

Fisica agli Acceleratori: Misure di Modello Standard e Ricerche di Nuova Fisica

Maurizio Martinelli

University of Milano Bicocca and INFN

Presentazione Tesi Triennali
U9-03, 14.03.2023

Il Modello Standard (in a nutshell)

Particelle Elementari

tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)		
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

QUARK

LEPTONI

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

BOSONI SCALARI

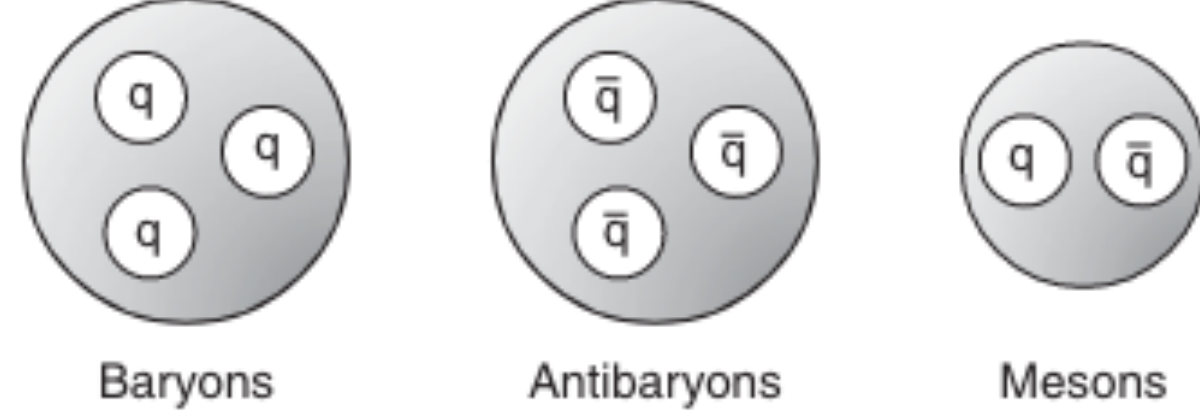


Fig. 1.9 The three types of observed hadronic states.
© Thomson, Modern Particle Physics (2013)

Interazioni tra Particelle

Diagrammi di Feynman

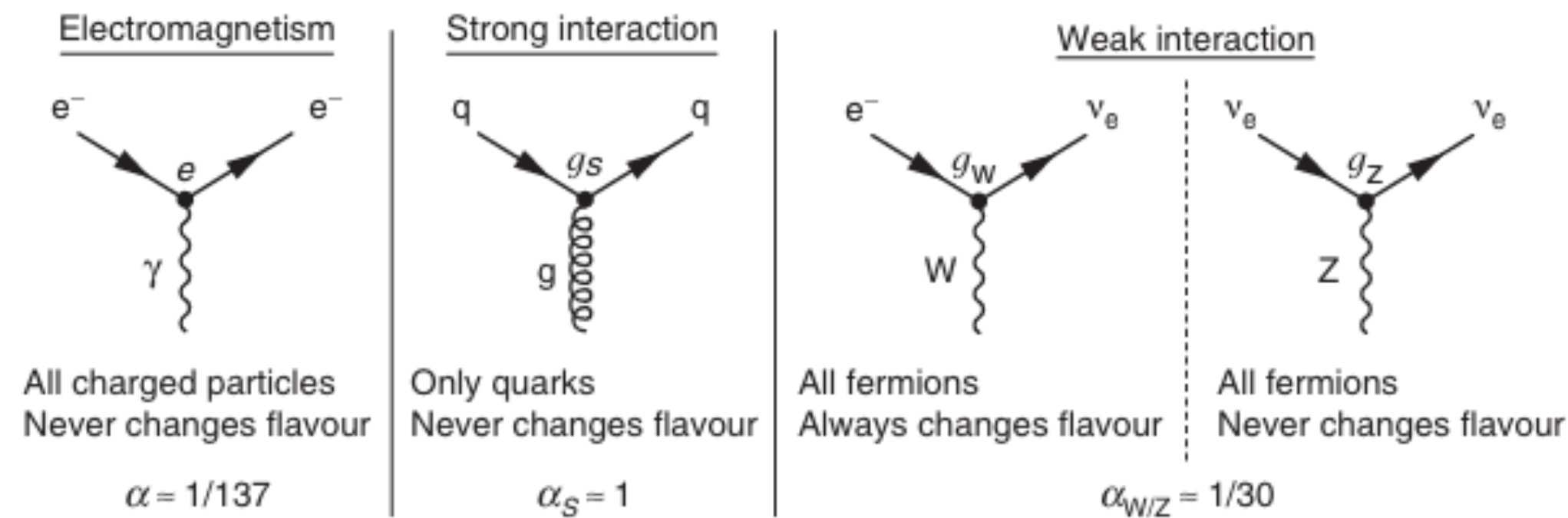


Fig. 1.4 The Standard Model interaction vertices.

charge. In the case of the leptons, by definition, the weak interaction couples a charged lepton with its corresponding neutrino,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

For the quarks, the weak interaction couples together all possible combinations differing by one unit of charge,

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

© Thomson, Modern Particle Physics (2013)

	tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)	
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARK	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
LEPTONI	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

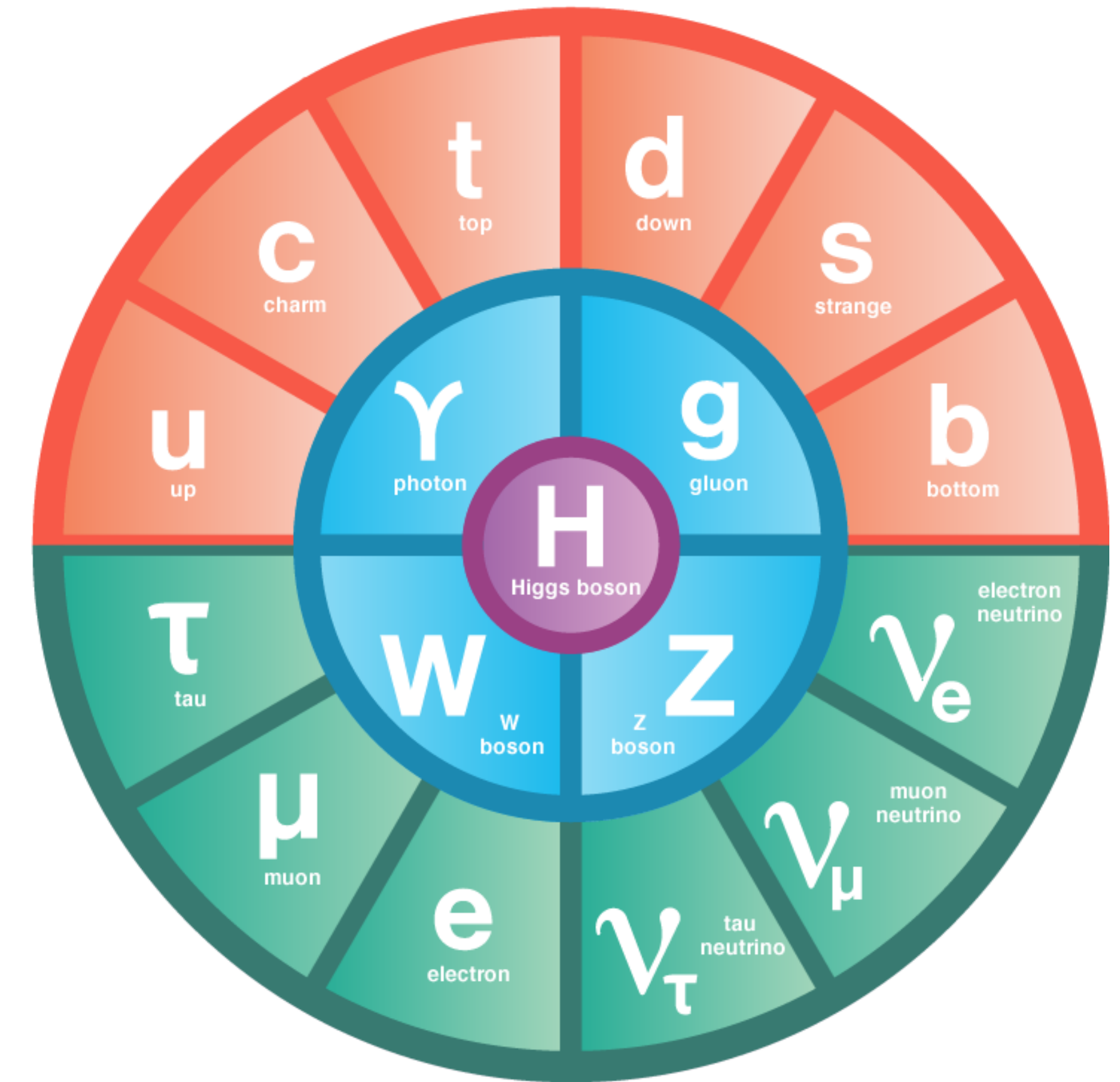
BOSONI SCALARI

Cosa si chiede un Fisico delle Particelle?

Perché studiare Fisica delle Particelle

Rispondere a queste domande

- Quali sono le leggi della Natura, i suoi costituenti fondamentali (*particelle elementari*) e le interazioni tra essi (*forze*)?
Modello Standard fornisce un'eccellente apparato teorico per spiegare le nostre osservazioni ma lascia alcune questioni insolute



Perché studiare Fisica delle Particelle

Rispondere a queste domande

- Quali sono le leggi della Natura, i suoi costituenti fondamentali (*particelle elementari*) e le interazioni tra essi (*forze*)?
Modello Standard fornisce un'eccellente apparato teorico per spiegare le nostre osservazioni ma lascia alcune questioni insolute
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
 Bosone di *Higgs* solo un tassello. Perché la differenza di scala tra le tre generazioni? Perché i neutrini hanno massa $<10^{-5}m_e$?

Table 1.1 The twelve fundamental fermions divided into quarks and leptons. The masses of the quarks are the current masses.

	Leptons				Quarks		
	Particle	Q	mass/GeV	Particle	Q	mass/GeV	
First generation	electron (e^-)	-1	0.0005	down (d)	-1/3	0.003	
	neutrino (ν_e)	0	$< 10^{-9}$	up (u)	+2/3	0.005	
Second generation	muon (μ^-)	-1	0.106	strange (s)	-1/3	0.1	
	neutrino (ν_μ)	0	$< 10^{-9}$	charm (c)	+2/3	1.3	
Third generation	tau (τ^-)	-1	1.78	bottom (b)	-1/3	4.5	
	neutrino (ν_τ)	0	$< 10^{-9}$	top (t)	+2/3	174	

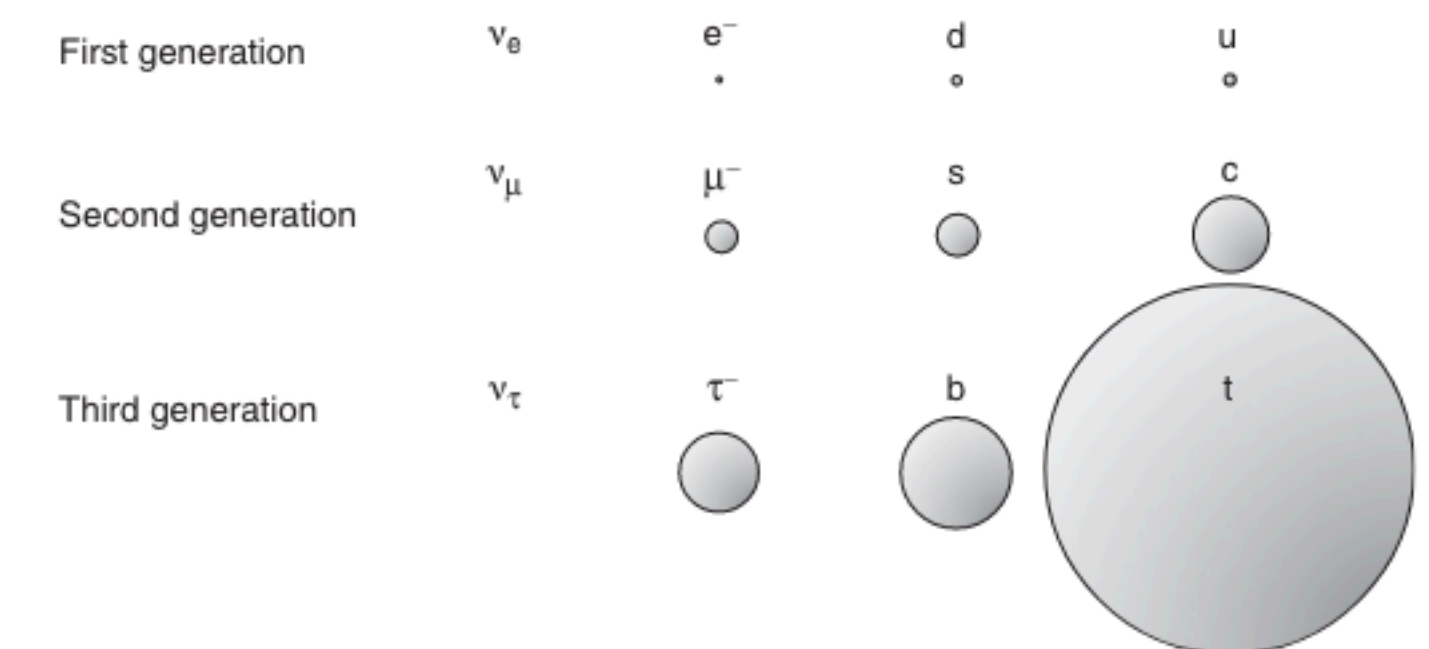


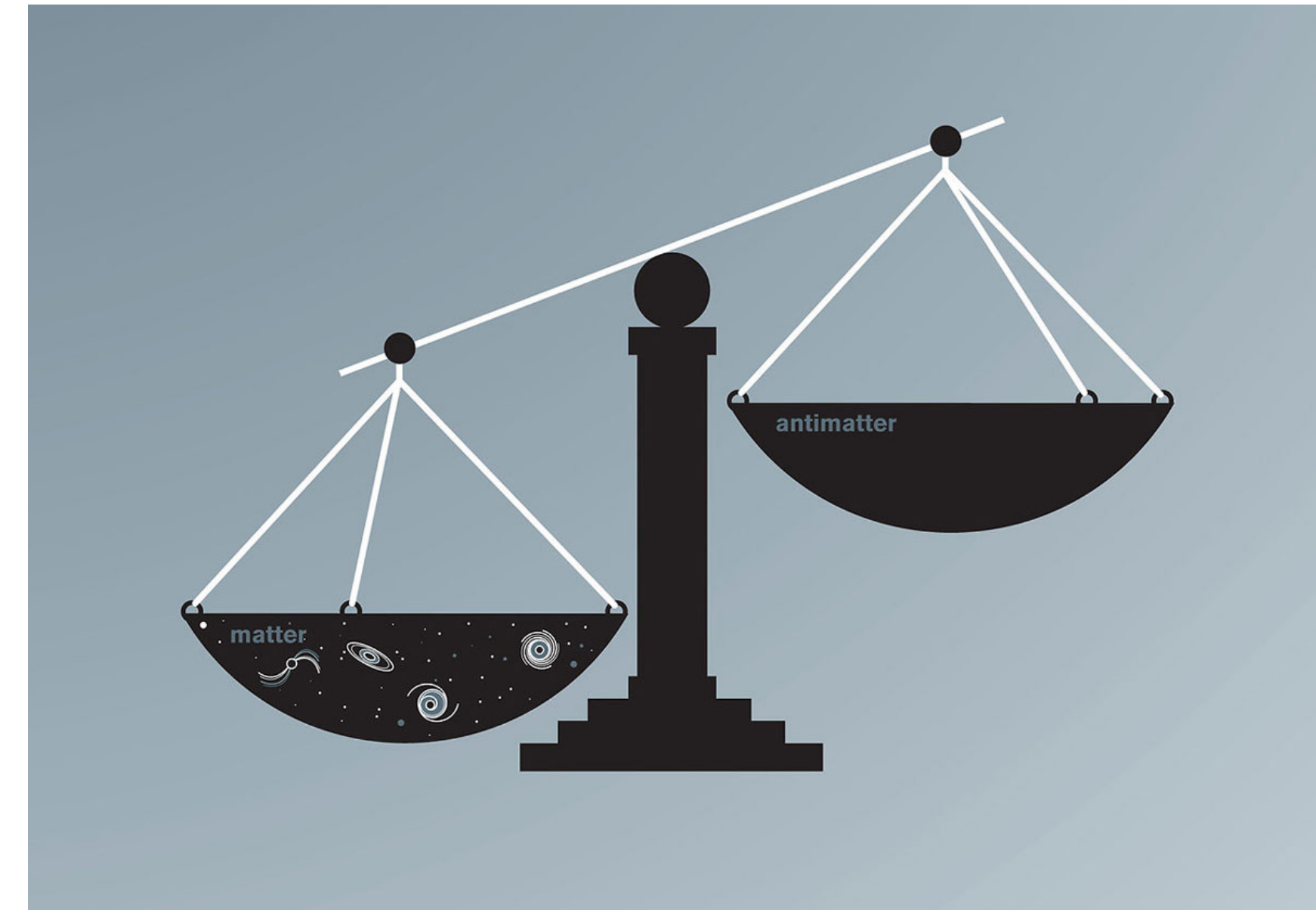
Fig. 1.2 The particles in the three generations of fundamental fermions with the masses indicated by imagined spherical volumes of constant density. In reality, fundamental particles are believed to be point-like.

© Thomson, *Modern Particle Physics* (2013)

Perché studiare Fisica delle Particelle

Rispondere a queste domande

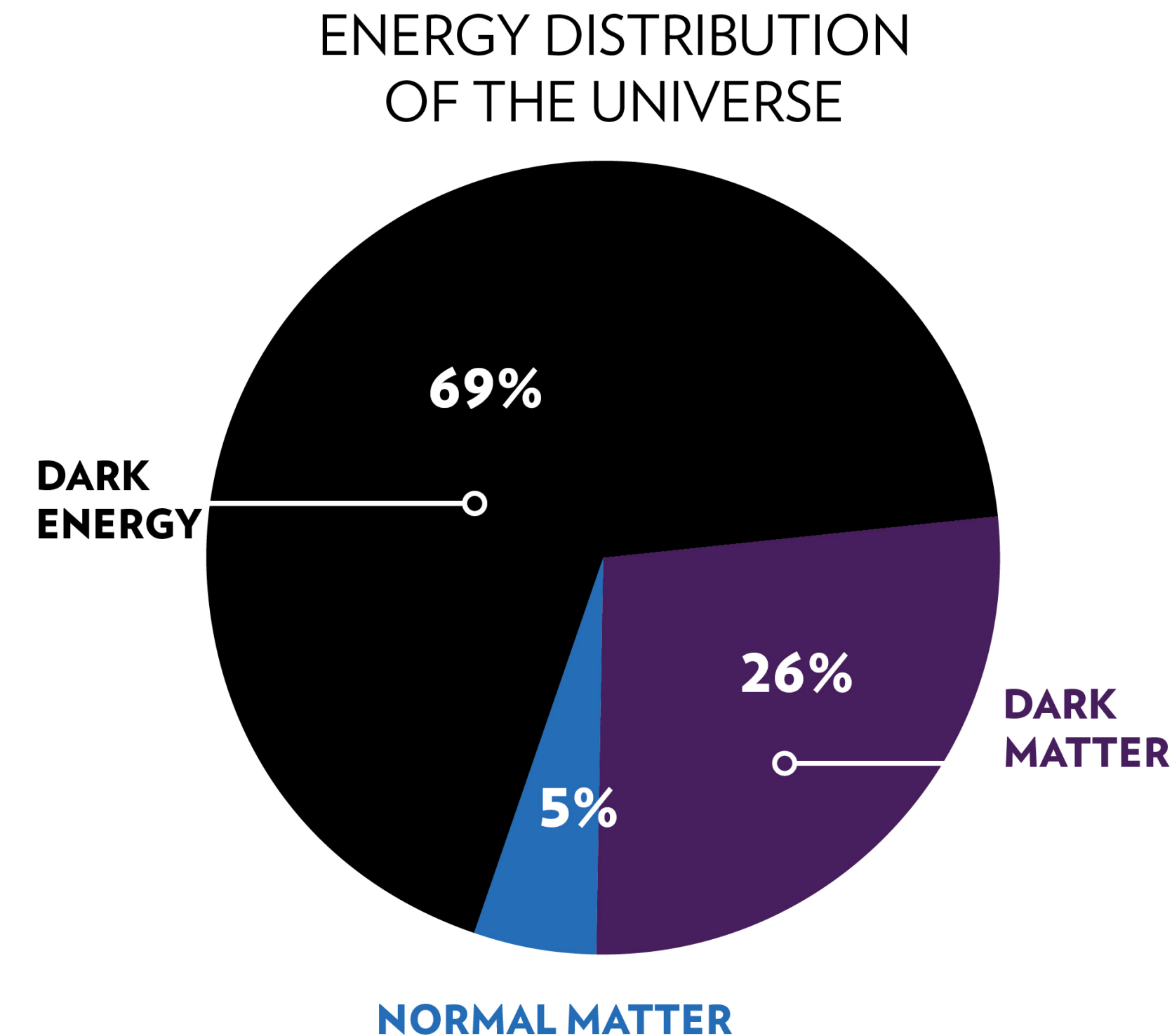
- Quali sono le leggi della Natura, i suoi costituenti fondamentali (*particelle elementari*) e le interazioni tra essi (*forze*)?
Modello Standard fornisce un'eccellente apparato teorico per spiegare le nostre osservazioni ma lascia alcune questioni insolute
- Qual è l'origine della massa delle particelle?
Bosone di *Higgs* solo un tassello. Perché la differenza di scala tra le tre generazioni? Perché i neutrini hanno massa $<10^{-5}m_e$?
- Dove è finita tutta l'antimateria?
Esiste un processo, la *violazione di CP*, nel Modello Standard che descrive l'asimmetria tra materia e antimateria, ma non è abbastanza



Perché studiare Fisica delle Particelle

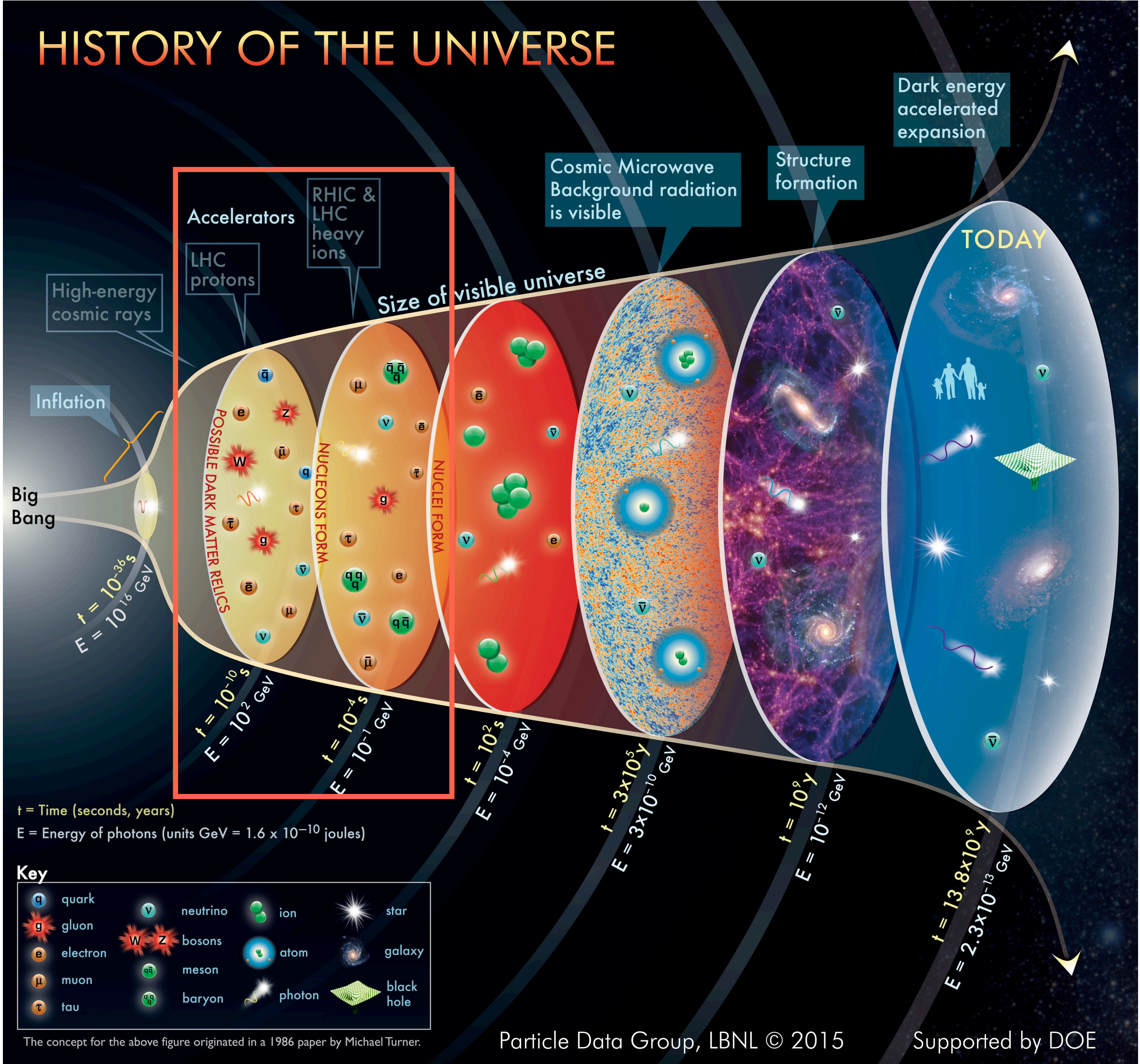
Rispondere a queste domande

- **Quali sono le leggi della Natura, i suoi costituenti fondamentali (*particelle elementari*) e le interazioni tra essi (*forze*)?**
Modello Standard fornisce un'eccellente apparato teorico per spiegare le nostre osservazioni ma lascia alcune questioni insolute
- **Qual è l'origine della massa delle particelle?**
Bosone di *Higgs* solo un tassello. Perché la differenza di scala tra le tre generazioni? Perché i neutrini hanno massa $<10^{-5}m_e$?
- **Dove è finita tutta l'antimateria?**
Esiste un processo, la *violazione di CP*, nel Modello Standard che descrive l'asimmetria tra materia e antimateria, ma non è abbastanza
- **Cos'è la materia oscura? Riusciremo ad osservarla?**

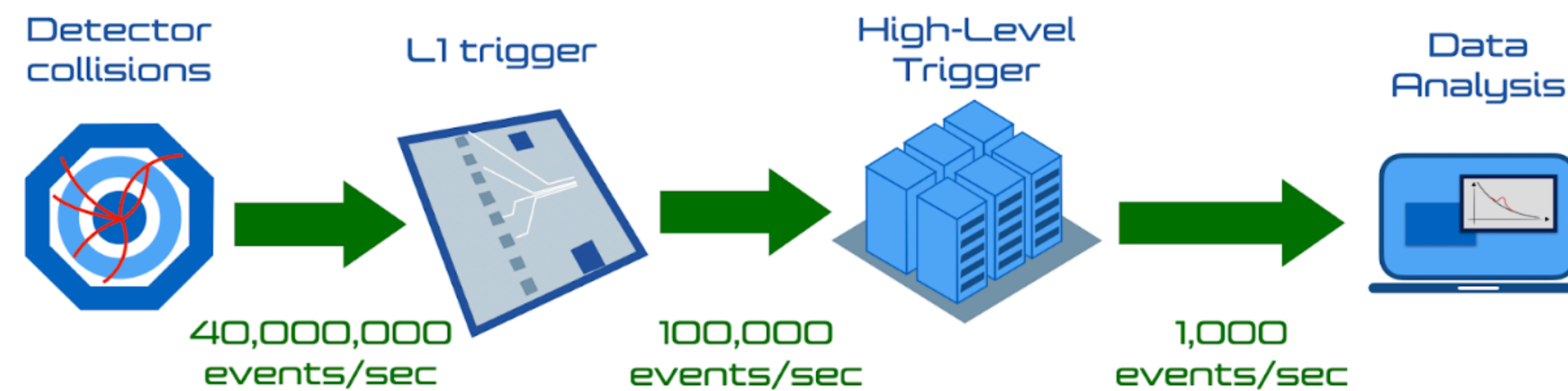
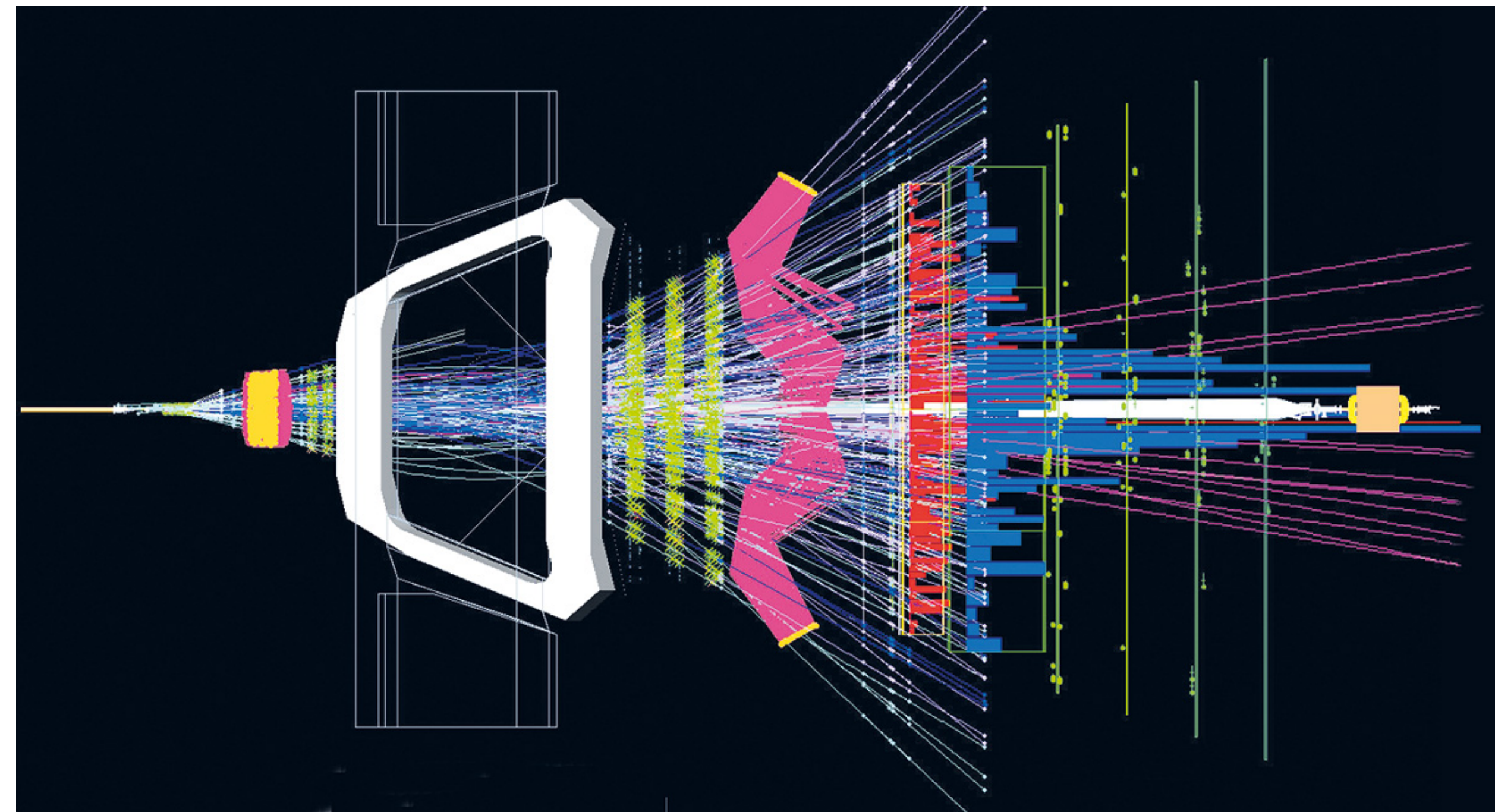
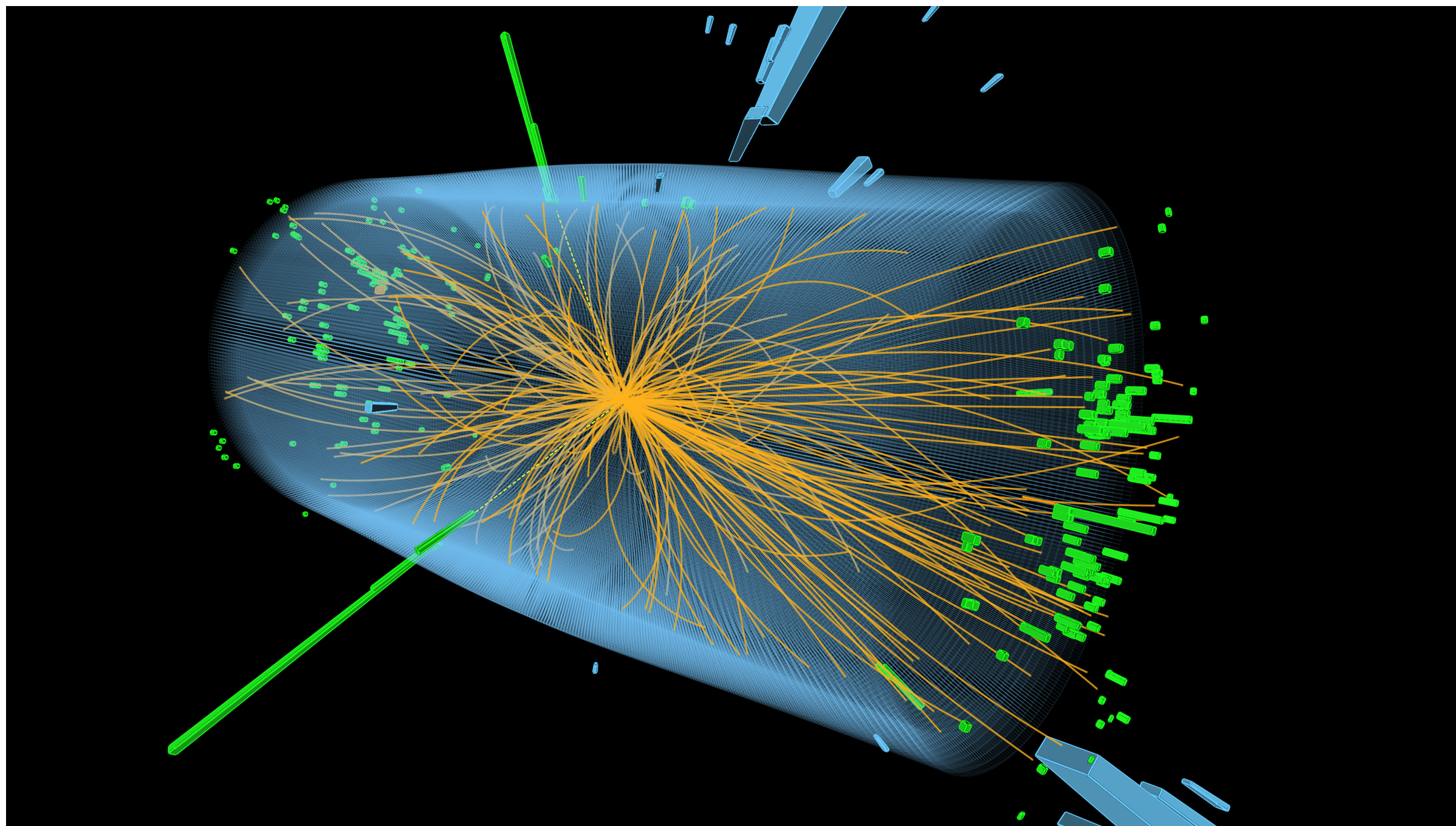


Che strumenti utilizza?

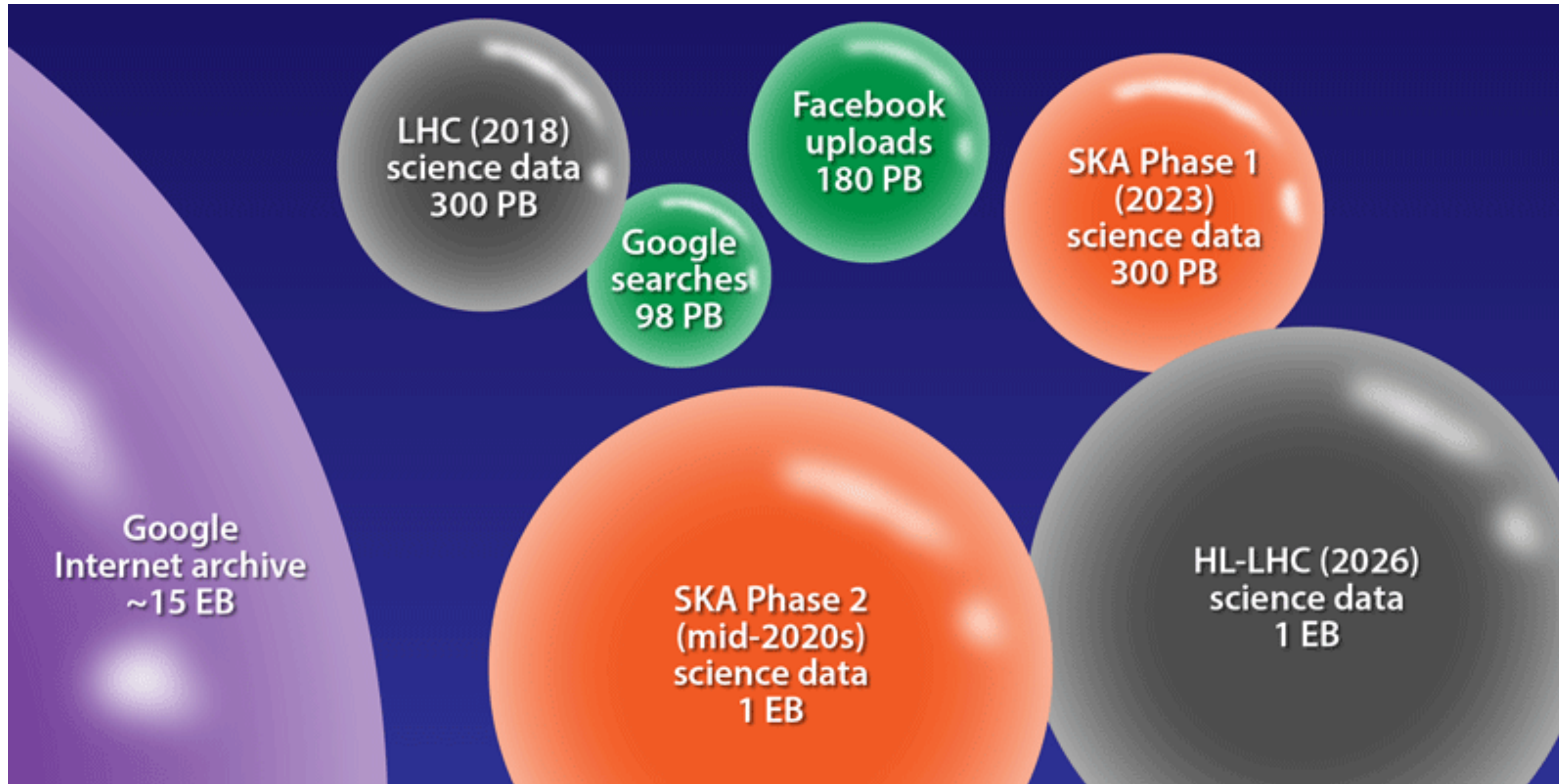
LHC come una macchina del tempo



Rivelatori come fotocamere sul passato



Dataset LHC



Analisi in HEP

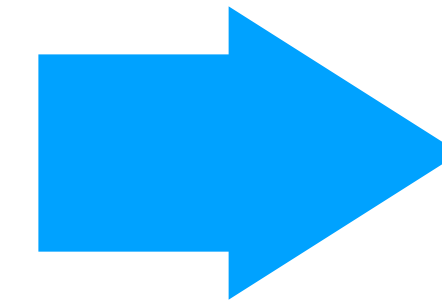
Tipicamente un'analisi completa richiede

- Una selezione di trigger (online - presa dati)
- Una selezione più raffinata (offline - pc+grid)
- Individuazione del segnale e misura delle osservabili di interesse
- Stima delle incertezze casuali e sistematiche
- Scrittura di una nota interna all'esperimento
- Revisione da parte di un comitato di colleghi nell'esperimento
- Scrittura di un draft da sottomettere al giornale
- Revisione interna
- Sottomissione al giornale
- Revisione da esperti anonimi
- Pubblicazione

Analisi in HEP

Tipicamente un'analisi completa richiede

- Una selezione di trigger (online - presa dati)
- Una selezione più raffinata (offline - pc+grid)
- Individuazione del segnale e misura delle osservabili di interesse
- **Stima delle incertezze casuali e sistematiche**
- Scrittura di una nota interna all'esperimento
- Revisione da parte di un comitato di colleghi nell'esperimento
- Scrittura di un draft da sottomettere al giornale
- Revisione interna
- Sottomissione al giornale
- Revisione da esperti anonimi
- Pubblicazione



Proposte di Tesi

Proposte di Tesi Triennali in Fisica delle Particelle

Proposte di Tesi Triennali



Studio del Bosone di Higgs e Misure Elettrodeboli

- Ricerca di Produzione Doppio Higgs 
- Vector Boson Scattering 

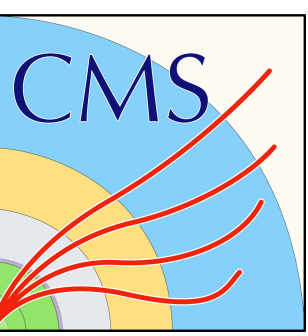
Asimmetria Materia-Antimateria

- Studio dei decadimenti $D^0 \rightarrow K^0_S \pi^+ \pi^-$ 

Test del Modello Standard

- Misura dell'elemento di matrice CKM V_{ub} in $B^0_s \rightarrow K \mu \nu$ 
- Analisi angolare di $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ 

Ricerca di eventi $HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$



Tema

- Ricerca di eventi con produzione di coppie di Bosoni di Higgs che decadono rispettivamente in $H \rightarrow b\bar{b}$ e $H \rightarrow \tau^+\tau^-$
- Meccanismi di produzione
 - Gluon Fusion
 - Vector Boson Fusion
 - Risonanze sconosciute

Motivazione

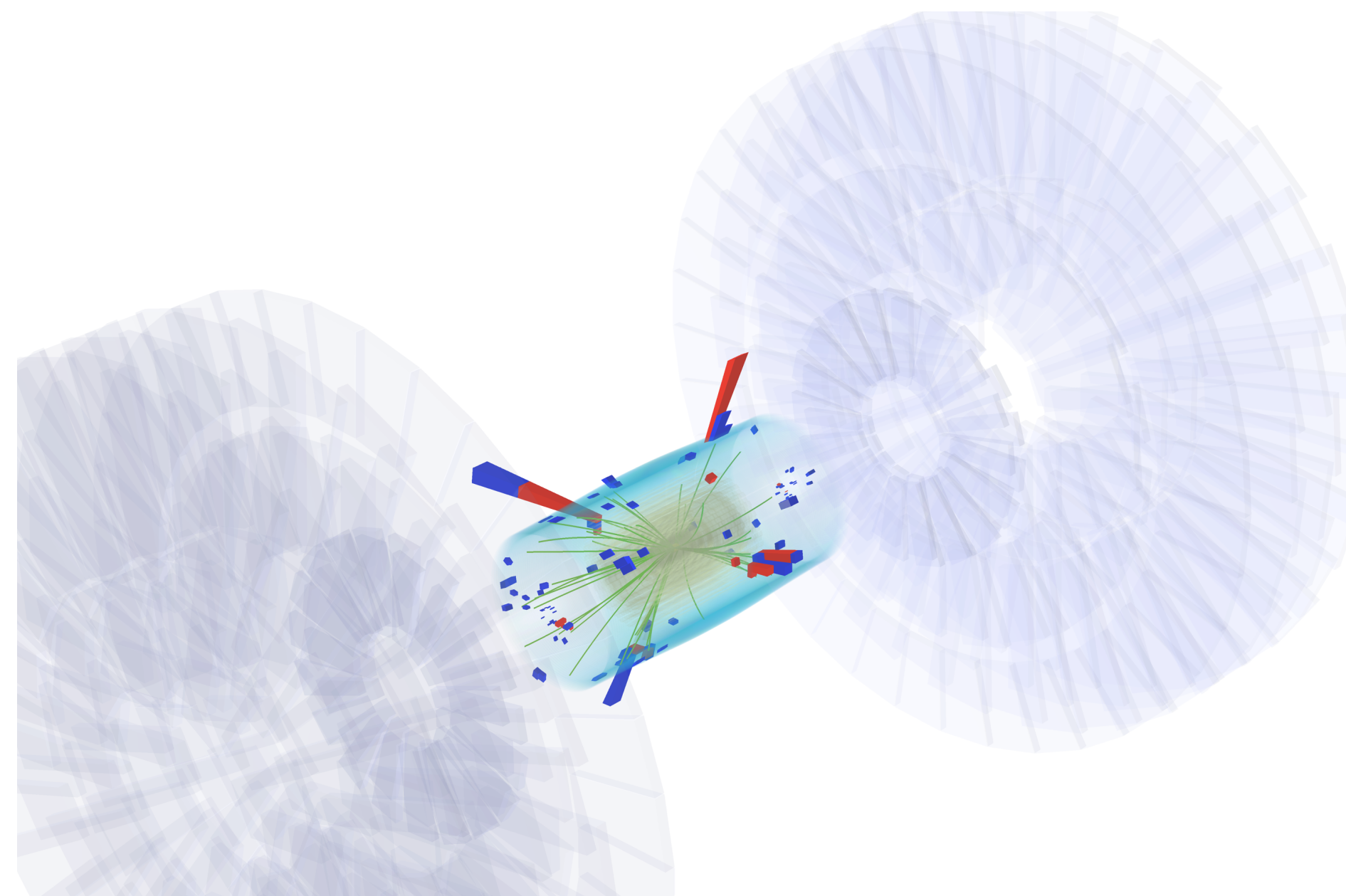
- Misura di uno dei tasselli mancanti del Modello Standard
- Portale di accesso a Nuova Fisica

Tecniche di Analisi

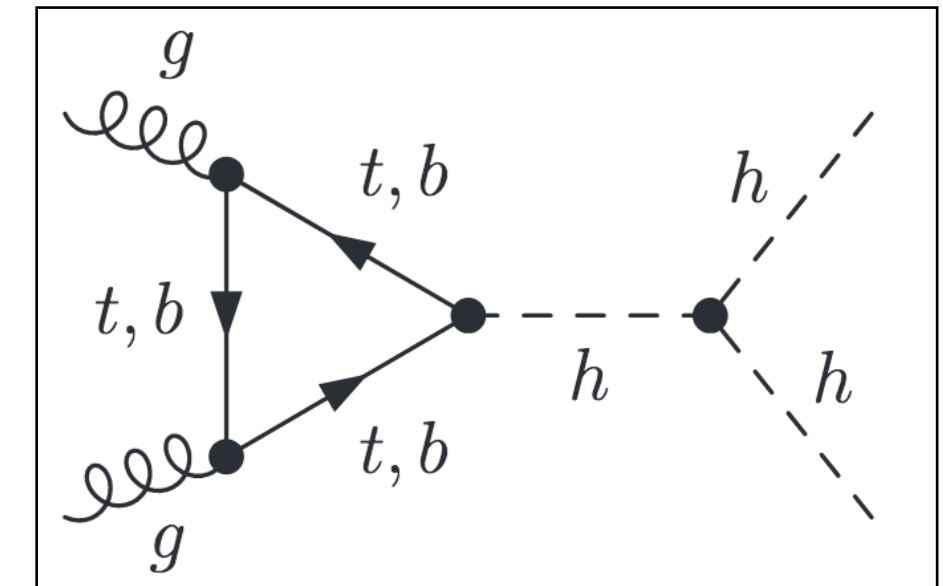
Deep Neural Network

Efficienza trigger: Machine Learning

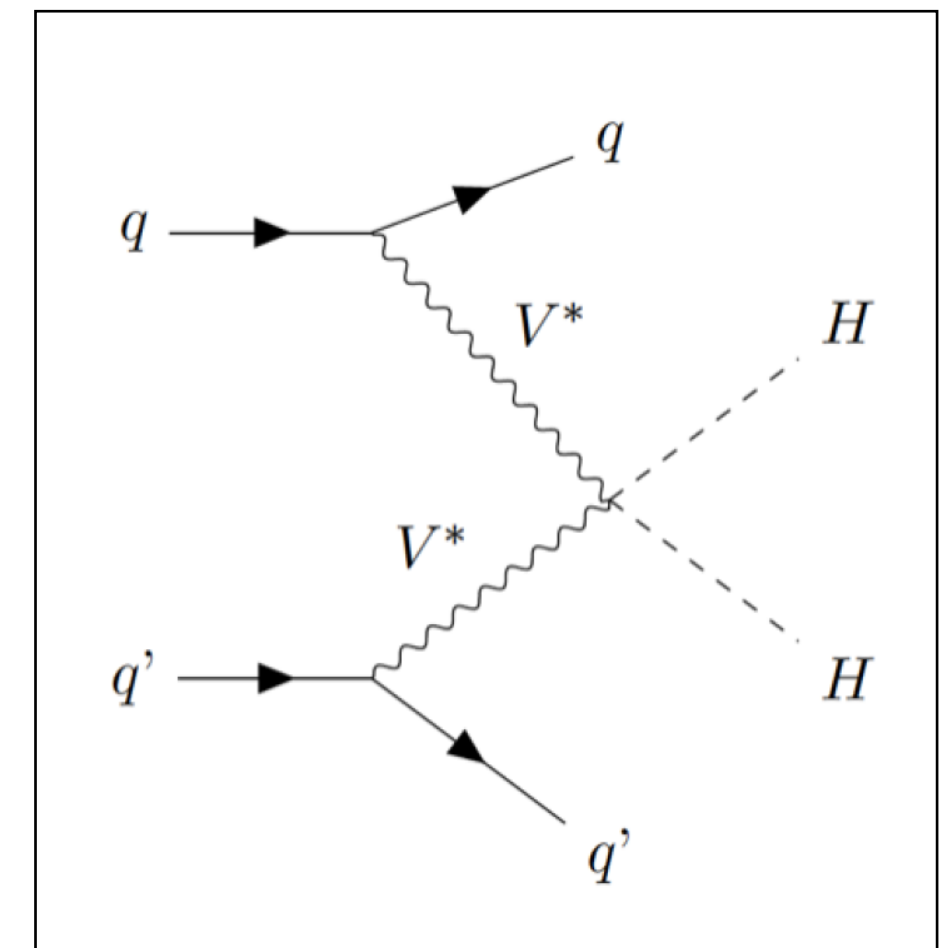
Simulazioni Monte Carlo



Gluon Fusion

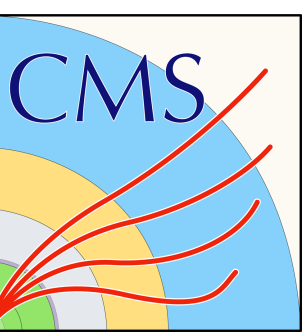


Vector Boson Fusion



M. Dinardo, P. Dini, S. Gennai, R. Gerosa, S. Malvezzi

Scattering di Bosoni Vettori



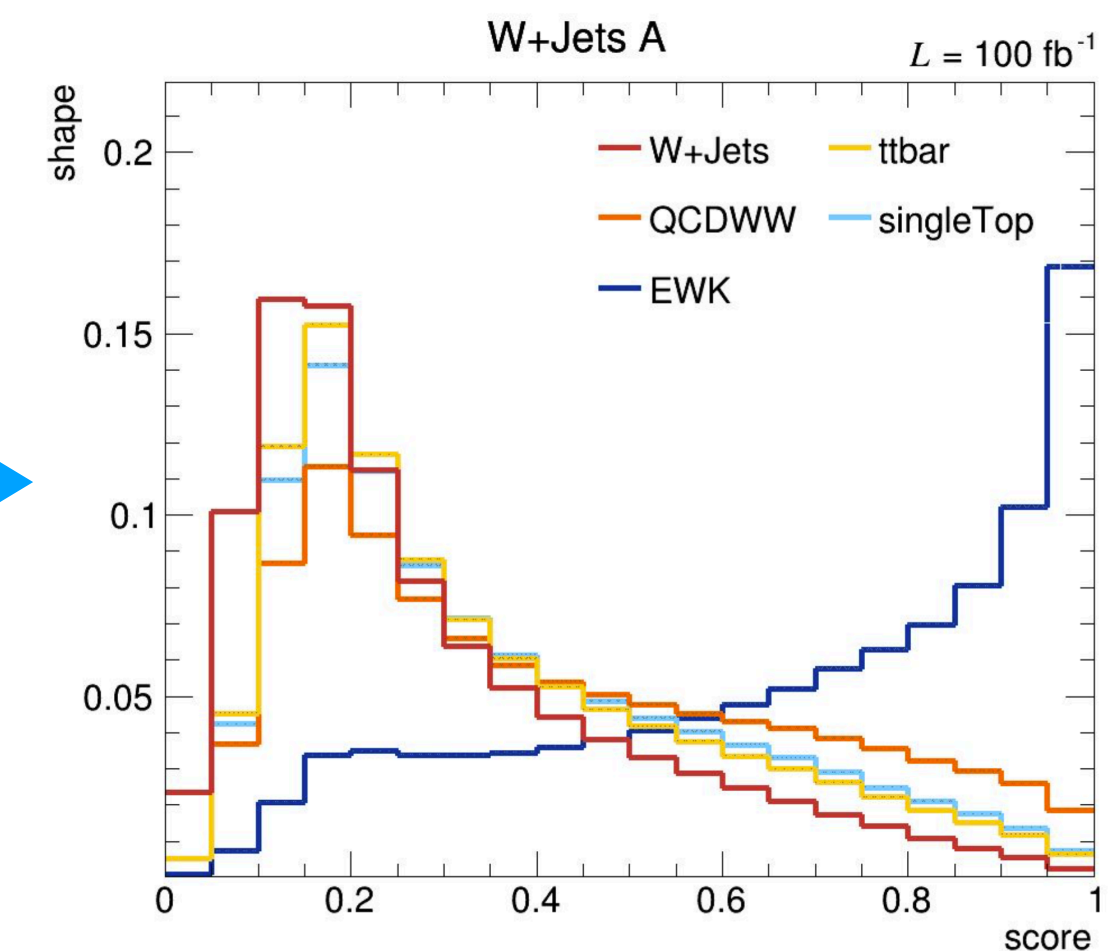
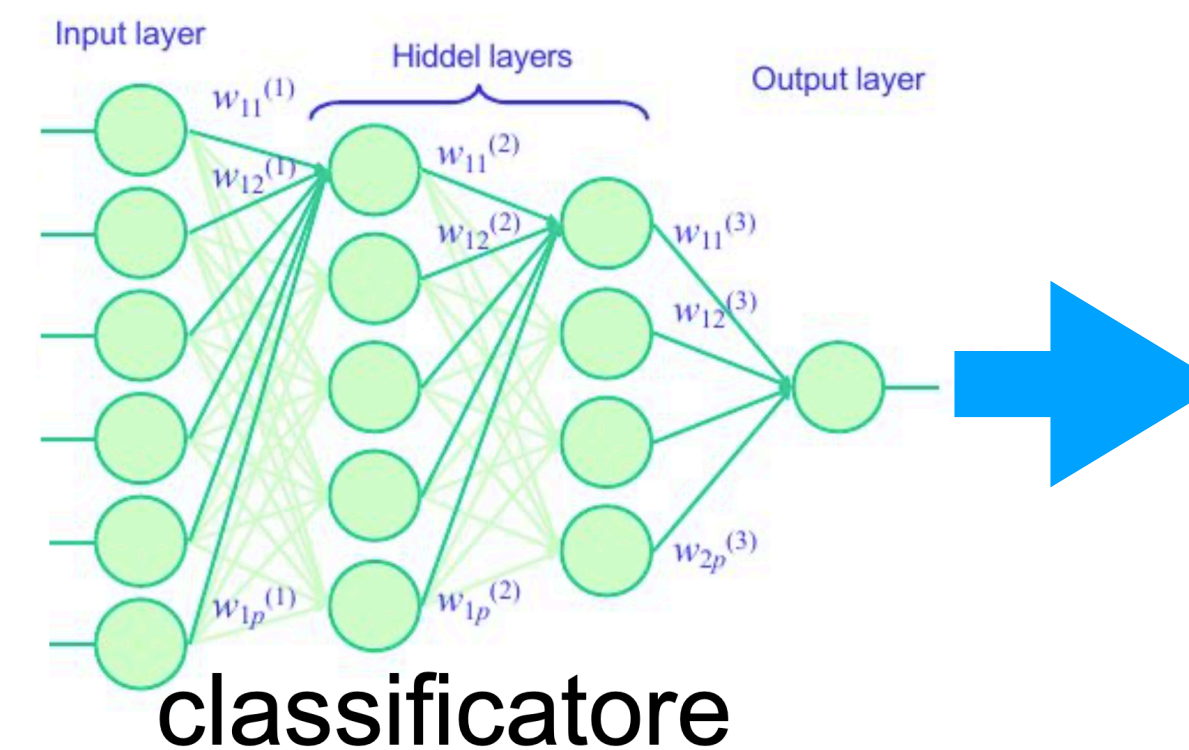
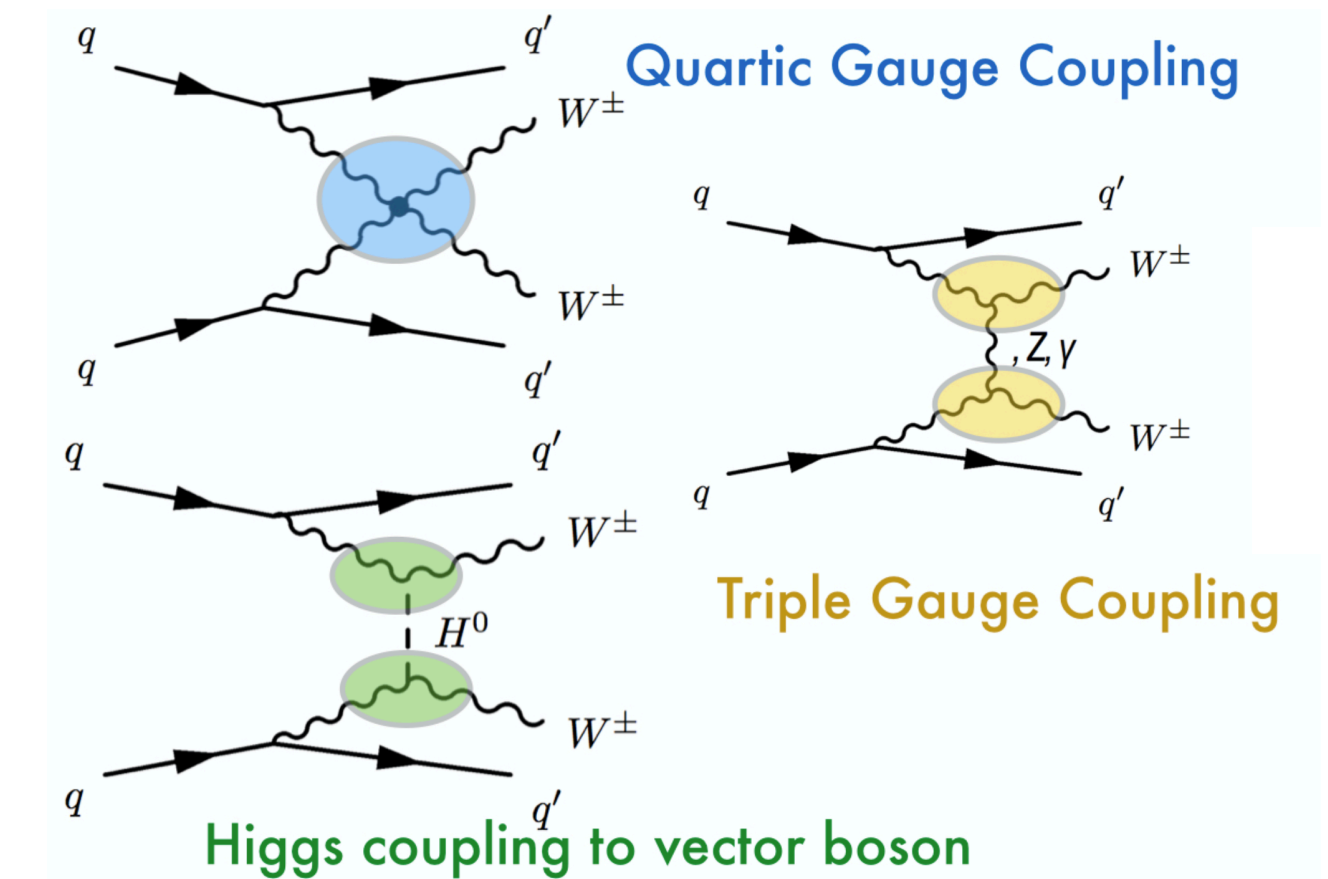
Fisica ElettoDebole

- Misura delle sezioni d'urto delle particelle mediatrici delle forze (Z,W, γ)
- Test efficace del meccanismo di Higgs
- Deviazione dalle attese potrebbe indicare Nuova Fisica

Tipologia del Processo

- Raro e generalmente con molto fondo
Acquisisce interesse con l'avanzare della presa dati
- Si presta a selezione con machine learning
Deep Neural Network per identificare e scartare i fondi

Tecniche di Analisi
 Deep Neural Network
 Fit globale effective field theory
 Simulazioni Monte Carlo



<http://govoni.web.cern.ch/govoni/tesi/#>

R.Gerosa, P. Govoni, A. Massironi, M. Paganoni

Studio dei Decadimenti $D^0 \rightarrow K^0_S \pi^+ \pi^-$

M. Martinelli, M. Calvi

<https://sites.google.com/unimib.it/lhcbbicocca/home>

Motivazioni

- Ricerca di asimmetria materia-antimateria ($\sim 10^{-4}$)

Tecnica di Analisi

- Studio della distribuzione dei decadimenti nello spazio delle fasi per identificare risonanze intermedie tramite fit del modello ai dati

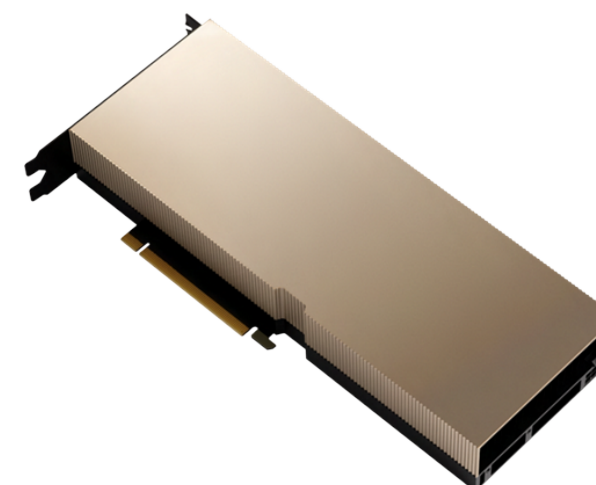
Proposte

1. Sviluppo di algoritmi di fit innovativi basati su TensorFlow (Google) 
2. Determinazione dell'efficienza di ricostruzione tramite tecniche di Machine Learning e sviluppo di una tecnica per valutare l'incertezza sistemica legata alla dimensione del campione

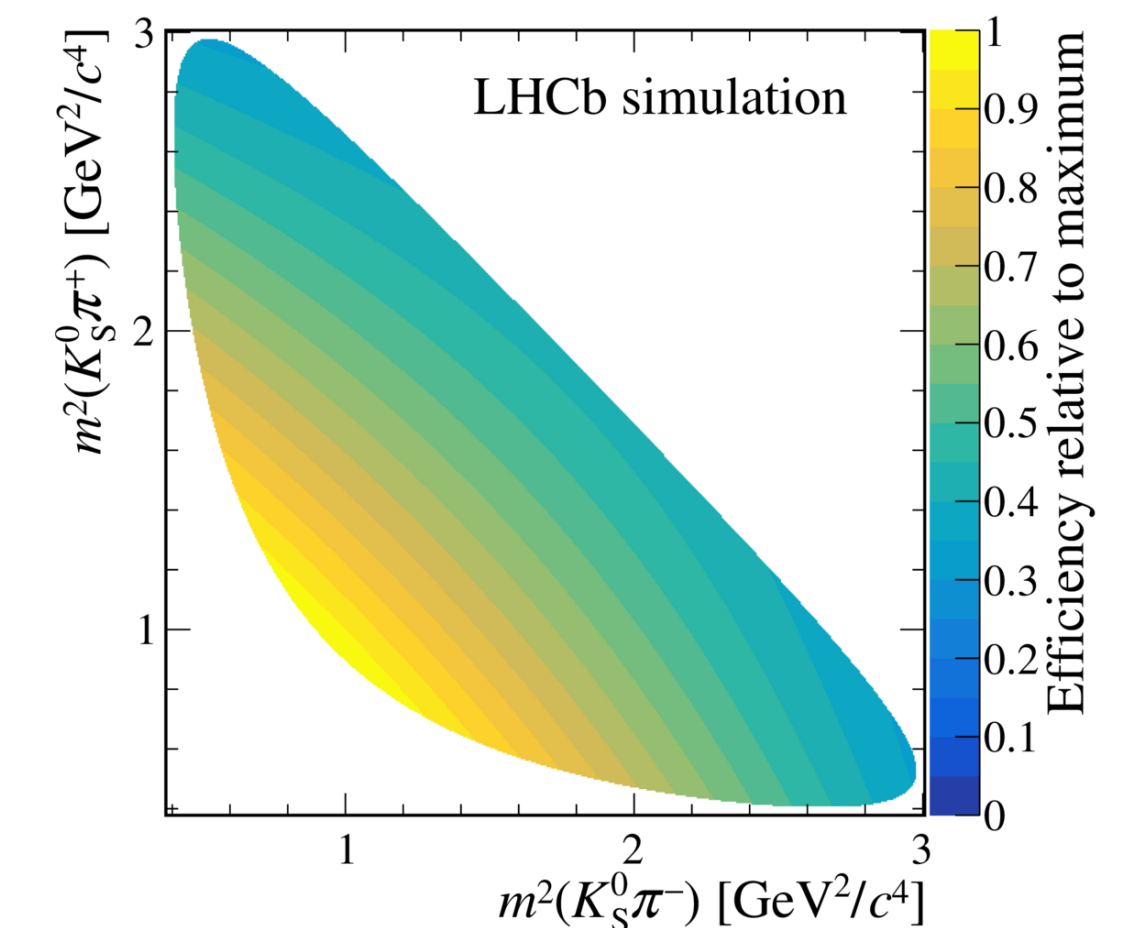
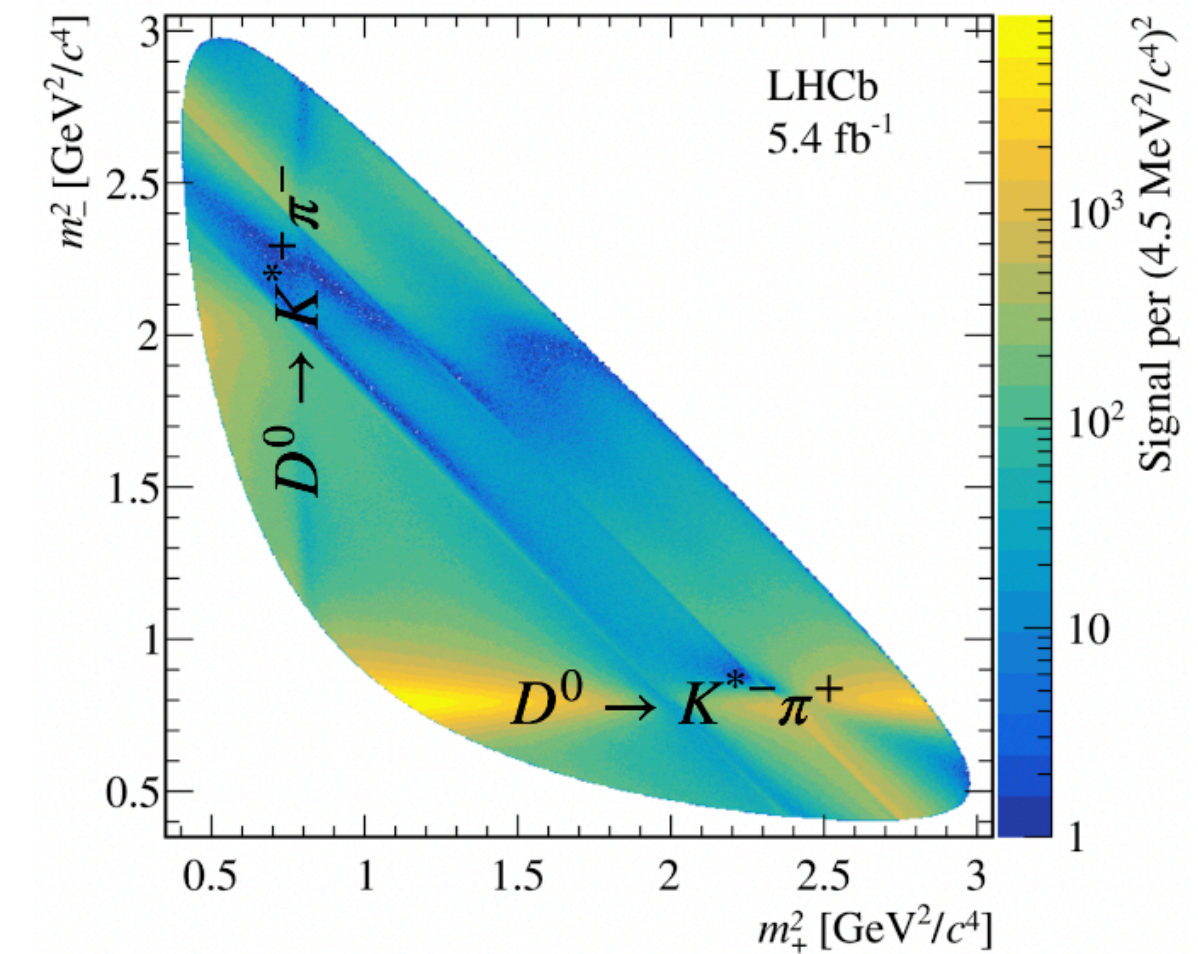
Tecniche di Analisi

Efficienza: Machine Learning

Fit: GPU+Machine Learning



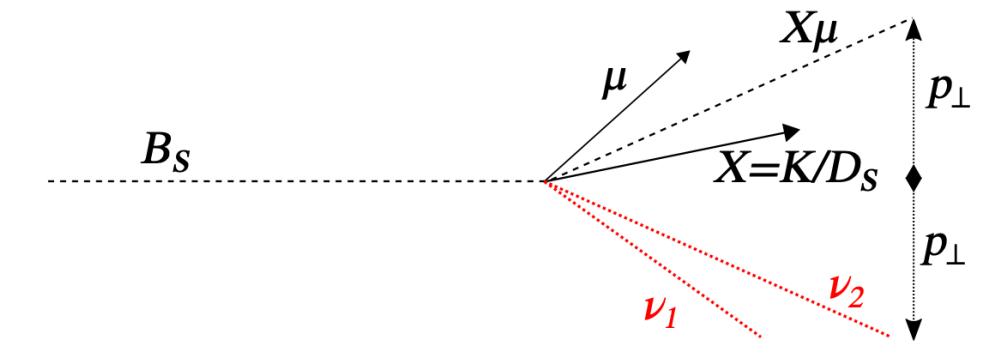
Brand new
nvidia A100 GPU



Misura dell'elemento di matrice CKM V_{ub} in $B^0_s \rightarrow K\mu\nu$

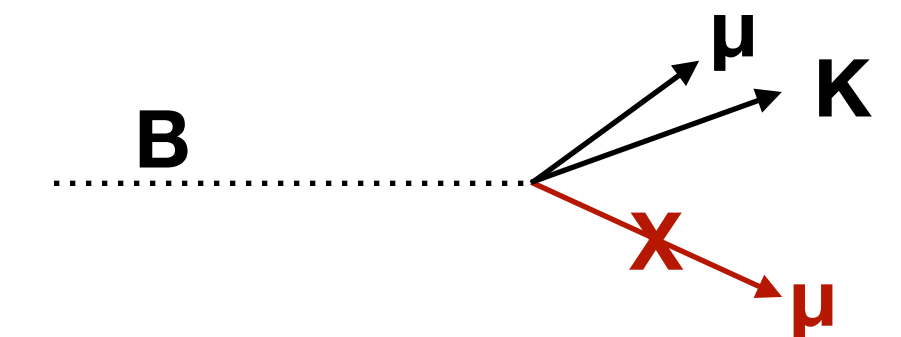
Dirimere la Discrepanza in V_{ub}

- La probabilità di transizione di un quark $b \rightarrow u$ è misurata tramite vari decadimenti. Emerge però una discrepanza tra le misure in cui il segnale viene ricostruito completamente o meno
- Per risolverla si misura il tasso di decadimento di $b \rightarrow u$ in molti canali
- Tra questi $B^0_s \rightarrow K\mu\nu$ è tra i più *puliti* da incertezze teoriche



Studio dei Fondi

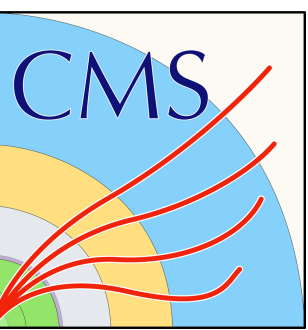
- **Agli acceleratori non ricostruiamo i neutrini!**
Utilizziamo tecniche cinematiche per sopperire a questa mancanza, ma assumiamo che le particelle mancanti siano solo neutrini
- **$B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)K^+$ è uno dei nostri fondi più abbondanti**
Lo studiamo utilizzando la simulazione. Obiettivo della tesi è di fornire una descrizione di questo fondo da utilizzare nel fit finale dei dati



Tecniche di Analisi
Cinematica, Efficienza, Simulazione

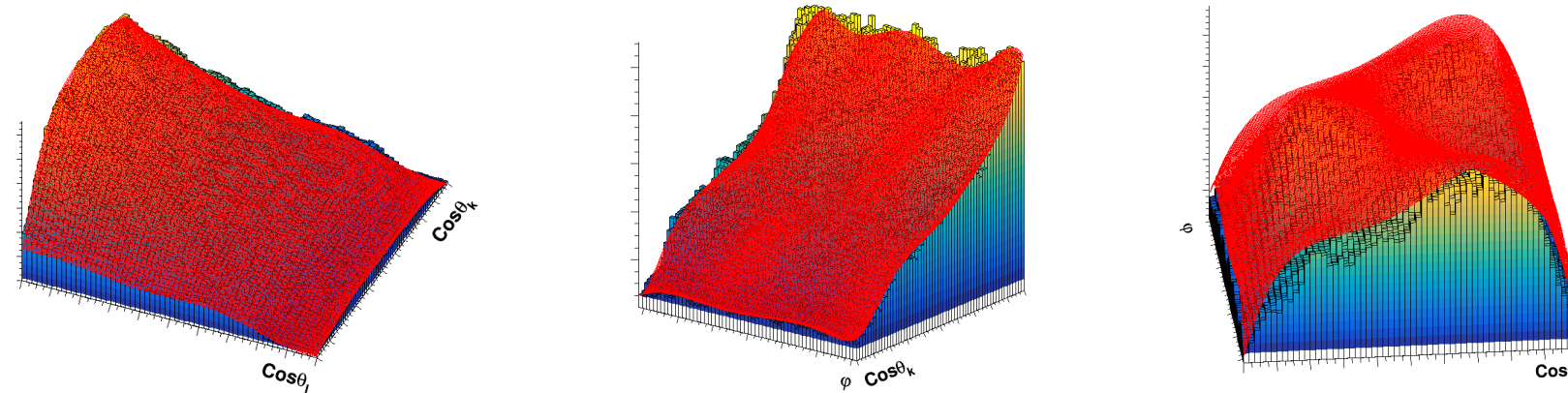
Analisi Angolare di $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$

M. Dinardo, P. Dini, S. Gennai, S. Malvezzi



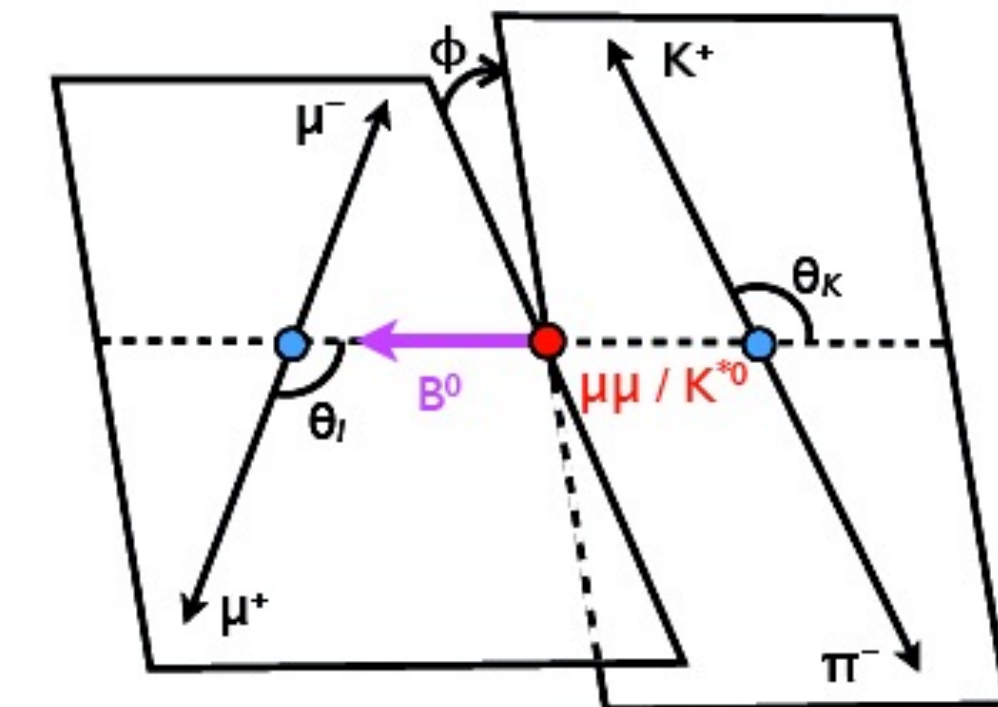
Decadimento Raro

- $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ procede tramite accoppiamenti di corrente neutra che cambiano il sapore (FCNC), molto rari nel Modello Standard (vietati al prim'ordine)
 - Tali processi potrebbero manifestare gli effetti di nuove particelle o forze
 - Il Modello Standard in questa analisi è un "fondo", per cui si studiano osservabili dalle ridotte incertezze teoriche
- Distribuzioni angolari

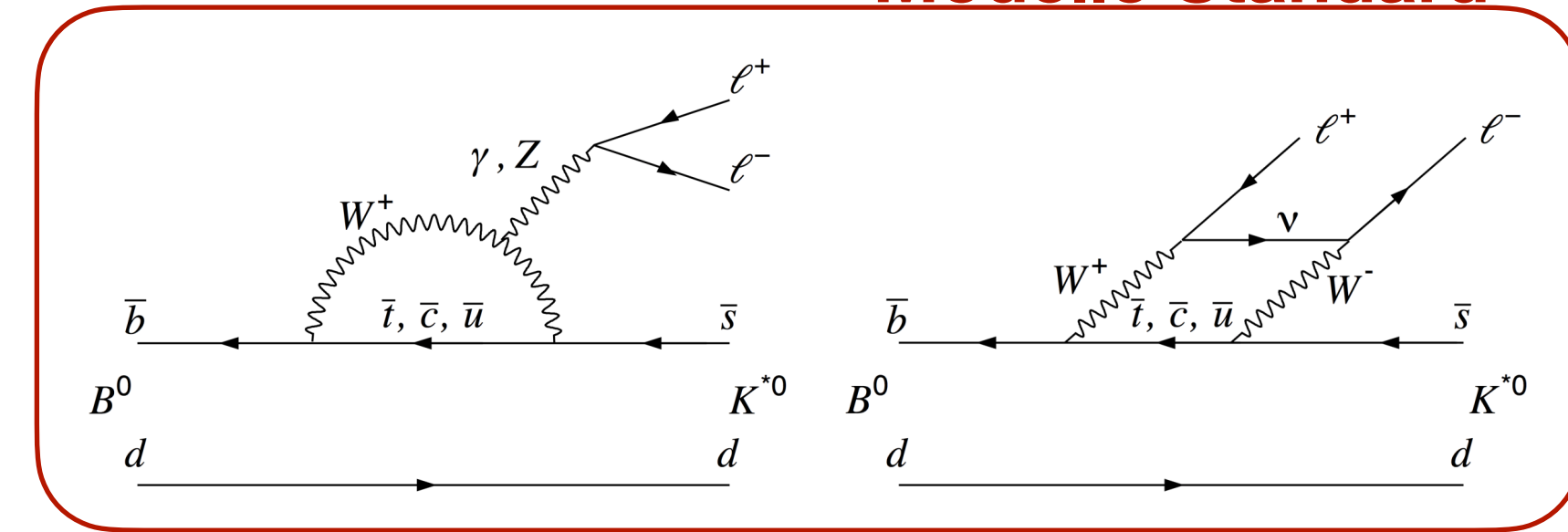


Tecniche di Analisi

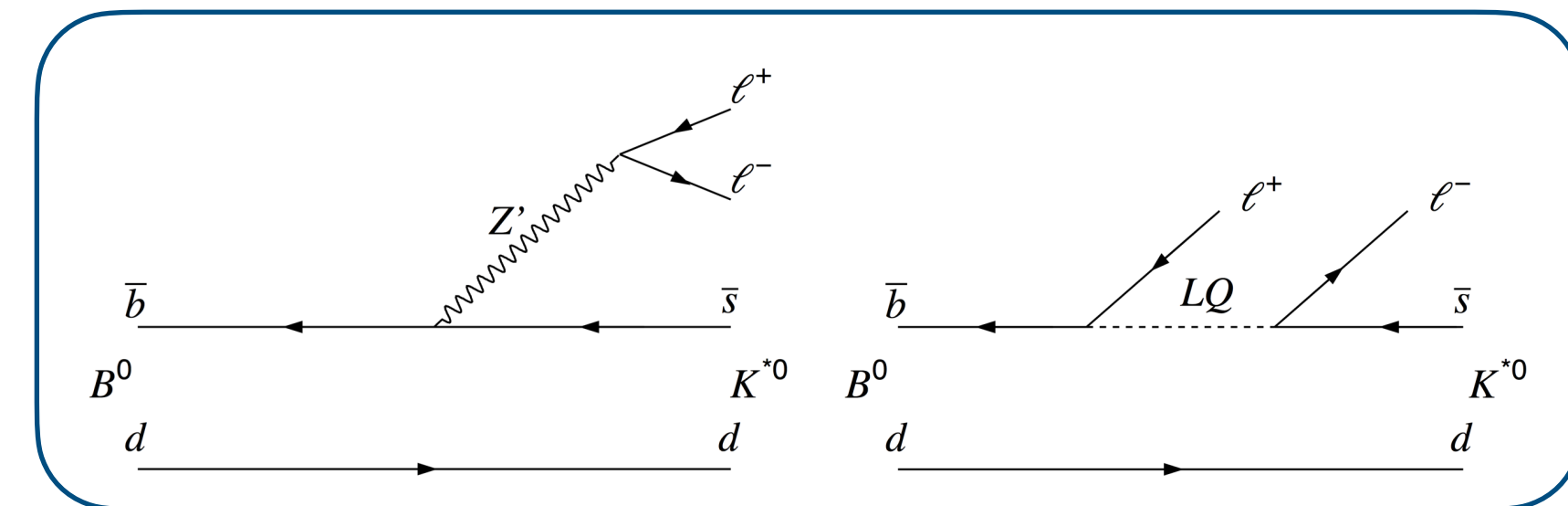
Machine Learning per la selezione
GPU per studiare eventi di fondo ed efficienza



Modello Standard



Nuova Fisica



Cosa si Impara da una tesi in Particelle?

Programmazione

C++
Python
GPU

Tecniche di Analisi

Big Data
Machine Learning
Calcolo parallelo

Metodo

Integrazione in una
grande collaborazione
internazionale

Conclusioni

Note

- Tutte le proposte di tesi del gruppo di particelle corrispondono allo stato dell'arte nei loro ambiti
- I referenti in Bicocca ricoprono ruoli principali a livello internazionale nelle rispettive proposte
- Se qualcosa vi interessa, non esitate a contattarci per fare una chiaccherata!

<https://www.fisica.unimib.it/it/ricerca/fisica-delle-particelle-e-delle-astroparticelle>