



UNIVERSITÀ
DI PARMA

Guido D'Amico



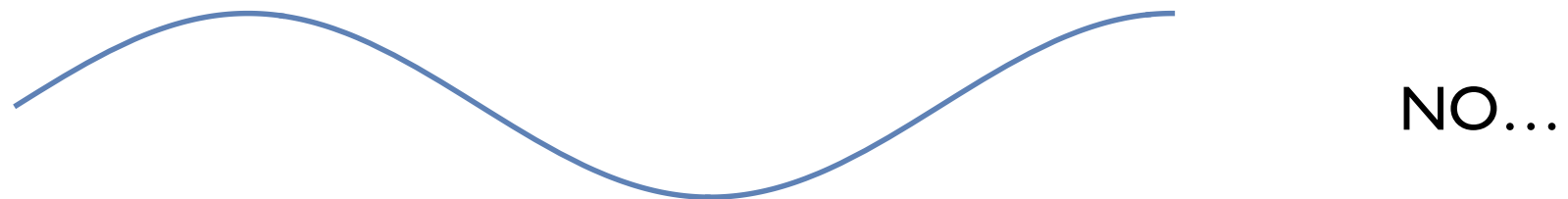
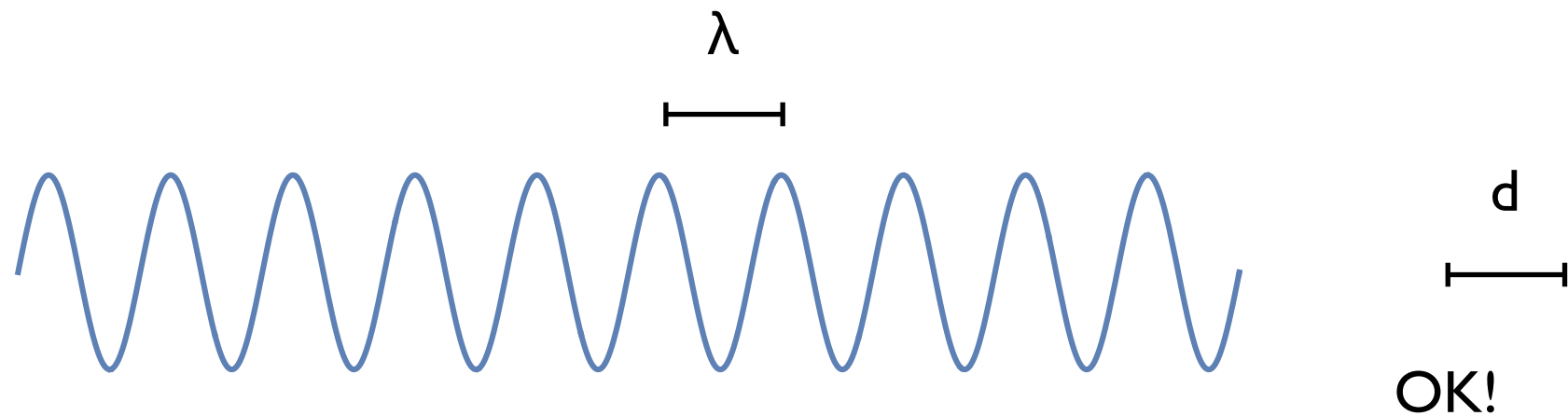
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Uno sguardo agli esperimenti: LHC

Masterclass 2025

Come vedere cose piccole

Lunghezza d'onda: $\lambda \sim d$



Microscopio $\rightarrow$ Luce visibile, $\lambda \sim 400\text{-}700\text{ nm}$

Raggi X, $\lambda \ll \lambda_{\text{luce}}$

Meccanica Quantistica

Le particelle hanno una lunghezza d'onda!

De Broglie $\lambda = \frac{\hbar}{mv} = \frac{\hbar}{p}$ Esempio: microscopio elettronico

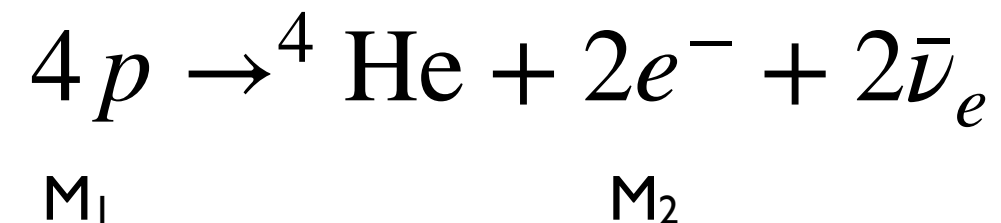
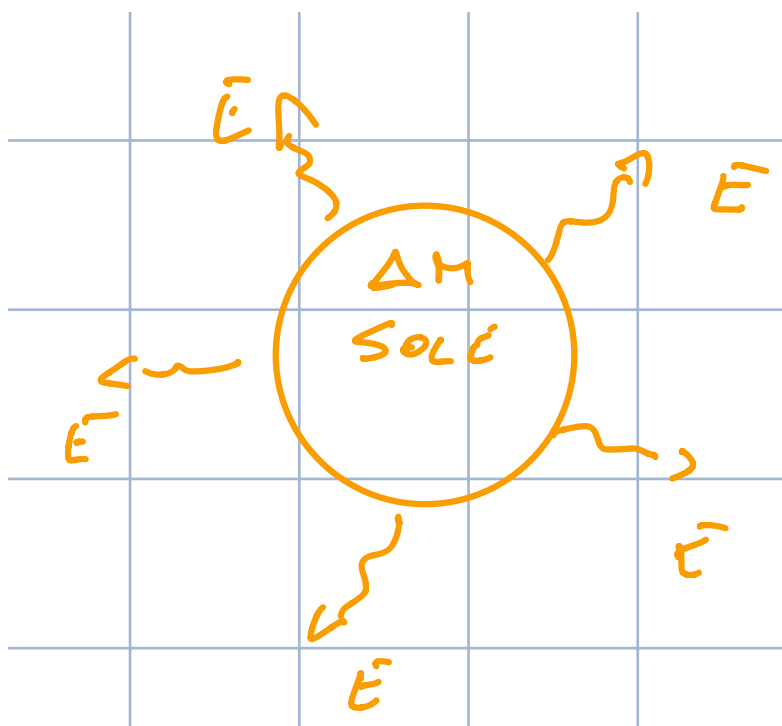
Grande impulso p : piccole distanze

Relatività speciale

Equivalenza di massa ed energia

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

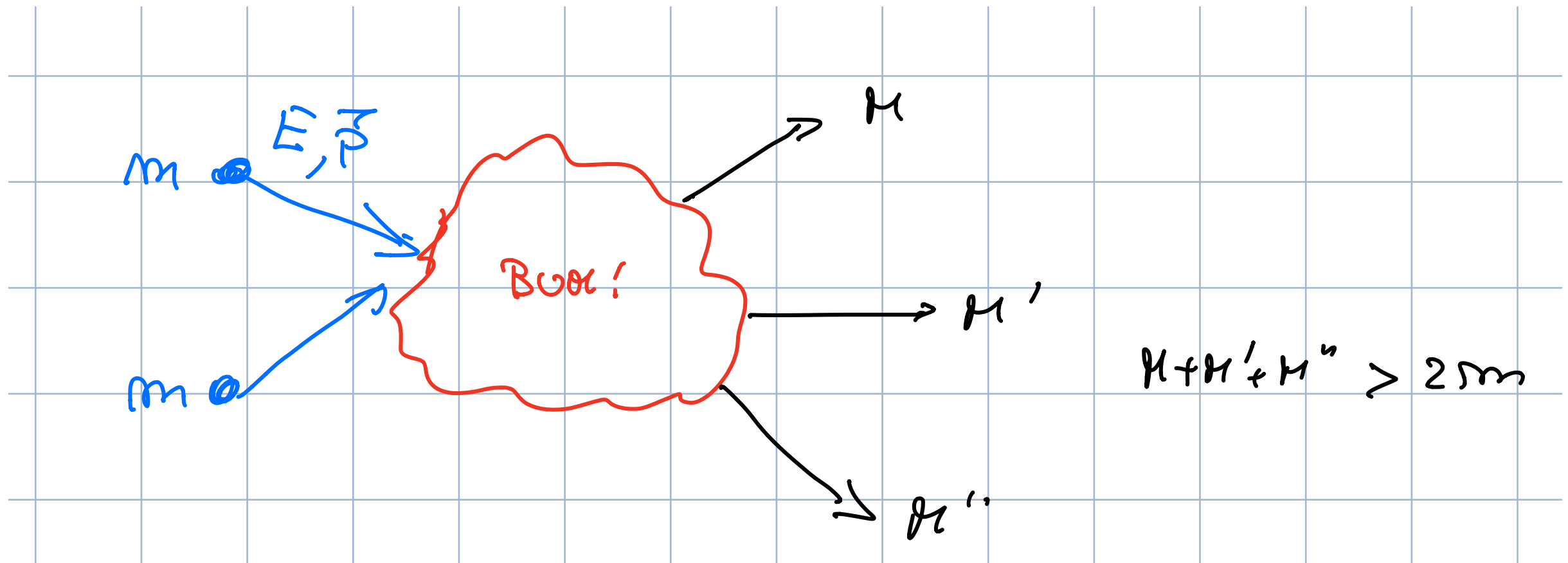
Esempio: fusione nel sole



$$M_1 = M_2 + \Delta E$$

Creazione di particelle

Ma anche $E \rightarrow M$, nuove particelle create “dal nulla”!

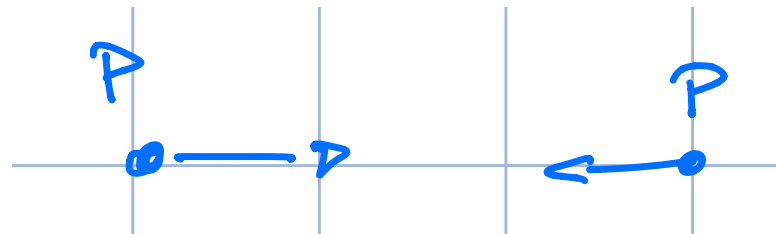


Alte energie:

- Struttura microscopica
- Nuove particelle massive

LHC: Large Hadron Collider

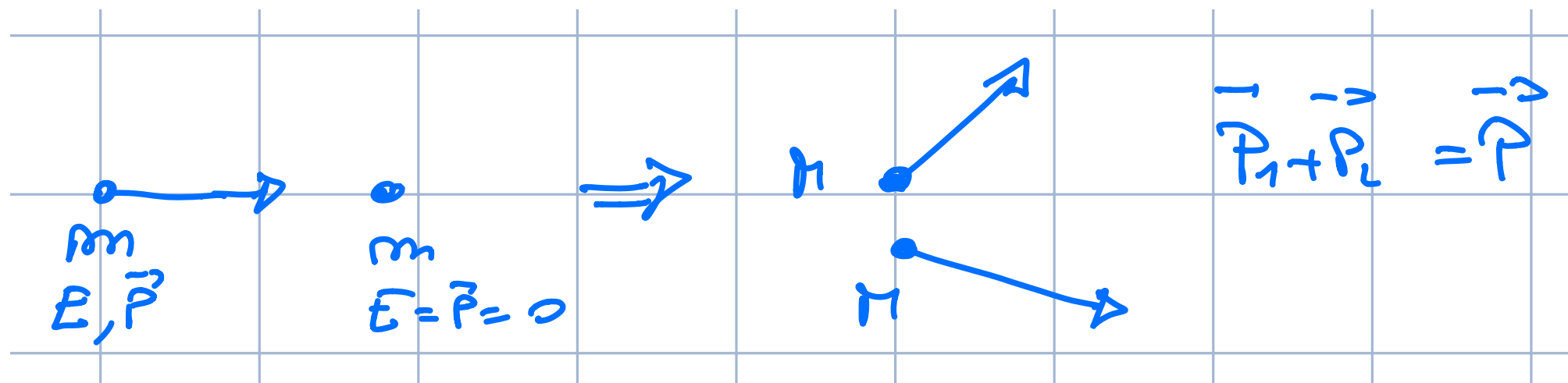
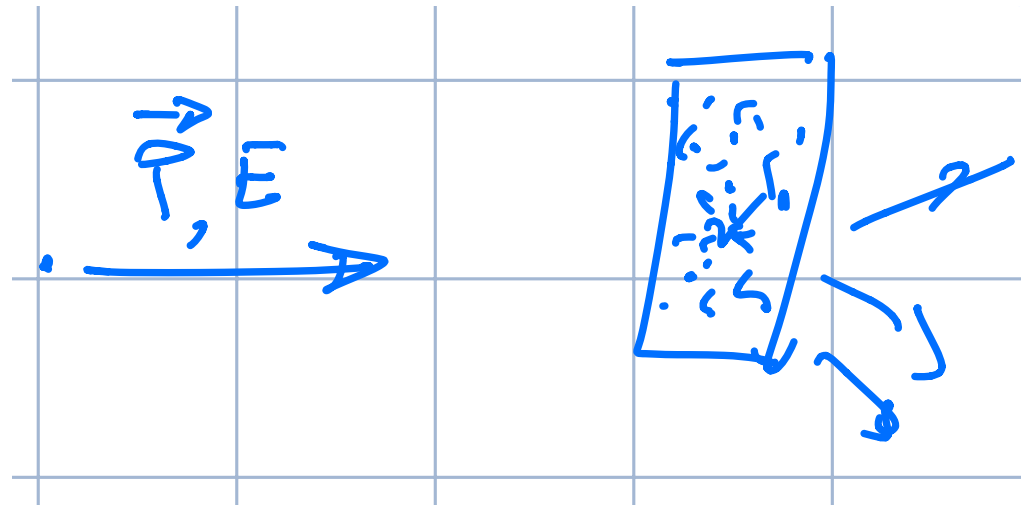
Perché collider?



Esperimento complicato: $r_p \sim 10^{-15}\text{m}$

Probabilità di collisione quasi zero!

Esperimenti a bersaglio fisso

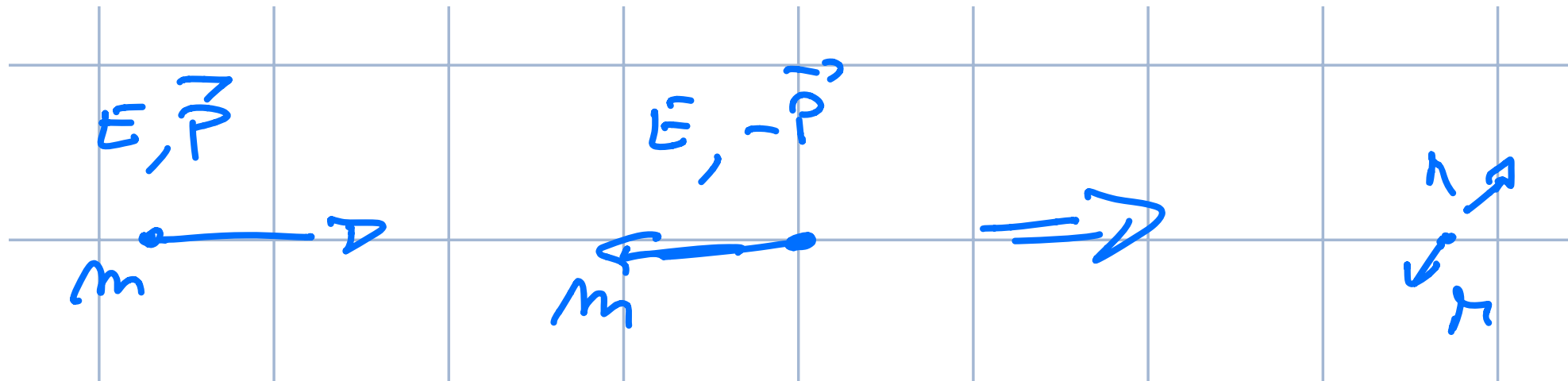


$$E_{\text{fisso}} \geq \frac{2M^2 - m^2}{m}$$

Esempio: $M = 100m_p$

richiede $E > 2 \cdot 10^4 m_p$

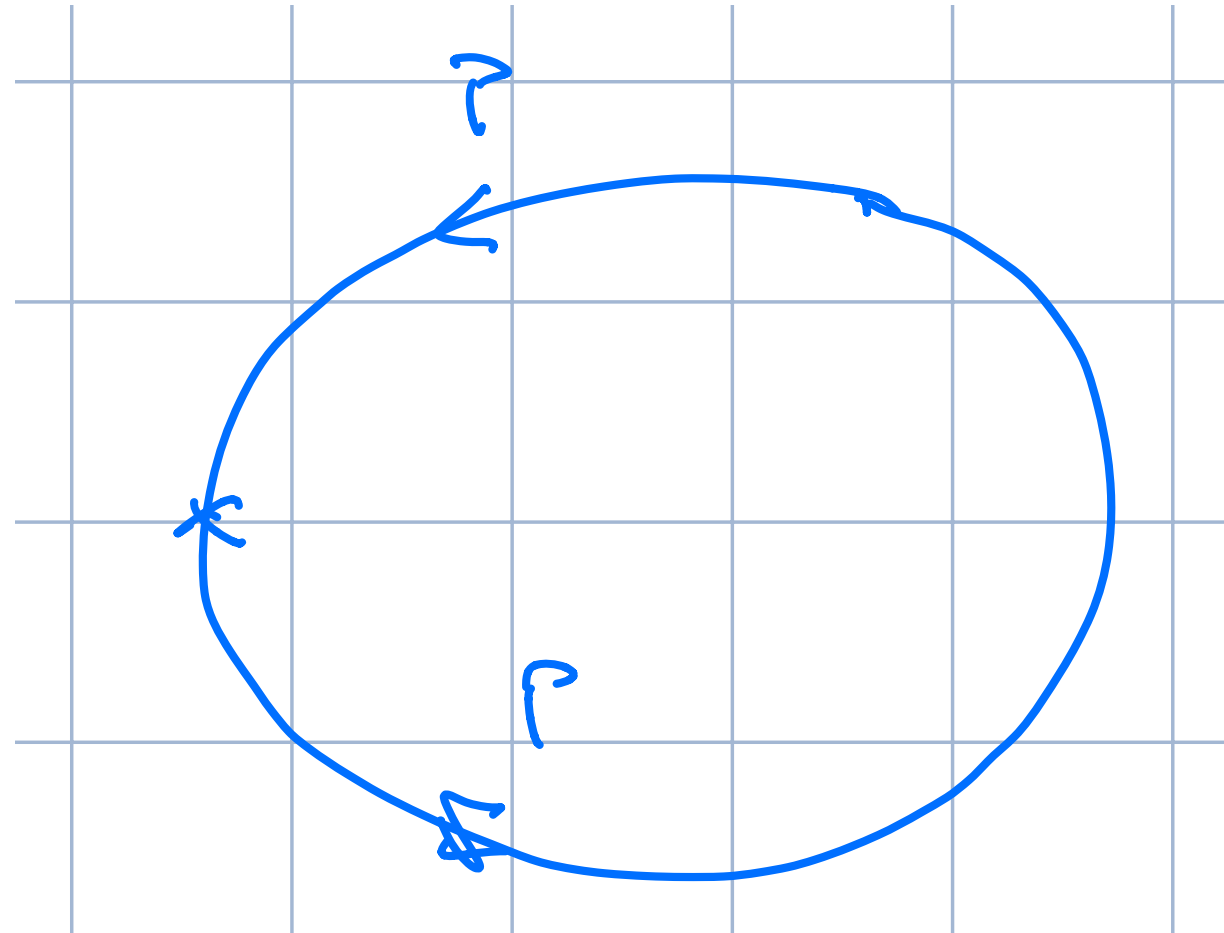
Large Hadron Collider



$$E_{\text{col}} \geq M \quad \frac{E_{\text{col}}}{E_{\text{fisso}}} \simeq \frac{m}{2M} \ll 1$$

Richiede molta meno energia!

Large Hadron Collider



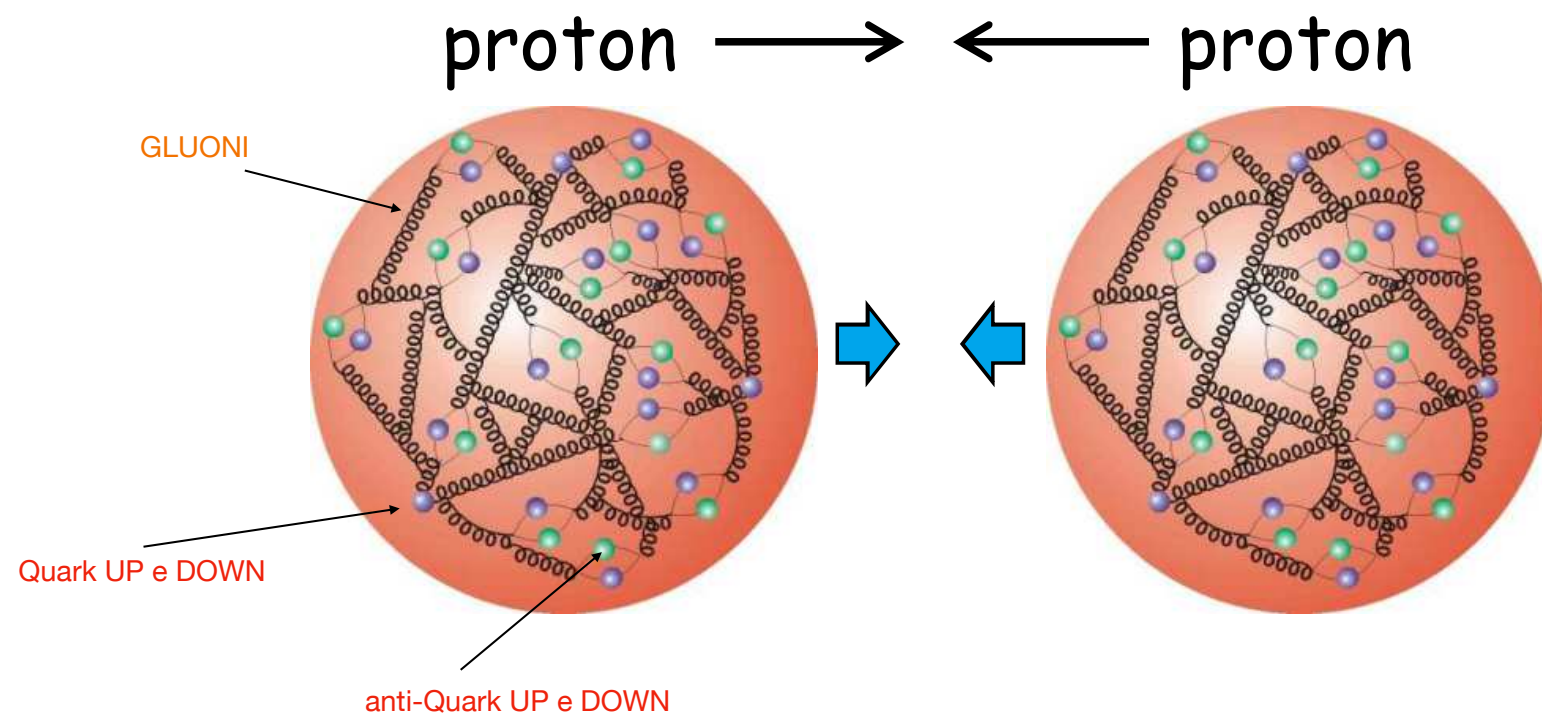
“Pacchetti” di particelle
Tanti giri → tante interazioni

Large *Hadron* Collider

Adrone: contiene quark e gluoni

Il protone è un adrone $m_p \sim 1 \text{ GeV}$

L'elettrone è un leptone $m_e \sim 0.5 \text{ MeV}$

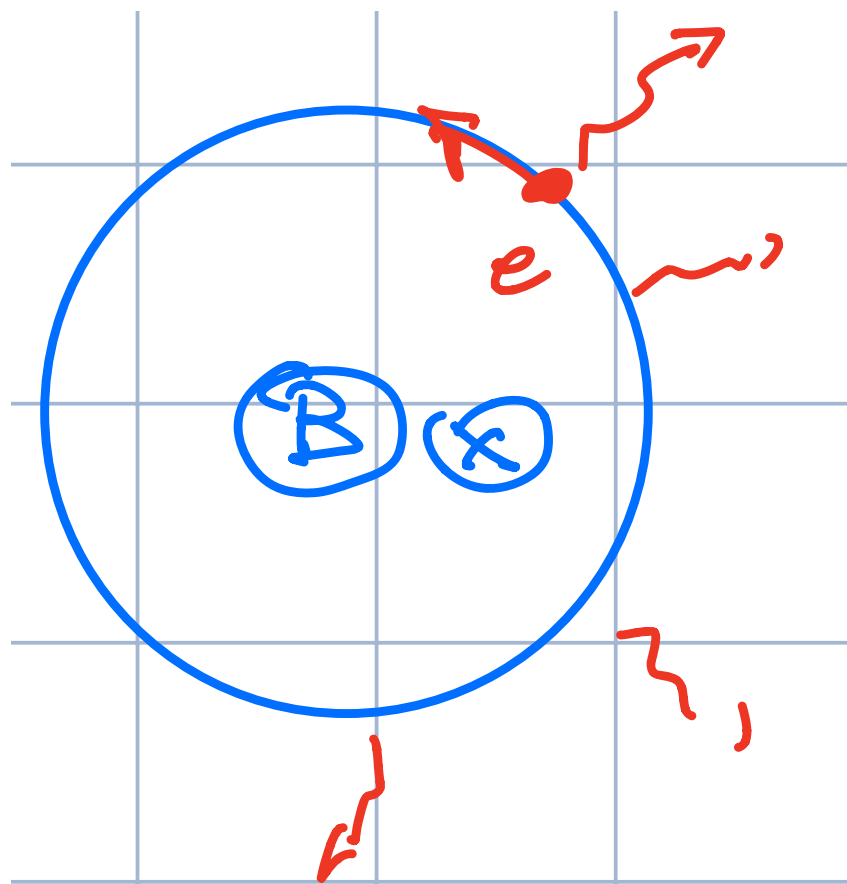


Ad alte energie $\rightarrow$ piccole distanze, interagiscono gluoni, quark e antiquark *singolarmente*, non tutto il protone

Adrone: contiene quark e gluoni

Il protone è un adrone $m_p \sim 1 \text{ GeV}$

L'elettrone è un leptone $m_e \sim 0.5 \text{ MeV}$

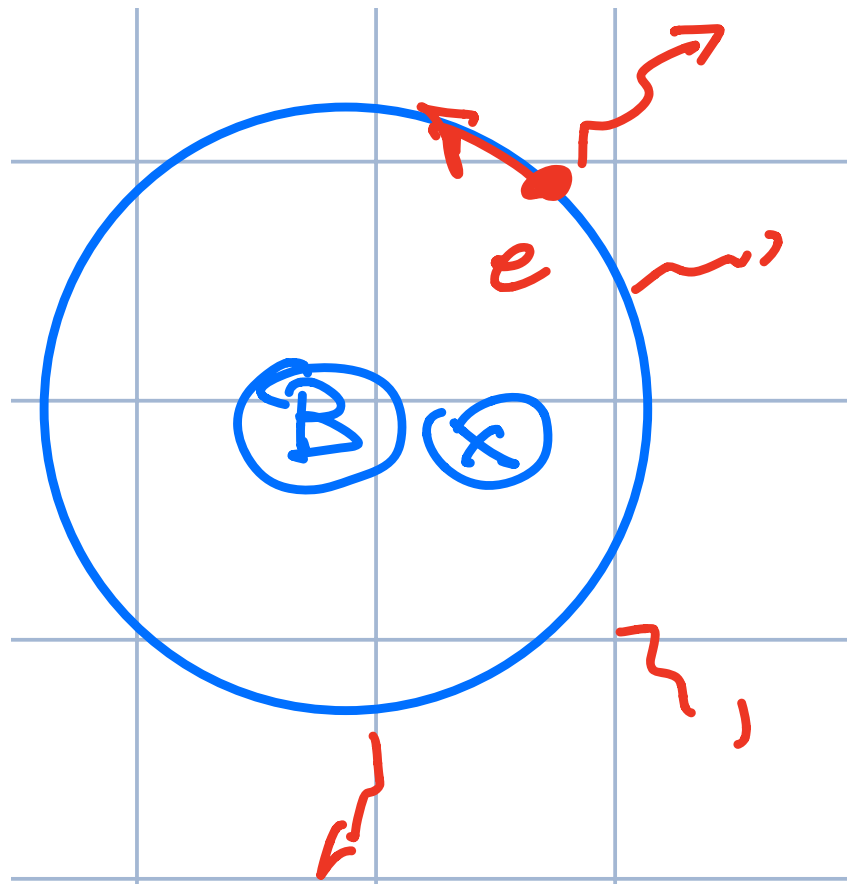


Radiazione di sincrotrone:
perdo energia di radiazione

$$\frac{W_p}{W_e} \sim \left(\frac{m_e}{m_p} \right)^4 \sim 10^{-12}$$

Con i protoni risparmio energia!

Large Hadron Collider



Forza di Lorentz:

$$evB = m \frac{v^2}{r} \implies p = mv = eBr$$

$B \sim 8$ Tesla, large $p =$ large r

$r \sim 4.3$ km

Dentro LHC

<https://videos.cern.ch/record/2020780>

Il nostro microscopio (il rivelatore ATLAS)

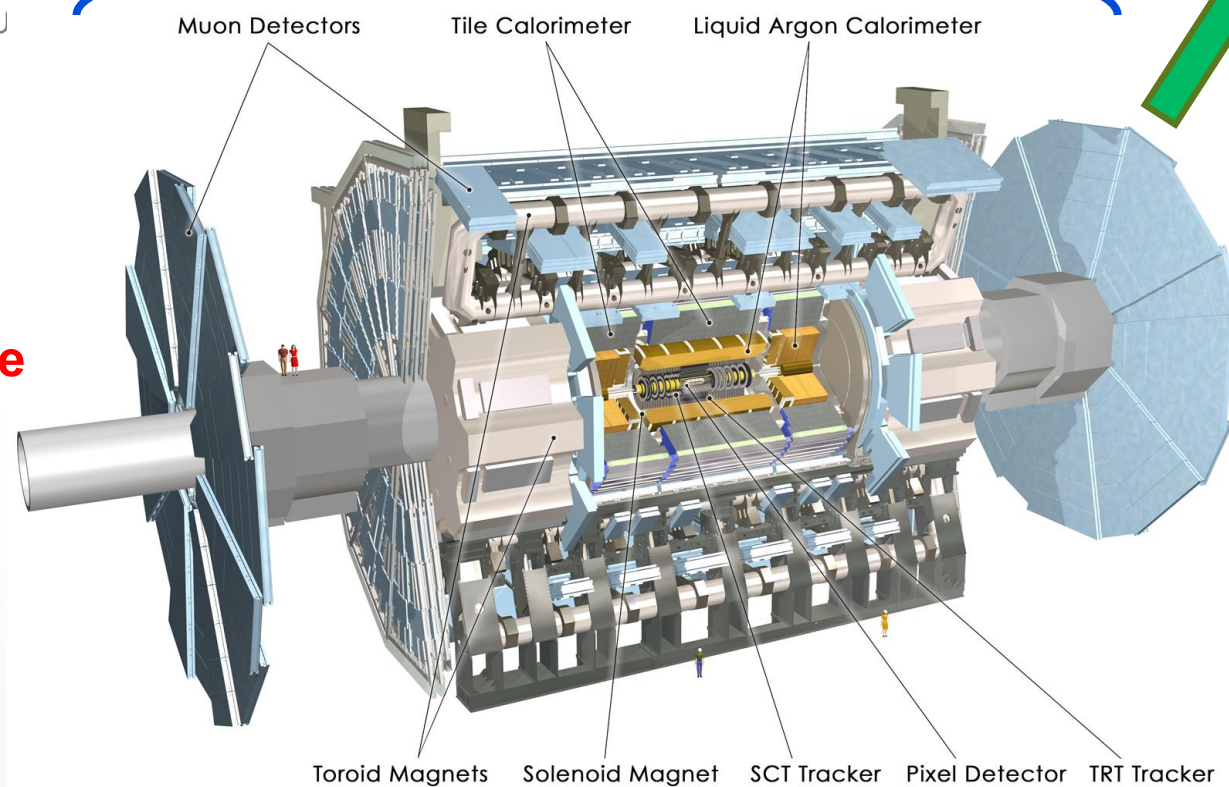


ATLAS vicino ad un edificio di 5 piani: 15 anni per progettare e costruire



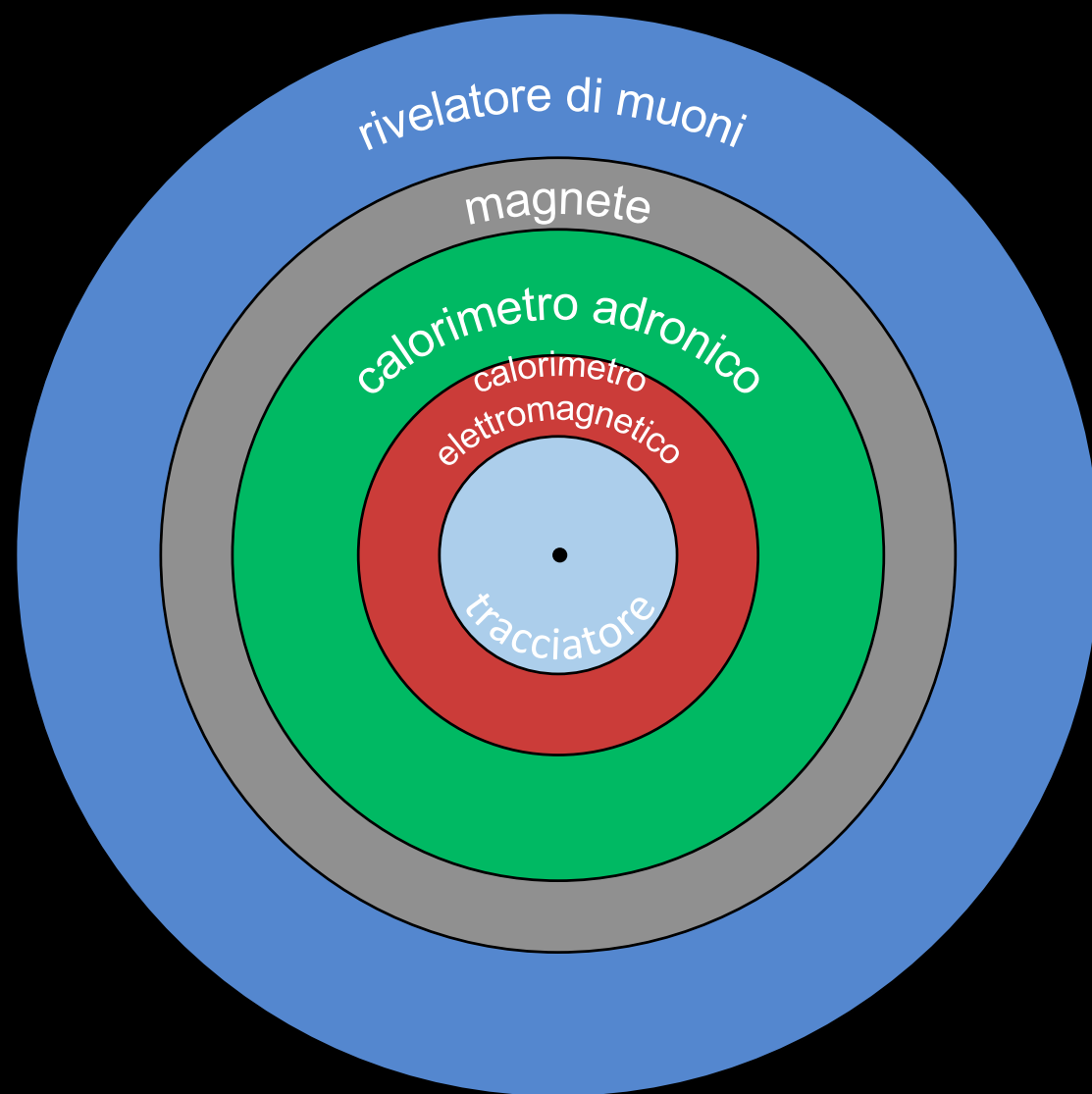
45 m

7000 Tonnellate



24 m

apparato di rivelazione ermetico



Rivelatore di Vertice o Tracciatore Interno
rivela le particelle cariche
e ne misura la quantità di moto

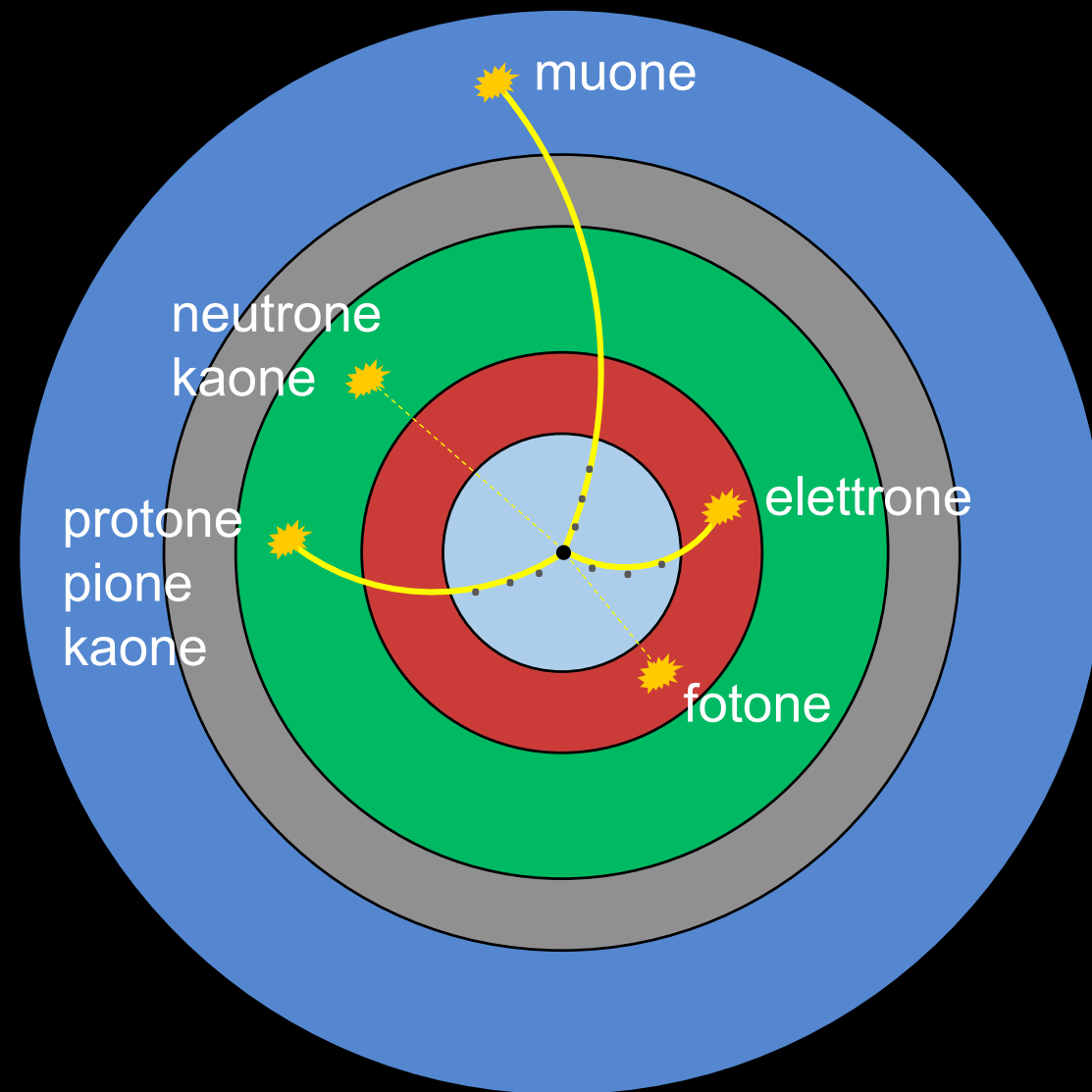
Calorimetro Elettromagnetico
rivela elettroni e fotoni
e ne misura l'energia

Calorimetro Adronico
rivela protoni, neutroni, pioni, kaoni
e ne misura l'energia

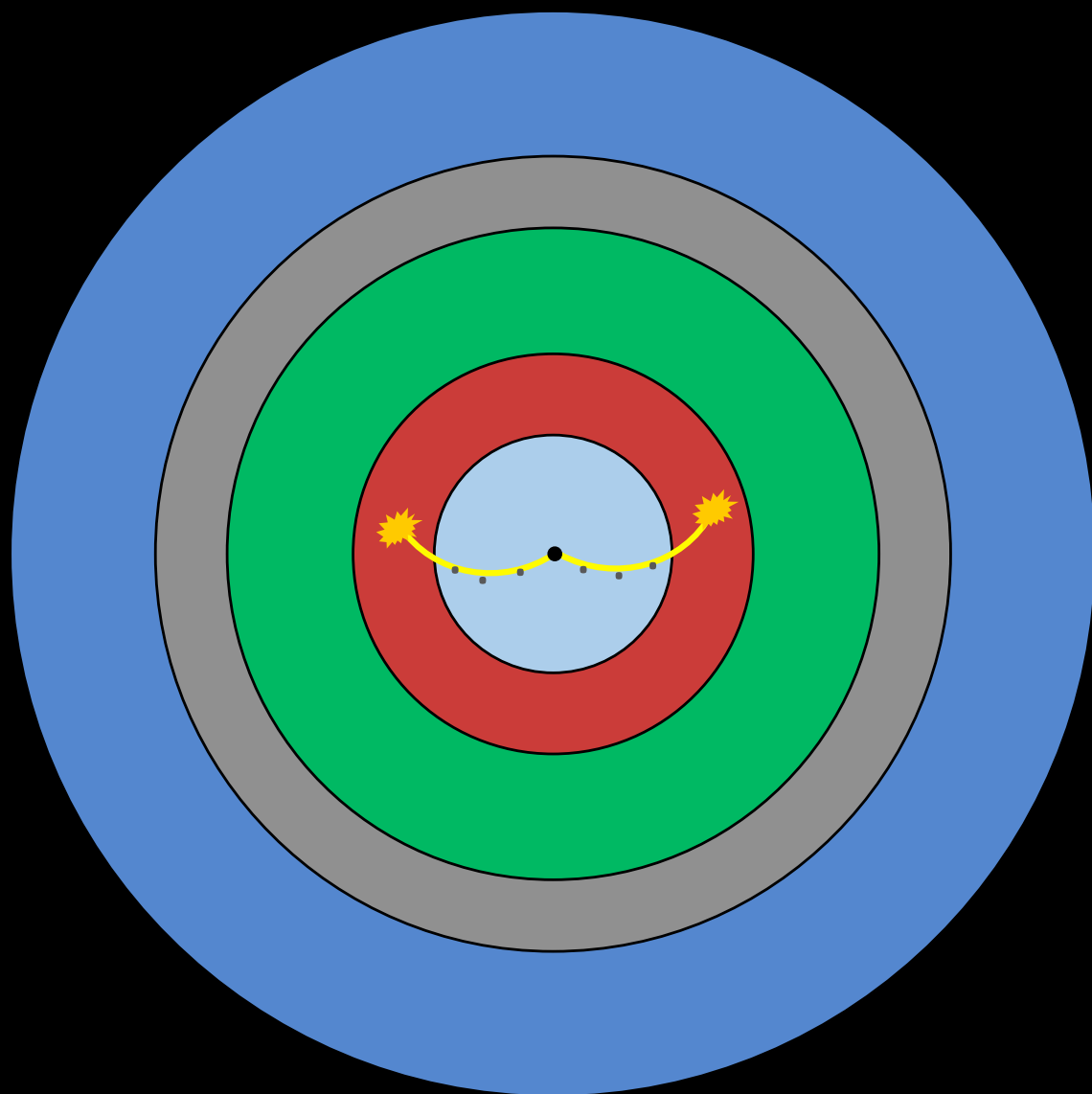
Magnete
curva le particelle cariche
e ne permette la misura della quantità di moto

Rivelatore di Muoni
rivela i muoni

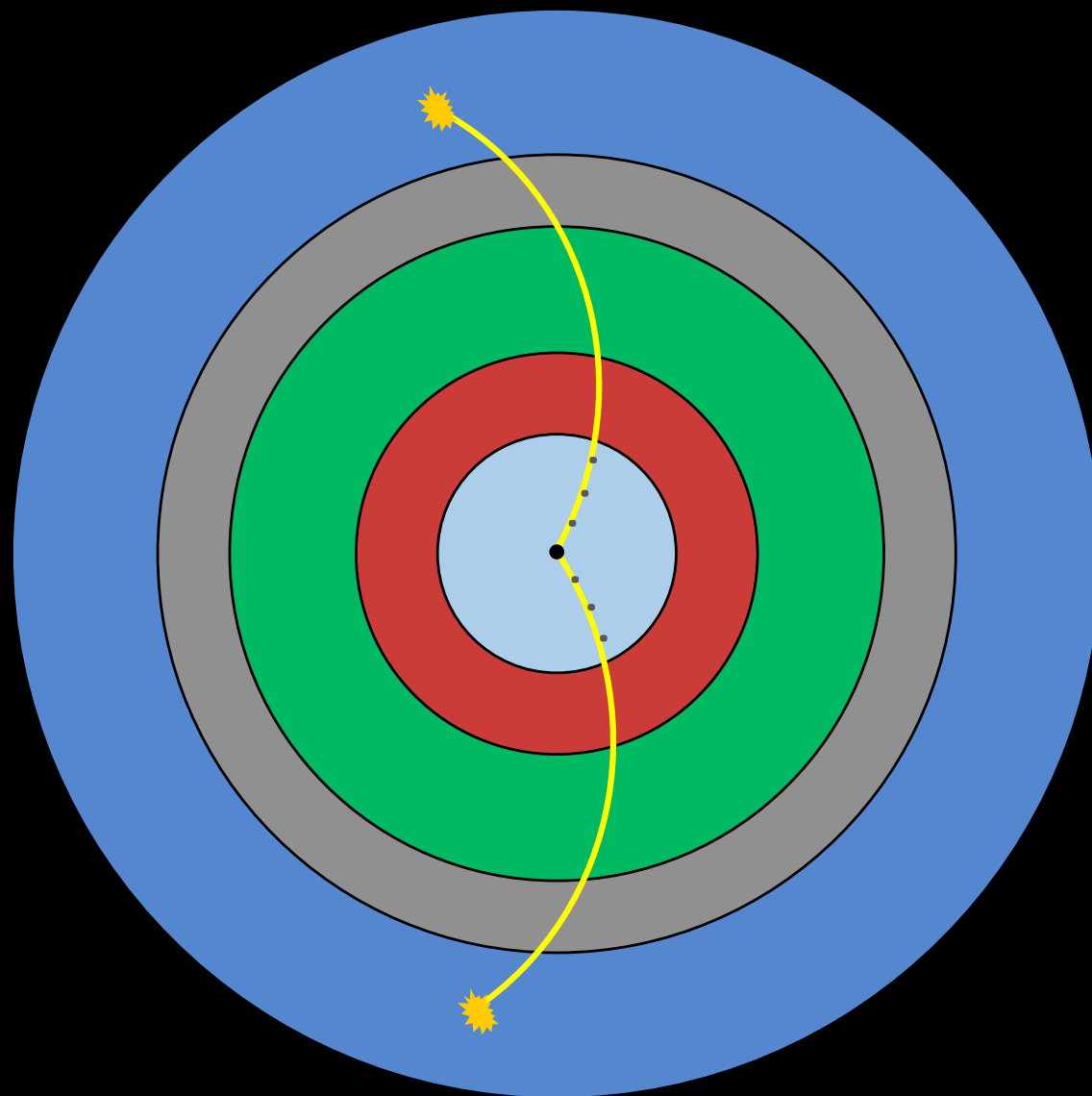
identificazione delle particelle



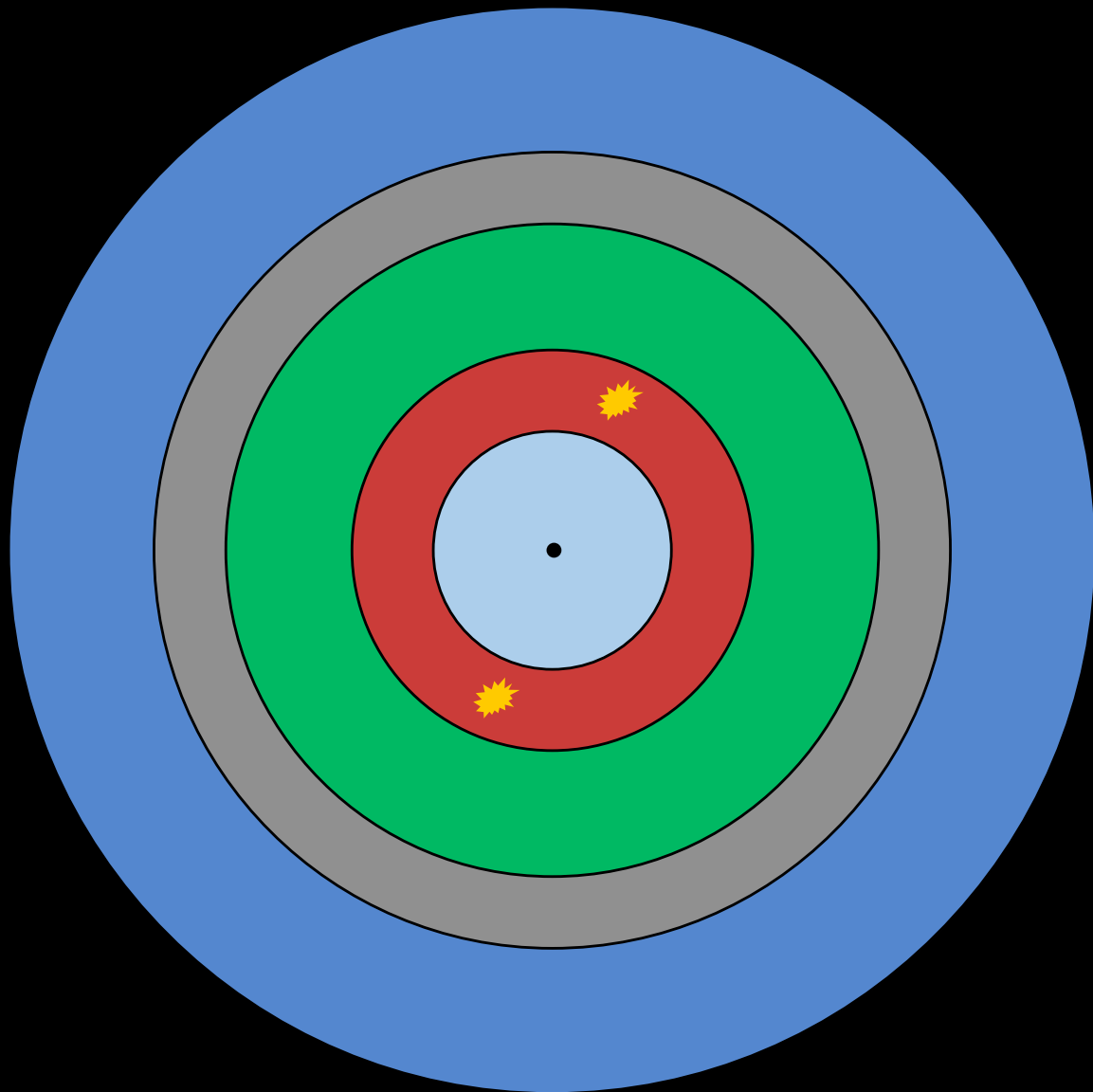
$$e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$$



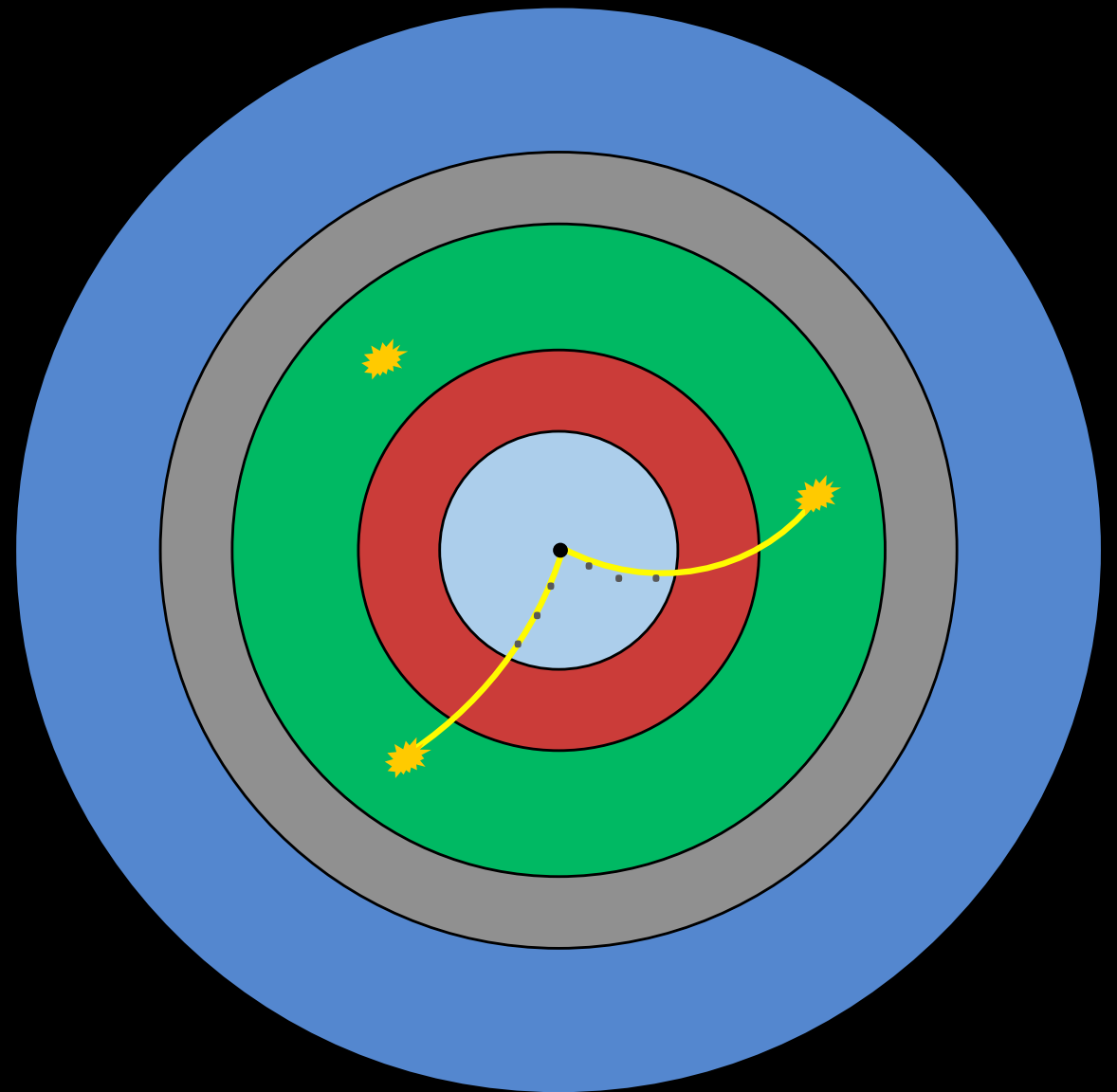
$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



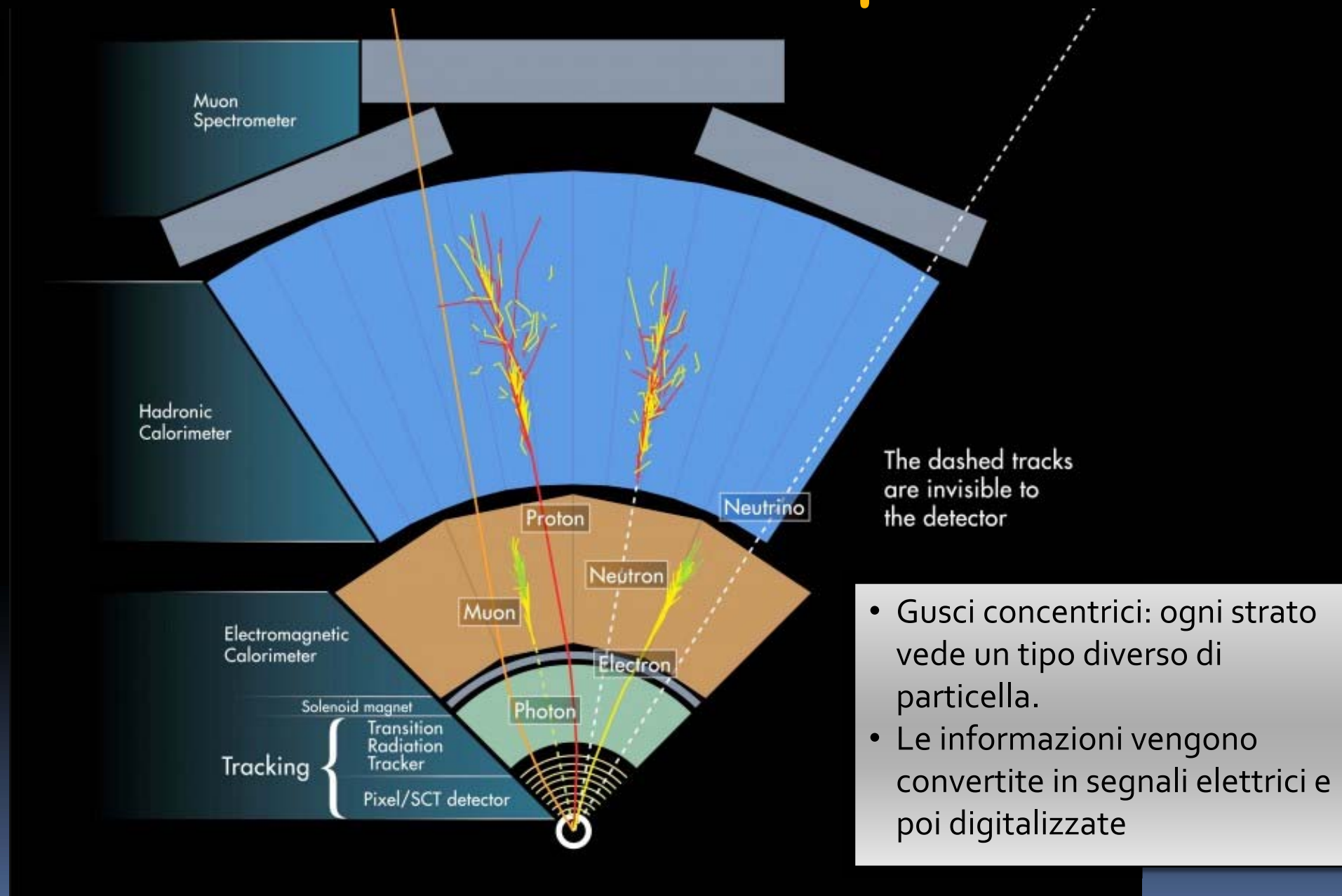
$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$$



$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \bar{p} n$$

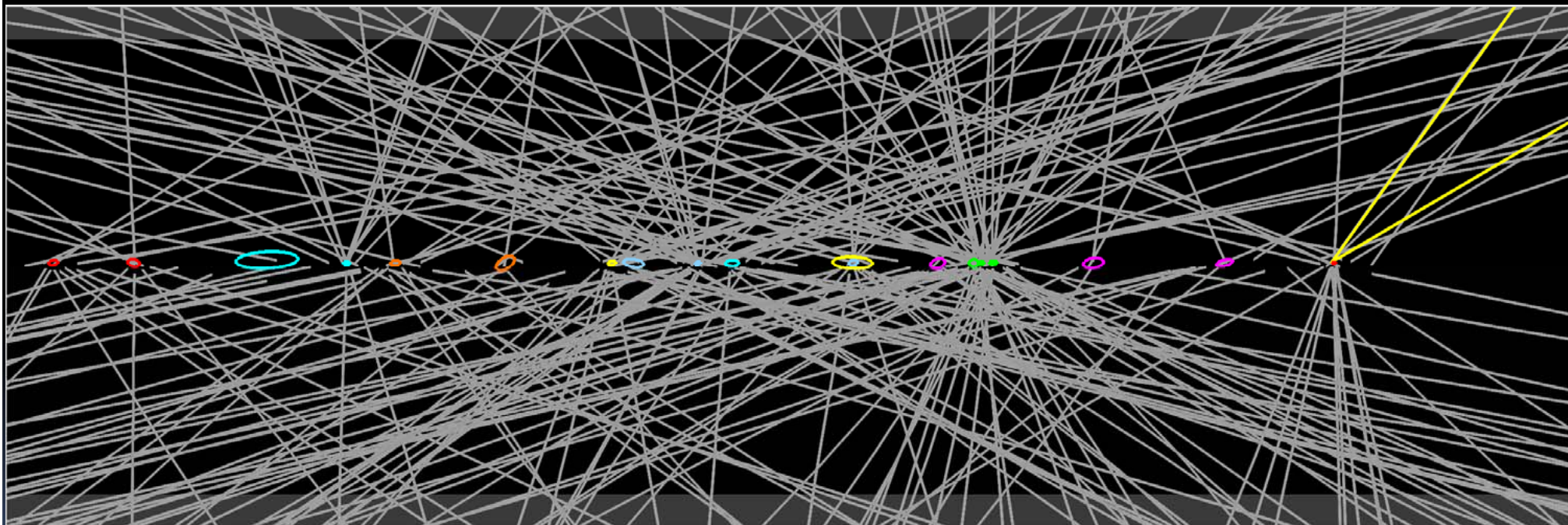


Come si fa a «vedere» una particella?



Quasi fatto...

Però i dati che escono dai rivelatori sono grezzi, difficili da decifrare ad occhio. In più se ne producono **milioni al secondo...**



Elaborazione dei dati di LHC



Risultato della ricostruzione

 **ATLAS**
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

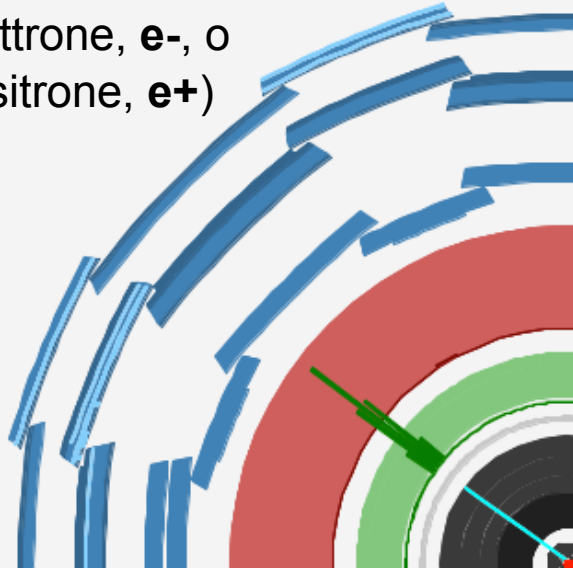
Proprietà fisiche
delle particelle

Run: 204153
Event: 35369265
2012-05-30 20:31:28 CEST

“Orme” da cercare

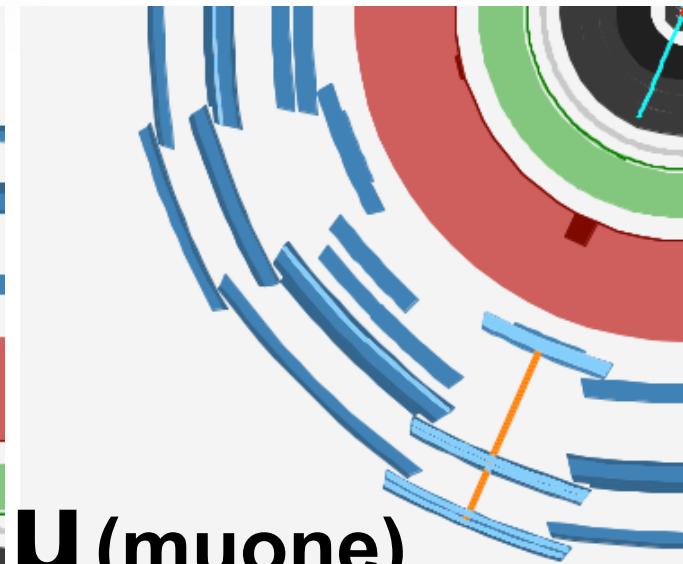
e (elettrone)

(elettrone, e^- , o positrone, e^+)



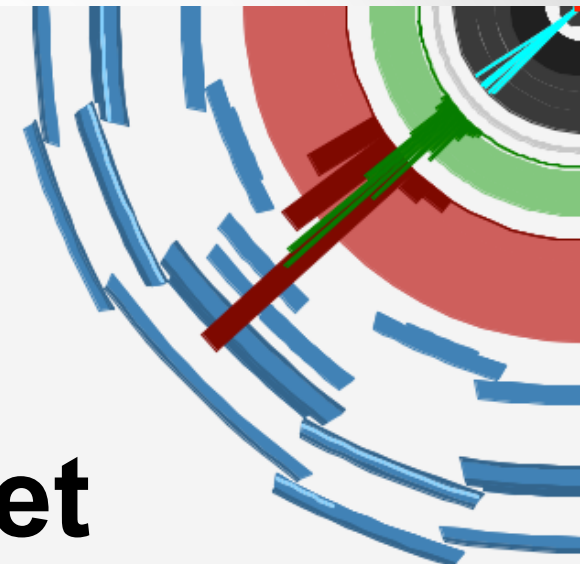
μ (muone)

(muone, μ^- , o antimuone μ^+)



jet

(getti di particelle collimate prodotte da quark)



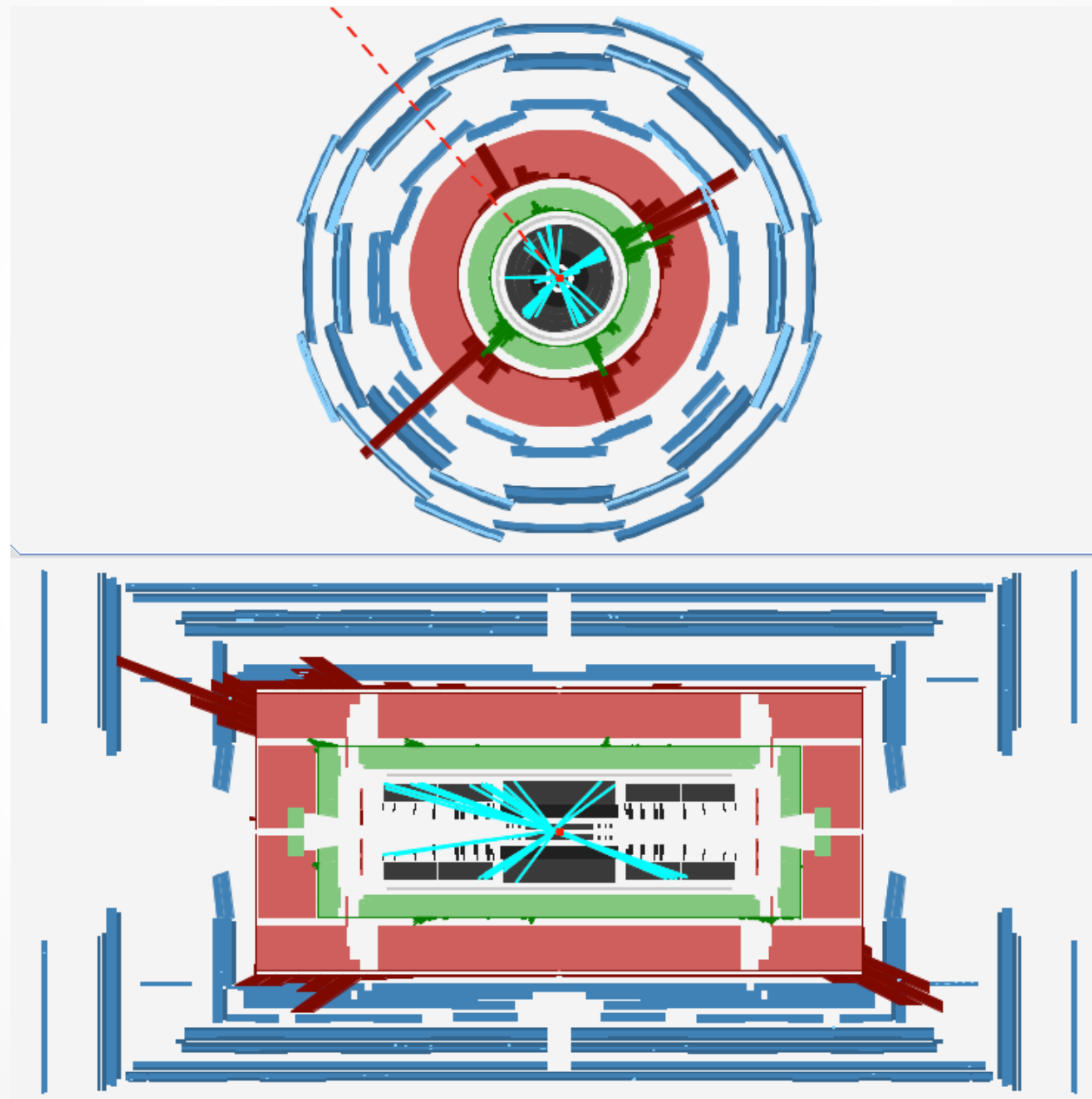
	e	μ	jet	ν (neutrino)
Rivelatori Traccianti				
Calorimetro elettromagnetico				
Calorimetro adronico				
Rivelatore di muoni				
Energia “mancante”				   

Come nell'esercizio precedente cerchiamo (stavolta senza differenziare per carica):

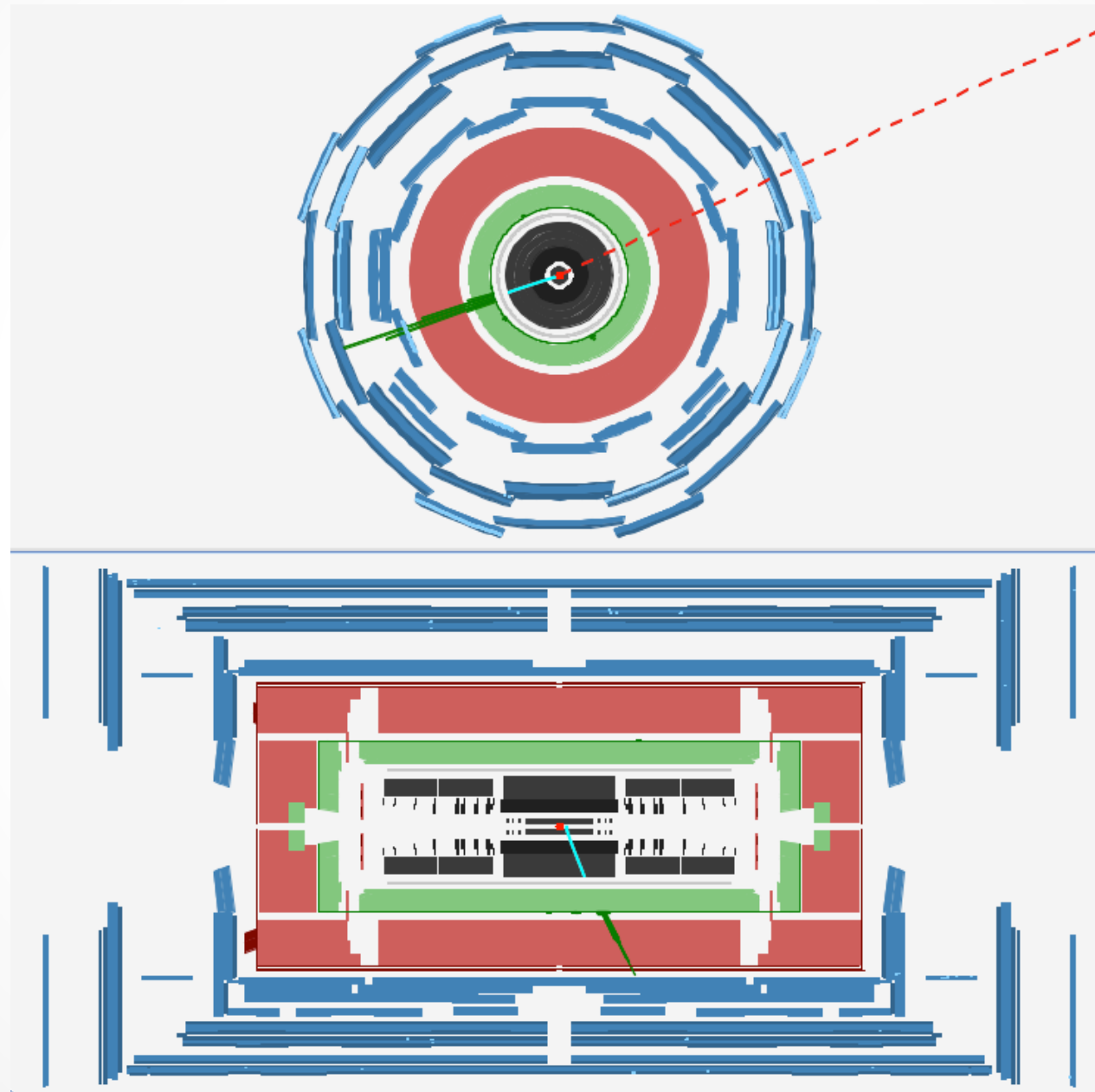
$Z \rightarrow \mu\mu$ $Z \rightarrow ee$ $W \rightarrow e\nu$ $W \rightarrow \mu\nu$

• $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ / $eeee$ / $ee\mu\mu$

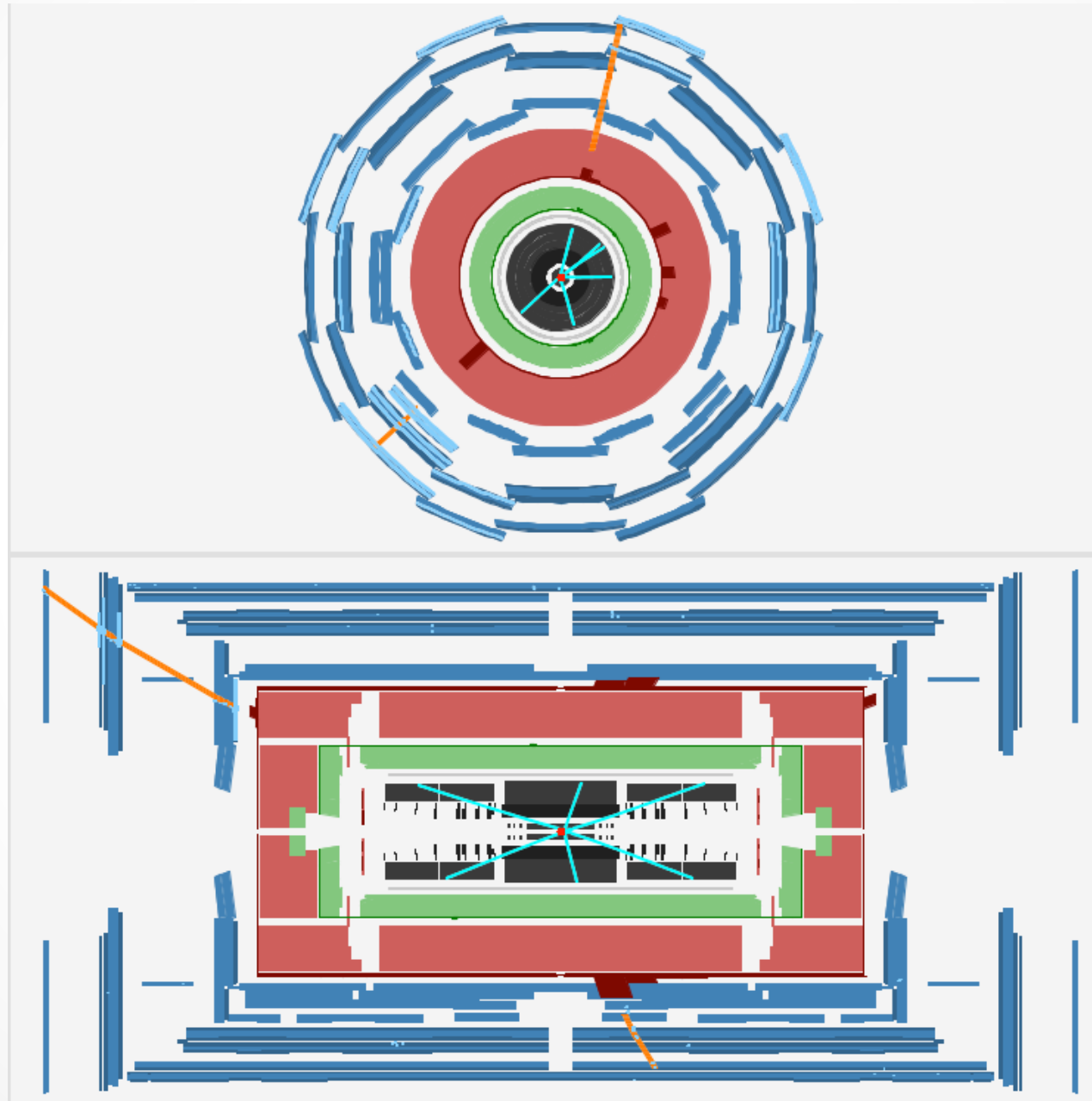
Rappresentazione grafica di una collisione registrata dal rivelatore



$$W \rightarrow e \nu$$



$$Z \rightarrow \mu\mu$$



3

