

Organizzazione della giornata

10:00 Introduzione alla fisica del Large Hadron Collider (LHC)

L. Bellagamba, INFN Bologna

11:00 Rivelazione degli eventi ed identificazione di particelle a LHC

S. Marcellini, INFN Bologna

12:00 Discussione

Pausa Pranzo

13:30 Esercitazione: Riconoscimento di particelle in collisioni protone protone a LHC

16:00 Connessione con il CERN, presentazione dei risultati cumulativi ottenuti da tutte le sedi coinvolte e discussione

Sedi che parteciperanno a questa giornata

-  - Bologna (IT)
-  - Munich (DE)
-  - Opava (CZ)
-  - Tübingen (DE)

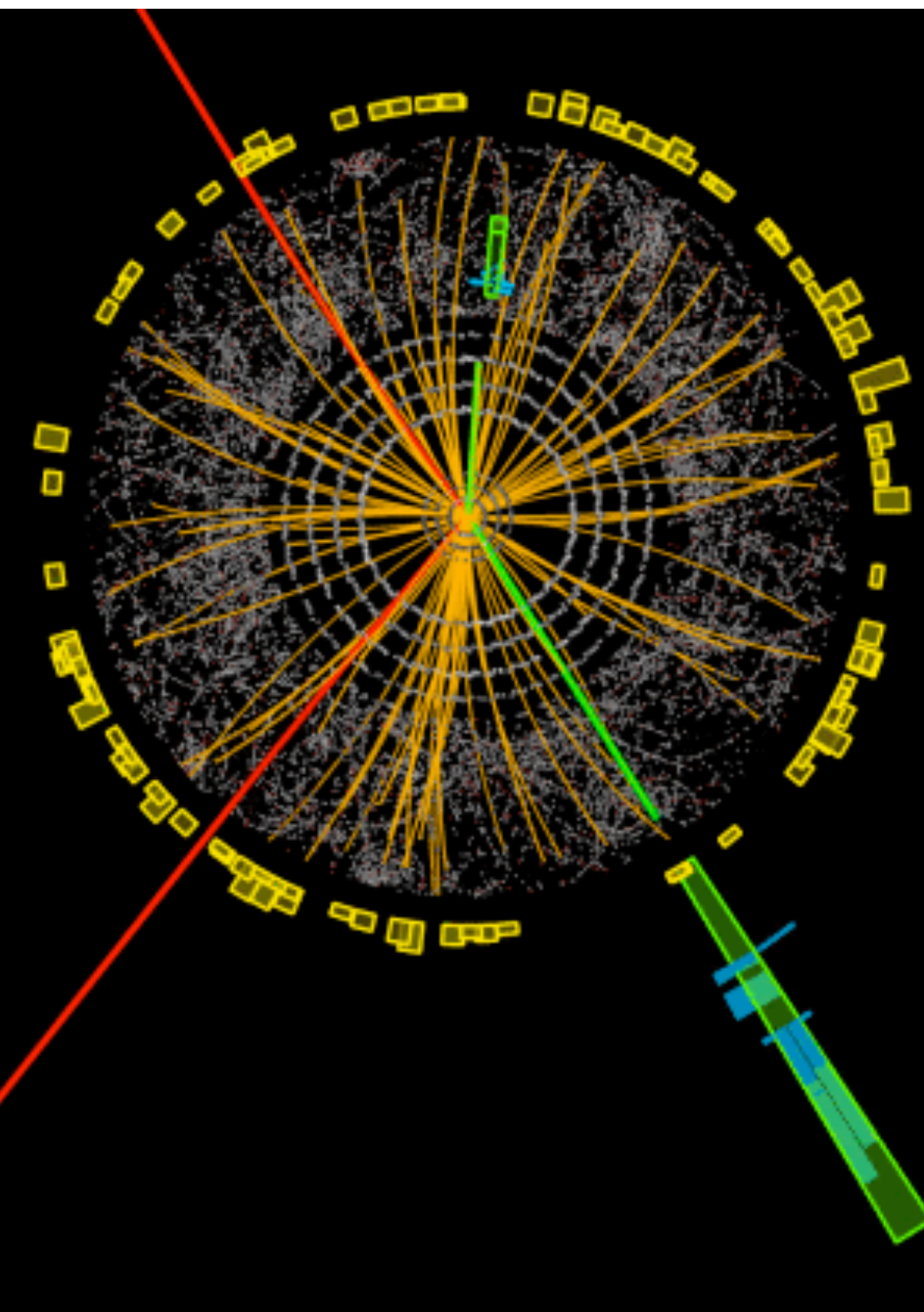
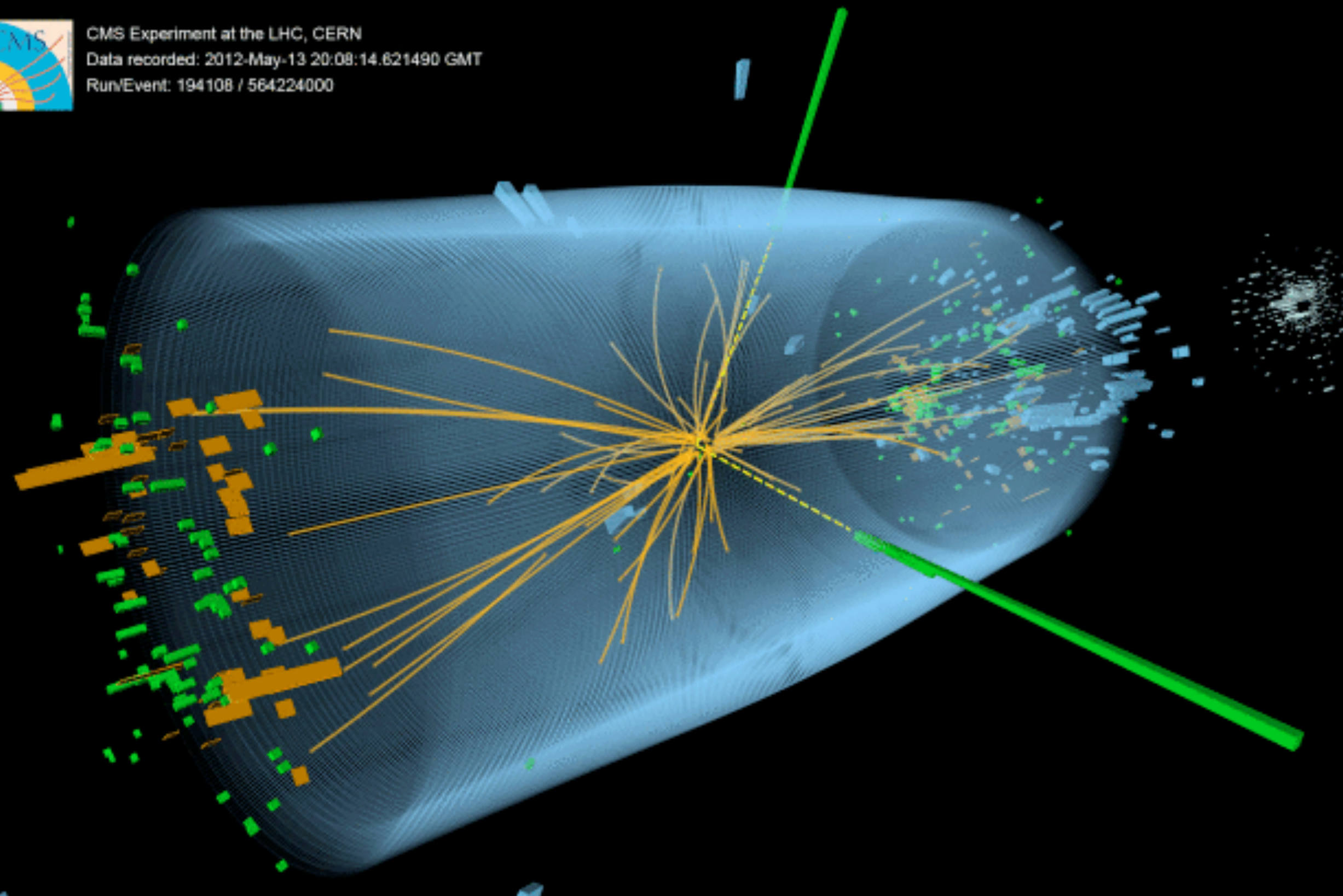


Introduzione alla fisica del Large Hadron Collider (LHC)

Lorenzo Bellagamba, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Sezione di Bologna)



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Run: 205113
Event: 12611816
Date: 2012-06-18
Time: 11:07:47 CEST

Studio della struttura della materia:

strumenti capaci di risolvere oggetti sempre piu' piccoli

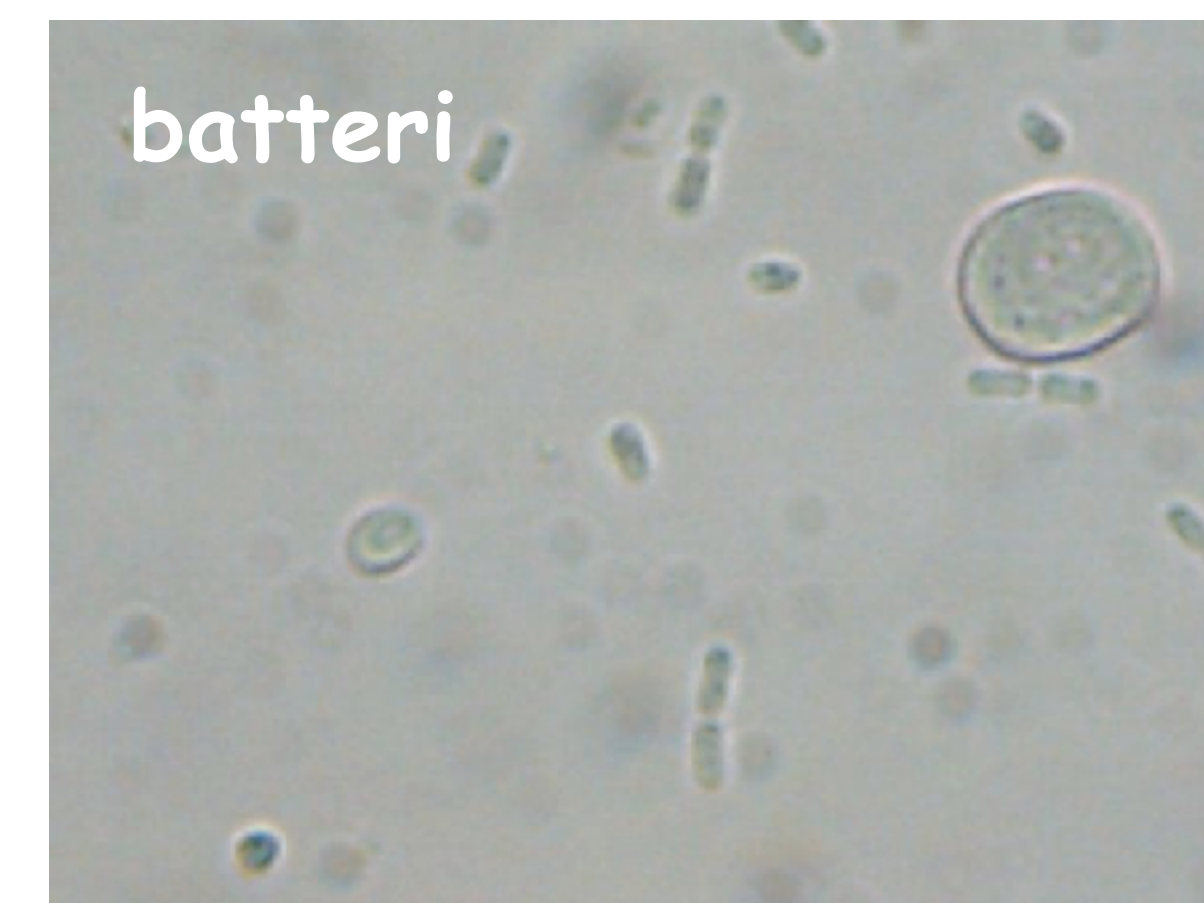
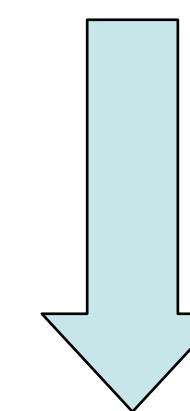
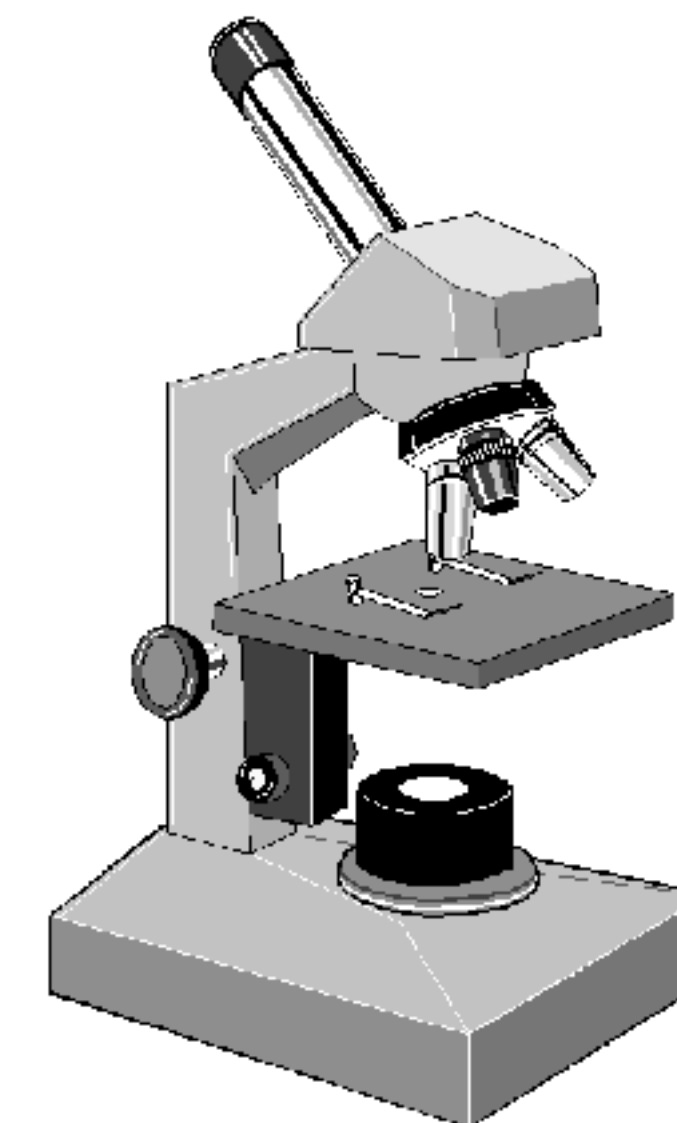
Microscopio ottico

→ risoluzioni dell'ordine di $0.2 \mu\text{m}$
(2 decimillesimi di mm)

Perche' non si puo' fare meglio?

→ utilizza luce visibile

non e' possibile risolvere strutture molto
piu' piccole della lunghezze d'onda della luce



Come possiamo fare meglio ?

Ci viene in aiuto la **meccanica quantistica**

Nel mondo microscopico non c'è distinzione netta tra comportamenti corpuscolari ed ondulatori. Le particelle si comportano come onde e viceversa.



$$\Lambda = \frac{h}{p} \quad \text{costante di Planck} \quad p = m \cdot v$$

$$h \cong 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot s$$

elettroni accelerati
→ risoluzioni molto migliori
rispetto ad un microscopio ottico

Si possono osservare dettagli fino a qualche
 decimilionesimo di mm ($\sim 0.1 \text{ nm}$)

~ 1000 volte meglio del microscopio ottico

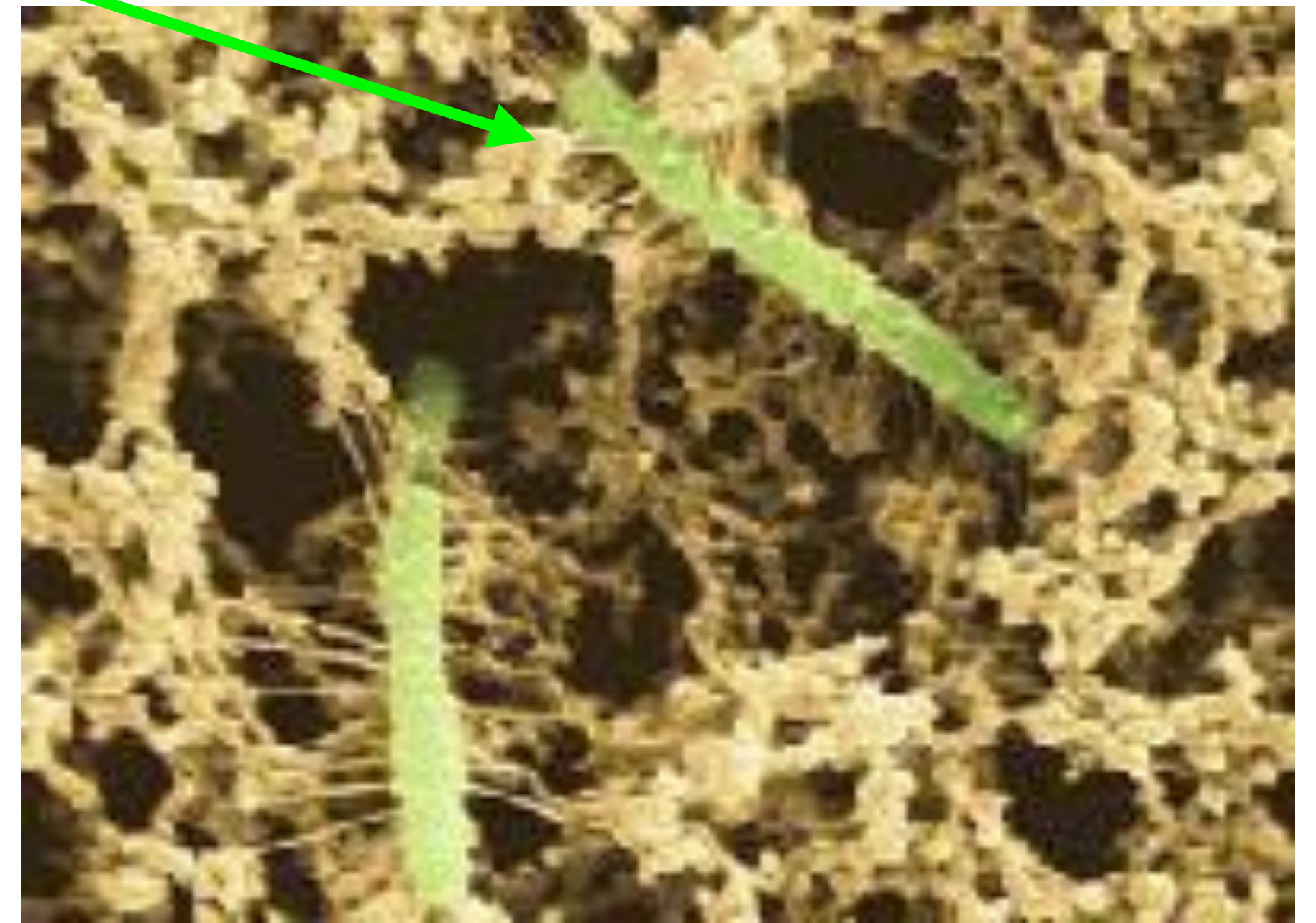


Enorme differenza di risoluzione

batteri



Microscopio ottico
Luce visibile



Microscopio elettronico
Elettroni accelerati

Per studiare oggetti ancora piu' piccoli?

Un nucleo atomico e' un milione di volte piu' piccolo (un millesimo di miliardesimo di mm, 10^{-15} m)

I piu' piccoli costituenti della materia a noi noti sono almeno 10000 volte piu' piccoli dei nuclei

Il microscopio che ci occorre per risolvere tali strutture e' uno strumento in grado di accelerare particelle ad energie elevatissime

Questo microscopio e' un acceleratore di particelle

LHC (Large Hadron Collider) e' il piu' grande acceleratore di particelle mai costruito

Si trova presso il CERN, nella regione di Ginevra al confine tra Francia e Svizzera

Ha una circonferenza di circa 27 Km

Accelera e fa collidere protoni



LHC: Large Hadron Collider



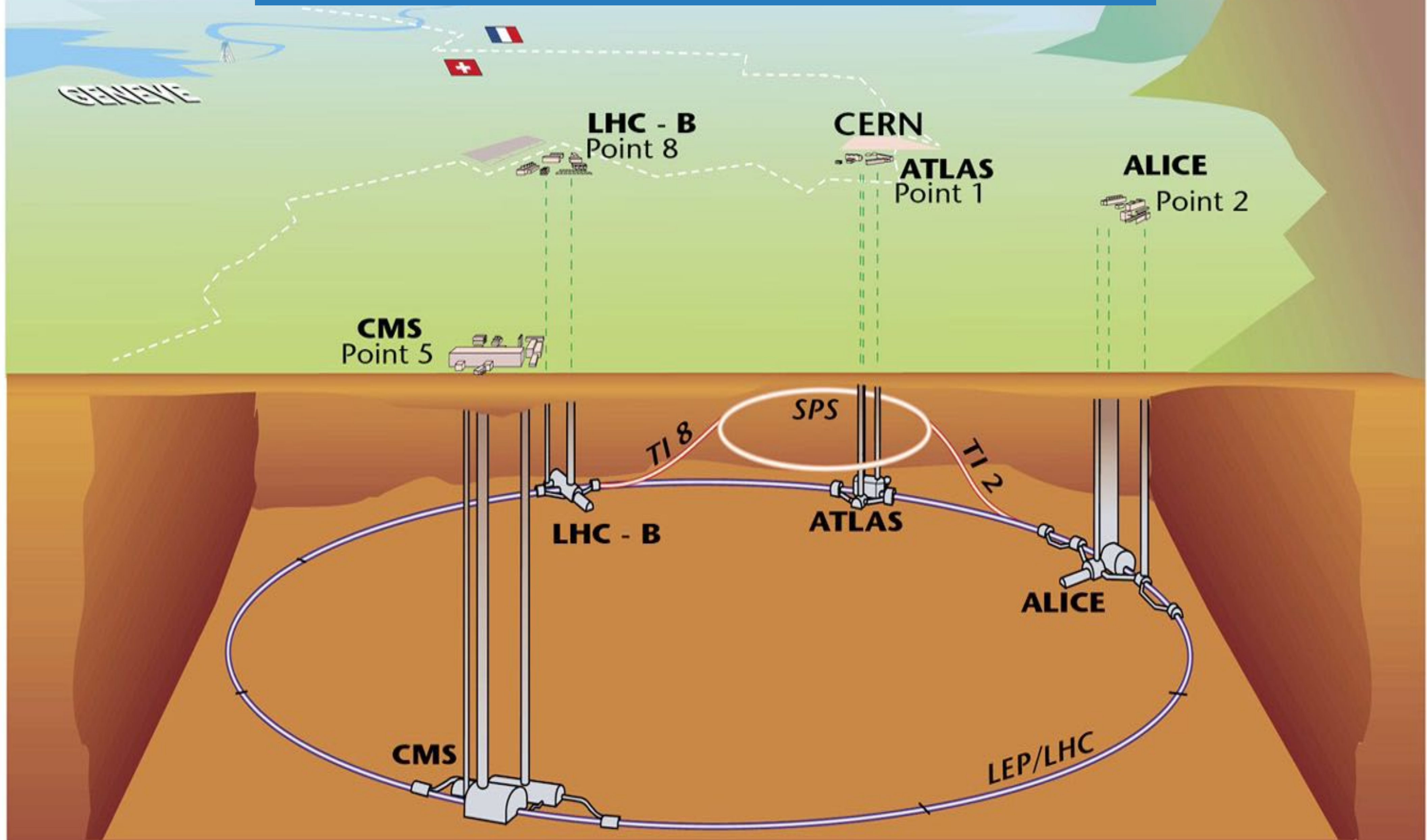
ALICE

ATLAS

LHCb

CMS

Gli Esperimenti ad LHC



CERN 25/04/2007



Sezione del tunnel e acceleratore



Due fasci di protoni vengono accelerati in direzioni opposte

ad una energia di

6800 miliardi di elettronVolt ($6.8 \times 10^{12} \text{eV}$) \rightarrow 6.8 TeV

(1 ev è l'energia di un protone accelerato da una ddp di 1 Volt)

**L'energia di un protone a LHC corrisponde a
quella di una zanzara in volo**

puo' sembrare poco ma...

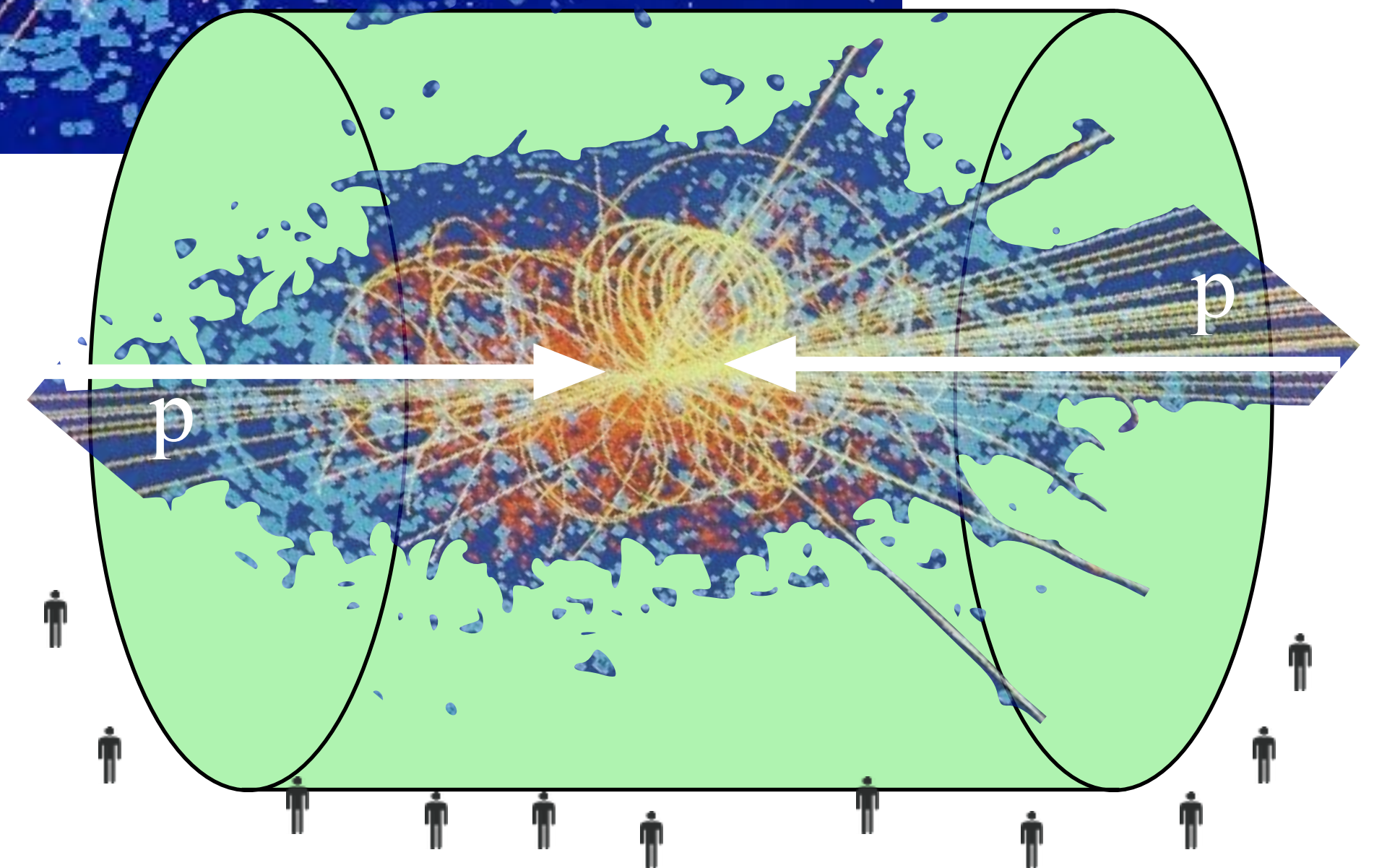
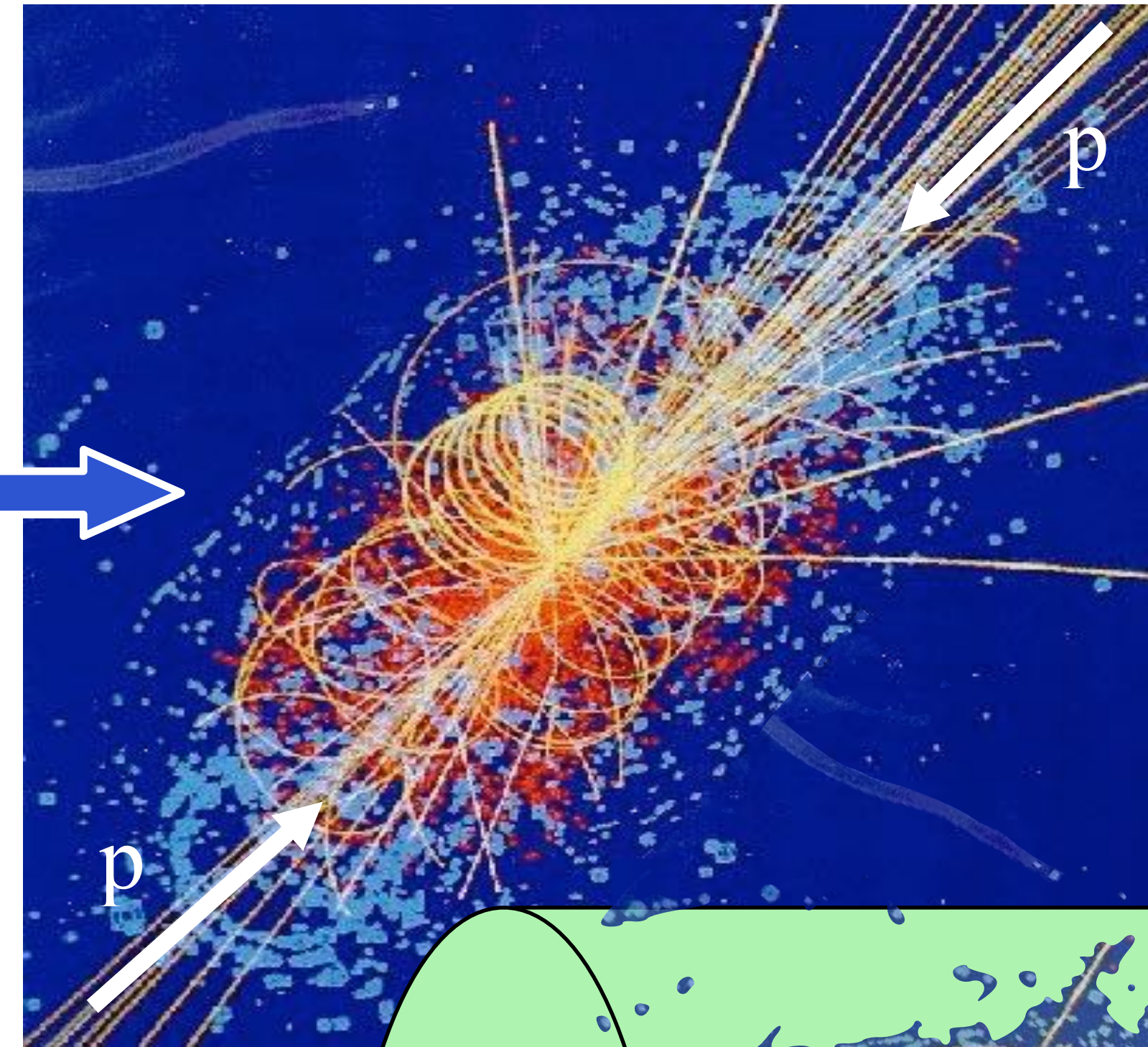
**questa energia è concentrata
su un solo protone!**

Quando i due fasci collidono una grande quantita' di energia viene concentrata in dimensioni estremamente ridotte

Creazione di materia
dall'energia

$$E = mc^2$$

Le collisioni avvengono all'interno degli apparati sperimentali: grandi strumenti delle dimensioni di edifici di diversi piani che hanno il compito di analizzare i prodotti dell'urto per ricostruire quello che e' successo



Esperimento ATLAS

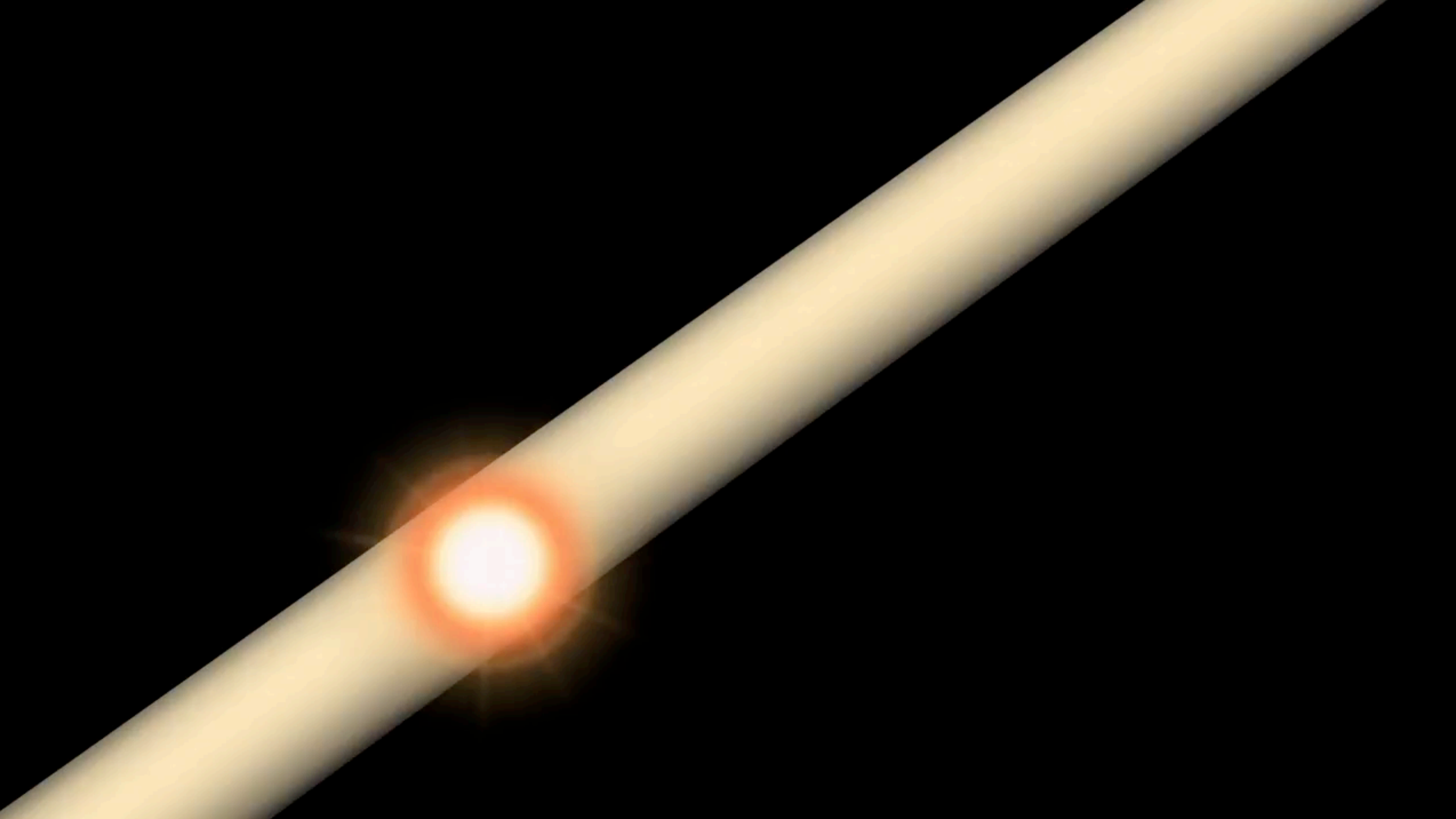
(46x25m, 7KT)



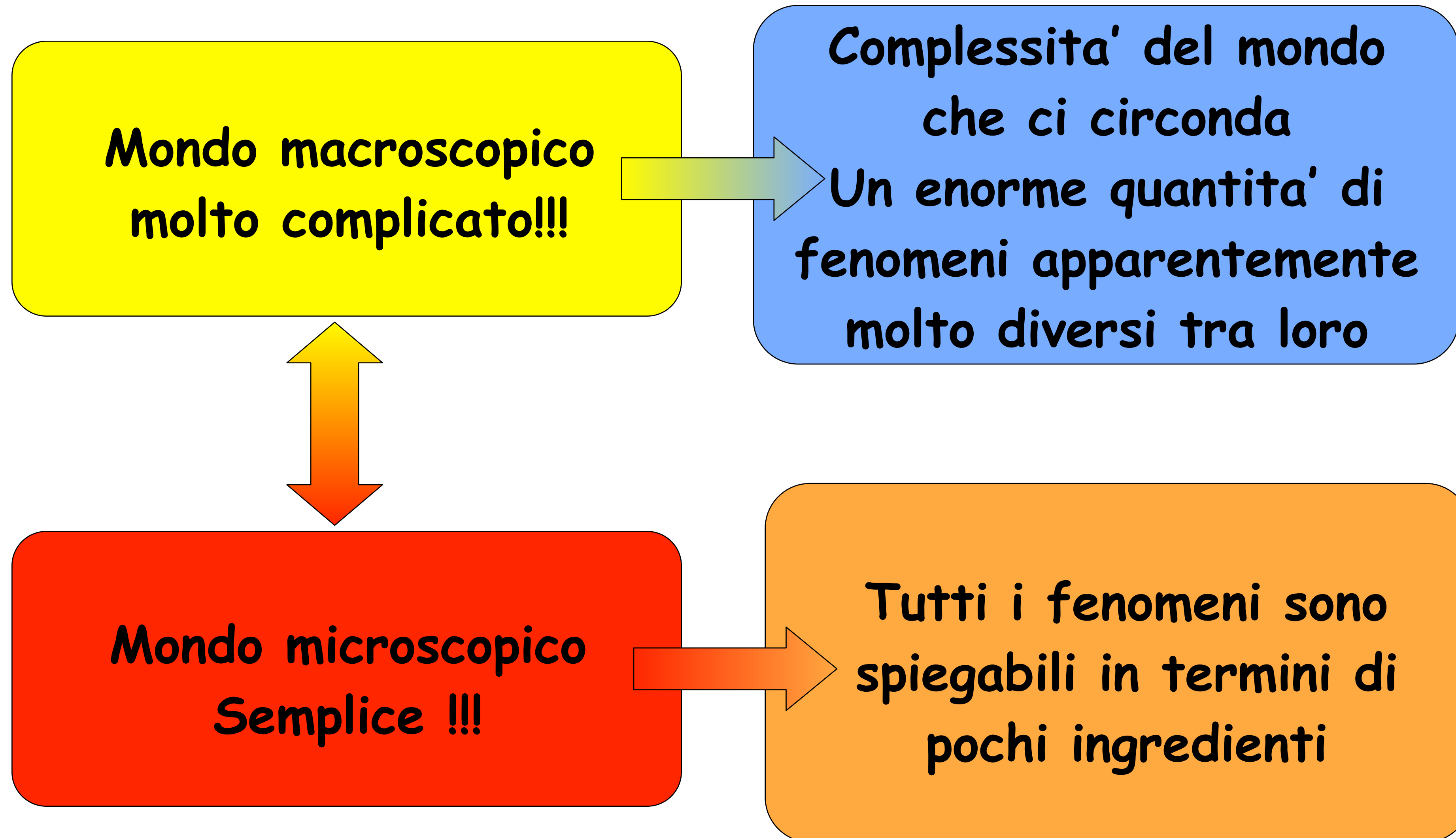
Esperimento CMS

(21x15m, 14 KT)

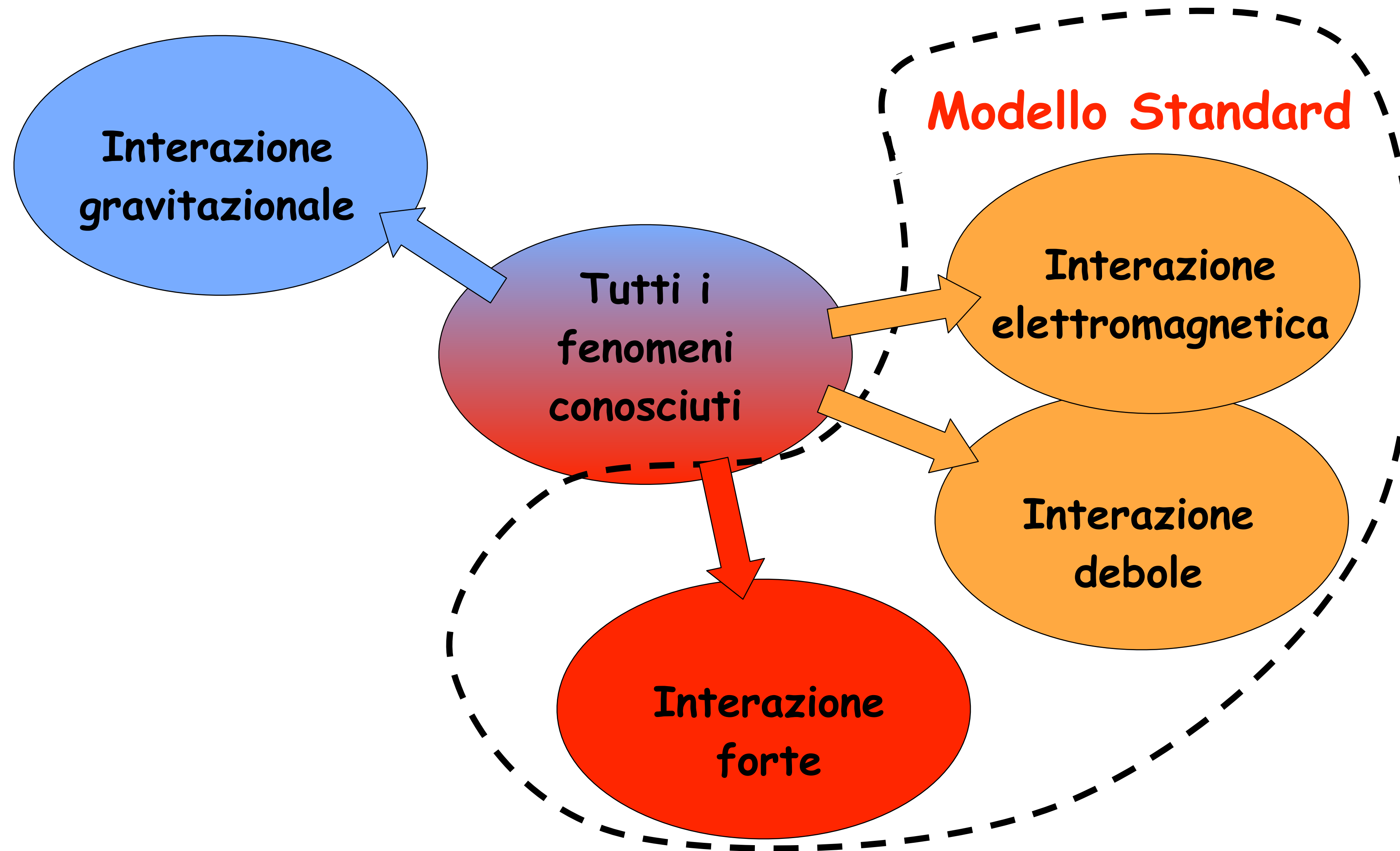




Cosa impariamo dallo studio delle particelle elementari ?



Le quattro interazioni fondamentali

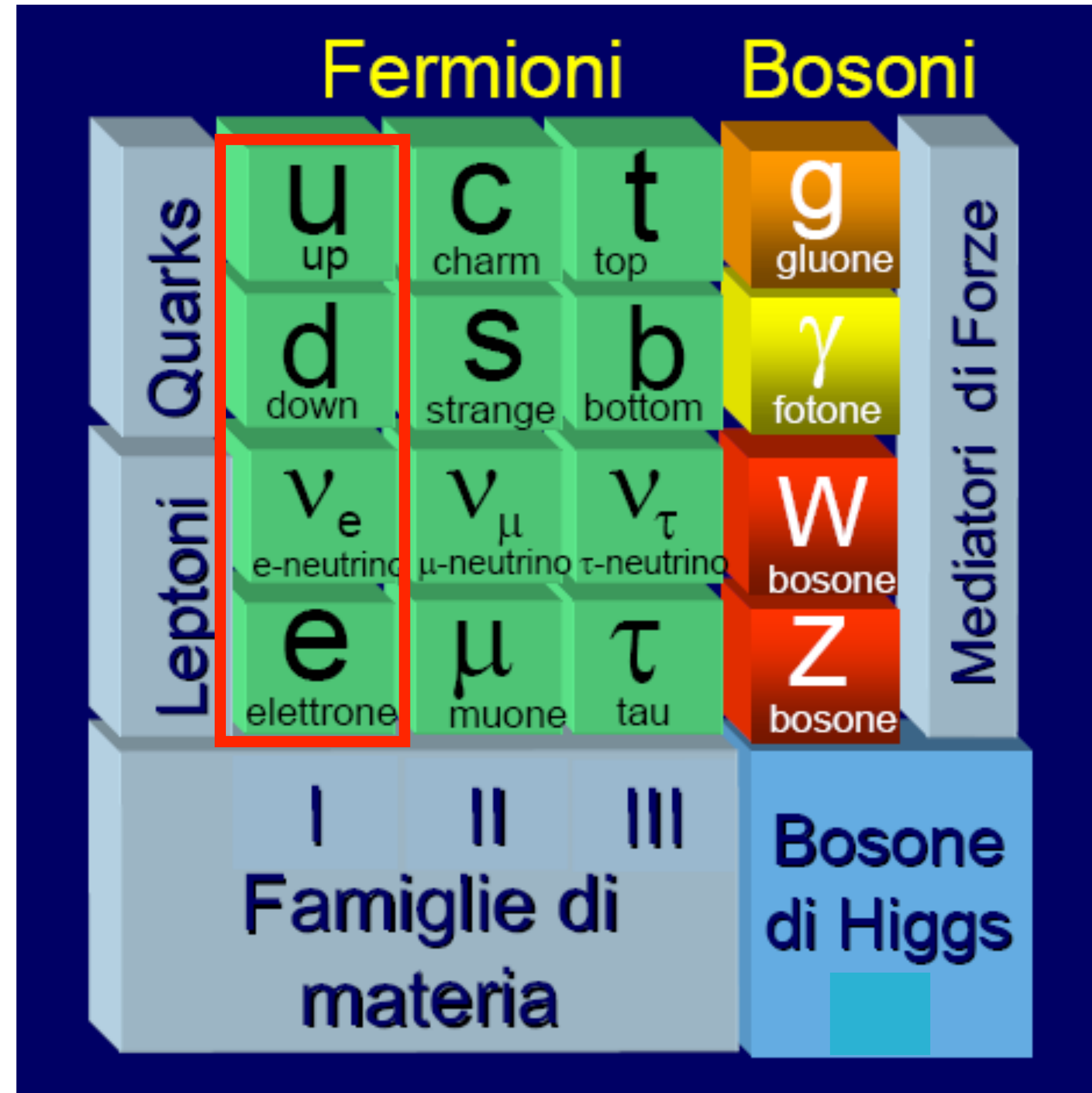


Modello Standard

tutte le nostre conoscenze in pochi ingredienti base

Tutto ciò che ci è noto è composto da quark e leptoni che interagiscono tramite i mediatori delle forze elettromagnetica, debole, forte e **gravitazionale**

In particolare tutta la materia che ci circonda è composta da quark e leptoni della I famiglia



materia: fermioni, spin 1/2

Interazioni: bosoni, spin 1,2

leptoni

ν_e

ν_μ

ν_τ

e

μ

τ

u

c

t

d

s

b

1°

2°

3°


Debole, Gravitazionale

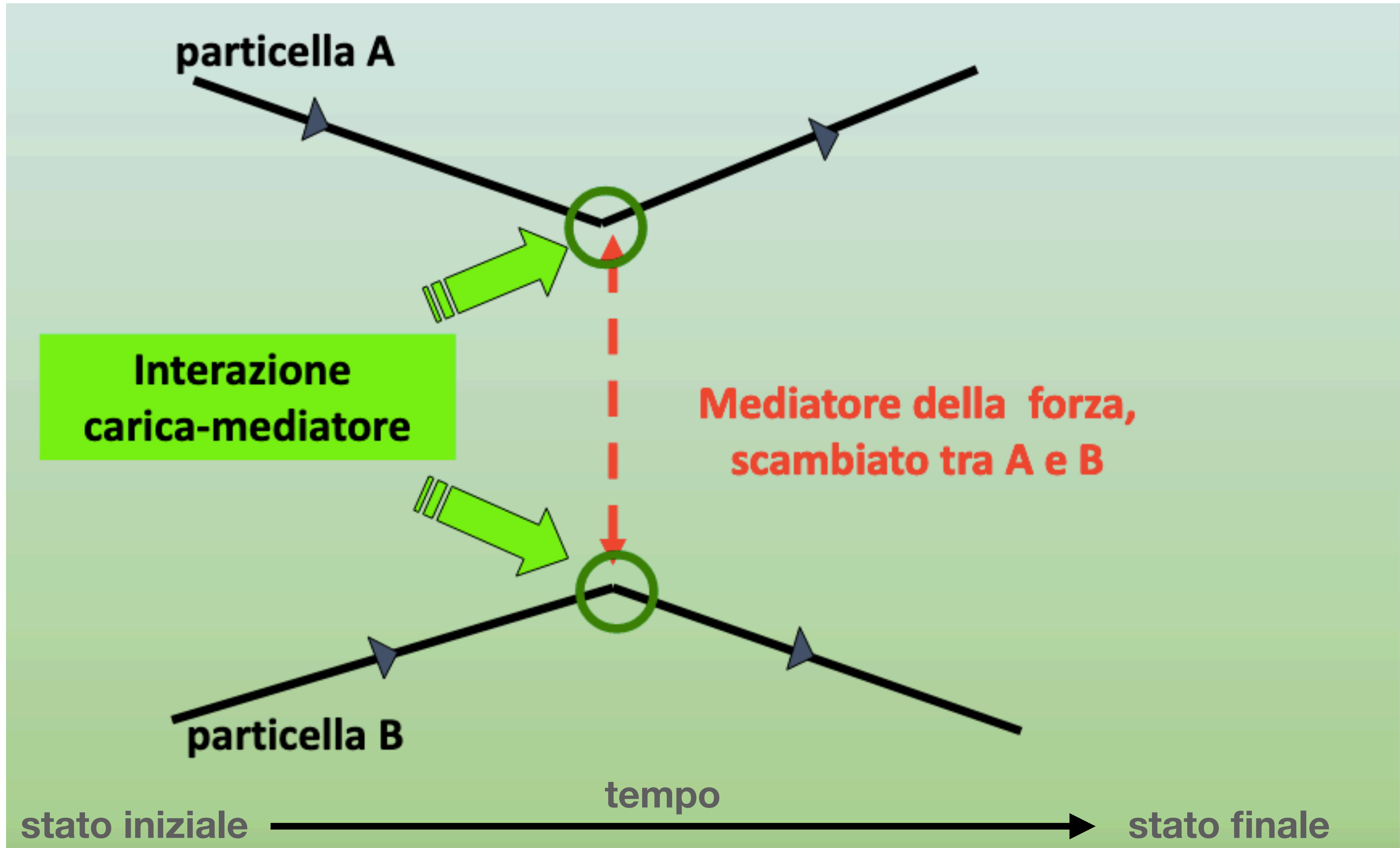
Debole, Gravitazionale,
Elettromagnetica

Debole, Gravitazionale,
Elettromagnetica, Forte

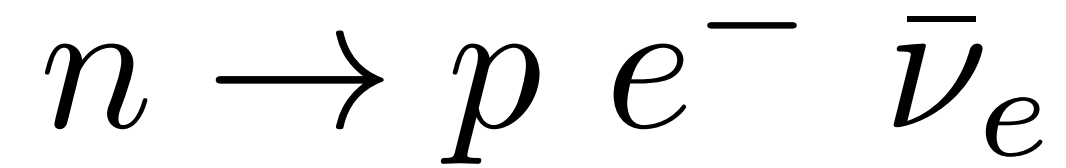
quark

Bosone di Higgs: responsabile della massa delle particelle, spin 0

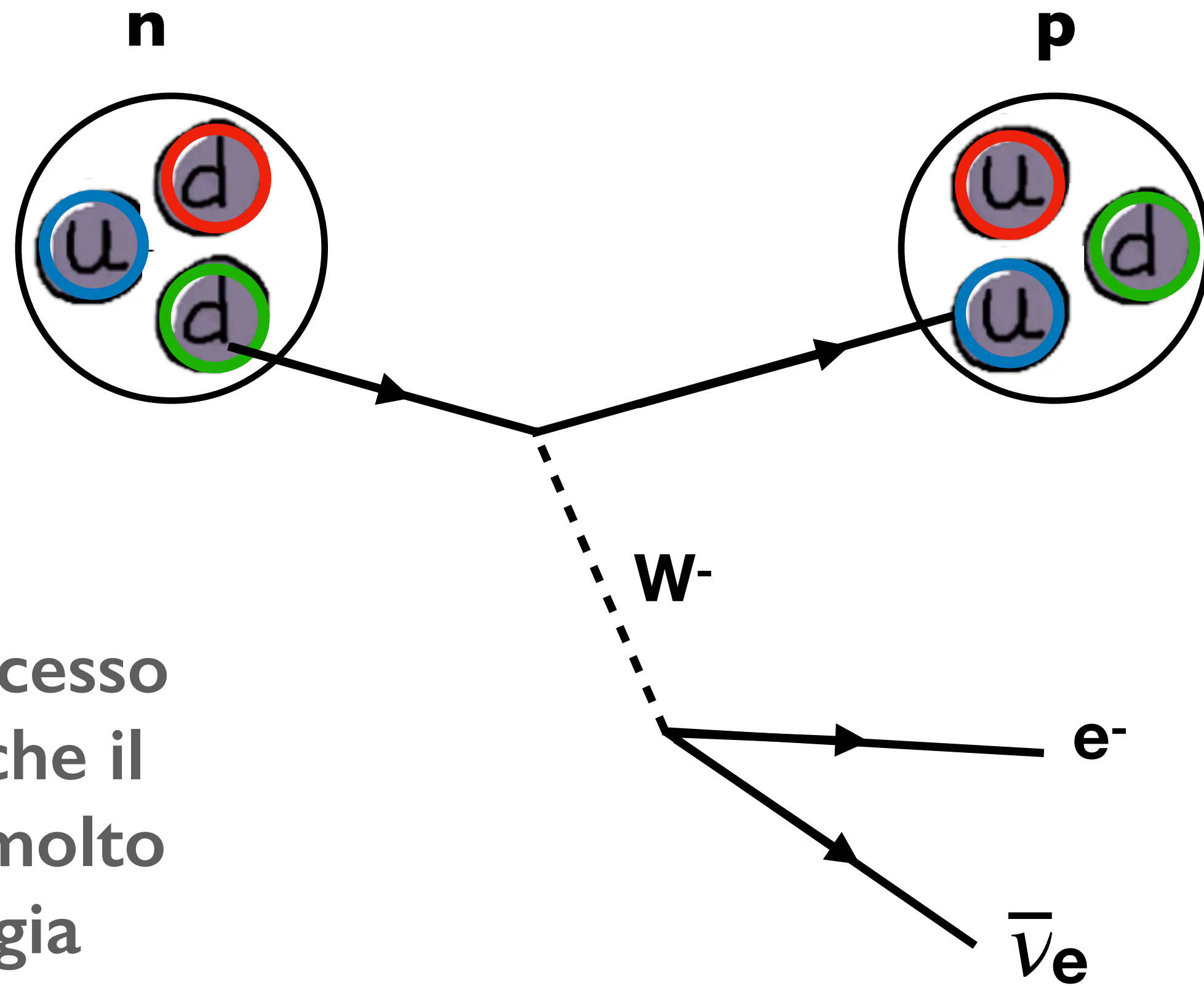
Interazione tra due particelle  scambio del bosone mediatore



esempio: decadimento β



$$M_n - M_p \simeq 1 \text{ MeV}$$



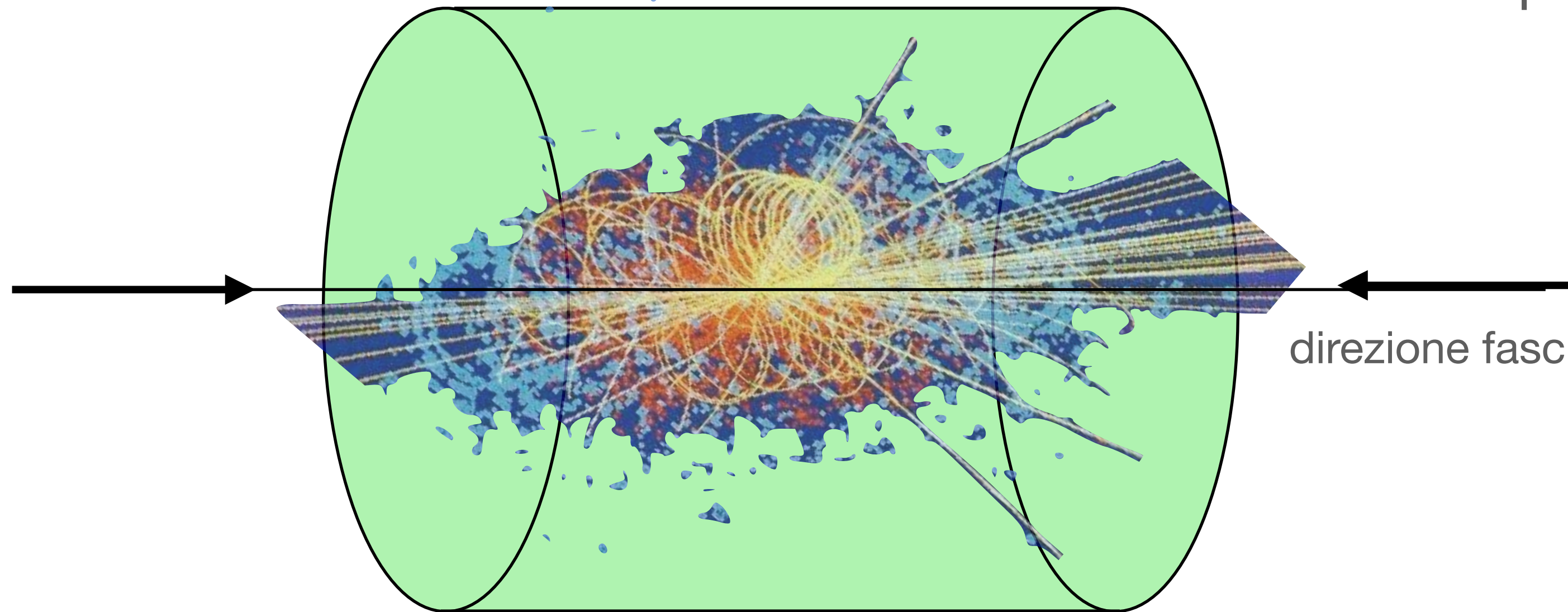
Vita media lunga: processo ostacolato dal fatto che il mediatore ha massa molto maggiore dell'energia disponibile nel decadimento

Corto raggio di azione: il mediatore sopravvive per un tempo compatibile con il principio di indeterminazione

$$\Delta t \cdot \Delta M > \hbar$$

Selezione eventi interessanti: impulso trasverso

Come abbiamo visto da ciascuna collisione si generano centinaia di particelle



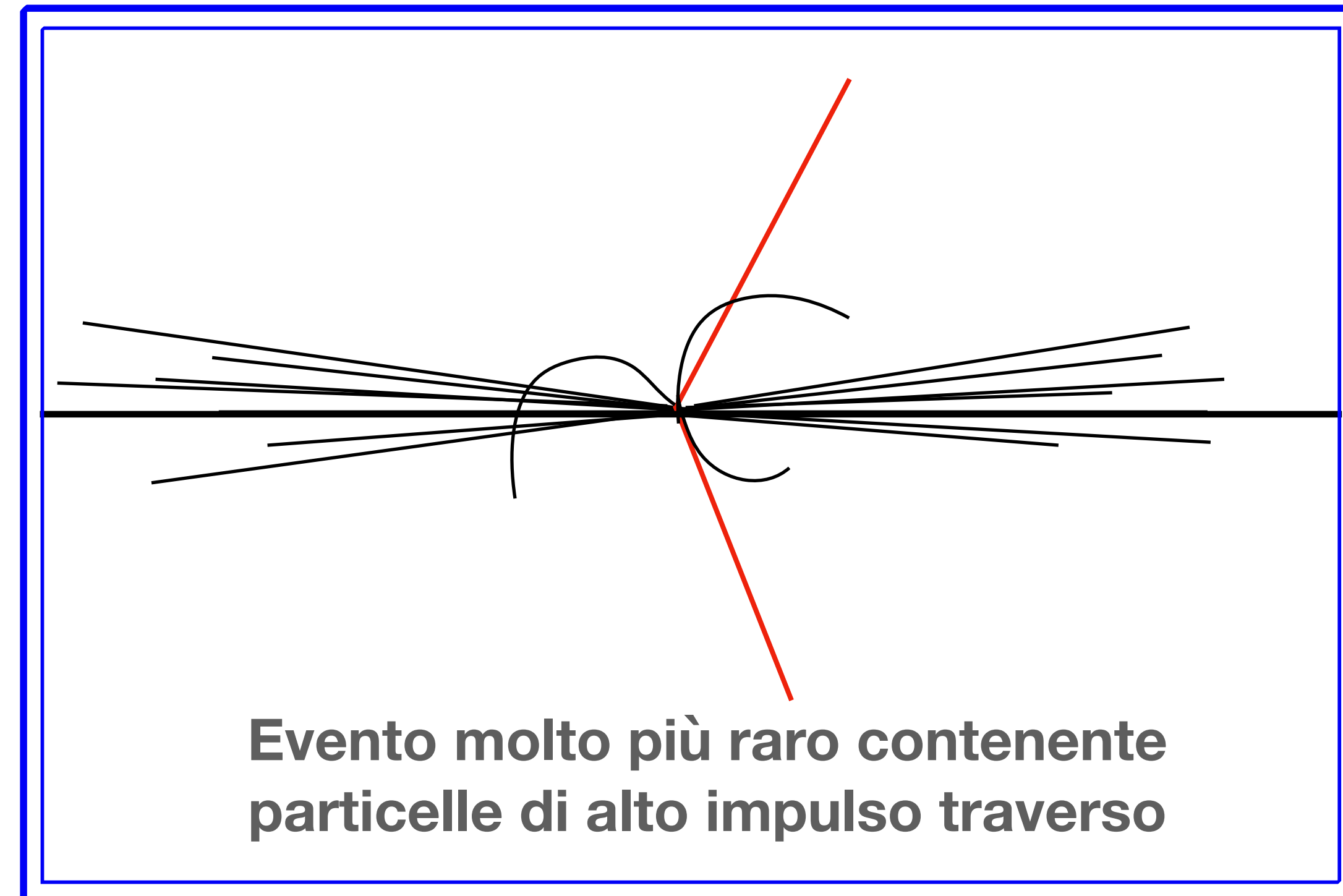
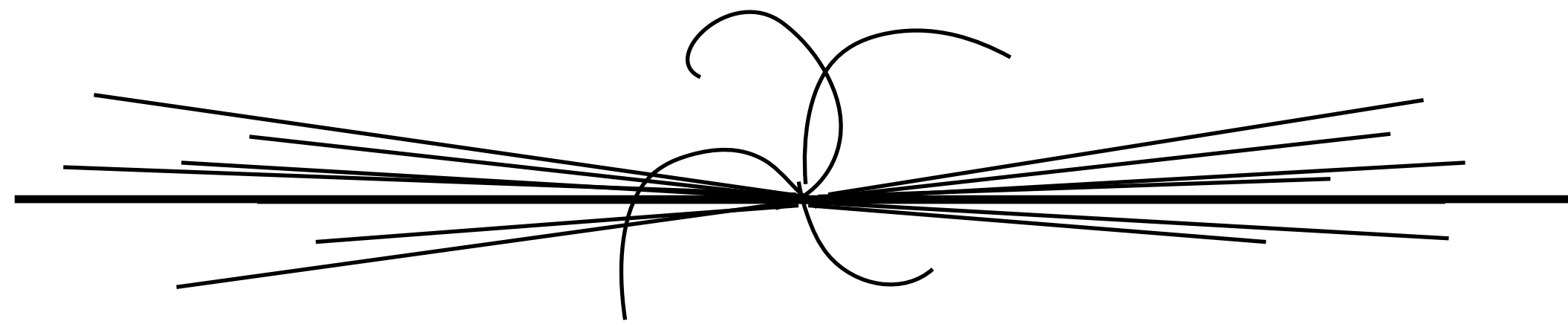
direzione fascio protoni

impulso particella

impulso trasverso

direzione fascio protoni

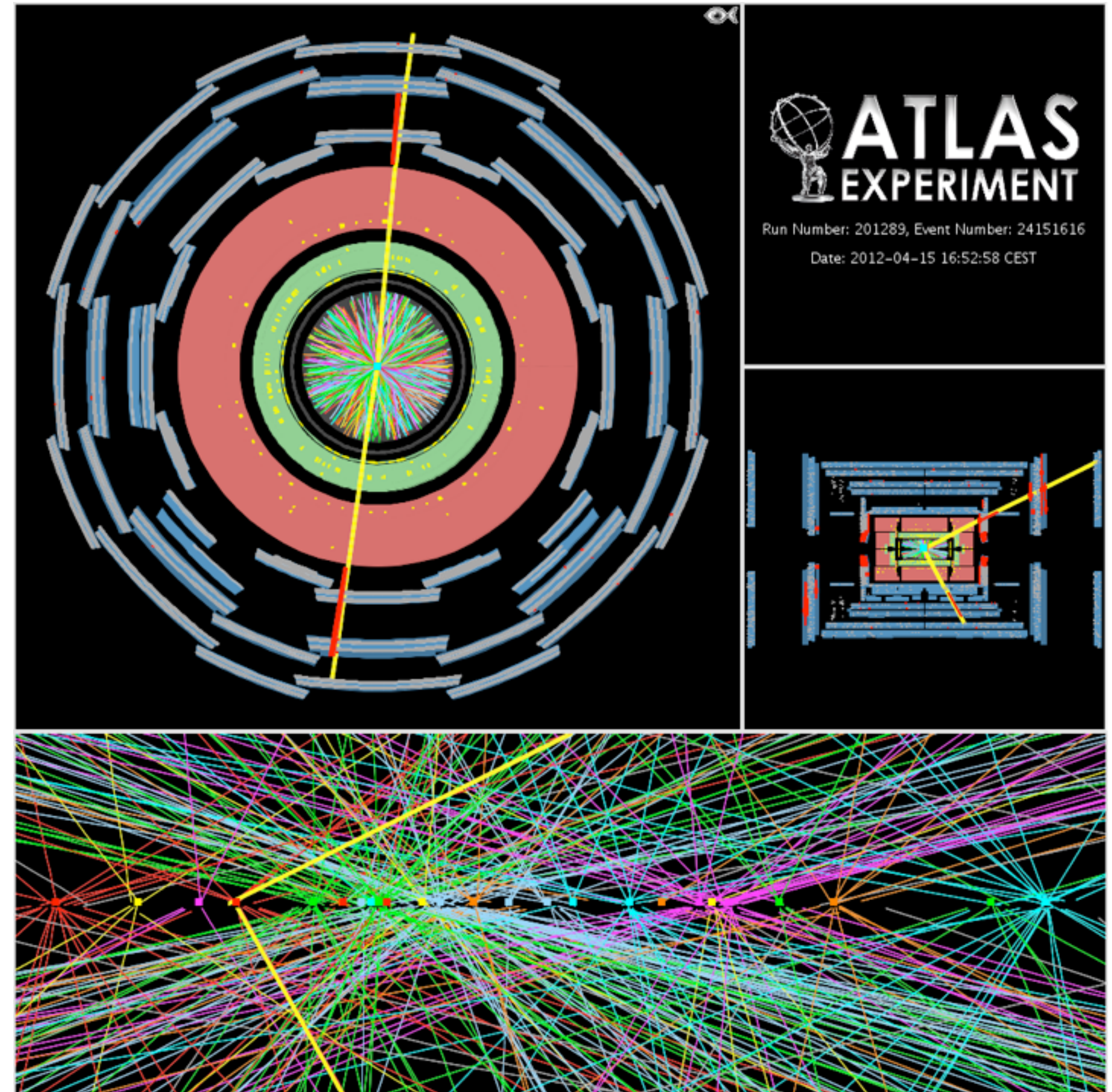
**Evento molto frequente ad LHC:
molte tracce di basso impulso trasverso**



**Evento molto più raro contenente
particelle di alto impulso trasverso**

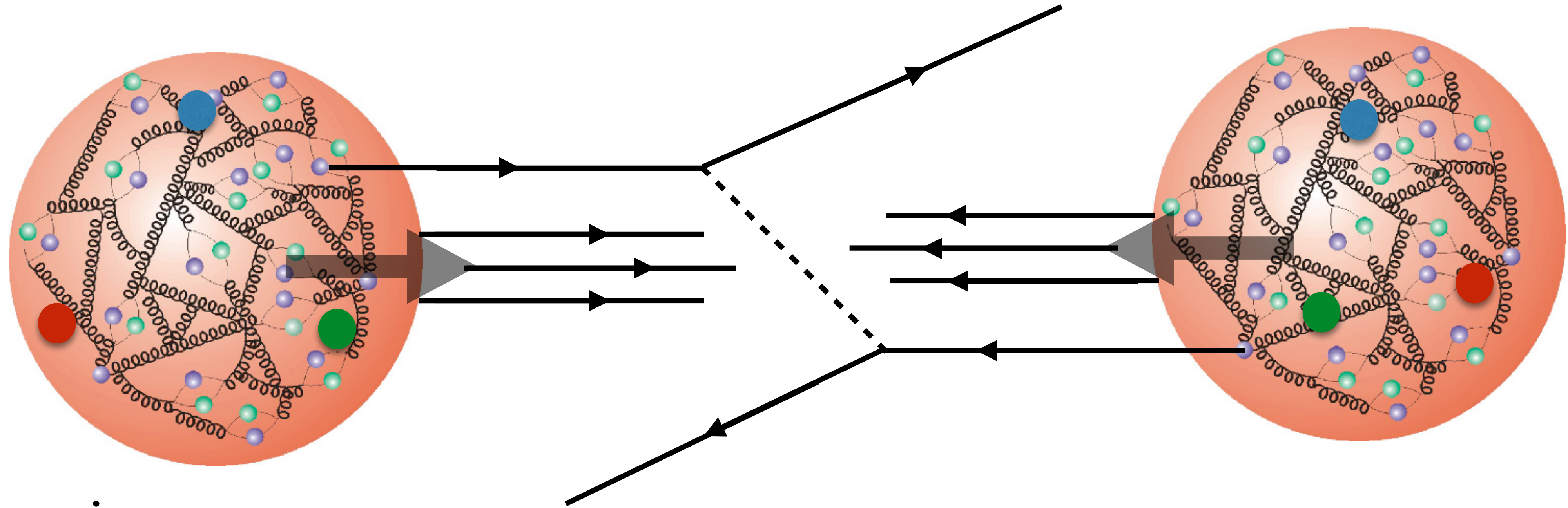
Qualche dettaglio in piu' su LHC

- ▶ protoni immagazzinati in pacchetti
~ 100 miliardi di protoni x pacchetto
~ 2800 pacchetti che circolano
- ▶ i pacchetti si incrociano all'interno dei rivelatori ogni 25 ns (40 milioni di volte al secondo)
- ▶ per ogni incrocio ci sono piu' collisioni protone-protone
- ▶ Gli eventi interessanti sono estremamente rari, dobbiamo produrre molte collisioni per poterne avere qualcuna di interesse
- ▶ Soltanto una piccolissima frazione di tutte le collisioni viene conservata per l'analisi successiva (qualche centinaio di eventi al secondo) ➔ Sistema veloce (online) per la selezione degli eventi interessanti: **trigger**

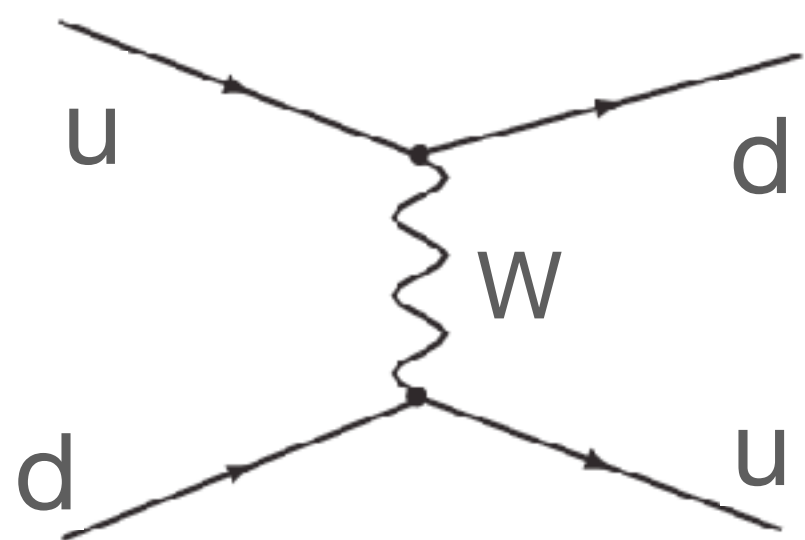


Il protone alle energie di LHC ha una struttura complessa

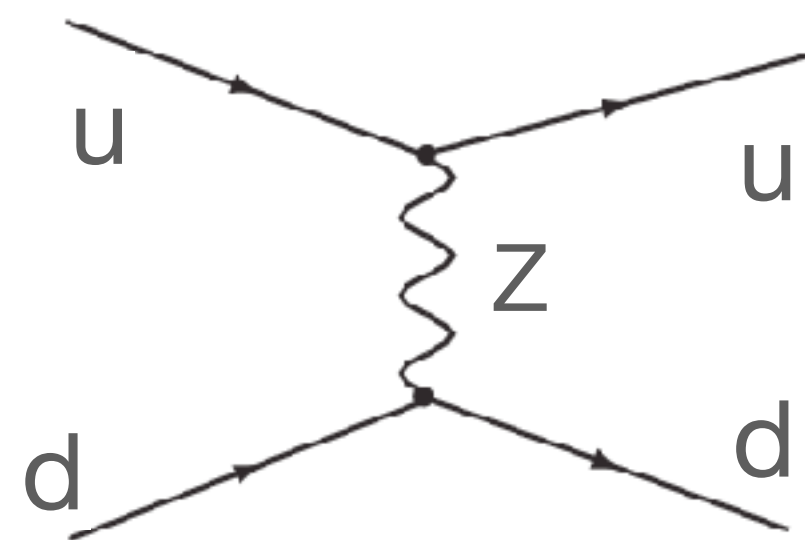
collisioni tra le componenti del protone quark e gluoni



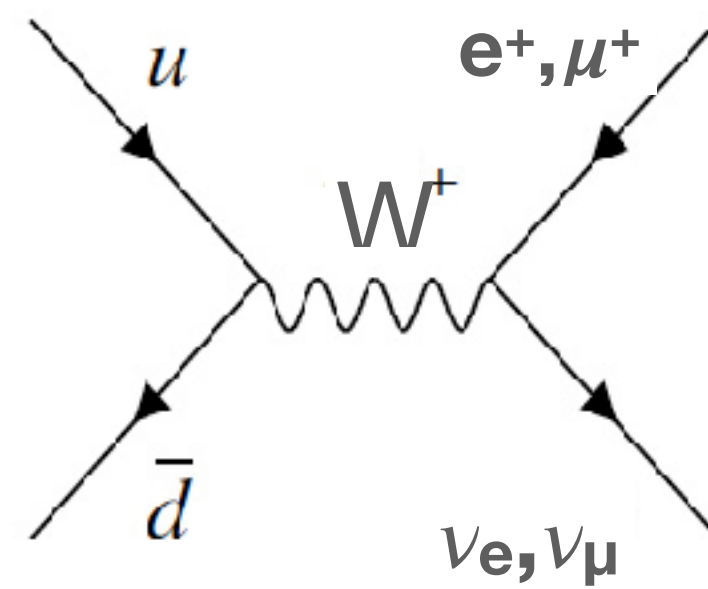
alcuni esempi:



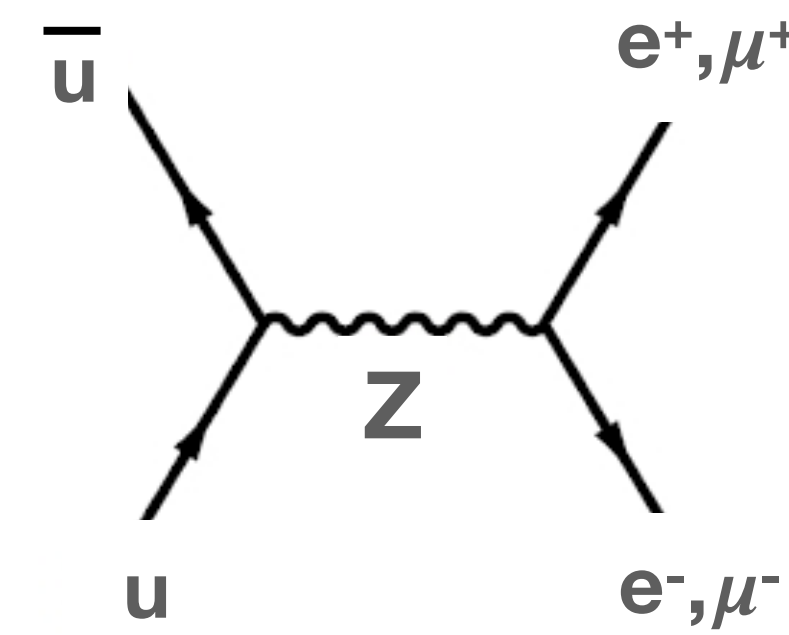
scambio W



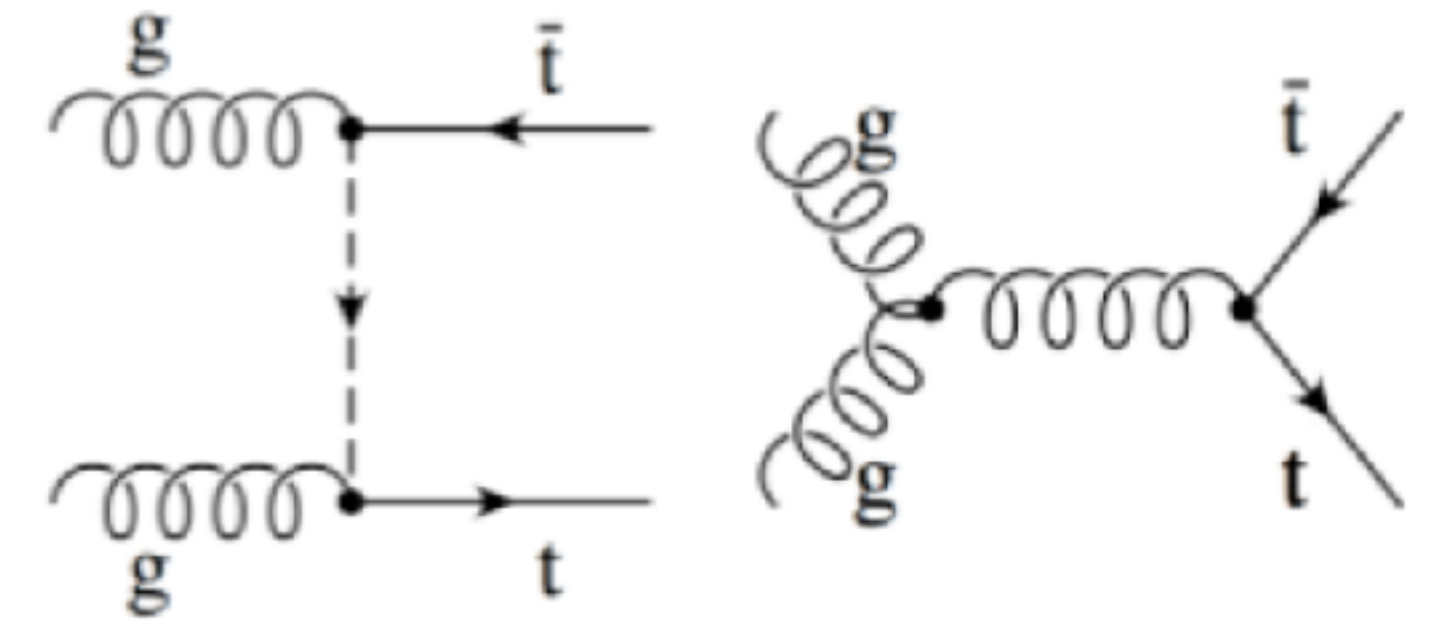
scambio Z



produzione W

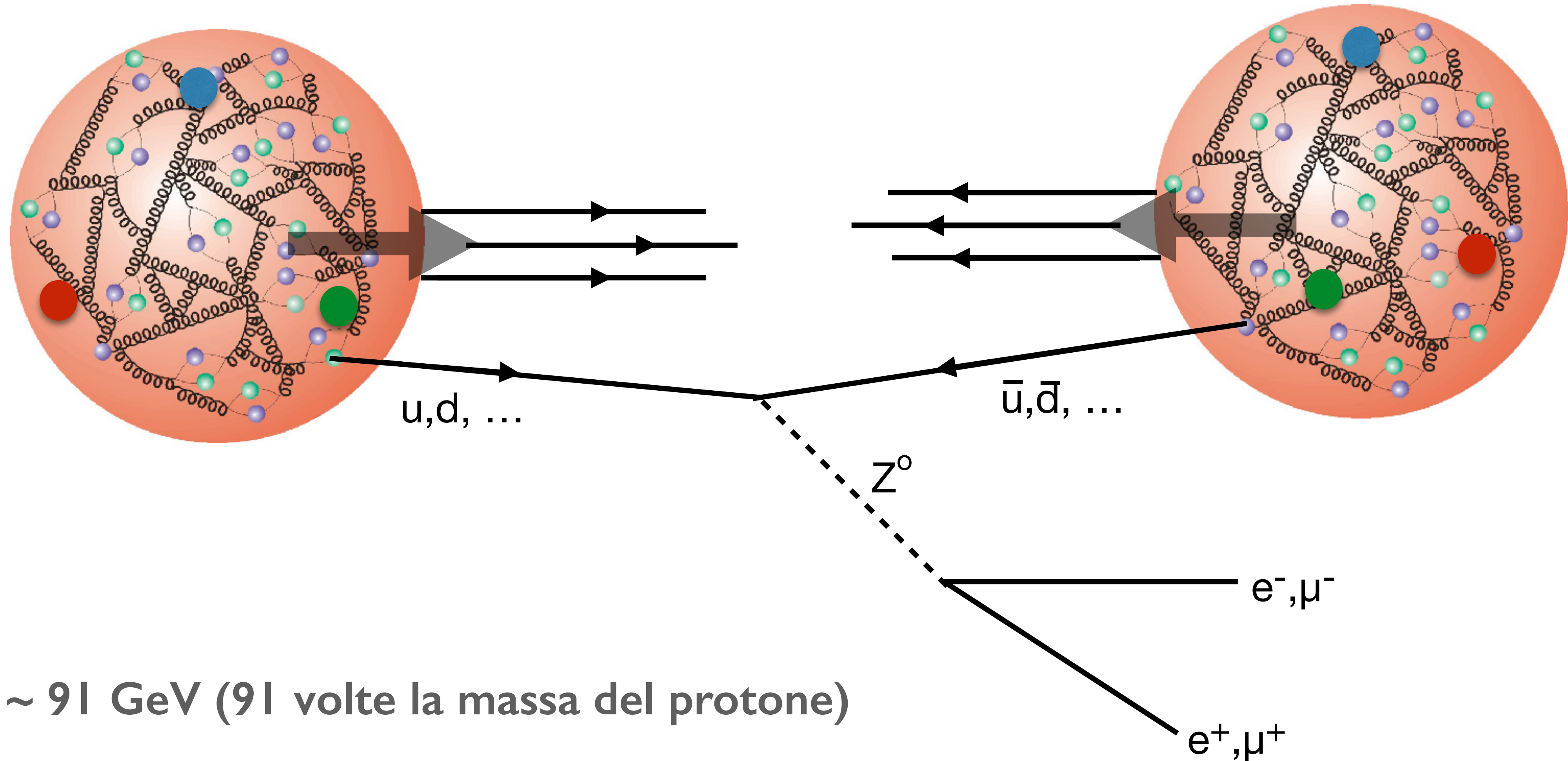


produzione Z



collisioni gluone-gluone

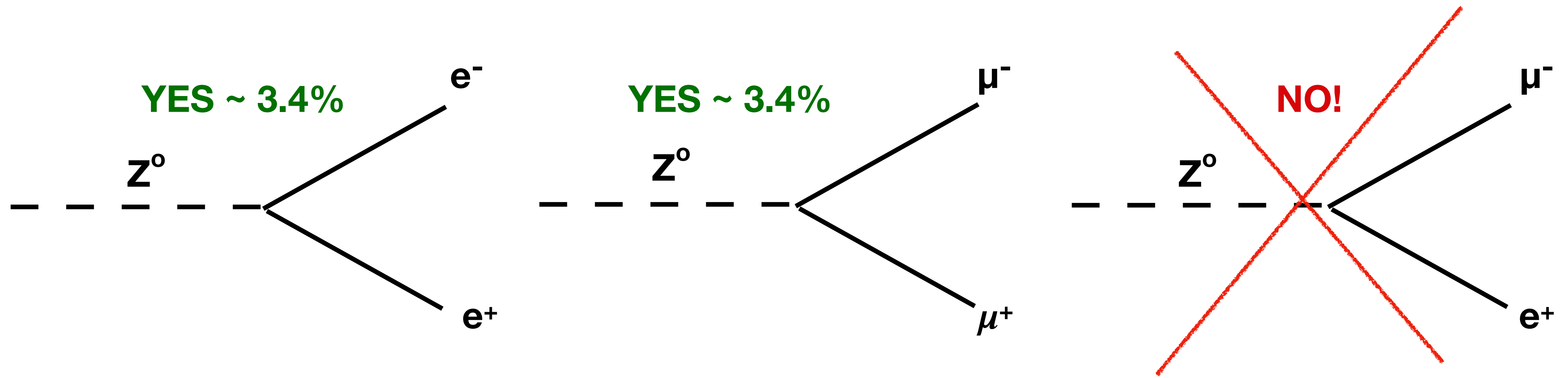
Mediatore interazione debole neutra: Z^0



- ▶ Massa ~ 91 GeV (91 volte la massa del protone)
- ▶ Non la osserviamo direttamente (vive per un tempo brevissimo $\sim 10^{-25}$ s)
- ▶ La sua presenza è indicata dallo studio dei prodotti di decadimento

Decadimento della Z^0

La Z^0 vive pochissimo e poi decade trasformandosi in coppie di particella-antiparticella (es: elettrone-antielettrone oppure muone-antimuone ~ 3% dei casi ciascuno)



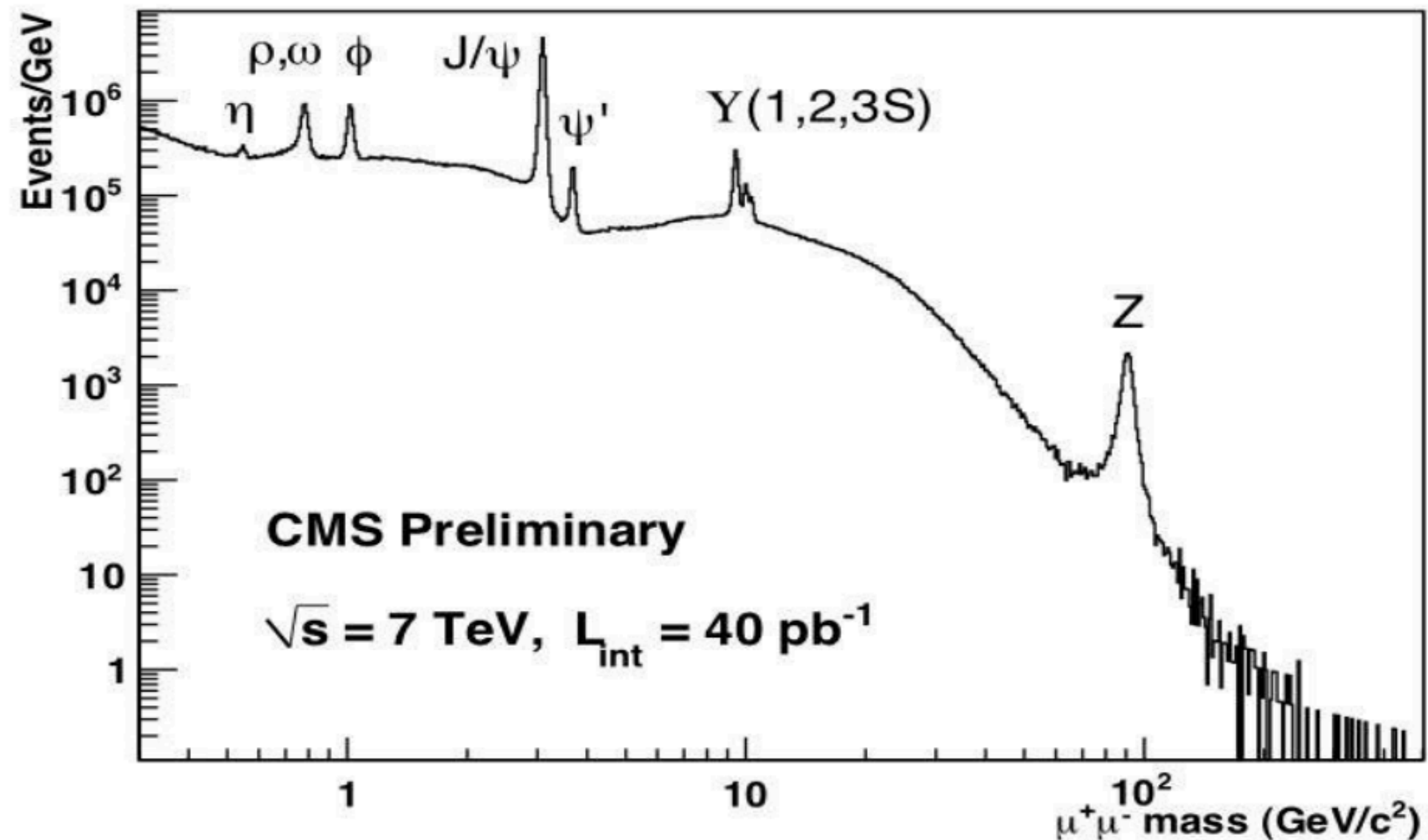
Massa invariante:

$$m^2 = (E_1/c^2 + E_2/c^2)^2 - (\vec{p}_1/c + \vec{p}_2/c)^2$$

Consente di risalire alla massa a riposo della particella madre dalla misura di energia ed impulso dei prodotti di decadimento

Nell'esercitazione troverete coppie di elettroni e muoni

La misura della massa invariante di queste coppie contiene il “ricordo” del fatto che esse sono state prodotte dal decadimento della Z o di altre particelle

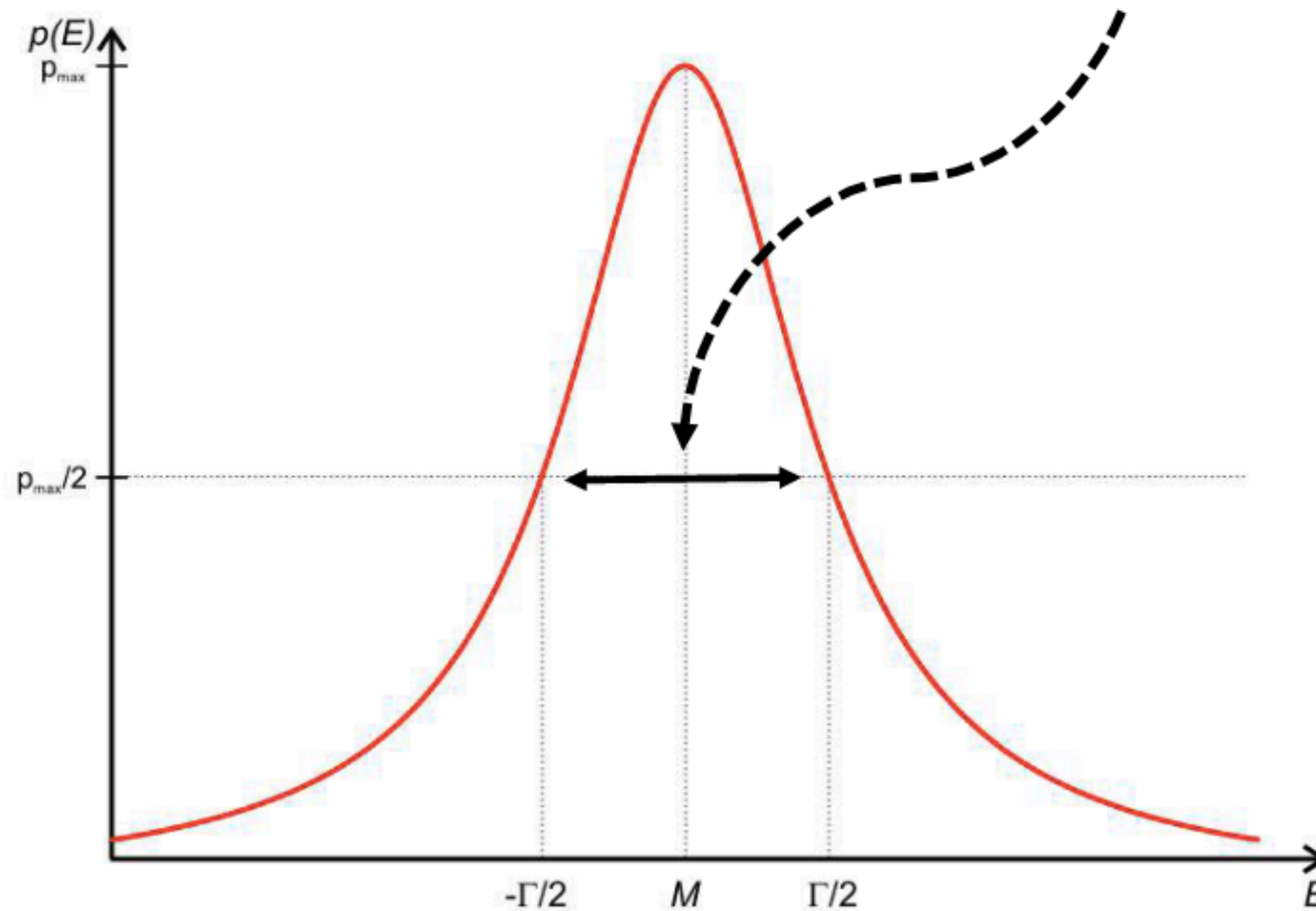


Le coppie possono anche essere prodotte da processi diversi dal decadimento di una particella ed in questo caso non si concentrano attorno ad una massa precisa

Perche' non si osserva una massa ben precisa ?

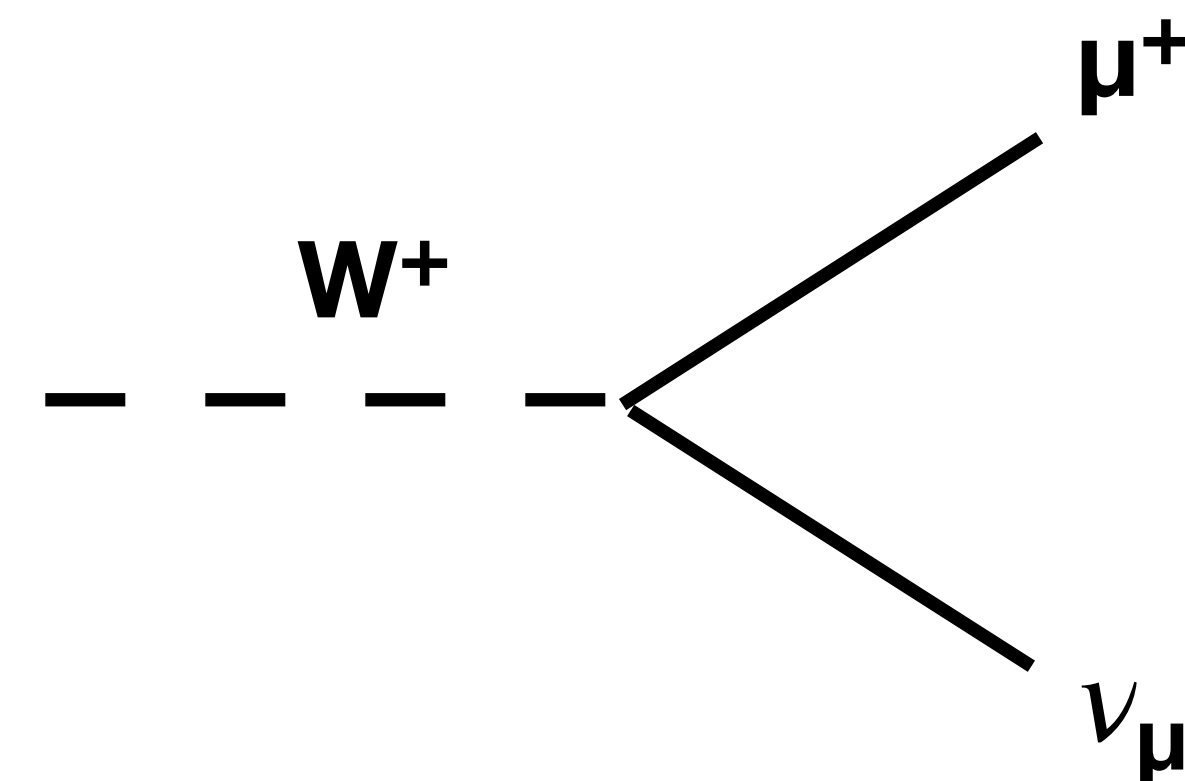
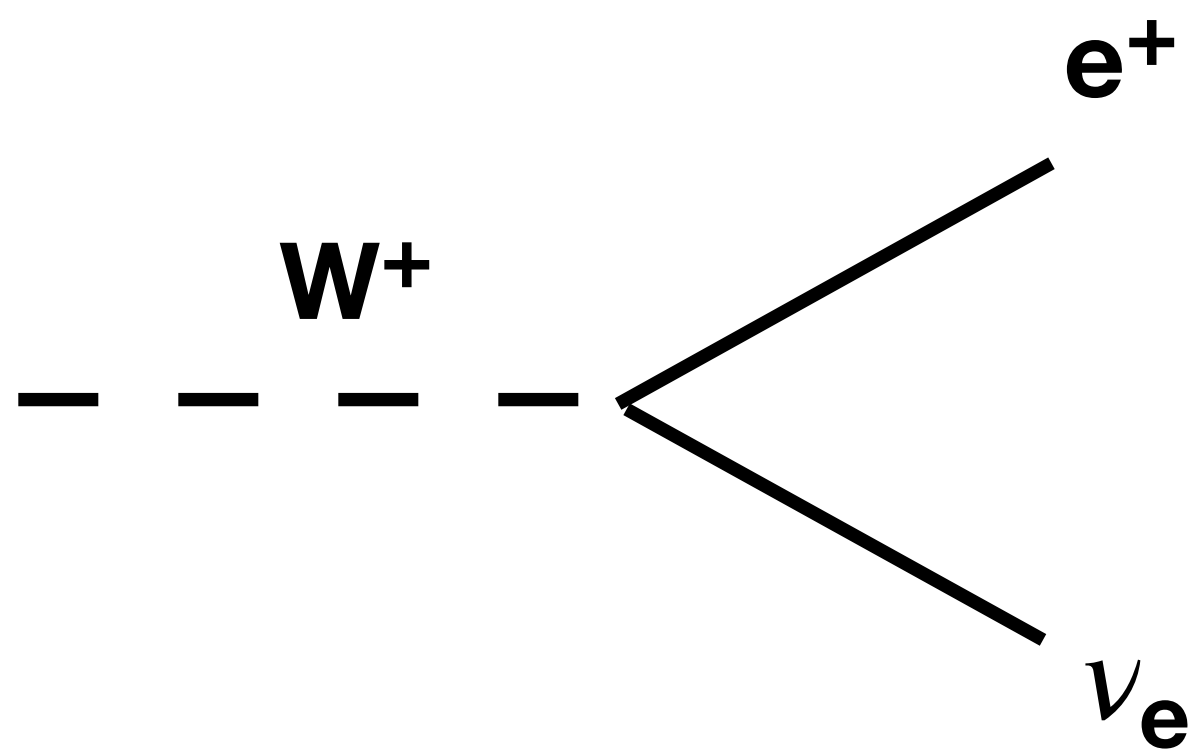
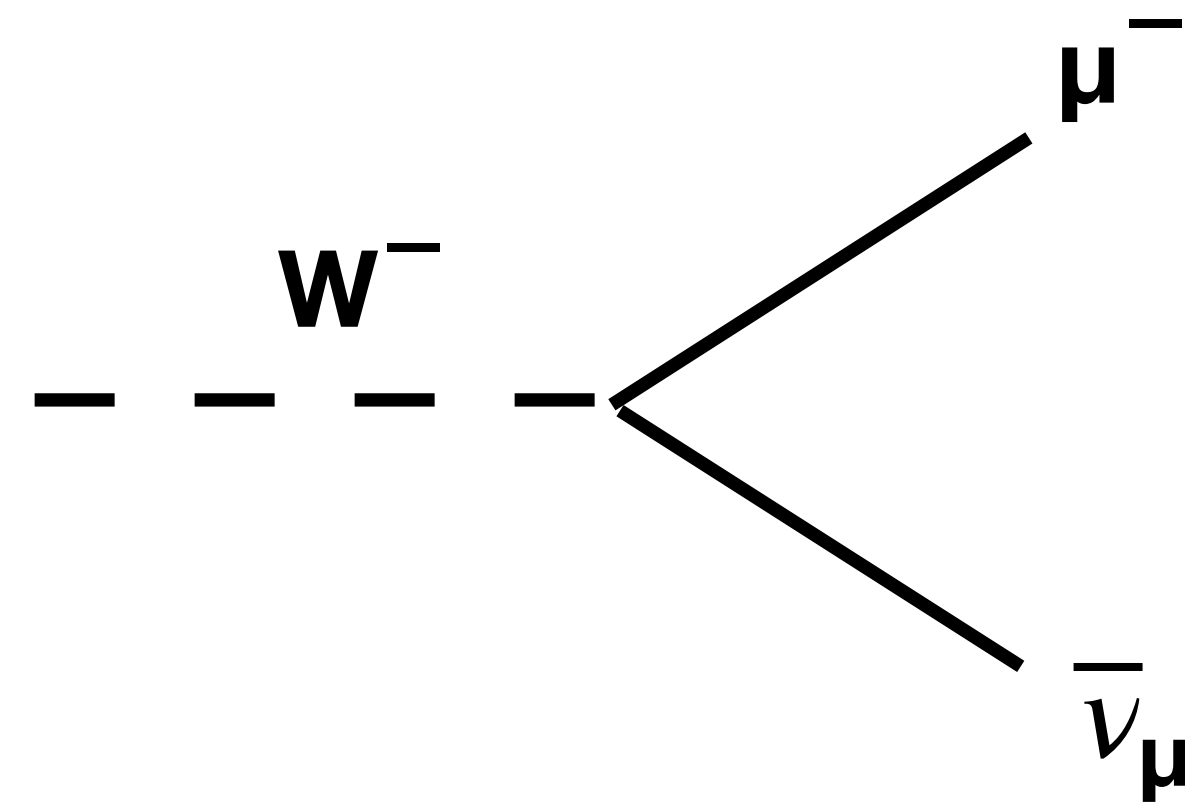
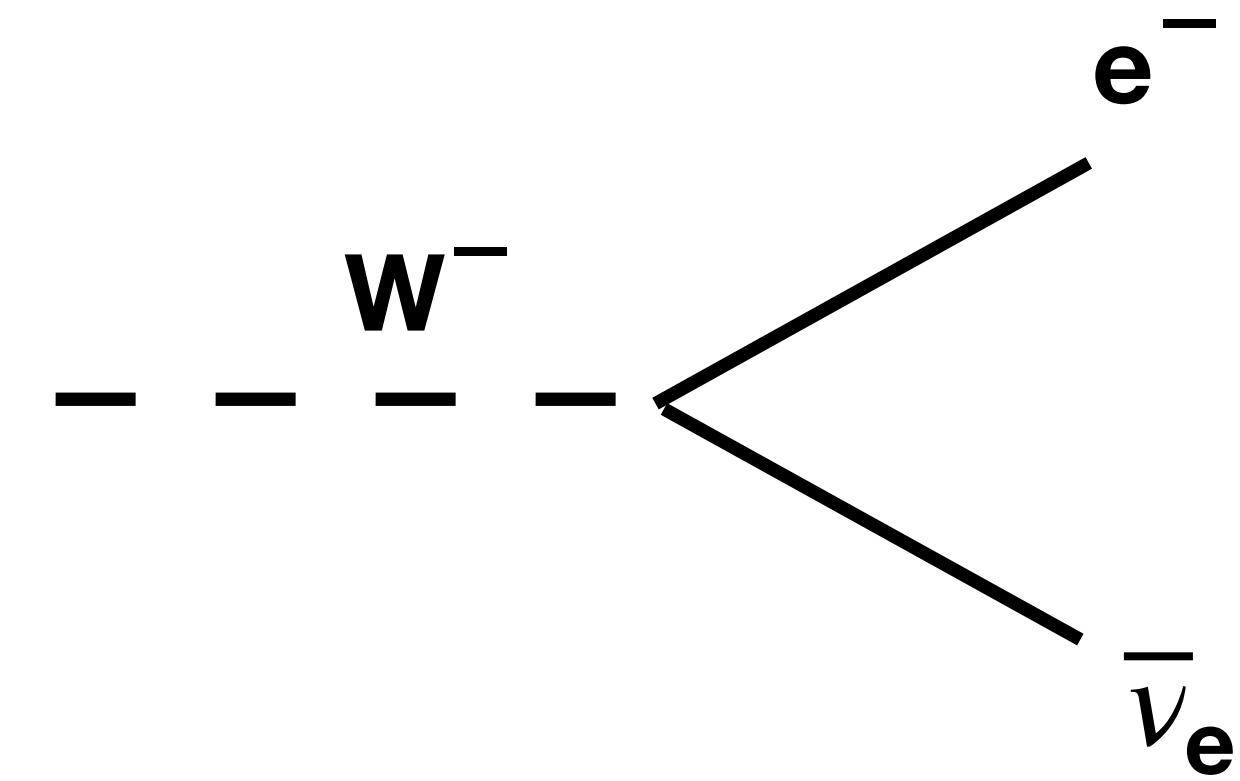
Particella che “nasce e muore” in un tempo brevissimo:
la sua massa (energia) è quindi indeterminata

Principio di indeterminazione di Heisenberg: $\Delta t \cdot \Delta M > \hbar$



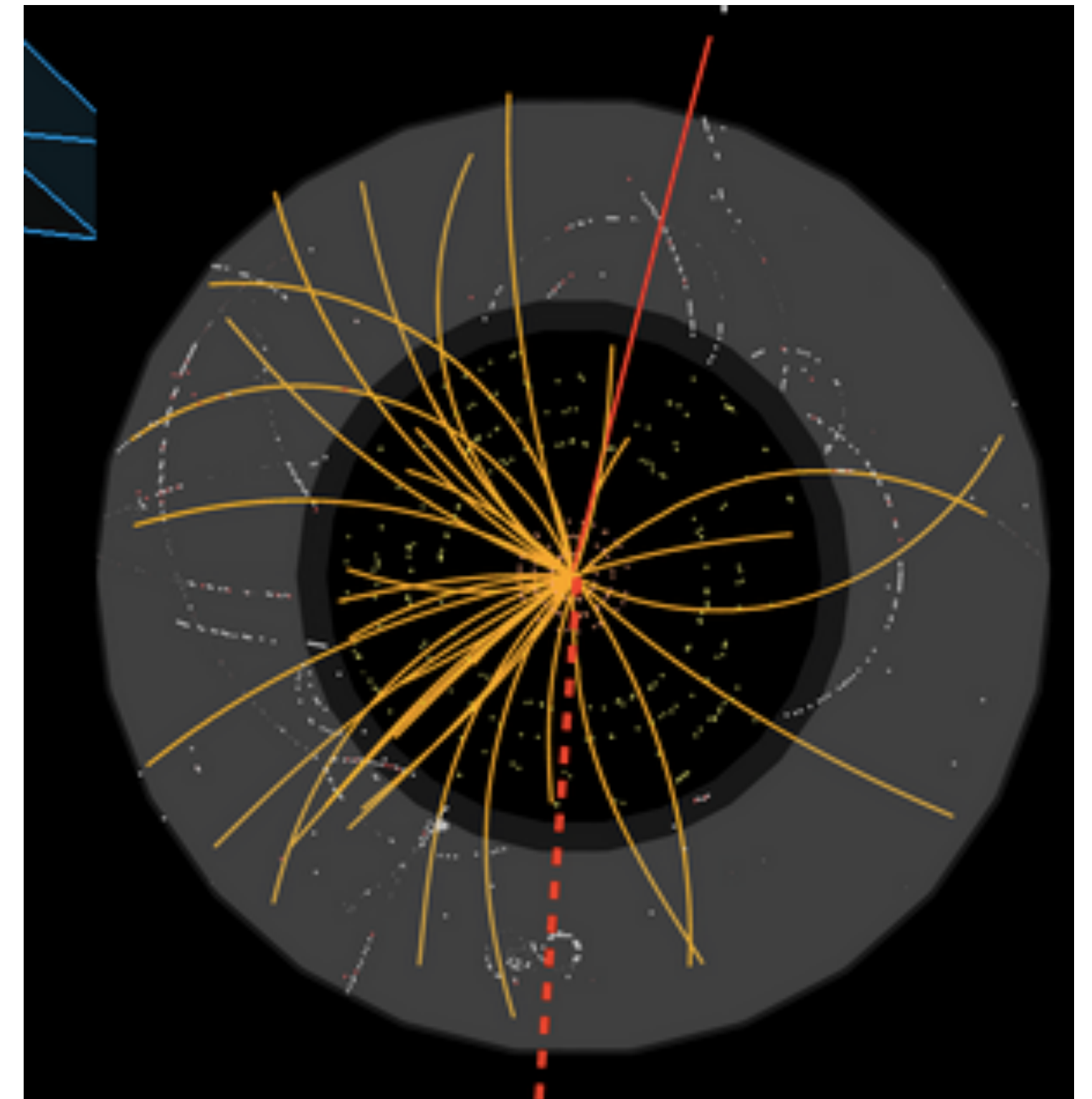
Altri processi che possono produrre uno o più leptoni (e/μ)

Decadimento W



La carica del leptone indica la carica del W

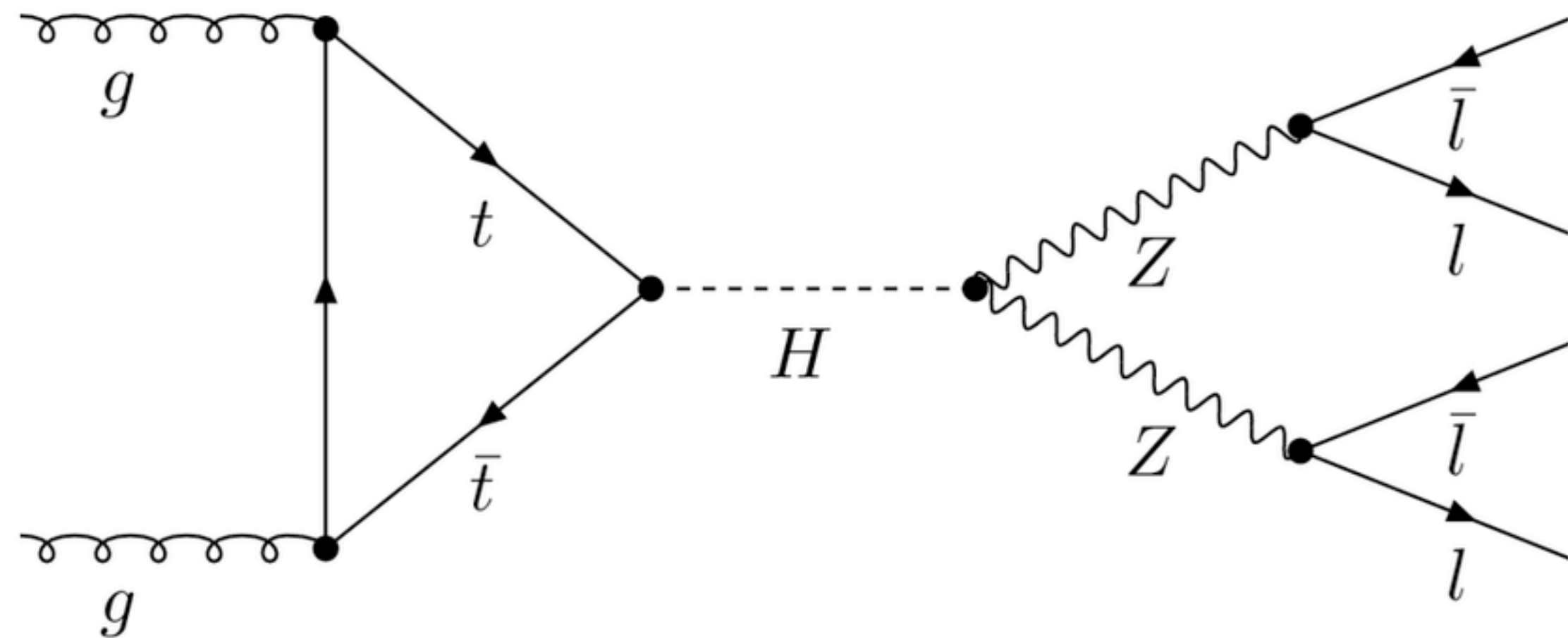
Il neutrino attraversa il rivelatore senza rilasciare alcun segnale:
la sua presenza e' segnalata dall'energia mancante



Altri processi che possono produrre uno o più leptoni (e/μ)

Bosone di Higgs (spin 0)

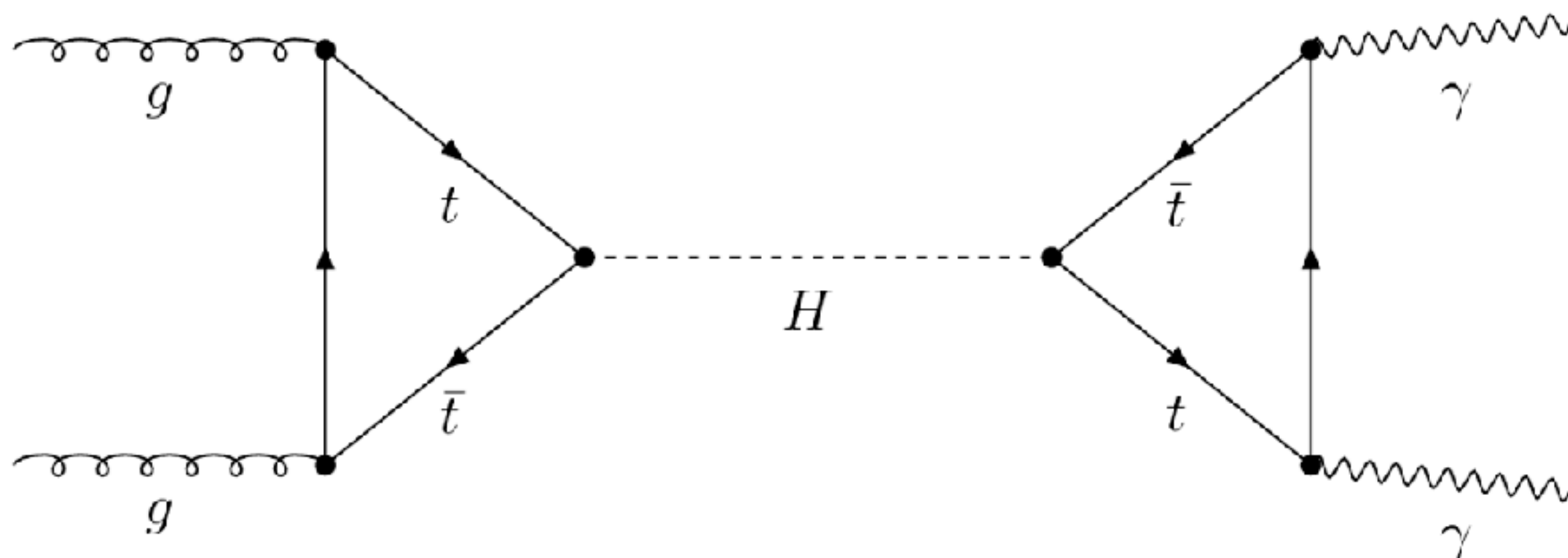
decade in coppie di Z (~2.5% dei casi)



Le particelle fondamentali acquistano massa grazie alla loro interazione con il campo di Higgs

Stati finali con 4 elettroni, 4 muoni,
o 2 elettroni e 2 muoni

può anche decadere in coppie di fotoni (~0.2% dei casi)

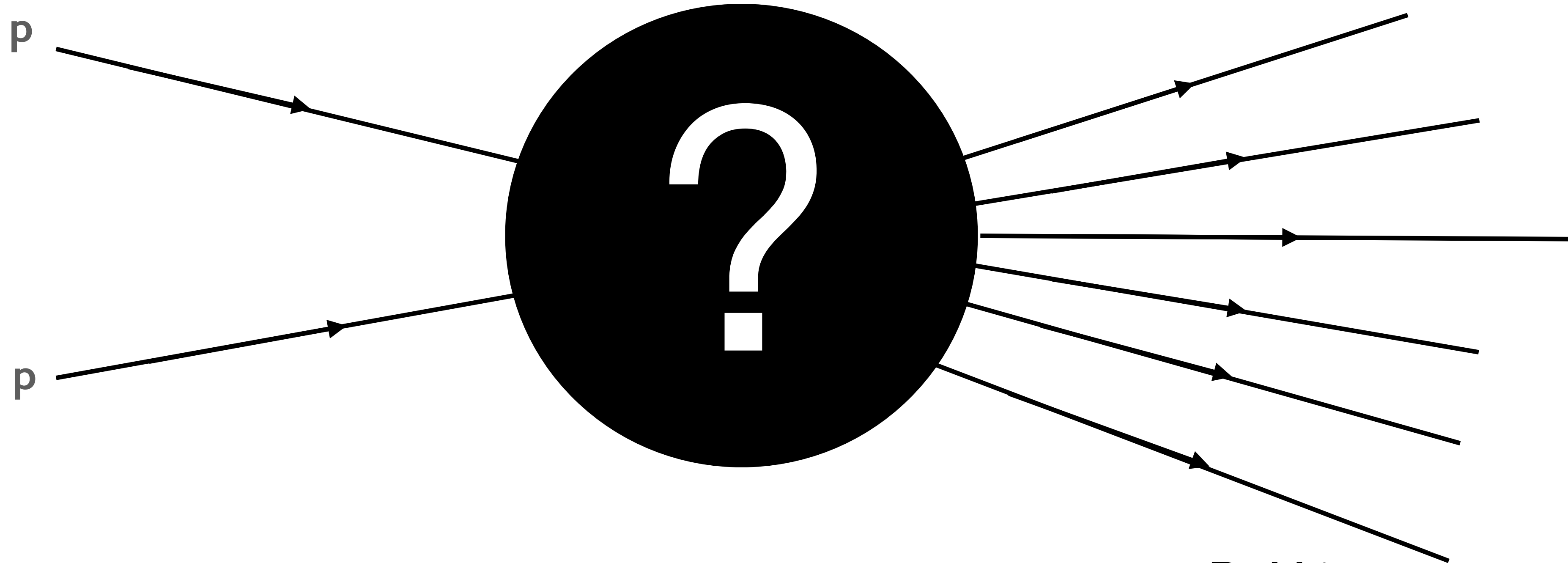


Stati finali con 2 fotoni

Eventi di fondo

Stato iniziale

Stato finale



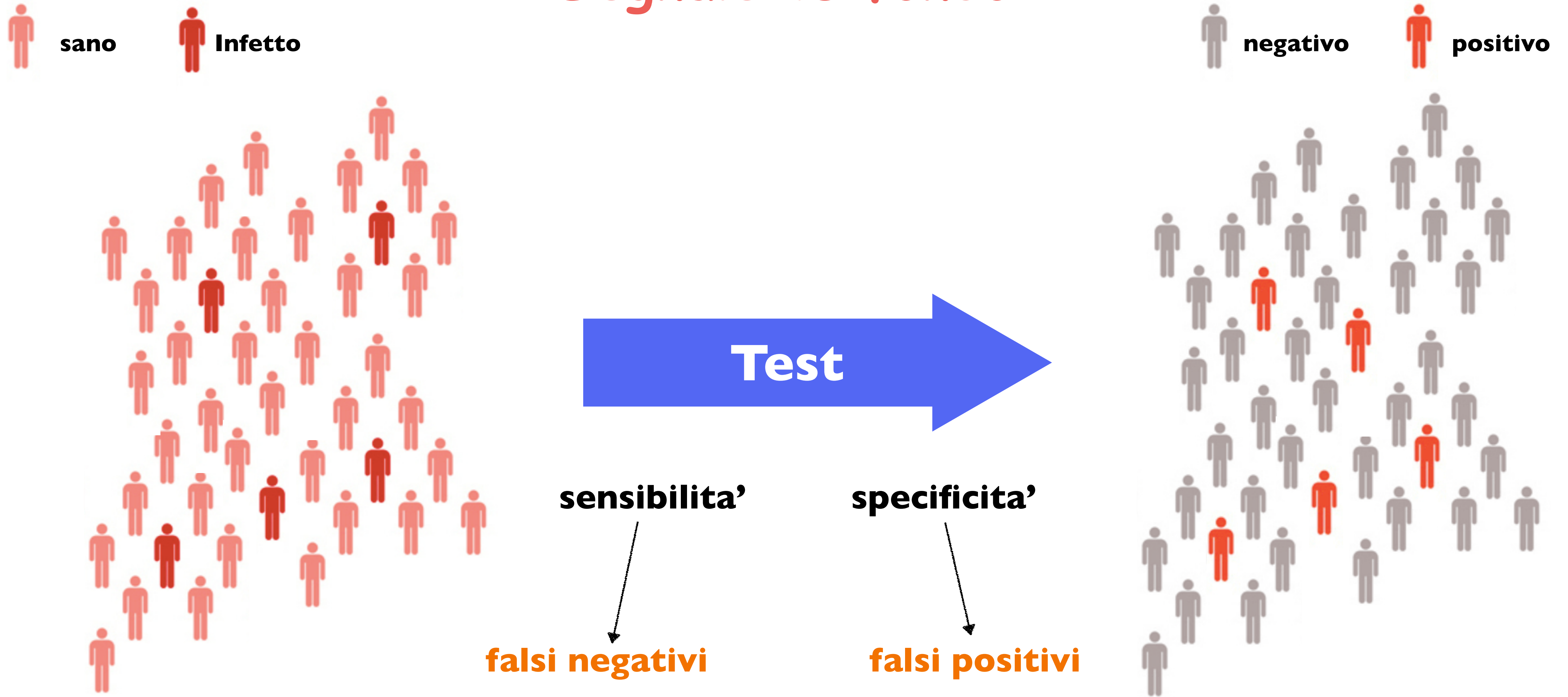
Conosciamo lo stato iniziale:
protoni di energia nota

Non abbiamo accesso a quanto
accade nella collisione

Dobbiamo cercare di capirlo
dalla misura delle particelle
nello stato finale

➔ **Molti processi differenti possono produrre stati finali simili o identici
eventi di fondo che complicano la misura del segnale che vogliamo identificare**

Segnale vs fondo



Segnale vs fondo

esempio numerico



sensibilita' $\rightarrow 1$
 specificita' $\rightarrow 1 - 1/1000$



$P(\text{Infetto} | +)$?

screening 100K individui

incidenza dell'infezione nella popolazione

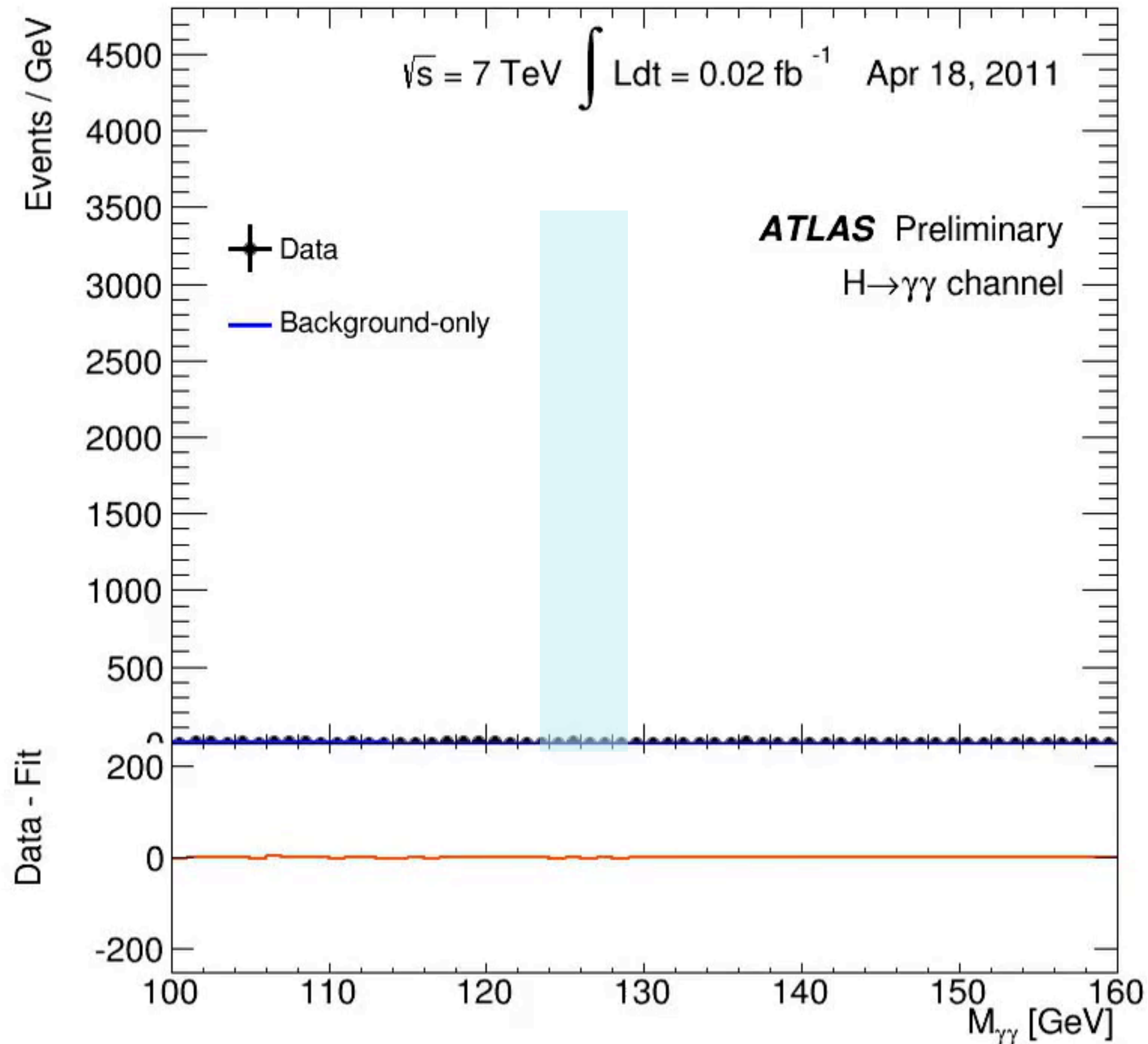
1/100

positivi $\rightarrow \sim 1000 + \sim 100 \rightarrow P(\text{Infetto}|+) \sim 1000/1100 \sim 0.9$

1/10000

positivi $\rightarrow \sim 10 + \sim 100 \rightarrow P(\text{Infetto}|+) \sim 10/110 \sim 0.09$

Identificazione del segnale dell'Higgs in stati finali con due fotoni



Non e' detto che i decadimenti piu' frequenti siano i migliori.

$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad 0.2\% \text{ dei casi}$$

Occorre anche considerare i disturbi da processi con stati finali simili

Esercitazione

Nell'esercitazione vi verranno sottoposti eventi "reali" di collisioni protone protone ad LHC. Voi dovrete identificare elettroni, muoni e fotoni e cercare di capire se sono stati originati dal decadimento di altre particelle

$Z \rightarrow 2$ elettroni o 2 muoni

Higgs \rightarrow 2 fotoni

Higgs \rightarrow 4 leptoni ($4e$, 4μ , $2e+2\mu$)

- Discutete tra di voi e siate critici
- Non abbiate paura di sbagliare, non e' un esame e nessuno vi giudica
- Ponetevi domande e chiedete chiarimenti

Lo scopo dell'esercizio è quello di avvicinarvi al mondo della fisica delle particelle in modo stimolante e (speriamo) divertente