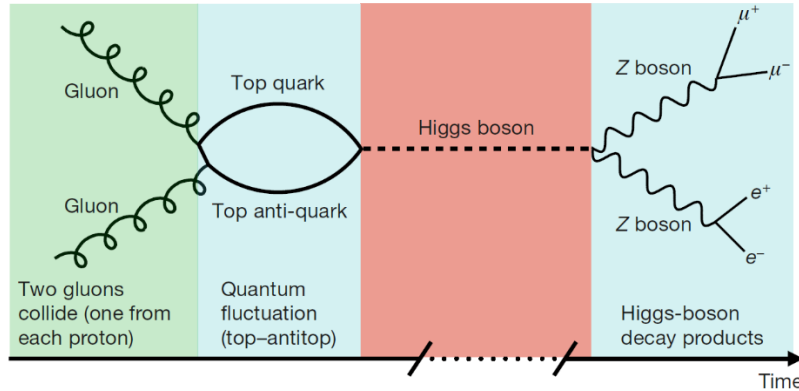
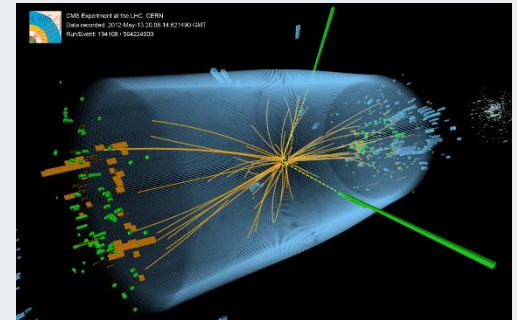
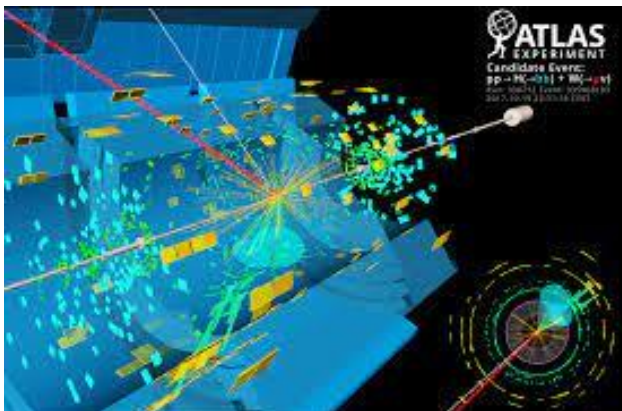


Il bosone di Higgs compie dodici anni

La scoperta e la misura del bosone di Higgs



Produzione del bosone di Higgs al LHC



Sommario

Nel mondo della fisica, poche scoperte sono state tanto rivoluzionarie e attese quanto quella del bosone di Higgs. Spesso definito la “*particella di Dio*”, il bosone di Higgs è un elemento fondamentale per comprendere come le particelle acquisiscano massa. La sua scoperta nel 2012 presso il Large Hadron Collider (LHC) del CERN ha rappresentato un momento storico per la scienza, fornendo una prova cruciale a sostegno del Modello Standard della fisica delle particelle. Il rilevamento del bosone di Higgs, avvenuto dieci anni fa, è stato una tappa fondamentale che ha aperto la strada allo studio di un nuovo settore delle interazioni fisiche fondamentali. In questo articolo esaminiamo il ruolo del campo di Higgs all'interno del Modello Standard e il suo impatto sul mondo che ci circonda. Riassumiamo le conoscenze acquisite sulla fisica del bosone di Higgs in dodici anni di ricerche, discutiamo le questioni ancora aperte e delineiamo le possibili connessioni tra il bosone di Higgs e i misteri irrisolti della fisica delle particelle..

PAROLE CHIAVE

Bosone: Un bosone è una particella subatomica che segue la statistica di Bose-Einstein, che permette a più bosoni di occupare lo stesso stato quantico. Esempi di bosoni includono i fotoni, che mediano le forze elettromagnetiche, e il bosone di Higgs, responsabile di conferire massa alle particelle.

CERN: L'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare (CERN) è uno dei più grandi e avanzati centri di ricerca sulla fisica delle particelle al mondo. Gestisce il Large Hadron Collider (LHC), dove gli scienziati studiano le particelle fondamentali e le forze che governano l'universo.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Introduzione

L'importanza della scoperta del bosone di Higgs non risiede solo nel fatto che sia stata trovata una nuova particella tanto attesa, ma soprattutto nel fatto che la sua esistenza fornisce la prima prova diretta della presenza di un nuovo tipo di campo fondamentale, noto come campo di Higgs. I campi in fisica sono concetti familiari anche nella vita quotidiana: ad esempio, il campo magnetico terrestre influenza l'ago di una bussola. La differenza principale tra il campo di Higgs e un campo magnetico è che, se si rimuove la sorgente di un campo magnetico, il campo scompare. Al contrario, il campo di Higgs è sempre presente ovunque nell'Universo, indipendentemente dalla presenza di altre particelle o oggetti. Si può immaginare l'Universo come immerso in un campo invisibile di energia, il campo di Higgs, che agisce come una sorta di collante cosmico per le particelle. Secondo la teoria, le particelle interagiscono con questo campo in modi diversi: alcune incontrano una forte resistenza e acquisiscono più massa, mentre altre lo attraversano quasi senza ostacoli e rimangono quasi prive di massa. Il bosone di Higgs è la particella associata a questo campo, proprio come il fotone è la particella associata alla luce. La scoperta del bosone di Higgs ha quindi confermato l'esistenza del campo di Higgs stesso.

La ricerca del bosone di Higgs

La caccia al bosone di Higgs è stata un viaggio lungo decenni. Proposto per la prima volta nel 1964 dal fisico Peter Higgs e da altri scienziati, il bosone di Higgs è rimasto una particella puramente teorica per quasi 50 anni. I fisici erano determinati a trovarlo, poiché era l'unica particella del Modello Standard che non era ancora stata osservata. Per individuare il bosone di Higgs, gli scienziati hanno costruito il Large Hadron Collider (LHC), il più grande e potente acceleratore di particelle al mondo. Situato presso il CERN, vicino a Ginevra, in Svizzera, l'LHC è un anello sotterraneo di 27 chilometri. Qui le particelle vengono accelerate fino a velocità prossime a quella della luce e fatte collidere tra loro. In queste collisioni ad altissima energia, le particelle si frantumano, permettendo agli scienziati di esaminare i mattoni fondamentali della materia.

Il modello Standard

Il Modello Standard è una teoria fondamentale della fisica che descrive i costituenti di base della materia e le forze che li governano. Esso spiega come le particelle fondamentali interagiscono attraverso tre delle quattro forze conosciute: la forza elettromagnetica, la forza nucleare debole e la forza nucleare forte.

Le particelle si dividono in due categorie principali: i fermioni, che costituiscono la materia, e i bosoni, che mediano le forze. I fermioni si suddividono ulteriormente in quark e leptoni: i quark si combinano per formare protoni e neutroni, mentre i leptoni comprendono elettroni e neutrini. Le forze sono trasmesse dai bosoni, come i fotoni per l'elettromagnetismo e i gluoni per la forza nucleare forte. Queste interazioni sono regolate da precise leggi, che permettono ai fisici di prevedere il comportamento delle particelle in collisioni ad alta energia, come quelle che avvengono negli acceleratori di particelle, tra cui il Large Hadron Collider.

Nonostante alcune limitazioni, il Modello Standard è un quadro teorico che spiega con successo un'ampia gamma di fenomeni fisici, dalle interazioni tra particelle al comportamento delle particelle fondamentali. Tuttavia, non include la forza di gravità né spiega la materia oscura. All'interno del Modello Standard, il campo di Higgs è essenziale per descrivere il mondo così come lo conosciamo.

Donne nelle

STEM –

Informazioni

sulla scienziata

Giulia Zanderighi - La professoressa Giulia Zanderighi è nata a Milano nel 1974. Dopo aver studiato fisica all'Università di Milano, ha conseguito il dottorato presso l'Università di Pavia. Ha proseguito la sua carriera accademica come ricercatrice postdoc presso l'Institute for Particle Physics Phenomenology di Durham (Regno Unito) e il Fermilab di Batavia (USA). Nel 2005 è diventata fellow nel dipartimento di teoria del CERN, per poi assumere nel 2007 il ruolo di docente all'Università di Oxford e di Tutorial Fellow presso il Wadham College. Dal 2010 è stata professoressa di fisica all'Università di Oxford. Nel 2014 ha preso un congedo da questa posizione per ricoprire, per cinque anni, un incarico da ricercatrice permanente presso il CERN. Dal 1° gennaio 2019 è direttrice del Max Planck Institute for Physics, dove guida il dipartimento "Novel Computational Methods in Particle Physics". È la prima donna a ricoprire questo ruolo presso l'istituto. Inoltre, è titolare di una Liesel Beckmann Professorship presso la Technische Universität di Monaco di Baviera. La sua ricerca si concentra sulla fisica delle particelle.

La scoperta del bosone di Higgs

Nel luglio del 2012, dopo anni di analisi sui dati provenienti da miliardi di collisioni tra particelle, Fabiola Gianotti, in qualità di rappresentante degli scienziati dell'esperimento ATLAS, annunciò una scoperta storica: era stata osservata una particella con proprietà compatibili con quelle del bosone di Higgs. La notizia ebbe un'eco mondiale e, nel 2013, Peter Higgs e il fisico François Englert, che aveva contribuito alla teoria, ricevettero il Premio Nobel per la Fisica. La scoperta del bosone di Higgs fu solo l'inizio. Dopo averlo individuato, gli scienziati si concentrarono sulla misurazione delle sue proprietà per comprendere meglio il modo in cui interagisce con le altre particelle. Queste misurazioni sono fondamentali per verificare se il bosone di Higgs si comporta come previsto dal Modello Standard o se nelle sue interazioni potrebbero nascondersi nuove sorprese.

Uno degli aspetti chiave da determinare è la massa del bosone di Higgs. Gli scienziati hanno stabilito che la sua massa è di circa 125 gigaelettronvolt (GeV), ossia circa 133 volte la massa di un protone. Questa misurazione è cruciale perché, nei modelli teorici, la massa del bosone di Higgs influisce sulla stabilità dell'universo. Comprenderne con precisione il valore aiuta a esplorare domande fondamentali, come se l'universo si trovi in uno stato stabile o se potrebbe subire cambiamenti nel tempo.

Un altro aspetto fondamentale è il modo in cui il bosone di Higgs interagisce con le altre particelle. Nell'LHC, i bosoni di Higgs vengono osservati mentre decadono, ovvero si trasformano in altre particelle. I modelli di decadimento forniscono informazioni preziose su come il bosone di Higgs si accoppia con diverse particelle, permettendo di confermare o affinare la comprensione del Modello Standard. L'intensità dell'interazione tra una particella e il campo di Higgs determina direttamente una sua proprietà fondamentale: la massa. Di conseguenza, questa interazione influenza la dimensione degli atomi, garantisce la stabilità del protone e regola la scala temporale dei decadimenti radioattivi (β), che a loro volta influiscono, ad esempio, sulla durata della vita delle stelle.

Donne nelle STEM – Informazioni sulla scienziata.

Fabiola Gianotti - Fabiola Gianotti è una fisica delle particelle italiana ed è stata la prima donna a ricoprire il ruolo di Direttore Generale del CERN, l'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare. Nata nel 1960, è una figura di spicco nel campo della fisica delle particelle ed è celebre per il suo contributo alla scoperta del bosone di Higgs nel 2012.

Oltre alla fisica, ha una formazione musicale e ha studiato pianoforte a livello professionale prima di dedicarsi completamente alla scienza. Il suo lavoro al CERN ha avuto un impatto significativo sulla comprensione delle particelle fondamentali e delle forze che regolano l'universo. Sotto la sua guida, il CERN ha portato avanti importanti ricerche in fisica delle alte energie, in particolare con il Large Hadron Collider (LHC).

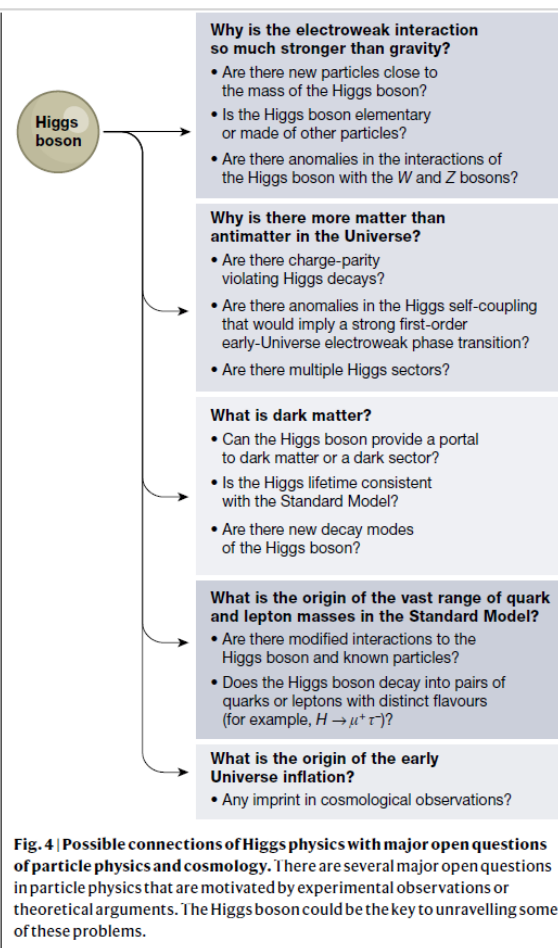


Table 1 | Ways in which the Higgs boson affects the world around us

Particle whose mass is set by the interaction with the Higgs field	Role of the particle masses	Impact on everyday life	Has the Higgs-particle interaction been experimentally confirmed?
Up quark ($m_{\text{up}} \approx 2.2 \text{ MeV } c^{-2}$) Down quark ($m_{\text{down}} \approx 4.7 \text{ MeV } c^{-2}$)	Affects the mass of the proton and neutron	Differences in quark masses ($m_{\text{up}} < m_{\text{down}}$) contribute to protons (made of two up and one down quarks) being lighter than neutrons (made of one up and two down quarks). As a result, protons are stable, as required for the existence of hydrogen.	No
Electron	Atomic radius $\propto 1/m_e$	A different value of the electron mass would modify the energy levels and chemical reactions of all known elements.	No
W boson	Radioactive beta decay rate $\propto 1/m_W^4$	Many radioactive decays, and the fusion reactions that power the Sun, involve the W boson. The W mass affects the rate of all of these reactions.	Yes

Three examples of how particle masses⁸⁴ play a crucial role in determining the physical nature of the world in which we live.

In all three cases, the Standard Model suggests that the corresponding particle masses arise from interactions of those particles with the Higgs field. The last column indicates whether or not we have clear experimental indications that confirm that hypothesis.

Perché il bosone di Higgs è importante

Nel Modello Standard, oltre al bosone di Higgs, esistono due categorie di particelle. La prima comprende i fermioni, come i quark up e down e l'elettrone, che costituiscono la materia ordinaria. Queste particolari particelle (insieme a uno dei tre neutrini) sono chiamate fermioni di prima generazione. Esistono poi due ulteriori generazioni di fermioni (seconda e terza), che includono particelle più pesanti, non presenti normalmente nel nostro mondo. La seconda categoria è quella dei mediatori di forza, ovvero il fotone, i bosoni W e Z e il gluone, collettivamente noti come bosoni vettori. Quando queste particelle vengono scambiate tra due fermioni, generano una interazione attrattiva o repulsiva tra di essi:

Il fotone è il mediatore della forza elettromagnetica,

I bosoni W e Z sono i mediatori dell'interazione debole,

I gluoni sono i mediatori dell'interazione forte.

Negli anni '60, mentre i fisici stavano iniziando a costruire questo quadro teorico, non era chiaro se fosse possibile formulare una teoria coerente che includesse portatori di forza dotati di massa. Si scoprì che ciò era possibile solo introducendo un'interazione di queste particelle con un campo di Higgs, e assegnando a questo campo un valore diverso da zero.

Man mano che il Modello Standard prendeva forma, si capì che le interazioni tra le particelle e il campo di Higgs erano un elemento centrale della teoria, soprattutto per spiegare la massa dei bosoni W e Z, come richiesto dalle osservazioni sperimentali, mentre il fotone e il gluone rimanevano privi di massa.

In modo sorprendente, le interazioni con il campo di Higgs fornivano anche un meccanismo teorico coerente per spiegare la massa dei fermioni. Ogni fermione interagisce con il campo di Higgs con una forza diversa (detta accoppiamento): più forte è l'interazione, maggiore è la massa della particella. Nel Modello Standard, questa interazione è nota come interazione di Yukawa. Dunque, il problema dell'origine della massa dei fermioni si riduce alla comprensione dell'origine della loro interazione con il campo di Higgs.

Oltre a offrire un metodo fondamentale per testare il meccanismo di Higgs, l'interazione del bosone di Higgs con le altre particelle è affascinante perché implica l'esistenza di una "quinta forza", mediata dallo scambio di bosoni di Higgs. A differenza delle altre forze del Modello Standard, la cui intensità dipende da una carica elementare (come la carica elettrica dell'elettrone per l'interazione elettromagnetica), questa nuova forza è più intensa per le particelle più pesanti.

Questa caratteristica la rende più simile alla gravità, ma con importanti differenze:

La forza mediata dal bosone di Higgs agisce solo su distanze molto brevi, mentre la gravità di Einstein si estende a tutte le scale. Il bosone di Higgs si accoppia solo alle particelle elementari del Modello Standard, mentre la gravità interagisce con la massa totale di un oggetto. Un grande enigma è che le interazioni deboli e di Higgs sono circa 10^{32} volte più forti dell'interazione gravitazionale. Il desiderio di spiegare questa enorme differenza, nota come problema della gerarchia, ha spinto i fisici a formulare diverse ipotesi teoriche.

Una possibilità è che il bosone di Higgs non sia una particella elementare, ma un oggetto composto da altre particelle ancora sconosciute. Altre teorie propongono nuove simmetrie dello spazio-tempo o dimensioni extra. Più recentemente, alcune idee speculative hanno ipotizzato un legame tra la scala delle interazioni deboli e l'evoluzione cosmologica, o la quantità di energia oscura nell'universo.

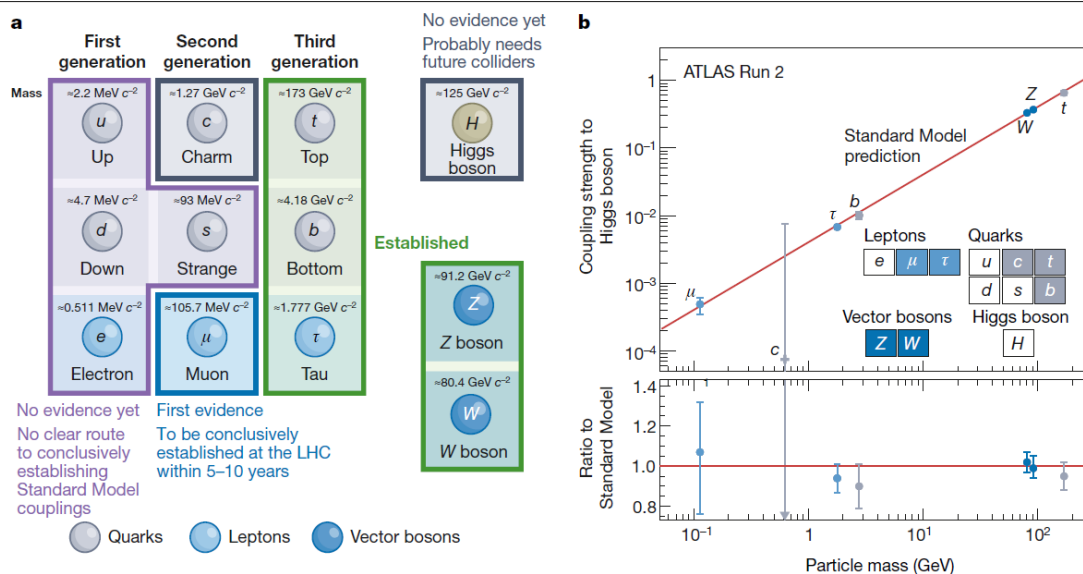


Fig. 3 | Status of our knowledge of Higgs interactions with known particles. **a**, Summary of which Higgs interactions have been conclusively established and future prospects. Photons and gluons are omitted because they are massless and do not interact directly with the Higgs field. Neutrinos are also omitted: their masses are very small relative to those of the other leptons shown, and not individually known. **b**, Plot of measured strength of interaction

of particles with the Higgs boson versus particle mass, as determined by the ATLAS Collaboration (adapted from ref.⁹⁶). The straight line shows the expected Standard Model behaviour, in which the interaction strength is proportional to the mass of the fermions (squared mass for W and Z bosons). The CMS Collaboration has similar results⁹⁷.

Conclusioni

La scoperta del bosone di Higgs all'LHC ha segnato l'inizio di una nuova era nella fisica delle particelle. Nei dodici anni successivi, l'esplorazione del campo di Higgs ha superato di gran lunga le aspettative iniziali, grazie a straordinari progressi sia sperimentali che teorici. Finora, ogni misurazione legata al bosone di Higgs è risultata coerente con il Modello Standard, il più semplice tra i modelli attuali della fisica delle particelle: un risultato straordinario a favore del *rasoio di Occam*. Oggi è chiaro che il meccanismo di Higgs, proposto per la prima volta negli anni '60, è responsabile non solo della massa dei bosoni W e Z , ma anche di quella dei tre fermioni più pesanti. Questo implica direttamente l'esistenza di una quinta forza, mediata dal bosone di Higgs.

Eppure, molte domande restano ancora aperte. Qualunque cosa emerga nei prossimi decenni, il nostro sapere ne uscirà arricchito: potremo ottenere prove decisive di aspetti ancora da confermare del Modello Standard, come la natura del potenziale di Higgs, oppure potremmo spalancare una finestra su nuovi orizzonti e sui grandi misteri dell'Universo.

Alla fine, il bosone di Higgs non è solo una particella: è una chiave per comprendere il funzionamento più profondo dell'Universo. La ricerca per trovarlo, misurarlo e comprenderlo dimostra la potenza della curiosità umana e fino a che punto gli scienziati siano disposti a spingersi per svelare i segreti del cosmo.

Risorse:

<https://home.cern/resources/video/cern/cern-and-rise-standard-model>

1. ATLAS Collaboration et al. *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*. Phys. Lett. B **716**, 1–29 (2012).
2. CMS Collaboration et al. *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*. Phys. Lett. B **716**, 30–61 (2012).
3. Higgs, P. W. *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*. Phys. Lett. **12**, 132–133 (1964).
4. Higgs, P. W. *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*. Phys. Rev. Lett. **13**, 508–509 (1964).
5. ATLAS Collaboration. *Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector*. Phys. Lett. B **784**, 173–191 (2018).
6. ATLAS Collaboration et al. *Measurements of WH and ZH production in the $H \rightarrow \beta\beta$ decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector*. Eur. Phys. J. C **81**, 178 (2021).
7. CMS Collaboration et al. *Observation of Higgs boson decay to bottom quarks*. Phys. Rev. Lett. **121**, 121801 (2018).
8. ATLAS Collaboration et al. *Measurements of Higgs boson production cross-sections in the $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ decay channel in pp collisions at $s=13\text{TeV}$ with the ATLAS detector*. Preprint at <https://arxiv.org/abs/2201.08269> (2022)
9. CMS Collaboration et al. *Measurement of the inclusive and differential Higgs boson production cross sections in the decay mode to a pair of τ leptons in pp collisions at $s=13\text{TeV}$* . Phys. Rev. Lett. **128**, 081805 (2022).
10. CMS Collaboration. *CMS technical design report, volume II: physics performance*. J. Phys. G **34**, 995–1579 (2007).
11. Guest, D., Cranmer, K. & Whiteson, D. *Deep learning and its application to LHC physics*. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **68**, 161–181 (2018).
12. Gao, J., Harland-Lang, L. & Rojo, J. *The structure of the proton in the LHC precision era*. Phys. Rep. **742**, 1–121 (2018).
13. Anastasiou, C., Duhr, C., Dulat, F., Herzog, F. & Mistlberger, B. *Higgs boson gluon-fusion production in QCD at three loops*. Phys. Rev. Lett. **114**, 212001 (2015).

Domande a risposta multipla

1. In quale anno la scoperta del bosone di Higgs è stata annunciata in maniera ufficiale?
A) 2008
B) 2012 ☒
C) 2015
D) 2020
2. Qual è il ruolo principale del bosone di Higgs nel Modello Standard della fisica delle particelle?
A) E' il mediatore dell'interazione elettromagnetica
B) Fornisce massa alle particelle fondamentali ☒
C) Rende stabili i nuclei atomici
D) Converte l'energia in materia
3. Per che cosa è usato principalmente il Large Hadron Collider (LHC)?
A) Per generare energia nucleare
B) Per studiare la formazione dei buchi neri
C) Per accelerare e far collidere particelle e studiare la fisica delle interazioni ☒
D) Per osservare galassie molto distanti
4. Dove si trova il CERN, il centro di ricerca in cui è stato scoperto il bosone di Higgs?
A) Stati Uniti
B) Al confine tra Svizzera e Francia ☒
C) Regno Unito
D) Germania

Titolo dell'unità didattica: 12 anni dalla scoperta del bosone di Higgs

Questa lezione offre agli studenti un'introduzione interattiva e coinvolgente alla fisica moderna delle particelle, collegando le reali scoperte scientifiche alle grandi domande sull'universo. 🚀

Obiettivi

Alla fine della lezione, gli studenti saranno in grado di:

- Spiegare cos'è il bosone di Higgs e perché la sua scoperta è stata importante.
- Comprendere il ruolo del bosone di Higgs nel Modello Standard della Fisica delle Particelle.
- Descrivere la funzione del Large Hadron Collider (LHC) e la sua connessione con la scoperta.
- Spiegare il ruolo del CERN nella ricerca in fisica fondamentale.
- Riflettere sull'impatto della scoperta del bosone di Higgs sulla fisica moderna.

Introduzione (10 min)

1. **Coinvolgi gli studenti-** chiedi alla classe:
 - " *Perché gli oggetti hanno massa?* "
 - " *Cosa sai del bosone di Higgs?* "
 - " *Hai mai sentito parlare del CERN o dell'LHC?* "
2. **Mostra un breve video (3-4 min)**
 - Mostra un **video introduttivo** sul bosone di Higgs (ad esempio dal sito del CERN o da qualche altra piattaforma educativa tipo SciShow or Veritasium).
3. **Contesto storico**
 - Spiega che nel **2012**, gli scienziati del CERN hanno scoperto il bosone di Higgs, confermando le previsioni teoriche degli anni '60.
 - Ricorda che il **2024** è stato il dodicesimo **anniversario** di questa scoperta.

Materiali necessari

- Proiettore o LIM
- Breve video clip (ad esempio dal sito del CERN o da YouTube)
- **Diagramma del Modello Standard** stampato
- Schede di lavoro con domande a risposta multipla e di discussione

Pennarelli e fogli grandi per il lavoro di gruppo

Metodi (15 min - Spiegazione e Discussione)

1. Il Modello Standard e il Bosone di Higgs

- Introduci il **Modello Standard** come il framework teorico per le particelle elementari note.
- Mostra il **diagramma** del Modello Standard ed evidenzia dove si inserisce il bosone di Higgs..
- Spiega che il **campo di Higgs field** è responsabile della massa delle particelle.

2. Il Large Hadron Collider (LHC) e il CERN

- Spiega come funziona l'**LHC**: un enorme acceleratore di particelle che fa scontrare protoni a velocità prossime a quelle della luce..
- Descrivi il **CERN**, il principale centro mondiale per la ricerca sulla fisica delle particelle, con sede in Svizzera e Francia..

3. Il significato della scoperta del bosone di Higgs:

- Ha confermato l'**esistenza del campo di Higgs**, che permette di spiegare **perché le particelle hanno massa**.
- Ha completato il **Modello Standard Model**, supportando decenni di previsioni teoriche.
- Ha creato nuovi problemi aperti in Fisica, come **la materia oscura e la Fisica oltre il Modello Standard**.

Attività di gruppo (15 min)

Sfida: "Progettiamo un acceleratore di particelle"

- **Obiettivo:** In gruppi di 3-4, gli studenti **progetteranno un nuovo esperimento** per studiare una particella sconosciuta, proprio come gli scienziati hanno progettato l'LHC per trovare il bosone di Higgs.
- **Istruzioni:**
 1. Scegliere una **particella misteriosa** (ad esempio, la materia oscura, i gravitoni, etc).
 2. Decidere come **riverlarla** usando un acceleratore di particelle.
 3. Abbozzare e presentare l'idea alla classe in **2 minuti per gruppo**.

Discussione e Riflessione (10 min)

- **E se il bosone di Higgs non fosse stato scoperto?**
 - Discuti di che cosa sarebbe accaduto se il bosone di Higgs non fosse stato rivelato al CERN.
 - Avremmo avuto bisogno di una nuova teoria della fisica?
- **Futuro della Fisica:**
 - Quale pensano gli studenti sarà la prossima grande scoperta **in Fisica**?

Valutazione e compiti per casa

- **Valutazione in classe:**
 - **Quiz** veloce (3-4 domande a risposta multipla).
 - Breve riflessione degli studenti: *" Cosa ti ha sorpreso di più della lezione di oggi?"*
- **Compito per casa:**
 - Ricerca una domanda ancora senza risposta in Fisica e scrivi una spiegazione del motivo per cui è importante.