

RICERCA DI NUOVE RISONANZE AL LHC

Daniele del Re

Sapienza Università & INFN Sezione Roma & CERN



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



INTRODUZIONE

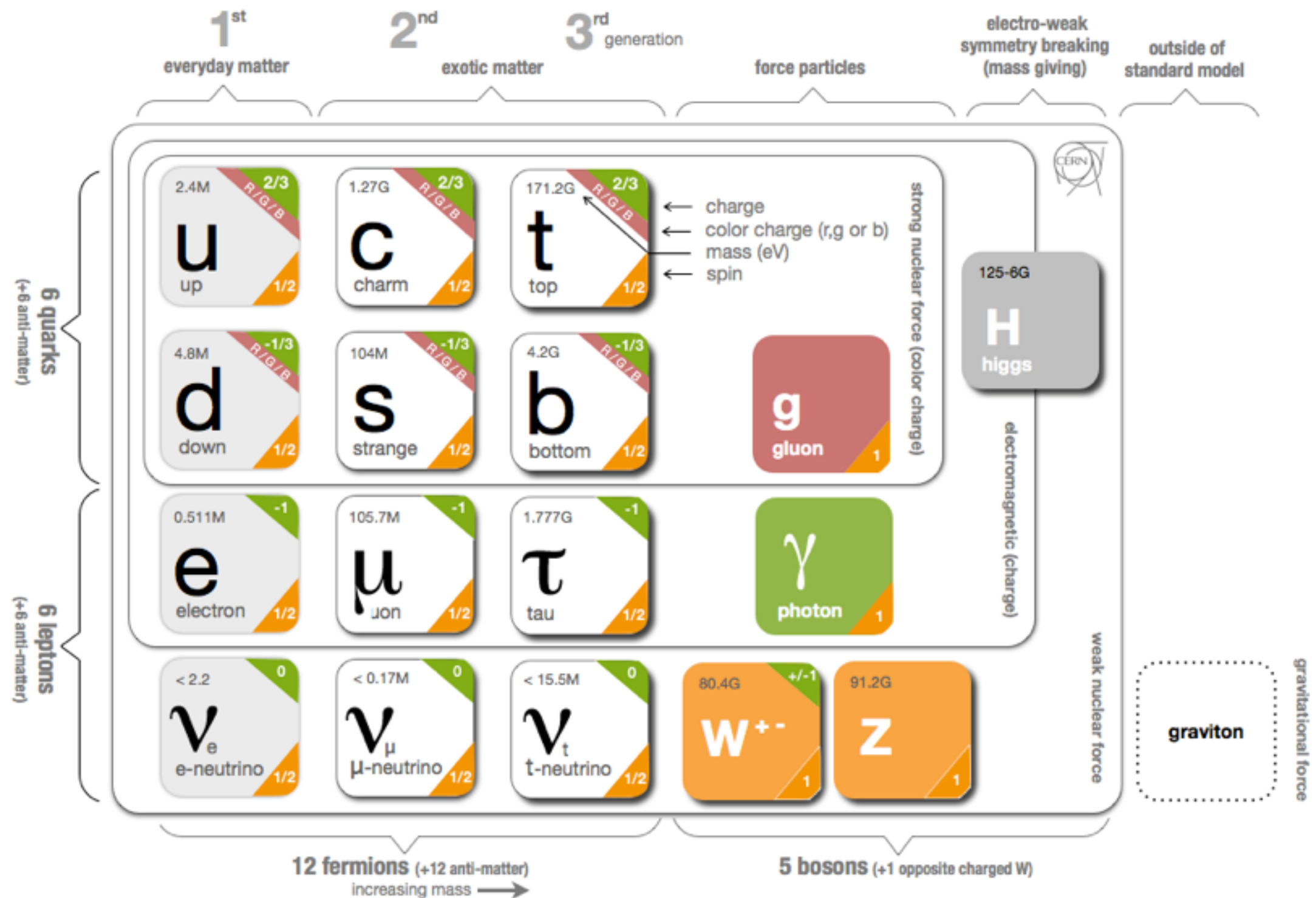
- **Cosa e' una risonanza che si cerca ad LHC?**

particella elementare nuova molto massiva che decade in particelle del modello standard, le cui caratteristiche possono essere misurate sperimentalmente

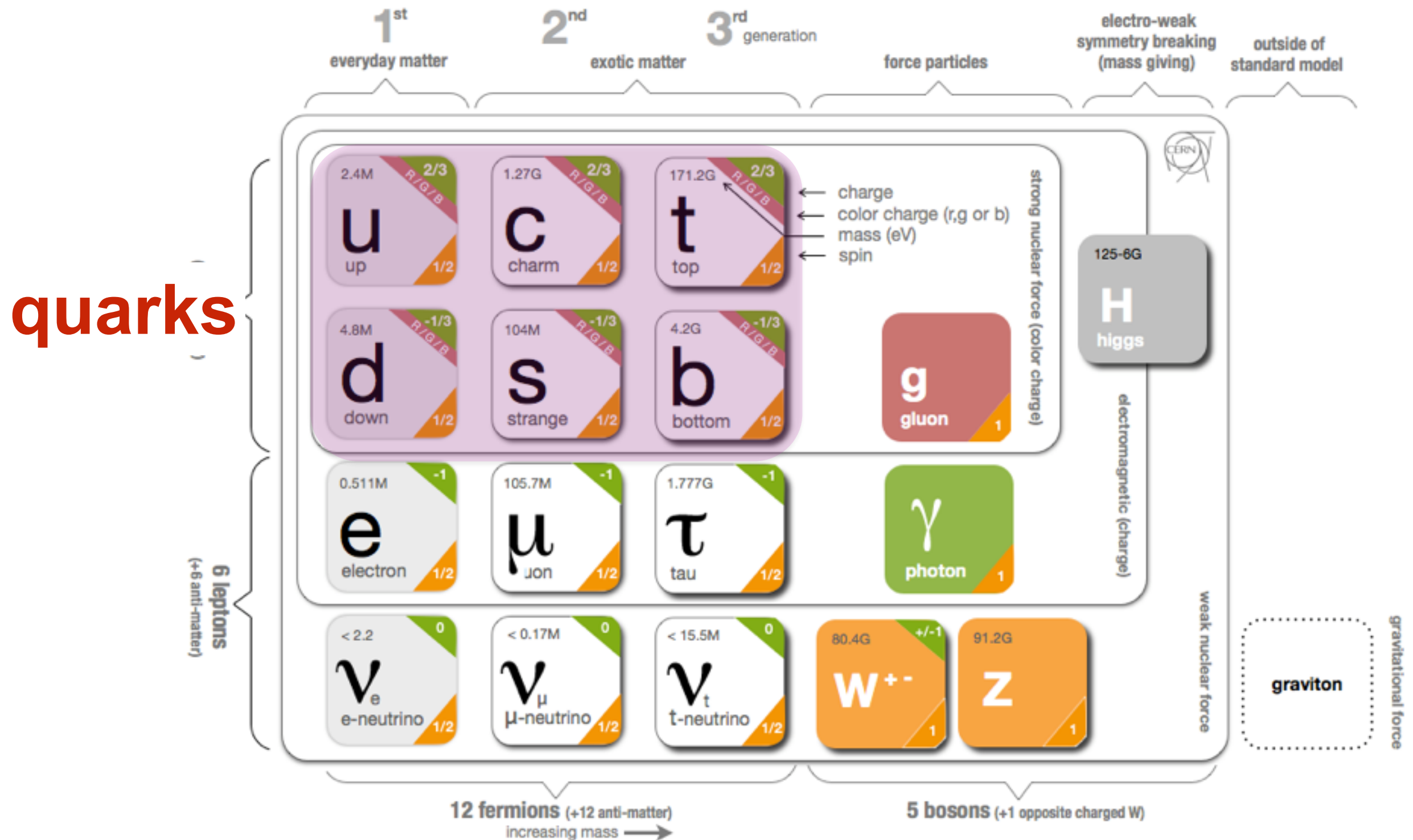
- **In sommario tratterò tre argomenti:**
 - perché si cercano nuove risonanze?
 - cosa esattamente si cerca?
 - come si cercano?

PERCHE' SI
CERCANO
NUOVE
RISONANZE

MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI

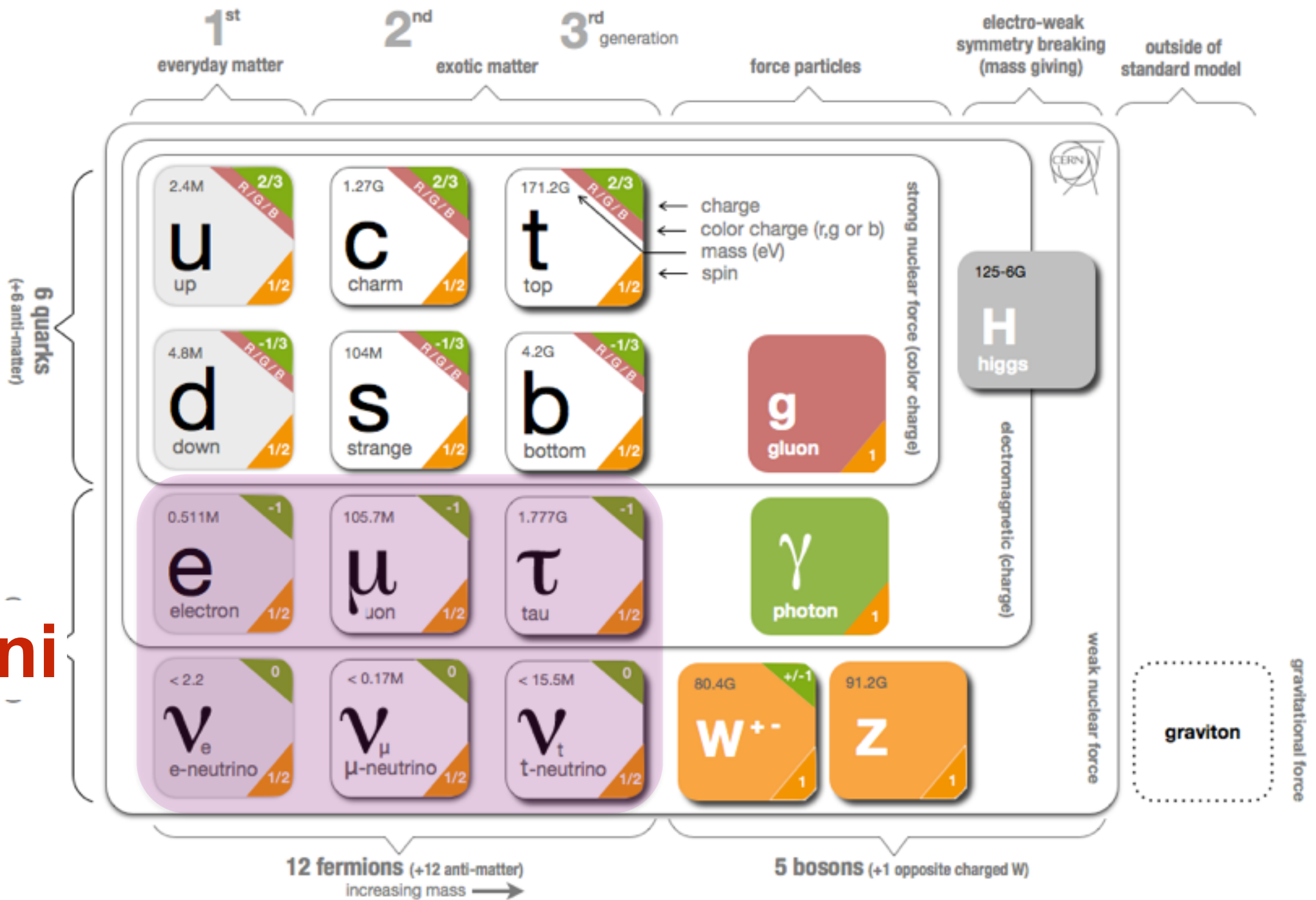


MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI



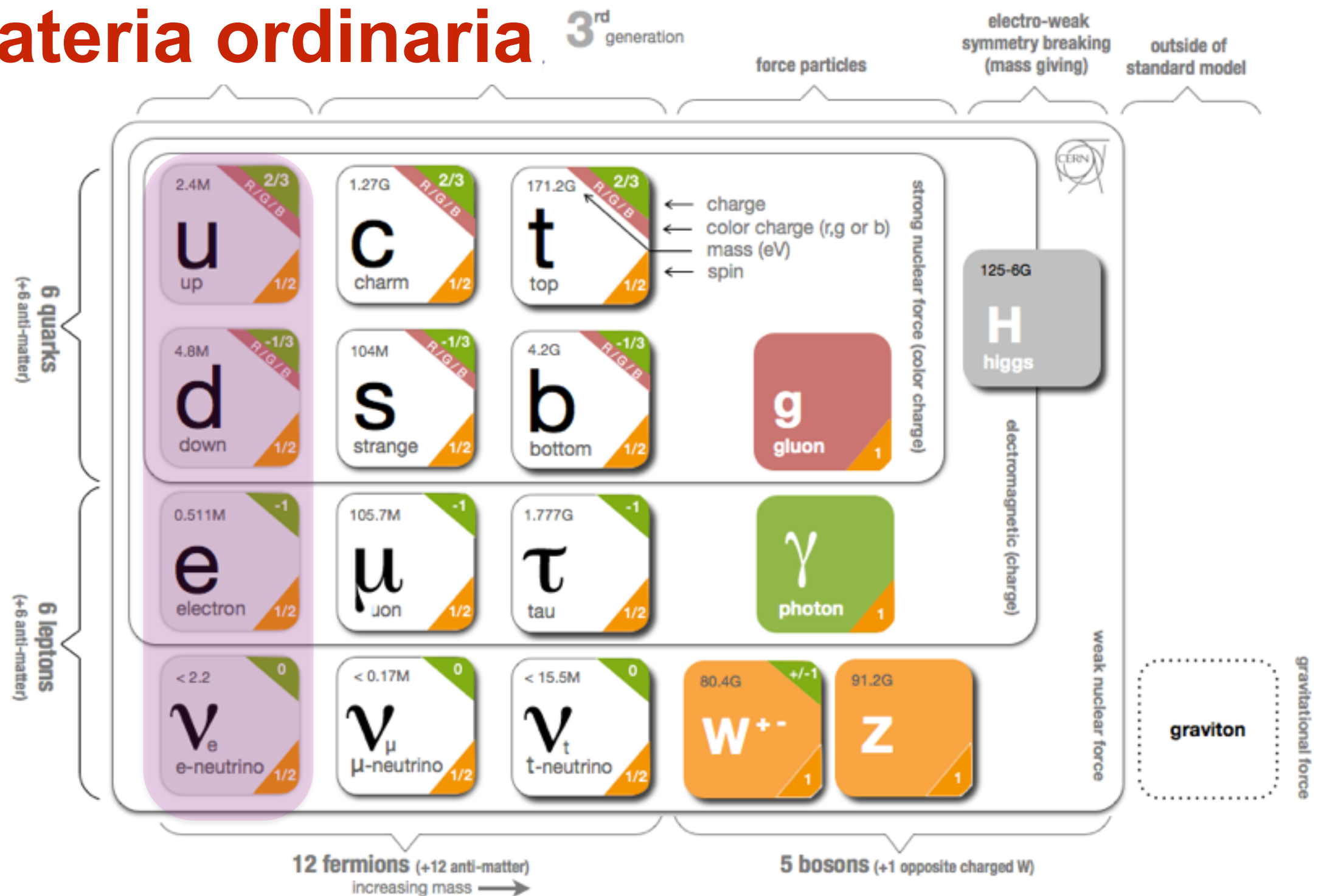
MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI

leptoni



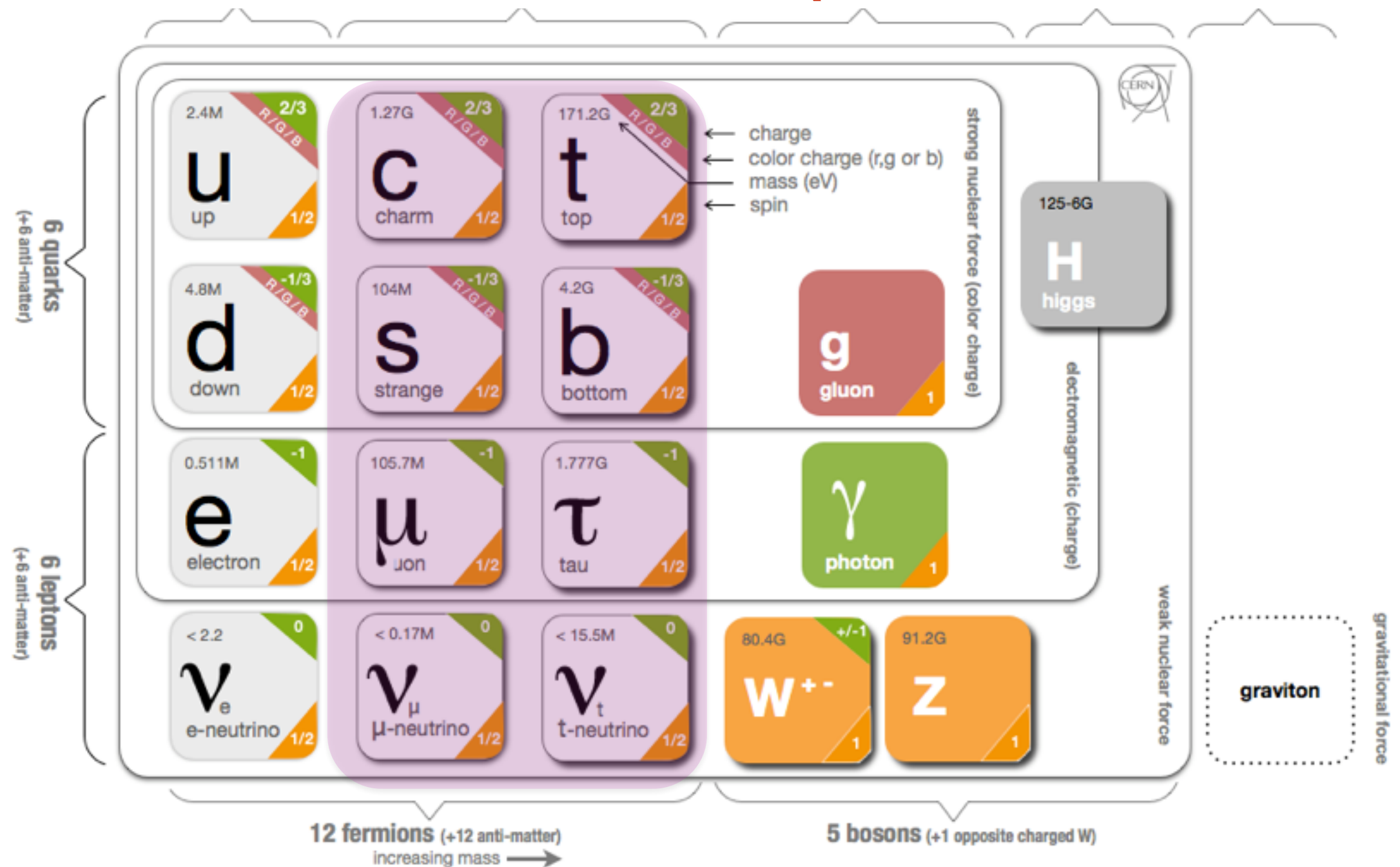
MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI

materia ordinaria

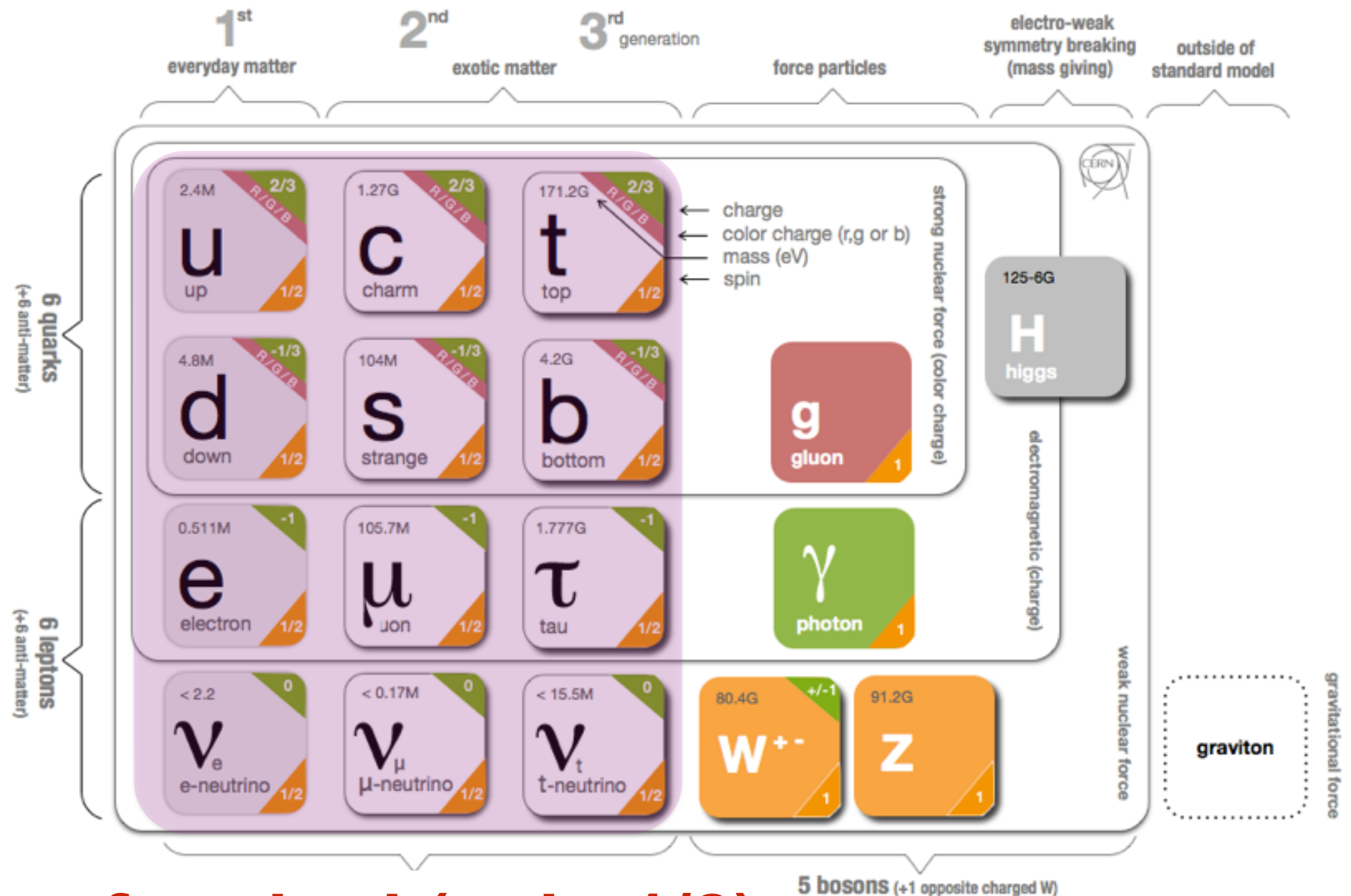


MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI

materia esotica (~prodotta in lab)

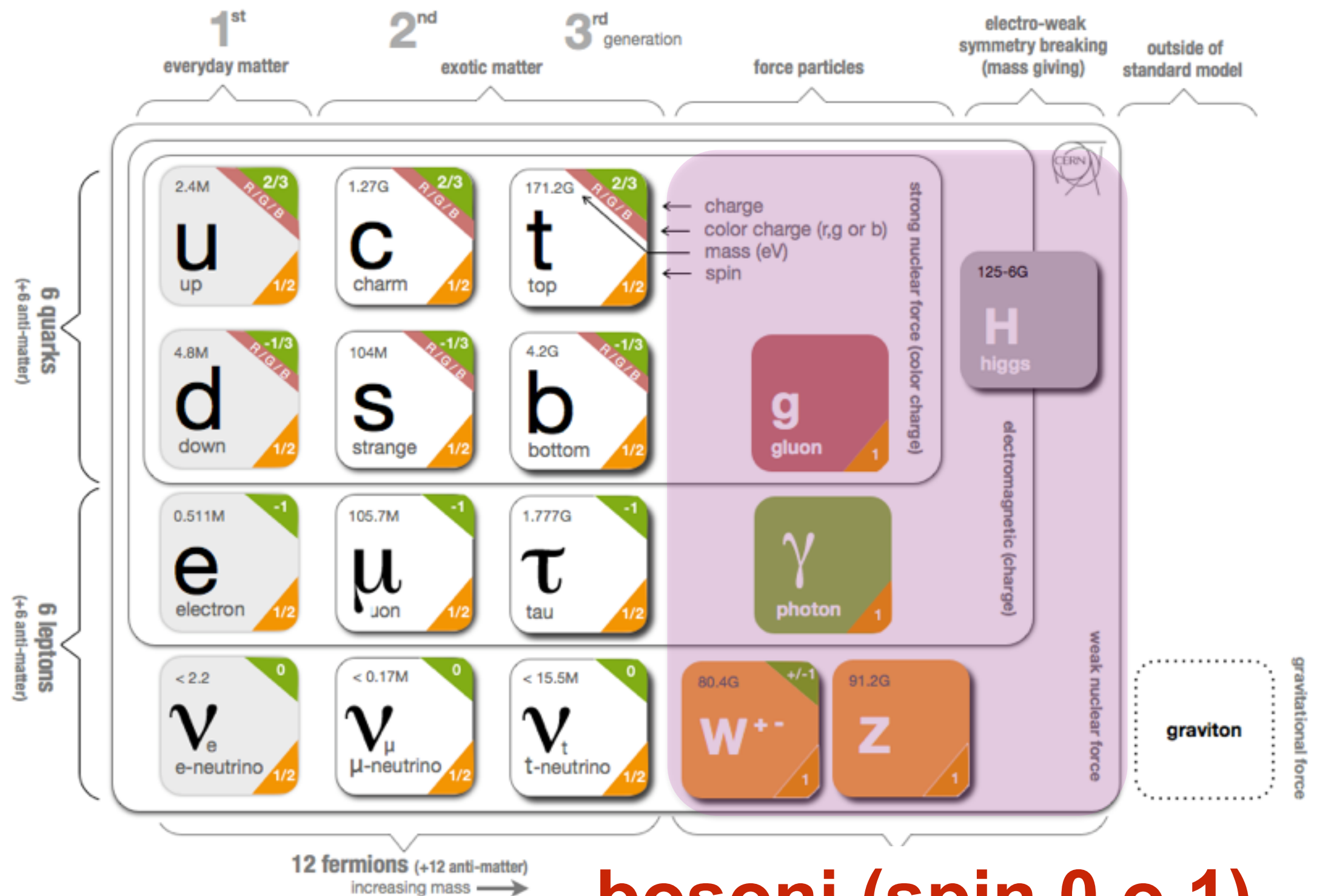


MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI



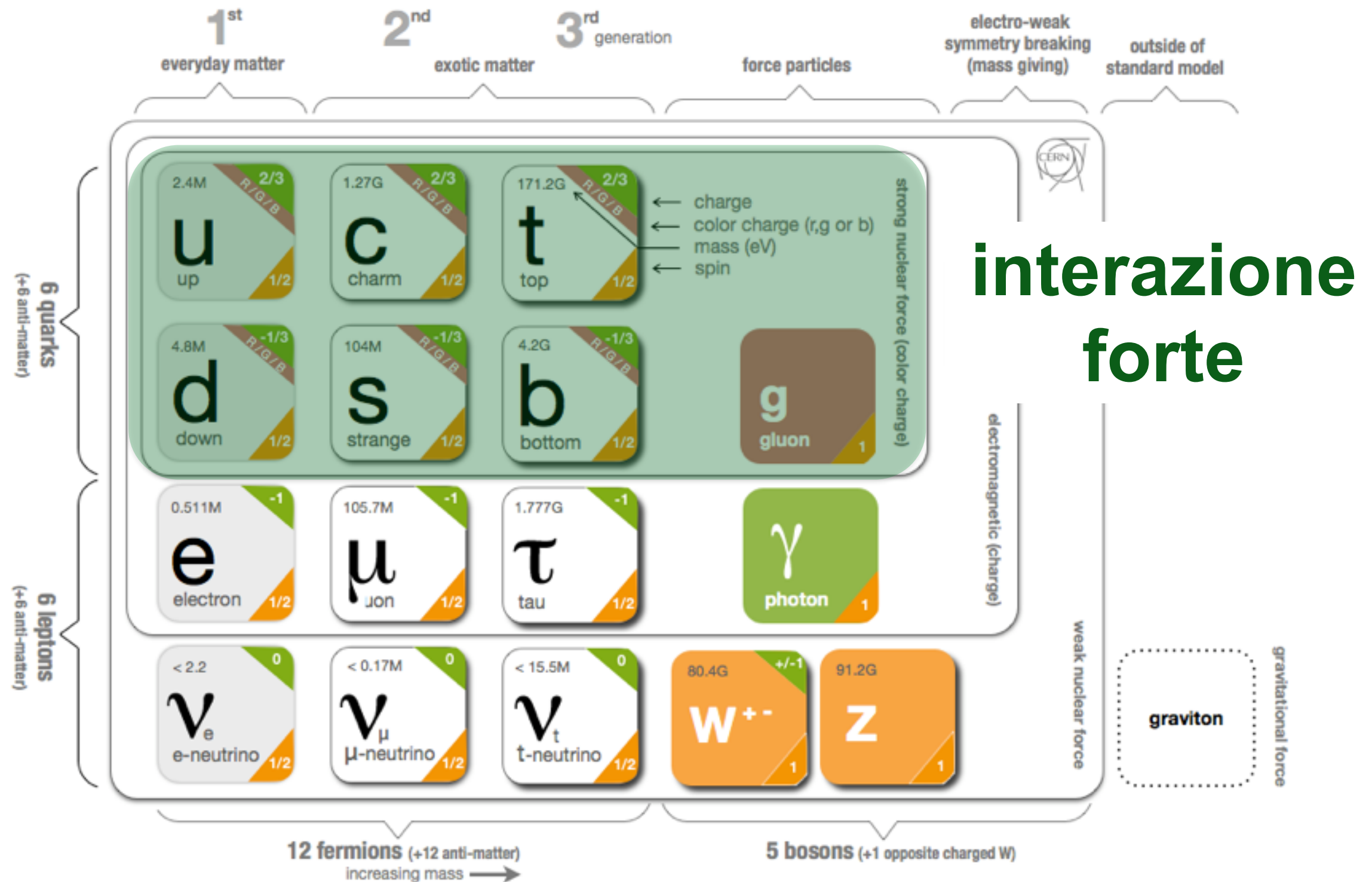
fermioni (spin 1/2)

MODELLO STANDARD: PARTICELLE ELEMENTARI

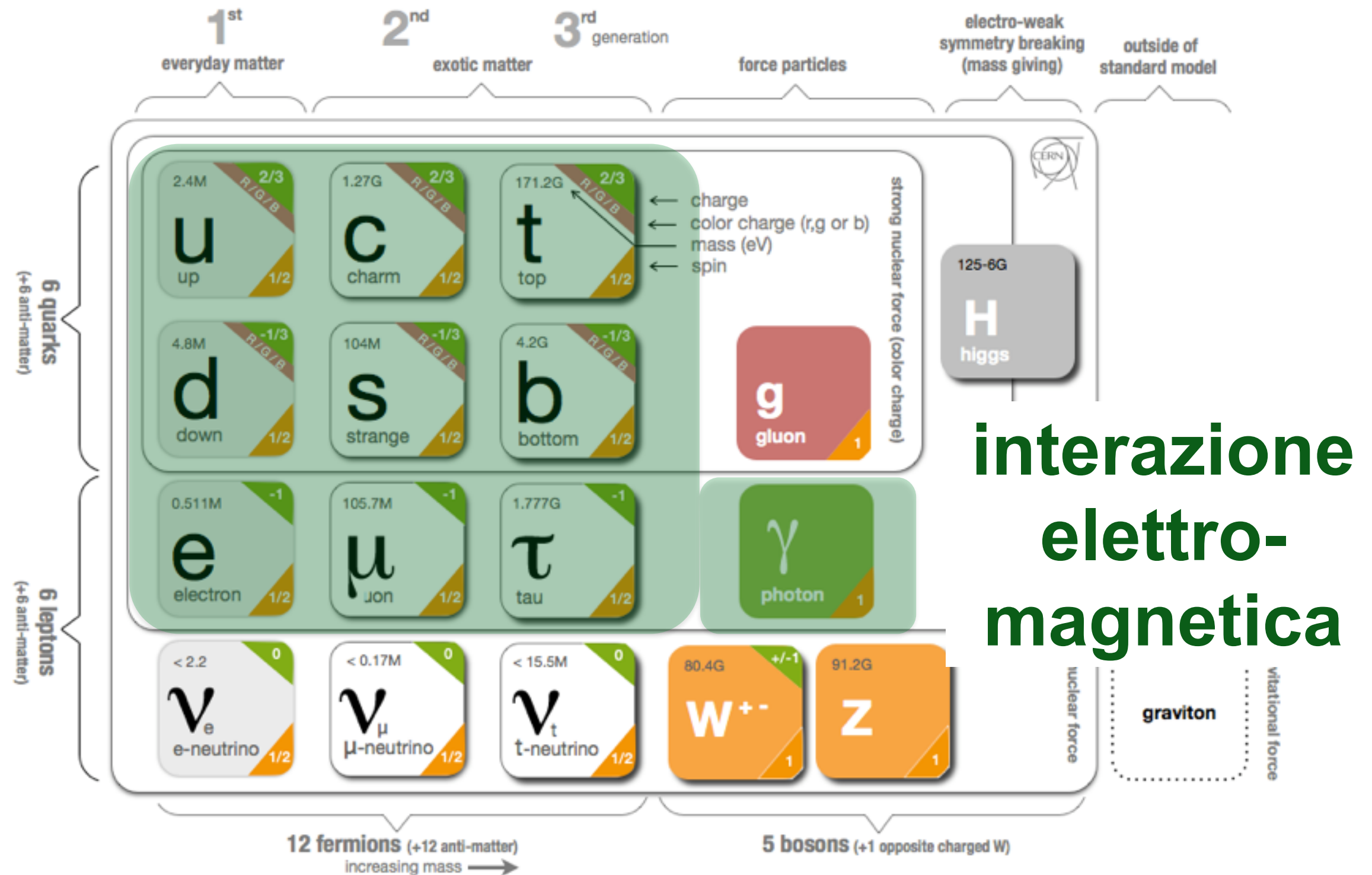


bosoni (spin 0 o 1)

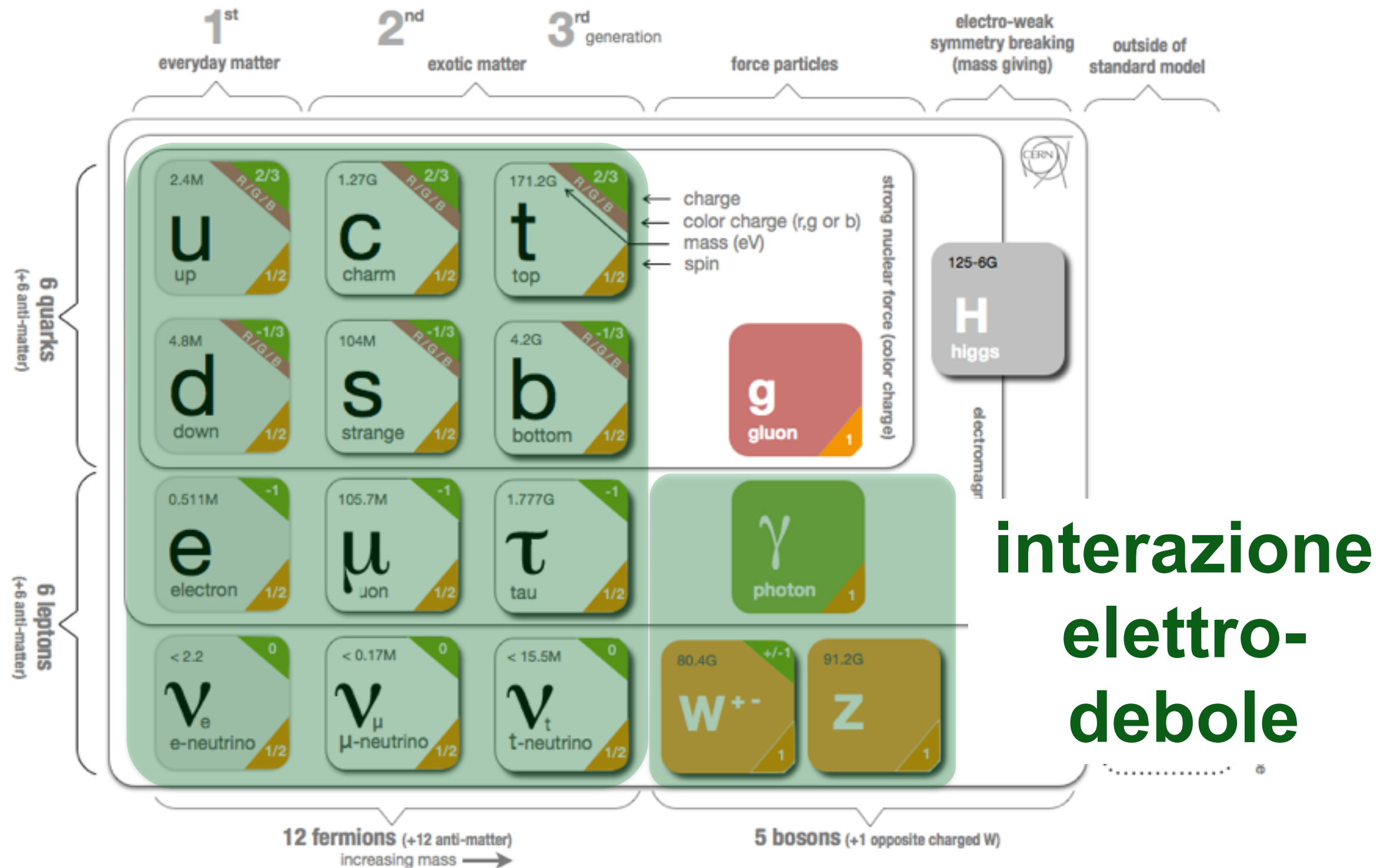
MODELLO STANDARD: INTERAZIONI



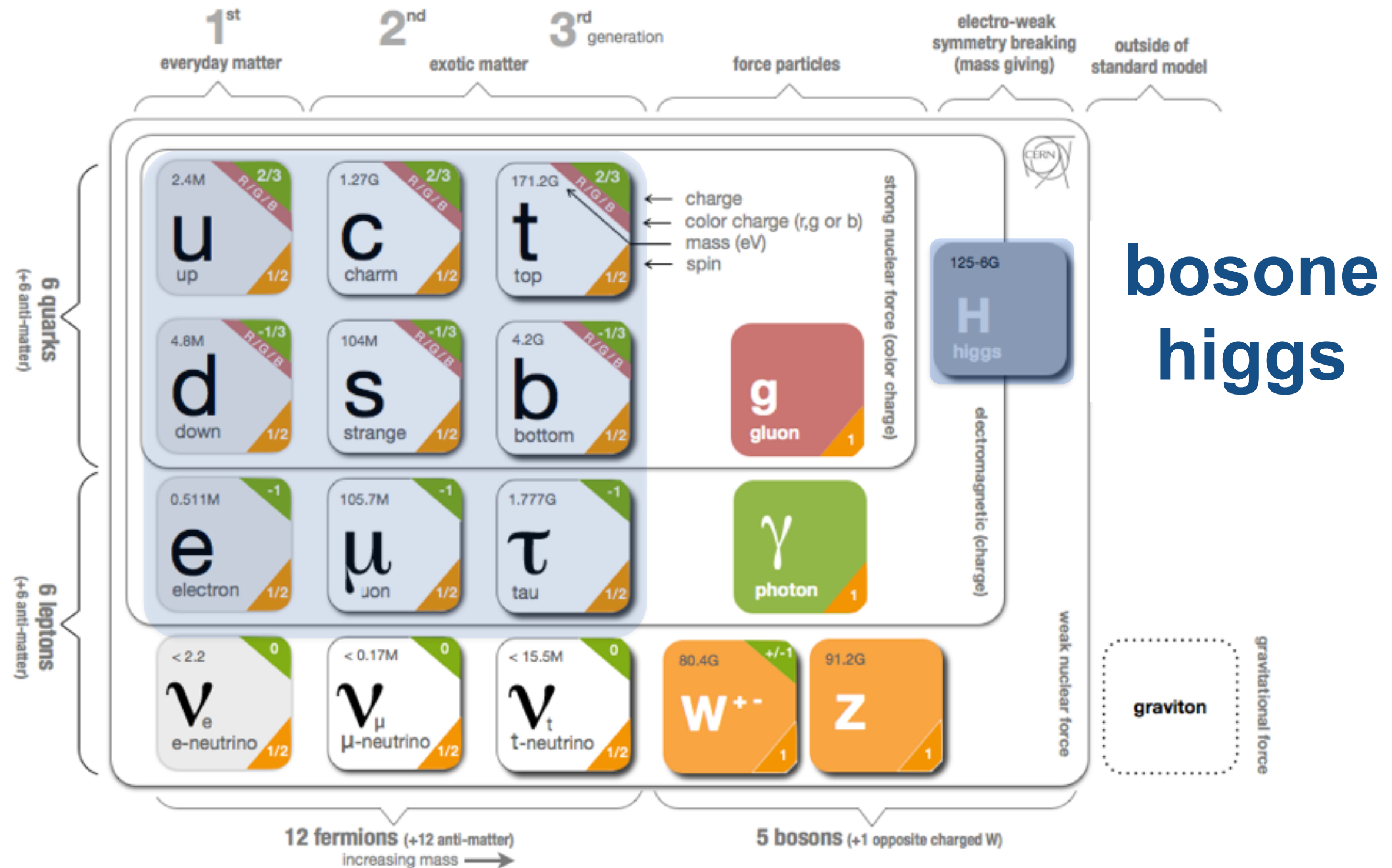
MODELLO STANDARD: INTERAZIONI



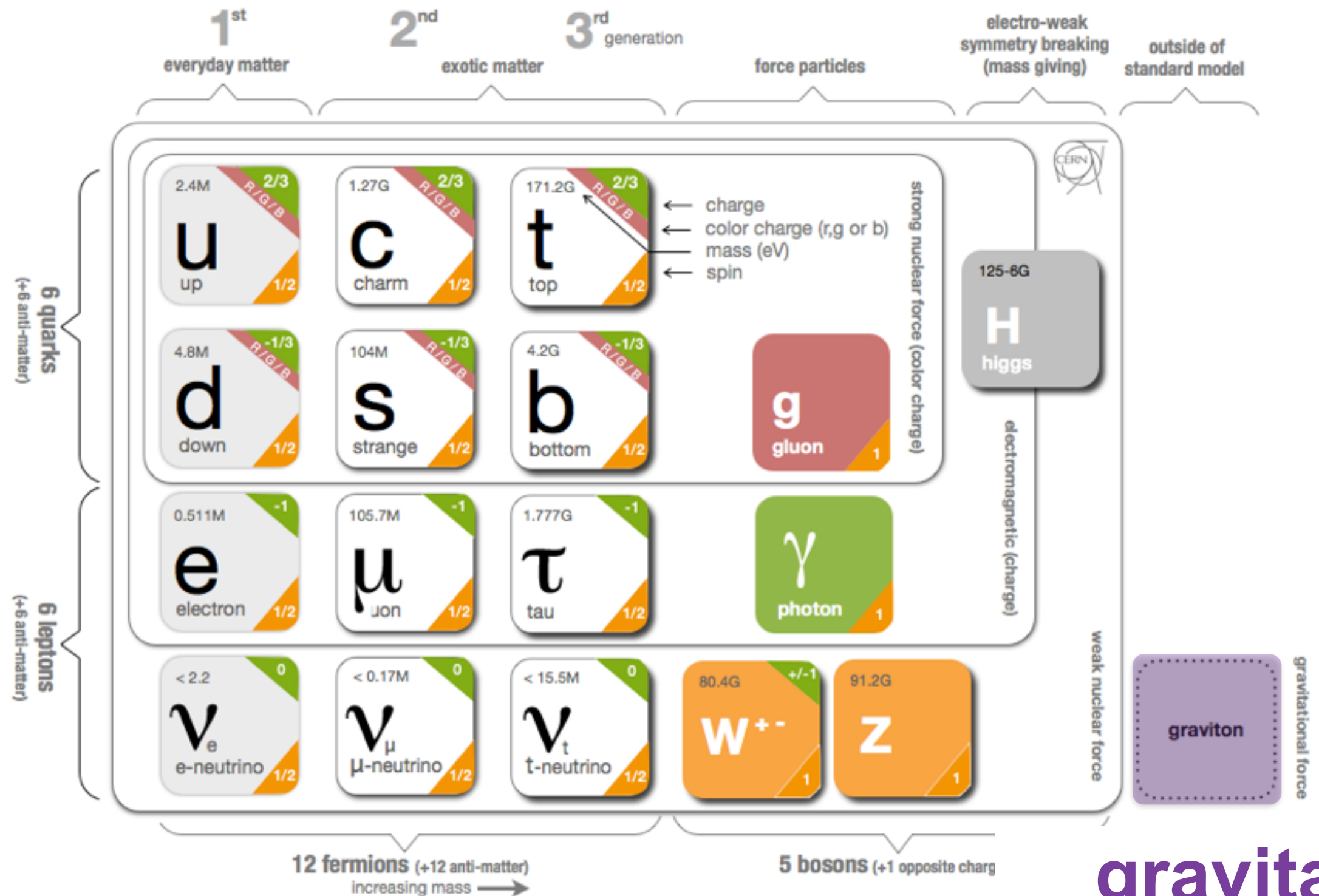
MODELLO STANDARD: INTERAZIONI



MODELLO STANDARD: INTERAZIONI



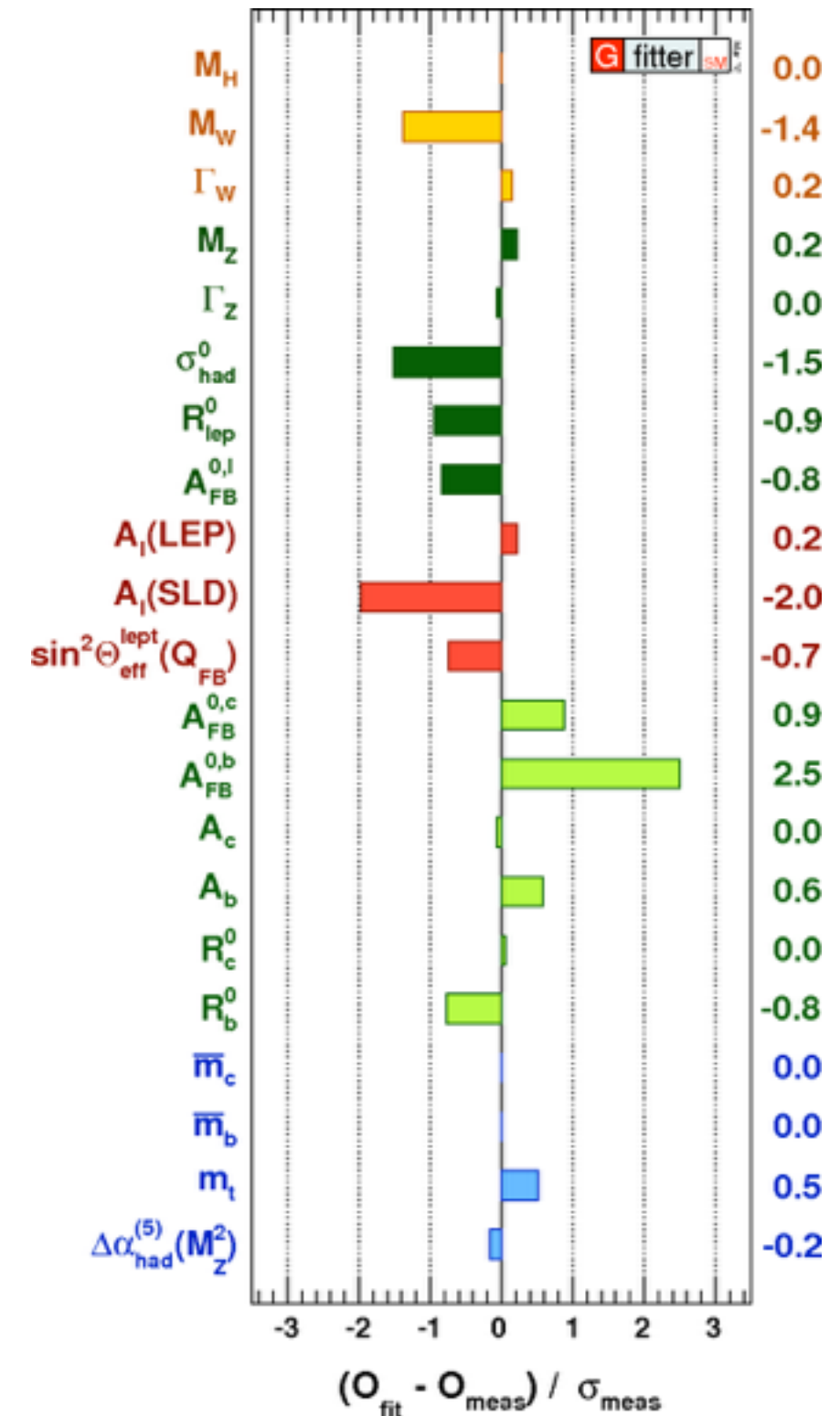
FUORI DAL MODELLO STANDARD



gravita'
(gravitone?)

VERIFICHE DEL MODELLO STANDARD

- **Test di precisione del Modello Standard tutti verificati (e.g. LEP)**
 - piccole discrepanze ma non preoccupanti
- **Higgs previsto e poi scoperto (LHC)**
 - misure attuali indicano che particella e' quella prevista dal modello
- **Perche' mettersi a cercare altro?**



QUESTIONI APERTE (SOLO ALCUNE)

1. Perché ci sono **tre famiglie di leptoni e di quarks**?
2. Perché esistono **quattro tipi di interazione e non una**?
 - unificazione impossibile anche ad energie enormi (serve cambiare modello)
3. Perché la **gravità è così debole**?
 - 40 ordini di grandezza rispetto a quella e-m!
4. Perché solo **il 5% della materia dell'universo è in forma di particelle ordinarie**?
 - da cosa è costituita la materia oscura?
5. Perché la **particella più massiva nota (top) ha (solo) una massa di ~200 volte quella del protone**?
 - per masse più alte sembra esserci il deserto

QUALCHE POSSIBILE SOLUZIONE

- **Supersimmetria**
 - per ogni bosone (fermione) esiste partner supersimmetrico fermionico (bosonico)
 - in alcune versioni prevede la presenza nuove risonanze
- **Extra Dimensioni (oltre le 4 in cui viviamo)**
 - prevedono nuove particelle ad altissima massa (risonanze)
- **Particelle poco interagenti con la materia ordinaria** che costituirebbero la materia oscura
 - interagiscono con la materia ordinaria grazie a nuovi mediatori di alta massa (risonanze)
- ...

RISONANZE VISTE DALLO SPERIMENTALE

- Gli sperimentali in realta' partono dal fatto piu' ovvio (l'ultimo punto elencato precedentemente):

5. Perche' la **particella piu' massiva nota (top) ha (solo) una massa di ~200 volte quella del protone?**

– per masse piu' alte sembra esserci il deserto

- **Quindi:**

- cerchiamo (e troviamo) una particella massiva nuova
- riscriviamo la Fisica
- risolviamo (in parte o tutte) le questioni aperte del Modello Standard
- *Metodo scientifico INDUTTIVO*

COSA SONO LE RISONANZE?

DEFINIZIONE

- (dalla Treccani) **Risonanza**:

*Fenomeno per cui l'ampiezza delle oscillazioni indotte in un sistema oscillante (meccanico o elettrico) tende, in particolari condizioni, a esaltarsi. **Per analogia, ogni fenomeno in cui una grandezza assume valori singolari, e in particolare valori singolarmente grandi, in corrispondenza a determinati valori di una grandezza da cui dipende.***

- Tanti esempi nella **fisica classica**:
 - meccanica
 - in circuiti (circuito RLC)
 - in acustica
 - ...
- **Cosa c'entrano le particelle?**

ESEMPIO: RISONANZA IN MECCANICA

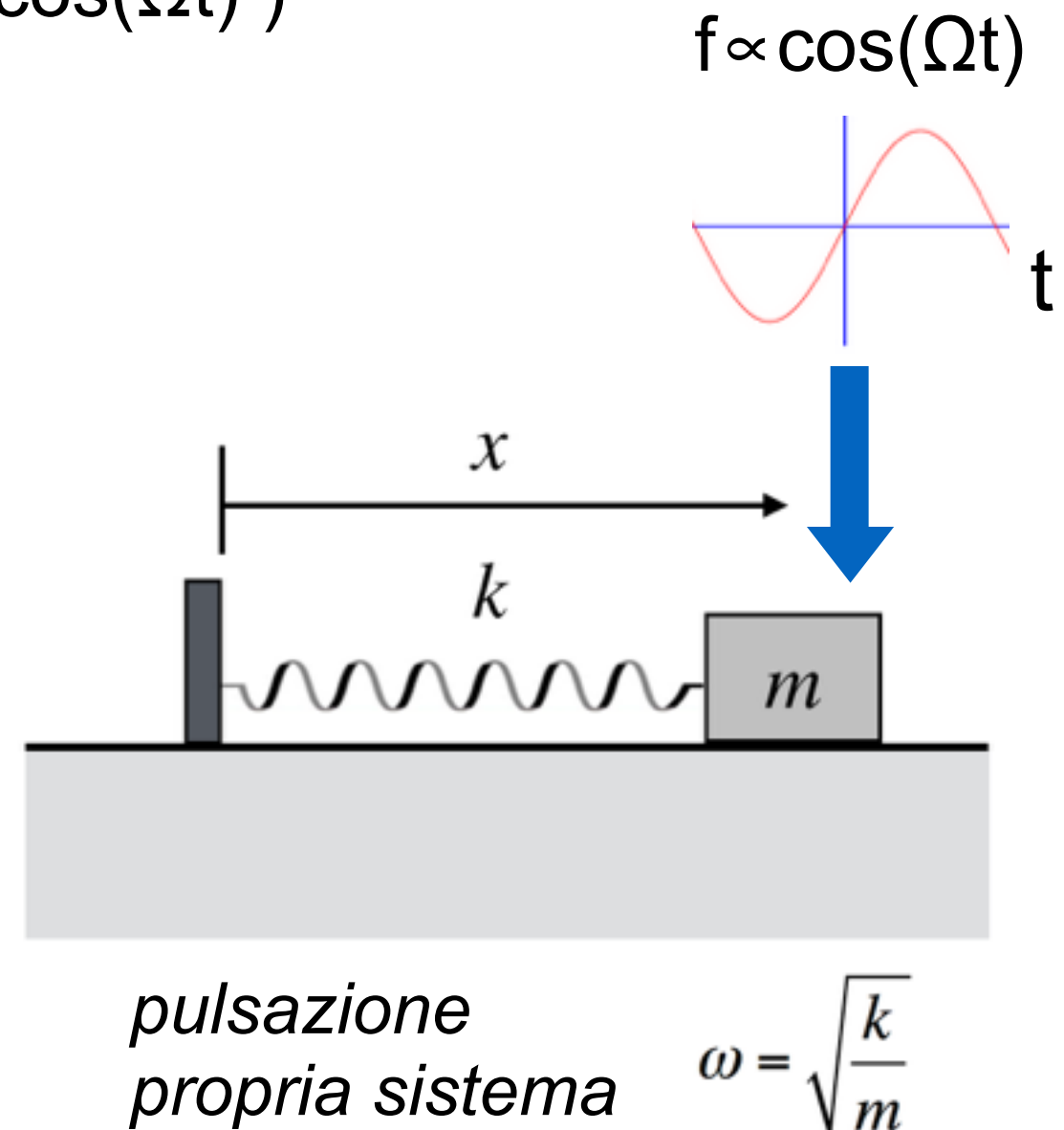
- Supponiamo di avere una **massa attaccata a una molla**
- Il sistema inoltre e' soggetto
 - ad **attrito del mezzo** ($F_a = \beta v$)
 - ad un **forzante** esterno periodico ($f \propto \cos(\Omega t)$)

- **Dinamica**

$$\underbrace{m\ddot{x}}_{\text{inerzia}} + \underbrace{\beta\dot{x}}_{\text{attrito}} + \underbrace{kx}_{\text{forza elastica}} = \underbrace{kl_0 \cos \Omega t}_{\text{forzante}}$$

- **Soluzione** (per tempi grandi):

$$x = \bar{A} \cos(\Omega t + \bar{\phi})$$



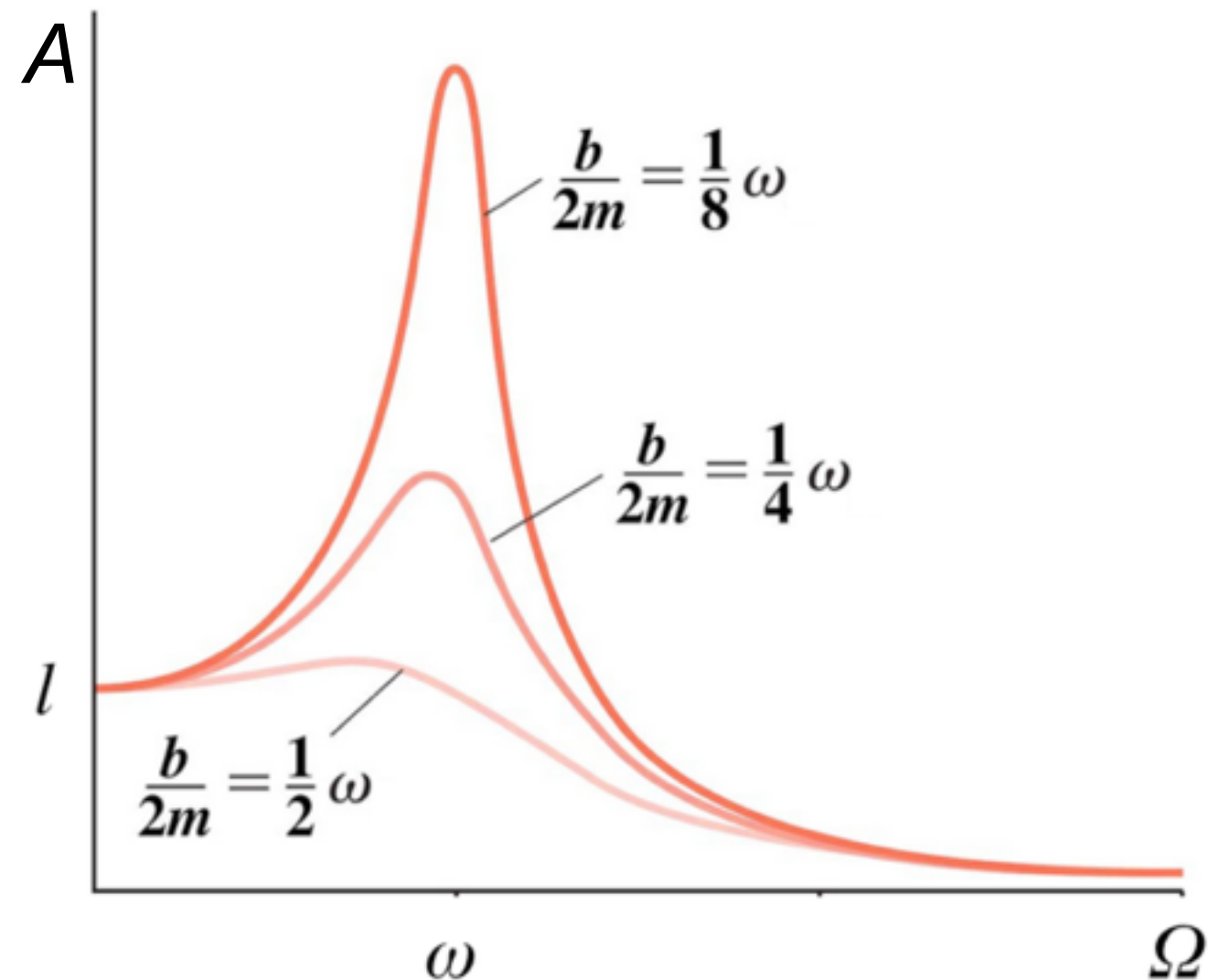
IL PICCO DI RISONANZA

- **Ampiezza di oscillazione dipende dalla frequenza del forzante**

$$\bar{A}(\Omega) = \frac{kl / m}{\sqrt{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + \beta^2 \frac{\Omega^2}{m^2}}}$$

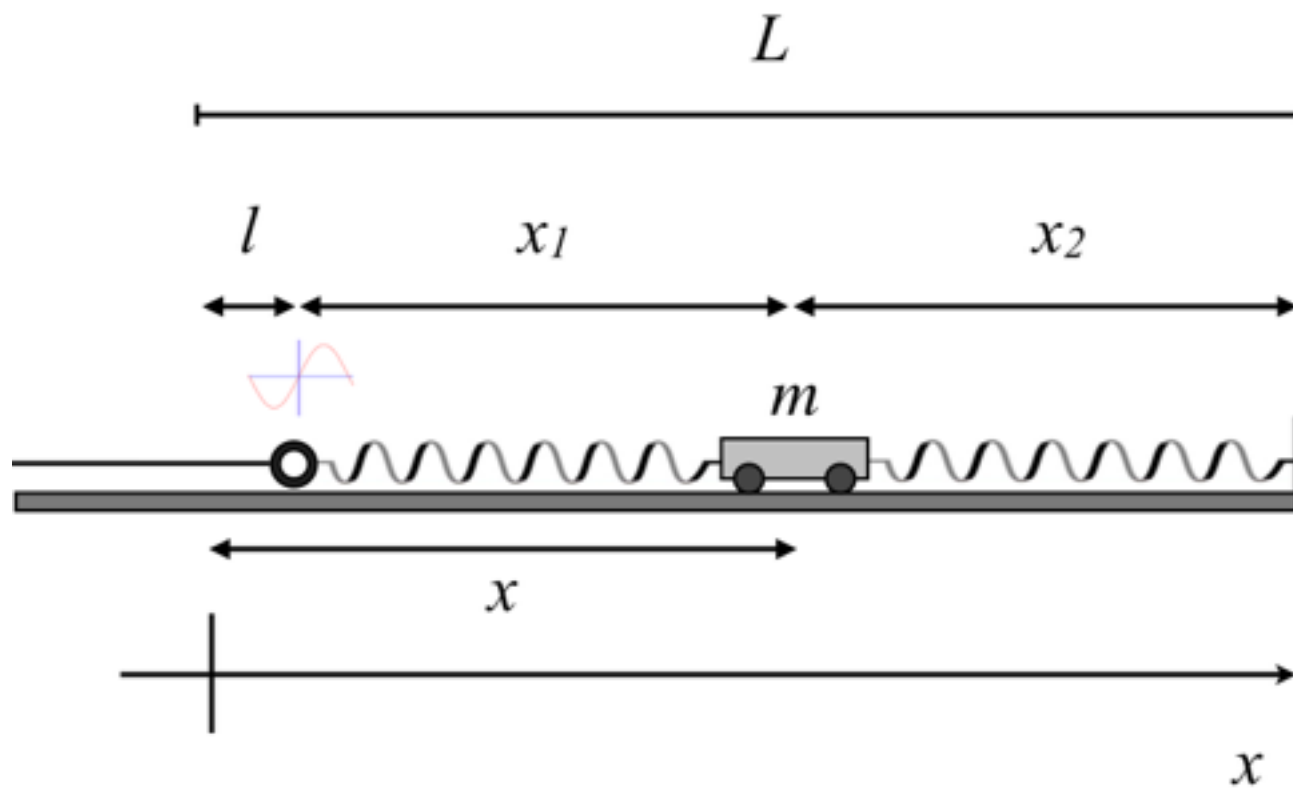
- **Massimo** quando

$$\Omega_r = \sqrt{\omega^2 - \frac{\beta^2}{2m^2}}$$



cioe' quando la ***frequenza del forzante e' simile a quella propria del sistema*** ($\Omega \sim \omega$)

ESEMPIO IN LABORATORIO



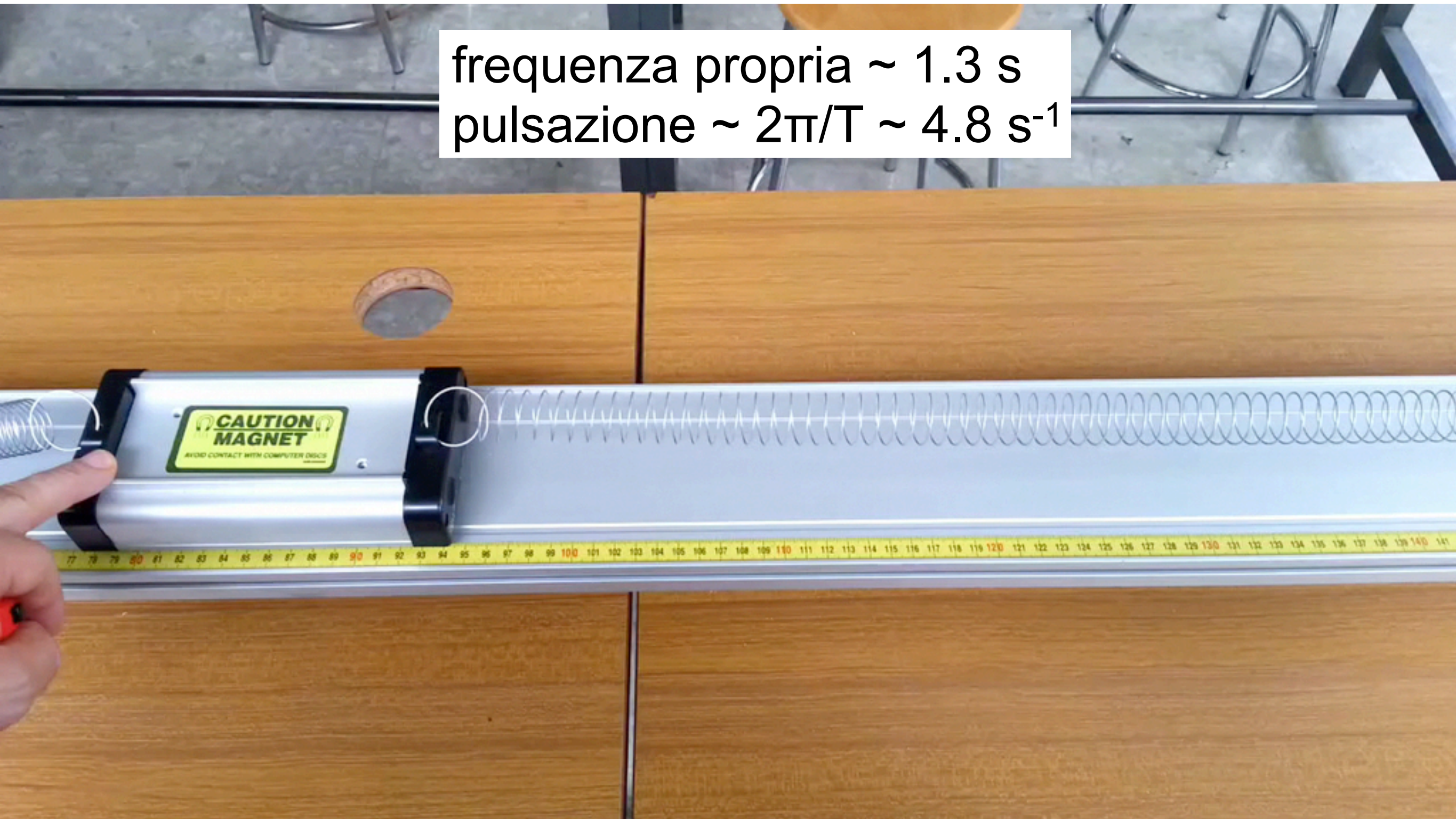
- **Due molle** invece di una
- **Forzante agisce sul punto di applicazione di una delle due molle** (l varia nel tempo)
- Soluzione di nuovo:

$$x(t \rightarrow \infty) = L/2 + \bar{A} \cos(\Omega t + \bar{\phi})$$



FREQUENZA PROPRIA

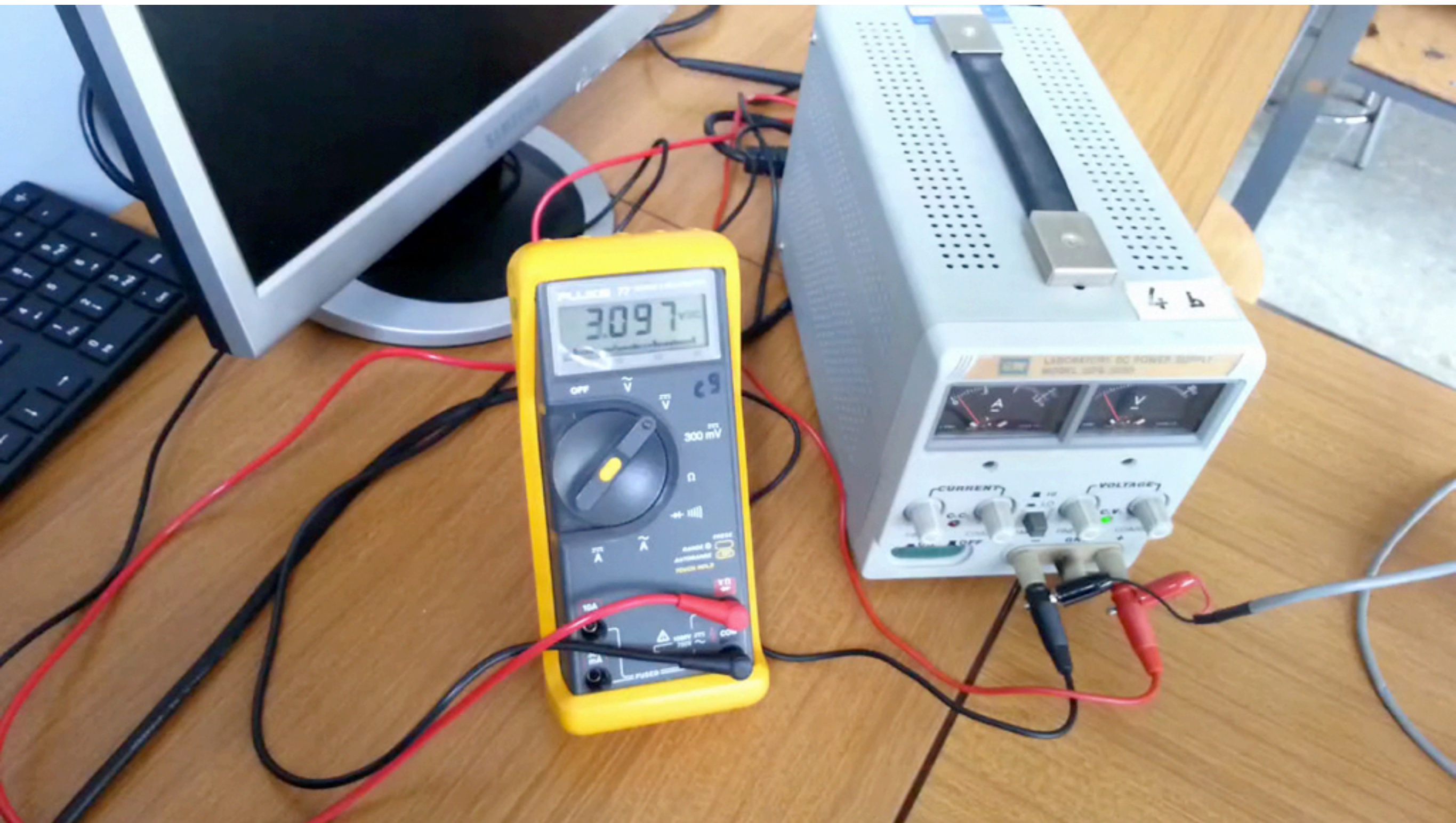
frequenza propria ~ 1.3 s
pulsazione $\sim 2\pi/T \sim 4.8$ s $^{-1}$



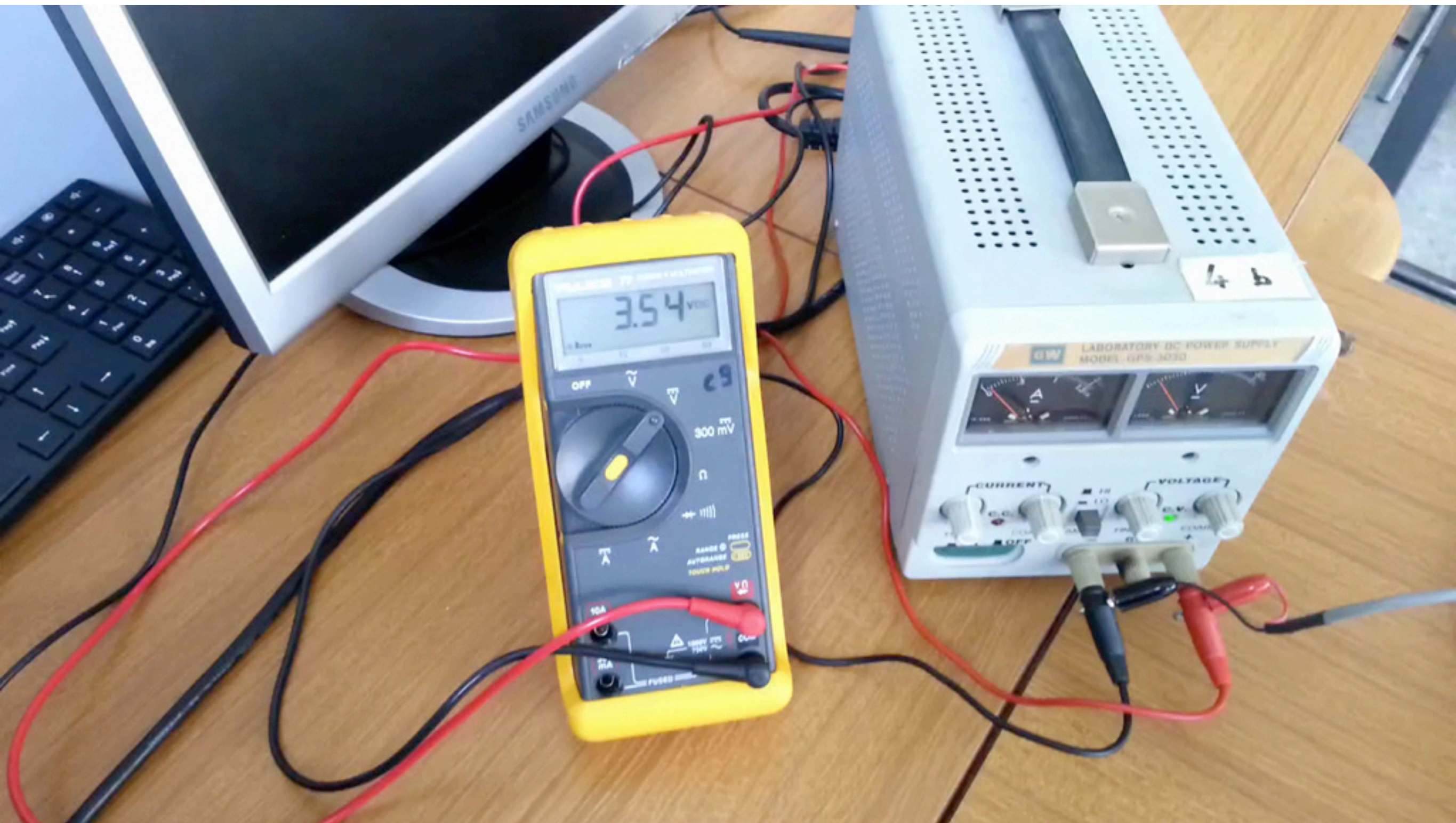
FORZANTE



FUORI RISONANZA



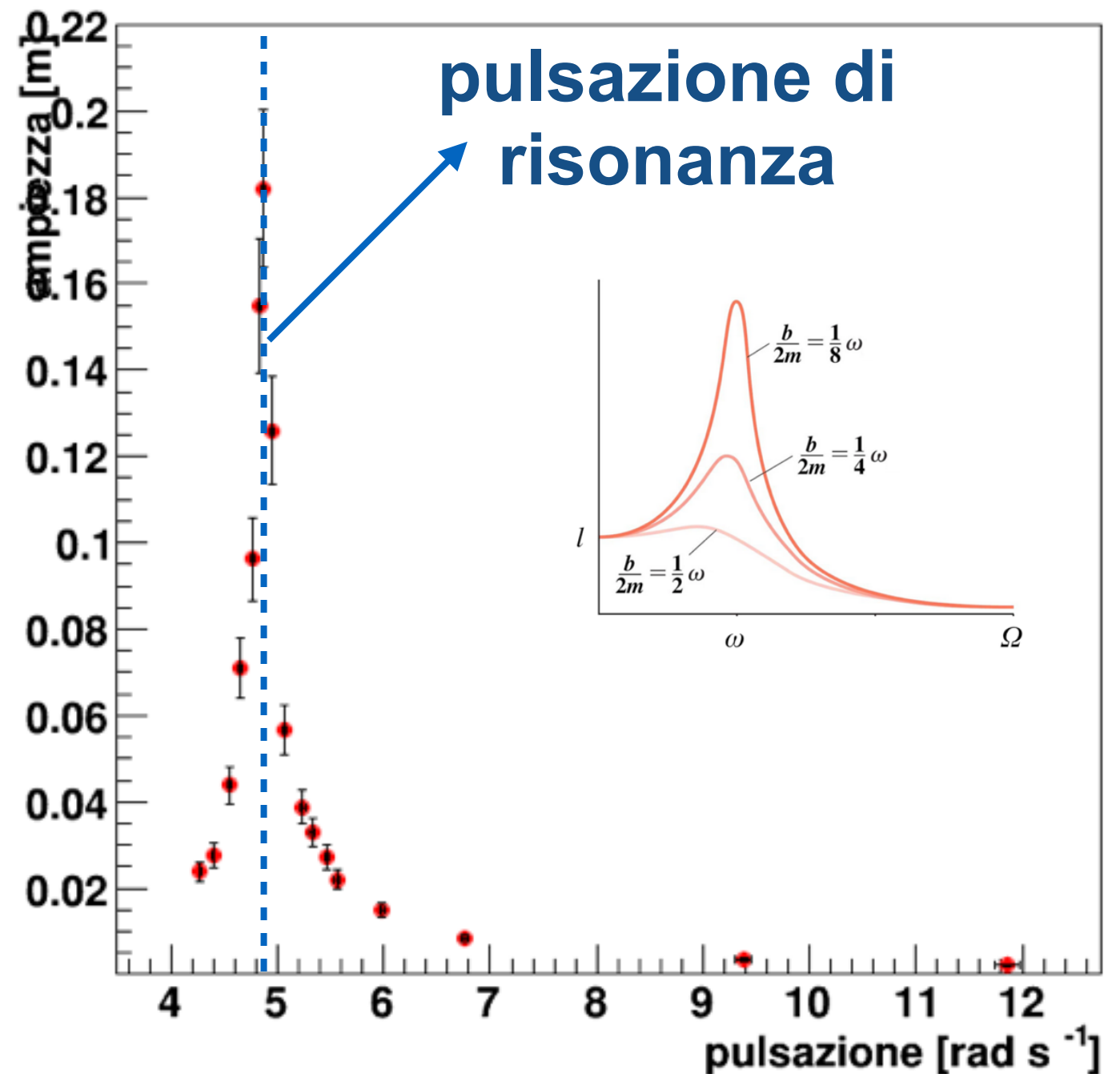
RISONANZA



LO SPETTRO MISURATO

- Lo spettro segue la distribuzione attesa
- Il massimo e' a $\omega = 4.8 \text{ s}^{-1}$
- **Dalla misura dello spettro e dalla individuazione del picco di risonanza possiamo risalire alla costante k della molla!**

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow k = m\omega^2$$



RISONANZA: MORALE

- Supponiamo di avere a che fare con **un sistema oscillante la cui dinamica e' incognita** (cioe' non conosciamo la costante elastica)
- **Sondiamo il sistema sperimentalmente**
 - lo investiamo con una sollecitazione oscillante (con frequenza variabile)
- **Se vediamo un picco e ne individuiamo la posizione abbiamo**
 - determinato la frequenza propria del sistema
 - **misurato la sua dinamica sperimentalmente!**
 - **identificato la fisica che descrive il sistema!**

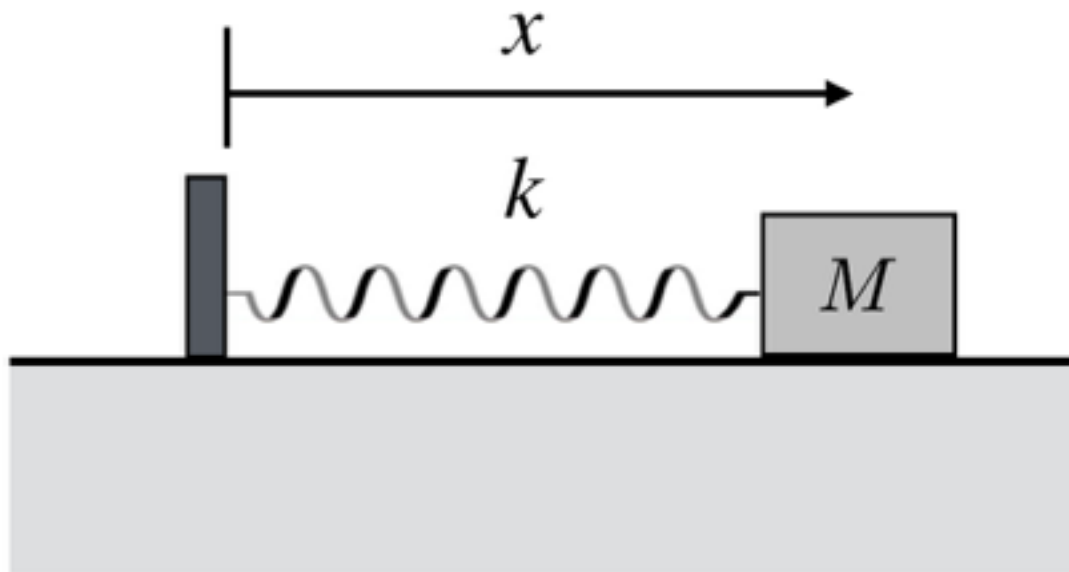
ANALOGO IN PARTICELLE

- Abbiamo una **particella o mediatore dell'interazione incogniti**
- **Sondiamo il sistema**
 - aumentiamo via via l'energia coinvolta
 - *o l'energia delle collisioni*
 - *o l'energia dei prodotti di decadimento della particella che possiamo misurare (lo vediamo a breve)*
- **Cerchiamo un picco**
- **Se lo troviamo abbiamo scoperto “nuova fisica”!**

MECCANICA CLASSICA VS QUANTISTICA

Classica

- Molla

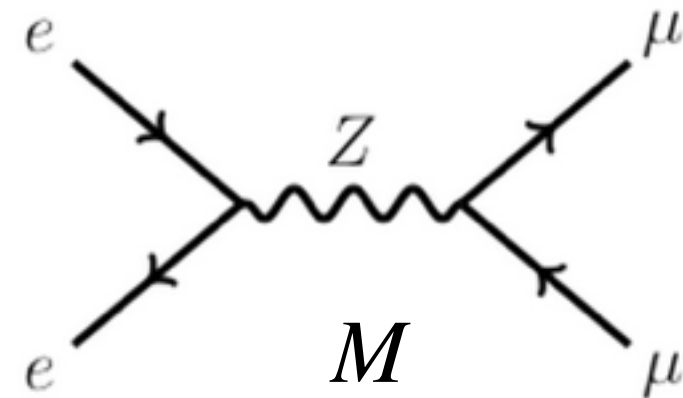


- **Ampiezza oscillazione vs frequenza forzante**

$$\bar{A}(\Omega) = \frac{kl / m}{\sqrt{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + \beta^2 \frac{\Omega^2}{m^2}}}$$

Quantistica

- Diagramma di Feynman



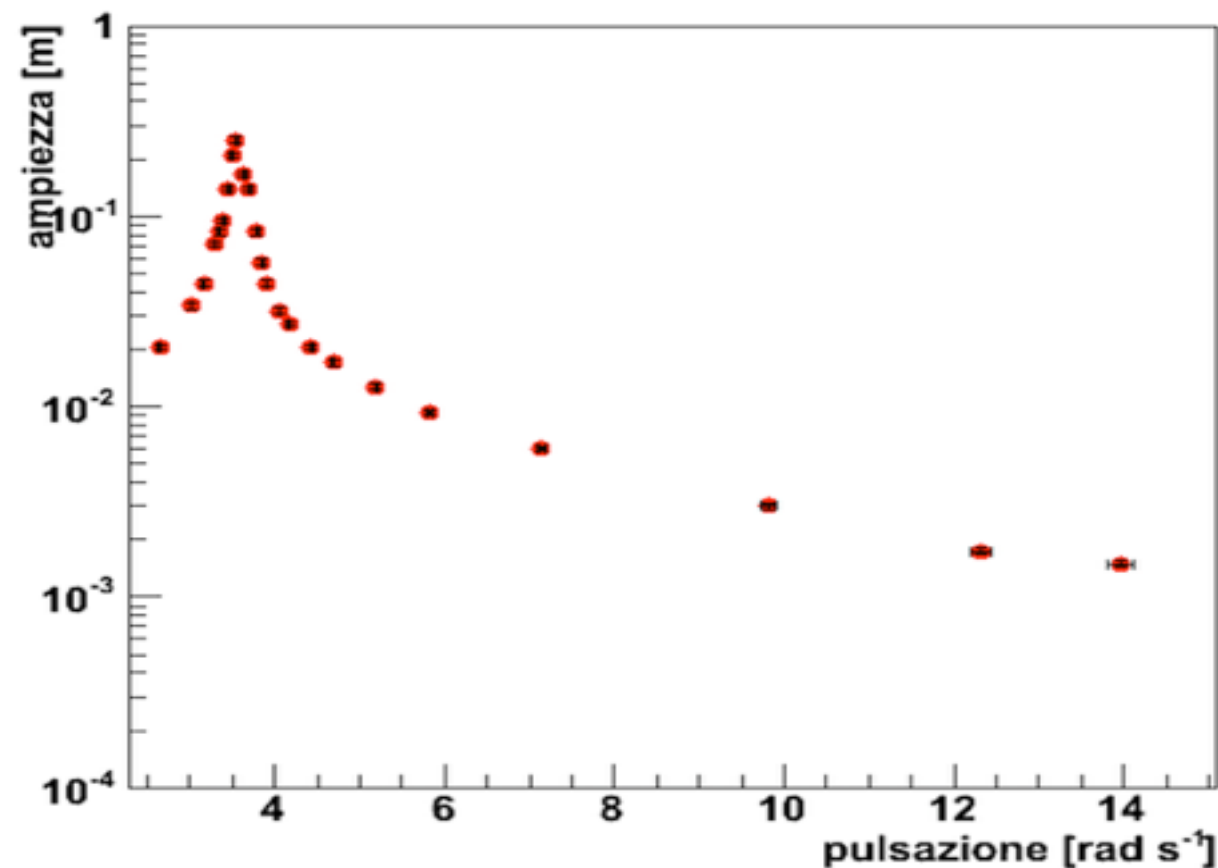
- **Probabilità di osservazione vs massa**

$$P(E) = \frac{A}{(E^2 - M^2)^2 + \Gamma^2 M^2}$$

MECCANICA CLASSICA VS QUANTISTICA

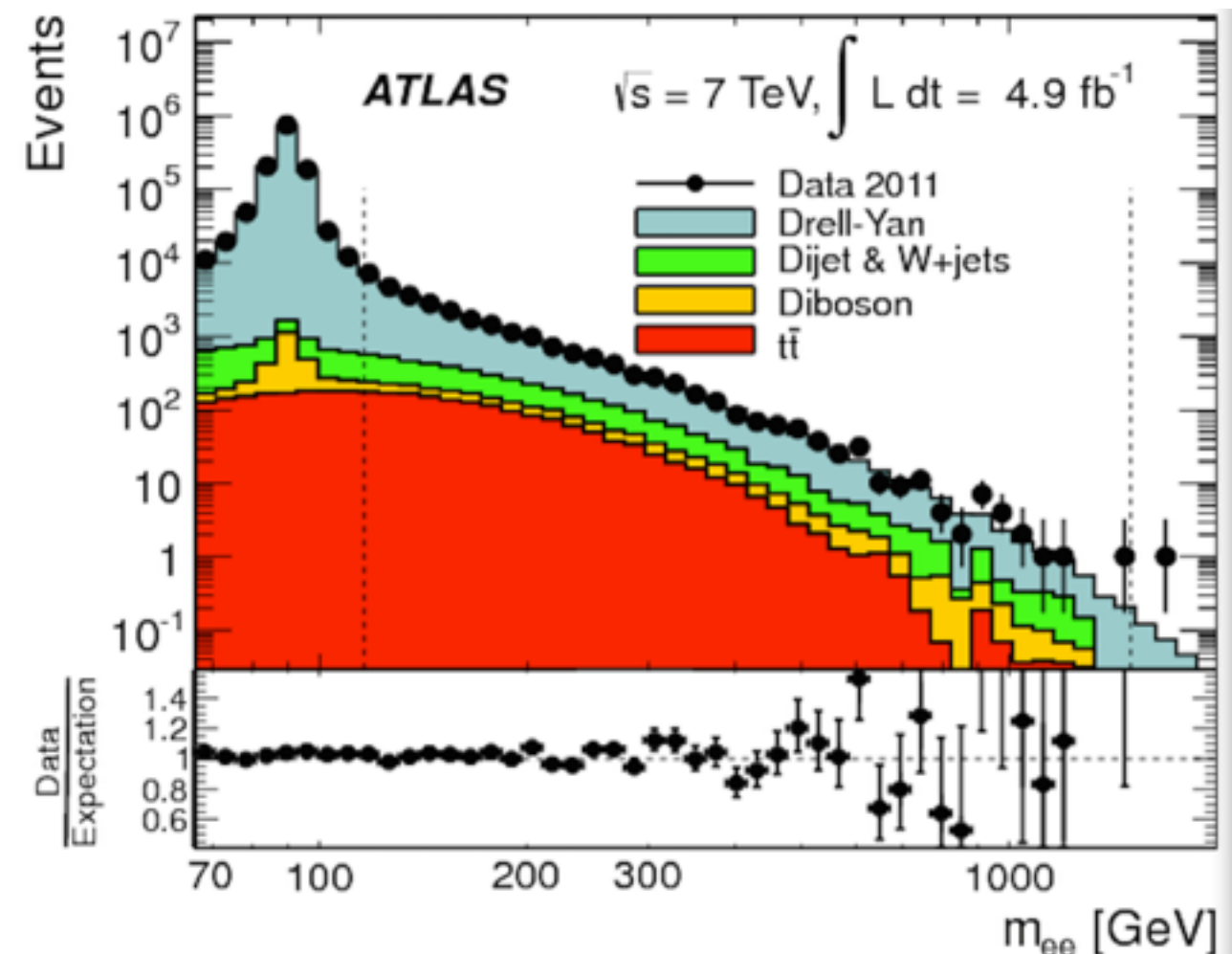
Classica

Ampiezza oscillazione vs
frequenza forzante



Quantistica

Probabilità di osservazione
(numero di eventi) vs massa



SCOPERTE CON RISONANZE: J/Psi (1974)

- **J/psi**: stato legato quark charm - antiquark charm
- Fondamentale per scoperta quark charm

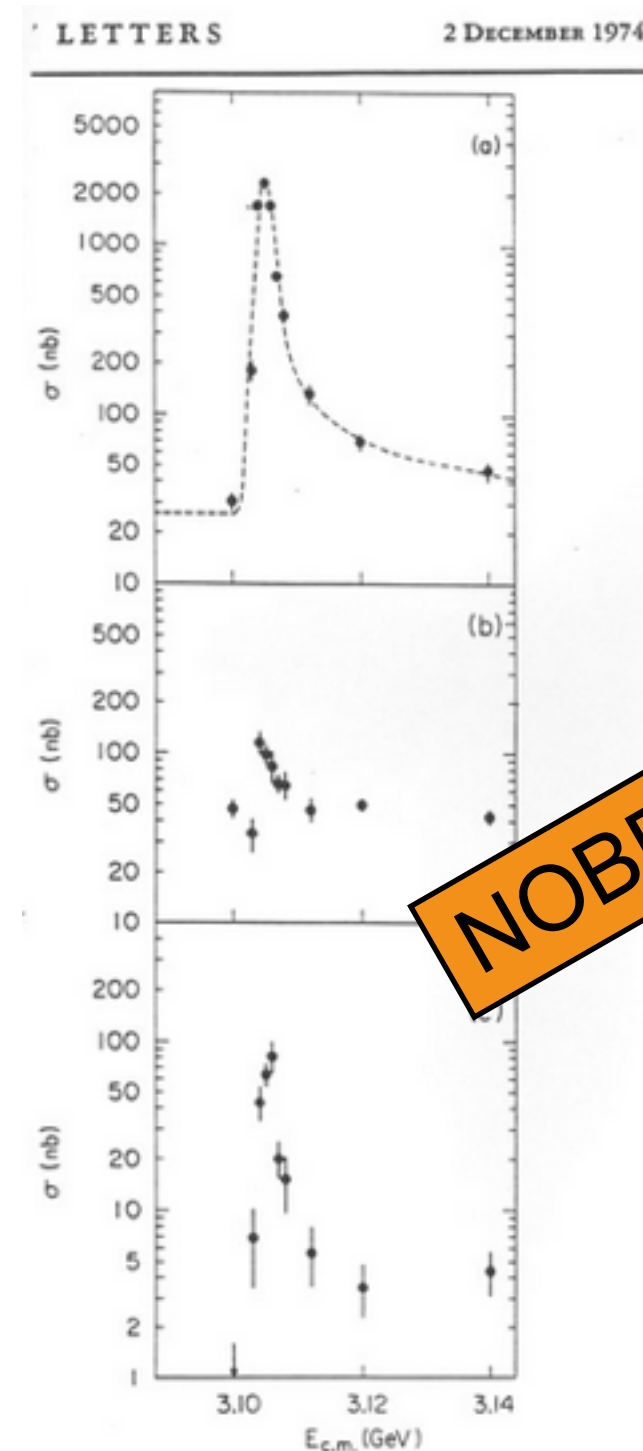
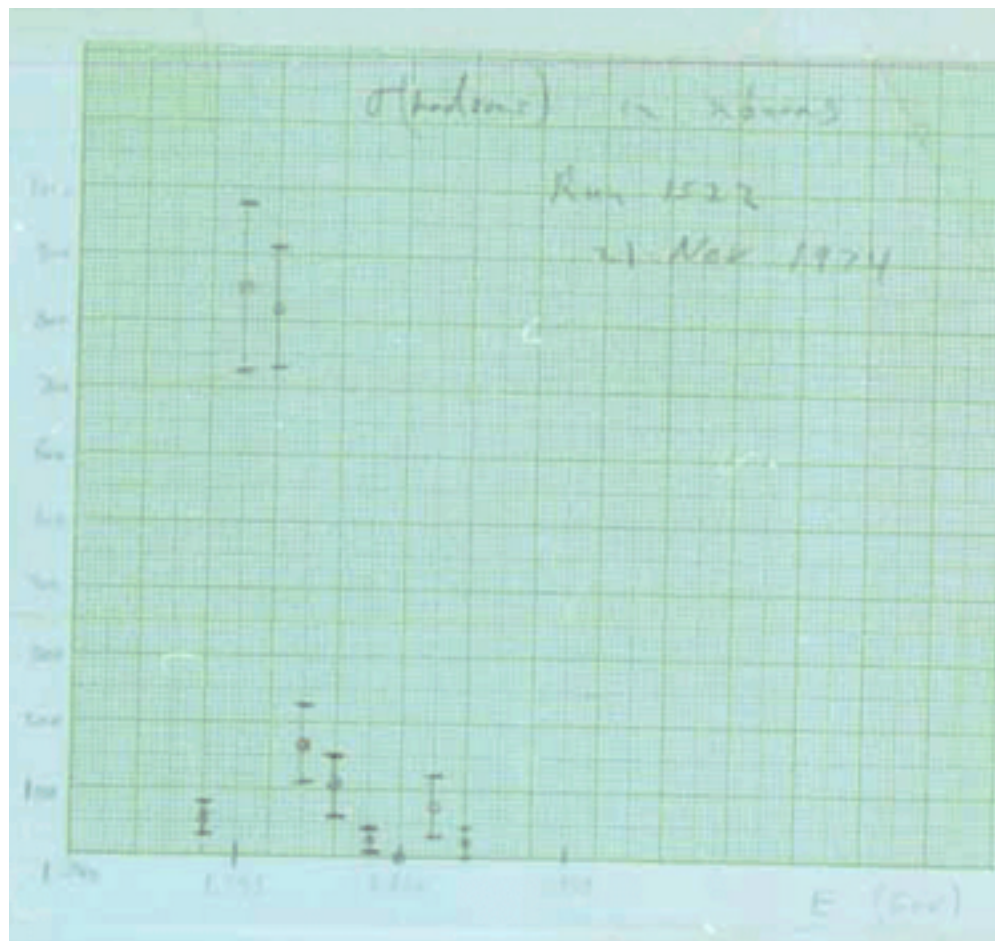


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multi-pion final states, (b) e^+e^- final states, and (c) $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, and K^+K^- final states. The curve in (a) is the expected shape of a δ -function resonance folded with the gaussian energy spread of the beams and including radiative processes. The cross sections shown in (b)

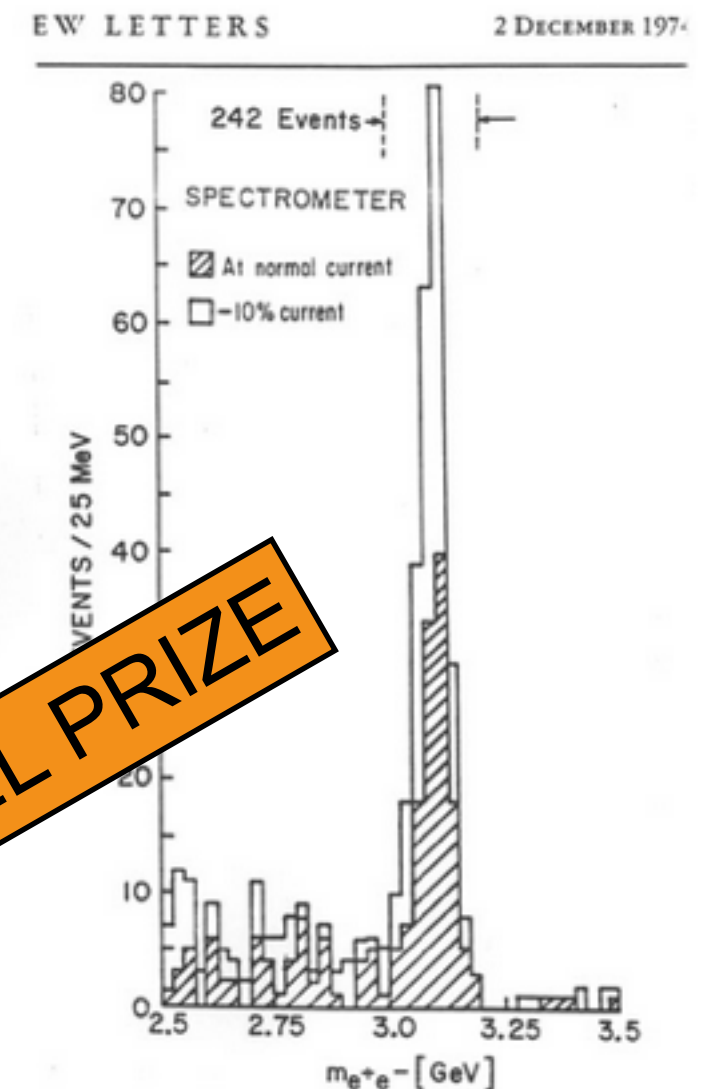
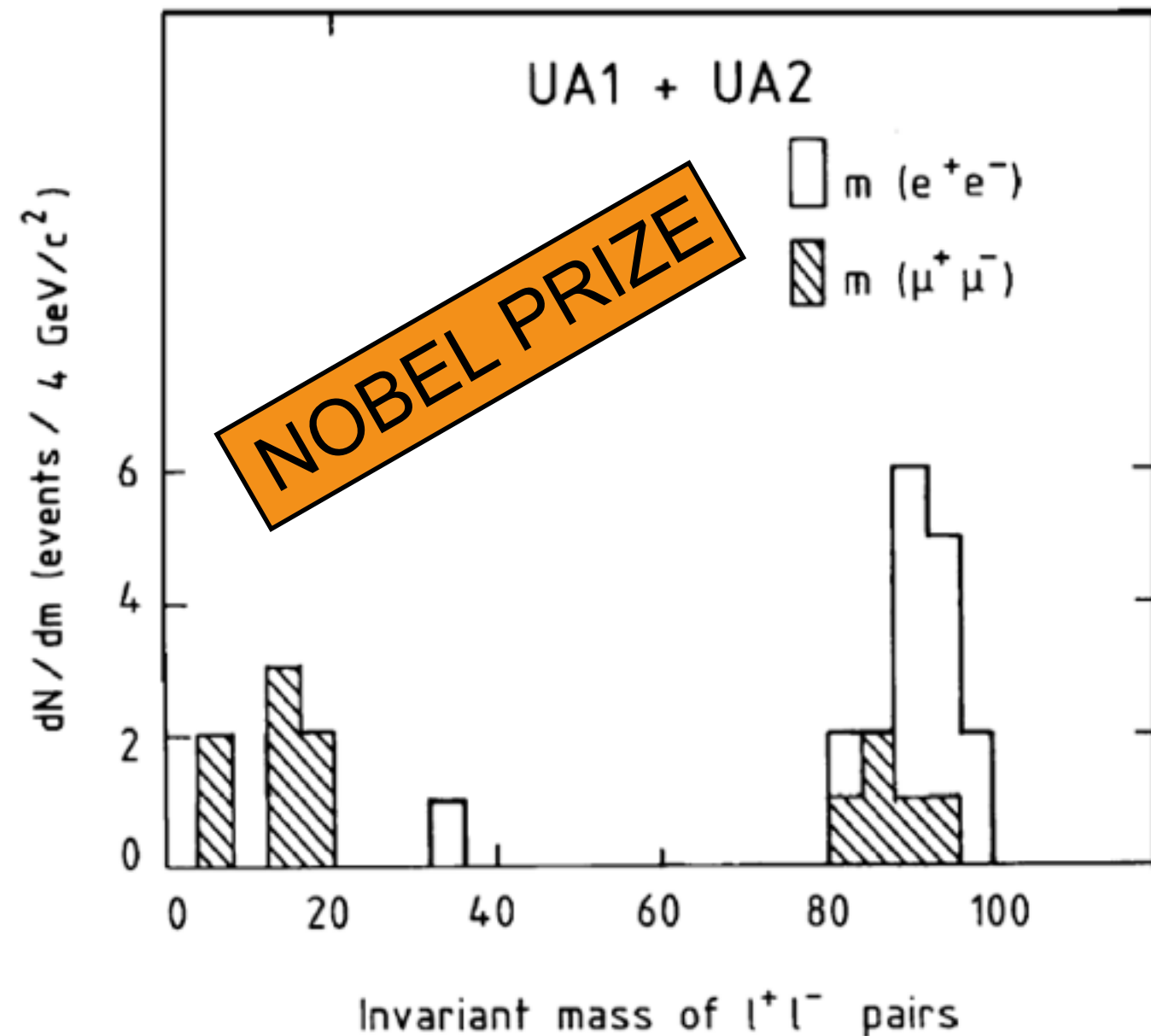


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J/ψ . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

NOBEL PRIZE

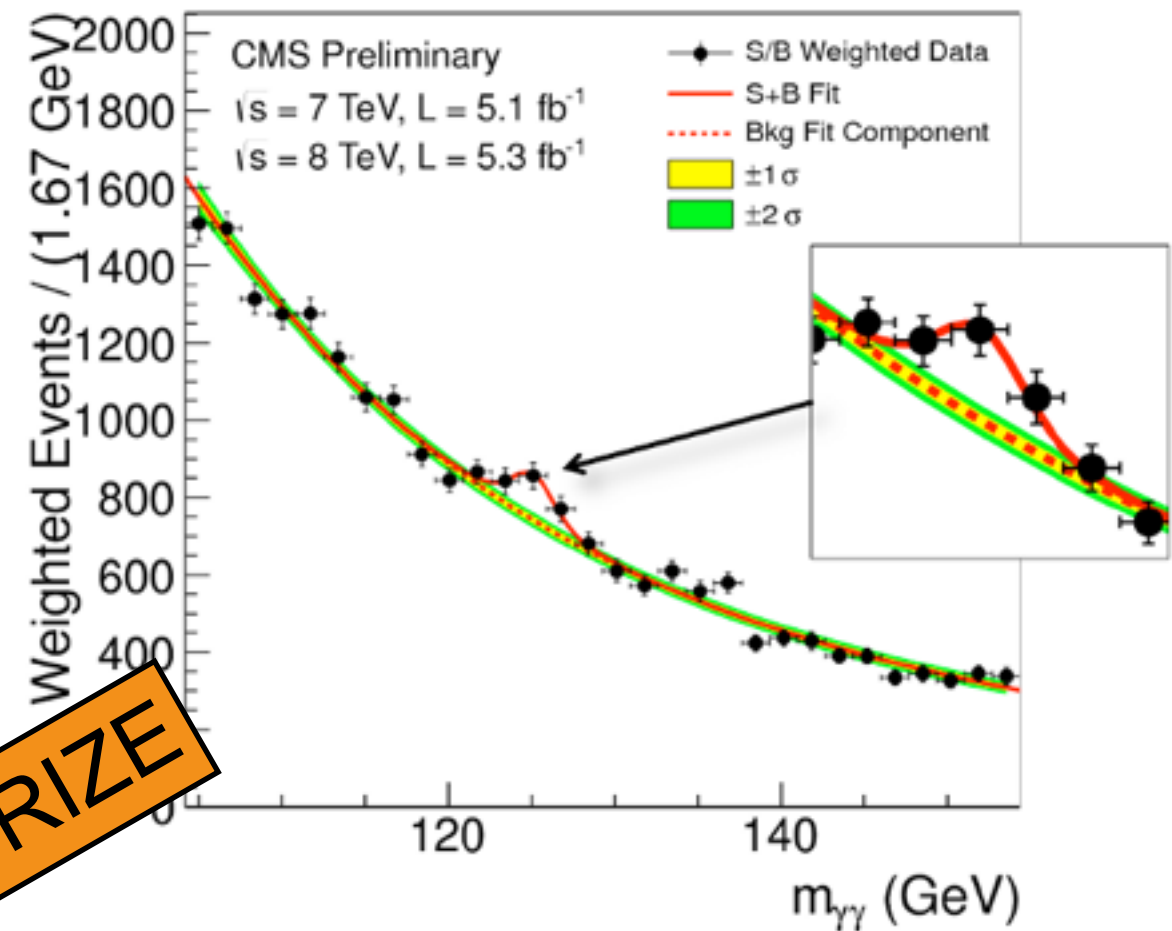
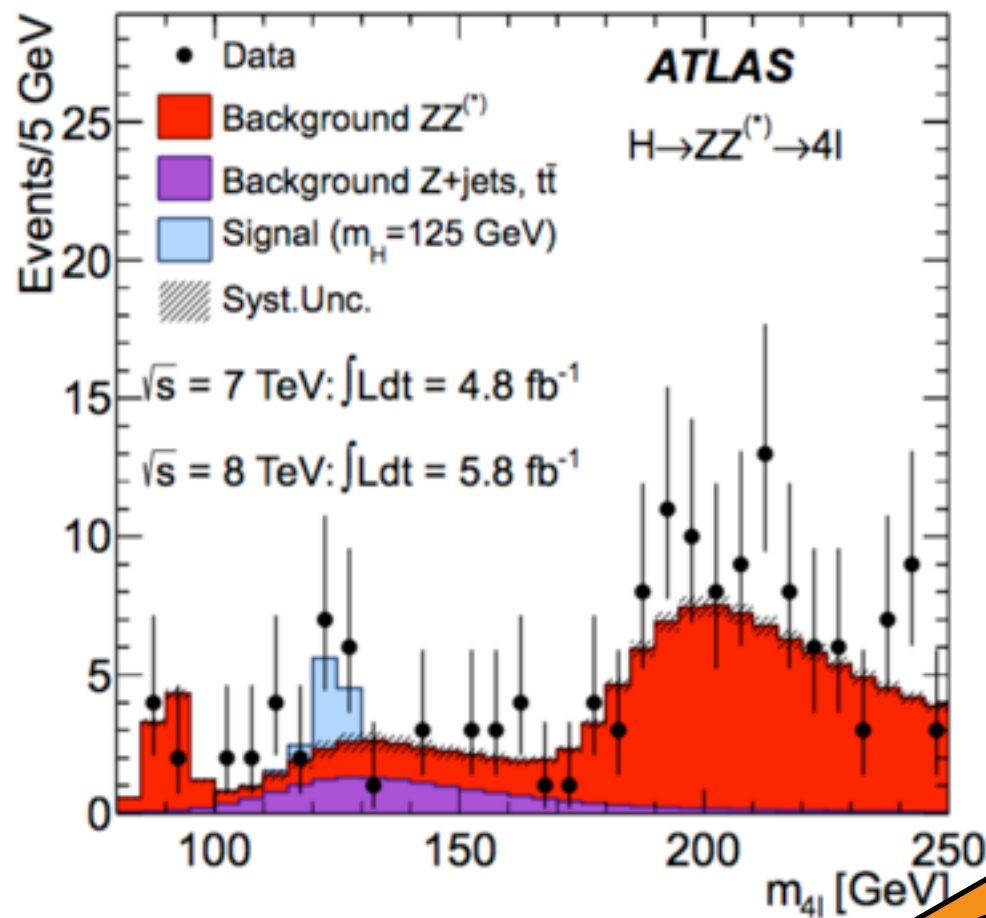
SCOPERTE CON RISONANZE: Z/W (1983)

- **Bosoni Z/W**: bosoni vettori, mediatori dell'interazione debole
- Fondamentale per dimostrare la **validità** del **Modello Standard**



SCOPERTE CON RISONANZE: HIGGS (2012)

Ed ovviamente la scoperta del **bosone di Higgs!**

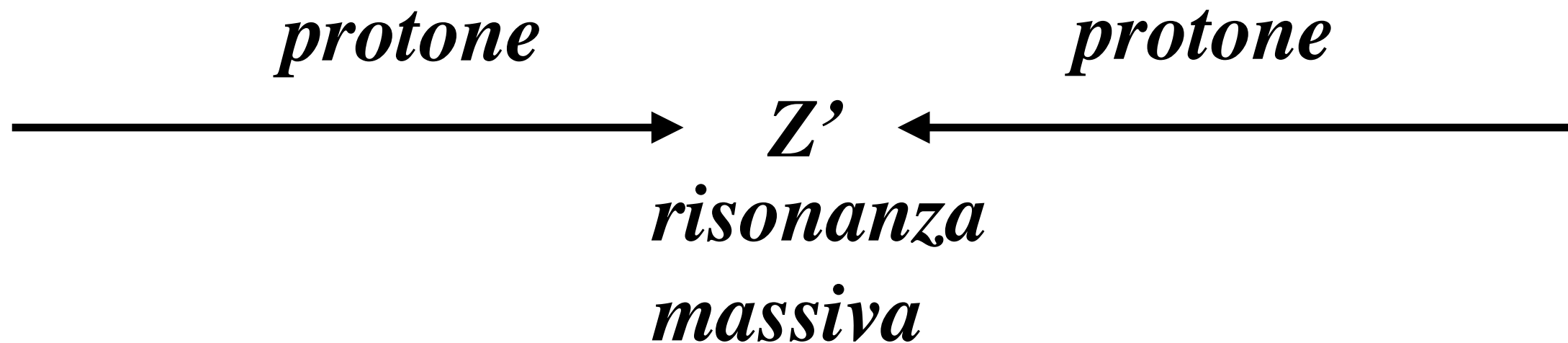


NOBEL PRIZE

COME SI
CERCANO

CREARE LE RISONANZE: RELATIVITA'

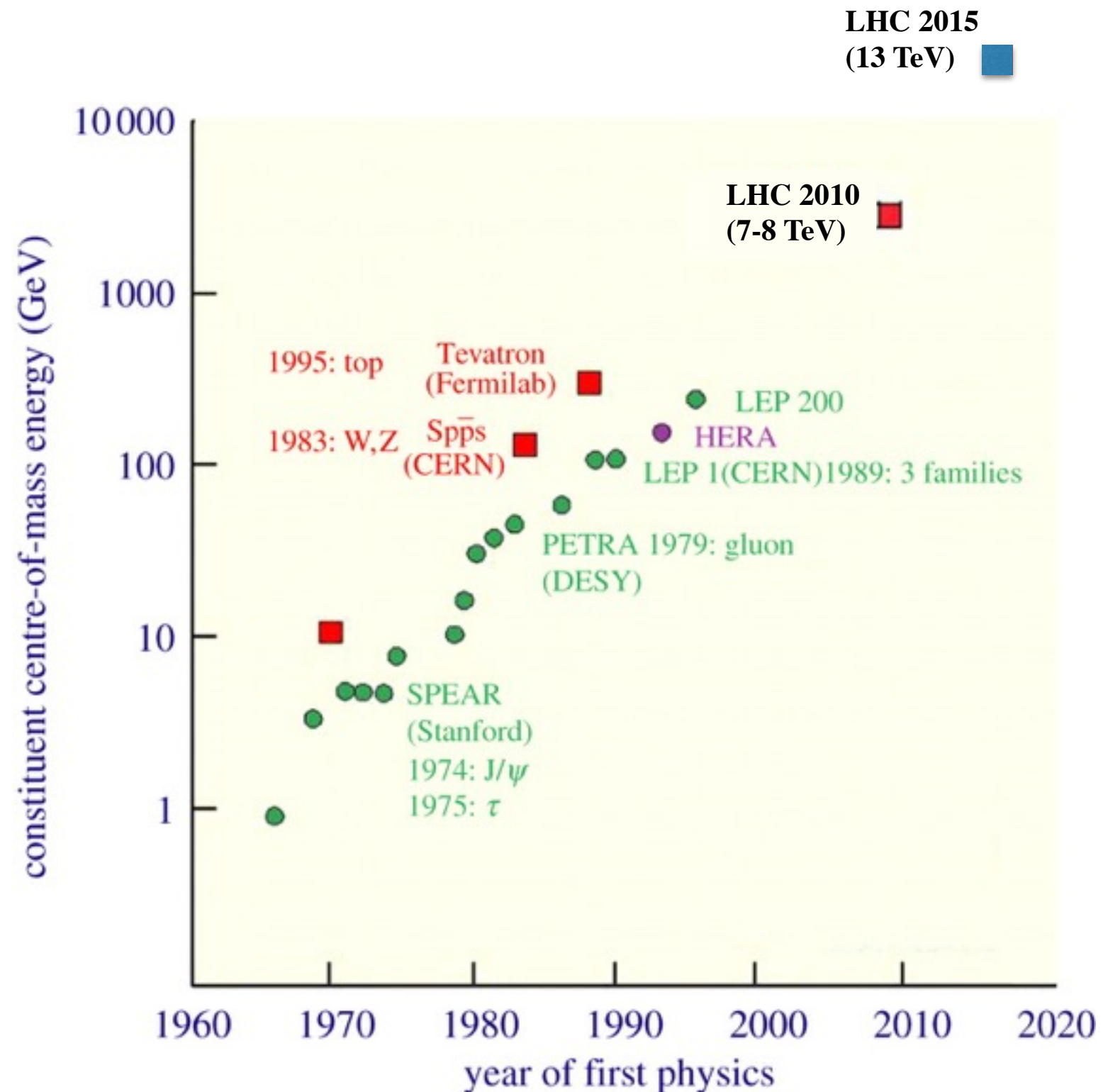
$$E = mc^2$$



- **i.e. nella collisione di due particelle di alta energia si puo' creare una particella nuova molto massiva**
- **piu' alta e' la massa della particella che vogliamo creare, piu' alta deve essere l'energia del collisore**

LHC (IL LUOGO IDEALE)

- **Collisore protone - protone**
- **Energia fino a 13 TeV**
 - mai raggiunta prima
 - circa 7 volte quella del collisore di precedente generazione (Tevatron)



LHC: CARATTERISTICHE

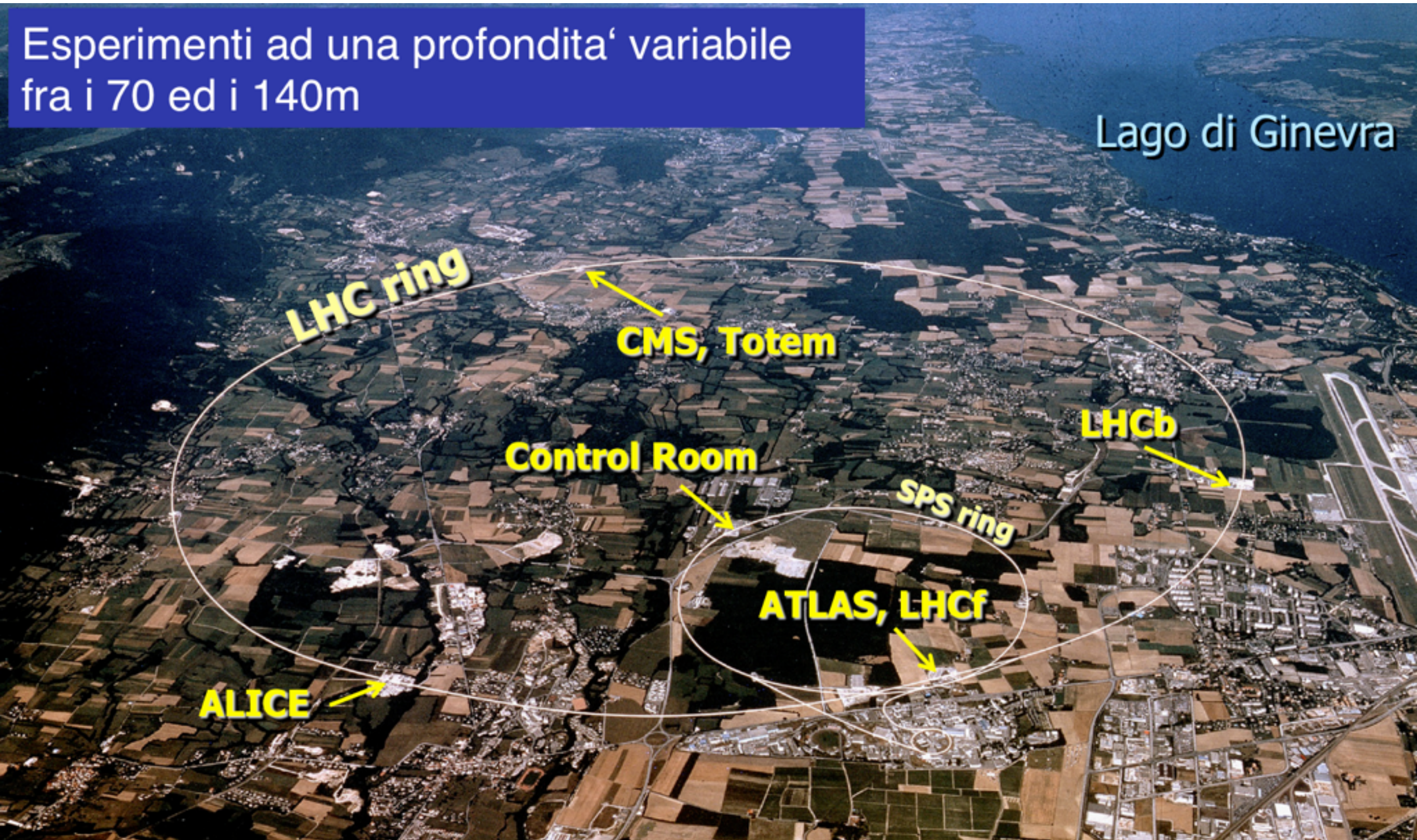
- I protoni accelerati da cavita' risonanti e mantenuti su una **traiettoria circolare (27km) da potenti magneti superconduttori**
 - campo magnetico = **8.3 Tesla**, temperatura = **1.9 K**
- Ogni fascio ha **protoni di 6.5 TeV** di energia che si muovono alla velocita' della luce
- I pacchetti di protoni si **incrociano ogni 25 nanosecondi**
- Circa **un miliardo (!) di collisioni ogni secondo** da analizzare



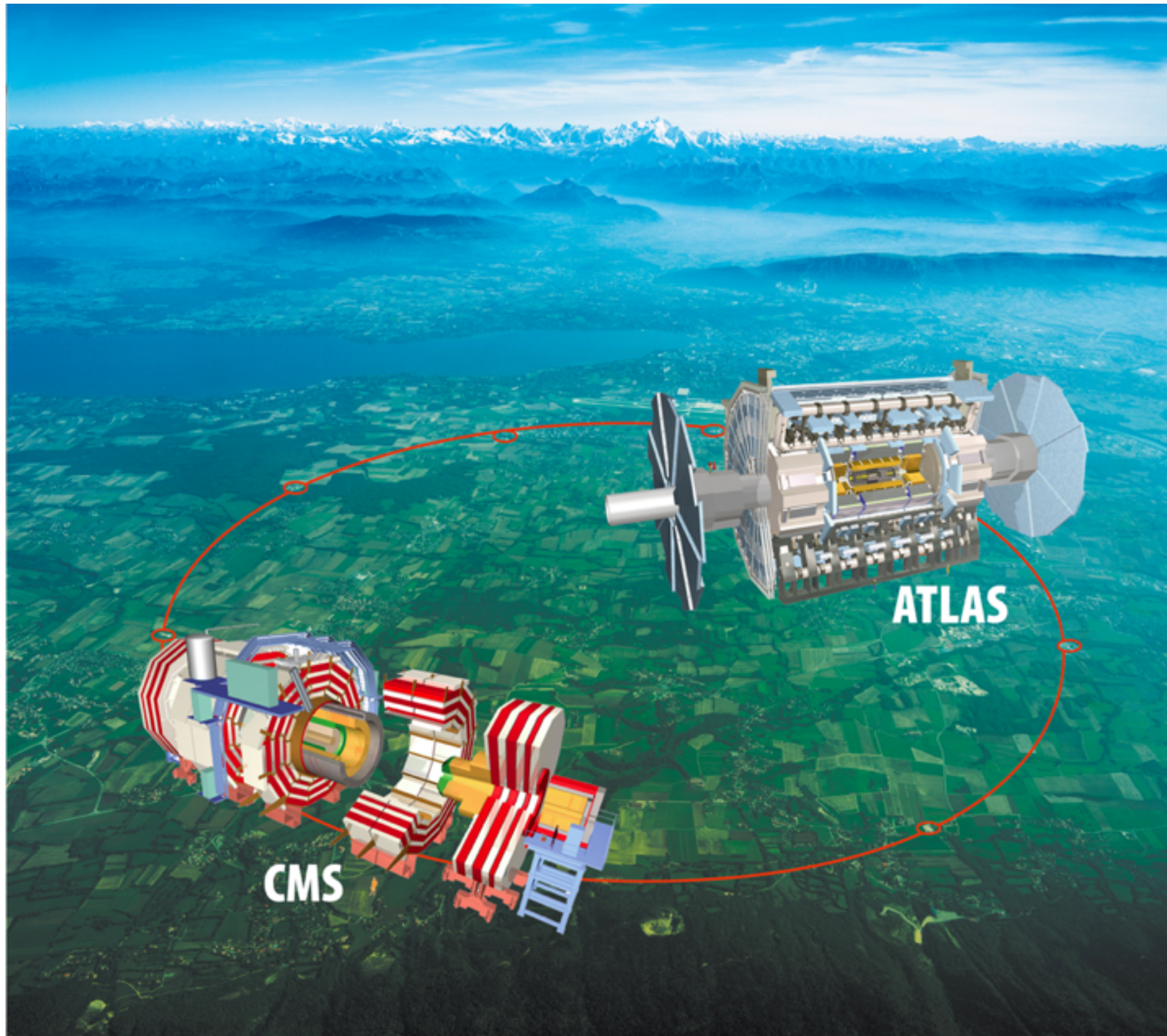
LHC: CARATTERISTICHE

Esperimenti ad una profondita' variabile
fra i 70 ed i 140m

Lago di Ginevra



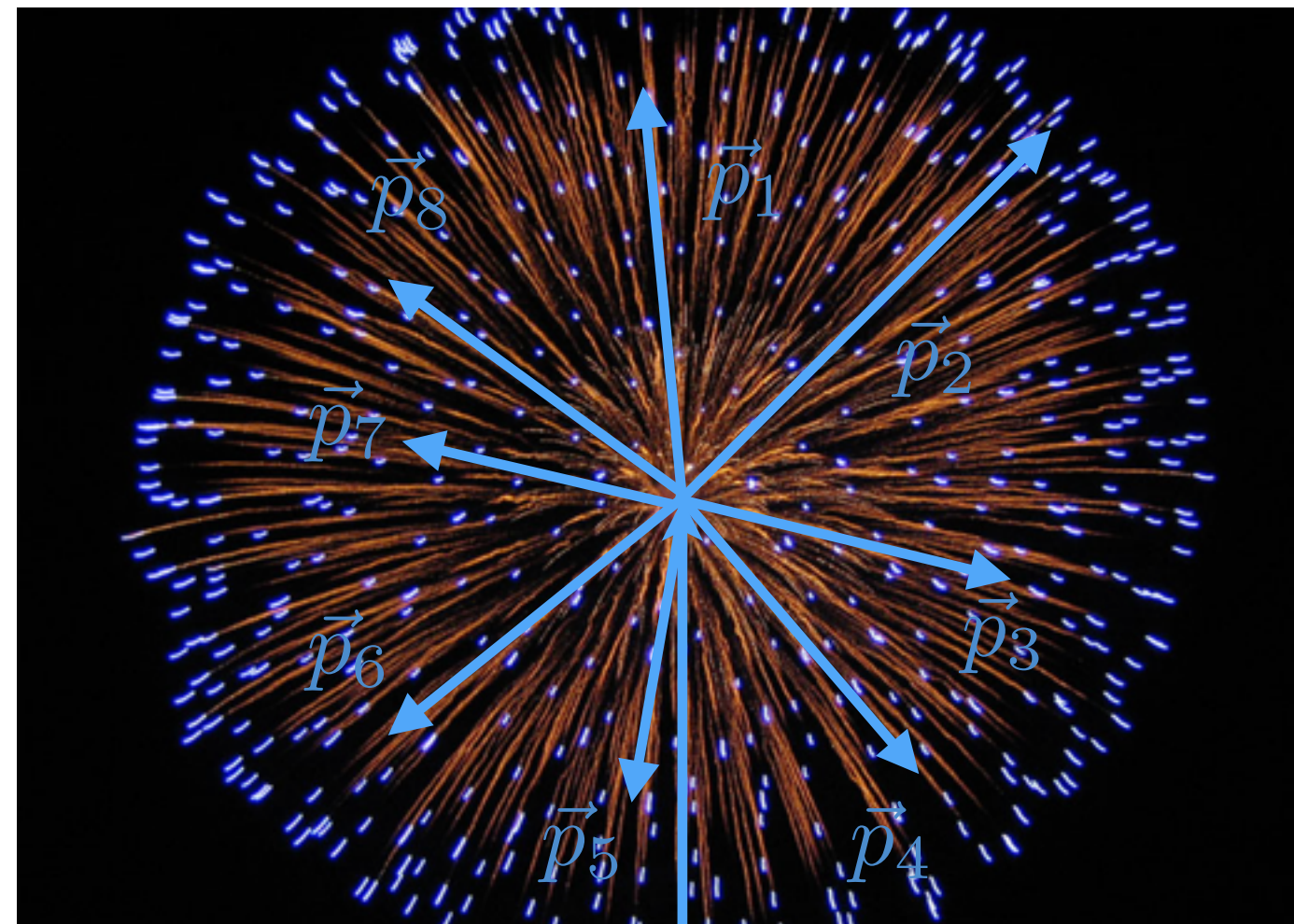
STUDIARE LE COLLISIONI: I RIVELATORI



FUOCHI D'ARTIFICIO

- **$\vec{p}_{iniziale} \sim 0$** al max traiettoria
- **p si conserva** (ma anche E , se si considera energia polvere da sparo)
 - somma delle quantita' di moto dei prodotti e' pari a quella iniziale
- Siccome **$p \sim 0$ allora simmetria sferica** in collisioni tra particelle elementari valgono stessi principi
- **Multiplicita'** puo' sembrare grande
 - in realta' all' LHC molto peggio

$$\vec{p}_{iniziale} = \sum_i \vec{p}_i$$



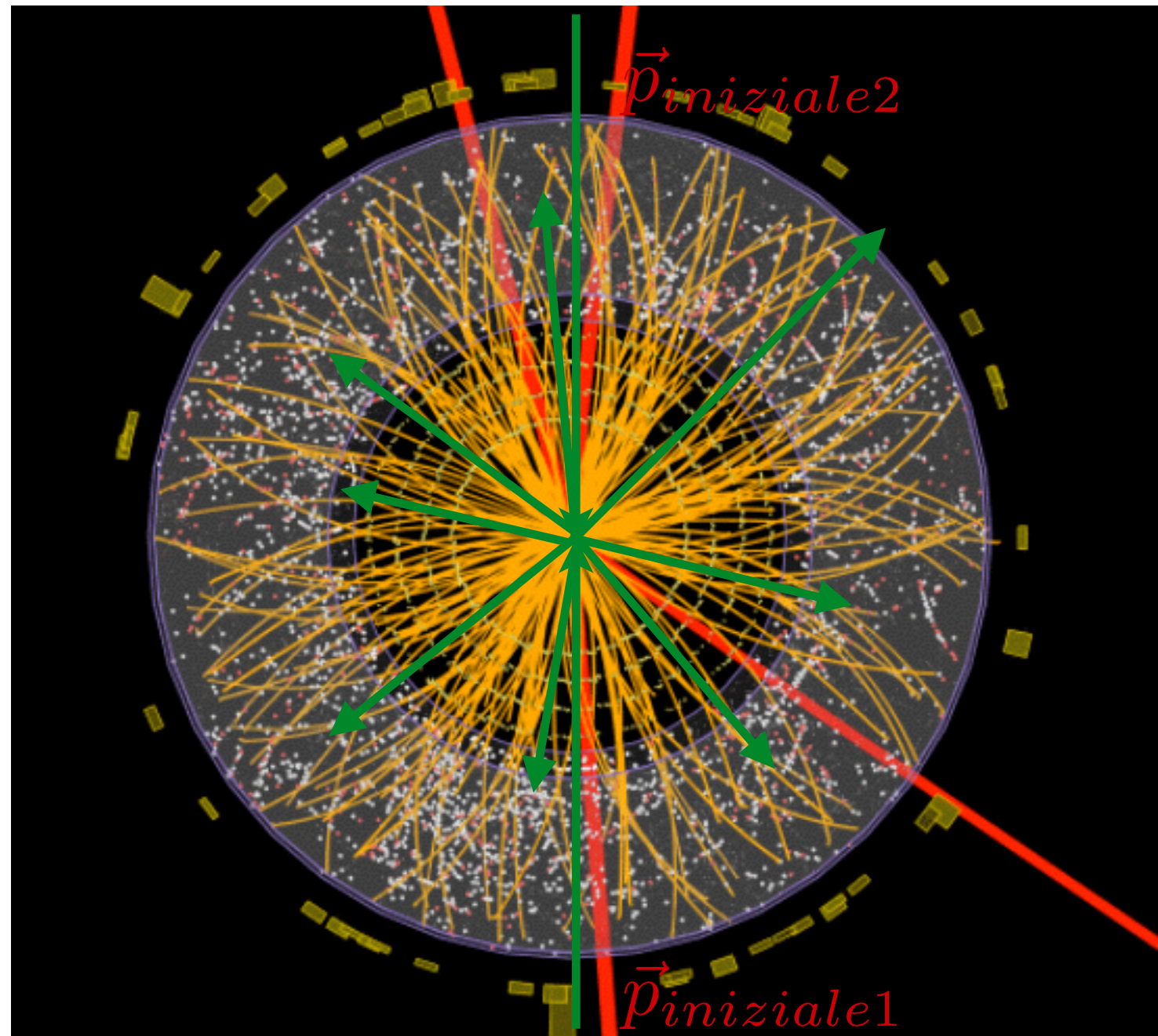
p = quantita' di moto

$\vec{p}_{iniziale}$

COLLISIONI ALL' LHC

- Molto simile per una collisione all'LHC
- **Tutte le particelle vanno misurate e identificate**
 - centinaia di particelle per evento!
- Il tutto va fatto a un **ritmo di 40 MHz** (40 milioni di volte per secondo)

$$\vec{p}_{iniziale} = \sum_i \vec{p}_i$$



COSA FARE CON UN RIVELATORE

1. Misurare la **quantita' di moto e l' energia** delle particelle stabili
 - oppure la quantita' di moto e la massa, oppure l' energia e la massa (bastano due grandezze su tre)
 - misurare la massa di una particella stabile significa “identificarla”, capire cioè se si tratta di un elettrone, di un muone, etc...
2. Capire se **coppie di particelle provengono da una particella instabile**
3. **Ricostruire la massa invariante** della particella instabile

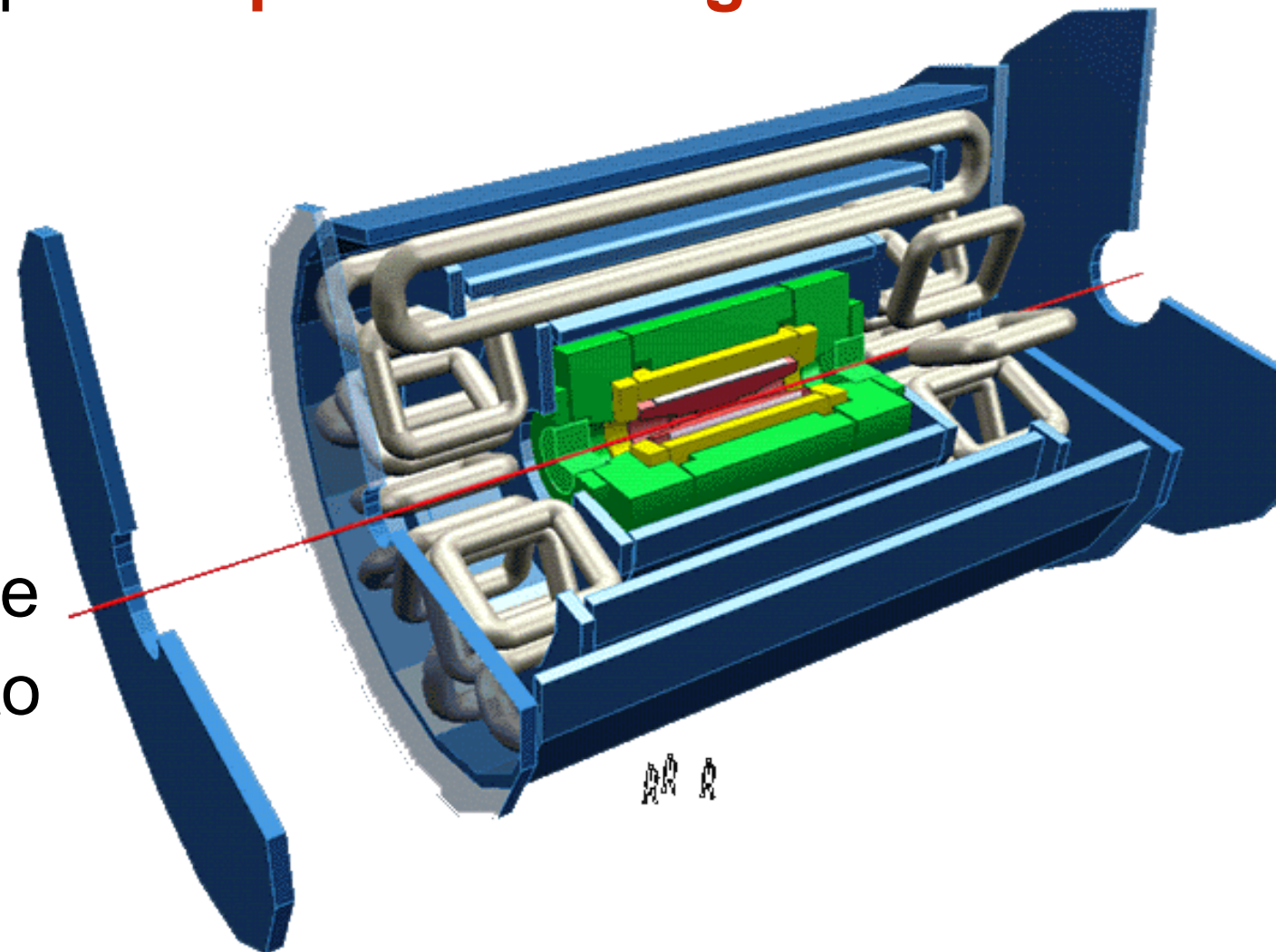
RIVELATORE “TIPO”

- **A cipolla**

1. diversi tipi di rivelatori **uno dentro l'altro a formare strati** di rivelazione intorno al punto dove si scontrano le particelle
2. I **rivelatori interni** devono avere un'**alta risoluzione spaziale** per distinguere particelle molto vicine
3. I **rivelatori esterni** devono coprire **superfici molto grandi**

- **Campo magnetico**

- per curvare le particelle cariche e misurarne la quantità di moto



RIVELARE PARTICELLE CARICHE

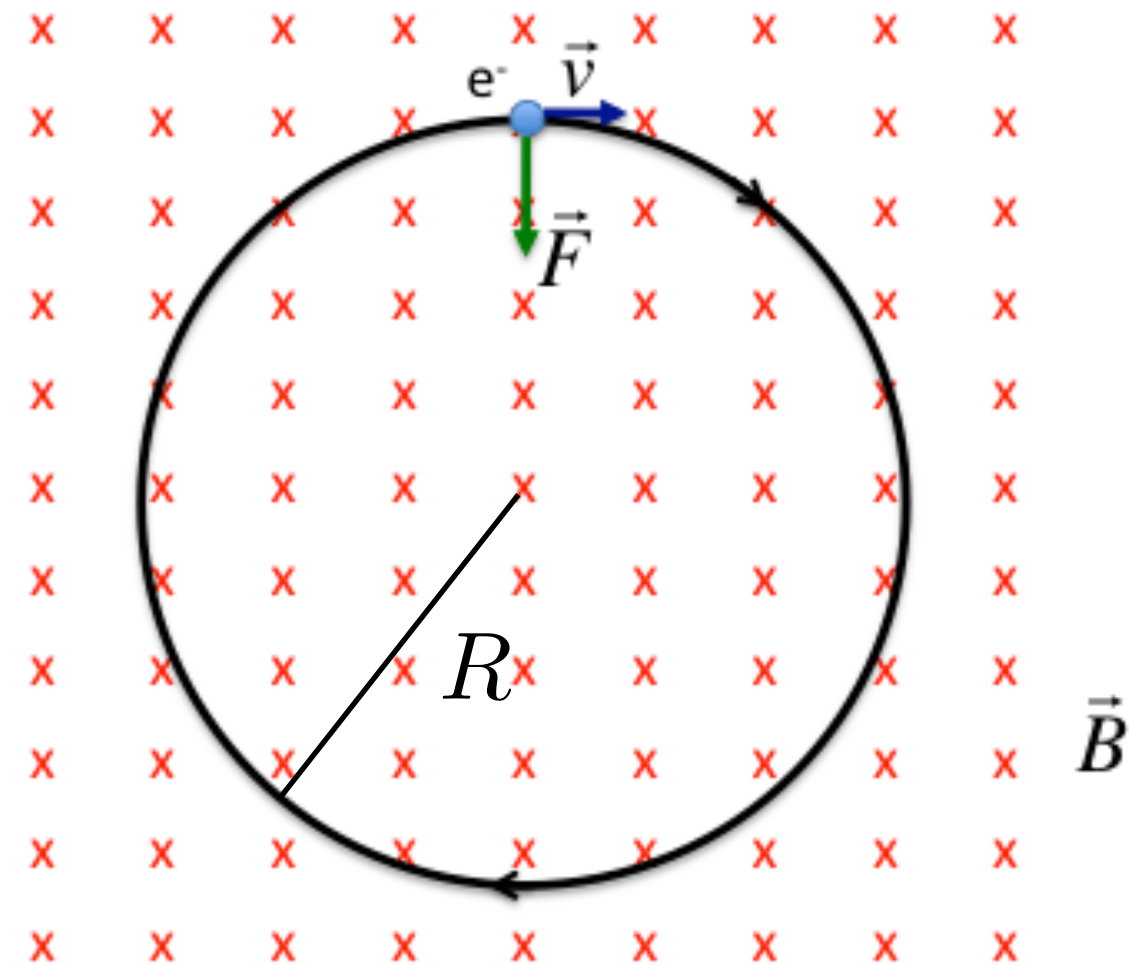
- Legge di **Lorentz**

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- Quantita' di moto legata a **raggio**

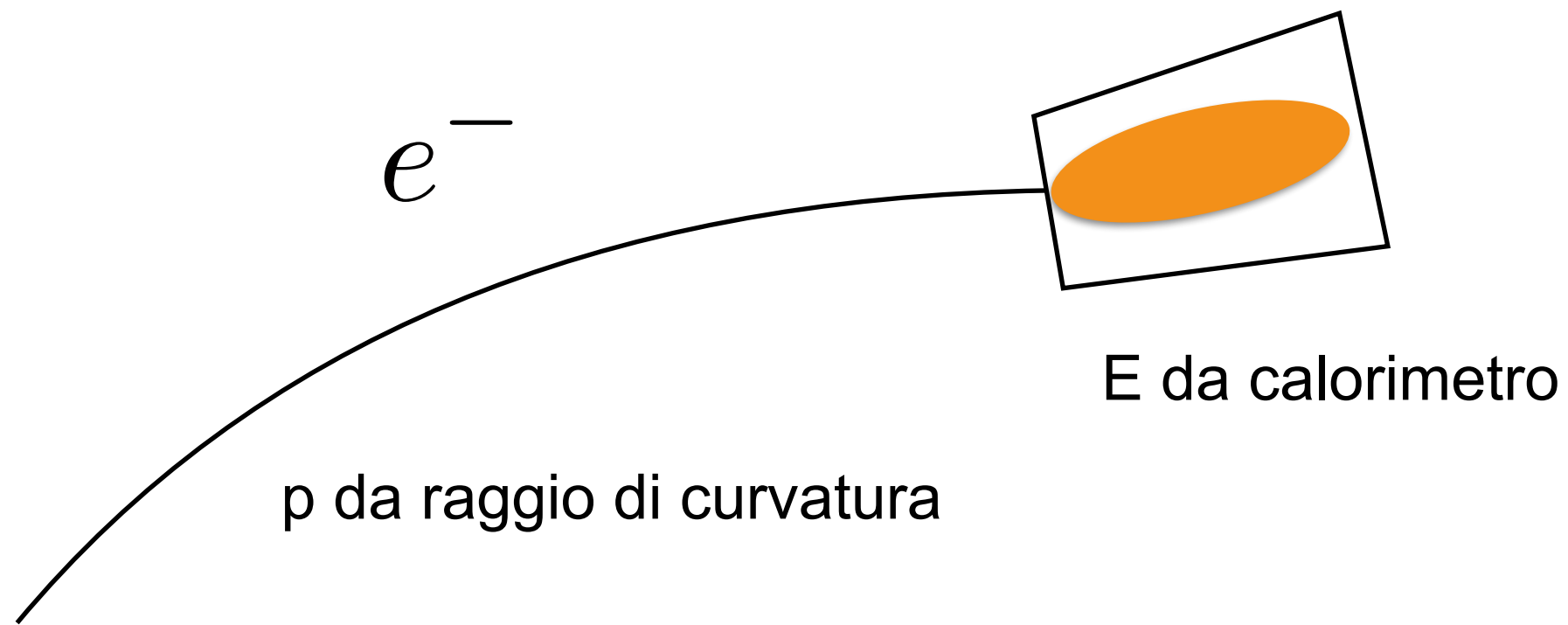
$$p = qBR$$

- Dalla misura di R si misura p



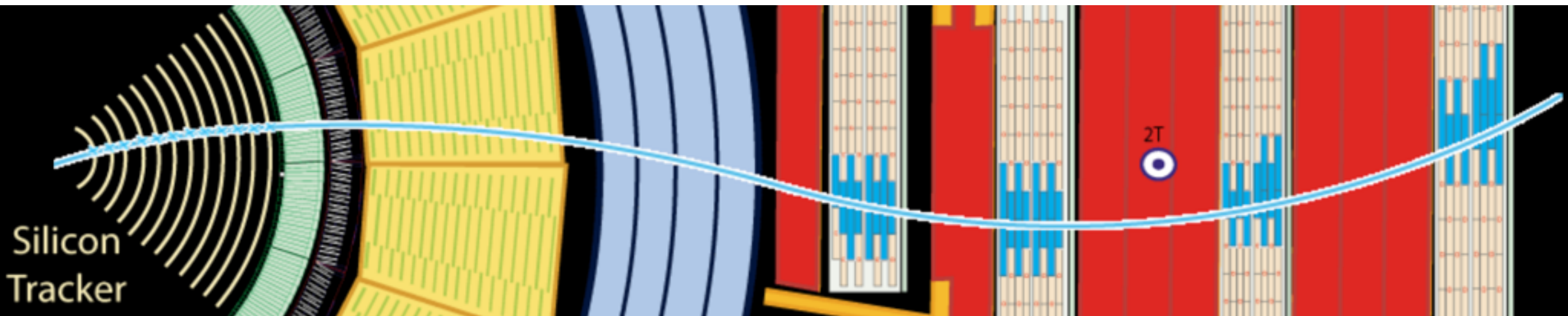
RIVELARE GLI ELETTRONI

- Completamente **assorbiti in rivelatori densi (calorimetri) dove si misura la loro energia**
- **Quantita' di moto dal raggio di curvatura ricostruito**
 - misura ridondante



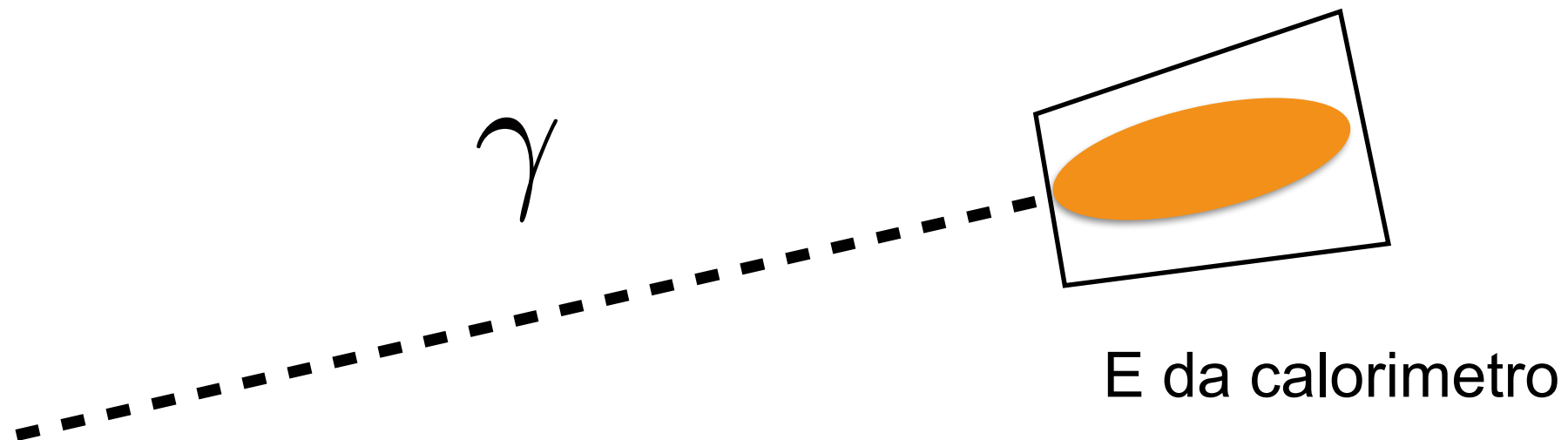
RIVELARE MUONI

- **Interazione debole con la materia**
 - Attraversano tutto il rivelatore
- **Carichi quindi curvano**
 - quantita' di moto da raggio di curvatura

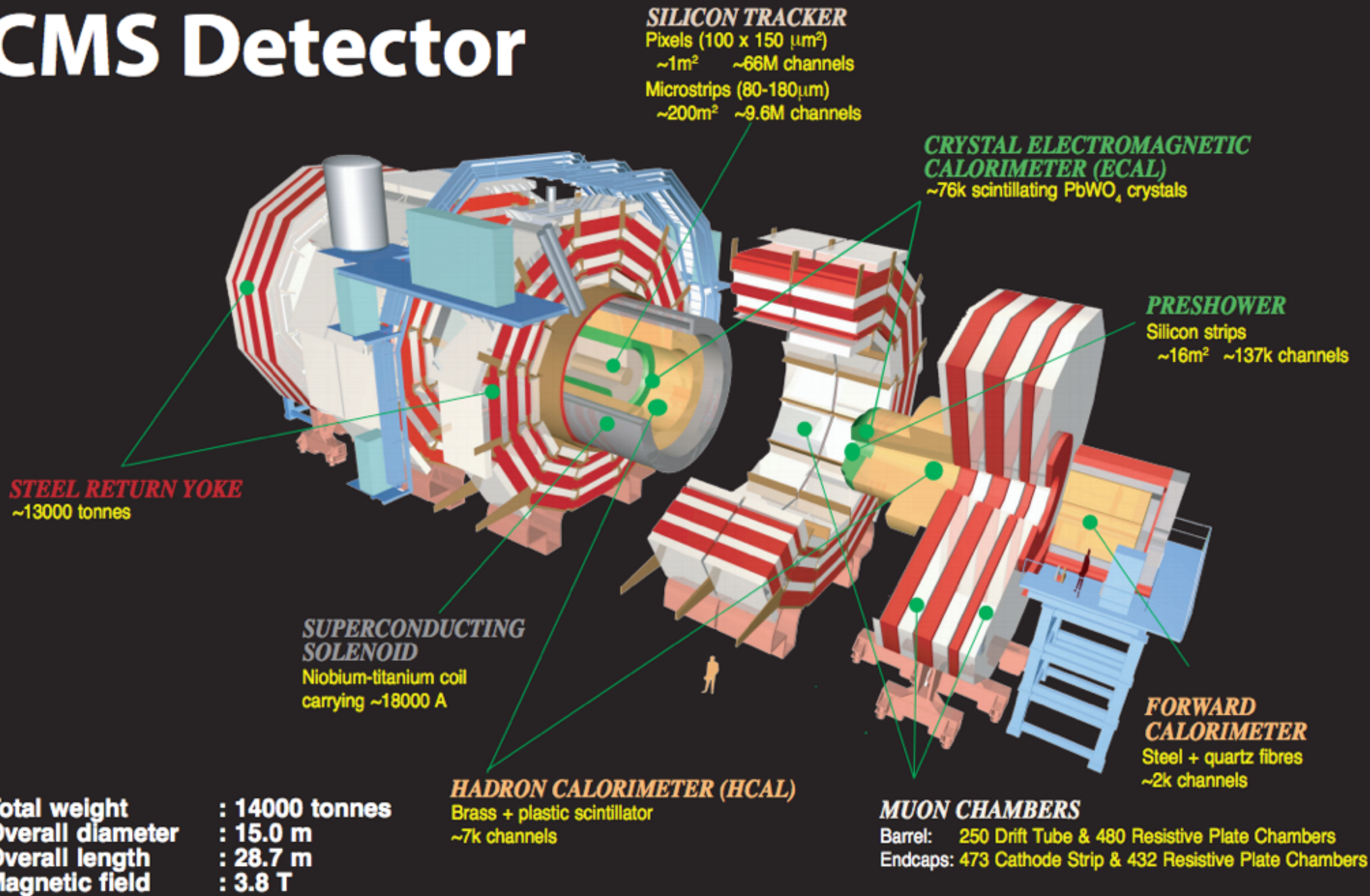


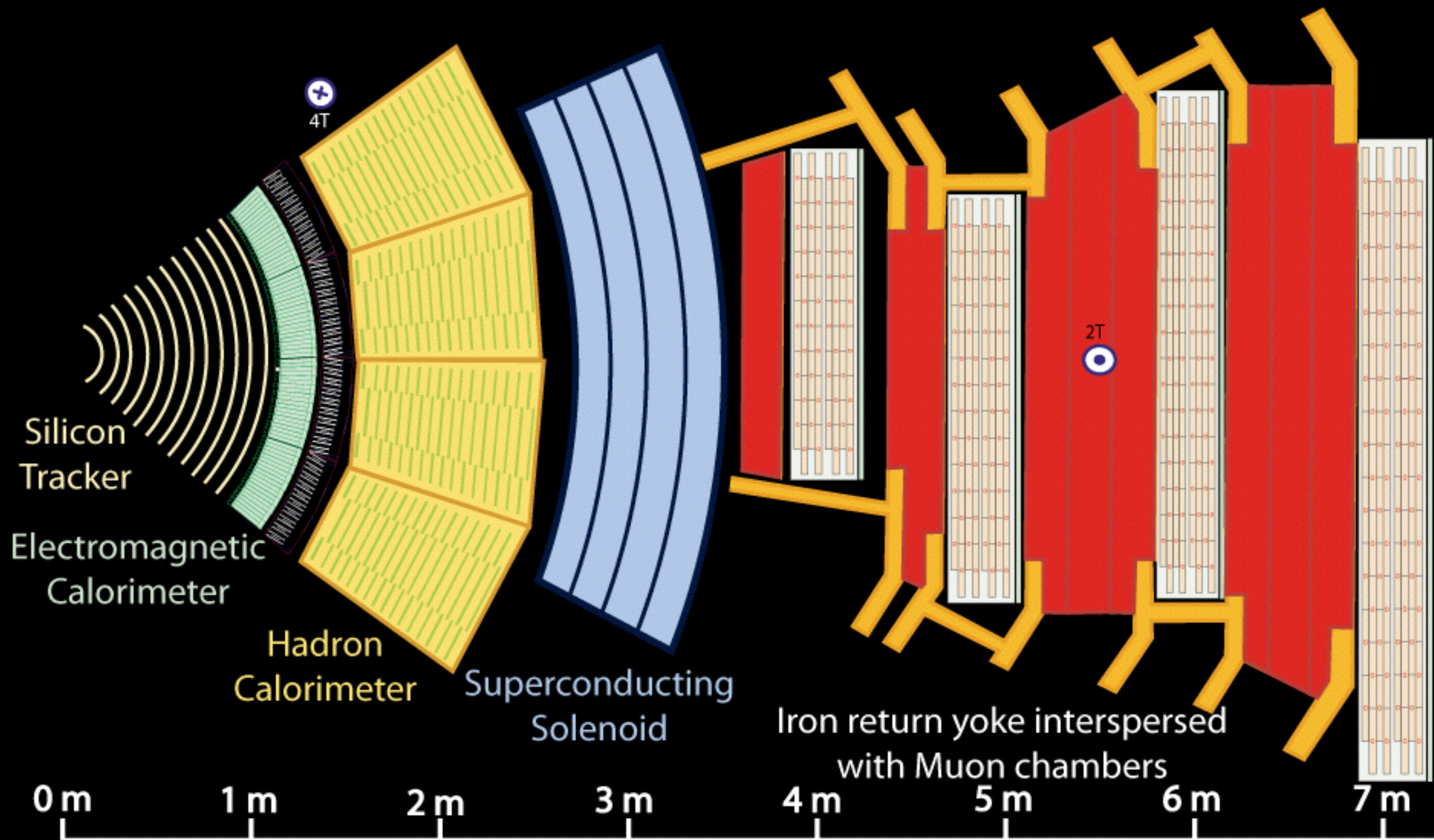
RIVELARE I FOTONI

- **Neutri quindi non curvano**
- **Assorbiti dai rivelatori massivi (calorimetri) come gli elettroni**
 - ne misuriamo l' energia
- **Massa = 0** (quindi $E=p$)



CMS Detector





Key:

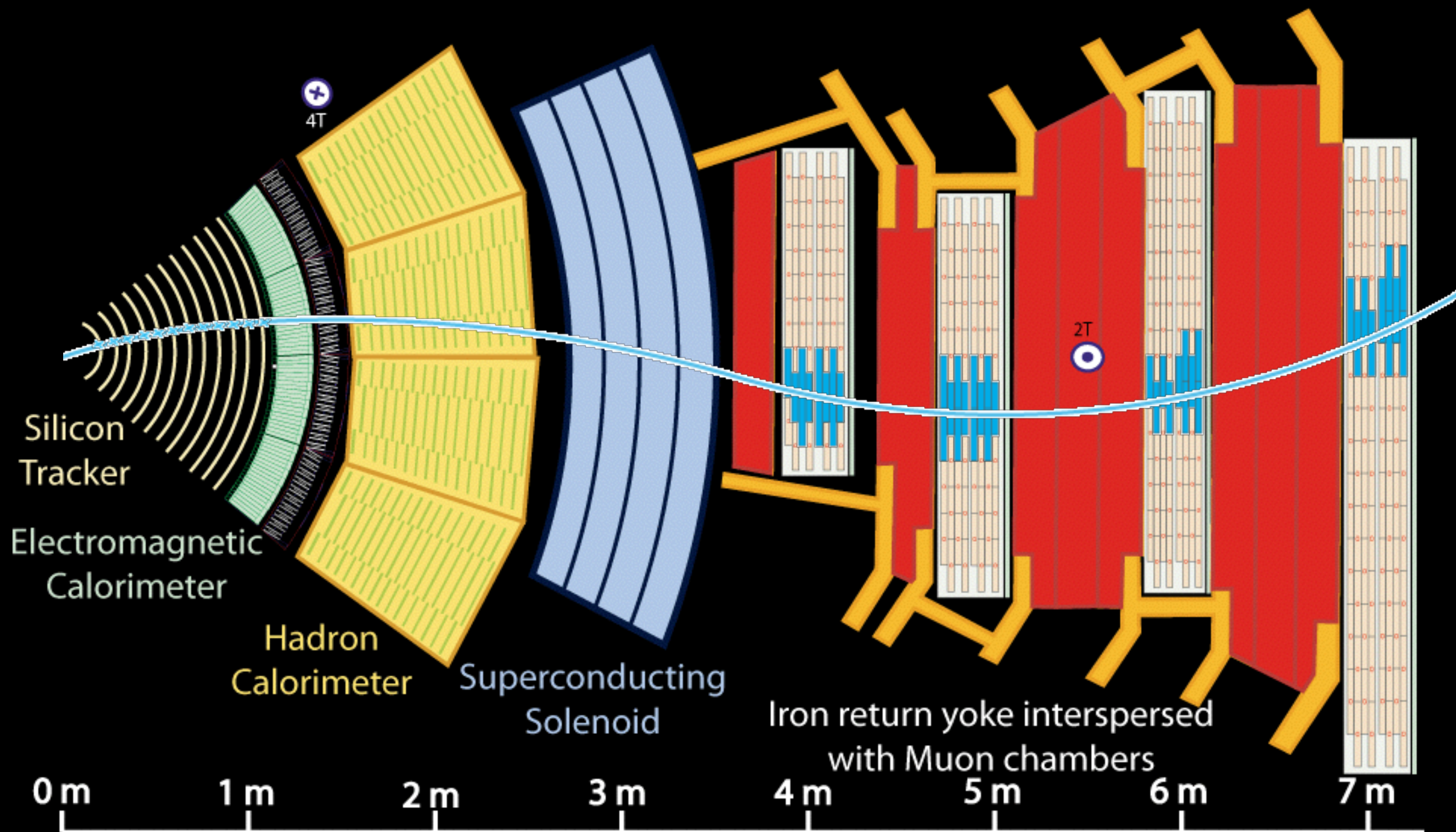
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

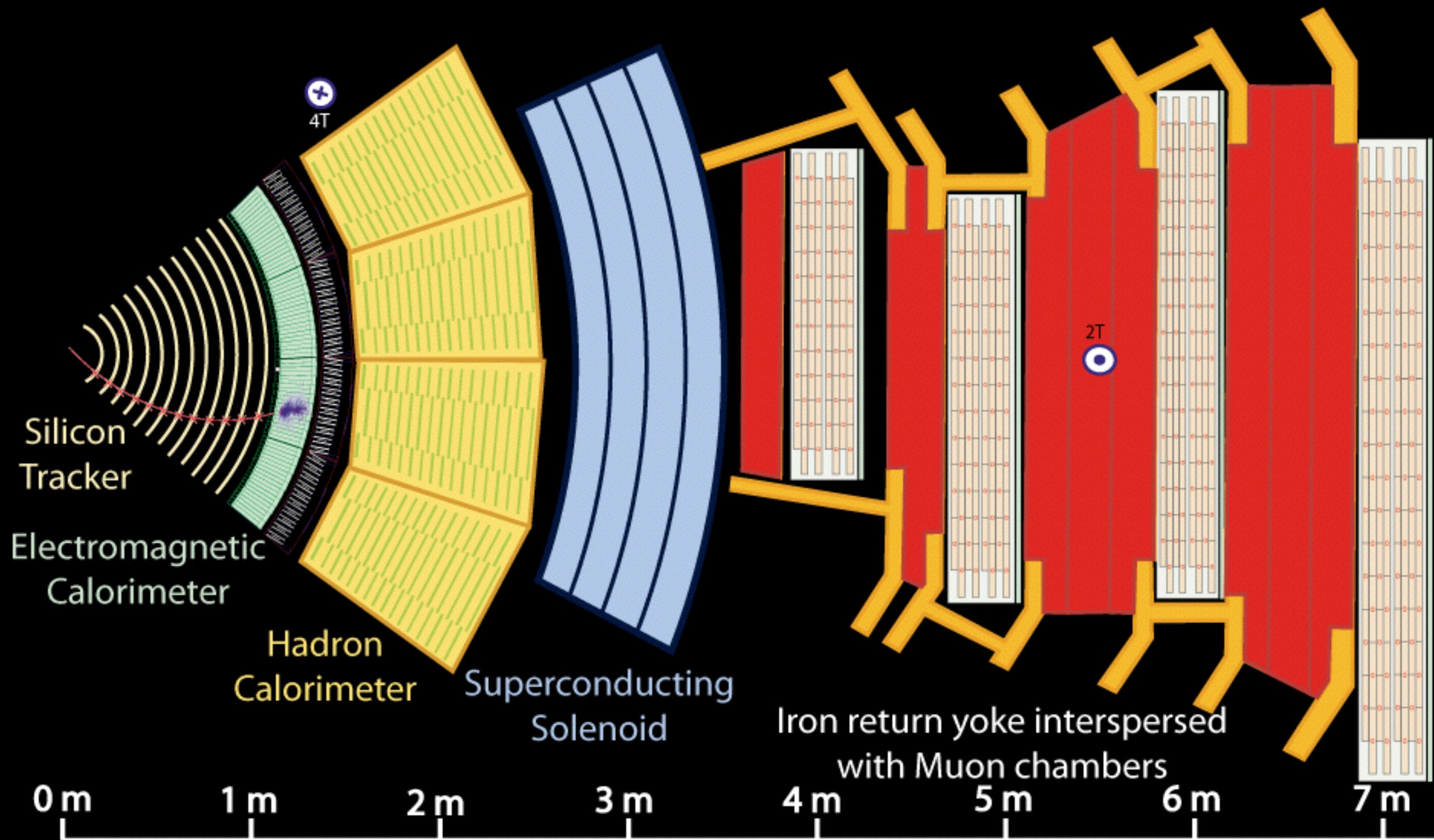
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

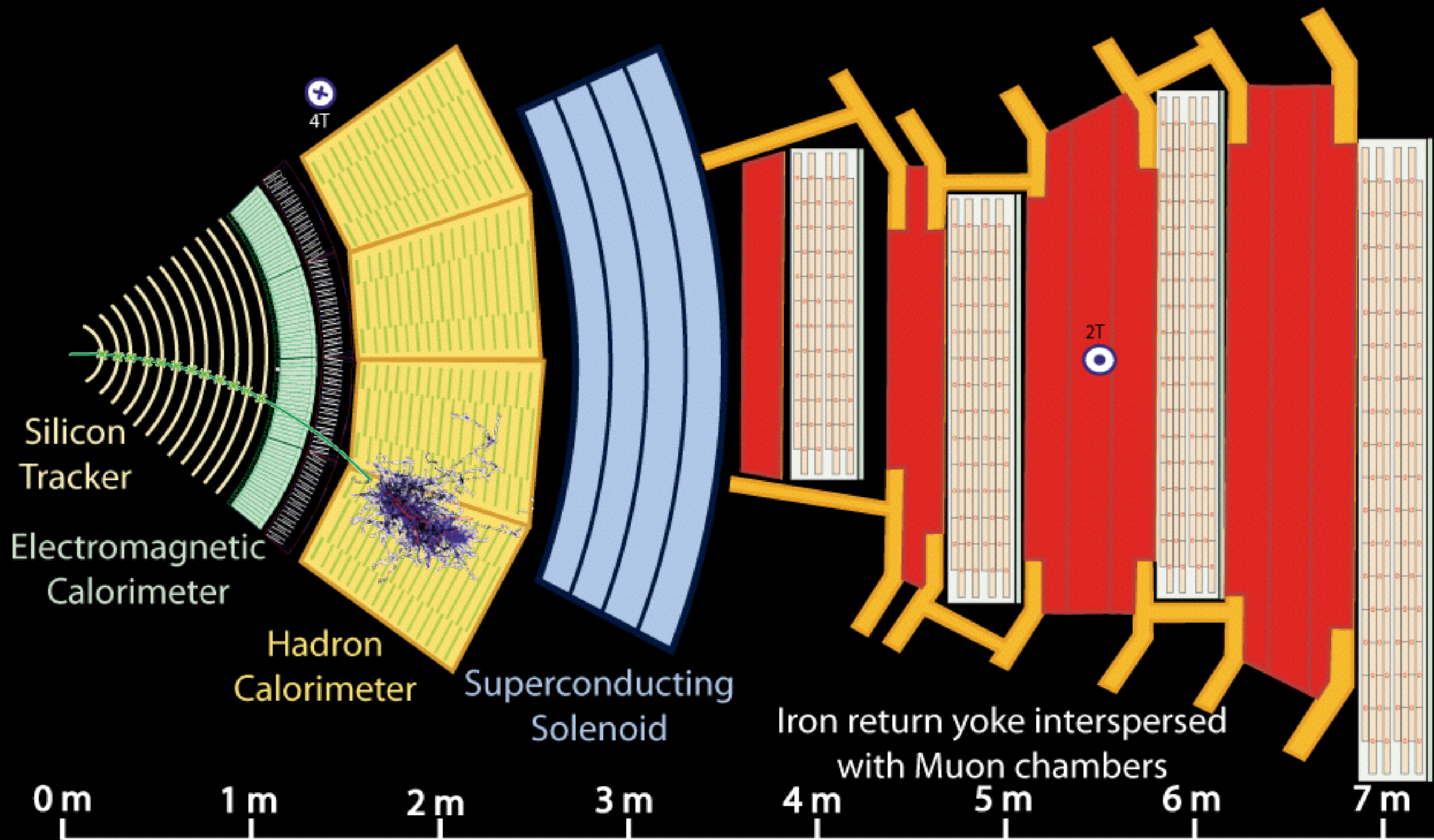
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

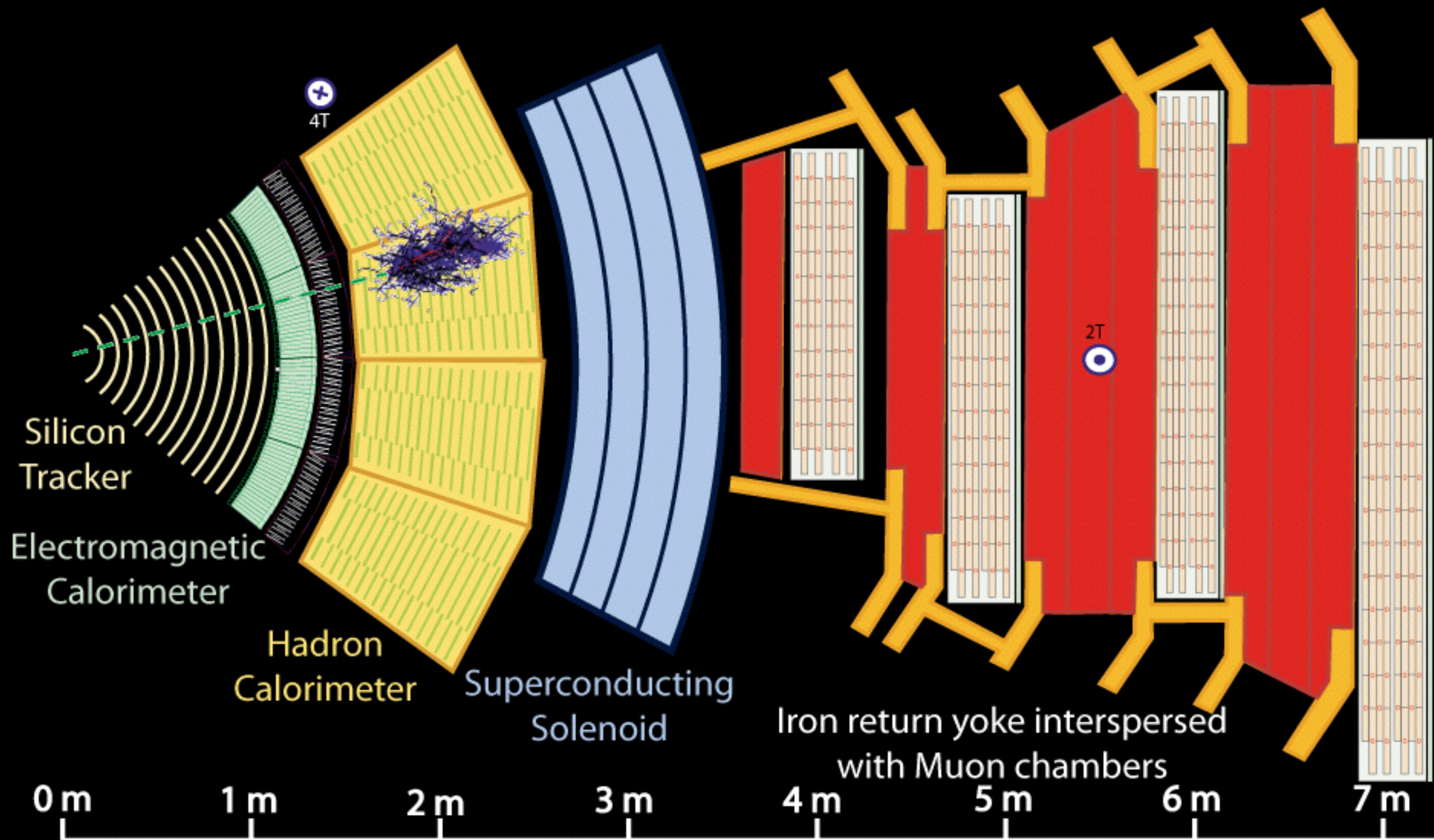
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

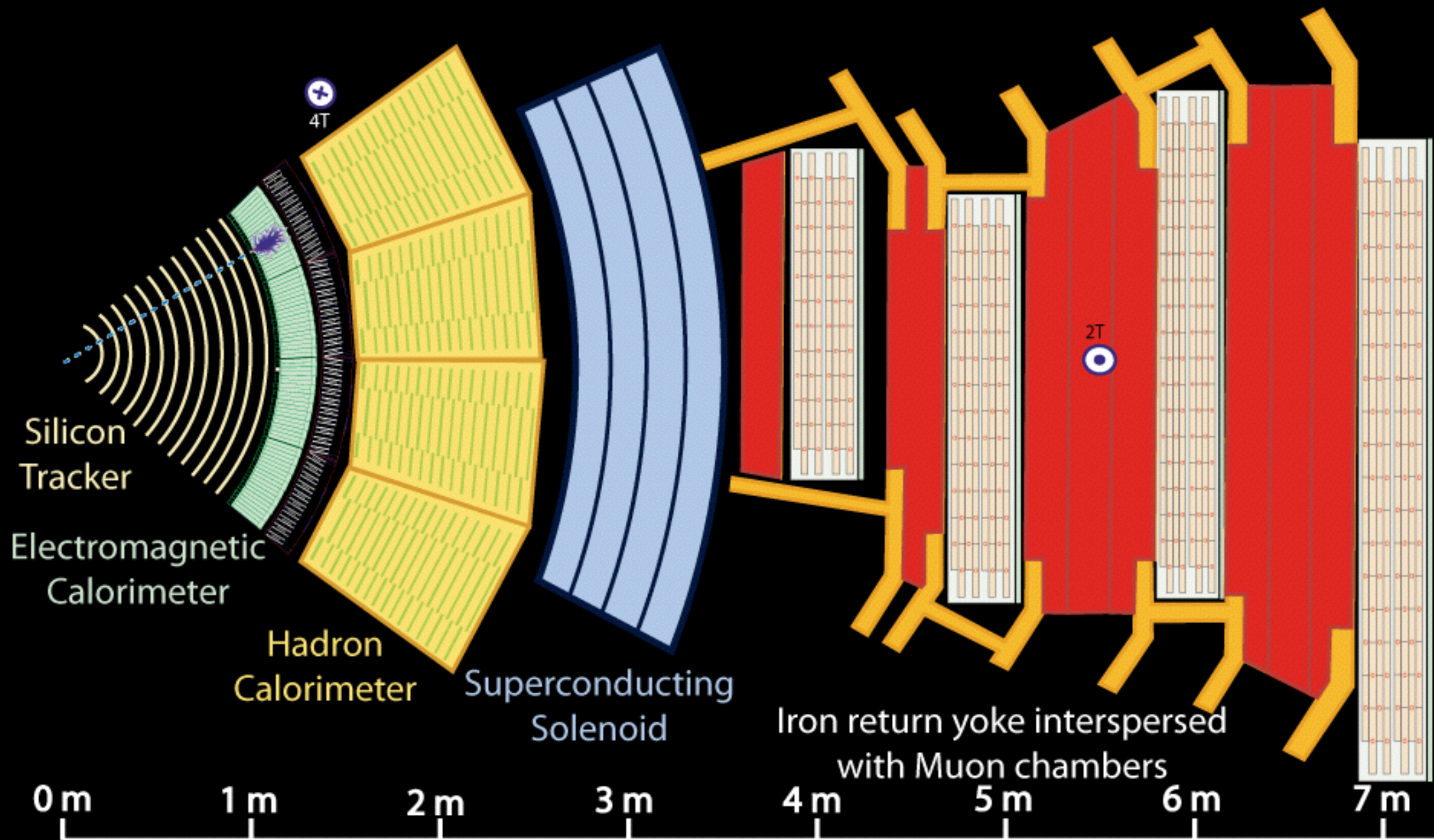
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

CINEMATICA RELATIVISTICA

- Basata sulla **relativita' ristretta** (velocita' luce costante in tutti i sistemi di riferimento)
- **Estensione** della cinematica/meccanica classica
 - condivide **principi di conservazione**

1. **Quantita' di moto** si conserva

$$\vec{p}_{iniziale} = \vec{p}_{finale}$$

2. **Energia** si conserva

$$E_{iniziale} = E_{finale}$$

• **Cosa e' E?**

In meccanica classica

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$$

In cinematica relativistica

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

RICOSTRUIRE RISONANZA: DECADIMENTO

$$E = mc^2$$

- **Particelle possono decadere e trasformarsi in altre particelle**
- **Esempio:** particella ferma che decade in due particelle uguali

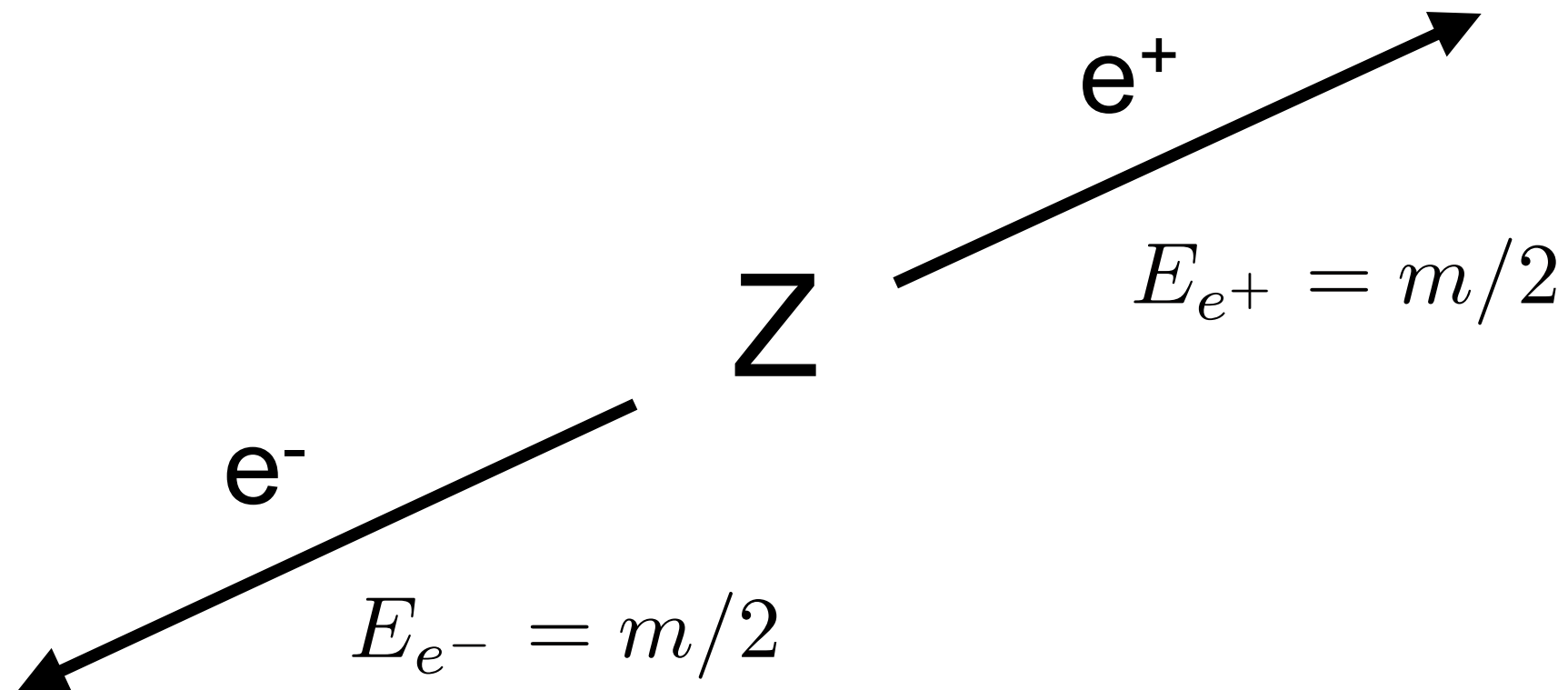
$$\vec{p}_{iniziale} = 0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \quad \Rightarrow \quad |\vec{p}_1| = |\vec{p}_2|$$

$$m = E_1 + E_2 = 2E \quad \Rightarrow \quad E = m/2$$

RICOSTRUIRE RISONANZA: DECADIMENTO

$$E = mc^2$$

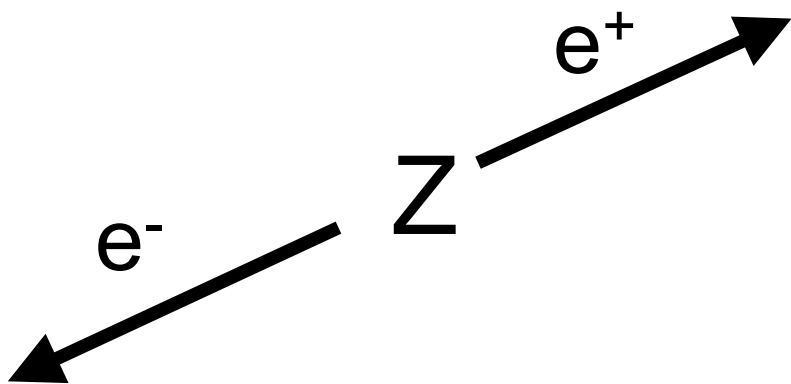
- **Particelle possono decadere e trasformarsi in altre particelle**
- **Esempio:** particella ferma che decade in due particelle uguali



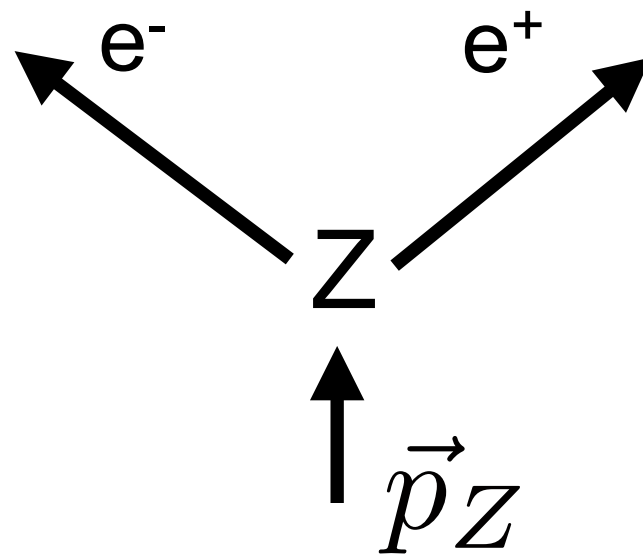
DECADIMENTO IN VOLO

- Se la **particella non e' ferma le cose si complicano** un pochino ma concettualmente situazione non molto diversa da fisica classica
- L' angolo tra le particelle si riduce (non piu' 180^0 ma meno)

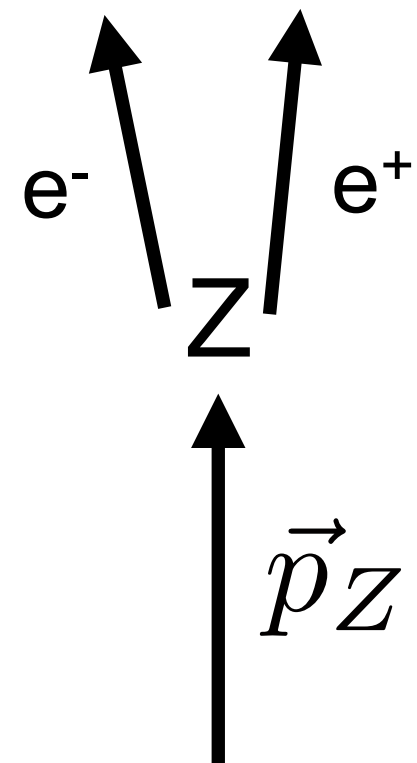
Z ferma



Z poco energetica



Z molto energetica



MASSA INVARIANTE

Se dunque **misuriamo la cinematica** dei prodotti di decadimento **possiamo risalire alla massa della particella decaduta!**

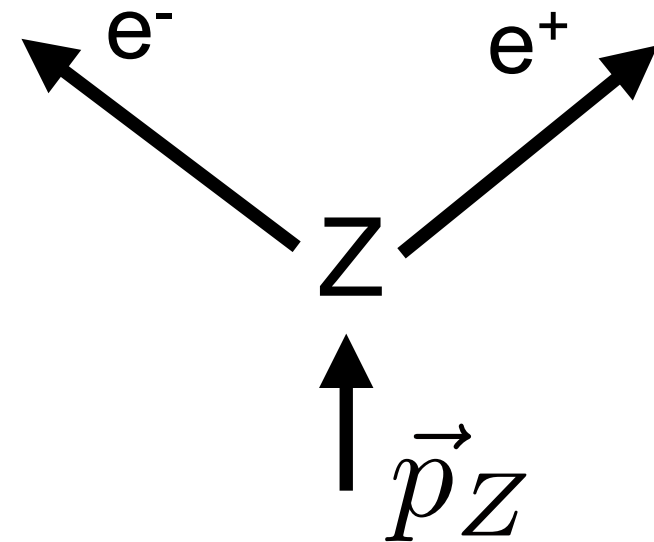
$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$



$$m = \sqrt{E^2 / c^4 - p^2 / c^2}$$

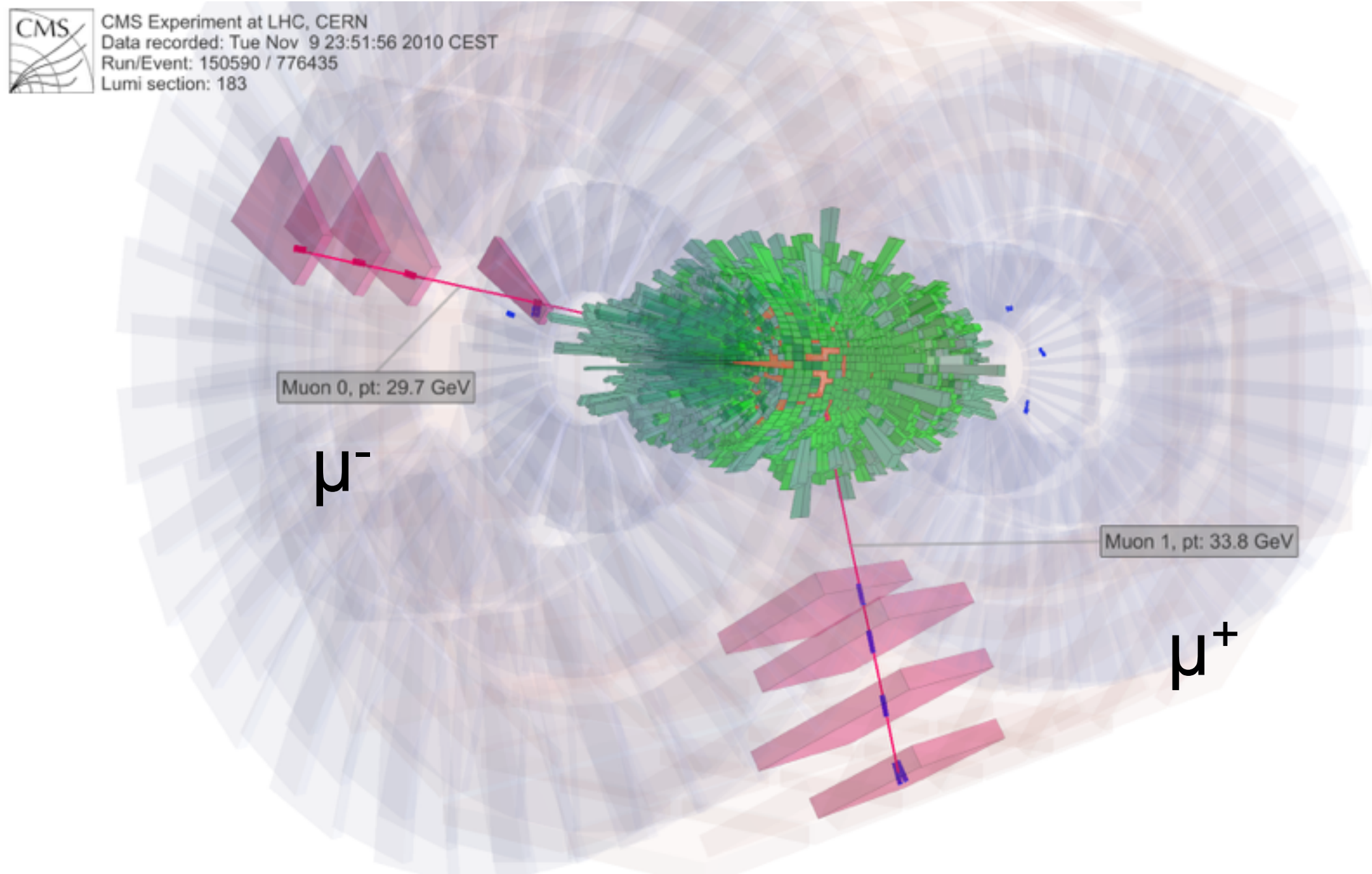


$$m = \sqrt{(E_{e^+} + E_{e^-})^2 / c^4 - |\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}|^2 / c^2}$$



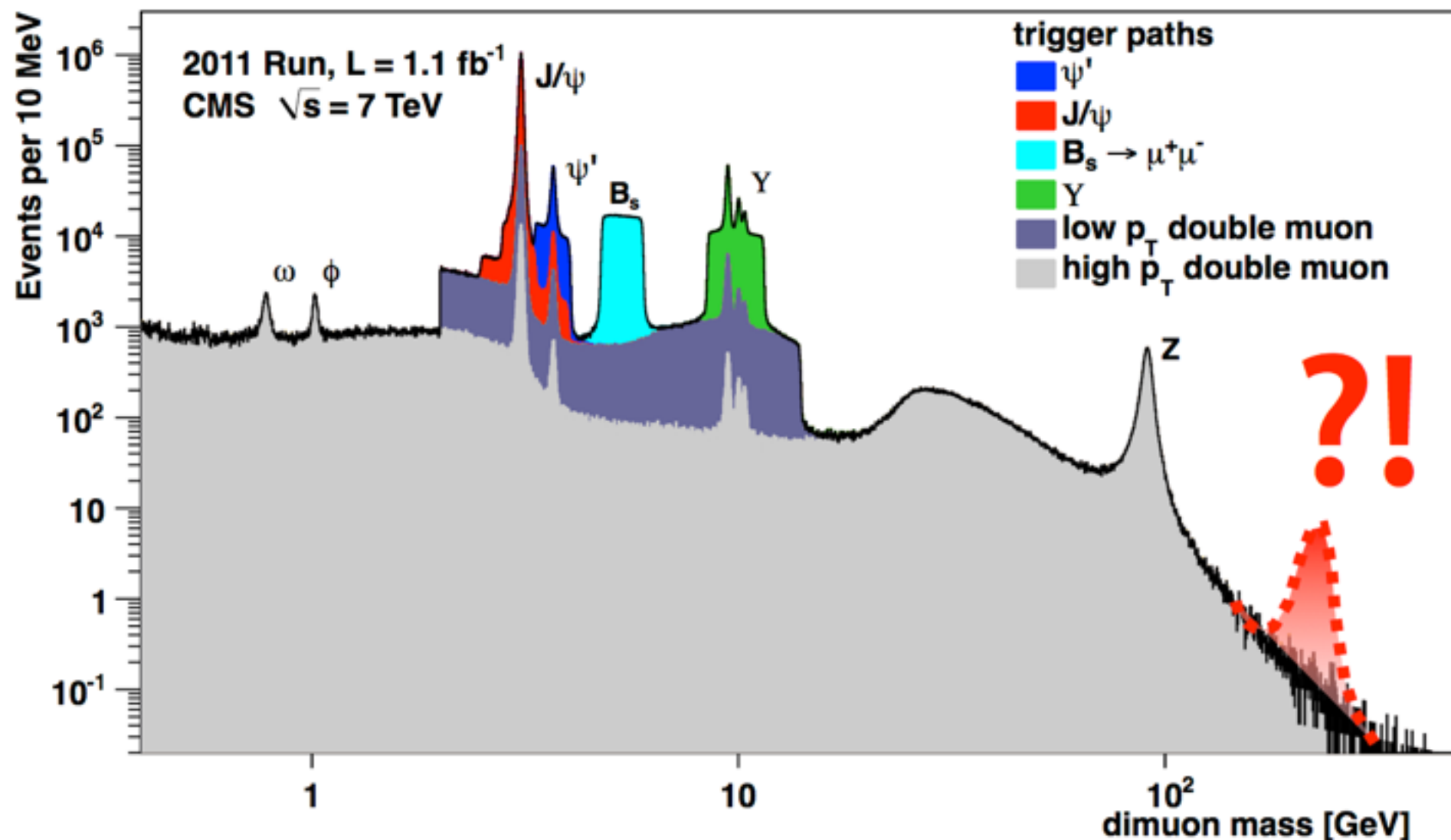
UN ESEMPIO: Z IN 2 MUONI

Z in due muoni ricostruito in una collisione tra ioni carichi



SPINGERSI AD ALTA MASSA

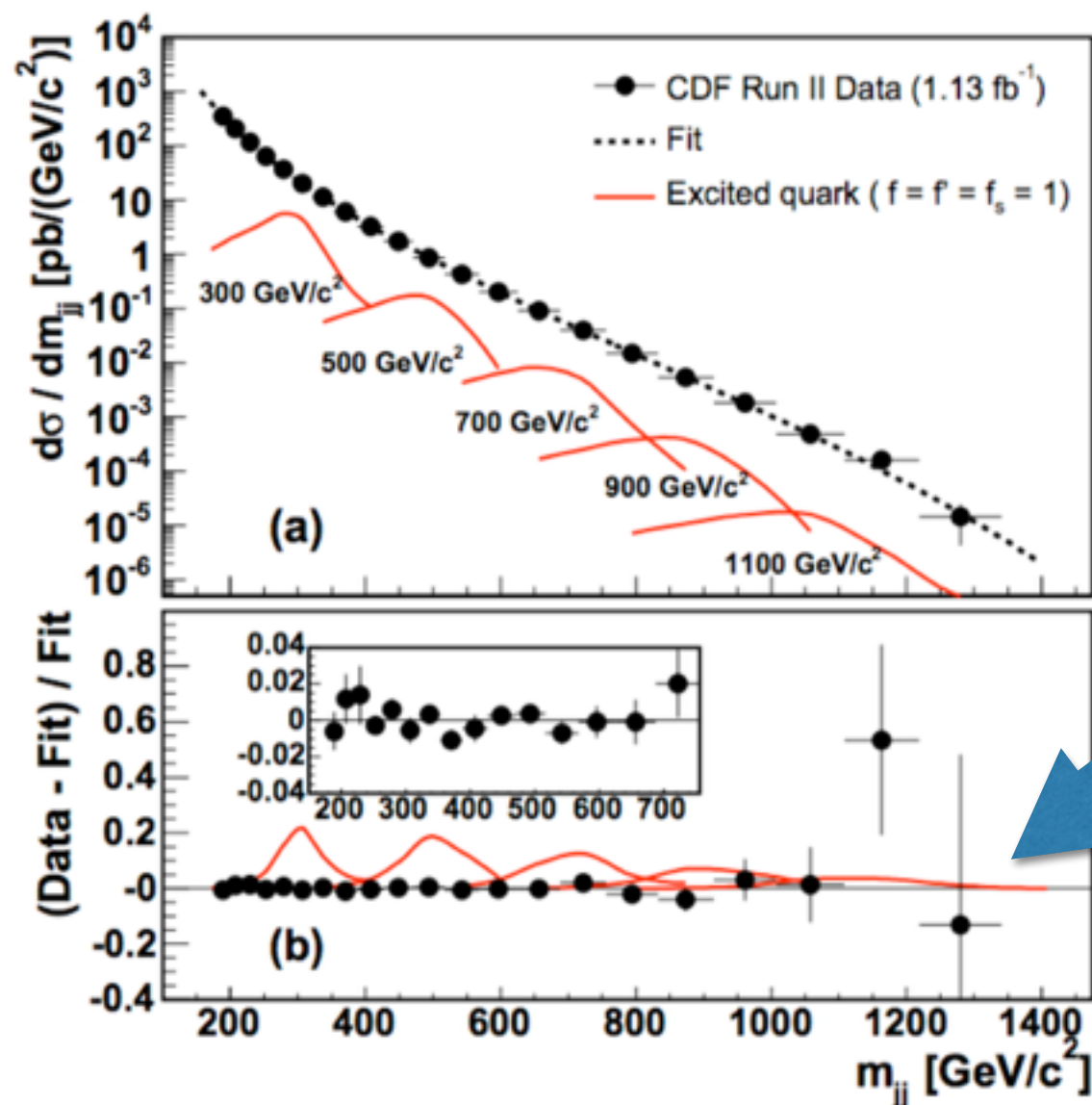
- Gli esperimenti al LHC hanno già “riscoperto” tutte le risonanze del Modello Standard
- Ma **possono spingersi in territori inesplorati** (masse elevate)



SPINGERSI AD ALTA MASSA

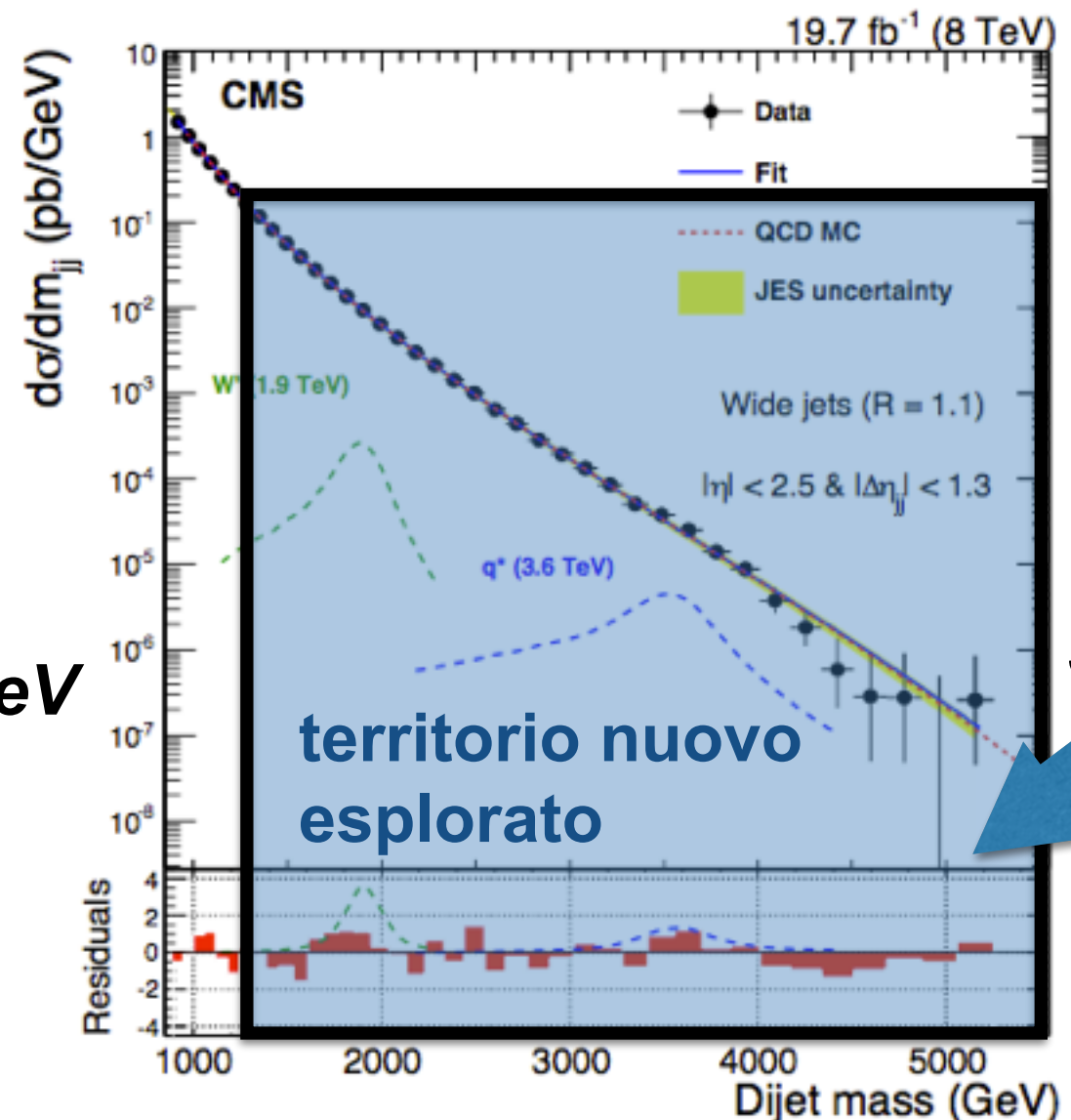
- **Gli esperimenti al LHC hanno già “riscoperto” tutte le risonanze del Modello Standard**
- Ma **possono spingersi in territori inesplorati** (masse elevate)

Tevatron



1.3TeV

LHC



5.2 TeV

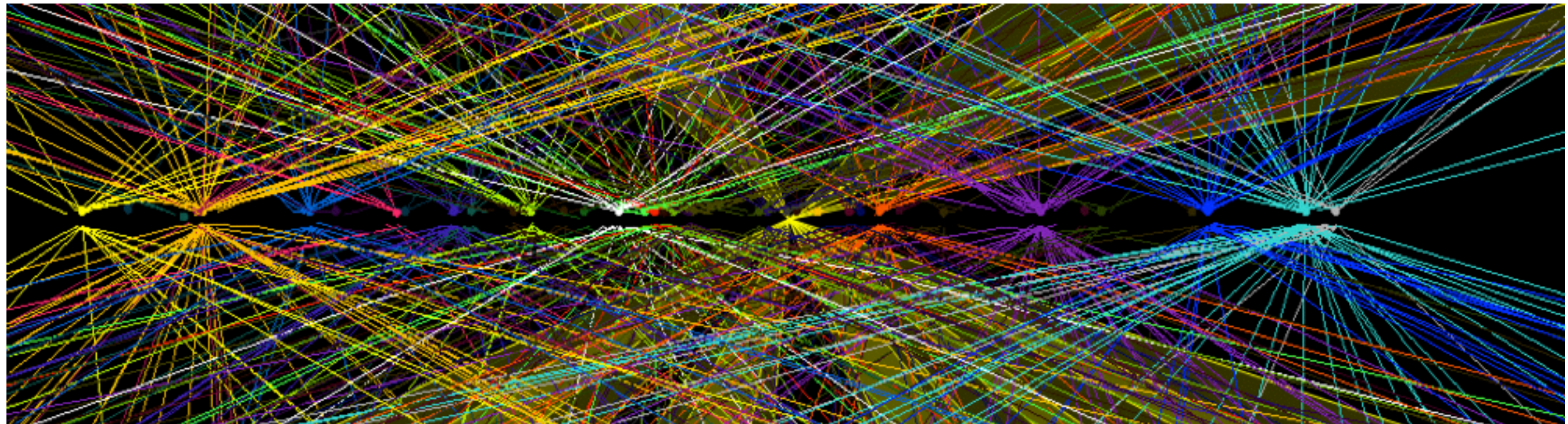
territorio nuovo esplorato

TUTT'ALTRO CHE BANALE: PILEUP

A causa dell'alta efficienza delle collisioni ci sono svariate interazioni quando due pacchetti si incrociano.

Complicazioni:

- **bisogna trovare l'interazione giusta**
- **sottrarre le particelle aggiuntive** emesse dalle interazioni aggiuntive
- **ci molti piu' dati da salvare ed eventi da ricostruire**

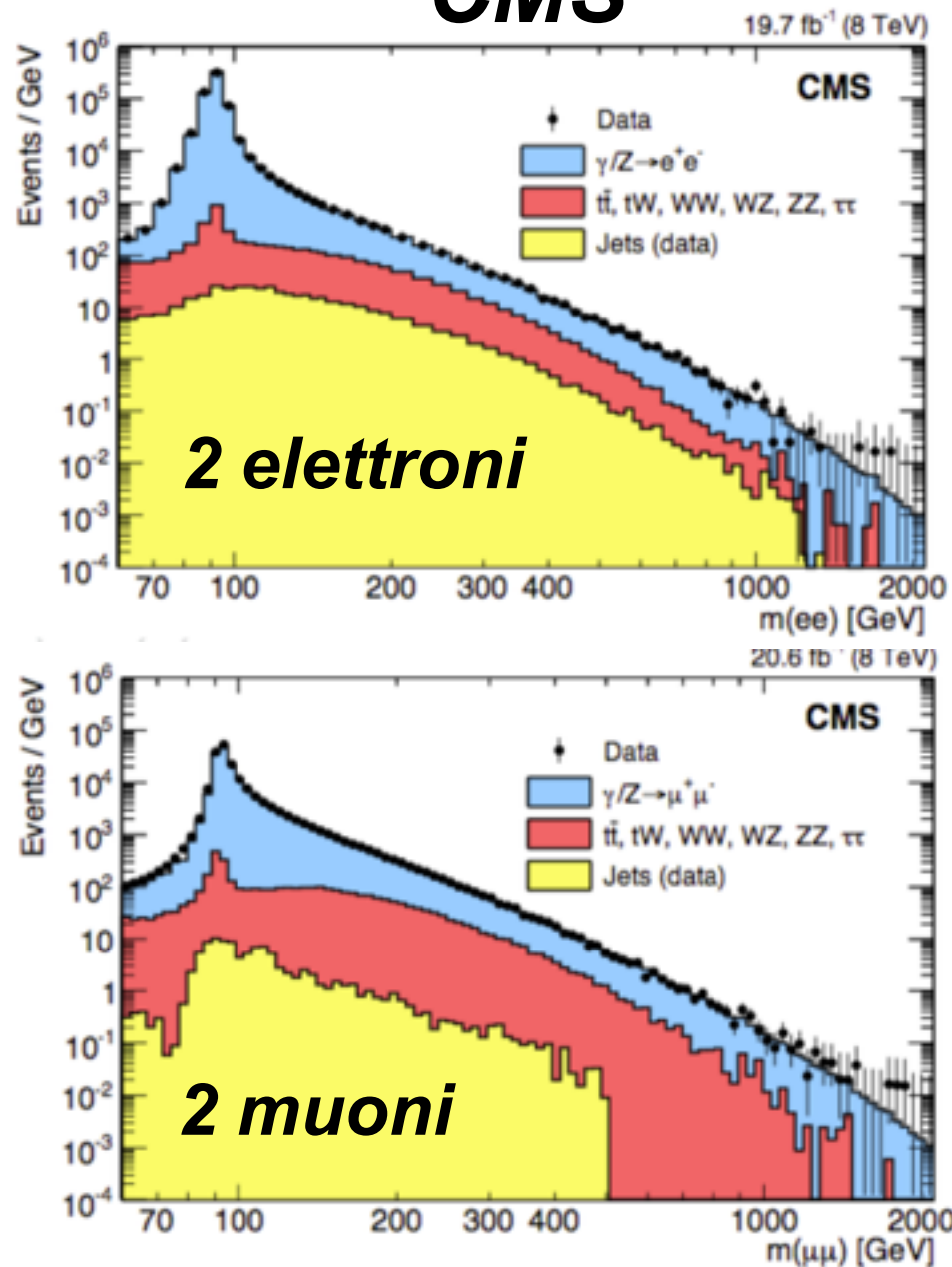


Evento di CMS con 80 vertici ricostruiti!

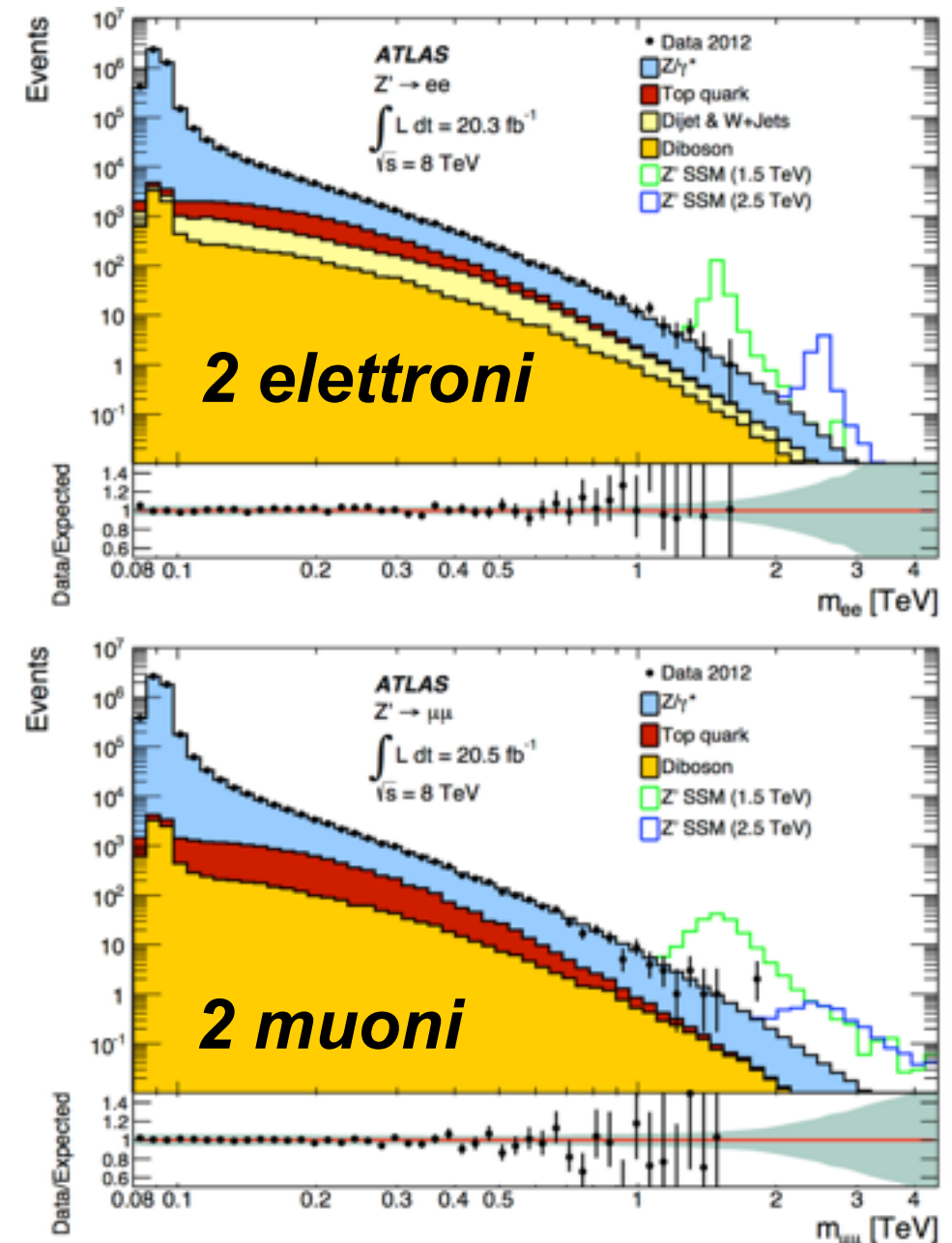
RISULTATI (MUONI, ELETTRONI)

- Risonanza che decade **in due leptoni** (muoni o elettroni)
 - **nessun segno evidente di nuove risonanze**

CMS



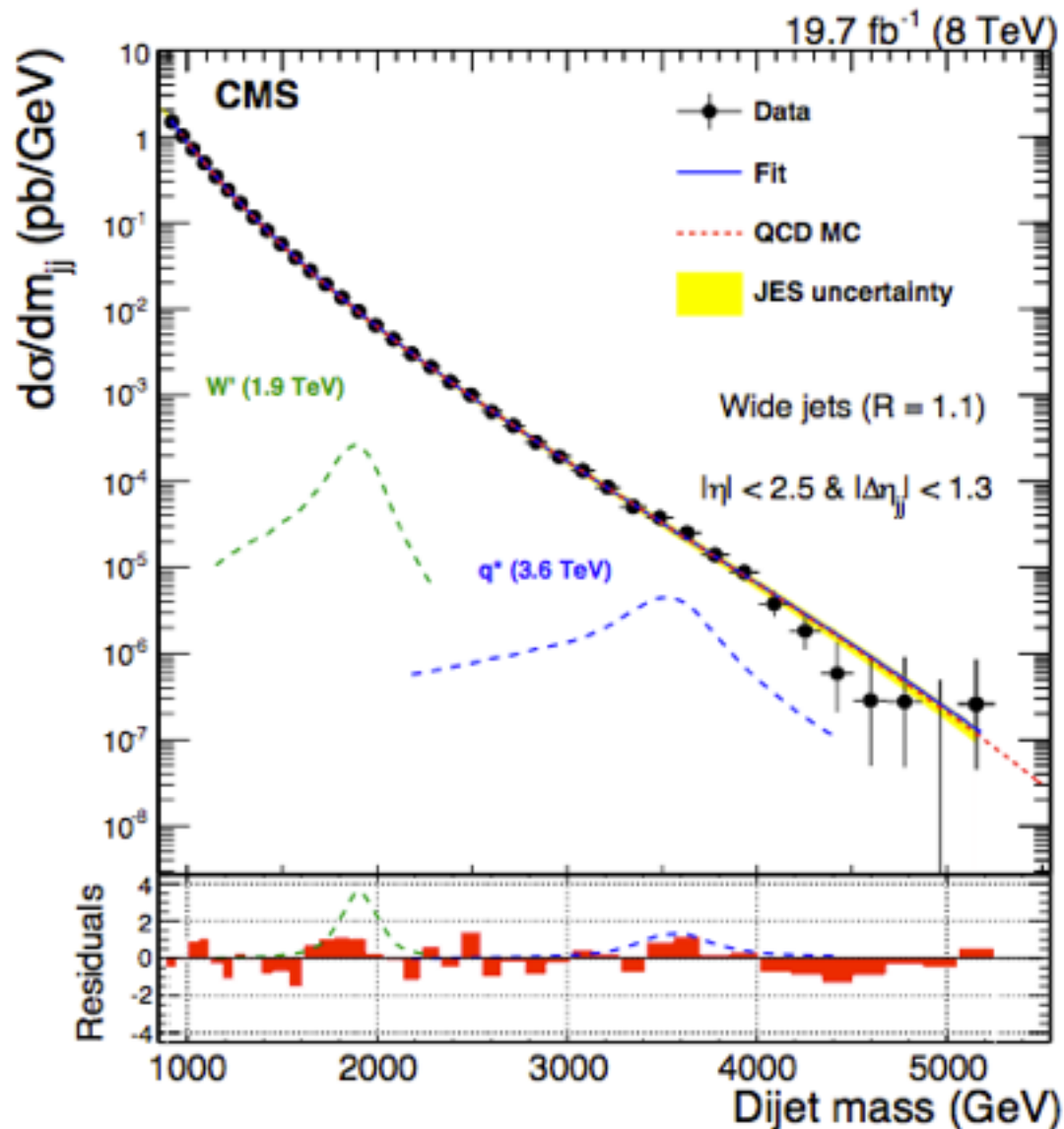
Atlas



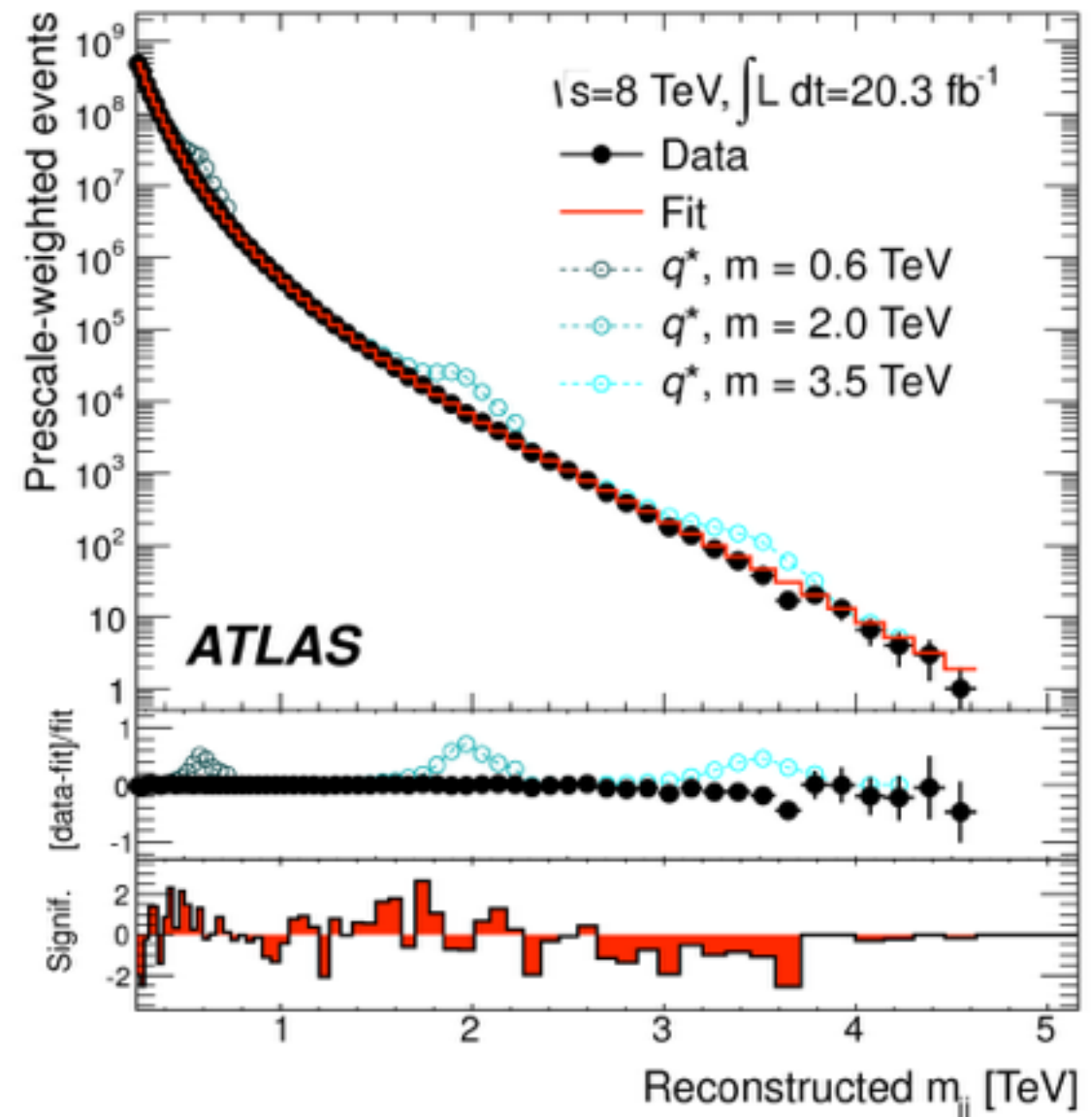
RISULTATI (QUARK/GLUONI)

- Risonanza che decade **in quark/gluoni (jet)**
 - **nessun segno evidente di nuove risonanze**

CMS



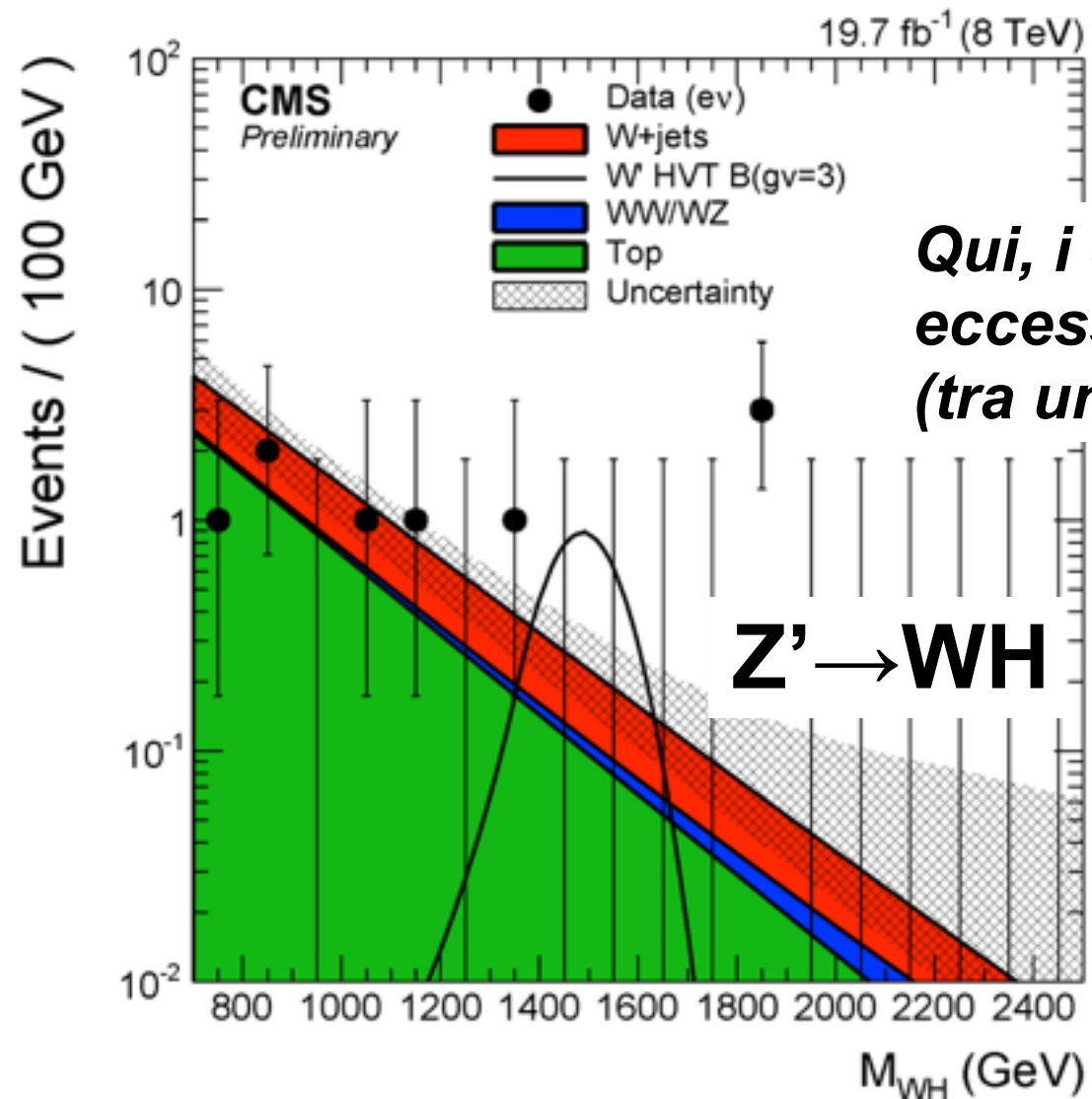
Atlas



RISULTATI (BOSONI)

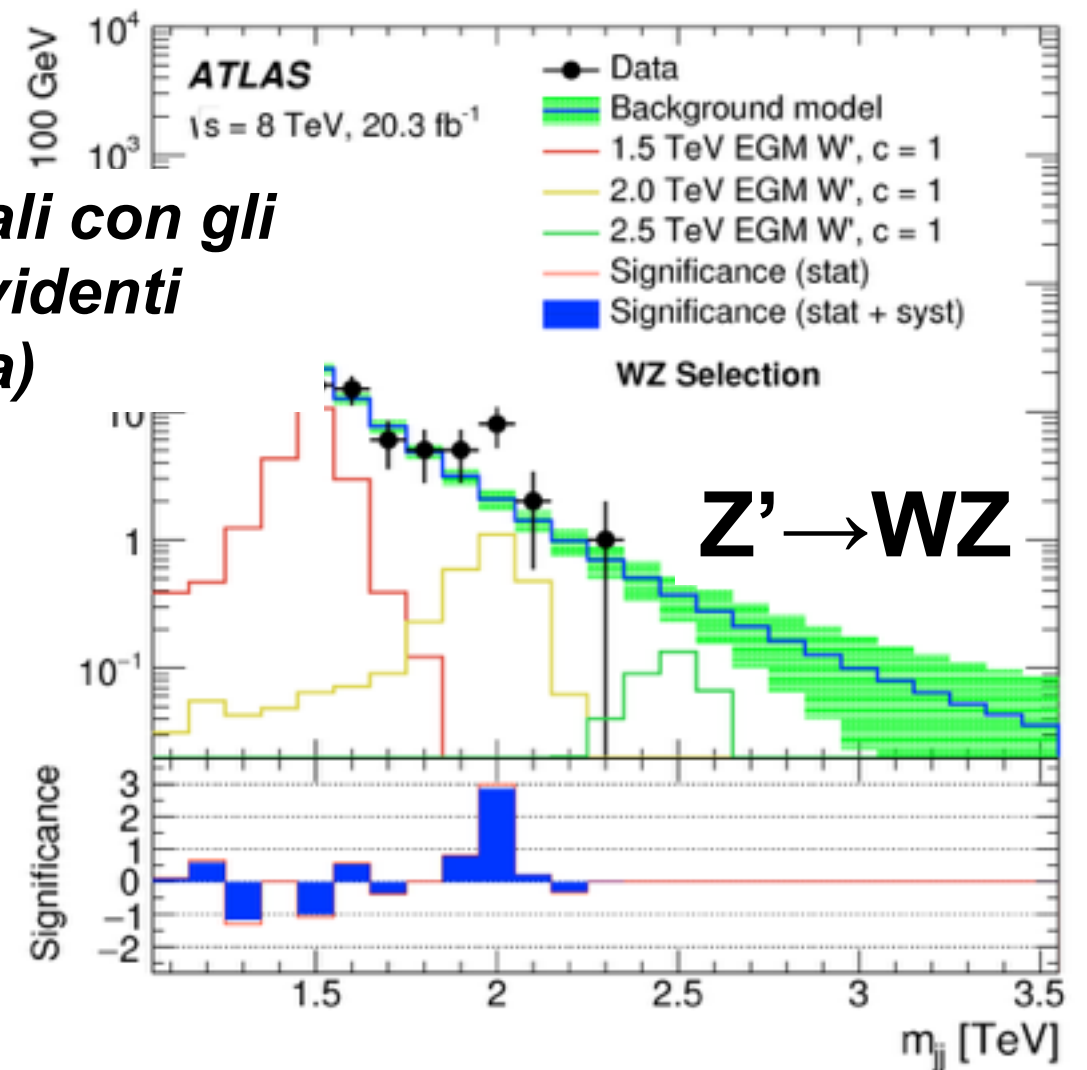
- Risonanza che decade **in bosoni** (Z/W/Higgs!)
 - **modesto eccesso a ~2 TeV**

CMS



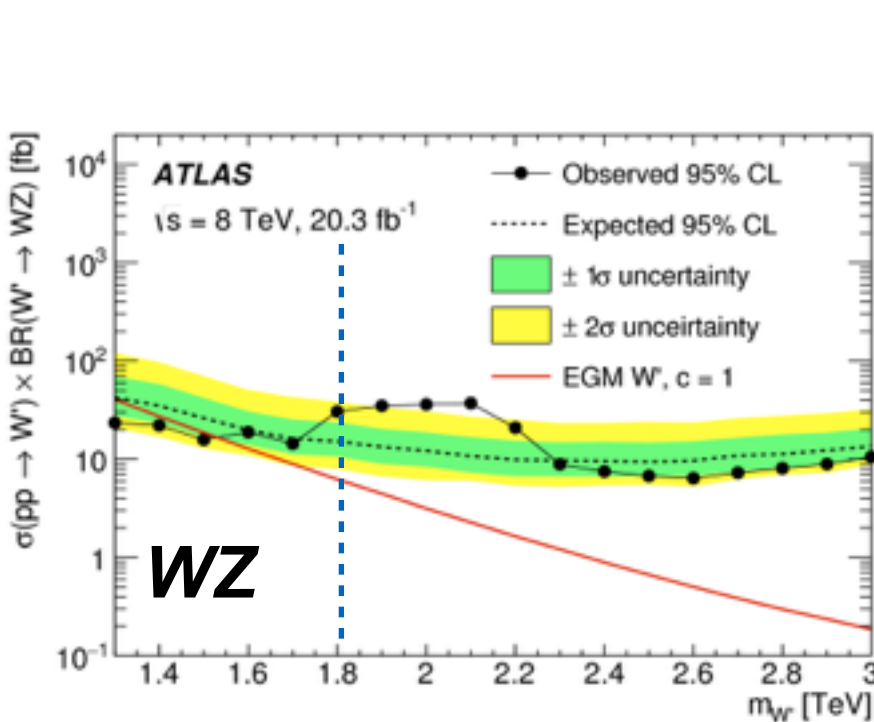
Qui, i due canali con gli eccessi piu' evidenti (tra una decina)

Atlas

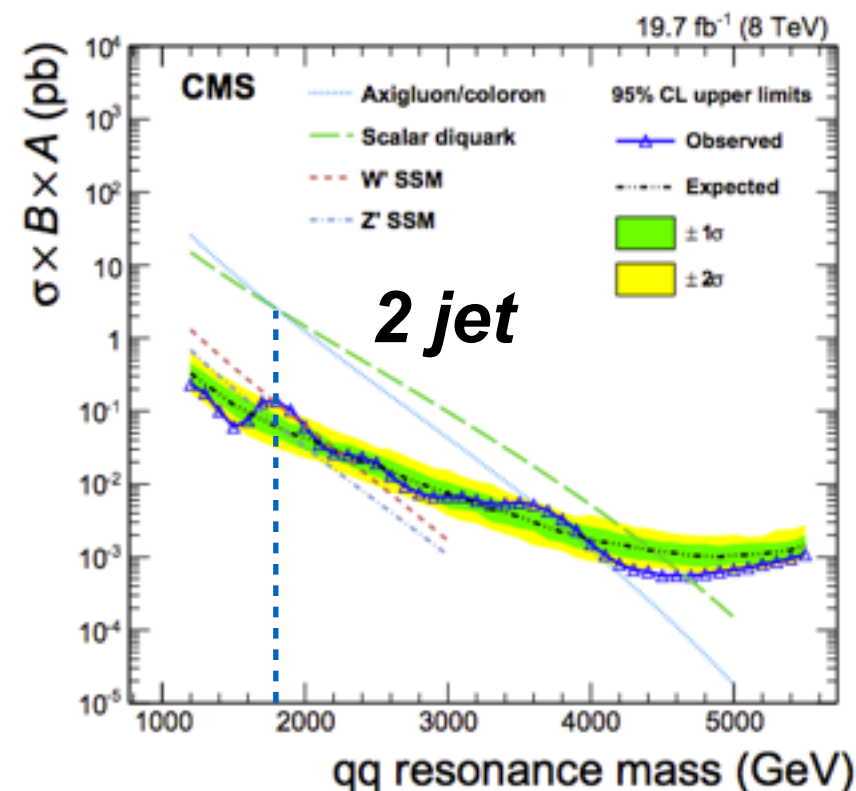


IN SOMMARIO: ABBIAMO VISTO NIENTE?

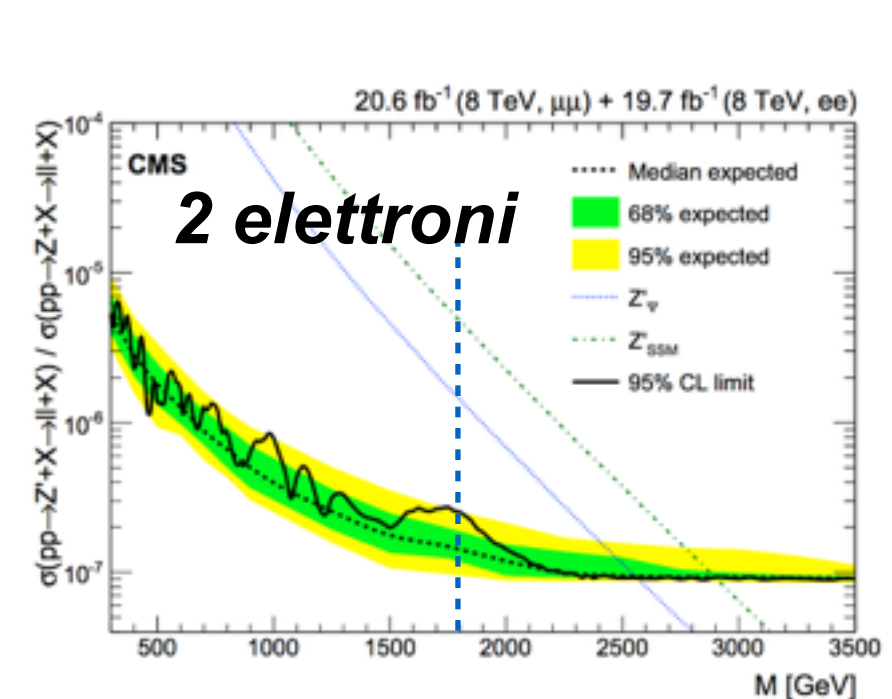
- **Per ora la risposta e' NO**
- Ci sono eccessi al momento non significativi (la soglia per la scoperta e' 5σ !)
- **Un esempio:** c'e' attivita' a 1.8-2 TeV in diversi canali
 - servono piu' dati per confermare



$\sim 3\sigma$ (local)



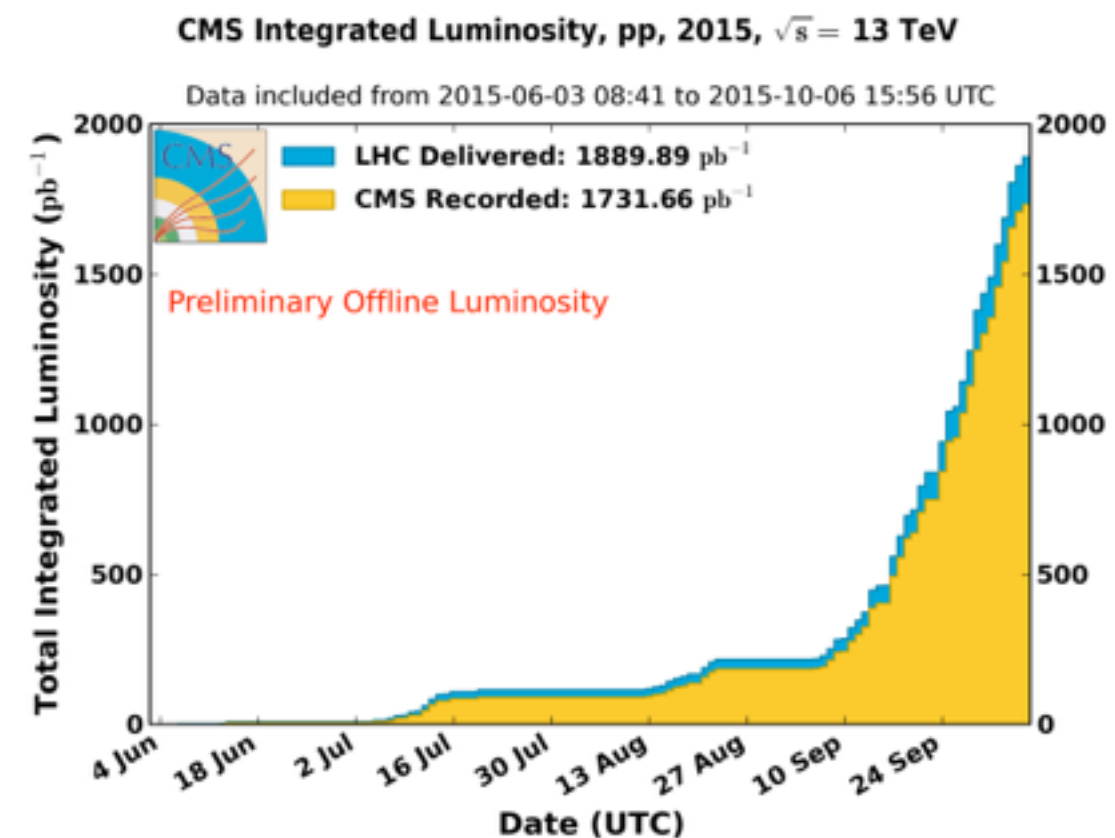
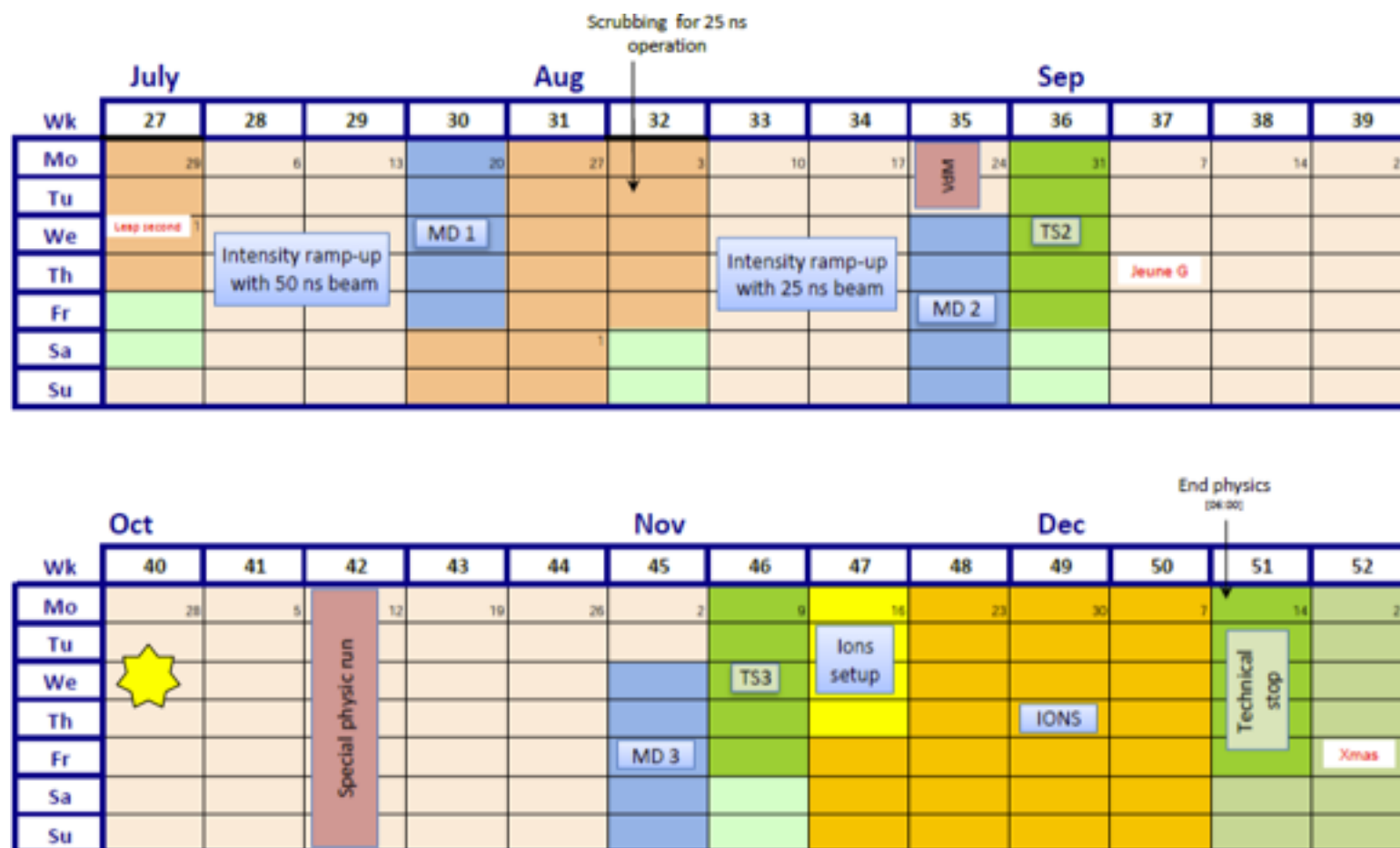
$\sim 2\sigma$ (local)



$\sim 2\sigma$ (local)

LHC NEL 2015

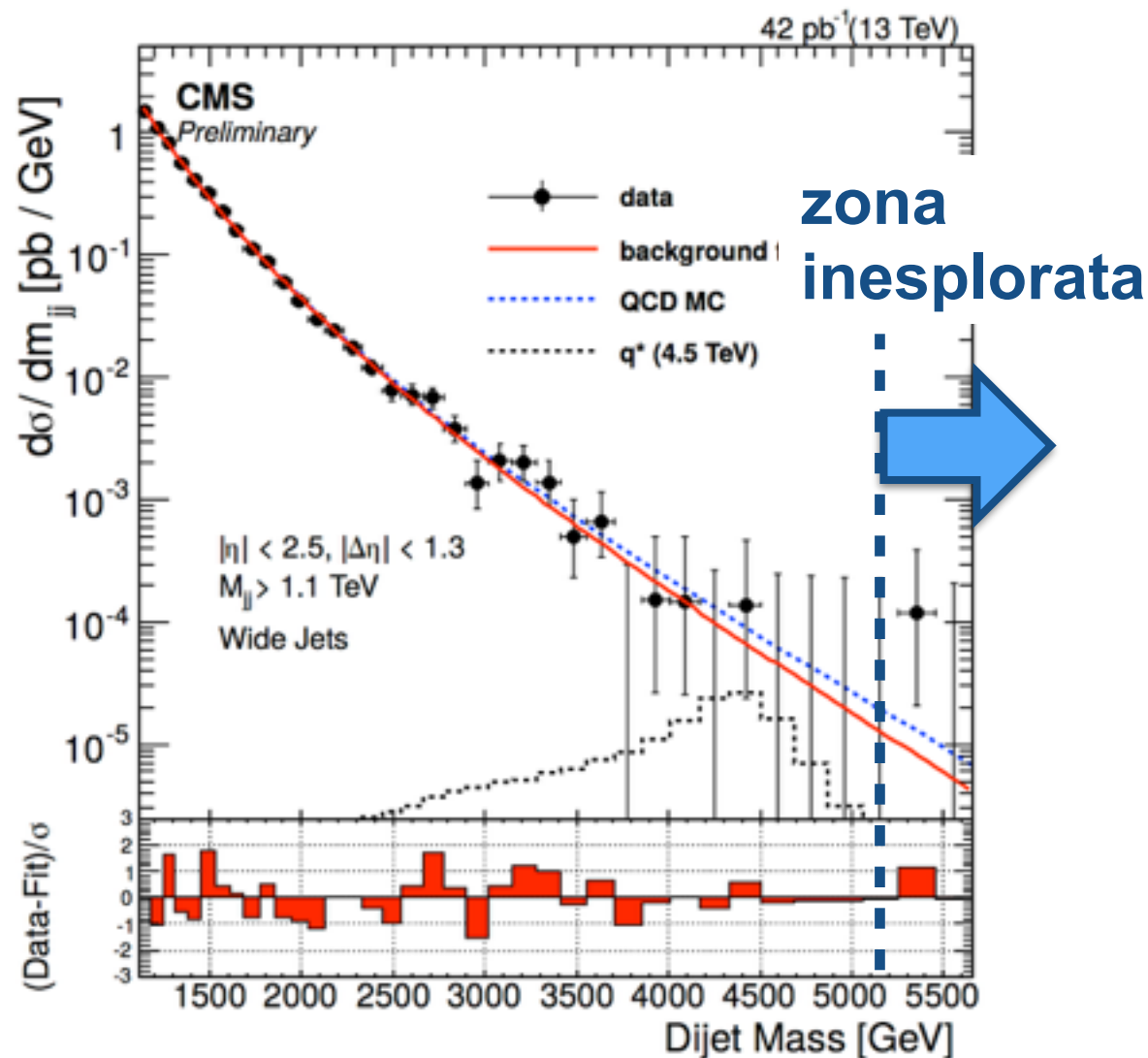
- Nel anni **2013-2014** (long shutdown) LHC e' stato potenziato
- L'energia e' cresciuta **da 8 TeV a 13 TeV**
- Ovviamente questo permette di **estendere notevolmente il potenziale di scoperta**
- Run **iniziato a giugno**



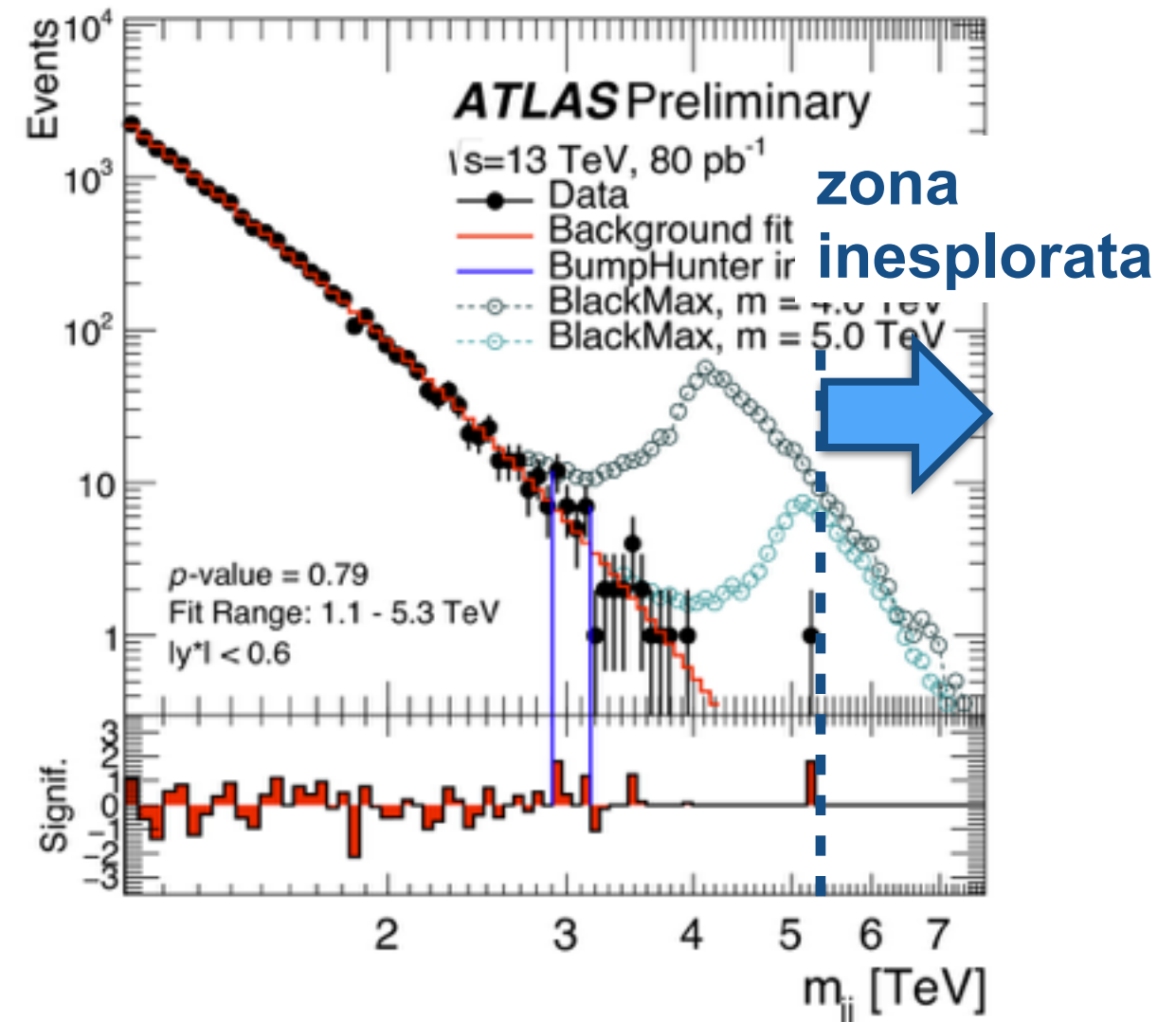
PRIMI RISULTATI A 13 TeV (2 JET)

- Ricerca di risonanze in **due quark** ripetuta con i primissimi dati
- **Gia' sensibile all' osservazione di risonanze molto massive** ($m > 5$ TeV)
 - nessun eccesso per ora

CMS

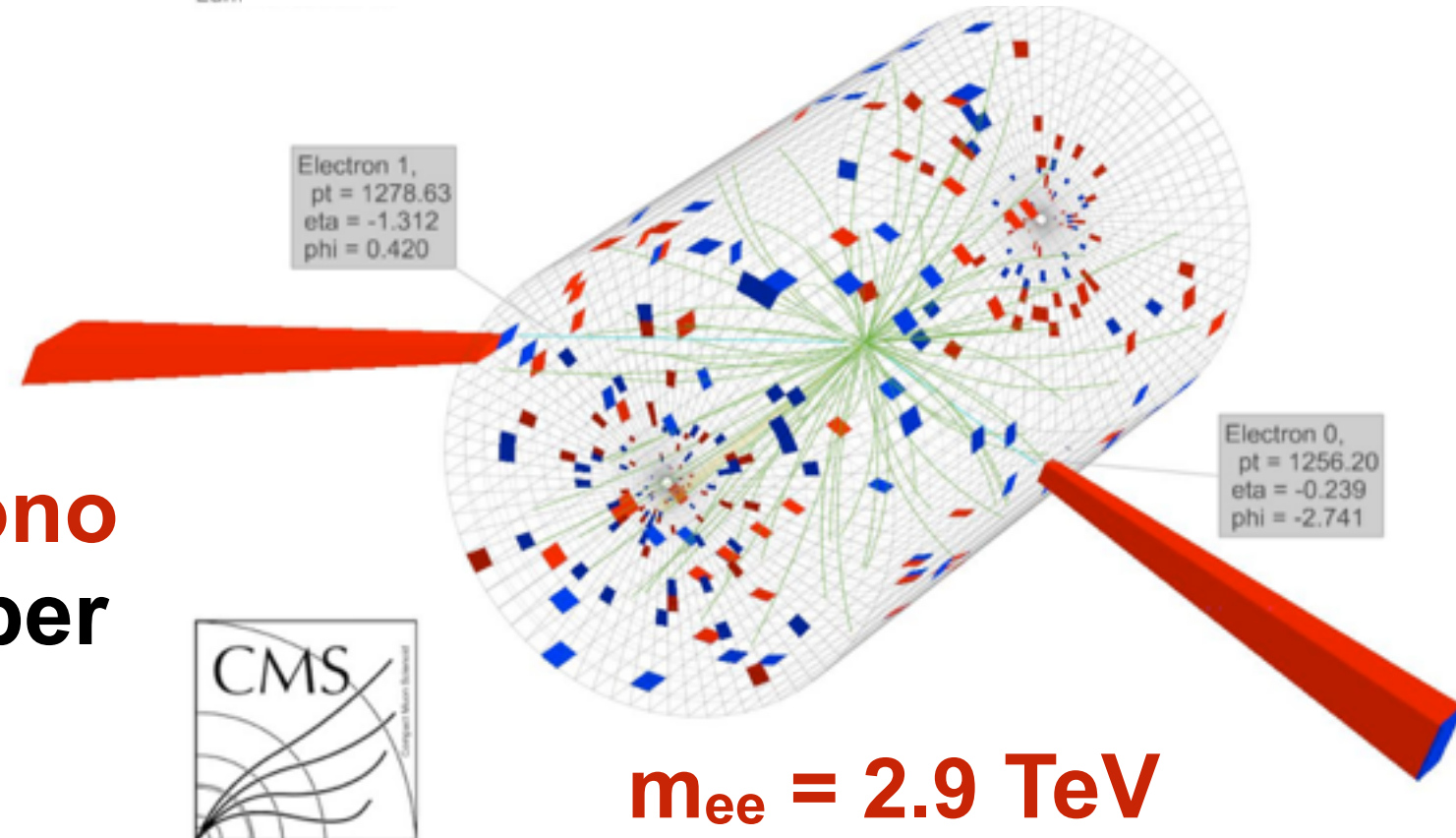
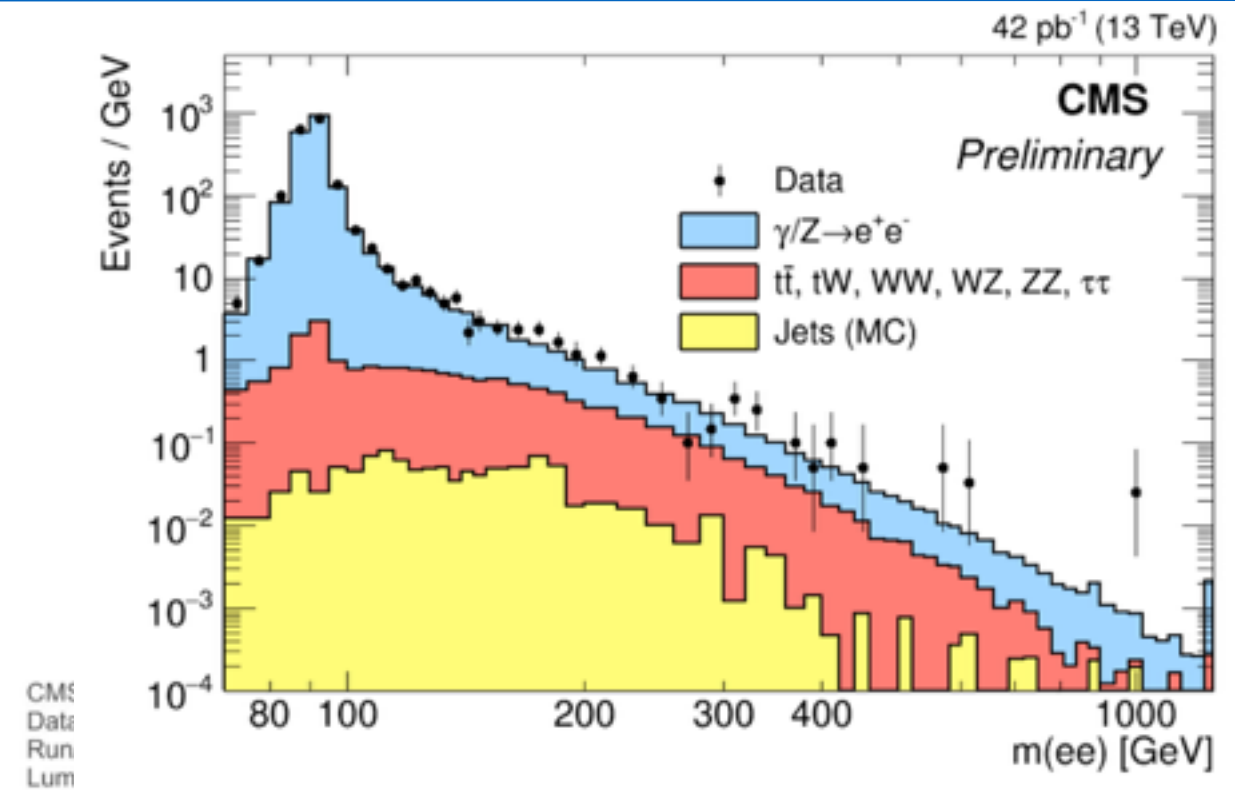


Atlas



PRIMI RISULTATI A 13 TeV (2 LEPTONI)

- Ricerca di **risonanze in due leptoni** ripetuta
- Interessante evento con **$m_{ee} = 2.9 \text{ TeV}$**
 - evento con massa piu' alta in Run1 era a 1.7 TeV
 - molto pulito
- Poco compatibile con Standard Model ma **servono piu' collisioni ed eventi** per evidenziare eccesso



FUTURO

Piani di LHC:

- **Fine 2015: 3-4 fb⁻¹** (in **Run1** si sono accumulati **20 fb⁻¹**)
 - ricerche piu' semplici di nuove risonanze
- **Fine 2016: ~30 fb⁻¹**
 - si ripetono tutte le ricerche di nuova fisica
 - **prossimi mesi cruciali per questo tipo di ricerche!**
- **Fine del Run2, 2018: ~100 fb⁻¹**
 - superato di gran lunga Run1
 - statistica sufficiente per ricerche piu' dettagliate
 - ~sufficiente per dare risposta sulla presenza di risonanze ad alta massa
- **2019-2021 Run3: ~300 fb⁻¹**
- **2024-2035 Run4-5: ~3000 fb⁻¹**

CONCLUSIONI

- La **ricerca di risonanze** in fisica delle particelle e' **cruciale**
 - ha permesso di consolidare la teoria del Modello Standard
 - ha fruttato molti premi Nobel
- L'eventuale **scoperta** di una **risonanza molto massiva** (TeV) al LHC dimostrerebbe **in modo incontrovertibile la presenza di fisica oltre il Modello Standard**
- **LHC** ha un **programma esteso** in questo tipo di ricerche
- Per ora (Run1) **non ci sono segni di nuove particelle**
- **Il Run2 a 13TeV apre nuovi scenari**
 - la crescita in energia ($8 \rightarrow 13$ TeV) incrementa notevolmente il potenziale di scoperta
- **2015 e 2016** sono gli anni piu' importanti per queste ricerche e **potrebbero rivoluzionare la fisica delle particelle**