così i fisici teorici hanno capito che per spiegare le osservazioni era necessario che le equazioni fossero simmetriche: sempre identiche a se stesse se venivano “ruotate” da certe classi di trasformazioni¹.

Il primo esempio di immutabilità delle leggi della fisica ce lo ha fornito Galileo nel suo *Dialogo tra Salviati e Simplicio*², facendoci notare che sia che siamo a terra che su una nave (un *gran navillo*) in movimento, un sasso lasciato cadere precipita sempre in verticale³, per fare uno dei tanti esempi. O, per un secchiello che perde acqua dal fondo, le gocce cadranno sempre nel secchio che gli abbiamo messo giusto sotto. Le leggi della dinamica non dipendono dal fatto che siamo o no sulla nave⁴. D'altronde anche la Terra è un oggetto in moto a velocità folle nello spazio e se tiro un pallone da basket per fare canestro mi aspetto che la traiettoria sia una bella parabola... e che possibilmente vada a segno, però questo non dipende dal moto della Terra ma dal mio lancio.

Le trasformazioni di cui parliamo in questo caso sono il passaggio dal sistema a terra a quello sulla nave, o l'oggetto in moto. E le leggi non cambiano perché questo ci dicono semplici esperimenti.

Questa è, sommariamente, la [relatività galileiana](#), ed Einstein ci insegna che va molto bene finché la nostra nave non è una navicella spaziale che si muove a velocità vicine a quella della luce (cioè circa trecentomila chilometri al secondo, il limite massimo postulato dalla relatività). A queste velocità le leggi della fisica sono sempre invarianti ma rispetto a trasformazioni più complesse (delle quali quelle galileane sono un caso particolare).

In sostanza: per descrivere le leggi della fisica, il fatto che noi siamo fermi o in moto a velocità costante è irrilevante e tutte le leggi matematiche devono riflettere questa importante proprietà, sperimentalmente verificata.

In fisica questo concetto è detto *invarianza* o *simmetria* rispetto a certe classi di trasformazioni e, come già ricordato, è un elemento fondamentale nella fisica moderna. Le trasformazioni possibili sono innumerevoli. Oltre

all'invarianza galileiana, possiamo avere invarianza per rotazioni o riflessioni, o trasformazioni molto più complesse che richiedono avanzate nozioni matematiche.

Il Modello Standard (MS), che finora spiega in maniera stupefacente le interazioni tra centinaia di particelle, è esattamente una teoria che rispetta particolari simmetrie matematiche. D'altronde già Galileo diceva che il linguaggio del mondo è fatto di cerchi e quadrati, la matematica insomma. Il Modello Standard ne è un ottimo esempio.

Ma il bosone di Higgs che c'entra in tutto ciò?

Ci arriviamo presto, per il momento immaginiamo il bosone di Higgs come uno squarcio nel giardino del monaco che ne rompe la bellissima simmetria.

Gli inizi

Prima di spiegare l'importanza del bosone di Higgs, e il perché dell'eccitazione di un'intera comunità di fisici, è necessario introdurre *il teatro* nel quale questa particella recita, per fornire una descrizione accurata di quello che osserviamo negli esperimenti: il Modello Standard.

Il nome potrà suonare piuttosto altisonante ma dati i successi negli anni, se lo merita tutto. È la teoria fisica che ha descritto un numero interminabile di fatti e con una precisione ancora insuperata: finora sembra praticamente infallibile. Sembra proprio la lingua corretta per raccontare tutte quelle particelle che vengono prodotte ogni giorno nei laboratori. È comunque ancora un modello e sono numerosi gli indizi che inducono a pensare che non sia la fine della storia, come vedremo più avanti.

Il Modello Standard è un castello dall'architettura molto ardita e pieno zeppo di stanze da esplorare. Prima di arrivare in cima e godere del paesaggio dovremo curiosare qua e là per trovare la strada giusta. Cominciamo dalle fondamenta e facciamo un salto indietro pensando agli eventi che possiamo sperimentare ogni giorno. Partire da lontano sarà molto utile.

La forza di gravità ci è estremamente familiare, tanto che la diamo per scontata. È debolissima ma i suoi effetti si propagano fino a distanze infinite. Detta la dinamica di intere galassie, stelle, sistemi planetari, e anche di una mela che cade da un albero. Questa è una delle cosiddette *forze fondamentali*, quelle forze che ci servono per spiegare l'universo come lo conosciamo. I fisici sono riusciti a ricondurre ogni fenomeno a poche forze. Vediamo quali ripercorrendo una parte di storia della fisica.

Oltre alla gravità, un'altra forza a cui siamo abituati è quella che per esempio fa attrarre o respingere due oggetti carichi: la *forza elettrica*. Insieme a questa possiamo sperimentare molto facilmente anche le forze che agiscono tra magneti, ed ecco la *forza magnetica*.

Tutte piuttosto comuni e alle quali non facciamo neanche troppo caso ogni

giorno.

Però i fisici sono persone strane: non si accontentano di osservare, vogliono anche capire come funzionano le cose.

Nell'Ottocento l'attività di molti sperimentali era concentrata nel cercare di capire queste ultime due forze con vari esperimenti su cariche elettriche, campi elettrici e campi magnetici.

Ben presto ci si accorse che, per esempio, una corrente elettrica in un circuito, quindi cariche elettriche che si muovono, produce un **campo** magnetico. Lo scoprì il danese [Hans Christian Ørsted](#) agli inizi del secolo, osservando come l'ago della sua bussola cambiava direzione se vi avvicinava un cavo percorso da corrente: primo esempio di *elettromagnetismo*. Altri studi provarono che un campo magnetico che varia nel tempo riusciva a generare corrente in un circuito vicino ([Faraday](#)): *l'induzione elettromagnetica*, base anche dello sviluppo dei motori elettrici odierni.

Divenne sempre più evidente che esisteva una stretta relazione tra campi magnetici ed elettrici. Le formule che descrivevano questa connessione erano note, ma nella prima metà dell'Ottocento mancava ancora una visione generale.

Fu un fisico di Edimburgo, [James Clerk Maxwell](#), nella seconda metà del secolo, a riuscire ad elaborare una teoria unica che spiegasse tutte le osservazioni.

In sole quattro equazioni, oggi conosciute come le **equazioni di Maxwell**, dimostrò come poteva descrivere le relazioni fino ad allora note che riguardavano le interazioni tra campi elettrici e magnetici.

Maxwell aveva capito che il campo elettrico e il campo magnetico sono in realtà due aspetti di un unico campo, e bastano quattro righe per riassumerne tutte le proprietà: un'eleganza e bellezza formale paragonabile a quella dei marmi del Partenone!⁵

Tutto si incastrava alla perfezione in una più ampia teoria: il primo esempio di **unificazione**.

Quindi solo un'unica forza, quella *elettromagnetica*, è la responsabile di buona parte dei fenomeni che sperimentiamo ogni giorno o che ci passano sotto gli occhi senza che ce ne accorgiamo. Riceviamo una telefonata al cellulare e stiamo sperimentando le onde elettromagnetiche, vediamo un bel quadro e i nostri ricettori mandano segnali elettrici al cervello dopo che la luce è arrivata all'occhio, facciamo bollire un po' di acqua e stiamo rompendo dei legami elettrici tra atomi di idrogeno e ossigeno: tutto questo è possibile spiegarlo a partire da sole quattro equazioni fondamentali, una bella sintesi.

Dalle poche linee indecifrabili del nostro giardino zen, con un passo indietro cominciamo a scorgere un pezzo del disegno del monaco. Non sono linee disordinate, ora acquistano un significato preciso: ne vediamo i primi rapporti e nessi.

Uno splendido passo avanti per la fisica ma molti altri ne dobbiamo raccontare.

(Storia delle) Particelle

Dati questi traguardi forse non stupisce particolarmente che alla fine del diciannovesimo secolo i fisici avessero la profonda, sbagliata, convinzione di aver capito una volta per tutte come funzionava la natura. Avevano la gravitazione e l'elegante elettromagnetismo e riuscivano con queste a spiegare praticamente tutto l'universo che li circondava. Il fisico [Albert Michelson](#) riteneva che non ci fosse più spazio per altre scoperte e che tutti i principi di base fossero ormai noti, il compito della fisica era di raffinare gli esperimenti per una maggiore precisione, niente di più, niente di stimolante ancora da indagare. Alcuni sconsigliavano agli studenti d'intraprendere la carriera in fisica, perché non avrebbero avuto molto da fare. Chiaramente non sapevano quanto si stessero sbagliando, e per fortuna! Mancavano le scoperte che avrebbero mutato del tutto il modo di pensare alla natura. Il fatto ironico è che proprio Michelson fece *quell'esperimento* importantissimo che innescò la rivoluzione della relatività di Einstein!⁶

Il Novecento è il secolo più denso di novità per tutta la fisica odierna e si apre con le due rivoluzioni inattese, la *relatività speciale* di Einstein e la Meccanica Quantistica, che sono le solidissime fondamenta del Modello Standard. Non ci addentreremo nel raccontare i dettagli di queste teorie, che meriterebbero molte più pagine di quelle che abbiamo a disposizione. Basti sapere che la prima, indagando sulle proprietà di oggetti che si muovono a velocità prossime a quelle della luce, abbatte il concetto di spazio e tempo assoluti, rendendoli *dipendenti* dall'osservatore, e la seconda rivede le nostre conoscenze sull'infinitamente piccolo, dalla scala molecolare-atomica via via verso i più piccoli componenti della materia come la conosciamo.

Con la Meccanica Quantistica si comincia a capire che alle scale atomiche l'idea comune di particella deve essere riconsiderata, perché molti esperimenti mostrano che le particelle si comportano *anche* come onde: possono interferire, sovrapporsi, annullarsi, come le già note onde elettromagnetiche.

La Meccanica Quantistica ribalta parecchie nozioni che ci hanno insegnato a scuola e costringe ad immaginare un mondo del quale non abbiamo esperienza diretta, perciò spesso sorprende nelle sue previsioni (tutte verificate sperimentalmente). Per il momento è sufficiente ricordare che le particelle non sono delle semplici microscopiche palline, anche se questa l'analogia è spesso molto utile, ma non sempre!

Una descrizione del mondo molto diversa da quella che Newton e Galileo avevano tracciato, decisamente meno intuitiva ma ancor più interessante e

tutta da decifrare⁷.

Quando le particelle sono molto veloci, la relatività entra in gioco e l'unione di questa con la Meccanica Quantistica porta a proprietà ancora più stupefacenti come particelle che si creano dal vuoto, nascono e muoiono nel giro di brevissimi istanti, ne generano di altre: sono alcune delle previsioni del Modello Standard.

Le origini

Oggi più o meno tutti, anche chi è completamente a digiuno di fisica, hanno sentito parlare almeno una volta di *elettroni*, *protoni* e probabilmente anche di *neutroni*. E ci paiono delle idee piuttosto naturali ormai: sono i costituenti base di un atomo. Eppure, duecento anni fa i fisici non avevano la benché minima idea che esistessero.

Il primo a fare capolino fu l'*elettrone*, ma non si rivelò subito. Il fisico [William Crookes](#) stava facendo esperimenti per capire che voltaggio servisse per far scoccare una scintilla tra due piatti di metallo in un tubo riempito di gas [[Figura 1 Il tubo di Crookes](#)]. Si accorse che uno dei piatti, quello collegato al polo negativo della batteria⁸ emetteva un debole fascio invisibile che faceva brillare materiali fluorescenti. Crookes non aveva capito a fondo cosa stava osservando, pensava di aver scoperto un nuovo stato della materia, la *materia radiante*, ma era fuori strada. Però i suoi tubi si rivelarono utilissimi e non sono altro che i preistorici antenati dei tubi catodici di monitor e televisori comunissimi fino a pochi anni fa.

Ci pensò il brillante [J. J. Thompson](#) a studiare a fondo le proprietà dei raggi catodici e a capire che erano dei piccoli corpuscoli, delle *particelle*. Ma particelle di cosa? Non erano atomi e neanche molecole: era ancora un puzzle, perché niente di noto spiegava tutte le osservazioni.

Come spesso accade in fisica, quando vuoi capire com'è fatto qualcosa cerchi di modificare il suo stato per vedere come reagisce, dalle reazioni si possono dedurre le caratteristiche di quello che stiamo studiando.

Quindi si disegnarono vari esperimenti, aggiungendo campi magnetici e campi elettrici e registrando accuratamente le risposte dei misteriosi raggi catodici. Thompson sapeva che i campi elettromagnetici deviano le traiettorie delle particelle cariche in modo prevedibile, grazie alle conoscenze note a quel tempo.

La sua conclusione, che gli valse il premio Nobel, è che si stessero osservando particelle cariche negativamente circa mille volte più leggere dell'atomo di idrogeno: era qualcosa di nuovo. Il nome "elettrone" era già stato coniato in un contesto completamente differente ma fu adottato rapidamente dalla comunità scientifica. La prima particella elementare era stata scoperta! Il Modello Standard ne spiega a centinaia, ma l'elettrone è

veramente uno dei mattoncini di base.

Capito che cosa è l'elettrone, vediamo com'è fatto e come si comporta un atomo, perché si scoprono cose anche più interessanti.

Sempre l'ineffabile Thompson proponeva per l'atomo un modello ad anguria con la carica positiva nella parte di una polpa gelatinosa mentre gli elettroni erano immersi all'interno come i semi. Per testare quest'idea, [Ernest Rutherford](#), che era stato un suo allievo, ideò un esperimento: venivano sparate delle particelle dette *alfa*, note e facilmente prodotte dai decadimenti degli elementi radioattivi, contro un foglio sottilissimo di oro. Se l'atomo fosse stato veramente come l'aveva immaginato Thompson, la massa gelatinosa del nucleo avrebbe deviato di poco dalla loro traiettoria le particelle alfa, cariche positive, molto pesanti e molto veloci; osservando quindi la distribuzione delle particelle dopo lo *scontro* era facile confermare o meno il modello [[Figura 2 L'esperimento di Rutherford](#)].

Il risultato sorprendente fu che alcuni *proiettili* tornavano indietro come se rimbalzassero su qualcosa di densissimo. Era come sparare contro delle caramelle di gelatina ed osservare che alcuni dei proiettili tornavano indietro. Il modello di Thompson non poteva essere quello giusto, la sua informe gelatina carica positivamente non poteva spiegare quest'ultimo risultato. Rutherford aveva scoperto che l'atomo ha un nucleo molto denso di oggetti carichi positivamente: i *protoni*. E nei suoi lavori ipotizzò che dovesse esistere anche una particella neutra. Non meraviglia che per i suoi studi ottenne il Nobel nel 1908.

Fu un suo studente, l'inglese [J. Chadwick](#), a trovare il [neutrone](#) nei suoi esperimenti e anche lui ottenne il Nobel nel 1935 per questo.

Una sequela di Nobel per scoperte determinanti nella fisica moderna. Scoperte per la fisica di base senza nessuna ricaduta apparente cento anni fa, ma che ora per esempio sono usatissime in medicina. Non si potranno mai prevedere le possibili applicazioni di una nuova conoscenza, per quanto lontana possa sembrare dal nostro mondo.

Siamo negli anni Trenta e più i fisici continuano ad indagare le proprietà della materia e più trovano delle stranezze da spiegare. Un esempio celebre è il [decadimento beta](#) dei materiali radioattivi.

Si sapeva che un elemento instabile si poteva trasformare in un altro emettendo un [elettrone](#) (l'analogo [decadimento alfa](#) emette la particella proiettile dell'esperimento di Rutherford). I prodotti finali erano quindi solo due, il nuovo nucleo e l'elettrone. Per i fisici era facile predire l'energia finale di quest'ultimo: doveva essere sempre la stessa. In questo caso però, il risultato dell'esperimento diceva che l'elettrone non aveva l'energia predetta ma sempre un po' meno, anche molto meno. Inoltre, ad ogni ripetizione un valore diverso.

Le leggi della fisica e le particelle note non potevano spiegare

quell'osservazione. Delle due l'una: o si abbandonava uno dei principi più testati e verificati della storia della fisica, la *conservazione dell'energia*, oppure qualcosa mancava all'appello; ma dov'era e cosa era? C'era una pistola fumante, mancava il colpevole.

Fu un fisico austriaco, [Wolfgang Pauli](#), uno dei padri della Meccanica Quantistica, a fare un identikit del responsabile, ipotizzando che effettivamente ci fosse un'altra particella molto leggera che non veniva rivelata perché neutra, invisibile e sfuggente ai campi elettromagnetici. In questo modo si riconciliavano principi ed esperimenti.

Il nome di neutrino arrivò da Enrico Fermi come diminutivo di neutrone. Fermi sviluppò anche una teoria per descrivere il [decadimento beta](#) che produceva questi neutrini. Ma ancora la loro esistenza era sulla carta e ci vollero più di 20 anni di esperimenti prima che l'elusivo neutrino fosse osservato direttamente confermando tutte le ipotesi teoriche. Un'altra vittoria per le simmetrie, perché pur di non abbandonarne una, la conservazione dell'energia, una nuova particella mai osservata era stata immaginata.

Il cammino dell'Higgs non è stato molto differente ma ancora più lungo.

Continuiamo la carrellata sulla scoperta di particelle perché è molto utile sia per apprezzare la complessità e l'eleganza del [Modello Standard](#) sia per capire la genesi e la portata di una scoperta come quella del bosone di Higgs [[Figura 3 Modello Standard delle particelle fondamentali e loro interazioni](#)].

Seguiamo ancora il monaco mentre traccia i segni sulla sabbia, alla fine il disegno sarà completo.

Usa la forza

Torniamo al modello di atomo di Rutherford: il nucleo era composto da cariche positive, che ora sappiamo essere i [protoni](#), e gli [elettroni](#) ci giravano attorno come pianeti intorno al Sole. Il modello era un po' semplicistico e lo stesso Rutherford sapeva che c'erano diversi problemi in questa spiegazione. Due fondamentali.

Il primo è che, quando gli elettroni *curvano*, l'elettromagnetismo di [Maxwell](#) ci insegna che emettono luce perdendo energia e facendo due conti dovrebbero collassare sul nucleo nel giro di frazioni di secondo, cosa che evidentemente non accade perché gli atomi esistono.

Secondo, se il nucleo è composto di tanti protoni, tutti carichi positivamente e molto vicini tra loro, questi dovrebbero respingersi violentemente a vicenda e l'atomo disintegrarsi in infinitesimi di secondo. E anche questo possiamo decisamente escludere che accada, in fondo siamo qui a scriverne.

La soluzione del primo problema arriva dalla Meccanica Quantistica: gli elettroni si possono muovere solo in orbite con un'energia multipla di una fondamentale. La più piccola quantità di energia che possono avere è detta

quanto di energia, da cui deriva il nome della teoria. Possono saltare da un'orbita all'altra, se hanno abbastanza energia, ma non possono andare sotto l'orbita più piccola. Inoltre, l'immagine *planetaria* dell'atomo con le orbite elettroniche non è quella corretta: quella che si avvicina di più alla realtà delle cose è l'immagine di un elettrone che circonda il nucleo come una nuvola. Sì, lo sapevamo, la Meccanica Quantistica dà risposte sorprendenti e questo è un esempio del comportamento non particellare nell'infinitamente piccolo.

La risposta alla seconda fondamentale domanda arriva dall'Oriente, dal Giappone, ma non dal nostro monaco zen, impegnato in meditazione.

Un fisico di Tokyo, [Hideki Yukawa](#), futuro primo premio Nobel del Giappone (1949), formulò una teoria per spiegare le interazioni tra protoni e neutroni nel nucleo. Ci doveva essere una nuova forza e doveva essere decisamente molto più *forte* di quella elettromagnetica per contrastarne gli effetti che avrebbero distrutto gli atomi ed incollare tra loro protoni e neutroni. Però nella nostra esperienza comune e, fino ad allora, negli esperimenti nessuno aveva mai sentito gli effetti di questa forza. Il *raggio di azione* doveva quindi essere ridotto alle scale molto piccole, quelle del nucleo.

Ispirato dalla teoria di Fermi sul [decadimento beta](#), realizzò che [protoni](#) e [neutroni](#) dovevano scambiarsi di continuo delle particelle delle quali poteva anche prevedere vari tratti caratteristici. Questo incessante scambio poteva essere la *colla* abbastanza potente da evitare la disintegrazione del nucleo. Il fatto che il raggio di azione della colla fosse circa la dimensione del nucleo permetteva di ipotizzare anche che la massa sarebbe stata a metà strada tra quella dell'elettrone e quella del protone. Yukawa chiamò questa particella, un'altra, mesone, dal greco *che sta in mezzo*. Ora viene chiamata pione (dal *pi* greco) e con il termine mesoni si indica un'intera classe di particelle, perché ne furono individuate molte altre simili.

Era ancora tutta da scoprire ma era chiaro che una nuova misteriosa forza era necessaria, la *forza forte*.

Il quadro comincia a complicarsi e le spiegazioni a mancare. Come in un libro di [Garcia Marquez](#), i personaggi abbondano e si fa confusione facilmente. Cerchiamo di mettere un po' di ordine.

Le forze erano almeno tre: *gravitazionale*, *elettromagnetica* e *forte*. Però con queste tre era difficile spiegare il decadimento beta. I tempi di decadimento degli elementi radioattivi variano da milioni di anni a frazioni di secondo. Le interazioni tipiche della forza forte e di quella elettromagnetica sono molto più brevi; la forza gravitazionale è troppo debole, quindi ancora una volta c'è un buco da riempire. Era chiaro che ci voleva addirittura una quarta forza e che doveva essere molto più debole dell'elettromagnetismo e della forza forte ma molto più intensa di quella gravitazionale. Fermi nel suo articolo introdusse per la prima volta questa idea, la *forza debole*.

Quindi, prima della fine degli anni Trenta, era noto che c'erano quattro

fondamentali interazioni da descrivere e parecchie nuove particelle saltavano fuori ad ogni esperimento.

Lo schema che alla fine dell'Ottocento ci pareva ormai chiaro andava sempre più complicandosi.

Oggi sappiamo che queste quattro forze sono realmente fondamentali, e ci permettono di spiegare moltissimi dati sperimentali, e tre di queste – elettromagnetica, forte e debole – sono i mattoni base per il Modello Standard.

Inoltre il modello di Yukawa, generalizzato nel Modello Standard, ci dice anche come agiscono queste tre forze: delle particelle vengono scambiate tra i protagonisti dell'interazione. Una emette e l'altra assorbe, incessantemente: così si crea il legame. Ognuna di queste particelle scambiate si comporta come un *messaggero* della forza: *comunica* che c'è un campo di forza generato da chi l'ha emessa.

Concludiamo il breve racconto dei primi cento anni di fisica delle particelle con alcune scoperte che daranno l'impulso per la creazione del Modello.

Cercando di trovare una teoria che descrivesse l'elettrone rispettando la relatività di Einstein, Paul Dirac riuscì a trovare l'equazione corretta che però ammetteva due soluzioni. Una era proprio l'elettrone, l'altra era il suo *opposto* per così dire. Stessa massa, stesse proprietà ma carica elettrica positiva. Nessuno aveva mai visto una cosa del genere. Ma non ci volle molto prima che l'elettrone positivo, o *positrone*, fosse trovato in un laboratorio in California.

Era il primo esempio di *antimateria*, che non è science fiction di secondo ordine come iperspazio o wormholes, ma qualcosa che ormai i fisici hanno imparato a produrre e manipolare. Negli ultimi anni si è stati capaci di creare interi atomi di antimateria!

Oggi sappiamo che ogni particella elementare ammette il suo doppio di carica opposta e quando si scontrano si annichilano completamente liberando tutta la loro energia. Particella e antiparticella possono anche essere prodotte dall'energia del vuoto, vivere un infinitesimo, e scomparire di nuovo. Eventi come questo non sono catastrofici ma avvengono di continuo nelle enormi macchine costruite per indagarle: gli acceleratori di particelle. All'^{LHC} (Large Hadron Collider) di Ginevra si fanno collidere proprio fasci di protoni e antiprotoni.

Il numero di particelle che abbiamo introdotto si è moltiplicato per due e ancora non abbiamo un piano per classificarle.

I coloratissimi quark

L'ultimo pezzo che completa l'*elenco* dei protagonisti del Modello Standard sono i *quark*.

Quando dagli anni '30 i fisici cominciarono a costruire i primi acceleratori, furono in grado di creare particelle nuove a piacimento. Alla fine degli anni Cinquanta si conoscevano 30 particelle, dieci anni dopo erano quasi cento e divennero velocemente centinaia! Ma quelli erano anche gli anni in cui uno squarcio di luce iniziò a fare chiarezza in questo interminabile zoo di particelle.

La direzione luminosa la indicarono indipendentemente e contemporaneamente Gell-Mann e Zweig che proposero un sistema per dare ordine alla classe dei *barioni* e *mesoni*, le particelle più pesanti che si conoscevano. Secondo la loro teoria lo schema poteva essere compreso se barioni e mesoni fossero stati composti da particelle più piccole. Gell-Mann chiamò queste particelle “quarks”, da una citazione di un libro di [James Joyce](#), *Finnegans Wake*: “*Three quarks for Muster Mark...*”. Nessuno ha mai capito perché abbia scelto questa parola, ma fu accolta con entusiasmo dai fisici che stavano finendo i nomi a disposizione per lo zoo.

Dovevano esistere tre tipi di questi quark: li chiamò *up*, *down* e *strange*. Con queste sole tre particelle potevano essere ricondotti alla ragione qualche centinaio di barioni e mesoni.

I mesoni dovevano contenerne due soli, un quark e un antiquark. I barioni dovevano essere composti da tre quark. Un protone ad esempio è formato da due *up* e un *down*. Il neutrone da due *down* e un *up*.

Tre sole particelle, e le loro antiparticelle, permettevano di spiegarne centinaia: ora cominciamo a ragionare.

L'ultimo pezzettino riguarda sempre i quark e per introdurlo abbiamo bisogno di due concetti che introduciamo molto brevemente, senza scendere troppo nel dettaglio.

In natura tutte le particelle hanno uno *spin*. Come delle trottole, ruotano continuamente attorno a se stesse (non esattamente ma è una buona analogia). A seconda del loro *spin* si possono dividere le particelle in due classi: *bosoni*, in onore del fisico indiano [Bose](#), e *fermioni*, da [Enrico Fermi](#).

Quello che ci interessa è che i bosoni sono molto *sociali*, possono stare in tanti nello stesso posto, mentre due fermioni con identiche proprietà non possono occupare lo stesso luogo contemporaneamente, sono *solitari*.

Come se avessimo tante palline bianche e nere da collocare in vari cassetti, la regola è che quelle nere, i bosoni, possono stare con altre nere senza problemi mentre quelle bianche devono stare da sole, non è possibile un'altra pallina bianca nello stesso cassetto.

Torniamo ai [quark](#). I quark sono dei fermioni: è escluso che due identici stiano assieme.

Si conosceva un [barione](#) con una massa molto grande (massivo) che secondo il modello di Gell-Mann deve essere composto da tre quark *up*. Ma questo è impossibile perché sono dei fermioni, quindi non possono essere tutti e tre

uguali. Ma che cosa può distinguere un quark *up* da un altro?

Secondo un fisico dell'Università del Maryland, Oscar Greenberg, i quark dovevano avere un'altra caratteristica che li distinguesse tra loro; ma nei **barioni** non si manifestava e quindi doveva essere una "carica" che aveva somma zero per i tre quark. Come in un atomo composto da protoni positivi ed elettroni negativi la cui carica totale è nulla, così doveva accadere per i barioni, con la complicazione che ora di tipi di carica diversa ne avevamo ben tre.

Greenberg chiamò questa carica *colore* e ne assegnò tre ai quark: rosso, blu, verde. Ma avrebbe potuto chiamarli anche Qui, Quo e Qua, sono solo delle etichette.

Il nome ha comunque un senso e deriva dal fatto che se sommiamo una luce rossa, una blu e una verde otteniamo una luce bianca, senza colore, proprio come le proprietà che stavamo cercando: tre cariche a somma nulla.

Quindi tutti i quark sono *colorati* ma formano solo particelle bianche, senza carica.

Il fatto che in natura ci siano solo particelle *bianche* è una manifestazione della simmetria che sta dietro la forza forte.

La teoria che descrive questa forza *colorata* è chiamata per questo motivo *cromodinamica*, dal greco *chroma*, colore, ed è un pezzo del Modello Standard⁹.

Con quest'ultima idea si completa una classificazione soddisfacente di centinaia di barioni e **mesoni**, molto più *economica*. Tre sole per dominarne cento: un risultato di semplicità tale da rendere orgoglioso ogni fisico teorico. Finalmente ora abbiamo le basi per presentare il Modello Standard e arrivare al bosone di Higgs.

Il maestro zen ha finito di tracciare tutte le linee ed è il momento di ammirare il risultato.

Il Modello Standard e il bosone di Higgs

Quello che oggi chiamiamo Modello Standard è stato sviluppato sostanzialmente tra gli anni Sessanta e Settanta da una serie di menti brillanti ed è valso parecchi premi Nobel.

È un'elegantissima teoria matematica basata essenzialmente, come sin da principio ho sottolineato, sul concetto di **simmetria**.

Punto primo: è una *teoria di campo*. Descrive cioè i legami e le caratteristiche di **campi** che permeano lo spazio. Il concetto ci è più familiare se pensiamo al campo elettrico. Prendiamo una pallina carica e avviciniamone una di carica opposta, si attrarranno anche se non si toccano, perché entrambe creano un campo elettrico attorno a sé e si influenzano a vicenda. Il campo magnetico è identico: non ho bisogno di arrivare a toccare un bullone di ferro per

catturarlo con il mio magnete, basta che mi avvicini un po' ed ecco che riesco ad attrarlo. Il bullone *ha sentito* che lo spazio attorno a sé era cambiato: mutato dalla presenza del campo magnetico.

La stessa luce è un'onda del campo elettromagnetico che si muove nello spazio, come un'onda nel mare, e il mare è il nostro campo in questo caso.

I campi del Modello Standard estendono quest'idea. Inoltre, introducendo anche gli effetti della Meccanica Quantistica, possono comportarsi anche come particelle: i *quanti* del campo, le più piccole entità che lo compongono. Se il campo ha abbastanza energia, può generare nuove particelle dal vuoto secondo la formula più famosa nella storia della fisica: $E=mc^2$. L'energia contenuta in una regione del campo è data da E , la massa delle particelle create da m e c la velocità della luce. Essendo c un numero enorme ci vuole parecchia energia per produrre particelle anche leggere.

Uno di questi quanti è noto al grande pubblico: è il *fotone*. È il quanto del campo elettromagnetico: l'oggetto più piccolo che compone la luce. In ogni momento siamo inondati di fotoni, basta accendere una lampadina o mettersi al sole.

Ma è arrivato il momento delle presentazioni.

I protagonisti

Nelle pagine precedenti abbiamo ripercorso anni di fisica ed abbiamo incontrato varie particelle. Ora ne conosciamo tante da riempirci un libro grosso come un elenco del telefono (libro effettivamente pubblicato ogni anno, che classifica tutte le particelle note¹⁰). Il quadro è potuto sembrare confusionario, ed in effetti lo è stato per anni, ma ora possiamo dare un senso a tutte queste informazioni introducendo i protagonisti del Modello Standard.

Prima di tutto abbiamo le particelle di materia, e ne abbiamo già viste parecchie. Quelle fondamentali sono i **quark**, ne conosciamo sei diversi, divisi a gruppi di due per similarità. Poi ci sono i **leptoni**, dal greco particelle *molto leggere*, tra cui l'**elettrone** e il **neutrino**: anche in questo gruppo ci sono sei tipi, e anche questi a coppie.

Molto simmetrico.

Fine.

Tutta la materia osservabile finora è spiegata a partire da queste 12 particelle (e le loro antiparticelle). Come per i pezzi delle costruzioni, ne abbiamo di pochi tipi ma le combinazioni sono virtualmente infinite da riempire un elenco del telefono.

In che modo si possono attaccare tra loro questi vari pezzettini? Qui entrano in gioco le tre **forze** fondamentali che il modello riesce a spiegare: forza elettromagnetica, debole e forte. La forza gravitazionale non è possibile includerla nel Modello Standard: si manifesta in modi troppo differenti per

ricondurla alle leggi del MS. Ci sono vari tentativi, finora tutti falliti, di unificarla con le altre: per ora rimane fuori, indipendente.

Le interazioni avvengono attraverso scambi di una particella per ogni forza, un *mediatore*. I *fotoni* per l'elettromagnetismo, i *bosoni W e Z* per la forza debole e i *gluoni* per la forza forte (da "glue", colla), le ultime quattro particelle che completano il Modello Standard: 16 in totale [\[Figura 4 Cronologia della scoperta delle 16 particelle del Modello Standard\]](#).

I mediatori sono i quanti dei campi usati per descrivere le forze: *ogni forza un campo, ogni campo un quanto*.

Tutte le particelle subiscono la forza debole, solo quelle cariche subiscono anche la forza elettromagnetica, e solo i quark anche quella forte.

Perciò, ad esempio, il neutrino, essendo neutro e leptone può solo interagire tramite la forza debole, quindi generalmente molto poco con il resto del mondo. Un neutrino può attraversare la Terra da parte a parte senza batter ciglio. Si spiega quindi perché fosse capace di nascondersi così bene ai fisici sperimentali per circa venti anni, non lasciava mai traccia di sé, solo in pochissime occasioni.

Una delle macchine più avanzate per rivelarlo è stata costruita in Giappone sotto una montagna nella zona centrale, il [SuperKamiokande \[Figura 5\]](#). La visione è spettacolare: un'enorme caverna scavata nella roccia racchiude una vasca di metallo che contiene varie decine di migliaia di tonnellate di acqua purissima. Pur utilizzando una montagna d'acqua come nel superKamiokande, il numero dei neutrini che si riescono a catturare è di poche migliaia all'anno: la [forza debole](#) è veramente debolissima rispetto ad esempio alla forza elettromagnetica.

Eppure negli anni Settanta un gruppo di fisici scoprì che esisteva una simmetria tra queste due forze e che si potevano descrivere entrambe con le stesse equazioni, semplificando ulteriormente lo schema. Ritorna in mente Maxwell, i campi elettrici e i campi magnetici. In effetti è un'altra [unificazione](#): avevano scritto la teoria *elettrodebole*. Le nuove equazioni non distinguono tra elettromagnetismo e forza debole, sono perfettamente interscambiabili.

Però in natura la differenza c'è, eccome: la forza debole ha un raggio di interazione piccolissimo, la scala atomica. Nel Modello Standard, un raggio di azione non infinito si traduce necessariamente in una massa per i [mediatori W e Z](#), che devono essere molto pesanti, non senza massa come i fotoni. Ma allora la simmetria dove è andata a finire? È veramente un mondo simmetrico?

I fisici avevano già imparato l'importanza delle simmetrie nel creare una solida impalcatura e questa non poteva essere un semplice caso. Bisognava trovare un modo per rispettarla spiegando gli esperimenti.

[Higgs](#) e altri fisici negli anni Sessanta trovarono una soluzione plausibile

aggiungendo un'ulteriore particella: il *bosone di Higgs* appunto (ci eravate già arrivati da soli...).

La teoria dice che nell'universo primordiale il campo di Higgs era nullo e quindi le due forze erano una sola, un mondo perfetto e soprattutto simmetrico. Ma era un equilibrio precario e millesimi di secondo dopo il **Big Bang**, il campo assunse un valore diverso da zero e le forze si separarono in forza elettromagnetica e forza debole. La simmetria si era rotta a causa di questo campo, uno squarcio nell'eleganza originale.

Che cosa è successo in quegli istanti? Una fluttuazione, una piccola variazione ha scompigliato l'ordine iniziale.

Per avere un'idea di questo meccanismo pensiamo ad una trottola: se la facciamo ruotare molto velocemente questa ci appare perfettamente simmetrica e stabile ma dopo qualche secondo comincia ad oscillare, dondolando a destra e sinistra fino a cadere da un lato. Il perché lo possiamo immaginare: può essere stato il tavolo non completamente liscio, la trottola che non era omogenea, l'aria circostante, oppure anche un solo minuscolo granello di polvere. È bastata una piccola perturbazione nelle condizioni iniziali per far sì che la trottola cadesse da un lato.

Niente di troppo diverso deve essere accaduto al campo di Higgs negli istanti successivi al Big Bang.

Quindi ora viviamo in un mondo non più simmetrico ma che ha ancora un ricordo delle geometrie iniziali, ben descritte dal Modello Standard. In fisica questo si chiama *rottura spontanea di simmetria*. Come la trottola, che è sempre simmetrica, ma è caduta su un lato.

Ci sono tantissimi esempi in fisica di rottura spontanea di simmetria. Pensiamo ai magneti. Sono composti da tantissimi piccoli magneti tutti allineati lungo una direzione per formare il campo magnetico. Se scaldiamo un magnete a migliaia di gradi perde completamente le sue caratteristiche diventando un oggetto normale. Questo perché i magnetini, disordinati dall'altissima temperatura, puntano in tutte le direzioni e quindi in media, in nessuna direzione. Una condizione di simmetria, perché nessuna direzione è privilegiata.

Quando raffreddiamo il materiale fino al di sotto della temperatura chiamata di Curie, i magnetini si riallineano e tornano a puntare tutti insieme nella stessa direzione, che dipende da come abbiamo raffreddato il materiale. La simmetria è stata rotta spontaneamente da minime perturbazioni mentre la temperatura scendeva: ora c'è una direzione preferita, quella di tutti i magnetini. L'esempio della trottola ritorna sotto altre forme ma con gli stessi ingredienti di base.

Il campo di Higgs, una volta rotta la simmetria, si comporta in modo *strano* rispetto agli altri. Quando è nullo, tutte le particelle lo attraversano senza alcun effetto, ma quando ha un valore diverso da zero allora si comporta

come un mare. Alcune particelle sono più *idrodinamiche* di altre, come se incontrassero maggiore o minore resistenza nel loro moto: la resistenza che incontrano gli conferisce una *massa*. Il fotone è perfettamente idrodinamico, ignora il campo di Higgs, ma i [bosoni W e Z](#) fanno più resistenza e dunque hanno una massa enorme, la simmetria elettrodebole è rotta.

Un'analogia molto popolare è la seguente. Pensiamo ad una sala conferenze piena di giornalisti che chiacchierano tra loro, che saranno il nostro campo di Higgs. Se una persona, uno sconosciuto, entra in sala e la attraversa da un lato all'altro, nessuno dei giornalisti se ne curerà. Quindi lo sconosciuto potrà agevolmente, leggero, passare tra loro. Se, al contrario, una persona molto importante e famosa, Einstein ad esempio, fa il suo ingresso in sala, verrà immediatamente circondato dai giornalisti che lo vorranno intervistare, anche perché riportare una dichiarazione di Einstein nel 2012 è piuttosto raro! Farà molta fatica ad arrivare all'altro lato della sala, è molto *pesante*. I giornalisti-campo di Higgs si aggregano attorno ad alcune particelle più che ad altre e conferiscono loro una massa perciò hanno più difficoltà a muoversi.

Se nella sala piena solo di giornalisti uno di loro dice di essere venuto a conoscenza di una notizia importante, tutti gli altri gli si avvicineranno per saperne di più: si forma una piccola perturbazione nel campo di Higgs, il nugolo di giornalisti: è il bosone di Higgs.

Senza scrivere la teoria matematica non è banale riuscire a crearsi un'immagine mentale del comportamento del campo di Higgs. Gli esempi precedenti rimangono sempre tentativi di spiegare le equazioni senza le equazioni ma sono delle utili analogie.

Tutti i [leptoni](#) e i [quark](#) hanno una massa grazie al campo di Higgs. Il resto della materia, nuclei e atomi, deve la propria massa a interazioni tra quark e [gluoni](#). I gluoni sono una colla così forte da generare essa stessa della massa. In ultima istanza, comunque, il mondo come lo conosciamo esiste per merito del campo di Higgs che pervade ogni angolo dell'universo. Senza di esso tutte le particelle vagherebbero nel cosmo alla velocità della luce. Insomma è un elemento molto importante nell'architettura del Modello Standard. Senza l'Higgs la teoria elettrodebole non potrebbe funzionare.

Sia chiaro che nel 1964 era solo una delle possibili soluzioni al problema, ma era quella più semplice ed elegante: due qualità molto apprezzate dai fisici teorici.

Facciamo un po' di sintesi di quanto raccontato finora. Sappiamo che ci sono 12 particelle di materia, divise tra *quark* e *leptoni* (e sono tutti *fermioni*). Queste particelle vagherebbero nel nulla isolate, e il mondo non esisterebbe, se non interagissero tra loro in qualche modo. Le [interazioni](#) che conosciamo sono *gravitazionale*, *elettromagnetica*, *debole* e *forte*. La prima è troppo differente dalle altre e quindi rimane fuori dal Modello Standard. Le altre tre sono spiegate dai campi del Modello Standard, i cui quanti sono in totale 4

(tutti *bosoni*): il *fotone* per l'elettromagnetismo, le W e Z per la forza *debole*, e i gluoni per la forza *forte*. Totale 16 particelle.

Si scopre però che due di queste forze sono in fin dei conti la stessa, grazie alle simmetrie del Modello: la forza *elettrodebole*. Purtroppo in natura questa simmetria non è manifesta e per riconciliare il senso estetico dei fisici teorici con gli esperimenti abbiamo bisogno di un altro campo, il campo di Higgs (di cui il bosone è il quanto elementare).

Quindi la previsione del campo di Higgs è un misto di ricerca del bello (sì anche in fisica), principi di simmetria e risultati sperimentali. Il senso estetico in una teoria non è un parametro da sottovalutare. Una teoria troppo complicata nasconde molto spesso qualcosa di più essenziale al di sotto e l'essenzialità è desiderabile, come ci insegna il monaco zen.

La missione del campo di Higgs è di rompere spontaneamente questa simmetria e dare massa ai fermioni del Modello Standard. Senza la massa gli atomi, le molecole e alla fine la vita non potrebbero esistere.

La sola ipotesi di esistenza del campo di Higgs permetteva di prevedere una serie di fatti come le masse dei bosoni W e Z, ancora non scoperti ma che da qualche parte dovevano pure essere.

I primi a scovarli furono i fisici del CERN (Centro di Ricerche Nucleari Europeo) capitanati da [Carlo Rubbia](#) che ricevette il Nobel proprio per questa importante misura, la prima conferma di una precisa previsione del Modello Standard.

Ma ancora non vi era traccia del bosone di Higgs, in nessuno dei dati raccolti fino a quel momento.

Per anni la ricerca è continuata senza mai trovare una risposta definitiva, escludendo via via delle possibilità su che massa potesse avere. Fino all'accensione del Large Hadron Collider del CERN a Ginevra, la più grossa macchina mai costruita dall'uomo. Che, a luglio 2012, ha scoperto che certamente esiste una particella che ha molte delle caratteristiche attese per il bosone di Higgs.

Cerchiamo di capire come hanno fatto e come ci sono arrivati: addentriamoci nella *caccia grossa all'Higgs*.

[1] Queste classi di trasformazioni in matematica prendono il nome di *gruppi*.

[2] *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, una delle opere più rilevanti di Galileo, fondamento della fisica moderna.

[3] Cade in "verticale" per noi che lo lasciamo. Però dipende dall'osservatore. A terra chi osserva il sasso lasciato cadere da una persona sulla nave vedrà una parabola perché si somma anche il moto della nave.

[4] Che si muove a velocità costante, per essere precisi.

[5] Eleganza che si può spingere oltre. Aggiungendo il formalismo della relatività di Einstein le equazioni possono essere ridotte ad una sola, brevissima.

[6] L'esperimento di Michelson e Morley (1887) che mostrò che l'etere non esiste e che la velocità della luce è indipendente dal sistema di riferimento, fondamento della relatività einsteiniana.

[7] La fisica newtoniana non viene per questo abbandonata perché funziona in modo egregio alle scale di lunghezza alle quali siamo abituati a vivere. La Meccanica Quantistica si riduce a quella classica in questo caso. Usare la Meccanica Quantistica per calcolare la traiettoria di un proiettile sarebbe come usare un cannone per uccidere le zanzare!

[8] Il piatto *negativo* è chiamato catodo.

[9] In inglese $_{\text{QCD}}$, Quantum ChromoDynamics, per distinguerla dalla QED, Quantum ElectroDynamics: l'elettromagnetismo.

[10] La pubblicazione è curata dal Particle Data Group (PDG), che rivede e cataloga tutti i risultati sperimentali di vari laboratori sparsi per l'intero mondo. Per i più curiosi esiste la [versione web](#) liberamente consultabile.

Fotografare significa riconoscere – nello stesso attimo e in una frazione di secondo – il fatto in sé e la rigorosa organizzazione delle forme sensibili che lo costituiscono. Mettere sullo stesso asse la mente, gli occhi e il cuore.

Henri Cartier-Bresson

Il Large Hadron Collider: il cacciatore

La macchina delle particelle

Dopo più di venti anni tra progetto e costruzione il [Large Hadron Collider](#) (_{LHC}) è entrato in funzione a fine 2008, un centinaio di metri sotto una valle svizzera vicino Ginevra.

È l'ultima e la più potente di una serie di macchine costruite dai fisici sperimentali per capire sempre meglio come funziona la parte più piccola del mondo: gli [acceleratori](#) di particelle.

Prima degli acceleratori ci si affidava ai cosiddetti *raggi cosmici*. Particelle molto energetiche di ogni tipo che ogni momento arrivano copiose sulla Terra dallo spazio. Però, aspettare che la natura sia così generosa da far passare una particella nel nostro rivelatore non è il massimo. Meglio progettare qualcosa che acceleri le particelle alle energie che ci servono. Poi possiamo farle scontrare tra loro, vedere cosa succede e confrontarlo con quello che ci aspettiamo.

Il primo antenato è stato costruito nel 1931 da [Lawrence e Livingston](#) ed aveva un diametro di 27 centimetri. Poteva accelerare gli elettroni ad una energia di circa un milione di elettronvolt (1 MeV). Un elettronvolt (eV) è l'energia che acquista un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di un volt. Un'energia molto piccola, ma stiamo parlando anche di oggetti molto piccoli. Comunque arrivarono ben presto macchine più grosse.

A Berkeley in California, già venti anni dopo, le particelle viaggiavano a un'energia di 380 MeV e ben presto si arrivò al gigaelettronvolt (1 GeV), un miliardo di elettronvolt.

L'energia a cui lavora attualmente l'_{LHC} è di 7 TeV, teraelettronvolt: 7 mila miliardi di elettronvolt, 7 milioni di volte più potente del primo acceleratore di 80 anni fa.

I numeri nascondono a volte la portata di un'informazione. L'energia di 7 TeV è più o meno paragonabile a quella di un'ape in volo. Potrebbe sembrare quindi inutile costruire chilometri di tubi, cavi, magneti per fare quello che già fa un'ape qualsiasi. Il punto è che stiamo dando l'energia di un'intera ape ad uno solo dei suoi protoni, miliardi e miliardi di volte più piccolo.

Cerchiamo di capire meglio la differenza cruciale nella concentrazione di energia in piccole zone di spazio. Prendiamo un martello e diamo un forte colpo su un tavolo, possibilmente non prezioso! Al massimo facciamo un'ammaccatura. Se ora diamo la stessa martellata su un chiodo siamo capaci di farlo entrare facilmente nel tavolo, stessa energia ma concentrata. Se avessimo un chiodo resistentissimo spesso quanto un capello potremmo farlo entrare in una lastra di metallo. Perciò l'energia racchiusa in una infinitesima regione dello spazio, il protone, è veramente notevole. Secondo i tecnici del _{CERN}, un fascio di protoni di _{LHC} alla massima energia potrebbe facilmente

sciogliere qualcosa come cinquecento chili di rame, se lasciato libero.

^{LHC} è una macchina colossale, che si fa fatica anche a descrivere tanti sono i numeri e i dettagli.

L'approvazione del progetto al ^{CERN} risale al 1994. Da allora si sono unite praticamente tutte le nazioni industrializzate al mondo nella collaborazione, un progetto totalmente internazionale anche se a guida strettamente europea.

Lo scopo del progetto era costruire una macchina capace di far collidere protoni e antiprotoni ad una energia totale di 14 TeV. All'^{LHC} vengono fatti scontrare anche nuclei di atomi pesanti, composti quindi di tanti protoni e neutroni, chiamati in una sola parola adroni. Il nome Large Hadron Collider (Grande Collisore di Adroni) deriva da questa caratteristica, che sia Large è facile capirlo.

L'acceleratore andava a sostituire il glorioso ^{LEP} (Large Electron-Positron collider) che aveva dato numerose conferme del [Modello Standard](#), e che è stato spento nel 2000 per fare posto all'^{LHC}.

Poche parole sul funzionamento basilare di un acceleratore sono importanti anche per comprendere le dimensioni del progetto.

In pratica prendiamo delle particelle che sono quasi a riposo e cominciamo a dargli dei *calcetti* mentre attraversano un tubo circolare. Ad ogni giro una nuova spinta, sino a raggiungere l'energia prefissata. Sembra parecchio facile ma il problema più grosso è che le particelle devono appunto percorrere un cerchio¹¹, e quindi dobbiamo aggiustare la traiettoria di continuo. Sappiamo dalle lezioni di fisica a scuola che un campo magnetico è capace di deviare le particelle cariche: abbiamo bisogno di magneti lungo tutto il percorso per raggiungere il nostro scopo. E il percorso che fanno i protoni dentro ^{LHC} è lungo quasi trenta chilometri...

Ci vogliono 1237 magneti potentissimi per far sterzare i protoni lungo il tunnel. I magneti capaci di fare questo lavoro sono speciali, sono superconduttori: la corrente che ci passa attraverso non dissipa energia, e questo consente di spingere al massimo la potenza per deviare i protoni che viaggiano velocissimi. Per avere superconduzione però dobbiamo tenerli tutti quanti ad una temperatura attorno ai -271 °C, costantemente immersi nell'elio liquido refrigerante. I magneti costituiscono il maggiore dispendio di energia di una macchina come ^{LHC}, paragonabile a quello di un Airbus 380 che voli a 700 km/h¹².

Ma non potevamo costruire un tunnel più piccolo? Era necessario così lungo? In realtà, sì.

Prima di tutto, ^{LHC} sfrutta il tunnel già costruito per il ^{LEP}, ma questo sposta solo la risposta alla domanda.

Parlando dell'atomo di Rutherford abbiamo già accennato che un oggetto carico che viene accelerato perde energia sotto forma di fotoni. Si accelera un oggetto se variamo la sua velocità, sia il valore che la direzione. Perciò i

protoni anche andando a velocità costante nel tunnel, vengono deviati continuamente dai magneti e rilasciano fotoni, rallentando. Più il cambiamento di direzione è repentino più perdono energia: ecco perché si desidera la curva più dolce possibile, altrimenti tutta l'energia che pompiano dentro l'acceleratore verrebbe persa in questa *dissipazione*. I 27 km del tunnel non sembrano così tanti ora.

I magneti costringono il fascio di protoni a correre lungo il tunnel dentro un piccolo tubo di pochi centimetri di diametro che non contiene praticamente nulla: il vuoto al suo interno è dieci volte più spinto di quello che c'è sulla Luna. Lungo tutto il cammino non vogliamo che le particelle interagiscano con qualcosa prima dello scontro vero e proprio.

Sono due i fasci che girano contemporaneamente in senso opposto: quello dei protoni e quello degli antiprotoni. In quattro punti i fasci vengono focalizzati e si scontrano: quello che avviene dopo è la parte più interessante.

In ognuno di questi quattro punti sono state scavate delle enormi caverne, cento metri nel sottosuolo e grandi decine di metri. La più grande è quella di A_{TLAS} , finita nel 2002: alta 40 metri, lunga 55 e larga 35, per contenere l'enorme rivelatore che era stato progettato.

Un rivelatore in fisica delle particelle è come un'enorme macchina fotografica che ci permette di tracciare le traiettorie e le energie di tutte le particelle prodotte in modo che siamo in grado di identificarle.

I rivelatori più grossi di L_{HC} sono A_{TLAS} e il Compact Muon Solenoid (C_{MS}) che sono anche i due esperimenti coinvolti nella ricerca del bosone di Higgs. Gli altri sono A_{LICE} e L_{HCb} [Figura 6 Schema del L_{HC}]. Il rivelatore di C_{MS} è più o meno equivalente ad un sensore di 75 milioni di pixel, non eccessivo se pensiamo che una macchina fotografica professionale ne può avere anche di più. La differenza è che ogni secondo scatta milioni di volte!

Ma non tutti gli scatti sono interessanti e quindi i dati, dieci milioni di miliardi di byte al secondo, passano attraverso una coppia di filtri che sono programmati per selezionare velocemente gli eventi potenzialmente interessanti: tu sì, tu no, dei vigili incessanti nel loro lavoro. Non sarebbe materialmente possibile registrare tutto quanto, è una quantità di dati inimmaginabile e già ora il flusso di informazioni è ineguagliato al mondo.

Ma come fa un rivelatore [Figura 7] (*detector*) a darci le informazioni che ci servono?

Seguiamo che cosa accade dopo che lo scontro fatale è avvenuto. Date le energie di L_{HC} , per ogni collisione [Figura 8] vengono create decine di particelle che si disperdono ovunque. Dunque è necessario un modo per riuscire a tracciarle. Il primo segmento, quello più vicino al tubo vuoto è proprio uno strato di sensori come in una macchina fotografica: tanti pixel che segnano che da lì è passata una particella, milioni di pixel, è il *tracker*, il *tracciatore*. In effetti non è un solo strato ma sono vari, uno molto vicino al

tubo per riuscire a individuare esattamente il punto dove è avvenuto lo scontro, chiamato *vertice*.

Bene, siamo in grado di tracciare ogni particella ma non ci basta: abbiamo bisogno anche della sua energia. Per calcolarla, la strategia è di farle passare attraverso materiali così densi da fermarle e costringerle quindi a perdere tutta la loro energia dentro questi materiali, poi è relativamente facile misurare quanta energia hanno rilasciato. Questi apparati si chiamano *calorimetri* e richiedono uno sviluppo in ricerca dei materiali migliori allo scopo. Sono anche fatti a segmenti così ci possono dare anche loro un'informazione utile per le traiettorie.

I calorimetri di [Atlas \[Figura 9\]](#) sono colossali, decine di metri in ogni direzione, impressionanti.

Ma tutta la macchina leva il fiato. Dieci anni di costruzione effettiva, venti di progetto e sviluppo, chilometri di cavi elettrici e dati, tonnellate di magneti e calorimetri calate sotto terra per cento metri, capacità di calcolo e di trasferimento dati da record, migliaia di persone da tutto il mondo, coordinamento internazionale di gruppi di centinaia di persone tra tecnici, ingegneri, fisici sperimentali e teorici, stato dell'arte praticamente in ogni campo: questo è LHC e fa venire le vertigini solo a pensarci.

Il solo fatto che funzioni una volta accesa è magnifico, talmente è alta la complessità.

Finalmente abbiamo tutte le informazioni che ci servono e possiamo a questo punto premere il pulsante *on* nelle control room della macchina e iniziare a curiosare dentro l'infinitamente piccolo.

Perché LHC è la macchina nella quale le equazioni scritte sulla carta prendono vita nel mondo reale.

La caccia

Uno dei numerosi obiettivi nella costruzione dell' LHC è la ricerca dell'evasivo bosone di Higgs.

In molti si potranno chiedere: sono quasi cinquanta anni che si aspetta di trovare una particella così importante nell'economia del [Modello Standard](#), come mai il grande pubblico ne ha sentito parlare solo da qualche anno?

La risposta breve è che all'inizio se ne sapeva troppo poco, anche per impegnarsi a cercarla.

La particolarità del campo di Higgs e della sua particella era che in sostanza se ne poteva sì prevedere l'esistenza ma non le sue proprietà importanti a livello sperimentale. I fisici teorici erano incapaci di dare una stima ragionevole della sua massa, ancor meno della forza dei legami con le altre particelle. La teoria diceva che questi legami, in linea di principio, potevano essere i più disparati: se molto deboli, avrebbero reso la particella molto più

difficile da scoprire. Un'incognita da tenere ben in conto quando si progetta un esperimento.

Negli anni successivi all'ipotesi del bosone da parte di tre gruppi indipendenti (non il solo Peter Higgs), si sapeva ancora poco e sarebbe stato come cercare il classico ago nel pagliaio. Lo stesso Higgs una decina di anni dopo si scusava con la comunità sperimentale per non essere ancora in grado di darle qualche numero per aiutarla nella ricerca. Inoltre gli acceleratori negli anni '70 e '80 non erano ancora abbastanza potenti. In ogni caso, si cominciarono a fare degli esperimenti almeno per sondare il terreno ed escludere alcune zone del pagliaio.

Fu con il progetto e la costruzione di due macchine, l'europeo $_{LEP}$ a Ginevra e l'americano [Tevatron \[Figura 10\]](#) vicino Chicago, che si poté fare un balzo in avanti ed eliminare sempre più zone dalla ricerca, restringendo sempre di più il campo delle possibilità. Vediamo qualche dettaglio sul come.

La massa è energia, come ci dice Einstein, e l'energia negli acceleratori si misura in elettronvolt. Quella del bosone di Higgs poteva essere compresa tra 100 GeV e 600 GeV circa, prima di questi esperimenti, una regione vastissima. Per avere un paragone di scala: il protone ha una massa di circa 1 GeV, perciò stiamo parlando di energie veramente grandi.

Ma come si cerca una particella come l'Higgs? E con quale certezza si può dire di averla trovata, oppure escludere con analoga certezza che nel pagliaio non ci sia alcun ago da cercare?

Il Modello Standard è la chiave perché ci permette di prevedere con precisione qual è la probabilità che certe particelle vengano prodotte dopo lo scontro dei protoni-antiprotoni. Usando questa informazione, gli sperimentali simulano tantissime collisioni al computer ricavando il numero di eventi che si aspettano di trovare, per poi poterli confrontare con i dati reali.

Nelle collisioni all' $_{LHC}$, l'Higgs può venire prodotto in tanti modi (se forniamo abbastanza energia), rimanere *in vita* per un istante e poi scomparire generando altre particelle (si dice *decadere*). Sono di nuovo gli effetti della [Meccanica Quantistica](#). Le particelle iniziali e quelle finali identificano il cosiddetto *canale*. E per l'Higgs i canali di produzione e decadimento sono numerosissimi.

Ma ricordiamo un fatto importante: l'Higgs non lo vedremo mai direttamente, vive troppo brevemente, dovremo sempre *leggere* la sua impronta, in base a quello che possiamo osservare, cioè le particelle nelle quali è decaduto. È come cercare di ricostruire la forma originale di un'anfora o di una rovina romana ispezionando i pezzi di un sito archeologico. Non è un compito facile ma con la giusta esperienza, e le informazioni su come i vari pezzi possono unirsi tra loro, non è un lavoro impossibile.

Il canale più semplice per gli sperimentali è quello in cui l'Higgs si trasforma in due fotoni [\[Figura 11 Schema del decadimento del bosone di Higgs in due](#)

fotoni]. I fotoni avranno un'energia che dipende dalla massa dell'Higgs. Bene, sembra un'impronta molto facile. Il problema fondamentale è che ci sono tante altre particelle che hanno un'impronta simile: decadono e producono dei fotoni. Ma come distinguo i due fotoni prodotti dall'Higgs da tutti gli altri modi di produrli?

Ecco che entrano in gioco le simulazioni accennate prima. Grazie a lunghi calcoli al computer, possiamo prevedere quanti fotoni ci possono essere se escludiamo che l'Higgs esista, per poi raffrontarli con i dati reali. Questo per l'intervallo di energie che ci permette il nostro acceleratore. Se i fotoni rivelati da A_{TLAS} e CMS non si discostano troppo da questo numero significa che l'Higgs non può essere prodotto a quell'energia: l'ipotesi che in quella zona non ci sia è confermata. Chiaramente non si fa *ad occhio* ma ci sono metodi statistici per capire con quale certezza possiamo escludere o meno che sia stato prodotto.

Combinando i risultati di LEP e del Tevatron, sino all'anno scorso, si escludeva la zona sotto i 115 GeV e sopra i 160 GeV. Tuttavia all'interno di questo intervallo la certezza statistica era troppo bassa per affermare di non aver trovato nulla¹³.

Al contrario, per poter dire di averlo trovato, bisogna mostrare una significativa differenza tra le previsioni delle simulazioni (quelle senza l'Higgs) e i dati dei rivelatori; una differenza che senza ombra di dubbio non possa essere spiegata da modelli che escludono l'Higgs: solo l'Higgs, o una nuova particella, può spiegare i dati osservati.

“Senza ombra di dubbio” è un concetto troppo vago per i fisici che sono abituati a quantificare anche la certezza con cui fanno le loro affermazioni (viceversa, *l'errore* intrinseco in ogni misura).

Questa *certezza* si misura in σ (*sigma*), la deviazione rispetto al valore medio atteso, compreso l'errore. Più è grande la deviazione e più un risultato inatteso è *significativo*: più fotoni rispetto a quelli previsti dalle simulazioni sono un risultato significativo. Ma quanti fotoni in più servono? Ne bastano uno o due, oppure ne servono almeno dieci? Questo dipende dalle simulazioni, e quindi in ultima analisi da quanto conosciamo bene il nostro acceleratore. Inoltre, una fluttuazione nel numero dei fotoni è sempre statisticamente attesa. È come tirare fuori da un sacco di palline bianche e nere ogni volta dieci palline e contare quante sono le bianche. Se in media ne trovo cinque ad esempio, non sempre ne troverò esattamente cinque. Talvolta una sola, tre o anche tutte e dieci: tutti i casi sono possibili ma quello più probabile è che ne trovi cinque. Quindi un semplice eccesso nel numero dei fotoni non basta.

Tornando al sacco di palline. Supponiamo che me lo consegnino dicendomi che le palline sono metà bianche e metà nere: quindi quando ne estraggo dieci alla volta mi aspetto, in media, di averne in mano cinque bianche. Al

contrario, ripetendo le estrazioni osservo che le palline bianche sono sempre di più di quelle nere: l'ipotesi che siano distribuite equamente non convince proprio. Detto in altre parole, ad ogni nuova estrazione sono sempre più sicuro che il sacco non contenga metà palline bianche e metà nere: continuo ad accumulare nuove prove sull'effettivo contenuto del sacco.

Per essere veramente certi di aver stimato bene palline e fotoni, i fisici sperimentali hanno scelto come soglia minima per dichiarare una scoperta, 5σ , cinque sigma. A cinque sigma la probabilità di aver preso un abbaglio, scambiando un eccesso di fotoni per una nuova particella, è meno di una su un milione. In altre parole, a cinque sigma produrre così tanti fotoni per puro caso è praticamente impossibile, è *certamente* una nuova particella (al 99.99994%!).

Ora possiamo rispondere alla curiosità iniziale: perché solo di recente si è sentito parlare del bosone di Higgs. La differenza tra il numero dei fotoni previsti senza l'Higgs e quelli misurati è veramente piccola e per ridurre l'errore, aumentando la significatività del risultato, bisogna accumulare una quantità di dati colossale. Serve LHC.

Pensiamo a una foto del cielo. Se ci proviamo con la nostra macchina fotografica una limpida notte d'estate in montagna, probabilmente otterremo una foto con pochissimi flebili puntini luminosi. Però se aumentiamo il tempo di esposizione a qualche ora i punti si fanno più intensi, altri ne compaiono, alcuni scompaiono perché magari era solo un aereo che passava. Se abbiamo un osservatorio che punta al cielo per giorni o anni (come [Hubble](#)), la fotografia che si ottiene è fantastica e con tantissimi dettagli. Possiamo scoprire nuove stelle, galassie o fenomeni impressionanti in questo modo (come le [supernove](#)), sempre che la luce che abbiamo catturato sia abbastanza da fornire una prova convincente.

Analogamente si comportano gli sperimentali ad A_{TLAS} e CMS. Invece che una sola foto, ne scattano di continuo per sovrapporre e formare una solida evidenza di aver trovato una nuova particella. Oppure per affermare che in quella zona del *cielo* particelle non ce ne sono, è tutto buio anche se rimango ad osservare per anni. Così si dà un numero alle certezze e alle incertezze.

L'assedio finale

Il 13 dicembre del 2011 c'è stata una presentazione congiunta dei due gruppi sperimentali. A_{TLAS} e CMS per una precisa scelta nelle fasi iniziali hanno lavorato principalmente in maniera indipendente e in competizione, senza essere a conoscenza dei progressi l'uno dell'altro. Questo garantisce un controllo ulteriore sulla correttezza degli esperimenti, una volta che i dati vengono fuori: se entrambi vedono qualche nuovo segnale è ancora più significativo. Quindi a dicembre, quando entrambi mostrarono un segnale di un eccesso di

fotoni a circa 125 GeV con una significatività di 3 sigma, un po' di ottimismo si diffuse tra i fisici delle particelle. Qualcosa ci poteva essere di reale ma servivano ancora più dati per essere sicuri a 5 sigma, veramente sicuri. Solo 3 sigma non bastano perché quell'eccesso poteva anche scomparire e dimostrarsi solo una fluttuazione statistica, un *aereo che passava* per caso.

Date le caratteristiche fenomenali di LHC , in sei mesi sono stati facilmente raccolti i dati necessari per smentire o no i dati di dicembre.

La mattina del 4 luglio 2012, la grande sala conferenze del $CERN$ era già completamente piena di gente che aveva aspettato davanti alle porte dalla notte precedente. In sala ci sono Peter Higgs e i colleghi che con lui hanno ipotizzato l'esistenza del campo: si attende la presentazione dei nuovi dati di CMS e $ATLAS$. Tutto il mondo della fisica delle particelle è collegato con Ginevra: dall'Australia tutti i rappresentanti dell'annuale congresso di fisica delle alte energie ($ICHE$), dal Giappone il grande laboratorio del KEK , dall'America i suoi vari laboratori. Che cosa avranno potuto trovare?

Il primo a parlare è il direttore del centro di ricerca che introduce, senza svelare dettagli, i due rappresentanti degli esperimenti che mostreranno a turno i risultati delle loro analisi.

CMS comincia per primo riassumendo la situazione precedente e discutendo dei vari canali di decadimento dell'Higgs, compreso quello con il segnale più limpido: quello in due fotoni.

La sala esplode in un applauso spontaneo quando finalmente arriva il grafico che mostra un eccesso di fotoni a 4.9 sigma nella regione di circa 126 GeV: era il segnale atteso. Una nuova particella c'è ed ha le caratteristiche attese per l'Higgs.

Arriva il turno dell'esposizione dei risultati di $ATLAS$. La curiosità è altrettanto alta perché non è ovvio che i due esperimenti, profondamente diversi, abbiano analisi concordanti.

Le slide proseguono con tutti gli importantissimi dettagli sulle analisi delle possibili sorgenti di errori e la loro quantificazione. Sino al momento in cui un grafico analogo a quello di CMS compare trionfalmente anche tra i dati di $ATLAS$, a 5 sigma e nello stesso punto: è la seconda fondamentale conferma. Un altro applauso dalle centinaia di fisici in sala e collegati nel mondo, anche più commosso del primo perché è definitivo che si sia scoperta una nuova particella, questo è certo (a 5 sigma!), e con le fattezze del bosone di Higgs, meno certo, ma piuttosto promettente.

Si possono stappare spumanti, sedersi comodamente con i piedi sulla scrivania e festeggiare il traguardo. Sono grandi momenti per la storia della scienza. Decenni di ricerche e decine di migliaia di persone per arrivare finalmente a questa meta. Non capita molto spesso. La prima vittoria di LHC .

Certo, ora il passo successivo più importante è dare ancora più conferme che la nuova particella abbia tutti i lineamenti del bosone così come previsto dal

Modello Standard.

Per il momento il Modello guadagna una nuova particella ed è quindi confermato ancora una volta, molto probabilmente nel suo pezzo mancante più indecifrabile, il bosone di Higgs.

Siamo arrivati in cima al castello e infine possiamo guardare sotto con soddisfazione: tutte le simmetrie sono rispettate e abbiamo trovato un nuovo tassello del complesso meccanismo della natura.

Oltre il Modello Standard

Accendere _{LHC} significa anche fare un salto indietro nel tempo, sino alle origini, meno di un millisecondo dopo il Big Bang.

_{LHC} è al contempo la zona più fredda e quella più calda dell'universo attuale. I magneti sono raffreddati a temperature più basse di quella dello spazio interstellare e quando facciamo scontrare ioni pesanti gli uni contro gli altri, ricreiamo le condizioni dell'universo immediatamente dopo il Big Bang. A quel tempo la natura era diversa, tutte le particelle senza massa: il campo di Higgs aveva ancora un valore nullo. Inoltre materia e antimateria erano presenti in stesse quantità. La simmetria dominava. Era un mondo piuttosto noioso: tutto uguale!

Il mondo attuale è decisamente più interessante, specialmente per i fisici, ma il confronto aiuta a capire meglio.

Sappiamo che il MS spiega tutta la materia che possiamo vedere, ma a conti fatti questa è solo il 4% di tutto quello che compone l'universo. I cosmologi hanno trovato prove convincenti che là fuori c'è qualcosa che non vediamo, non abbiamo alcuna idea di cosa sia, ma della quale possiamo osservare gli effetti: la materia oscura e l'energia oscura. Di cosa sono composte?

In più, perché siamo costituiti solo di materia e l'antimateria la possiamo creare solo negli acceleratori? Dove è finita se tutto all'inizio era in equilibrio?

Perché la forza dei legami dell'Higgs con le altre particelle ha proprio quei precisi valori?

L'Higgs è composto da altre particelle più fondamentali? Ne esistono altri tipi?

E inoltre, riusciremo a capire perché la gravità si comporta in modo così differente rispetto alle altre forze spiegate in modo egregio dal Modello Standard? O a trovare finalmente, il sogno di Einstein, una teoria che unifichi tutte le forze in una sola, l'estrema sintesi?

Riusciremo a trovare una conferma o a smentire le teorie supersimmetriche per le quali ogni particella deve avere un suo doppio¹⁴?

Da tutte queste e numerose altre domande è chiaro che il _{MS} è solo una parte della spiegazione dei meccanismi della natura. Molti quesiti attendono ancora

una risposta e ^{LHC} può essere la macchina che nei prossimi decenni ci darà una mano a penetrare questi meccanismi ancora più a fondo, continuando a seguire gli insegnamenti di Galileo.

Non c'è quindi da cullarsi sugli allori. Ma concediamoci una pausa dopo gli annunci del ^{CERN}!

[11] Costruire un acceleratore lineare in cui le collisioni abbiano la stessa energia richiederebbe tunnel di centinaia di chilometri, una soluzione poco pratica. Al momento esiste un progetto per la realizzazione dell'*International Linear collider* (ILC), un acceleratore lineare di particelle di circa 20 km, capace di accelerare elettroni e protoni fino ad una energia di 500 GeV .

[12] Circa 11000 MJ (megaJoule). Per avere un'idea, 1 MJ è l'energia coinvolta nello scontro tra due macchine. Il solo fascio di protoni contiene un'energia di 173 MJ.

[13] In realtà era troppo bassa per affermare qualunque cosa, una sorta di terra incognita.

[14] Per ogni bosone un **fermione** e viceversa. Per esempio per ogni quark ci sarà uno *squark* (quark supersimmetrico), un bosone. E così via per ogni particella fondamentale del MS e la teoria risultante ha un grado di simmetria ancora superiore a quella del Modello.

ここにいる
ただここにいる
降る雪の中に

Io solo c'ero
Io, solo. E fioccava
intorno la neve.
Kobayashi Issa

Conclusione

Raccontare come è stata scoperta una sola particella ci ha permesso di esplorare un mondo affascinante, tanto vicino quanto poco intuitivo: l'infinitamente piccolo. Una specie di reame fantastico in cui accadono gli eventi più incredibili: creazioni, distruzioni violente, lampi di luce e oggetti misteriosi e sfuggenti. La teoria di campo quantistica è tutto ciò. Riesce a spiegare in modo stupefacente questi eventi che sanno di magico, ma che accadono continuamente in natura in ogni istante, dal Big Bang a oggi, da almeno quattordici miliardi di anni.

I fisici sperimentali hanno imparato come studiare questo reame e quelli teorici hanno cominciato a tracciarne le *mappe*, a identificarne i protagonisti principali e le loro relazioni. Un lavoro cominciato quasi duecento anni fa e che ancora non è certamente terminato.

Il bosone di Higgs era l'ultimo mattoncino da incastrare per ottenere un solido edificio che descrivesse quasi tutto il mondo che conosciamo. Titoli e copertine di giornali, notiziari alla televisione, una delle particelle più mediatiche della storia. Anche chi non lavora con le equazioni tutti i giorni ne ha capito la portata.

È contemporaneamente una vittoria teorica e sperimentale. Teorica, perché prevista con pervicacia per risolvere un problema di coerenza tutto interno al modello matematico, senza nessun input dalla natura, se non che le particelle avessero massa mentre per il modello era impossibile. Sperimentale, perché ha richiesto la costruzione di ben tre acceleratori (LEP, Tevatron, LHC) che progressivamente hanno ristretto il campo di ricerca sino a mostrare che il pezzo mancante esiste realmente.

Il progresso teorico è paragonabile ad un'opera d'arte. Come tutte le creazioni dell'ingegno umano, va semplicemente ammirato. In questo caso specifico, è un'opera d'arte che ci ha permesso di soddisfare uno degli istinti più primordiali: la curiosità.

Il progresso sperimentale è sotto gli occhi di tutti al CERN. La macchina LHC è una somma di migliaia di elementi ideati e costruiti per lo scopo. Se non era disponibile la tecnologia per raggiungere un certo obiettivo, i team di ricerca la sviluppavano appositamente. Ognuna di queste conoscenze tecniche allo stato dell'arte è già parte del bagaglio di innumerevoli aziende che hanno collaborato con ingegneri e fisici del CERN.

Ad ogni modo, nessuna eventuale ricaduta economica dovrebbe oscurare il punto centrale di ogni ricerca di base: curiosità (di nuovo!), inventiva e creatività, e tantissimo lavoro di migliaia di persone dei cinque continenti pronte a collaborare per illuminare l'ignoto.

Ora il prossimo ignoto ha tanti nomi: supersimmetria, materia oscura, gravità

quantistica, unificazione, teoria delle stringhe. Tante domande, e sono le domande che nei prossimi anni e decenni guideranno la prossima generazione di fisici e di appassionati di scienza.

Glossario

- ACCELERATORE:** Strumento che imprime elevate energie cinetiche a particelle subatomiche mediante l'azione di campi elettromagnetici. Le particelle così accelerate sono inviate contro un opportuno bersaglio per investigare la struttura della materia e dei suoi costituenti e per produrre nuove particelle.
- ANTIPARTICELLE:** ogni particella elementare (a eccezione dei fotoni) presenta una corrispondente antiparticella con massa, spin e vita media uguali ma carica elettrica, momento magnetico e numeri quantici uguali in valore assoluto e di segno opposto.
- BARIONE:** famiglia di particelle costituite da 3 [quark](#).
- BIG BANG:** grande esplosione primordiale dalla quale l'universo si sarebbe formato a partire da uno stato iniziale di altissima densità e temperatura, cui sarebbe seguita una rapida espansione.
- BOSONE:** insieme ai [fermioni](#), sono una delle due classi fondamentali in cui si dividono le particelle. A differenza dei fermioni, i bosoni possono affollare lo stesso posto (*stato quantico*). Tutti i quanti mediatori delle [forze](#) fondamentali sono bosoni.
- CAMPO:** un campo in fisica è un'entità che pervade tutto lo spazio-tempo e può assumere valori diversi in ogni punto. Il campo elettrico è un esempio: generato dalla presenza di cariche elettriche che modificano la regione circostante permette la propagazione della forza elettrica. Anche la distribuzione di temperature sopra l'Italia è un campo, differente in ogni punto.
- DECADIMENTO ALFA:** decadimento di un nucleo radiattivo per emissione di un nucleo di elio (He), composto da due protoni e due neutroni.
- DECADIMENTO BETA:** decadimento radioattivo per emissione di un [elettrone](#) e di un [neutrino](#). Uno dei neutroni del nucleo si trasforma in un [protone](#), più stabile.
- ELETRONE:** particella elementare costituente dell'atomo, con carica elettrica negativa. L'antiparticella dell'elettrone è il *positrone*, il quale si differenzia solo per la carica elettrica di segno opposto; quando queste due particelle collidono possono essere sia diffuse che annichilate producendo fotoni.
- EQUAZIONI DI MAXWELL:** le quattro equazioni trovate da James Clerk Maxwell per descrivere sinteticamente tutte le interazioni elettromagnetiche. Il primo esempio di unificazione.
- FERMIONE:** insieme ai bosoni, sono una delle due classi fondamentali in cui si dividono le particelle. Caratteristica fondamentale è quella per cui due fermioni identici non possono occupare contemporaneamente lo stesso posto (*stato quantico*).
- FORZA E MEDIATORE:** una forza è la causa del cambiamento dello stato di riposo o di moto uniforme di un corpo. Le forze fondamentali sono 4: elettromagnetica, debole, forte, gravitazionale. Tutti gli altri tipi di forza sono riconducibili a queste ultime. In fisica delle particelle le forze (esclusa la gravità) si propagano tramite lo scambio di particelle, dette *mediatori*, tra due corpi. I mediatori della forza elettromagnetica sono i *fotoni*, quelli della forza debole sono le particelle *W* e *Z* e quelli della forza forte sono chiamati *gluoni* (da colla in inglese perché tengono insieme, tra le altre cose, il nucleo atomico).
- GLUONI:** sono particelle mediatrici delle interazioni forti. I gluoni sono bosoni e si propagano a velocità della luce come il fotone. I gluoni legano i quark a formare mesoni e barioni. Esistono otto tipi di gluoni.
- HUBBLE:** telescopio posto in orbita attorno alla Terra, con lo scopo di osservare lo spazio. Il telescopio ha fornito alcune delle più spettacolari fotografie dello spazio.
- LEPTONI:** secondo gruppo di costituenti fondamentali della materia, insieme ai [quark](#). Anche i leptoni sono 6: *elettrone*, *muone*, *tauone* e le corrispondenti specie di neutrini, una per ognuno. Sono molto leggeri rispetto ai quark (da cui il nome derivato dal greco) e interagiscono solo tramite [forza](#) elettromagnetica e debole.
- MECCANICA QUANTISTICA:** descrizione della natura a scale inferiori a quella atomica che prevede anche la contemporanea descrizione dei corpi come particelle e onde che possono sovrapporsi ed annullarsi tra loro. Secondo la Meccanica Quantistica l'energia di un sistema fisico non può assumere qualunque valore ma solo multipli di un valore fondamentale, il *quanto* di energia.
- MESONE:** termine originariamente introdotto per indicare genericamente particelle elementari di massa intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone; il nome è stato poi dato a particelle instabili che presentano interazioni forti e che fanno parte della classe dei bosoni. Sono composti da un [quark](#) e un [antiquark](#).
- MODELLO STANDARD:** teoria matematica che descrive le interazioni tra le particelle elementari (ne classifica 17) mediante tre [forze](#) fondamentali: elettromagnetica, debole, forte. In realtà le prime due possono essere descritte da una sola teoria, quella elettrodebole. Il bosone di Higgs è uno dei mattoni nella descrizione della forza *elettrodebole*. La forza gravitazionale non è spiegata dal Modello Standard.
- NEUTRINO:** Particella elementare elettricamente neutra, appartenente alla famiglia dei [leptoni](#) e per via delle caratteristiche dello [spin](#), è classificata come [fermione](#). Interagisce con la forza debole e con la forza gravitazionale, ma non sente a forza nucleare forte e la forza elettromagnetica. Il nome fu coniato da Enrico Fermi come diminutivo del neutrone, molto più massiva.
- NEUTRONE:** particella costituente dell'atomo. Il neutrone è una particella elettricamente neutra ed è composta da 3 [quark](#) (*up, down, down*). Insieme al neutrone è uno dei costituenti del nucleo atomico. Appartiene alla famiglia dei [barioni](#) e, per via delle caratteristiche dello [spin](#), è classificato come [fermione](#).
- PROTONE:** particella costituente dell'atomo. Il protone è una particella dotata di carica positiva ed è composta da 3 [quark](#) (*up, up, down*). Insieme al neutrone è uno dei costituenti del nucleo atomico. Appartiene alla famiglia dei [barioni](#) e, per via delle caratteristiche dello [spin](#), è classificato come [fermione](#).
- QUARK:** costituenti fondamentali della materia, insieme ai [leptoni](#). Compongono anche le particelle che formano il nucleo atomico, [protoni](#) e [neutroni](#). In natura sono 6 (*up, down, strange, charm, bottom, top*) ma sono solo due i costituenti di protoni e neutroni: il quark *up* e il quark *down*. Interagiscono tra loro tramite tutte e tre le forze descritte dal [Modello Standard](#).
- RELATIVITÀ GALILEIANA:** per la relatività galileiana ogni sistema in moto a velocità costante (anche nulla) è equivalente: i corpi al suo interno si muovono allo stesso modo. Nessun esperimento in quel sistema ci permetterebbe di capire se siamo o no in movimento. È un esempio di Simmetria.
- RELATIVITÀ SPECIALE:** estensione della relatività galileiana per oggetti in moto a velocità prossime a quelle della luce. Cambiano le trasformazioni ma il principio base è identico. Postula la presenza di una velocità limite, quella della luce nel vuoto. In conseguenza delle trasformazioni, lo spazio e il tempo non sono più indipendenti e assoluti ma possono mutare uno nell'altro a seconda del sistema di riferimento. La relatività speciale è stata confermata da tutti gli esperimenti condotti negli ultimi cento anni di storia della fisica. Le trasformazioni rispettano gli effetti di causa-effetto quindi ogni speculazione di viaggio nel tempo è fuori luogo in relatività speciale.
- SIMMETRIA:** invarianza di una teoria a seguito di trasformazioni delle equazioni che la descrivono. Una palla allo specchio rimbalza sempre allo stesso modo: la trasformazione di riflessione è una simmetria delle equazioni della meccanica, per esempio. Nel Modello Standard il tipo di trasformazioni è meno intuitivo ma analogo.
- SPIN:** proprietà intrinseca delle particelle elementari che ne caratterizza il comportamento rispetto al gruppo delle rotazioni e che concorre a definirne lo stato quantico.
- UNIFICAZIONE:** riduzione di due o più teorie ad una sola, consistente, che le include e le descriva tutte quante.

Tavole, grafici e illustrazioni

Figura 1 [Il tubo di Crookes](#)

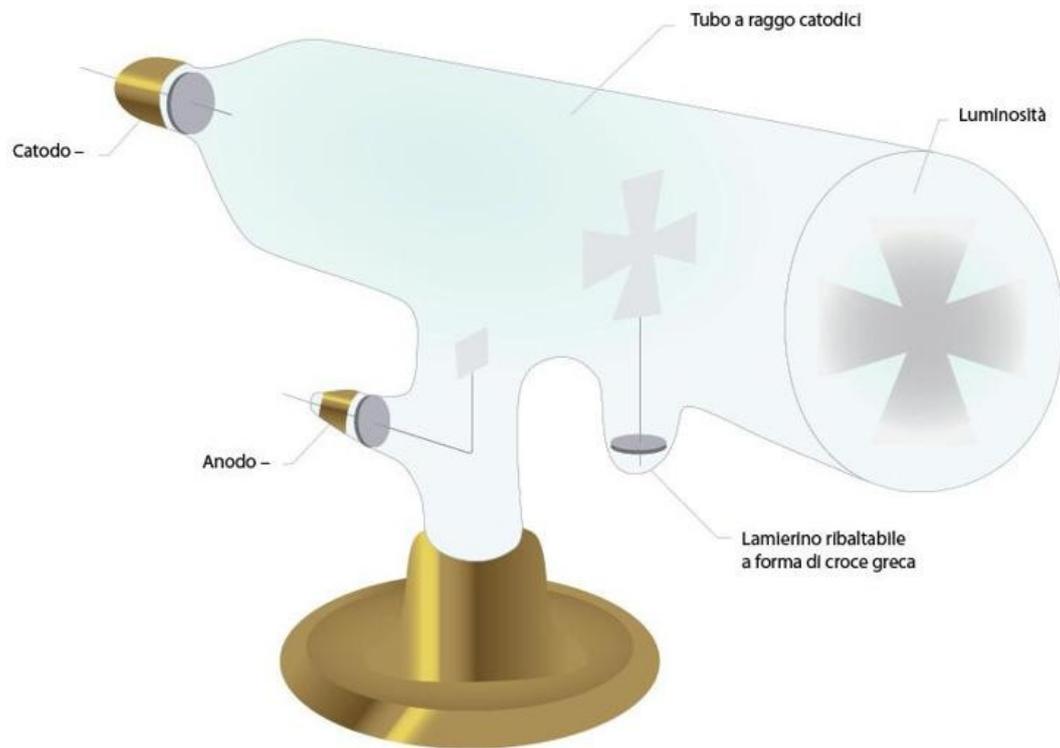
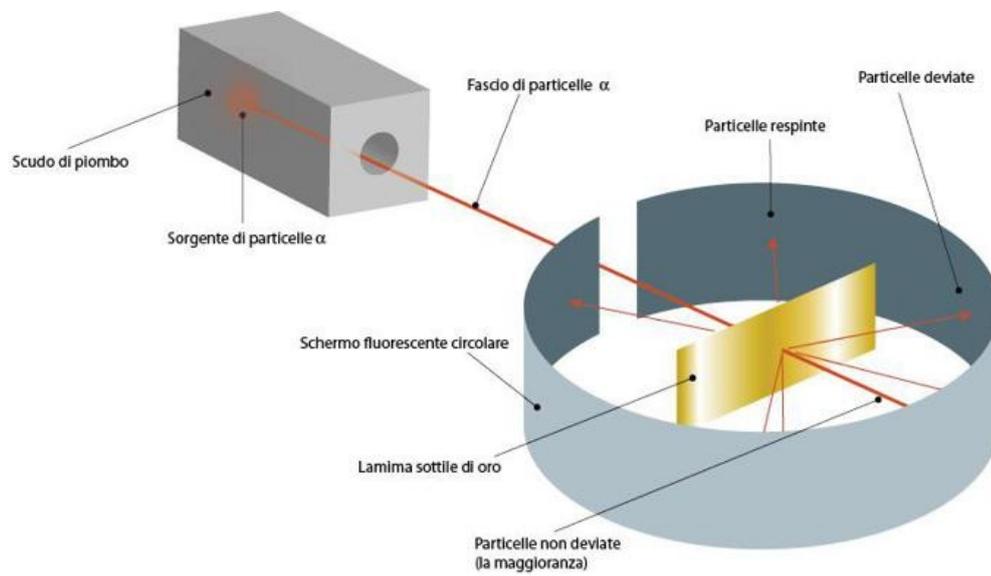


Figura 2 [L'esperimento di Rutherford](#)



Cosa succede quando le particelle entrano in contatto con la lamina d'oro (particolare)

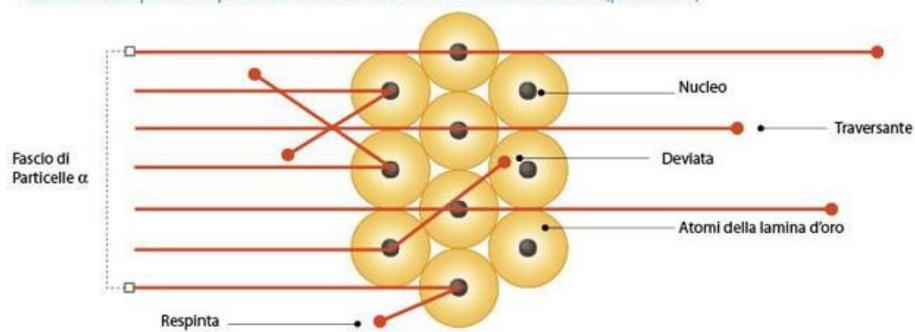


Figura 3 Modello Standard delle particelle fondamentali e loro interazioni

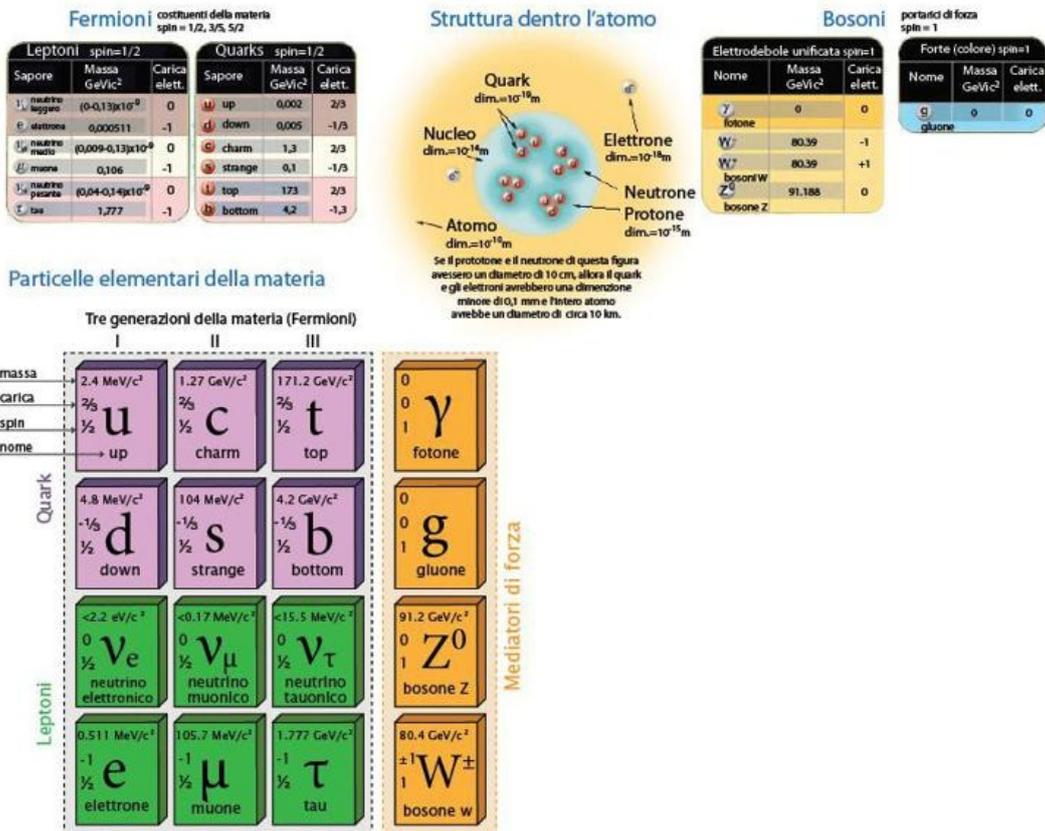
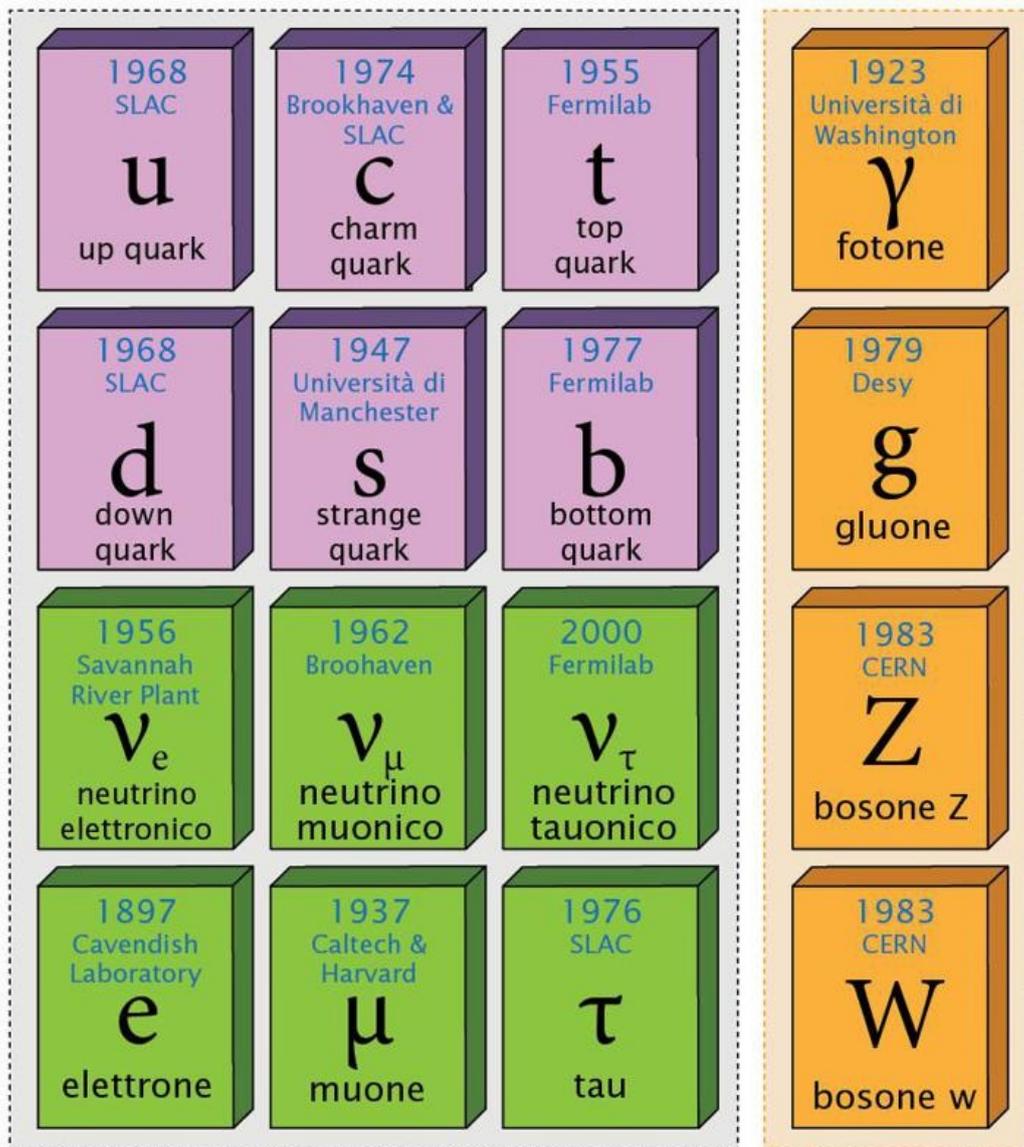


Figura 4 [Cronologia della scoperta delle 16 particelle del Modello Standard](#)



[Figura 5 Particolare della vasca del SuperKamiokande](#)

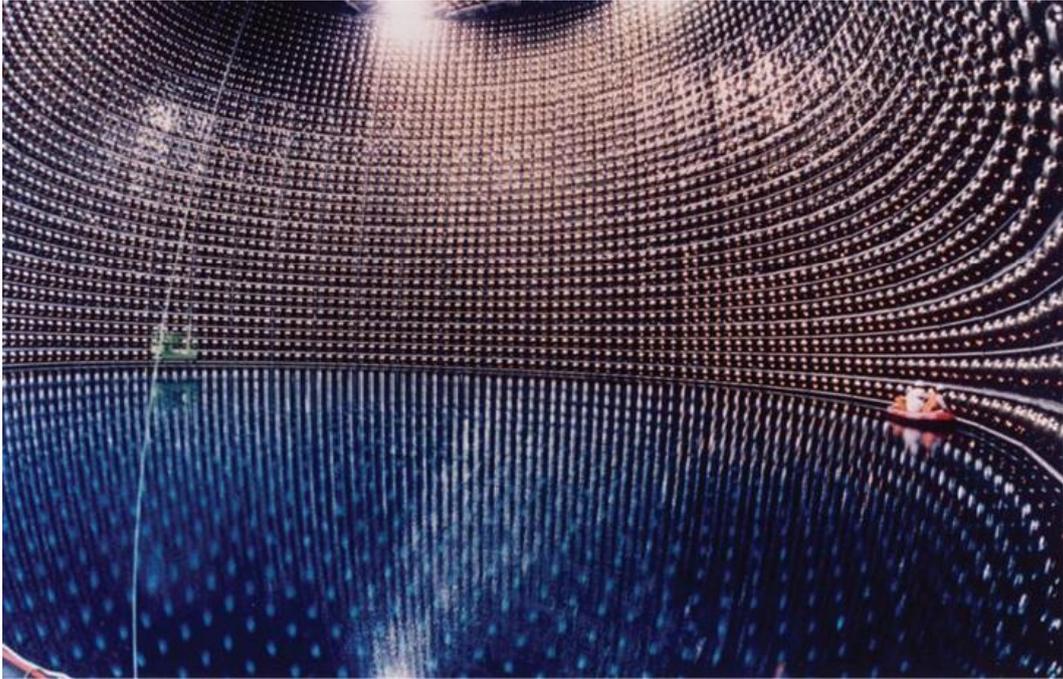


Figura 6 [Schema del LHC](#)

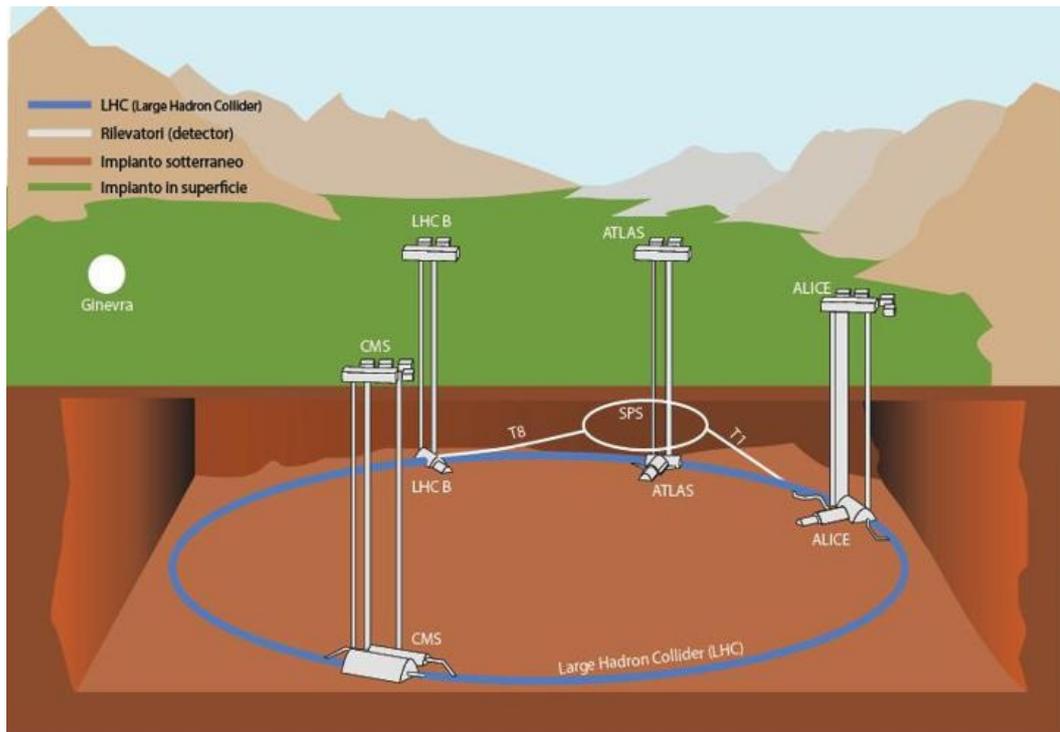
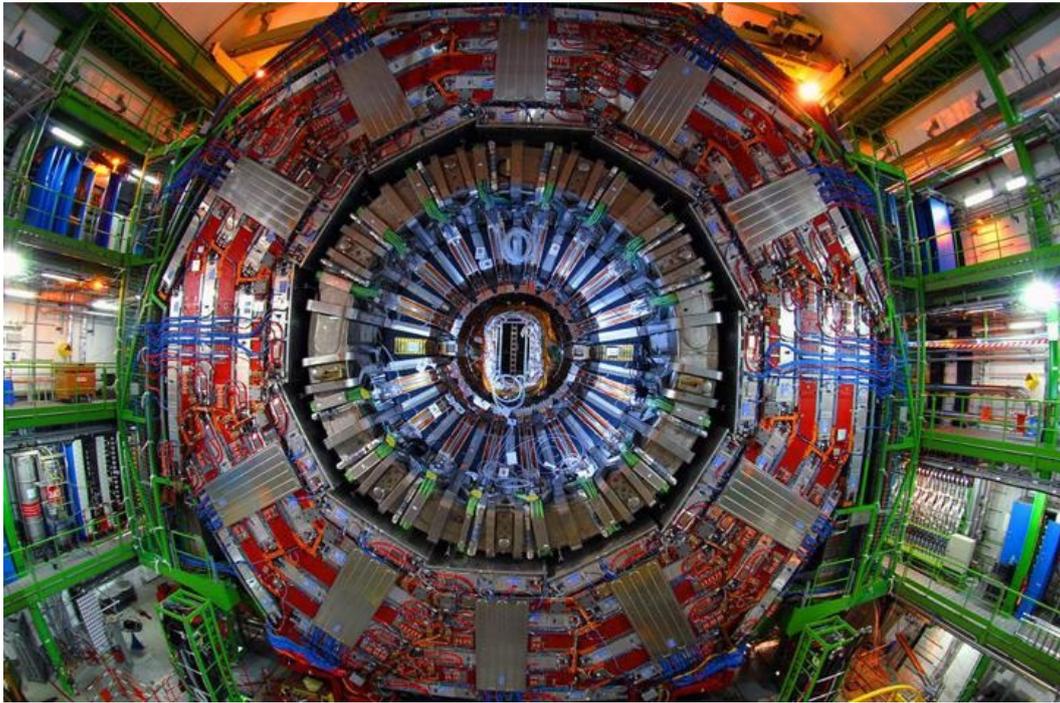


Figura 7 Il rivelatore CMS



Dall'interno all'esterno si osservano: il tracker, calorimetro elettromagnetico (in blu), calorimetro adronico, solenoide per deviare i muoni (in rosso).

Figura 8 [Collisione di particelle](#)

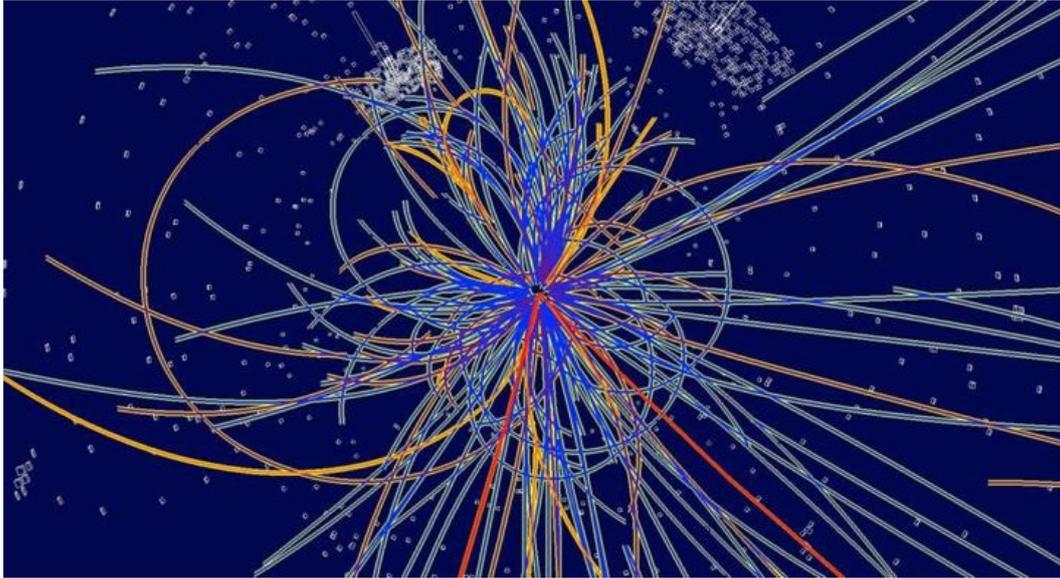


Figura 9 [Il detector di ATLAS](#)

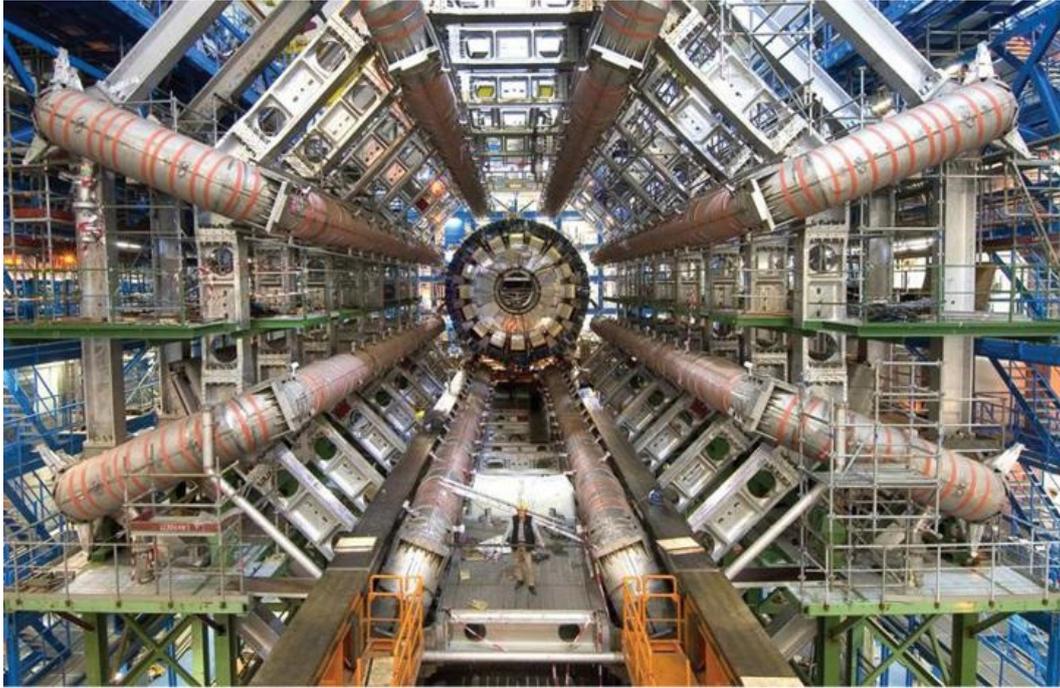
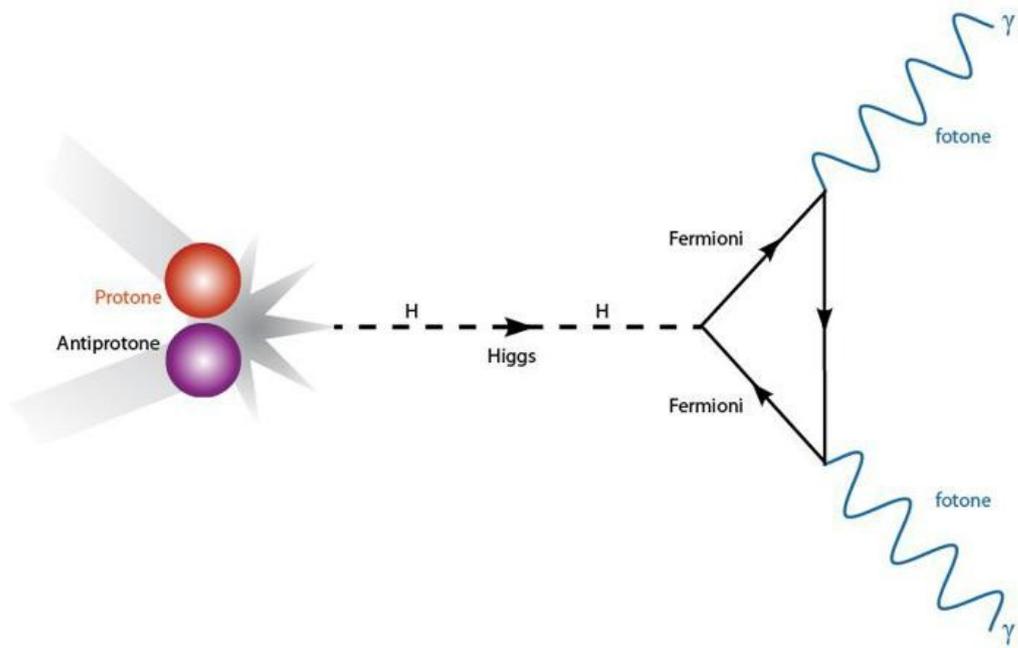


Foto scattata durante la costruzione

Figura 10 [L'acceleratore circolare di particelle Tevatron](#)



Figura 11 Schema del decadimento del bosone di Higgs in due fotoni



L'autore

Guido Cossu (Sassari, 1980) è un ricercatore presso l'istituto di ricerca per le alte energie (KEK) a Tsukuba, Giappone.

Ha studiato fisica all'Università di Pisa e si è specializzato alla Scuola Normale Superiore. Si occupa di simulazioni delle interazioni tra i quark tramite supercomputer, un ramo della fisica chiamato Lattice QCD.

Quarta di copertina

Dai monaci zen ai coloratissimi quarks, passando per immense macchine atte allo studio dell'infinitamente piccolo, in questo single e-book Guido Cossu, ricercatore del KEK a Tsukuba in Giappone, ripercorre la recente storia della fisica per spiegare cosa c'è dietro all'eccitazione di un'intera comunità scientifica per la scoperta del bosone di Higgs. Entriamo nel teatro nel quale questa particella recita, cercando di fornire una descrizione accurata della storia scientifica che ha portato alla necessità teorica dell'esistenza della particella e alla difficoltà sperimentale per scoprirla.

La caccia al bosone di Higgs ci porterà infatti attraverso un castello teorico dall'architettura molto ardita: il Modello Standard. Non facciamoci intimorire dal nome così altisonante, la sua eleganza e semplicità formale ci sorprenderà, come quella di un giardino Zen.

Una lettura non solo per gli addetti ai lavori, ma per chi possiede spirito investigativo e per tutti coloro che sono animati da curiosità sulla natura e su tutte quelle particelle che ci attraversano ogni giorno.

Buona caccia grossa al bosone di Higgs!

goWare <e-book team>

goWare è una start-up del Polo Tecnologico di Navacchio costituita da autori, editor, sviluppatori software e comunicatori uniti da una nuova visione del mobile computing e dalla passione per l'editoria.

Raccogliere, selezionare e organizzare i contenuti, allo scopo di renderli a portata di touch e condurli sulle vie dei dispositivi mobili è la sfida quotidiana di goWare.

Operativamente goWare è costituita da due team: goWare <app team>, che si occupa di concepire e sviluppare applicazioni per iPhone e iPad e goWare <e-book team>, che è dedicata alla creazione di format per il digital publishing, di e-book, di consulenza e formazione per i professionisti dell'editoria, e si avvale della collaborazione di KeyPub.

KeyPub è un progetto condiviso di Ecomind e goWare per fornire alle redazioni (copy-editor, impaginatori, sviluppatori) gli strumenti più avanzati, il materiale didattico e corsi per uno sviluppo professionale eccellente.

Il goWare <e-book team> è composto da Roberto Avanzi, Elisa Baglioni, Maria Rosa Brizzi, Stefano Cipriani, Valeria Filippi, Mirella Francalanci, Francesco Guerri, Mario Mancini, Alessio Orlando, Lorenzo Puliti, Maria Ranieri, Suyen Tommasi.



Altri e-book di goWare

Istantanee (oltre l'attualità)



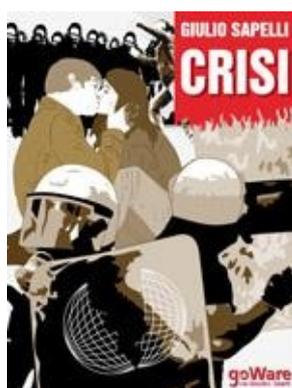
L'INVERNO DI MONTI

Giulio Sapelli

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



NELLA CRISI DEL CAPITALISMO, DALL'ITALIA AL MONDO

Giulio Sapelli

99 pagine

Italiano

single e-book

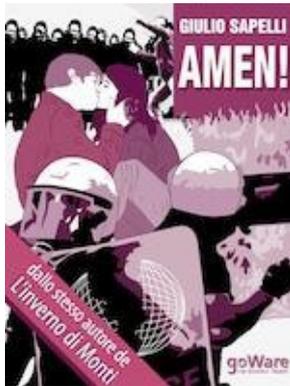
[Scarica qui](#)



DECLINO. DALLA DECADENZA ALL'ECONOMIA MORALE

Giulio Sapelli

Italiano
single e-book
[Scarica qui](#)



AMEN! UN GRIDO INASCOLTATO SULLA CRISI ITALIANA

Giulio Sapelli
Italiano
single e-book
[Scarica qui](#)



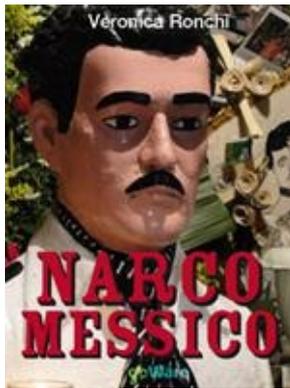
CHI COMANDA IN ITALIA

Giulio Sapelli
Italiano
single e-book
[Scarica qui](#)



GERMANIA COPIA & INCOLLA

Stefano Casertano
Italiano
single e-book
[Scarica qui](#)



NARCOMESSICO

Veronica Ronchi

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



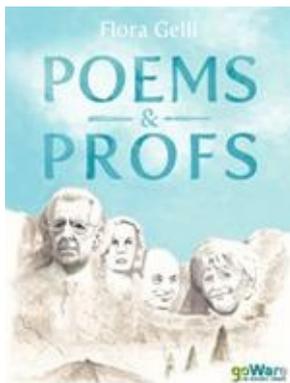
SVILUPPO E NECESSITÀ

Sergio Carrà

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



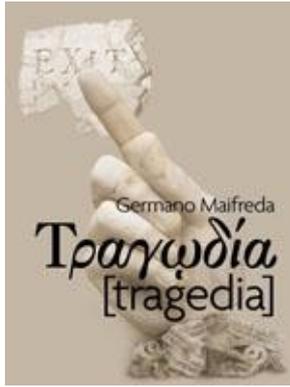
POEMS & PROFS

Flora Gelli

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



TRAGEDIA. VIAGGIO NELLA GRECIA DEL DEFAULT

Germano Maifreda

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)

Dialoghi dell'apocalisse (... e altri cataclismi)



L'ITALIA CHE SI UCCIDE

Giulio Sapelli e Lodovico Festa

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)

Le orme della storia (il presente a ritroso)



PASOLINI. VISIONI E PROFEZIE TRA PASSATO E FUTURO

Antonella Pierangeli

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



TEMPI DI SCUOLA E TEMPI DI VITA

Dario Ragazzini

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)

Digitalissimo (nuovi media e tecnologie)



MEDIA DIGITALI? CI SIAMO!

goWare <e-book team>

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



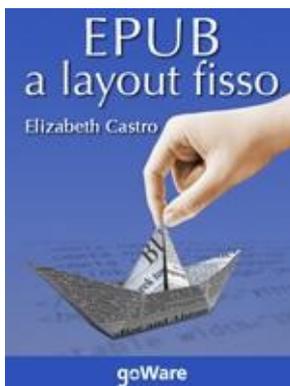
E-PUBLISHING & E-BOOK...

goWare <e-book team>

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



EPUB A LAYOUT FISSO

Elisabeth Castro

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)

Fair play (sport & Co.)



JUVE30

Stefano Barbetta

Italiano

single e-book

[Scarica qui](#)



JUVENTUS. IL PROCESSO FARSA

Mario Pasta e Mario Sironi

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



PALLONI BUCATI. IL FLOP DEL CALCIO ITALIANO

Stefano Righi

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)

Mind the step! (guide alla diversità, con Morellini editore)



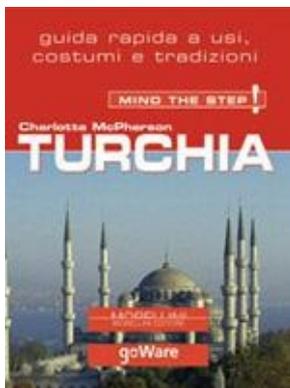
GIAPPONE

Paul Norbury

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



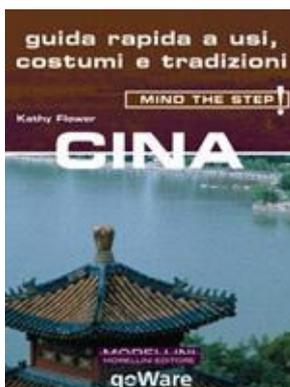
TURCHIA

Charlotte McPherson

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



CINA

Kathy Flower

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



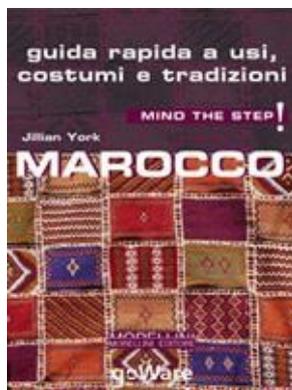
BRASILE

Anna Maria Scarparo

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



MAROCCO

Jillian York

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



MESSICO

Guy Mavor

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



SUDAFRICA

David Holt-Biddle

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



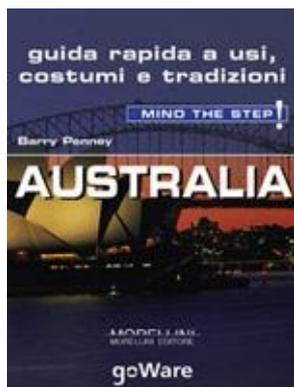
ARGENTINA

Moira Pulino

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



AUSTRALIA

Barry Penney

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



ITALY

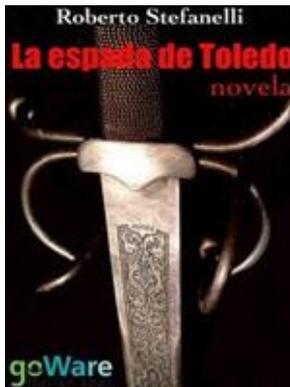
Charles Abbott

Inglese

standard e-book

[Scarica qui](#)

Tavola rotonda (fiction per ogni misura)



LA SPADA DI TOLEDO

Roberto Stefanelli

Italiano/Inglese/spagnolo

standard e-book

[Scarica qui](#)



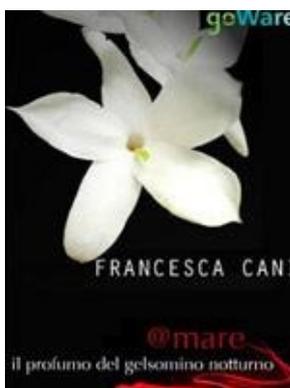
L'OVALE DI CASSINI

Maria Laura Platania

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



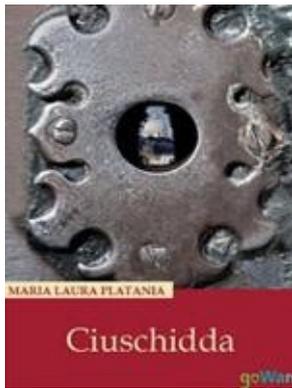
@MARE - IL PROFUMO DEL GELSOMINO NOTTURNO

Francesca Cani

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



CIUSCHIDDA

Maria Laura Platania

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



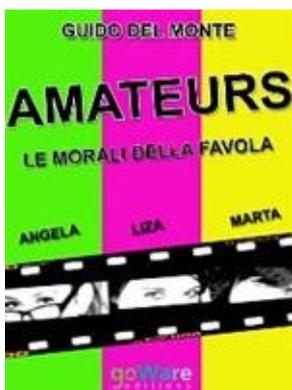
LIBERO DI AMARE

Sergio Freggia

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



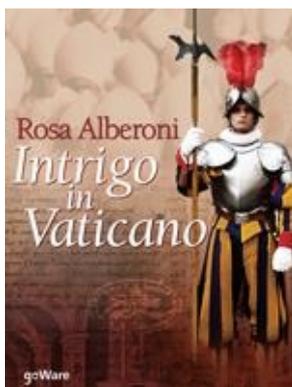
AMATEURS. LE MORALI DELLA FAVOLA

Guido Del Monte

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



INTRIGO IN VATICANO

Rosa Alberoni

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)



ESERCIZIO: «PULSARE ALLE TEMPIE»

Maurizio Silvi

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)

Appebook



LESSICO MEDICO ITALIANO

Pietro Benigno e Pietro Li Voti

Italiano

oversize e-book (12.000 pagine)

[Scarica qui](#)



I RIMEDI DELLA NONNA

goWare <e-book team>

Italiano

standard e-book

[Scarica qui](#)

Indice

Frontespizio	3
Colophon	4
Il Modello Standard	6
Dialogo con un monaco zen	7
Simmetrie	7
Gli inizi	9
(Storia delle) Particelle	11
Le origini	12
Usa la forza	14
I coloratissimi quark	16
Il Modello Standard e il bosone di Higgs	18
I protagonisti	19
Il Large Hadron Collider: il cacciatore	26
La caccia	30
L'assedio finale	33
Oltre il Modello Standard	35
Conclusione	38
Glossario	40
Tavole, grafici e illustrazioni	41
Figura 1 Il tubo di Crookes	42
Figura 2 L'esperimento di Rutheford	43
Figura 3 Modello Standard delle particelle fondamentali e loro interazioni	44
Figura 4 Cronologia della scoperta delle 16 particelle del Modello Standard	45
Figura 5 Particolare della vasca del SuperKamiokande	46
Figura 6 Schema del LHC	47
Figura 7 Il rivelatore CMS	48
Figura 8 Collisione di particelle	49
Figura 9 Il detector di ATLAS	50
Figura 10 L'acceleratore circolare di particelle Tevatron	51
Figura 11 Schema del decadimento del bosone di Higgs in due fotoni	52

L'autore	53
Quarta di copertina	54
goWare <e-book team>	55
Altri e-book di goWare	56