

FROM LHC TO FCC

A NEW SYSTEM OF ACCELERATORS FOR THE FUTURE OF HIGH-ENERGY PHYSICS

GUIDO TONELLI

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa, Italy

INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italy

CERN, Geneva, Switzerland

The discovery of the Higgs boson marks the triumph of the Standard Model of fundamental interactions. However, despite the unquestionable success, the theory contains no convincing explanation for dark matter and dark energy, asymmetry between matter and antimatter and other important phenomena that characterize our universe. The article discusses the proposal and the physics program of the FCC, Future Circular Colliders, a system of new high-energy accelerators which should be built at CERN as heir to LHC. Through the combination of precision measurements of the Standard Model main parameters and the direct search for new particles or interactions, FCC looks like the most promising scientific infrastructure in the quest for New Physics.

DA LHC A FCC

UN NUOVO SISTEMA DI ACCELERATORI PER IL FUTURO DELLA FISICA DELLE ALTE ENERGIE

1 Una scoperta che ci ha permesso di far luce sulla struttura più intima della materia

Con la scoperta del bosone di Higgs [1–4], annunciata nel 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider (LHC) del CERN, la fisica delle alte energie ha superato una pietra miliare nella storia della conoscenza. Con l'inclusione della nuova particella, il Modello Standard delle interazioni fondamentali (MS) è finalmente completo. La teoria considera la materia composta di *quarks* e leptoni, particelle a spin frazionario cioè fermioni, e descrive le loro interazioni attraverso lo scambio di altre particelle a spin intero, bosoni, che trasportano le interazioni forte, debole ed elettromagnetica. Il modello è semplice e combina assieme in maniera elegante relatività speciale e meccanica quantistica, i due pilastri della fisica moderna. Da un insieme limitato di parametri si può ricavare una quantità incredibile di previsioni molto precise su grandezze osservabili che sono state puntualmente verificate da un numero impressionante di misure sperimentali. E il bosone di Higgs costituisce l'architrave dell'intera costruzione.

La nuova particella è la manifestazione materiale di un campo invisibile, *H*, che, da tempo immemorabile, riempie ogni angolo del nostro universo assegnando una massa distinta a ciascuna particella elementare per tramite dell'interazione con il campo stesso. Con la sua scoperta possiamo ricostruire ciò che è successo quando sono passati appena 10^{-11} s dal Big Bang.

Quando l'universo primordiale in espansione raggiunge una temperatura di circa 100 GeV il meccanismo della rottura di simmetria elettrodebole entra improvvisamente in azione. In quell'istante il campo H cambia di colpo le proprietà del vuoto e le particelle che in esso si propagano vengono differenziate fra loro, per sempre. Il vuoto elettrodebole assegna dinamicamente, tramite le sue interazioni, una massa alle particelle elementari fondamentali. I bosoni W e Z , portatori della forza debole, interagendo fortemente col campo scalare, acquisteranno una massa imponente, rispettivamente di 80.4 e 91.2 GeV e la forza debole risulterà per sempre confinata nelle infime distanze sub-nucleari. Al contrario, incapaci di un'interazione diretta col campo di Higgs, i fotoni rimarranno privi di massa e propagheranno all'infinito l'interazione elettromagnetica. Un meccanismo diverso, analogo all'interazione di Yukawa, regolerà le interazioni del campo scalare con i fermioni fondamentali e definirà le masse di *quark* e leptoni.

Alcuni *quark*, in particolare il *top*, interagiranno così fortemente con il campo di Higgs da diventare particelle estremamente massicce. I *top* saranno così pesanti da non riuscire a formare né stati legati né forme stabili di materia. Al contrario altri *quark* interagiranno così debolmente con la nuova forma di vuoto da acquistare sì una massa, ma davvero molto piccola. È il caso dei *quark up* e *down*, così leggeri da potersi aggregare in triplette, tenute assieme da un mare di gluoni, i portatori della forza forte. Grazie a questo meccanismo, quando sono passati poco più di 10^{-6} s dal Big Bang, si formano i primi protoni: una struttura materiale permanente, carica positivamente ed estremamente stabile, la cui vita media supera l'età attuale dell'universo. Alcuni leptoni speciali, gli elettroni, interagiranno molto debolmente con il campo H e ne ricaveranno una piccolissima massa, proprio il valore giusto per consentire loro, carichi negativamente, di orbitare attorno a un protone e formare atomi stabili. In un battito di ciglia tutto è cambiato per sempre.

La forma attuale di tutta la materia, compresi noi, è stata in qualche modo determinata da quei momenti iniziali. In conseguenza di questo meccanismo gli ingredienti caotici dell'universo primordiale, via via che la temperatura si ridurrà ulteriormente, collasseranno in strutture materiali persistenti; molto più tardi da esse prenderanno forma stelle, galassie e pianeti, incluso uno molto particolare, collocato in una regione confortevole del Sistema Solare, sul quale si svilupperanno molte forme di vita. Grazie al vuoto elettrodebole, questa sottile impalcatura che sorregge le enormi strutture che chiamiamo universo, la materia ha acquistato le caratteristiche che ci sono così familiari.

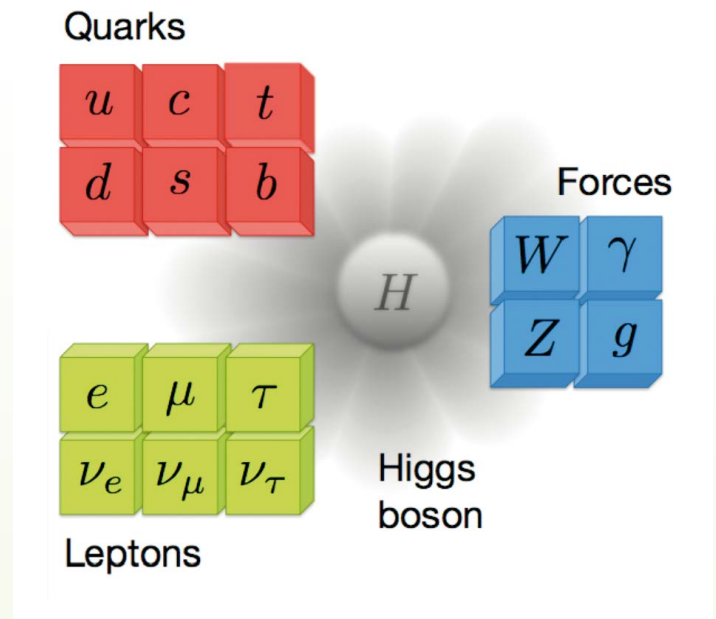


Fig.1 Il Modello Standard.

2 Il problematico trionfo del Modello Standard

La scoperta dell'Higgs segna un altro successo della fisica delle particelle. L'ultimo elemento mancante alla grande costruzione è stato finalmente catturato e il quadro è ormai completo (fig. 1). E tuttavia, mentre celebriamo il trionfo più recente di questa teoria che ha conosciuto così tanti successi, la lista dei problemi aperti, i fenomeni per i quali il MS non fornisce alcuna spiegazione, è francamente imbarazzante. Ci sono buoni motivi di ritenere che la risposta a molti dei quesiti aperti comporterà l'emergere di nuovi paradigmi.

È ben noto che il MS non riesce a spiegare molti fenomeni che giocano un ruolo fondamentale nella dinamica del nostro universo. Per esempio non contiene particelle o forze che consentano di capire materia oscura o energia oscura e neanche ci fornisce meccanismi che diano conto dell'asimmetria fra materia e anti-materia. Infine, e non è un particolare da poco, non include la gravità, come se la più comune fra tutte le forze avesse una natura irriducibile rispetto alle altre interazioni fondamentali descritte dal Modello Standard.

Sappiamo già che prima o poi saremo costretti ad abbandonare la descrizione del mondo di cui oggi siamo così orgogliosi. L'apparire di nuovi campi o di particelle ultra-massicce ci porterà a una descrizione della natura più completa e generale indicata con il nome generico di Nuova Fisica (NF). Ci aspettiamo che essa spieghi la materia fino a una scala di energia molto superiore a quella finora esplorata riducendo il MS a un caso particolare, valido soltanto nel limite delle basse energie.

La bellezza del nostro campo di ricerca è che sappiamo che prima o poi questo succederà ma non sappiamo quando. Potrebbe accadere anche domani, se un nuovo stato della materia venisse scoperto nei dati di LHC; ma ci potrebbero anche volere decenni e magari capiterà soltanto dopo che entrerà in operazione una nuova generazione di potentissimi acceleratori.

Oggi non sappiamo a quale scala di energia il MS perderà la sua validità e dove troveremo le risposte alle questioni per le quali brancoliamo ancora nel buio. Sappiamo comunque che ogni nuova congettura dovrà necessariamente includere il bosone di Higgs e, a sua volta, la nuova particella potrà essere utilizzata come un ulteriore strumento, di grande sensibilità, per esplorare un territorio completamente sconosciuto. Siamo nel bel mezzo di una rivoluzione scientifica i cui contorni ci saranno più chiari, forse, fra qualche decennio.

3 Un nuovo scenario: l'Higgs come portale per la Nuova Fisica

La fisica delle particelle si muove oggi in uno scenario radicalmente diverso rispetto al passato. Negli ultimi quarant'anni il percorso da seguire era indicato con chiarezza: il MS guidava tutte le ricerche e gli sforzi di tutti erano orientati a scoprire, uno dopo l'altro, i componenti ancora mancanti. La ricerca seguiva una specie di percorso obbligato, caratterizzato da alcuni punti di svolta ben definiti. Il primo fu senza dubbio la scoperta della J/ψ nel '74, seguita a breve dalla scoperta della Y nel '77. Gli anni '80 furono dominati dalla scoperta dei bosoni vettoriali intermedi, W e Z , che segnarono un altro punto di svolta, cui seguirà la scoperta del top nel 1995 e quella dell'Higgs nel 2012. Ogni decennio o giù di lì, esperimenti sempre più sofisticati, e acceleratori via via più potenti, producevano una successione di scoperte fondamentali, che confermavano e completavano il quadro teorico definito dal MS.

Con la scoperta dell' H , l'ultimo elemento mancante, la situazione cambia radicalmente. Ora non c'è più una strada ben definita da seguire; l'esplorazione non segue più alcuna direzione privilegiata, ci si deve avventurare in mare aperto senza sapere dove si avranno più chance di scoprire la NF, né tantomeno quando avverrà la prossima scoperta.

Non abbiamo la più pallida idea della scala di energia alla quale il MS si romperà e compariranno nuove particelle o nuove interazioni dominate dai processi di NF; sappiamo tuttavia che molti nuovi studi utilizzeranno il bosone di Higgs come ulteriore strumento di indagine.

Materia oscura

L'esistenza di materia oscura nell'universo è un dato sperimentale ormai consolidato e sappiamo che non ci sono particelle o fenomeni descritti dal MS che possano darne conto. Molte estensioni del MS, in particolare quelle che prevedono particelle massicce debolmente interagenti, potrebbero fornire una spiegazione convincente, ma le ricerche condotte finora non hanno prodotto risultati. Nessuno ha trovato le particelle stabili e pesanti previste da diverse varianti di teorie di Super-Simmetria (SUSY) o le risonanze Kaluza-Klein ipotizzate in alcuni modelli di Extra-Dimensioni.

Rivelatori via via più sofisticati sono in operazione o stanno per essere installati in laboratori sotterranei per cercare di raccogliere gli elusivi segnali di interazione diretta di particelle di materia oscura con i nucleoni della materia ordinaria. Un approccio, in qualche modo complementare, viene seguito a LHC, dove ATLAS e CMS cercano decadimenti invisibili del bosone di Higgs, che deriverebbero dall'interazione dell' H con il settore oscuro della materia.

Inflazione

L'Higgs, prima particella scalare fondamentale, potrebbe accendere una nuova luce su una delle questioni più scottanti della moderna cosmologia. Molte evidenze sperimentali, in particolare quelle raccolte con misure di precisione del fondo di radiazione cosmica a microonde (CMB), ci dicono che è molto probabile che l'universo primordiale sia passato attraverso uno stadio di *inflazione cosmica*. La teoria, proposta nei primi anni '80, sembra dare le spiegazioni più convincenti di un'ampia serie di osservazioni, ma presenta tuttora un punto debole. Nessuno ha ancora scoperto l'*inflatone*, la particella responsabile della crescita esplosiva che avrebbe trasformato una microscopica fluttuazione quantistica del vuoto in un universo materiale costituito da massa-energia intrecciata con lo spazio-tempo.

Un campo scalare debolmente decrescente, come quello previsto per un Higgs di 125 GeV, ad alta energia potrebbe produrre, in linea di principio, una densità di energia del vuoto a pressione negativa, proprio quella necessaria a produrre l'*inflazione cosmica*. Ma non tutti concordano con l'ipotesi che H possa essere l'inflatone. I dubbi potranno essere risolti solo da nuove misure di polarizzazione sul CMB o dalla scoperta di nuove particelle scalari a LHC.

Asimmetria di materia e anti-materia

Studi recenti sembrano indicare la possibilità che l'asimmetria fra materia e anti-materia possa essere stata

determinata dinamicamente. L'ipotesi di una bariogenesi collegata alla rottura spontanea di simmetria elettrodebole si baserebbe su una condizione di non equilibrio nella storia cosmologica del nostro universo. Se la dinamica della rottura di simmetria si fosse tradotta in una brusca transizione di fase, al primo ordine con la temperatura, nella quale fosse stata presente una sorgente importante di violazione di CP, da questo stesso fenomeno avrebbe potuto scaturire l'asimmetria che ancora domina il nostro universo. Ma i dettagli della transizione di fase originaria sono governati dall'andamento del potenziale dell' H ad alta energia e nessuno ha ancora avuto accesso a questo parametro così importante per la costituzione materiale del nostro universo. Misurare direttamente il potenziale dell'Higgs, e il suo andamento fuori dall'usuale condizione di equilibrio, risulterebbe la strada maestra per dirimere la questione. Senza considerare che ci sarebbero effetti indiretti sugli accoppiamenti ordinari dell'Higgs alle particelle del MS che potrebbero essere investigati per produrre ulteriore evidenza.

4 Studi di precisione e l'esplorazione di LHC

Dopo il primo periodo di presa dati che ha portato alla scoperta dell'Higgs, LHC ha ripreso a funzionare nel 2015 all'energia record di 13 TeV; da allora ha accumulato una quantità di nuovi dati quindici volte superiore a quella che ha portato alla scoperta dell'Higgs. Con i miglioramenti che sono in corso, si prevede di raggiungere, entro il 2025, una statistica complessiva di circa 500 fb^{-1} .

Mentre si tiene il fiato sospeso e si analizzano con trepidazione i dati a 13 TeV, è già in corso un'intensa attività per migliorare drasticamente la macchina e i rivelatori. L'obiettivo è di aumentare ulteriormente la luminosità fino a raccogliere 3000 fb^{-1} di dati. Questa fase di altissima luminosità prende il nome di *High Luminosity LHC* (HL-LHC) e coprirà, grosso modo, il periodo 2028–2040.

Dunque il grande acceleratore del CERN ha davanti a sé una lunga vita che consentirà la ricerca sistematica di nuova fisica, attraverso la scoperta diretta di nuove particelle, o con la ricerca di deviazioni significative dalle previsioni del MS. I due percorsi vanno visti come complementari. Mentre si continueranno a ricercare nuovi stati della materia, l'acceleratore funzionerà come una vera e propria fabbrica di bosoni di Higgs e di quark top. In caso di assenza di segnali diretti di nuova fisica, l'altissima statistica permetterà comunque misure di precisione su parametri decisivi del MS che potrebbero dare indicazioni indirette di nuovi fenomeni.

Occorre sottolineare che le misure finora effettuate sull' H sembrano indicare una piena compatibilità con le previsioni del MS; tuttavia le incertezze associate ai risultati sono ancora troppo grandi e non si possono escludere anomalie o proprietà non standard. C'è ancora spazio per scoprire

partners dell'Higgs, magari generati da meccanismi di produzione diversi da quelli previsti dallo SM o dominati da modi di decadimento esotici.

In realtà sono ancora molte le questioni aperte che riguardano l'Higgs. Siamo sicuri che sia una particella elementare? Chi ci garantisce che non sia invece uno stato composito? È solo o è accompagnato da un'intera famiglia di partner esotici? E i suoi accoppiamenti con le altre particelle del MS sono esattamente quelli previsti, o nei dati raccolti si nascondono anomalie? La risposta ad alcune di queste domande potrebbe aprire percorsi inattesi verso la Nuova Fisica.

La scoperta di nuove particelle, o interazioni fondamentali, può presentarsi sotto forma di osservazione diretta di nuovi stati della materia; ma può anche procedere per il tramite di misure di precisione, con l'identificazione di anomalie significative rispetto ai valori previsti dal MS. Le particelle ultra-massicce, ipotizzate in alcuni modelli di NF, se sono troppo pesanti per essere prodotte all'energia di LHC, possono comunque interferire con processi noti del MS e produrre effetti misurabili legati alla loro presenza virtuale. Identificare alcune di queste sottili anomalie porterebbe alla scoperta indiretta di NF. Poiché è così intrinsecamente sensibile a ogni nuova particella, il bosone di Higgs è un candidato naturale per agire da portale per la fisica oltre il MS.

Questo è il motivo per cui ATLAS e CMS stanno concentrando la loro attenzione sulle proprietà dell' H . Nell'era post-scoperta l'attenzione si sta focalizzando sempre più sulle misure di precisione: prima di tutto massa e larghezza dell'Higgs, poi i suoi accoppiamenti con le altre particelle del MS. Fra gli obiettivi più ambiziosi c'è lo studio dei decadimenti rari dell' H , inclusi quelli che darebbero accesso a λ , il coefficiente di auto-accoppiamento. È uno dei parametri fondamentali per capire l'evoluzione del potenziale dell'Higgs e cercare di dire qualcosa di più quantitativo sulla transizione di fase elettrodebole.

Le misure più recenti ci dicono che l'era delle misure di precisione sull' H è già cominciata. A pochi anni dalla scoperta conosciamo ormai la massa dell'Higgs con un'accuratezza dello 0.17%; il risultato più preciso è stato ottenuto recentemente da CMS, $m_H = 125.26 \pm 0.21 \text{ GeV}$ [5]. Metodi indiretti ci hanno anche consentito di ricavare un limite superiore alla sua larghezza $\Gamma_H < 9.16 \text{ MeV}$ @ 95% CL [6].

Le costanti di accoppiamento del bosone di Higgs con le particelle note si possono estrarre dall'intensità del segnale, $\sigma/\sigma_{\text{SM}}$, espresso come rapporto rispetto a quanto previsto dal MS per diversi modi di produzione e di decadimento. La scoperta è stata dominata dai modi di decadimento dell' H in coppie di bosoni, principalmente fotoni e Z. Osservare i decadimenti in coppie di fermioni è stato molto più difficile. Ci sono voluti anni per produrre le prime osservazioni dell' H che decade in coppie di leptoni τ ; ancora più difficile

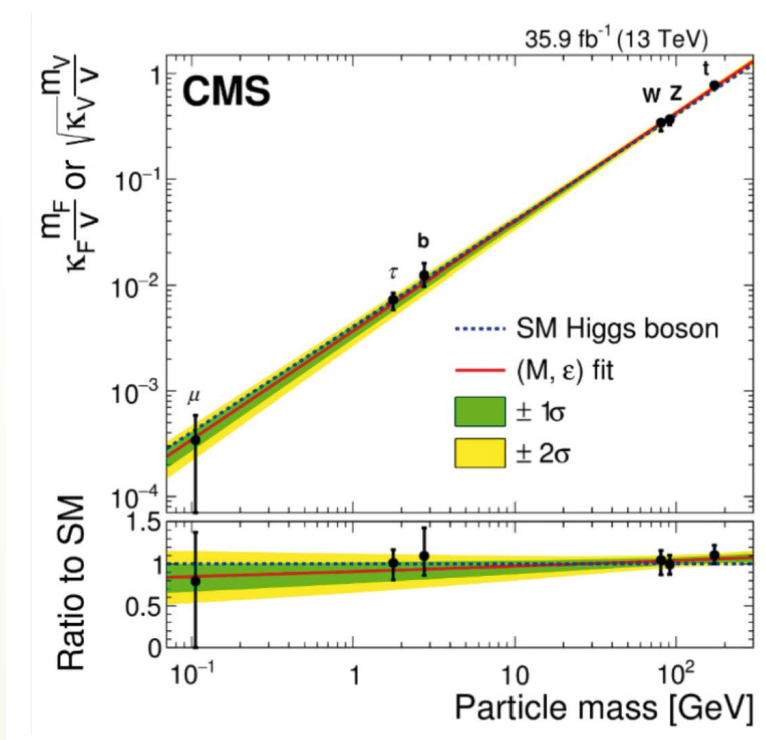


Fig. 2 Costanti di accoppiamento dell'Higgs.

è stato raggiungere le 5σ per il decadimento in coppie di *quark* b o identificare l' H prodotto in associazione con una coppia di *top*. Quest'ultimo modo di produzione, estremamente interessante in quanto sensibile direttamente all'accoppiamento Yukawa col *top*, è risultato particolarmente complicato a causa della minuscola sezione d'urto e dei fondi considerevoli. Dall'insieme di queste misure si ricavano gli accoppiamenti dell'Higgs illustrati in [fig. 2](#).

Nel frattempo proseguono studi dettagliati che cercano potenziali anomalie nelle sezioni d'urto differenziali o nei decadimenti rari dell' H . Per esempio sono in corso ricerche del decadimento in $Z\gamma$, canale per il quale si prevede un BR di 1.54×10^{-3} ; la statistica attuale di dati non consente ancora una sensibilità sufficiente per identificare un segnale, ma gli studi potrebbero fin da ora riservare sorprese. Il canale risulta particolarmente interessante dal momento che è molto sensibile a possibili contributi di NF; particelle pesanti cariche, entrando nei loop del decadimento, potrebbero produrre significative amplificazioni di un BR molto piccolo.

Misurare l'accoppiamento dell' H ai muoni risulta essere anch'essa un'impresa difficile, dal momento che il MS predice in questo caso una frazione di decadimento di 2.2×10^{-4} . E tuttavia i progressi ottenuti nel migliorare l'identificazione dei muoni e la loro risoluzione in energia ci spingono a essere ottimisti sulla possibilità di raggiungere il risultato nei prossimi anni di presa dati. Praticamente impossibile invece, a meno che un qualche processo di nuova fisica non produca un aumento mostruoso del BR, cercare di misurare il decadimento dell' H in coppie di elettroni, processo per il quale ci aspettiamo un BR di 5×10^{-9} .

Per tutti questi studi la statistica gioca un ruolo fondamentale. Dobbiamo produrre decine di milioni di bosoni di Higgs per identificare i modi di decadimento rari e migliorare l'accuratezza con la quale misuriamo gli accoppiamenti. È quello che ci aspettiamo che accada con HL-LHC.

Gli studi che sono stati fatti, estrapolando i risultati attuali ai 3000 fb^{-1} di HL-LHC, ci dicono che sarà possibile misurare la massa dell' H con un'accuratezza migliore di 50 MeV. Mentre la sua larghezza totale potrà essere stimata, con metodi indiretti, fino al valore previsto dal MS $4.2 \pm 2 \text{ MeV}$. Sarà sicuramente possibile analizzare in dettaglio modi di produzione difficili, come il ttH , e non ci dovrebbero essere problemi a investigare in profondità decadimenti rari come $Z\gamma$ e $\mu\mu$.

Per quanto riguarda gli accoppiamenti le proiezioni stimano che sarà possibile raggiungere una precisione ultima nell'intervallo 1–5% [7]. Per collocare questo valore nel giusto contesto occorre far notare che più pesante è la particella sconosciuta che interferisce con gli accoppiamenti ordinari dell' H , più piccoli sono i suoi effetti. Le anomalie scalano con l'inverso del quadrato della massa; per definire la scala, le modifiche agli accoppiamenti prodotte da particelle pesanti qualche TeV sarebbero al di sotto del %. Questo significa che alla fine di LHC, se non ci saranno nuove scoperte dirette, la sfida di scoprire Nuova Fisica attraverso le misure di precisione degli accoppiamenti dell' H sarà ancora aperta.

Infine sarà estremamente difficile, se non impossibile, misurare il parametro λ . In linea di principio potrebbe essere ricavato dai rarissimi eventi nei quali il bosone di Higgs è

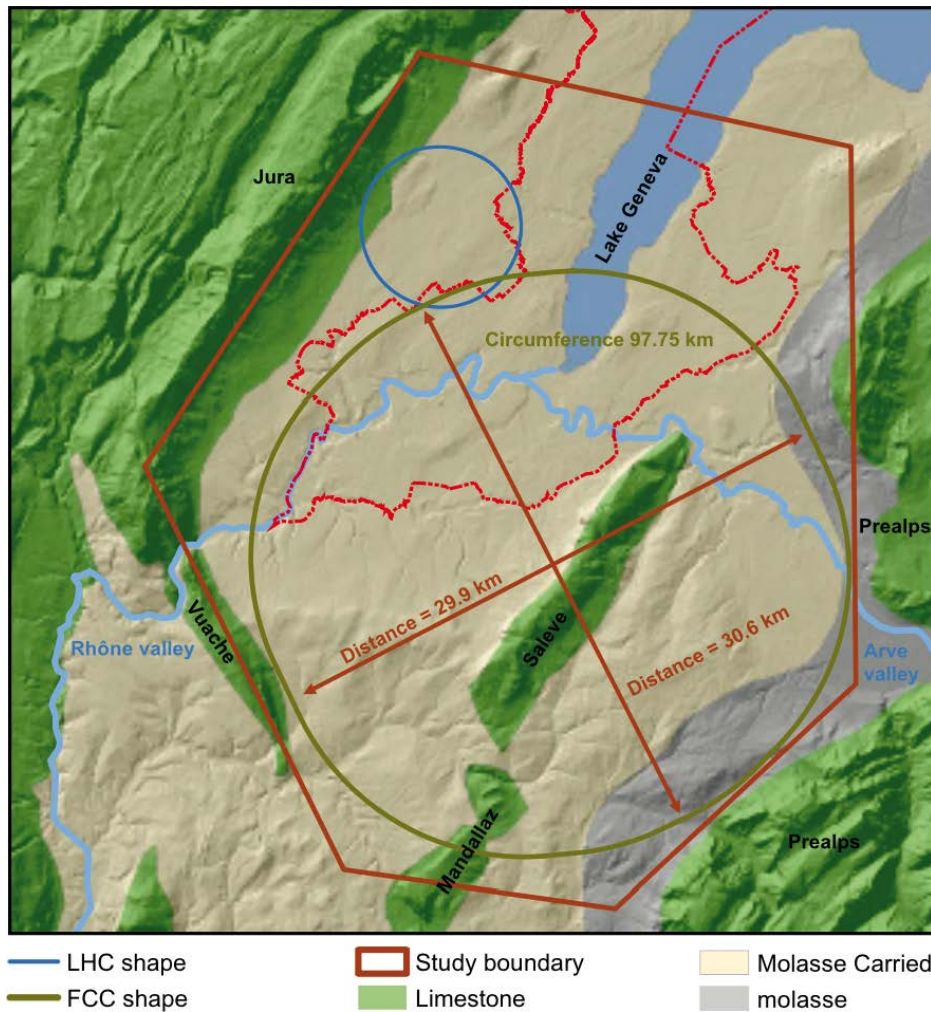


Fig. 3 Layout di FCC.

prodotto in coppie; ma nell'ambiente difficile di HL-LHC si pensa che sia estremamente complicato ricostruirne una quantità sufficiente per ricavare una misura accurata di un parametro fondamentale della natura.

Risulta chiaro insomma che, per esplorare seriamente tutti gli angoli nei quali si può nascondere la Nuova Fisica è necessario cominciare a guardare a una nuova generazione di acceleratori: gli eredi di LHC.

5 Una strategia per i collider del futuro

La strategia europea per il futuro della fisica degli acceleratori è molto chiara. Mentre si continua a sfruttare appieno il potenziale di LHC è giunto il momento di gettare le basi di un nuovo sistema di futuri acceleratori.

FCC, acronimo che sta per *collider* circolari del futuro, è il nome di un gruppo di studio internazionale, che è stato costituito con lo scopo di produrre un disegno concettuale, definire le infrastrutture e stimare i costi per un nuovo anello

da 100 km, da costruire al CERN (fig. 3). In una prima fase il progetto prevede un grande acceleratore che produrrà collisioni fra elettroni e positroni, FCC-ee [8]. In seguito esso dovrebbe essere sostituito da una macchina protone-protone, FCC-hh [9], ospitata nello stesso tunnel; uno schema che il CERN ha già utilizzato con successo con la costruzione in sequenza di LEP e LHC.

La proposta è nata nel 2014 e ha raccolto subito un fortissimo sostegno da parte della comunità internazionale. Il lavoro ha coinvolto oltre 1300 fisici e ingegneri appartenenti a 150 università, istituti di ricerca e partner industriali. Il risultato dello studio è un rapporto dettagliato pubblicato alla fine del 2018, che costituisce la base per definire la nuova strategia europea nel campo degli acceleratori di particelle. La decisione di costruire questa nuova infrastruttura di ricerca dovrebbe essere presa nel prossimo futuro; si avvicina quindi un momento cruciale che potrebbe segnare il corso della fisica di tutto questo secolo.

Dal punto di vista della fisica, la combinazione in

successione dei due acceleratori è di gran lunga la configurazione ottimale. La macchina a leptoni sarebbe la prima a essere installata non appena il tunnel fosse pronto. Le tecnologie richieste per FCC-ee sono abbastanza mature e la produzione industriale di magneti e cavità risonanti può essere organizzata in parallelo mentre procedono i lavori di scavo del tunnel. Gli stessi rivelatori non richiederebbero innovazioni estreme rispetto a quelle già messe a punto per LHC. In uno scenario realistico, si potrebbe immaginare di cominciare la costruzione nel 2028 e iniziare le operazioni di FCC-ee entro il 2040, alla fine della fase di alta luminosità di LHC.

La macchina a protoni è invece molto più complessa, e richiederebbe ancora parecchi anni di sviluppo per la produzione su scala industriale dei magneti. Prevedere come data di partenza per FCC-hh il 2050 permetterebbe di lavorare alle soluzioni migliori per i magneti superconduttori che saranno il cuore dell'impresa. D'altra parte gli stessi rivelatori per la macchina a protoni sono estremamente complicati: richiederanno nuove tecnologie e molti anni di sviluppo di prototipi prima di cominciare la produzione su scala industriale dei vari componenti.

6 Il programma di fisica di FCC-ee

I due approcci risultano pienamente complementari. Nell'ambiente ideale di un collider a leptoni si possono effettuare le misure più precise sui parametri del MS che mente umana possa immaginare; l'obiettivo sarebbe quello di studiare gli effetti indiretti di nuove particelle e interazioni fino a una scala di molte decine di TeV. Un collider a protoni da 100 TeV consentirebbe in seguito l'esplorazione sistematica di una grossa porzione della stessa regione di energia, con la possibilità di osservare direttamente nuovi stati della materia.

Il programma di fisica di FCC-ee è concentrato sulle misure di precisione dell'Higgs, del top e dei parametri fondamentali del Modello Standard [10]. È previsto che la macchina funzioni a 91 GeV per produrre un'enorme quantità di Z (5×10^{12}), per poi passare a 160 GeV per generare 10^8 coppie di W, salire a 240 GeV per produrre 10^6 H in associazione alla Z e infine raggiungere i 350–365 GeV per creare 10^6 coppie di top.

Misure di precisione dei parametri elettrodeboli

Grazie all'immensa statistica alle diverse energie di collisione e a uno sforzo specifico per calibrare con grande accuratezza l'energia dei fasci, FCC-ee potrà dare accesso a diverse manifestazioni di NF. La presenza di nuove interazioni, che si mescolerebbero a quelle del MS, porterebbe a modifiche significative di alcuni dei parametri elettrodeboli più sensibili. Nuove particelle massicce e debolmente interagenti, interferendo con i propagatori ordinari W, Z

e γ produrrebbero correzioni misurabili alla massa di W, Z o all'angolo di Weinberg. Ci potrebbero essere anche effetti dipendenti dal sapore dei quark, traducendosi, per esempio in piccole variazioni degli accoppiamenti dello Z ai *quark* pesanti. Se i neutrini leggeri ordinari si mescolassero con eventuali partner destrorsi, molto più pesanti, si potrebbero osservare anomalie nei loro accoppiamenti ordinari a Z e W e così via. Il programma sarebbe ulteriormente arricchito da misure di precisione sul quark top ricavate dall'enorme statistica di eventi prodotti in soglia. Altre misure di precisione diventerebbero possibili con lo studio delle enormi quantità di prodotti di decadimento, $10^{11} \tau$ e $2 \times 10^{12} b$, identificabili con grande efficienza e ottima purezza.

Per molte misure di precisione la sfida diventerebbe il controllo degli errori sistematici e lo sviluppo di calcoli teorici ordini di grandezza più precisi di quelli attualmente disponibili. Nell'ipotesi di riuscire a controllare queste sorgenti di errore si prevedono risultati impressionanti in termini di precisione raggiungibile. Le masse di Z, W e top, parametri fondamentali per il fit globale elettrodebole, sarebbero misurabili con precisioni dell'ordine, rispettivamente, di 0.1, 1 e 10 MeV migliorando di ordini di grandezza le conoscenze attuali. Analoghi miglioramenti si avrebbero su altri parametri altrettanto importanti come le larghezze, il numero di neutrini leggeri e $\sin^2 \theta_W^{\text{eff}}$.

Misure dell'Higgs

La natura puntiforme dei leptoni che entrano in collisione e la perfetta conoscenza dello stato iniziale renderebbero accessibili misure dell'Higgs che sono impossibili alle macchine adroniche come LHC. Con FCC-ee si sfrutta la produzione dell'H che rinvia contro la Z in 10^6 eventi $e^+e^- \rightarrow ZH$. Questo permette di misurare l'accoppiamento assoluto alla Z, che è il punto di partenza della determinazione della larghezza totale dell'H, e poi degli altri accoppiamenti attraverso misure dei BR. In questo modo si riesce a raggiungere una precisione inferiore al % per tutti i principali accoppiamenti, compresi quelli inaccessibili a LHC, come gli elusivi decadimenti in coppie di gluoni o in coppie di *quark charm*. Ulteriori informazioni potranno venire dagli 1.5 ab^{-1} di dati raccolti a 365 GeV. A questa energia si prevede che verranno prodotti altri 7×10^5 Higgs, fra i quali circa un terzo nel modo di produzione esclusivo di fusione di due bosoni W. L'analisi combinata di tutti questi campioni consentirebbe di migliorare ulteriormente l'accuratezza degli accoppiamenti e misurare con precisione la larghezza totale della risonanza in maniera indipendente dai modelli. Si prevede di raggiungere l'1% nella misura di Γ_H e di confinare la possibilità di decadimenti invisibili dell'Higgs a valori molto inferiori al %. Per collocare nel giusto contesto queste prospettive vale la pena ricordare che i limiti attuali posti dagli esperimenti di LHC al BR invisibile dell'H è attorno

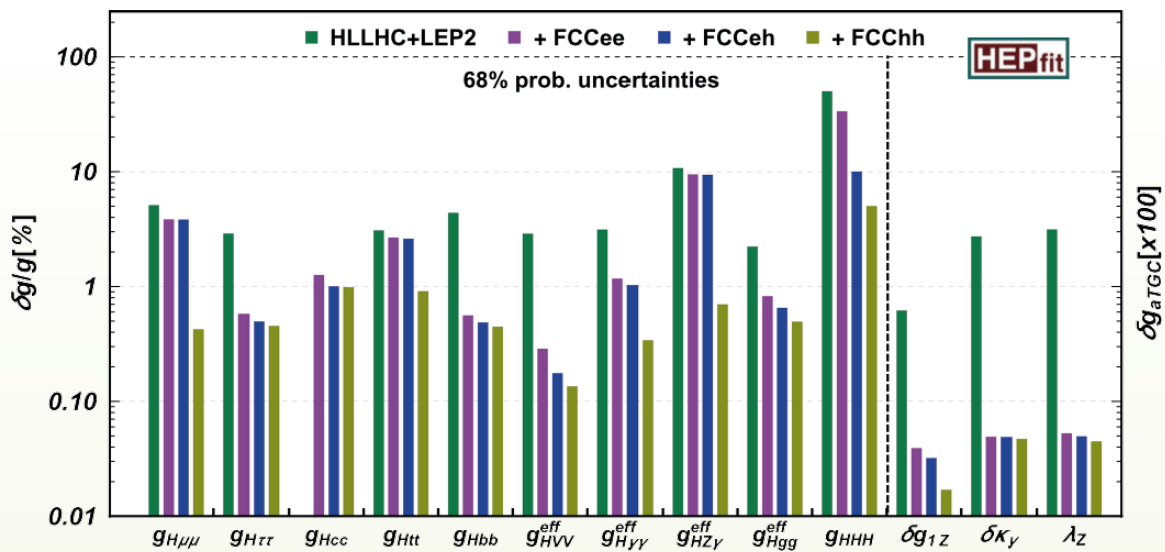


Fig. 4 Precisione sui principali accoppiamenti dell'Higgs raggiungibile con la combinazione in sequenza di FCC-ee e di FCC-hh.

al 20%, valore che potrebbe ancora nascondere molte sorprese.

Infine si sta addirittura valutando, per FCC-ee, la possibilità di organizzare un run speciale della macchina a $\sqrt{s} = m_H$ per provare a misurare, o quanto meno a mettere limiti stringenti, al BR virtualmente *impossibile* in elettroni.

FCC-ee potrebbe infine produrre una prima misura del coefficiente di auto-accoppiamento dell'Higgs, che si prevede di riuscire a misurare con un'accuratezza intorno al 30%. Non sarebbero possibili, invece, miglioramenti significativi per gli accoppiamenti dell' H a muoni e top e qui entrerebbe in gioco la complementarità con FCC-hh.

7 Il programma di fisica di FCC-hh

Il collider a protoni da 100 TeV, FCC-hh, è progettato per raccogliere una luminosità integrata totale fino a 20 ab^{-1} , cui corrisponde una produzione dell'ordine di 10^{10} bosoni di Higgs. Il considerevole aumento di energia nel centro di massa rispetto a LHC permetterebbe di aumentare di circa un ordine di grandezza la potenzialità di scoperta diretta di nuove particelle o nuove interazioni. La grande abbondanza di bosoni di Higgs e la possibilità di produrre misure di precisione sull'Higgs anche in ambiente adronico, come dimostrato da LHC, permetterà inoltre di arricchire e completare l'ambizioso programma di misure delle caratteristiche dell'Higgs già ampiamente sviluppato con FCC-ee [10].

Fisica dell'Higgs

Le diverse opzioni esplorate dal gruppo di studio di FCC offrono un'opportunità unica per studiare la natura del bosone di Higgs. Per esempio sfruttando il regime ad alto impulso degli H prodotti a FCC-hh si potrebbe cercare di capire se il bosone di Higgs è veramente una particella elementare o se ha piuttosto una struttura interna.

Operate in sequenza, le due macchine acceleratrici risulterebbero perfettamente complementari per quanto riguarda la misura degli accoppiamenti. Grazie all'enorme statistica di dati fornita da FCC-hh sarà possibile investigare in dettaglio tutte le caratteristiche di decadimenti rari dell'Higgs come $H \rightarrow \gamma\gamma, \mu\mu, Z\gamma$ e gli accoppiamenti relativi potranno essere misurati con precisioni $\sim 1\%$. Risultati simili potranno essere ricavati per l'accoppiamento diretto dell'Higgs al top che si potrà ricavare dal modo di produzione ttH . Diventeranno accessibili decadimenti invisibili come $H \rightarrow 4\nu$ e si potranno scoprire direttamente o mettere limiti inferiori a 10^{-3} per i BR in particelle invisibili di qualunque genere. Infine la grande statistica di produzione di Higgs in coppie permetterà di migliorare la misura del coefficiente di auto-accoppiamento fino a una precisione del 5–7%.

Con il programma di misure congiunto, FCC-ee + FCC-hh, tutti gli accoppiamenti dell'Higgs ai bosoni di gauge e ai fermioni carichi della seconda e terza generazione –a eccezione del *quark strange*– si potranno misurare con precisioni comprese fra l'1% e lo 0.1% (fig. 4). Tutto questo non solo permetterà di identificare ogni eventuale anomalia,

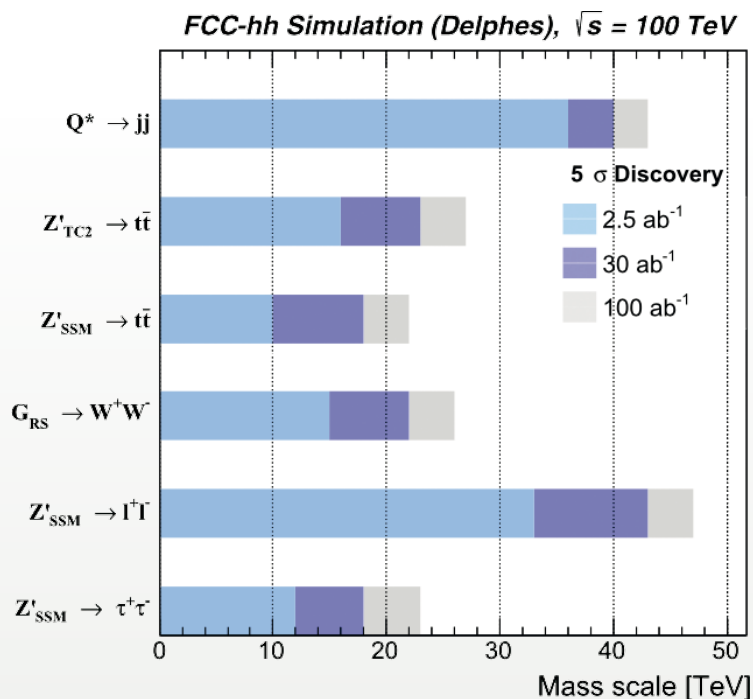


Fig. 5 Potenziale di scoperta diretta di FCC-hh.

ma consentirà anche di estrarre informazioni accurate sulla scala di energia alla quale il MS perderebbe di validità.

Studio della transizione di fase elettrodebole

Come è ben noto il MS non prevede una rottura di simmetria violenta a sufficienza e segnata da un'appropriata sorgente di violazione di CP tali da far risalire a quel fatidico istante la prevalenza di materia su anti-materia che registriamo nel nostro universo. Queste condizioni potrebbero però essere determinate dalla presenza di Nuova Fisica che potrebbe manifestarsi con nuove particelle scalari molto massicce o significative anomalie negli accoppiamenti del bosone di Higgs. Tutti fenomeni che non potrebbero sfuggire alla manovra a tenaglia costruita con la sequenza dei due acceleratori. Per la prima volta con FCC-hh sarebbe possibile avere energia a sufficienza da perturbare il potenziale dell'Higgs e portarlo al di fuori delle ordinarie condizioni di equilibrio in maniera da poterne studiare le caratteristiche con grande dettaglio.

Ricerca diretta di nuova fisica

I 100 TeV di energia nel centro di massa di FCC-hh renderebbero possibile l'esplorazione di una scala di energia 7 volte superiore a quella di LHC. Qualunque nuovo stato della materia, di massa compresa fra alcuni TeV e alcune decine di TeV, sarebbe identificato direttamente. Le ricerche di particelle supersimmetriche verrebbero estese a grandi masse: si potrebbero scoprire partner scalari del top fino

a 10 TeV e gluini fino a 20 TeV. I limiti di esclusione per le risonanze vettoriali previste nei modelli di Higgs composito potrebbero superare i 30 TeV. Si potrebbero sottoporre a verifica teorie che ipotizzano nuovi bosoni di gauge Z' , quark eccitati Q^* , o gravitoni massicci, G_{RS} , come quelli ipotizzati in alcune teorie di extra-dimensioni (fig. 5).

La nuova macchina avrebbe infine un impatto significativo sulle ricerche di materia oscura; in particolare si potrebbe scoprire, o escludere definitivamente, i candidati di materia oscura appartenenti alla classe delle particelle massicce e interagenti solo debolmente (WIMP: Weakly Interacting Massive Particles). L'idea che enormi concentrazioni di WIMP siano state in equilibrio termico con le particelle del Modello Standard fin dai primi istanti dell'universo resta una delle ipotesi più suggestive per spiegare la materia oscura ma finora non ci sono state conferme. La potenza di FCC-ee permetterebbe di confermare o escludere in via definitiva questa ipotesi.

8 Stato della discussione

La strategia europea per i futuri acceleratori sta prendendo in considerazione diversi scenari. Fra questi anche l'idea di effettuare il programma di studi di precisione dell'Higgs tramite un acceleratore lineare a leptoni. Il progetto CLIC (Compact Linear Collider) si propone di costruire una *Higgs-factory* lineare, alternativa a FCC-ee [11]. Per uno sfruttamento ottimale del suo potenziale di fisica CLIC

sarebbe costruito e operato per fasi successive: inizialmente a una energia nel centro di massa di 380 GeV, per poi passare a 1.5 TeV e raggiungere infine 3 TeV. Corrispondentemente le dimensioni del sito crescerebbero da 11 a 50 km. Altre alternative allo studio prevedono di aumentare l'energia di LHC fino a 28 TeV equipaggiando l'attuale acceleratore con magneti superconduttori più potenti.

È indubbio comunque che con la proposta di FCC l'Europa lancia la sua sfida e prende il centro della scena nel dibattito mondiale sugli acceleratori del futuro. Altri attori importanti sono il Giappone che propone ILC (International Linear Collider) [12], una *Higgs-factory* basata su un acceleratore a leptoni di tipo lineare, e soprattutto la Cina.

Il gigante asiatico propone un progetto ambizioso in due fasi, per molti versi simile a FCC. La costruzione di un anello da 100 chilometri che ospiterebbe un collider elettrone-positrone (CECP: Circular Electron-Positron Collider) da 240 GeV (con possibilità di operare anche a 91 e 160 GeV), per poi passare a un acceleratore a protoni SPPC (Super Proton-Proton Collider) capace di produrre collisioni a 100 TeV [13]. Un piano così ambizioso ci fa capire che la Cina punta a raggiungere un ruolo una posizione di assoluta preminenza nella fisica delle alte energie.

Gli Stati Uniti, leader indiscussi del campo fino a qualche decennio fa, stanno invece mantenendo un basso profilo. Partecipano in qualche modo alle iniziative di Europa, Cina e Giappone, ma non hanno proposto un'alternativa, né si candidano a ospitare una delle grandi infrastrutture in discussione.

Sono tutti progetti molto ambiziosi, che richiedono lo sforzo di migliaia di scienziati e importanti investimenti, ma nessuna delle alternative si dimostra superiore alle potenzialità combinate di FCC, che resta la proposta di gran lunga più promettente per portare la fisica delle alte energie all'altezza delle sfide di questo secolo.

9 Conclusioni

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era nella comprensione di alcuni dei fenomeni che hanno determinato la particolare struttura materiale del mondo che ci circonda. Restano aperte tuttavia molte questioni, per capire le quali sarà forse necessario ricorrere a nuovi paradigmi, ma nessuno può prevedere quando e in che forma essi diventeranno evidenza sperimentale.

Mentre procedono senza sosta le ricerche di segnali di nuova fisica, comincia a diventare urgente progettare una nuova generazione di macchine acceleratrici. Le prime discussioni su LHC cominciarono verso la metà degli anni '80 e la grande infrastruttura fu completata nel 2008. Se vogliamo una nuova macchina in operazione alla fine della fase di alta luminosità di LHC, il momento giusto per agire è ora.

La proposta di FCC si presenta come lo strumento migliore per consentire a nuove generazioni di scienziati di esplorare gli angoli più nascosti della materia per fare luce su alcuni dei misteri più oscuri del nostro universo.

References

- [1] ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 710 (2012) 49.
- [2] CMS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 710 (2012) 26.
- [3] ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 1.
- [4] CMS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 30.
- [5] CMS Collaboration, *JHEP*, 11(2017) 047.
- [6] CMS Collaboration, *Phys. Rev. D*, 99 (2019) 112003.
- [7] M. Cepeda et al., "*Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC*", ArXiv:1902.00134.
- [8] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. Special Topics*, 228 (2019) 261.
- [9] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. Special Topics*, 228 (2019) 755.
- [10] A. Abada et al., *Eur. Phys. J. C*, 79 (2019) 474.
- [11] A. Robson et al., "*The compact linear e^+e^- Collider (CLIC): Accelerator and Detector*", ArXiv: 1812.07987.
- [12] Ties Behnke et al., "*The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary*", ArXiv:1306.6327.
- [13] The CEPC Study Group, "*CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator*", ArXiv:1809.00285.

Guido Tonelli

Fisico del CERN, professore dell'Università di Pisa e ricercatore associato dell'INFN, è uno dei principali protagonisti della scoperta del bosone di Higgs, l'importante risultato che ha portato all'assegnazione del premio Nobel per la fisica del 2013 a François Englert e Peter Higgs. Per il suo contributo a questa scoperta ha ricevuto numerosi premi e riconoscimenti internazionali; fra i più prestigiosi lo *Special Prize for Fundamental Physics*, il Premio "Enrico Fermi" e la Medaglia d'onore del Presidente della Repubblica. È autore di oltre 1200 articoli scientifici su rivista e di libri di divulgazione scientifica per il grande pubblico.