

Le interazioni fondamentali della natura

Assemblea INFN - 04/02/2021



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



Theory and Phenomenology
of Fundamental Interactions

UNIVERSITY AND INFN · BOLOGNA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Tiziano Peraro
a rappresentanza del gruppo QFT@Colliders

Quantum Field Theory at Colliders

Membri del gruppo

- QFT@Colliders = “Teoria Quantistica dei Campi agli acceleratori”
- *Coordinatore nazionale*: Gian Paolo Vacca (Bologna)
- *Altri coordinatori locali*:
Alessandro Papa (Cosenza), Stefano Catani (Firenze),
Carlo Oleari (Milano), Carlo Carloni Calame (Pavia)
- INFN Sezione di Bologna
 - *Membri dello Staff*: Gian Paolo Vacca, Fabio Maltoni,
Gianluigi Alberghi, Tiziano Peraro
 - *Altri membri*: L. de la Cruz (postdoc), D. Massaro (PhD),
L. Pagani (PhD)

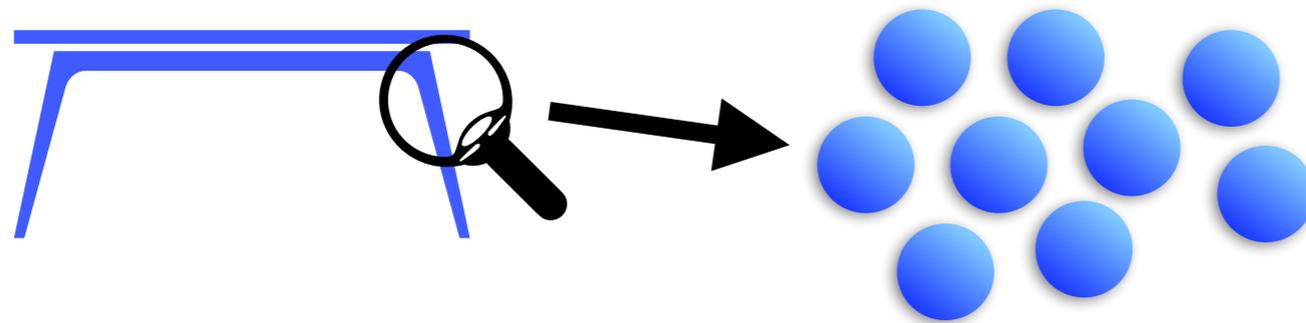
Quali sono le interazioni fondamentali?

**Cos'è la “Teoria Quantistica dei Campi”
(o “QFT”) e perché è importante?**

Perché agli acceleratori?

La realtà a livello fondamentale

- Un'idea antica, di Leucippo e Democrito (c.460–c.370 a.C.)



Possiamo decomporre tutto in
“**costituenti fondamentali**”

Cosa sono questi **costituenti fondamentali**?
Come **interagiscono** tra loro?

It took a **long time** to find out!!!

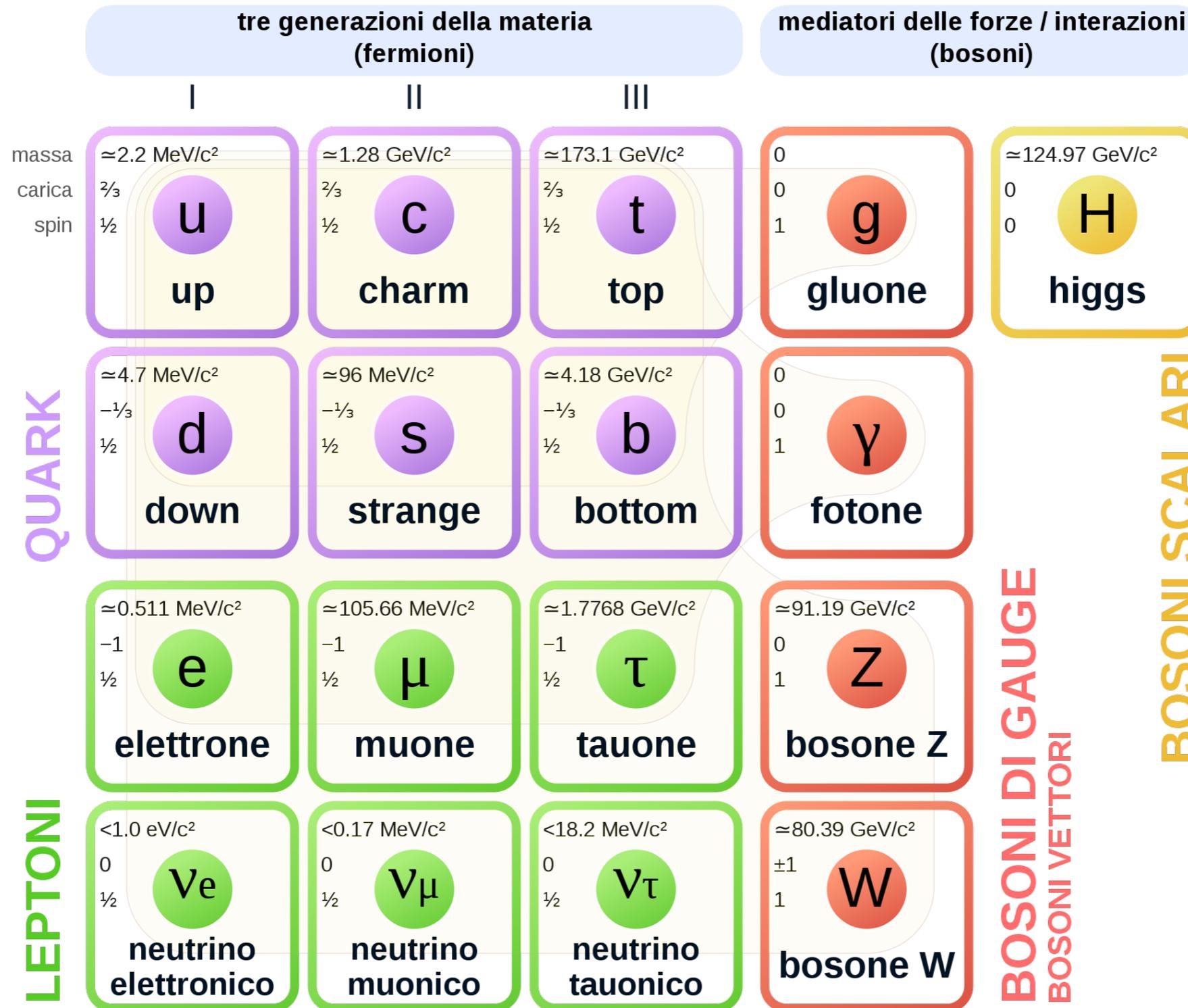
- In 2021

- costituenti → **particelle elementari**
- interazioni → **interazioni fondamentali**

Questo è descritto con la
Teoria Quantistica dei Campi

Il Modello Standard delle particelle elementari

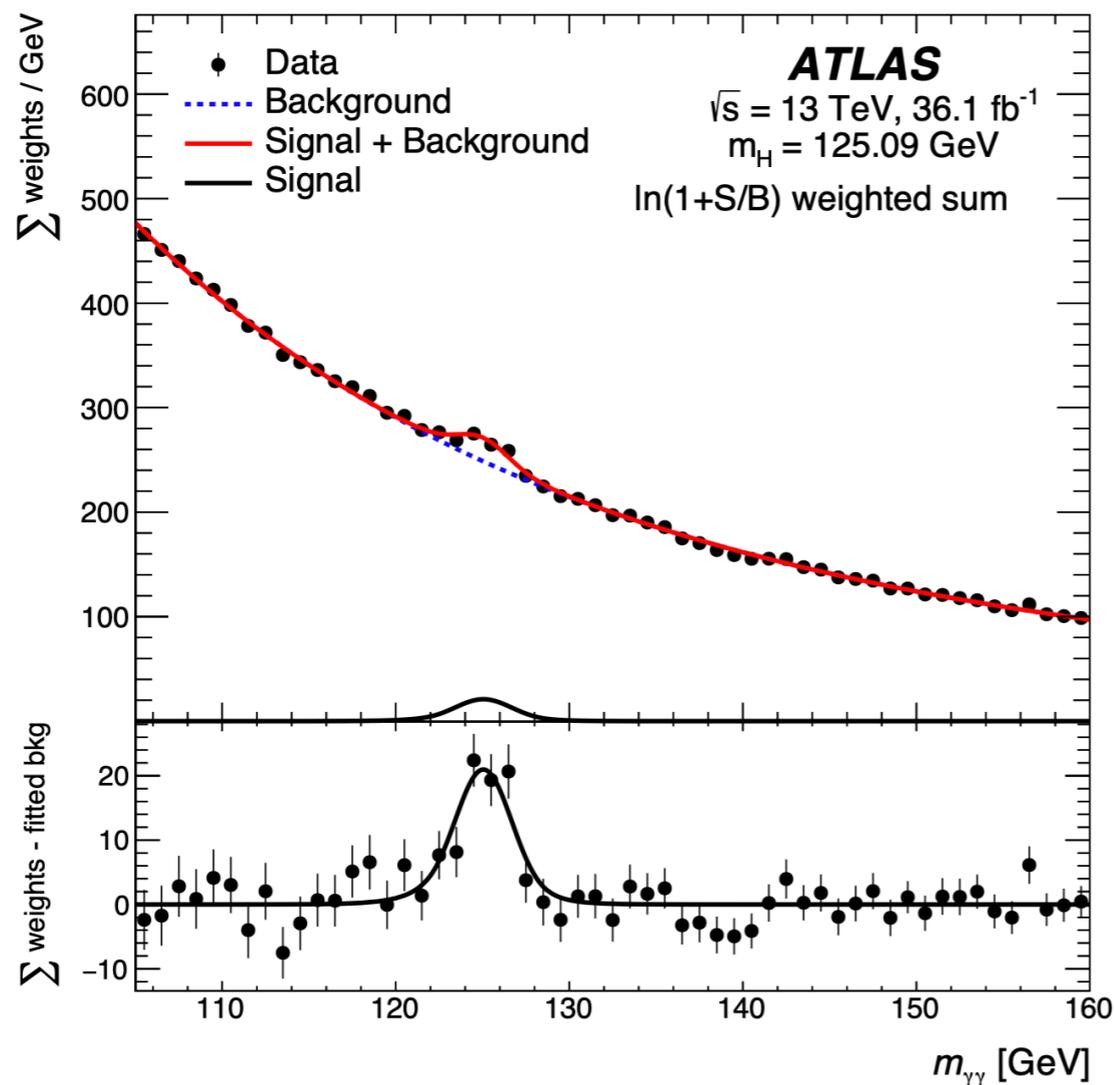
Una Teoria Quantistica dei Campi delle particelle e le interazioni osservate



Il bosone di Higgs

L'ultima particella elementare scoperta

Scoperta dagli esperimenti **ATLAS** e **CMS** al CERN nel 2012. Sotto un segnale nel canale di decadimento in due fotoni, da ATLAS.

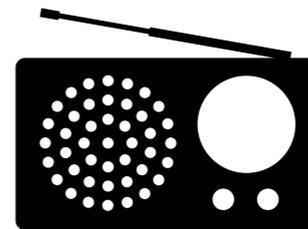
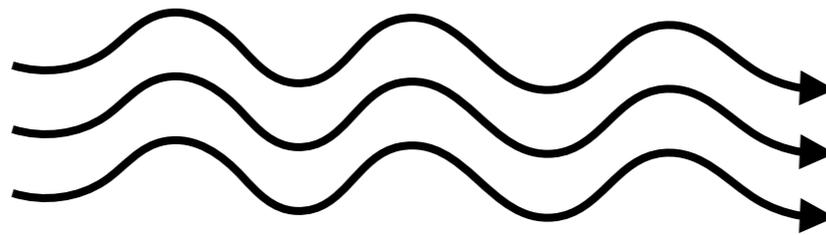


Scoperto
all'**acceleratore LHC**

Il grafico mostra
chiaramente un segnale,
ma abbiamo bisogno di
una **teoria** per capire
che cosa è!

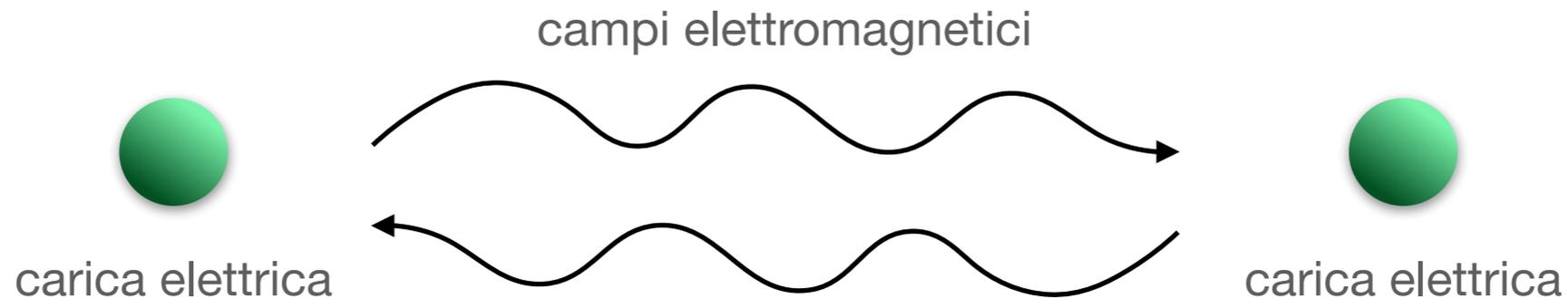
La teoria: cosa sono i “campi”?

- Possono essere ovunque nello spazio
- Sono più forti/deboli a seconda di dove/quando li osserviamo
- Possono trasportare informazione, energia e altro...



Campi e interazioni

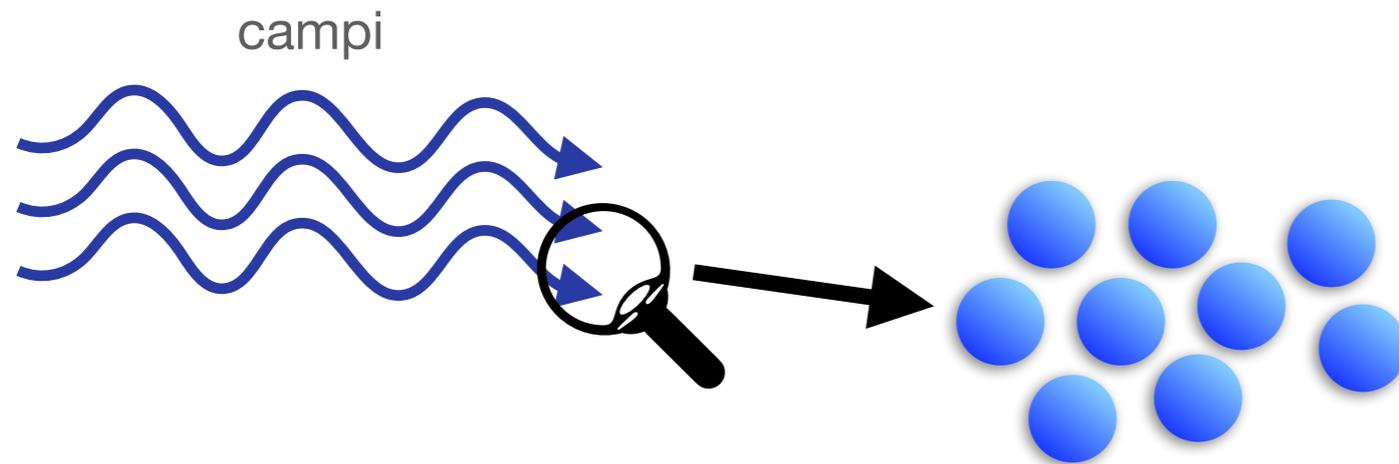
Esempio: interazioni elettromagnetiche



Le cariche elettriche “sanno” l’una dell’altra scambiandosi campi elettromagnetici e “reagendo” ad essi.

Anche la luce è un campo elettromagnetico che interagisce con cariche presenti intorno a noi e nei nostri occhi.

QFT = Campi + Meccanica Quantistica



I campi sono composti da piccoli “pacchetti” chiamati **quanti**

I **quanti** dei campi fondamentali sono **particelle elementari**

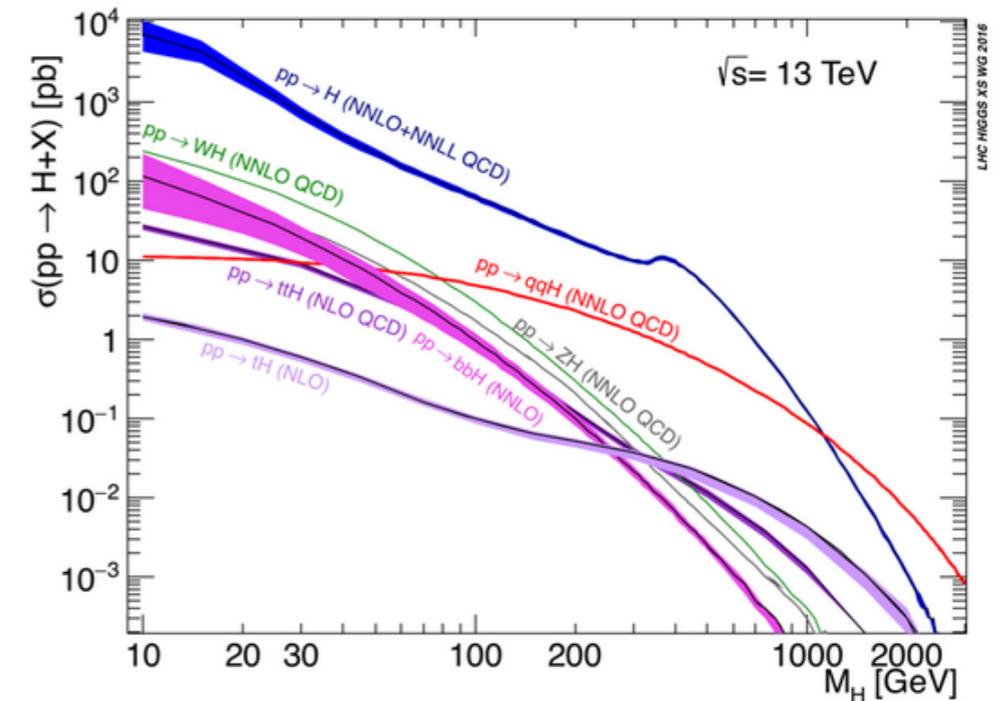
Tutte le particelle elementari sono quanti di campi

- i **fotoni** sono i quanti del **campo elettromagnetico**
- gli **elettroni** sono i quanti del **campo elettronico**
- i **bosoni di Higgs** sono quanti del **campo di Higgs**

Nessuna distinzione tra campi e materia!

QFT@Colliders

- La QFT permette di fare previsioni quantitative e accurate per esperimenti
- È il nostro strumento principale per spiegare ciò che vediamo e guidare la ricerca di cose nuove
- Previsioni accurate sono essenziali per vedere segnali di fisica nuova o interessante



- teoria delle **perturbazioni** = “lavora di più per essere più accurato”

- NN...LO = Next-to-Next-to...Leading Order in una “piccola” costante di accoppiamento α

$$\sigma = \sigma_{LO} + \alpha \sigma_{NLO} + \alpha^2 \sigma_{NNLO} + \dots$$

facile ma solo
una stima

più accurato
(~10% incert.) ma più difficile

molto più accurato
(~0(1%) incert.) ma molto difficile
comparabile con incertezza
sperimentale

QFT@Collider

Fisica di precisione per accedere a nuova fisica

Testare quello che sappiamo (o crediamo di sapere) il più possibile, per cercare qualcosa di nuovo e rispondere a domande ancora aperte.

Gravità + Meccanica
Quantistica?

Cosa succede a
energie più alte?

e molte altre...

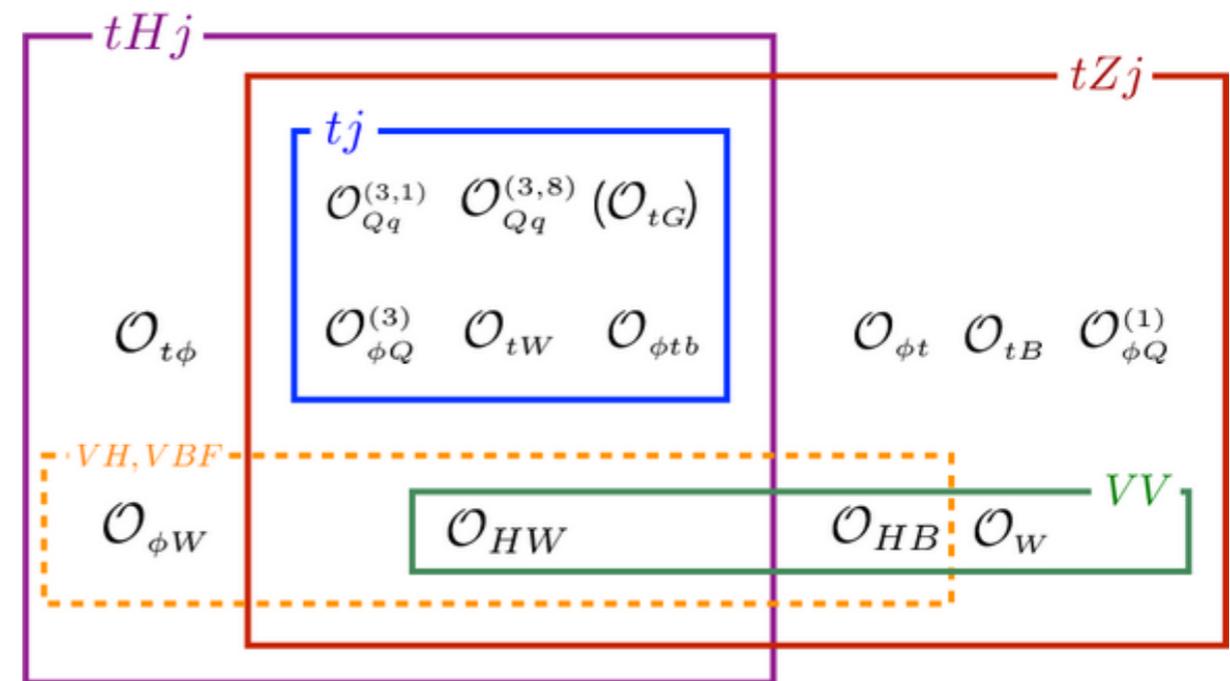
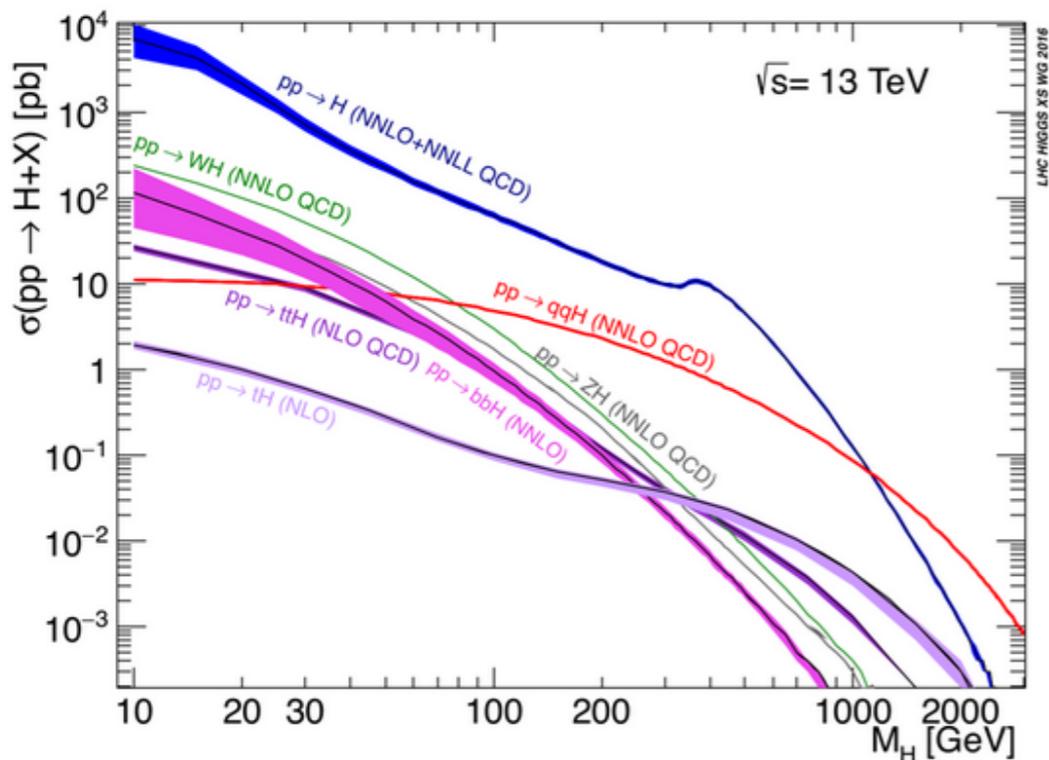
Interazioni non viste nel MS

Cosa sono materia e
energia oscura?

Asimmetria materia/
antimateria?

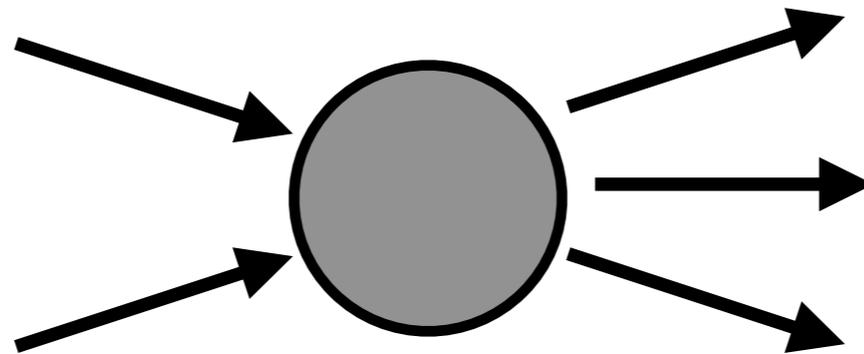
Attività di ricerca a Bologna

- Calcoli di precisione nel Modello Standard
- Teorie di Campo Efficaci (Effective Field Theories)
- Acceleratori futuri
- QCD (interazione forte) ad alte energie



Esempio: ampiezze di diffusione

- **Ampiezze** legate a **probabilità di interazione** tra particelle



- QFT ci dice come calcolarle
 - vorremmo accuratezza NNLO
 - molte sfide teoriche, computazionali e matematiche

Ampiezze di diffusione

Difficoltà e tecniche all'avanguardia

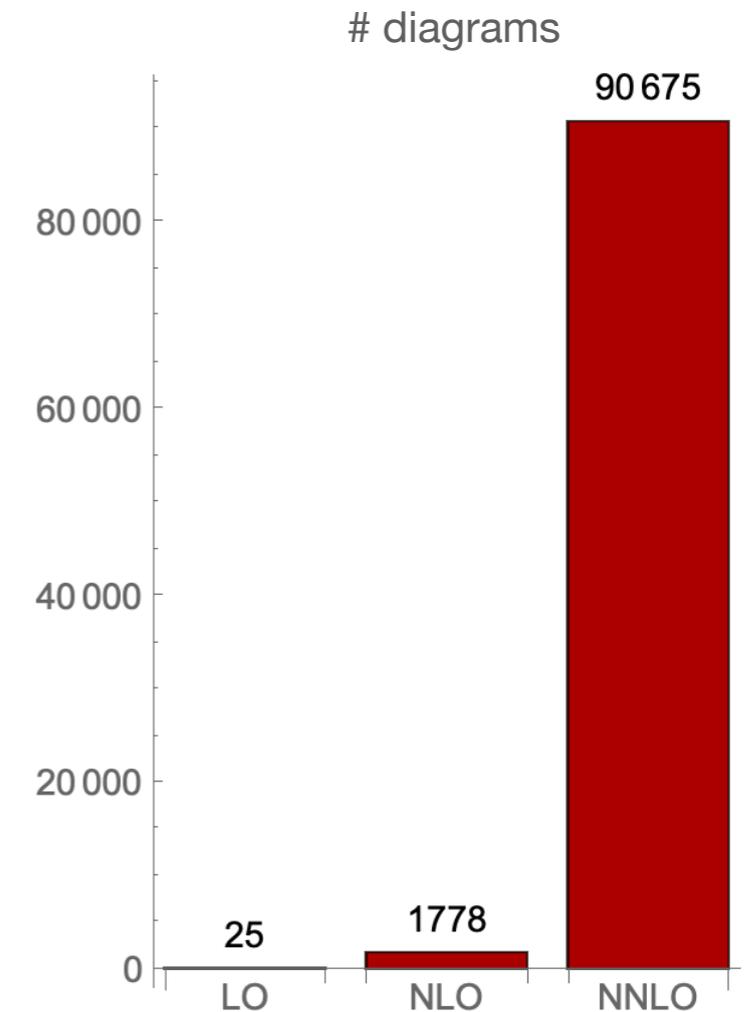
- Complessità algebriche
 - cercare e sfruttare proprietà nascoste della teoria
 - calcoli in parallelo
 - nuove tecniche computazionali (campi finiti, ricostr. funzionale)
- Calcolare integrali
 - studio di funzioni speciali
 - equazioni differenziali
 - tecniche di integrazione analitiche/numeriche

$$\int \left(\prod_j d^D k_j \right) \frac{N(k_j)}{\prod_j D_j(k_j)}$$

Esempio: ampiezze a 5 gluoni

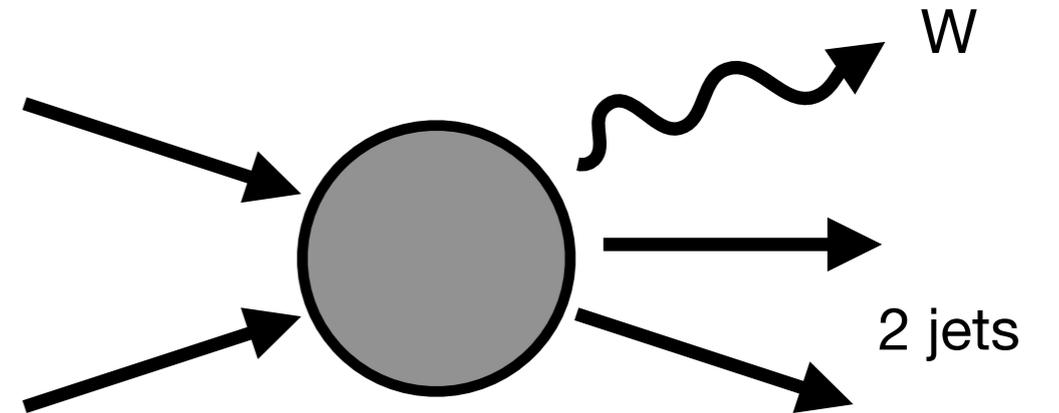
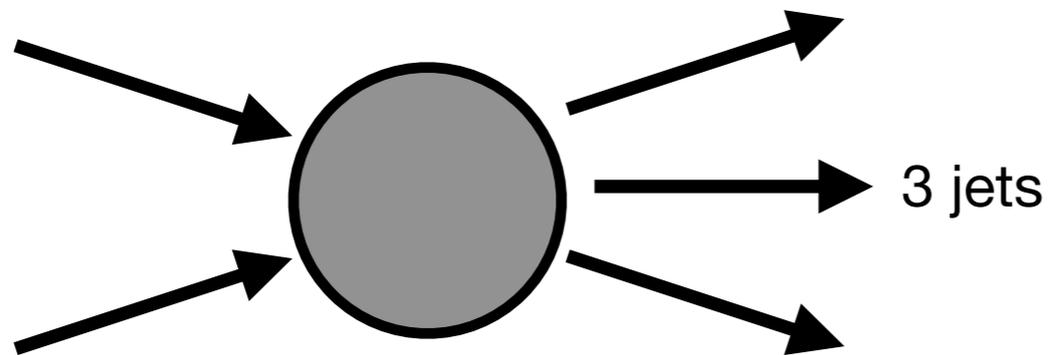
Badger, Brønnum-Hansen, Hartanto, T.P. [2017-2020]

- Complessità (1 diagramma = 1 contributo)
 - LO: funzione razionale, 25 diagrammi
 - NLO: 1 778 diagrammi, 5 variabili d'integrazione
 - NNLO: 90 675 diagrammi, 11 var. d'integrazione
- AI NNLO
 - relazioni tra integrali $\mathcal{O}(10^7)$ equazioni e incognite, con 5 parametri liberi
 - risolto numericamente e ricostruito analiticamente con tecniche di campo finito [T.P. \(2016,2019\)](#)

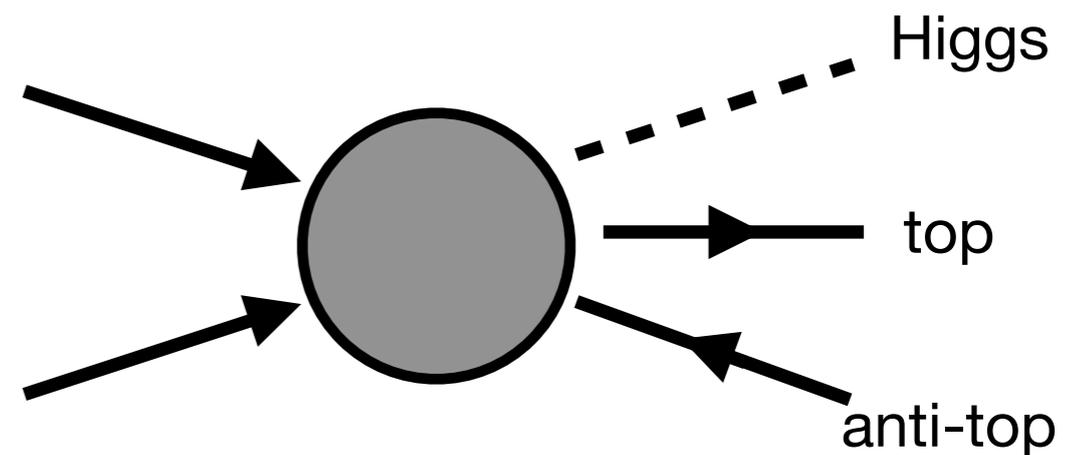
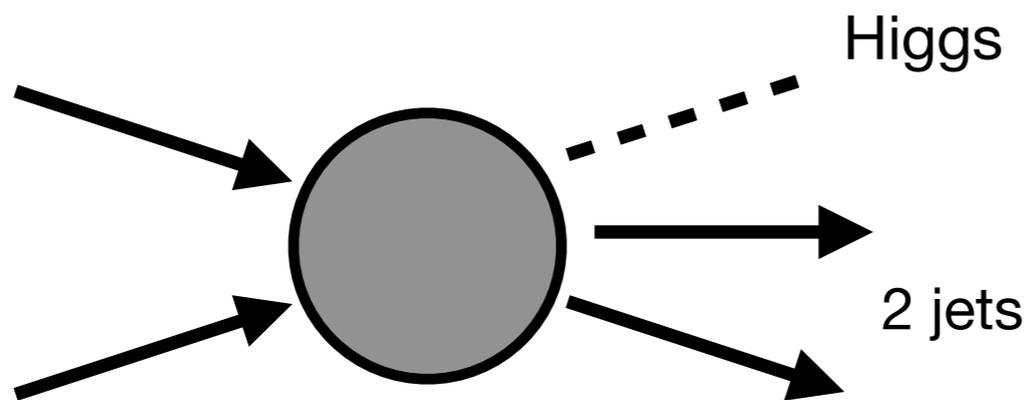


Ampiezze di diffusione

- Alcuni risultati recenti @ NNLO



- Alcuni piani futuri @ NNLO



Conclusioni

- Sia **teoria** che **esperimenti** sono essenziali per studiare la natura
- I campi sono responsabili sia di materia e interazioni
- La **Teoria Quantistica dei Campi** descrive **particelle** elementari e **interazioni** fondamentali sondate in **esperimenti ad acceleratori**
- Un grande progresso recente nelle nostre capacità teoriche e sperimentali...
- ...ma molte sfide e domande ancora aperte!

Grazie!