

# Alla ricerca della Materia Oscura

ARTE E SCIENZA  
2022-2024



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

20/03/2023

Silvia Resconi  
INFN Milano

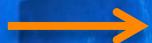
# Cosa conosciamo veramente ?

La materia che conosciamo:  
la nostra terra, i pianeti,  
le stelle, le galassie...



15%

La materia oscura (Dark  
Matter) e' circa 5.6 volte piu'  
abbondante della materia  
che conosciamo



85%



# Materia Oscura (Dark Matter)

## Perche' Oscura ?

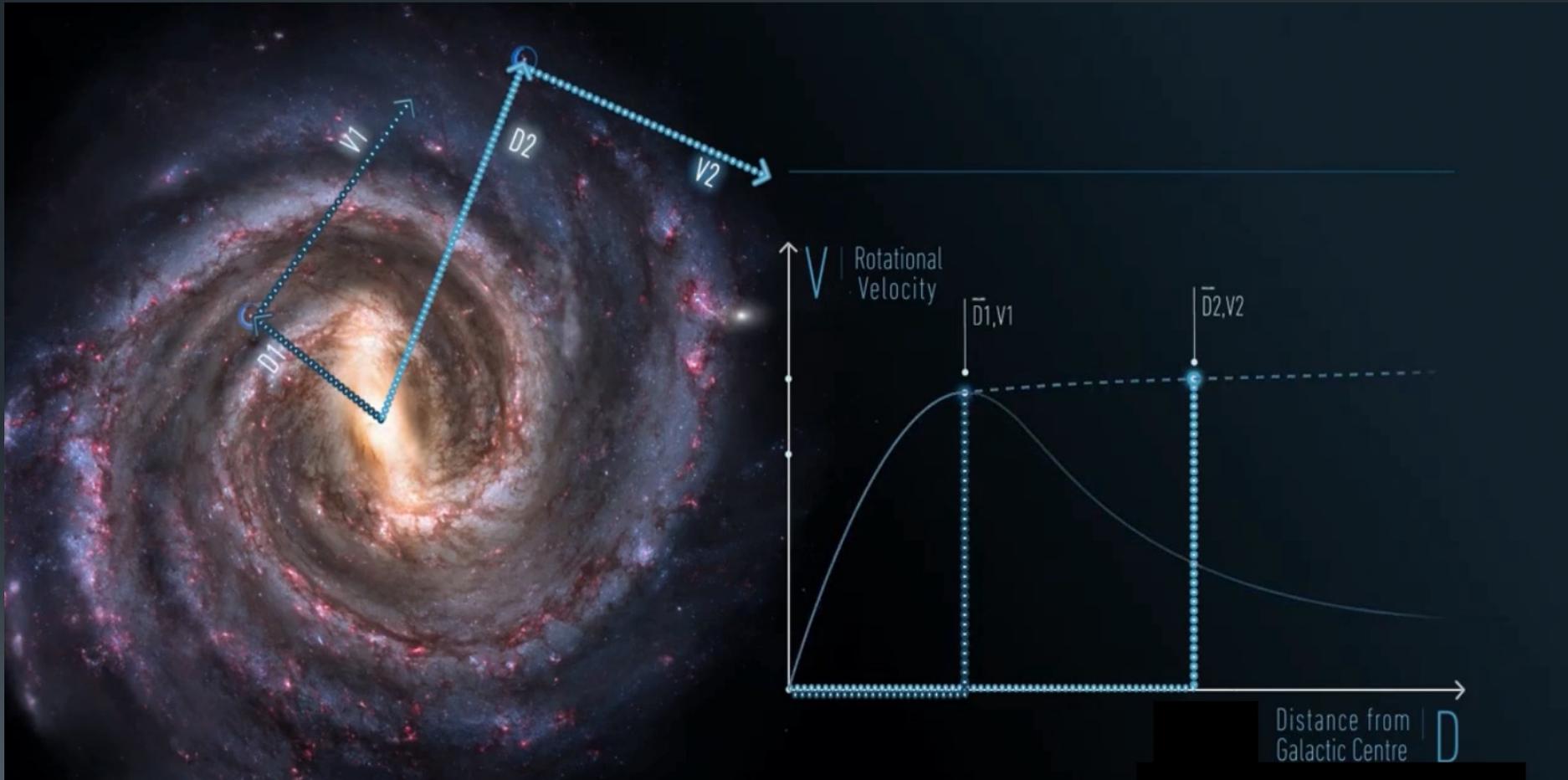
- Non conosciamo la sua natura  
→ problema aperto della fisica contemporanea
- Non puo' essere osservata direttamente tramite i telescopi poiche' non assorbe, non riflette, non emette luce

## Come facciamo a sapere che esiste?

- Puo' essere osservata indirettamente tramite gli effetti che esercita sulla materia vicina: moto di pianeti, stelle e galassie  
→ Interagisce gravitazionalmente come qualsiasi corpo di massa non nulla (legge di gravitazione universale di Newton)

# Moto delle stelle nelle galassie

Vera Rubin, negli anni '70, misuro' la velocità di rotazione delle stelle nelle galassie, le cosiddette **curve di rotazione**.



Questa anomalia puo' essere spiegata solo se si suppone l'esistenza di massa aggiuntiva invisibile (materia oscura)

Ogni galassia e' immersa in una sorta di alone di materia oscura piu' esteso



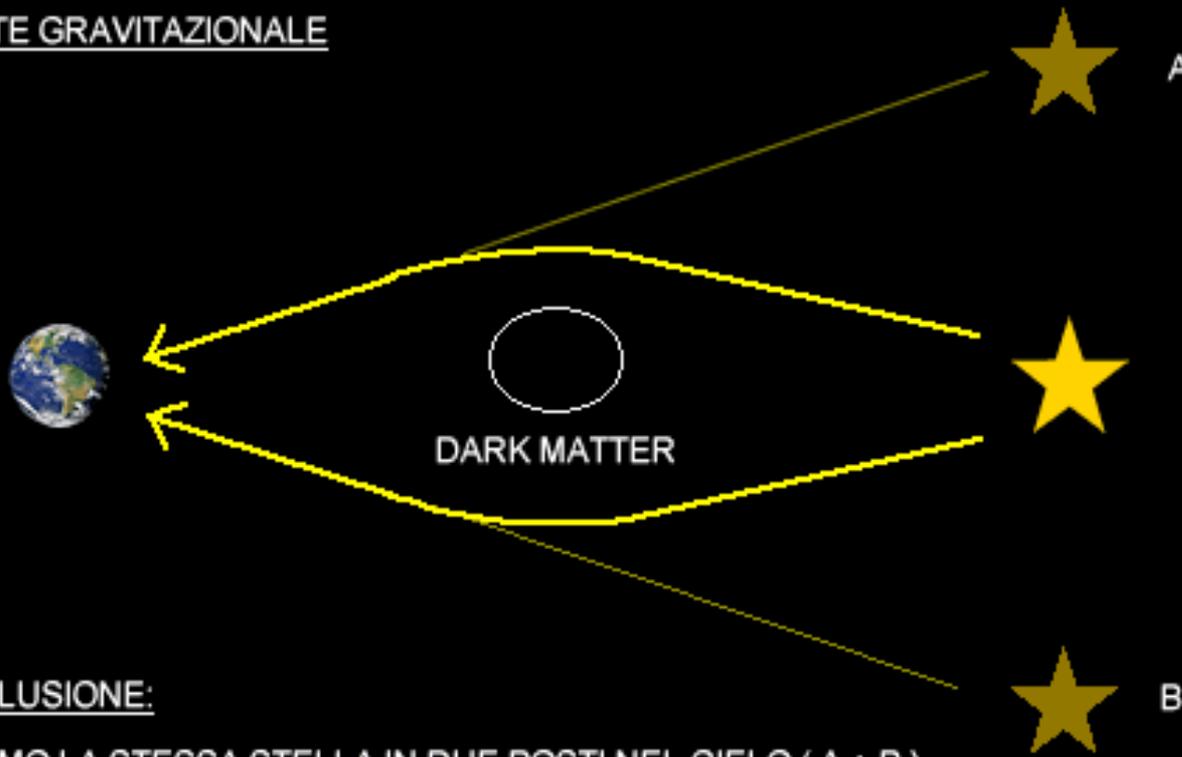
**Immagine artistica** dell'alone di materia oscura, qui rappresentato in blu, attorno alla via lattea

# Ulteriori prove...

## ...lenti gravitazionali

Nel corso degli anni il miglioramento delle osservazioni astronomiche ha fornito ulteriori prove a favore dell'esistenza della materia oscura come il fenomeno di **lente gravitazionale**

### LENTE GRAVITAZIONALE



### CONCLUSIONE:

VEDIAMO LA STESSA STELLA IN DUE POSTI NEL CIELO (A + B)

*In presenza di una grande massa i raggi di luce proveniente dalle stelle possono subire delle deflessioni.*

*A volte si osserva la deviazione della luce senza la presenza di massa visibile.*

*Cio' e' dovuto alla presenza di materia oscura tra noi e la fonte luminosa*

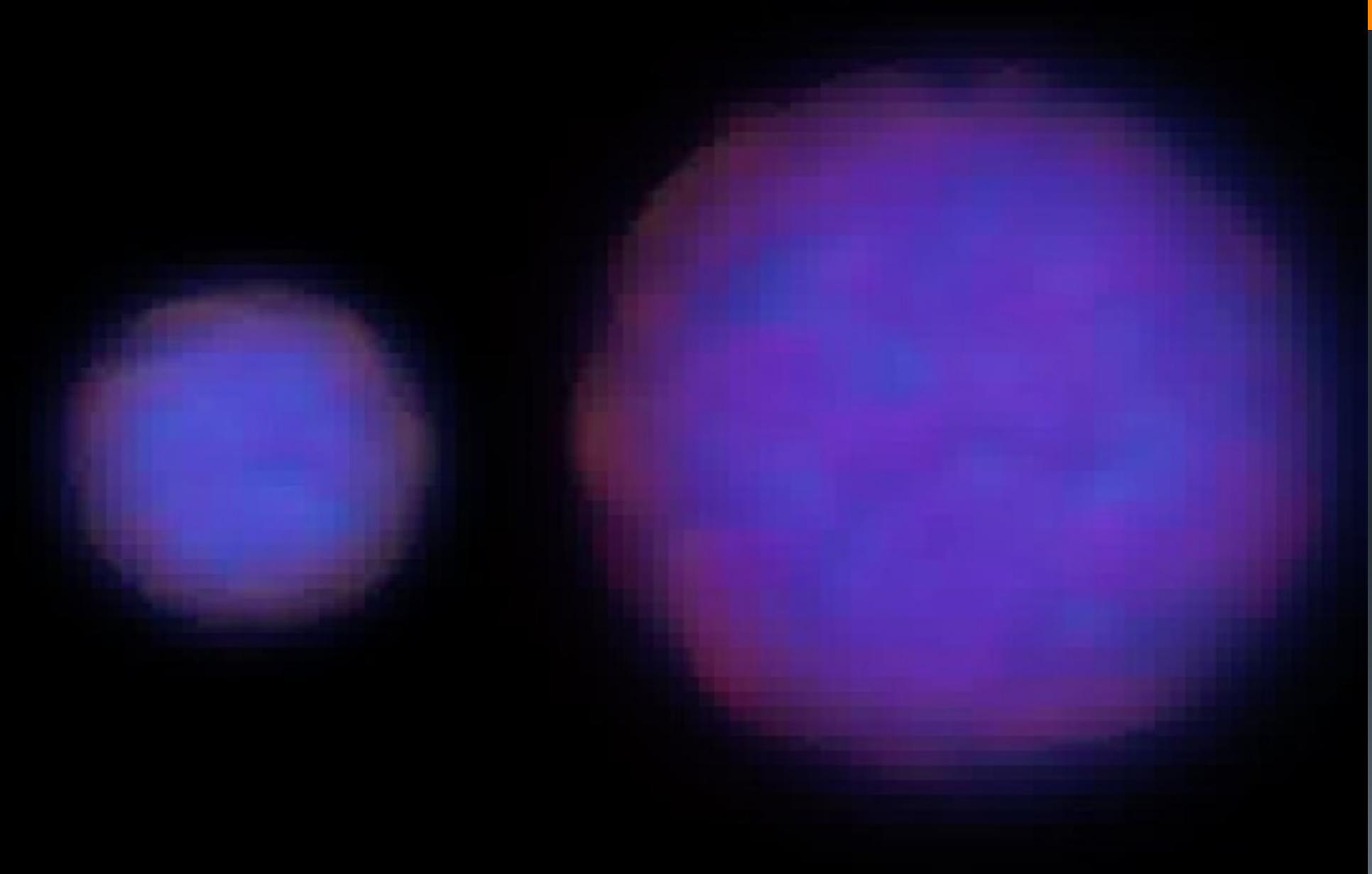
# Lenti gravitazionali

Dalla misura l'angolo di deflessione dei raggi di luce si può risalire alla massa della lente che comprende massa ordinaria e materia oscura.



# Scontro tra due ammassi di galassie:

ha l'effetto di separare la materia ordinaria dalla materia oscura



# The Bullet Cluster



# La materia oscura e' costituita da particelle?

L'ipotesi piu' semplice e attraente per i fisici e' che la materia oscura sia costituita da particelle elementari:

- **Sono neutre (non hanno carica)**
  - spiega la ragione per cui risultino invisibili, non potendo emettere radiazione elettromagnetica di nessun genere
- **Hanno massa**
  - spiega gli effetti gravitazionali
  - massa pari a circa 100 volte la massa del protone
- **Non sono particelle conosciute**
  - nessuna delle particelle che costituisce il Modello Standard presenta queste caratteristiche



**WIMP = Weakly Interactive Massive Particle**

# Concetto di particella elementare

Già nel 400 a.C. i filosofi greci, immaginavano che la materia non si potesse suddividere all'infinito: ad un certo punto si sarebbe ottenuta una sua parte piccolissima che non sarebbe piu' stato possibile dividere in due.

Democrito chiamò **àtomos**, cioè **"indivisibili"** queste particelle minime.



Questa e' la prima idea di **particella elementare !!**

Fino al 1800 si pensava che l'atomo fosse il costituente elementare della materia e quindi indivisibile per definizione.

# Le particelle degli atomi

**QUARKS**

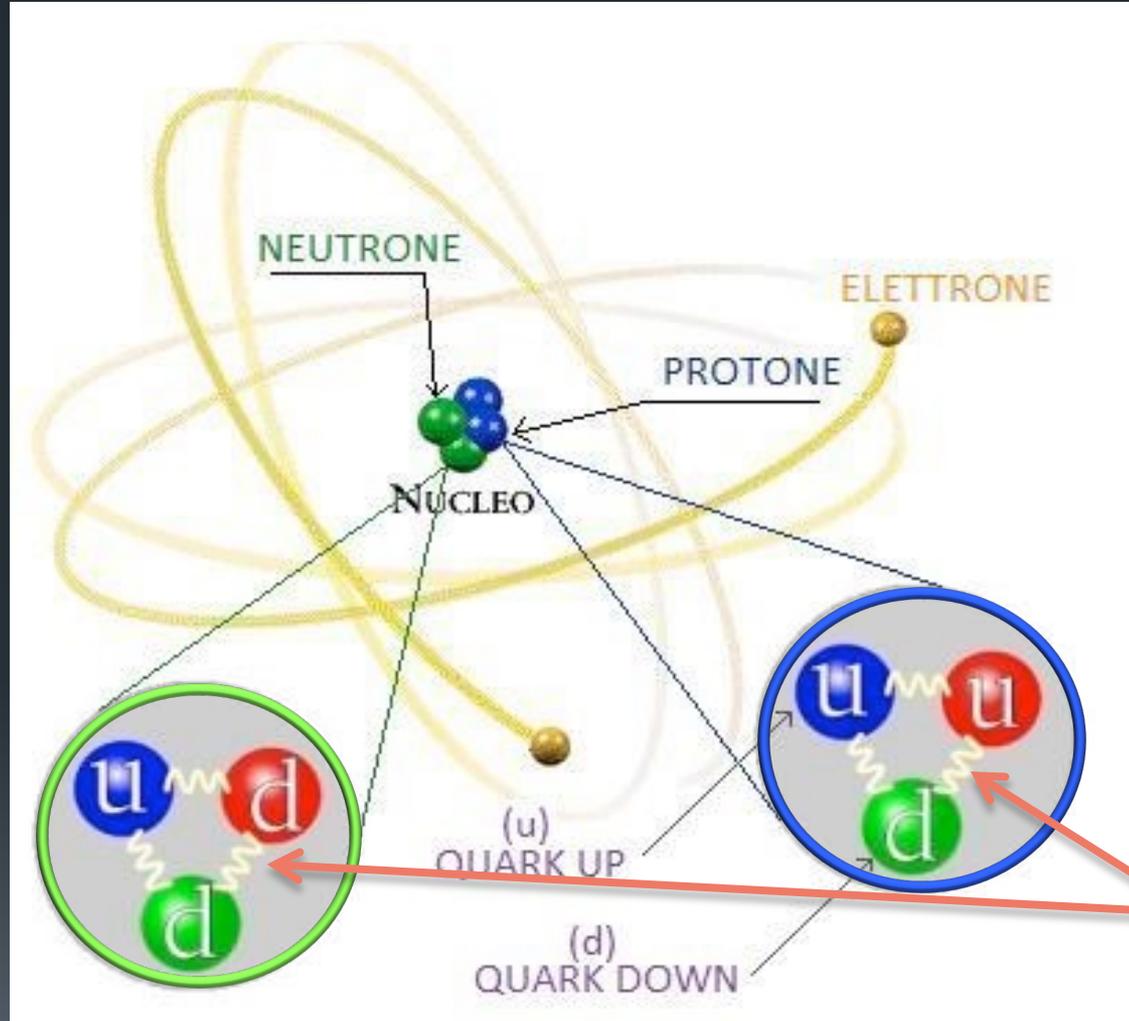
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	<b>u</b>
charge →	$2/3$	up
spin →	$1/2$	

mass →	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	<b>d</b>
charge →	$-1/3$	down
spin →	$1/2$	

mass →	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	<b>e</b>
charge →	$-1$	electron
spin →	$1/2$	



*la "colla" che tiene insieme i quarks: "forza forte"*

0	<b>g</b>
0	gluon
1	

*Gli atomi di tutte le molecole*

# Il Modello Standard

descrive i costituenti della materia

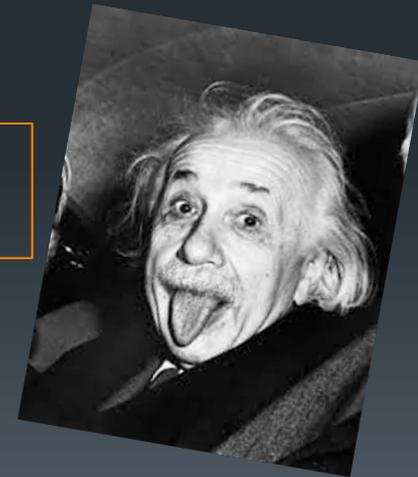
	1	2	3
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	$-1$	$-1$	$-1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	$0$	$0$	$0$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino

**3 famiglie:**

*le particelle della 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> famiglia sono piu' pesanti e instabili si possono produrre agli acceleratori o nel cosmo a seguito di urti ad altissima energia*

$$E = mc^2$$

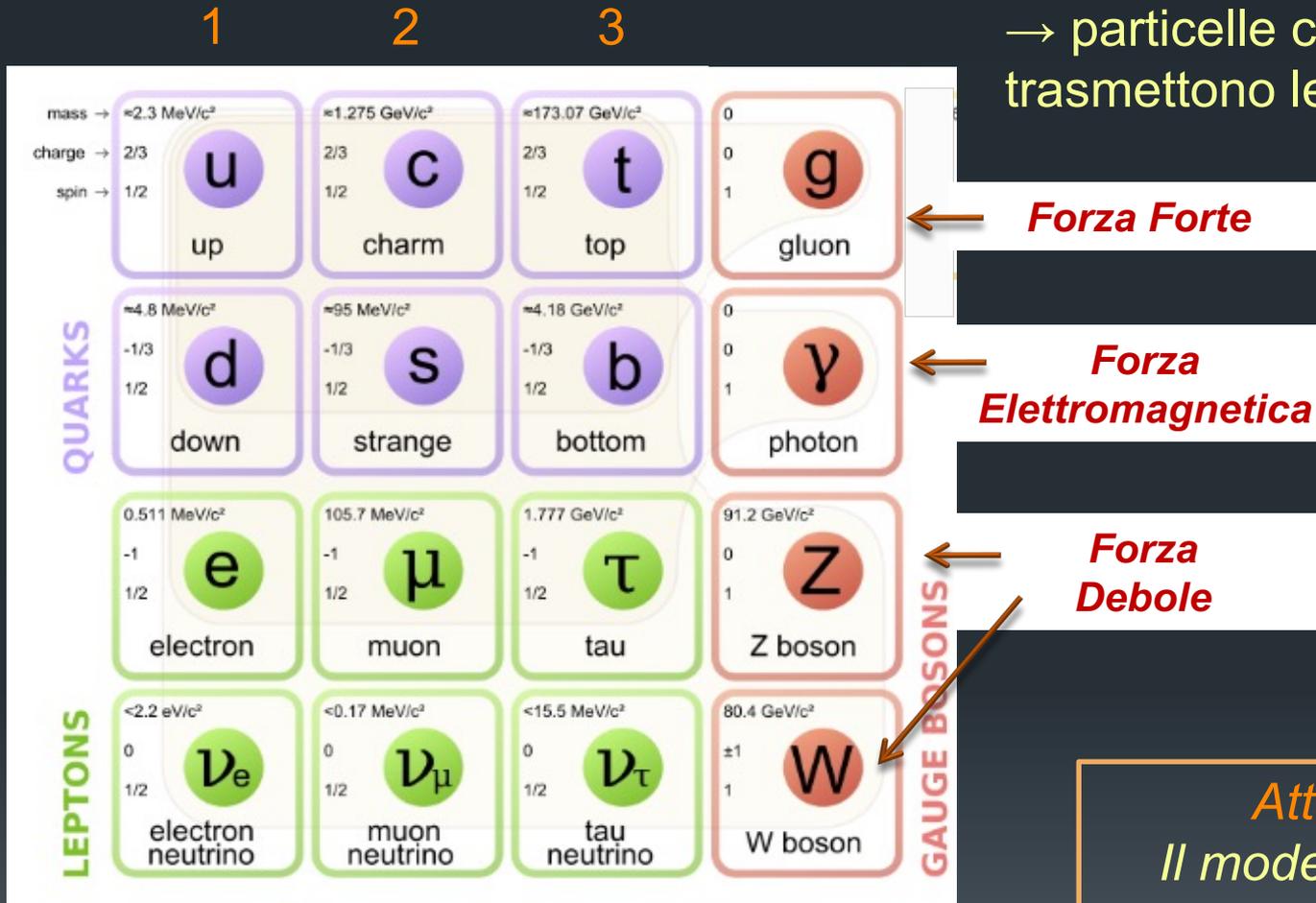
$c = \text{velocita' della luce}$   
 $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$



*I neutrini: particelle neutre, leggere, Interagiscono raramente con la materia, piu' simili alle WIMPs: massa troppo piccola per spiegare la densita' di materia oscura nell'Universo*

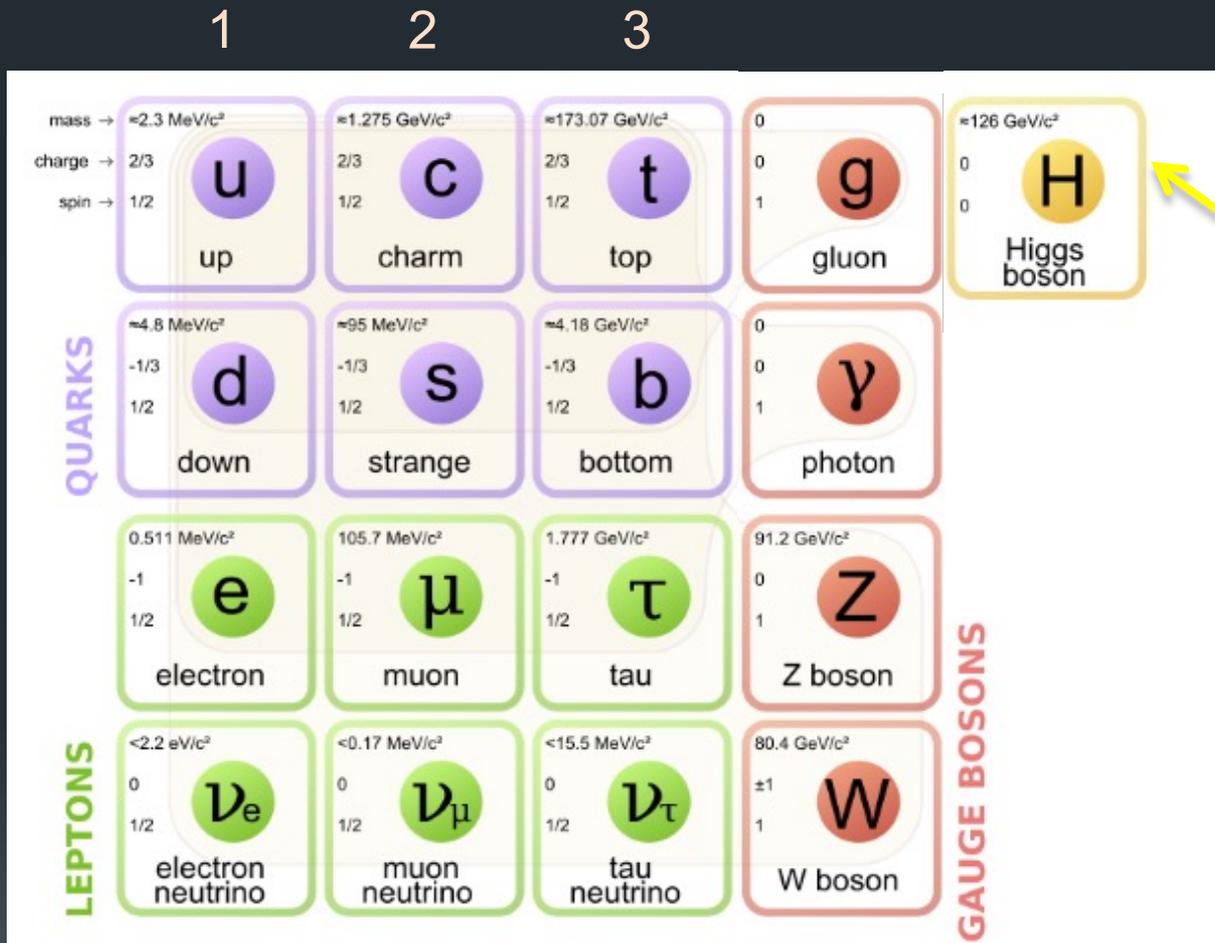
# Il Modello Standard

descrive le Forze dell'Universo  
→ particelle che trasmettono le Forze



**Attenzione:**  
Il modello Standard non comprende la Forza Gravitazionale!

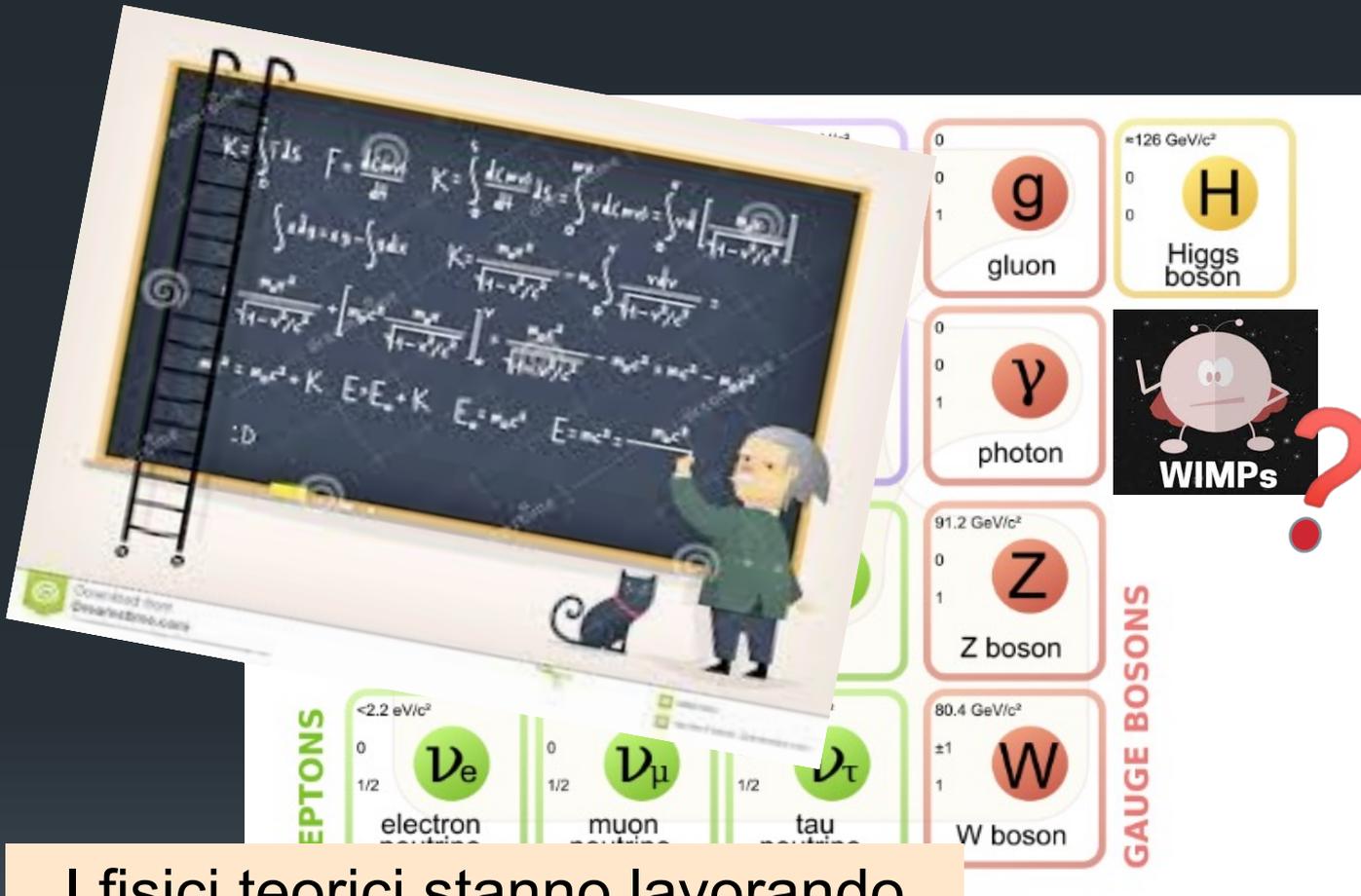
# Il Modello Standard



Bosone di Higgs:  
scoperto del 2012  
all'acceleratore LHC al  
CERN (Ginevra)

*Conferisce la  
massa alle  
particelle*

# C'e' posto per le WIMPs ?



I fisici teorici stanno lavorando per estendere il Modello Standard, nuove teorie...

# Come rivelare le WIMPs ?

Esistono tre filoni principali di ricerca della materia oscura:

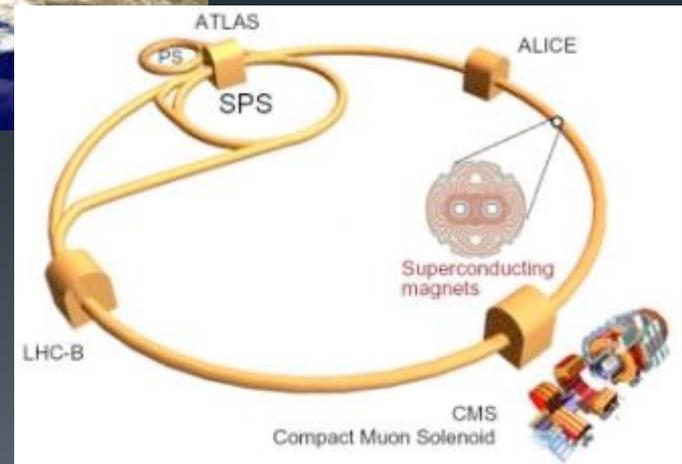
*Osservazione diretta*



*Osservazione indiretta*



*Produzione in esperimenti agli acceleratori*



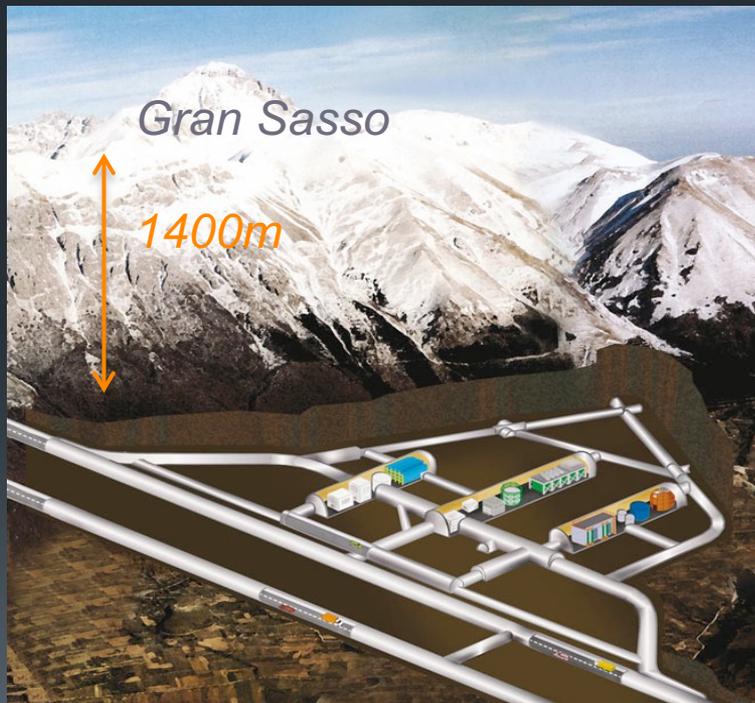
# Osservazione diretta

la Terra assieme al Sistema Solare ruotando intorno al centro della Galassia intercetta continuamente particelle dell'alone di materia oscura (WIMPs) che potrebbero interagire con la materia visibile.



# Osservazione diretta

la Terra assieme al Sistema Solare ruotando intorno al centro della Galassia intercetta continuamente particelle dell'alone di materia oscura (WIMPs) che potrebbero interagire con la materia visibile.



esperimenti di grandi dimensioni in laboratori sotterranei per schermare dai raggi cosmici ("rumore") che renderebbe la rivelazione più difficile.



*Lo spessore della roccia consente di ridurre il flusso della radiazione cosmica di circa un milione di volte.*

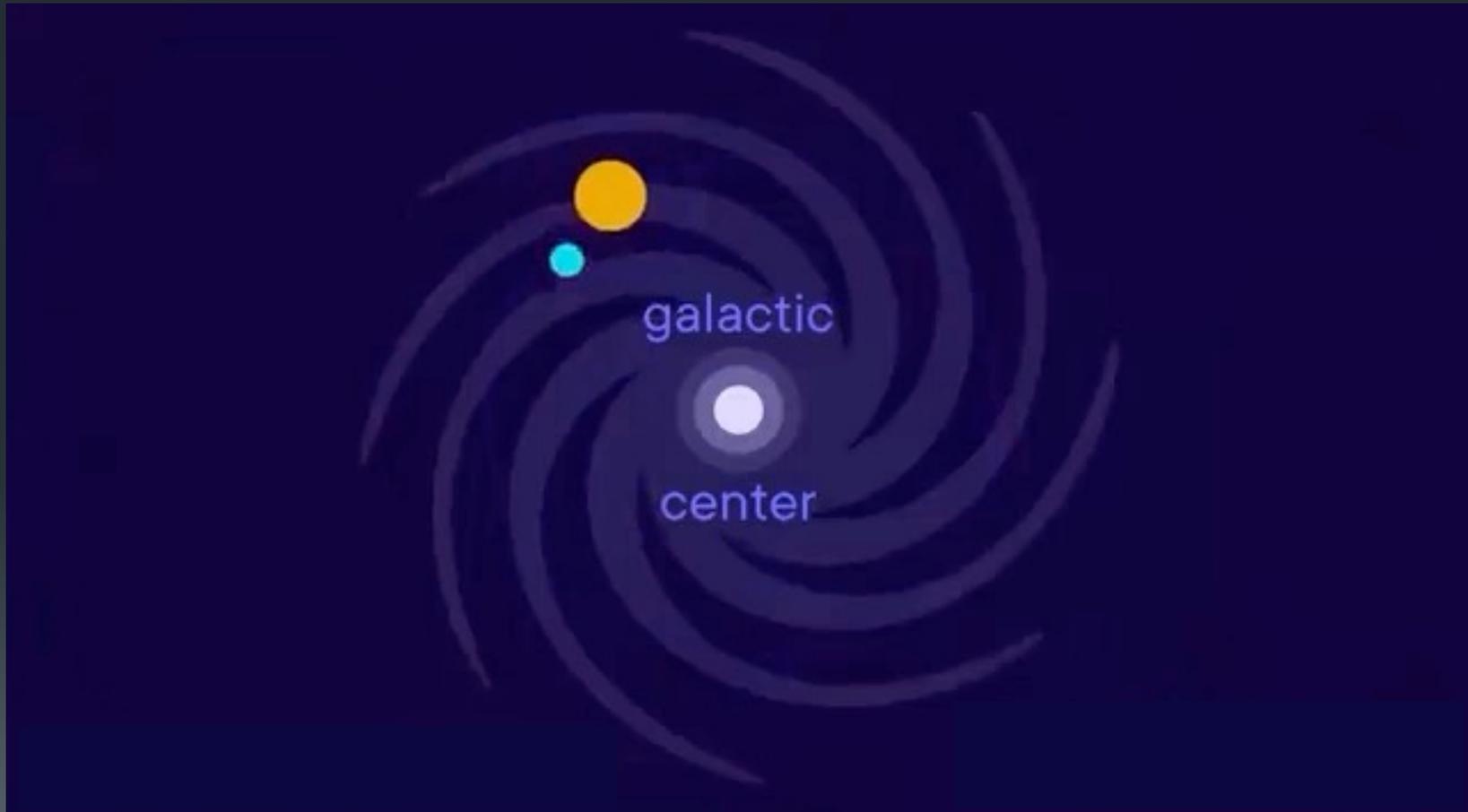
# Raggi cosmici

Particelle provenienti dal cosmo, da stelle e galassie che scontrandosi con i nuclei dell'atmosfera terrestre producono altre particelle: muoni, elettroni, neutrini, fotoni,.. creando sciami di particelle.



# DAMA... possibile scoperta ?

Il flusso delle particelle di Materia Oscura intercettate dalla terra durante l'anno varia: e' massimo a Giugno e minimo a Dicembre

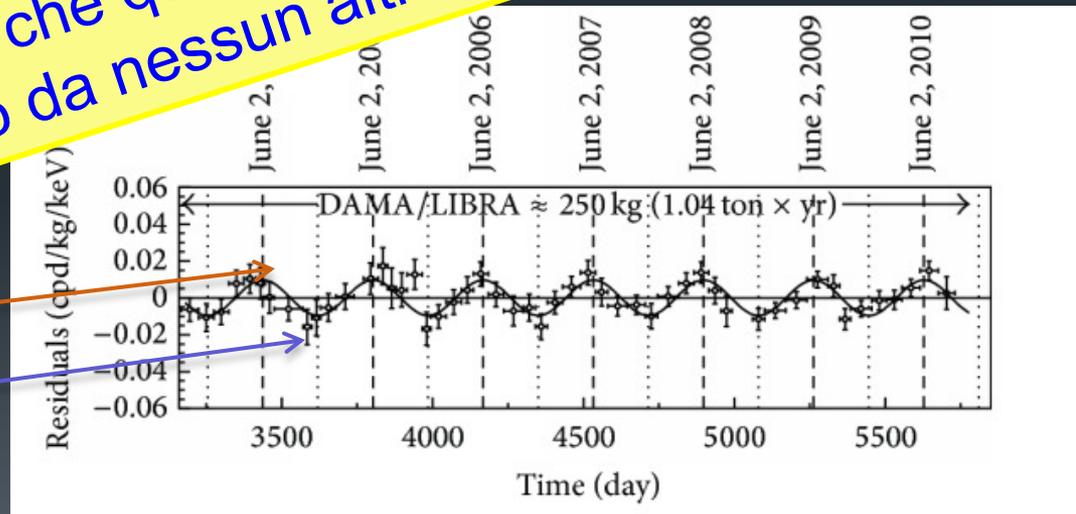


# DAMA... possibile scoperta ?



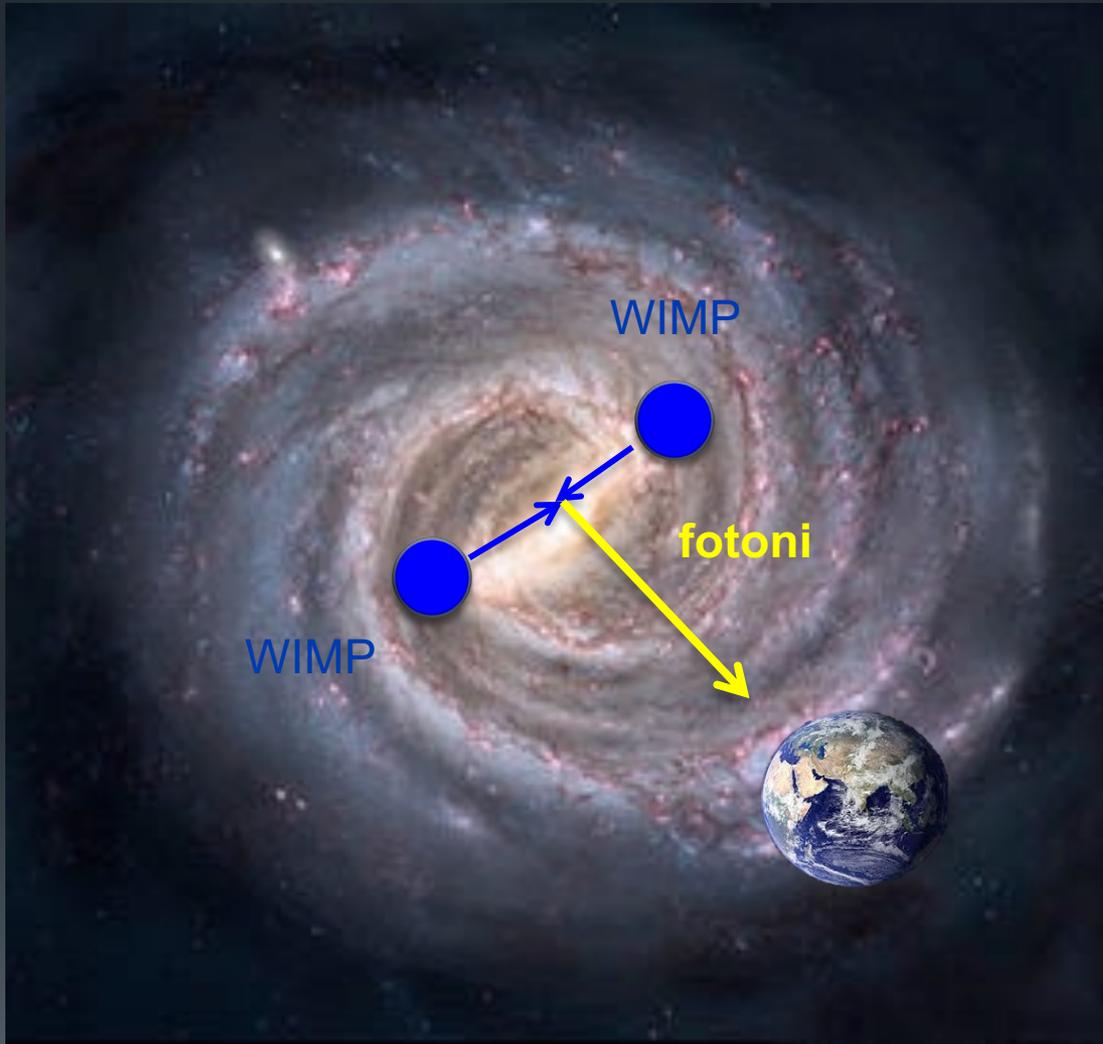
Sembra proprio una scoperta!  
Peccato che questo risultato non sia  
confermato da nessun altro esperimento...

Ci aspettiamo un numero di oscillazioni con periodo annuale con massimi a giugno e minimi a dicembre



<http://dx.doi.org/10.1155/2014/605659>

# Osservazione indiretta



Ricerca di segnali dovuti  
allo scontro  
(annichilazione) tra  
particelle di materia  
oscura (WIMPs)

Cosa si cerca ?

Un eccesso di particelle  
note, come ad es: fotoni,  
provenienti da regioni  
della galassia

# Osservazione indiretta

Ricerche effettuate nello spazio:

- hanno maggiori capacità direzionali rispetto agli apparati terrestri
- risentono meno del “rumore” dovuto ai raggi cosmici che attraversando l’atmosfera producono particelle che possono essere prese per WIMPS

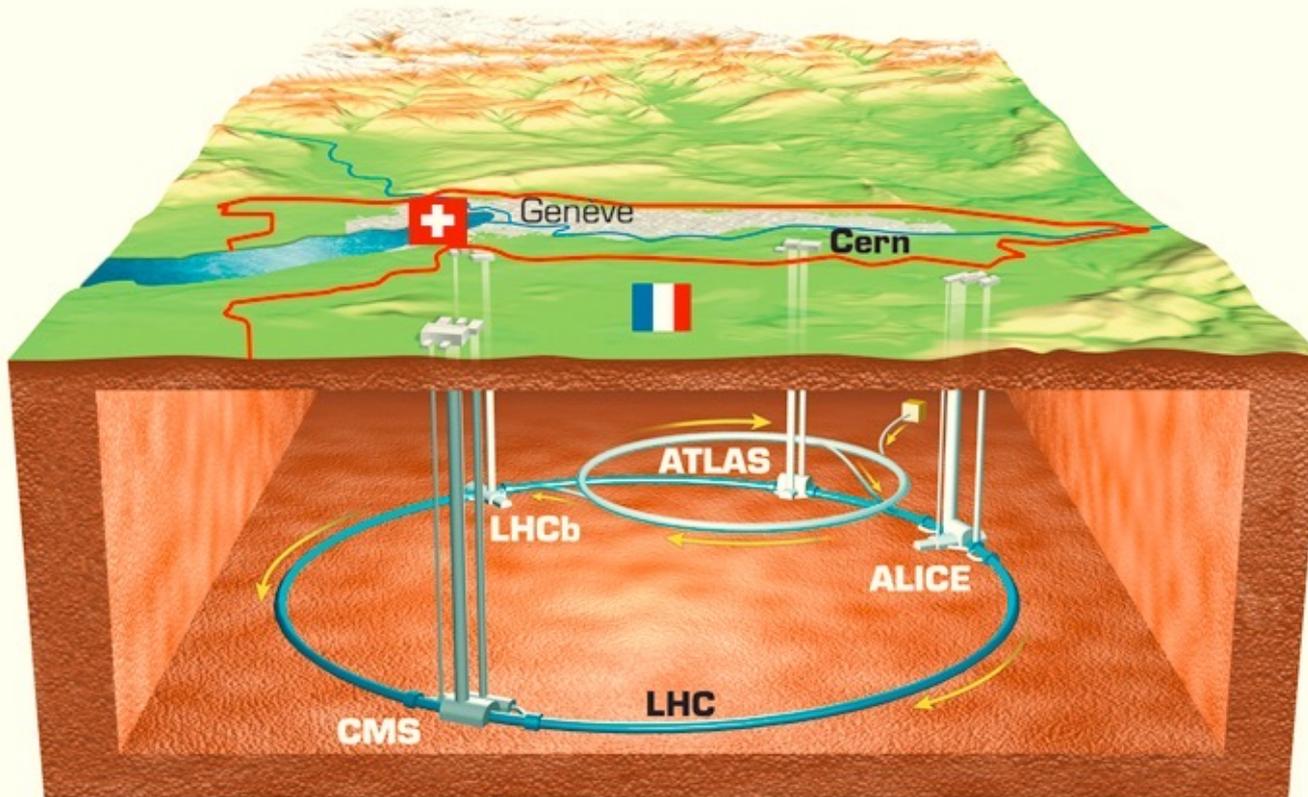
Ci vorranno ulteriori osservazioni per capire se questo segnale possa essere causato dalla particelle di materia oscura

Lo Spaziale Fermi della NASA ha rivelato un’intensa emissione di fotoni proveniente dal centro della nostra galassia la cui origine però potrebbe essere dovuta a sorgenti note.



# Produzione agli acceleratori

*Al Large Hadron Collider (LHC) presso i laboratori del CERN, al confine tra la Francia e la Svizzera si cerca di produrre particelle di materia oscura dalla collisione di fasci di protoni.*



## LHC:

Circonferenza = 27 km

Profondita' = 100 m

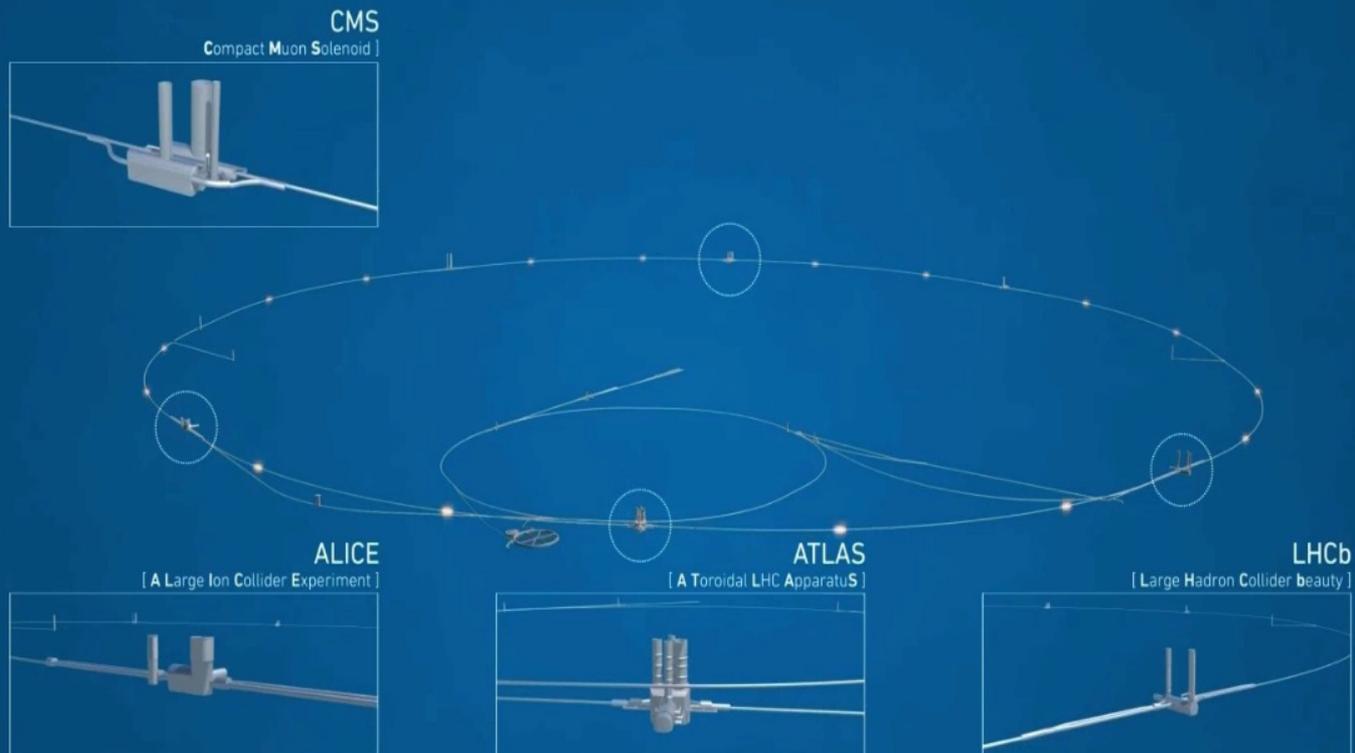
→ 4 esperimenti:

ATLAS, CMS,

LHCb, ALICE

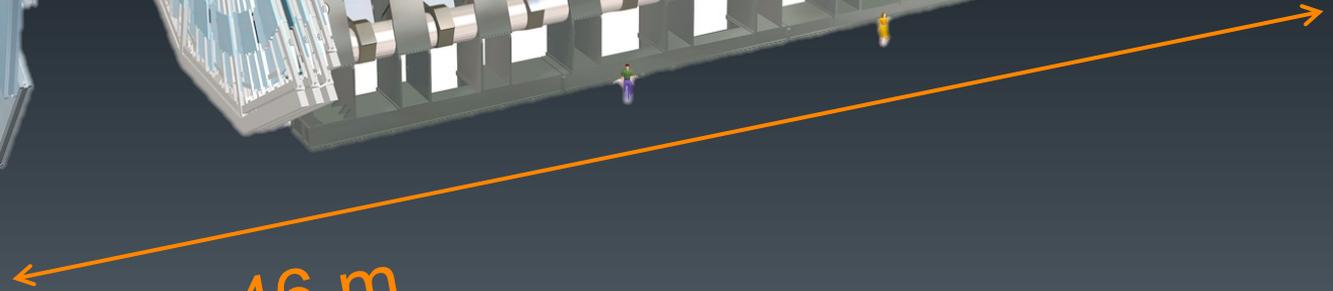
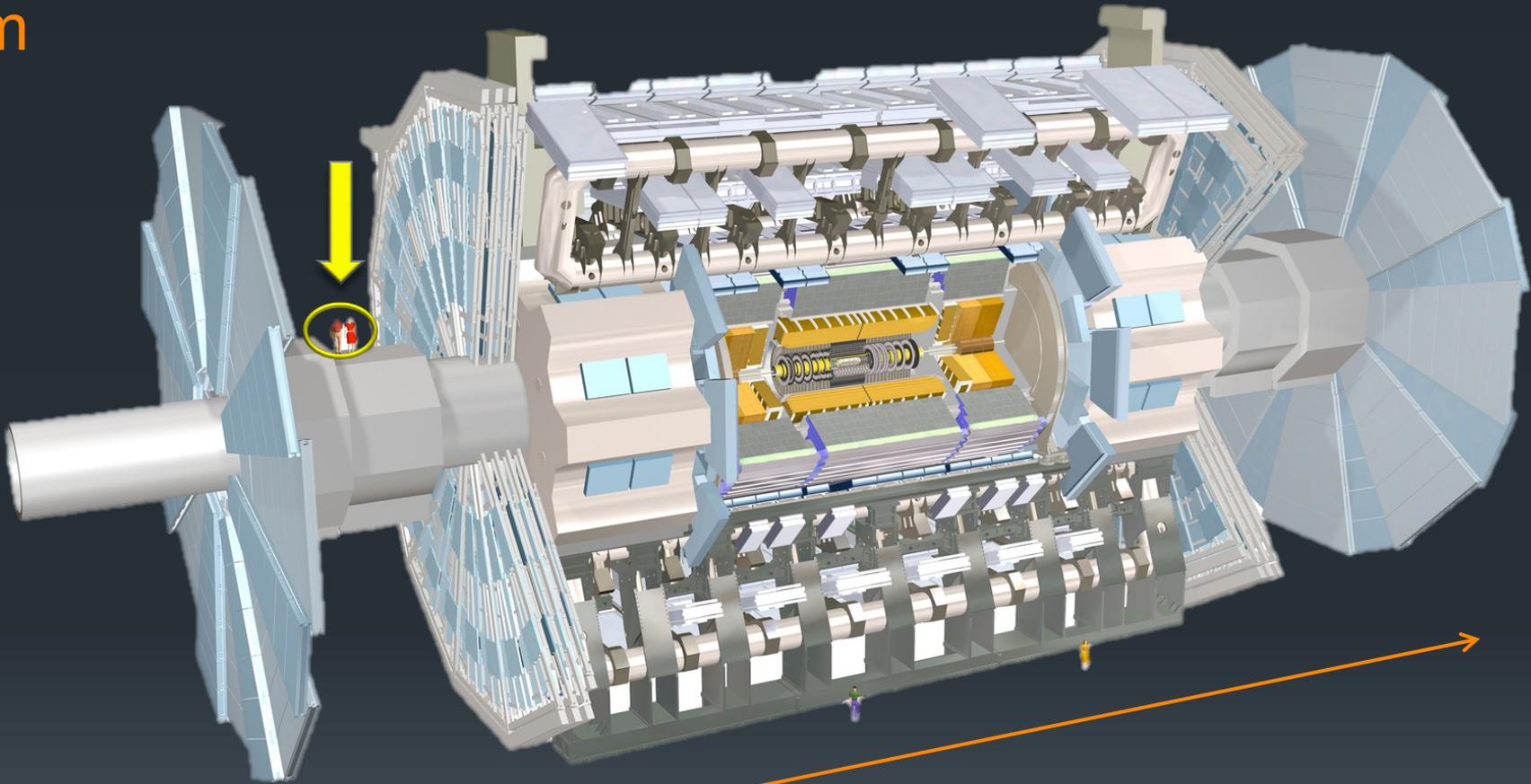
# LHC Large Hadron Collider

Si fanno scontrare due “fasci” di protoni che viaggiano in direzioni opposte composti da “pacchetti” di protoni: 100 miliardi di protoni per “pacchetto”  
collisioni tra protoni in 4 punti: 40 milioni di collisioni al secondo!  
energia totale:  $13 \text{ TeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ )



# ATLAS

25 m

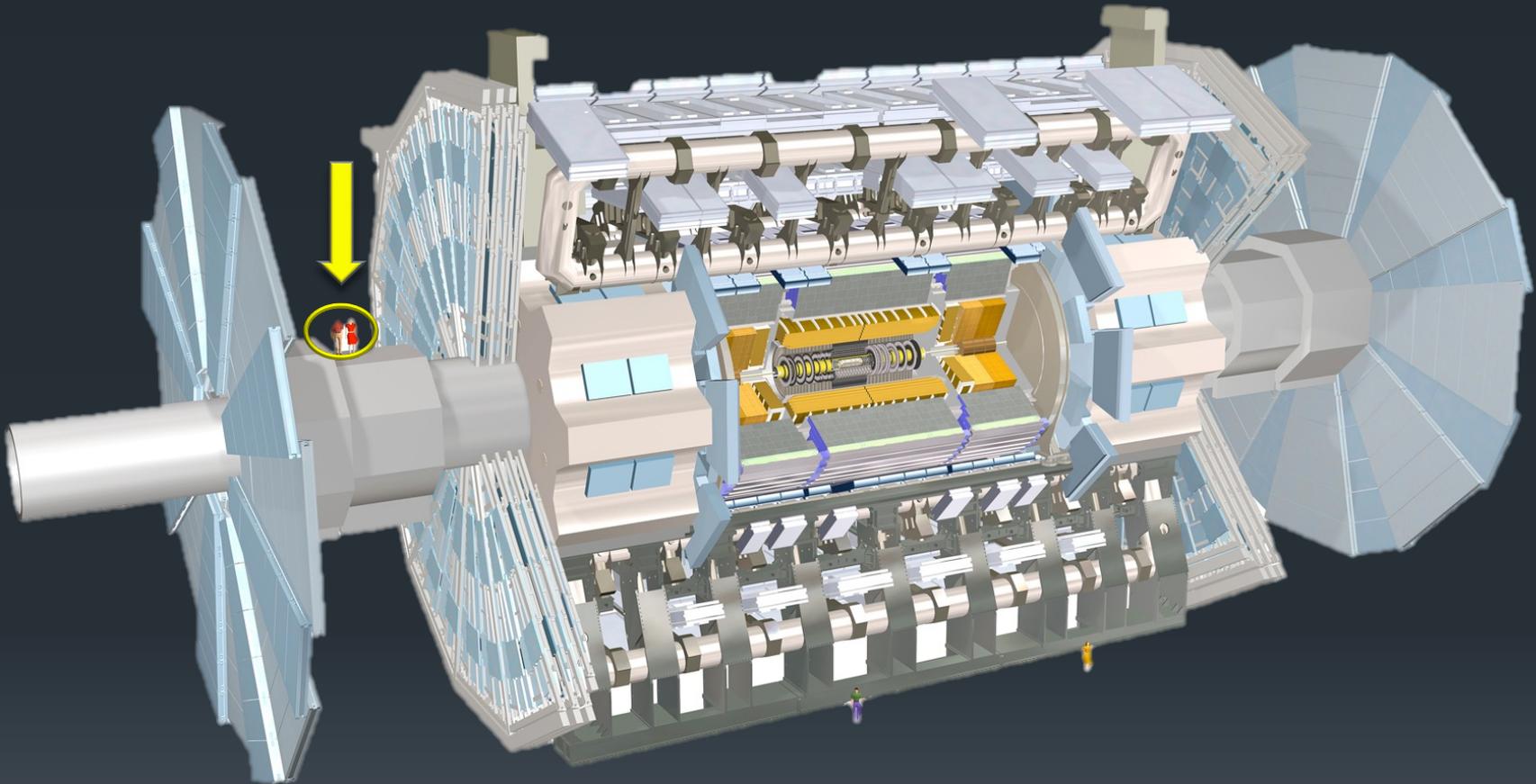


46 m

Peso = 7000 tonnellate

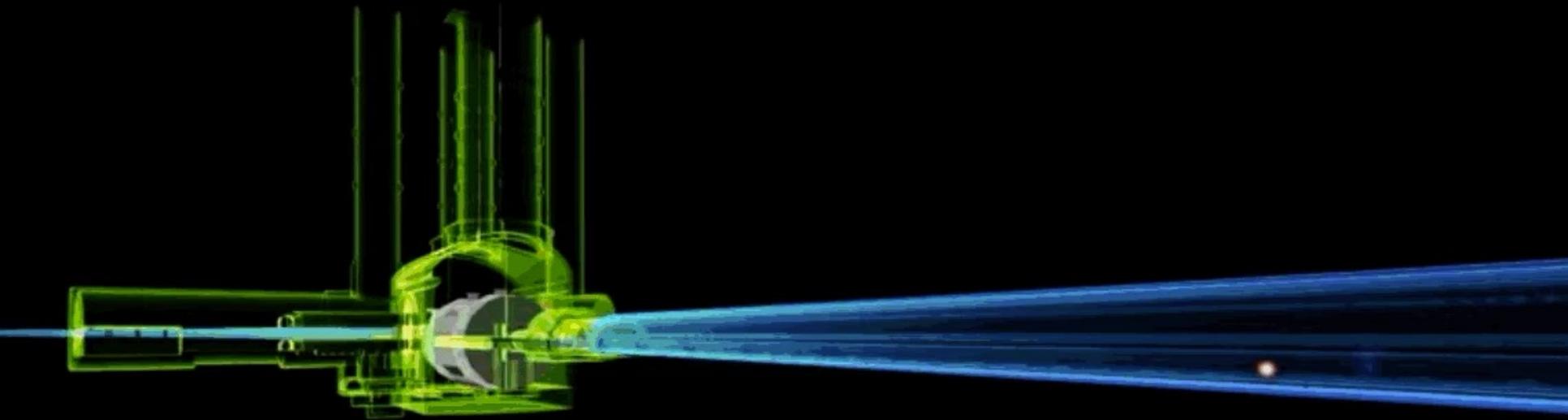
# ATLAS

28



Il rivelatore e' costituito da vari strati concentrici che permettono di misurare la traiettoria, la carica e l'energia delle diverse particelle prodotte dalle collisioni tra protoni.

# Collisione protone-protone



# Uno tsunami di dati!

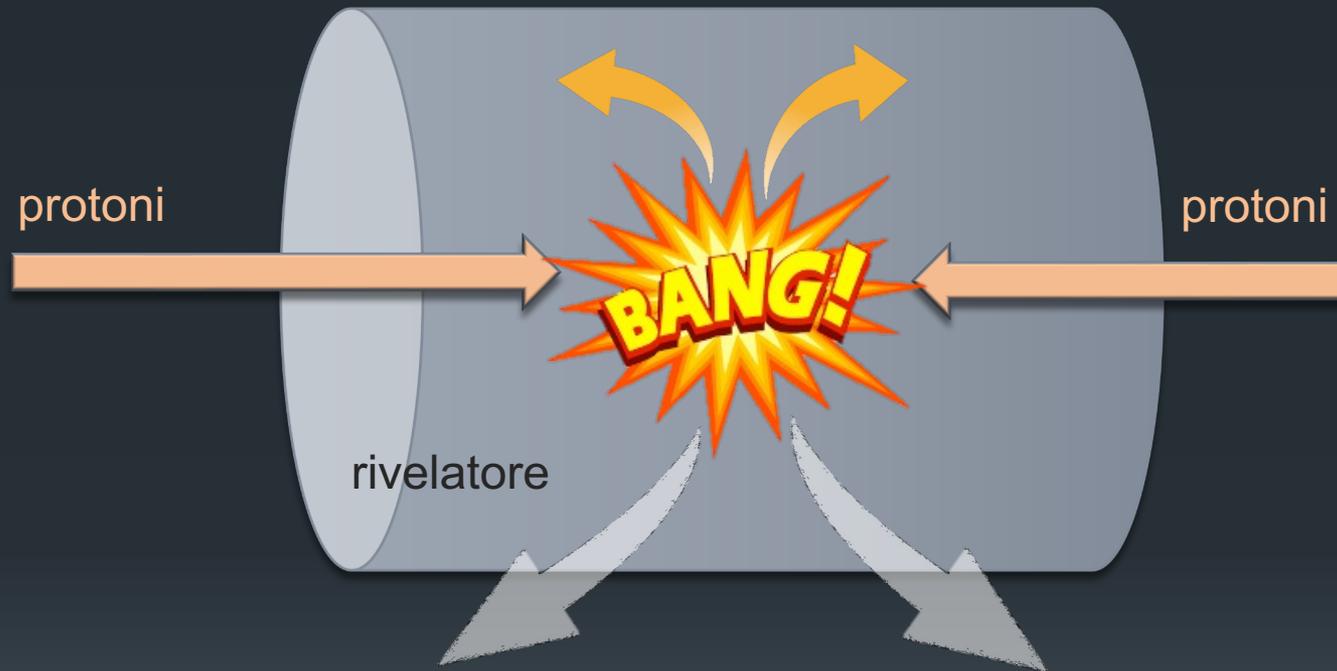
30

L'insieme di tutto questo genera ovviamente un vero tsunami di dati che devono essere estratti dal rivelatore e spediti ai computer dedicati a registrare le interazioni

Esperimento ATLAS

# Come si rivelano le WIMPs ?

**Particelle note, es: fotoni, elettroni, adroni**

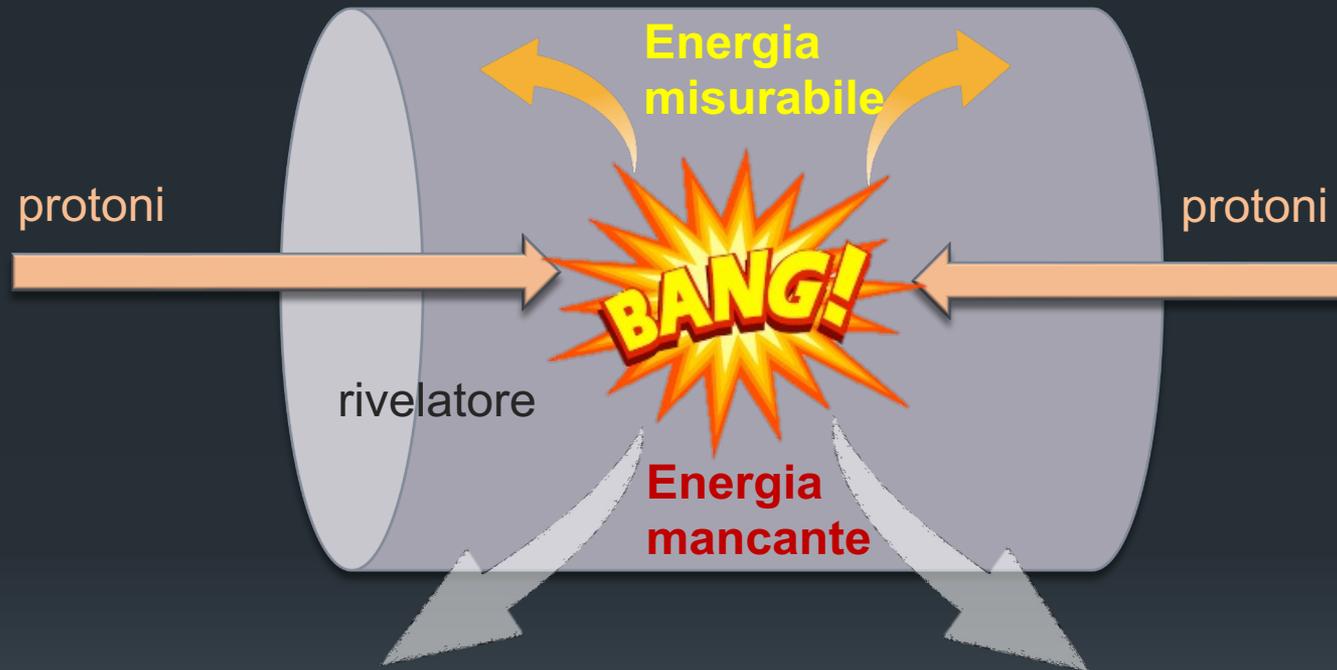


**Particelle di materia oscura, WIMPs  
Non lasciano nessun segnale nel rivelatore!!**

# Come si rivelano le WIMPs ?

32

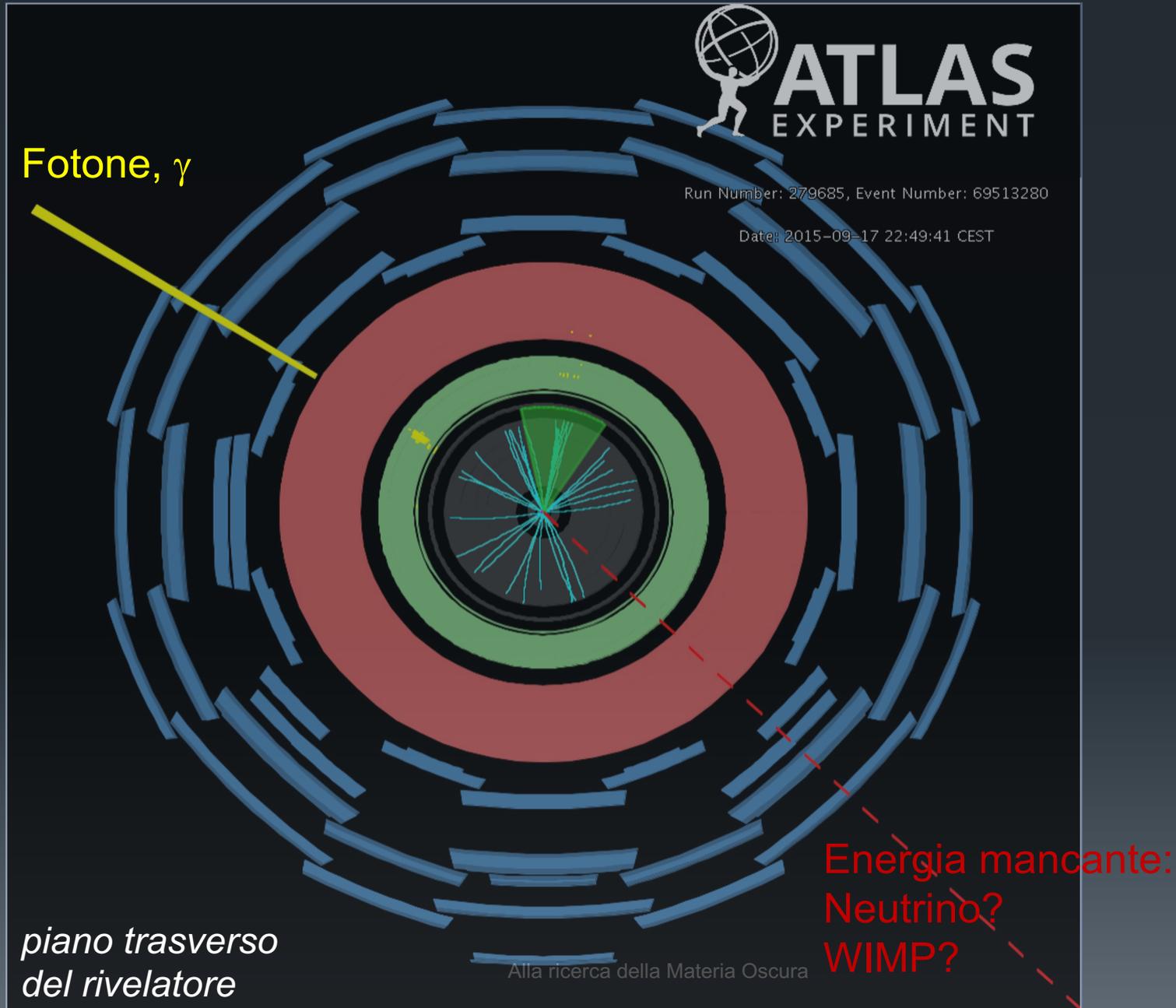
**Particelle note, es: fotoni, elettroni, adroni**



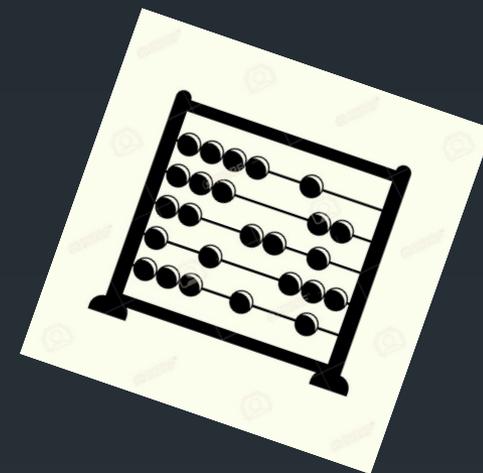
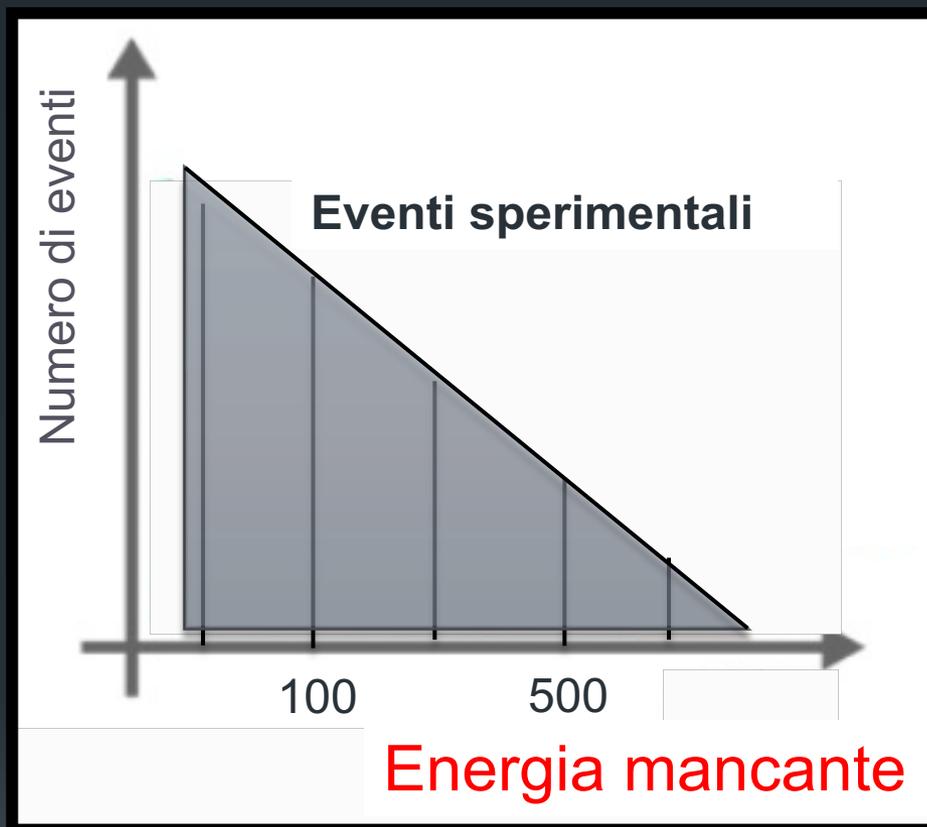
**Particelle di materia oscura, WIMPs**

Energia iniziale dei protoni = Energia finale delle particelle prodotte  
La variabile fisica che si studia e' **l'energia mancante (missing energy)**

# Possibile evento di materia oscura a LHC

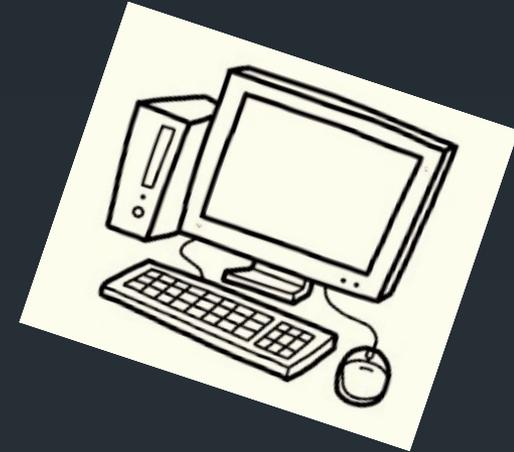
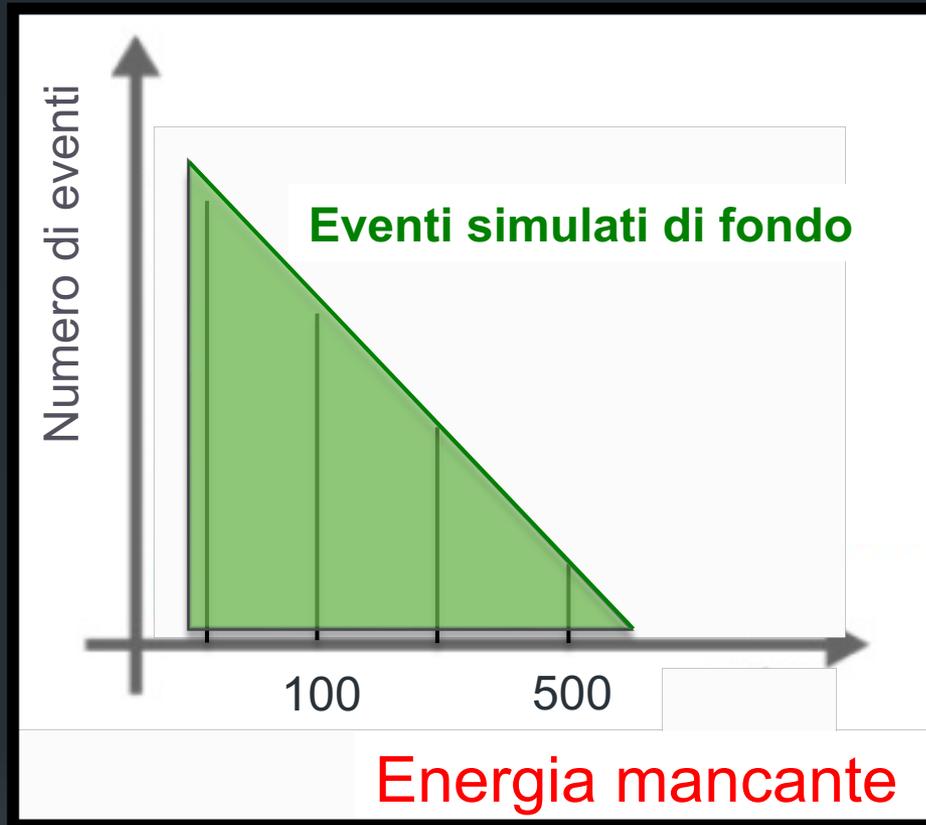


# La strategia di analisi



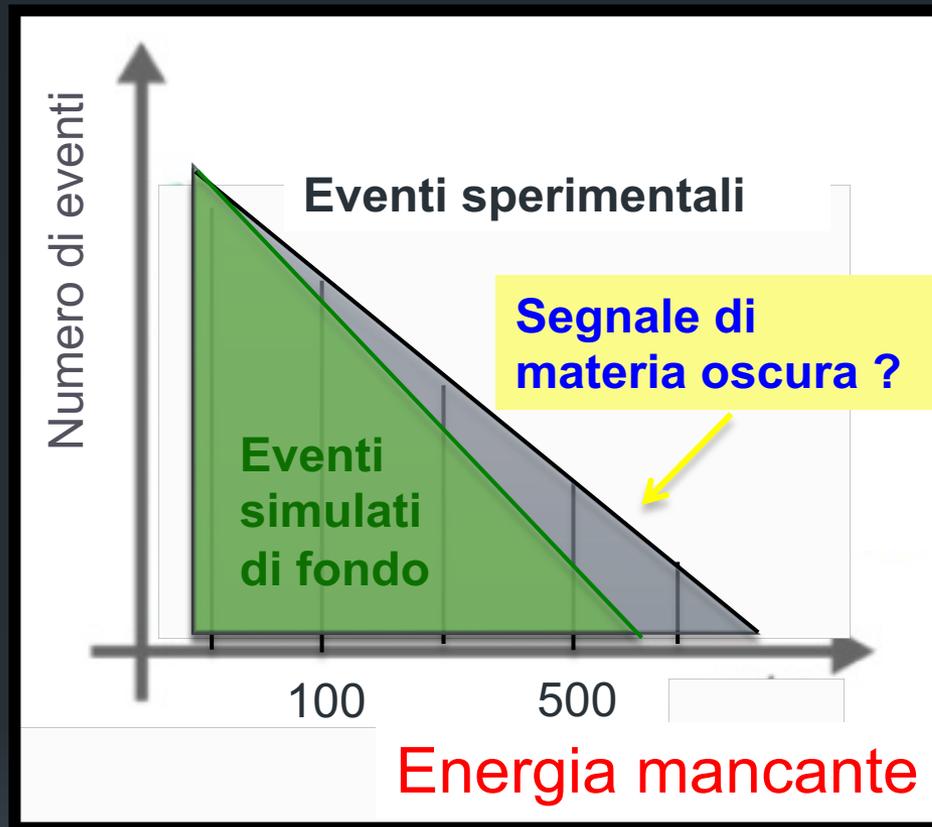
- Si contano gli eventi registrati dal rivelatore con alti valori di energia mancante che caratterizzano le particelle di materia oscura

# La strategia di analisi



- Alcune particelle del Modello Standard possono causare alti valori di energia mancante (es: neutrini) e quindi essere scambiate per WIMPs .
- Dalle simulazioni dettagliate di queste particelle nel rivelatore e' possibile prevedere il numero di eventi di "fondo" previsto.

# La strategia di analisi

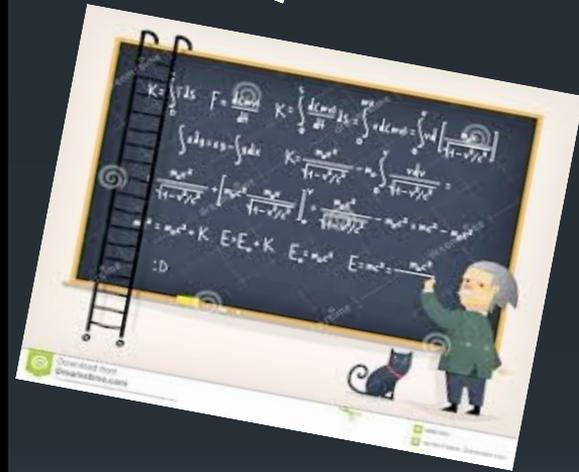
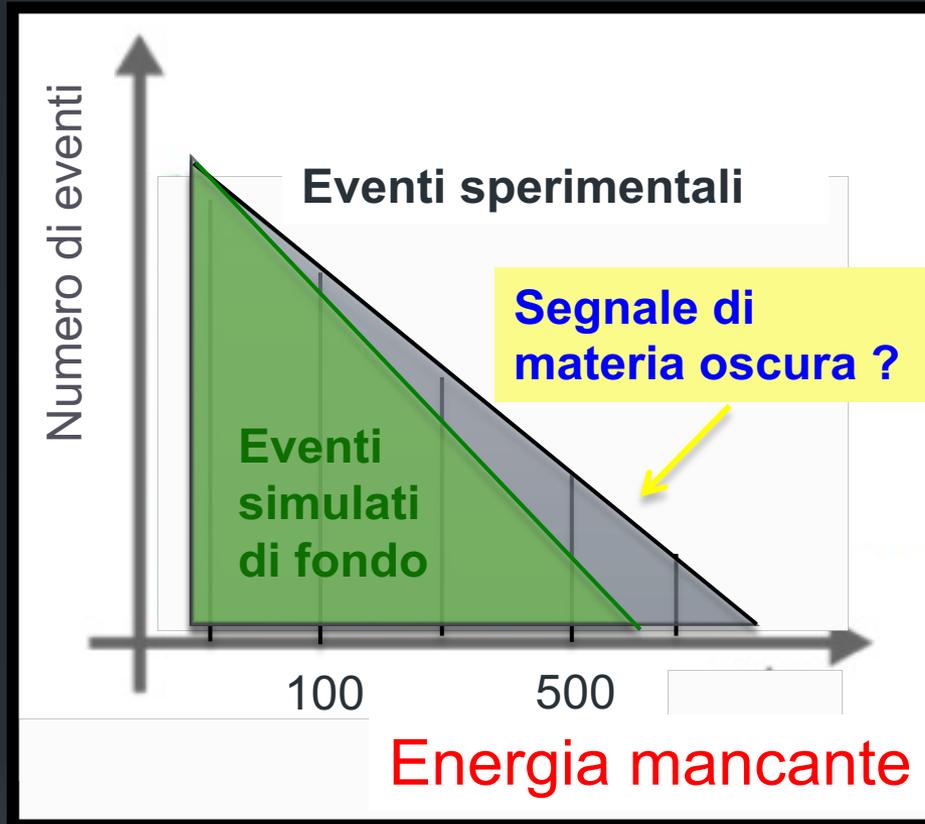


- Si confrontano gli eventi sperimentali con gli eventi di fondo:

➔ se si trova un eccesso di eventi sperimentali rispetto alle simulazioni vuol dire che abbiamo scoperto la materia oscura?

# La strategia di analisi

37



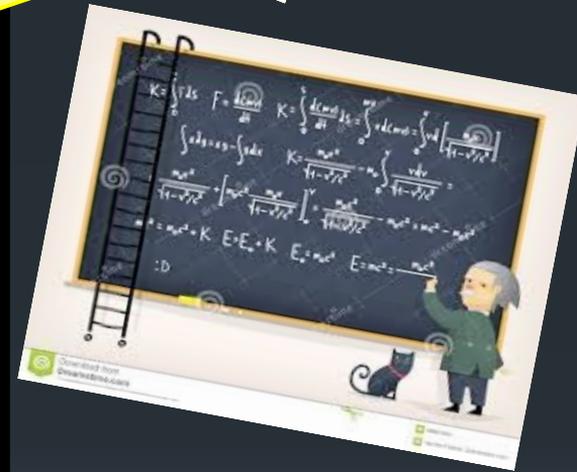
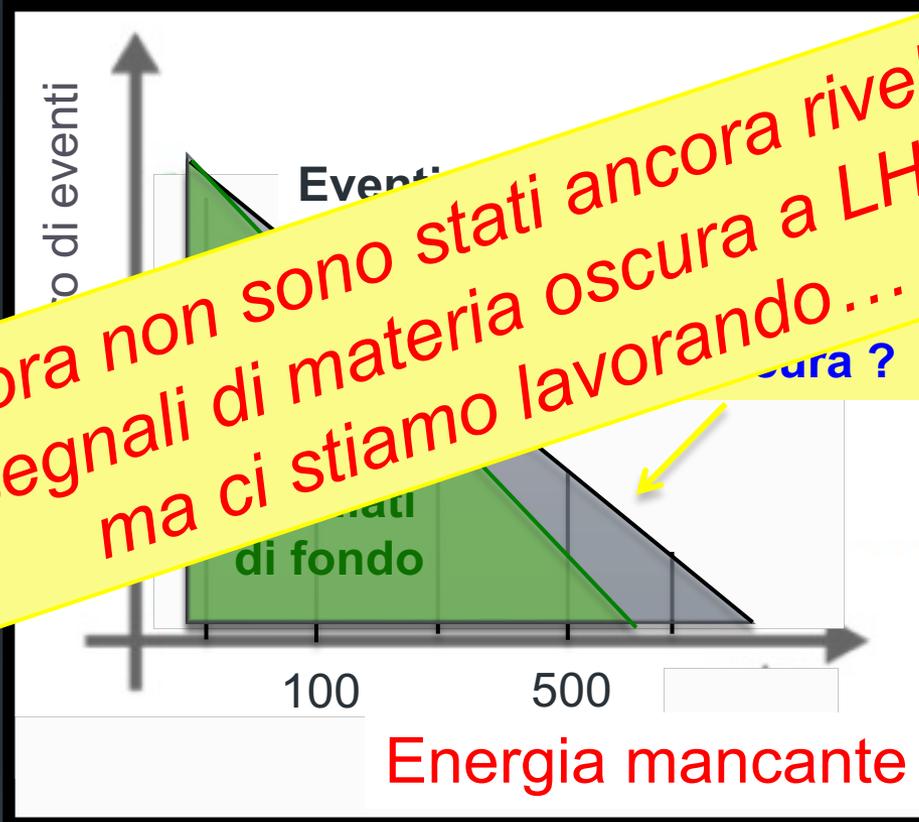
**Per poter affermare di aver fatto una scoperta e' necessario che:**

- Il rapporto tra il numero di eventi sperimentali e quelli di fondo sia alto
- Che tutti i possibili errori di misura (sistematici) siano considerati
- Che almeno un altro esperimento abbia un segnale simili

# La strategia di analisi

38

Finora non sono stati ancora rivelati  
segnali di materia oscura a LHC  
ma ci stiamo lavorando...



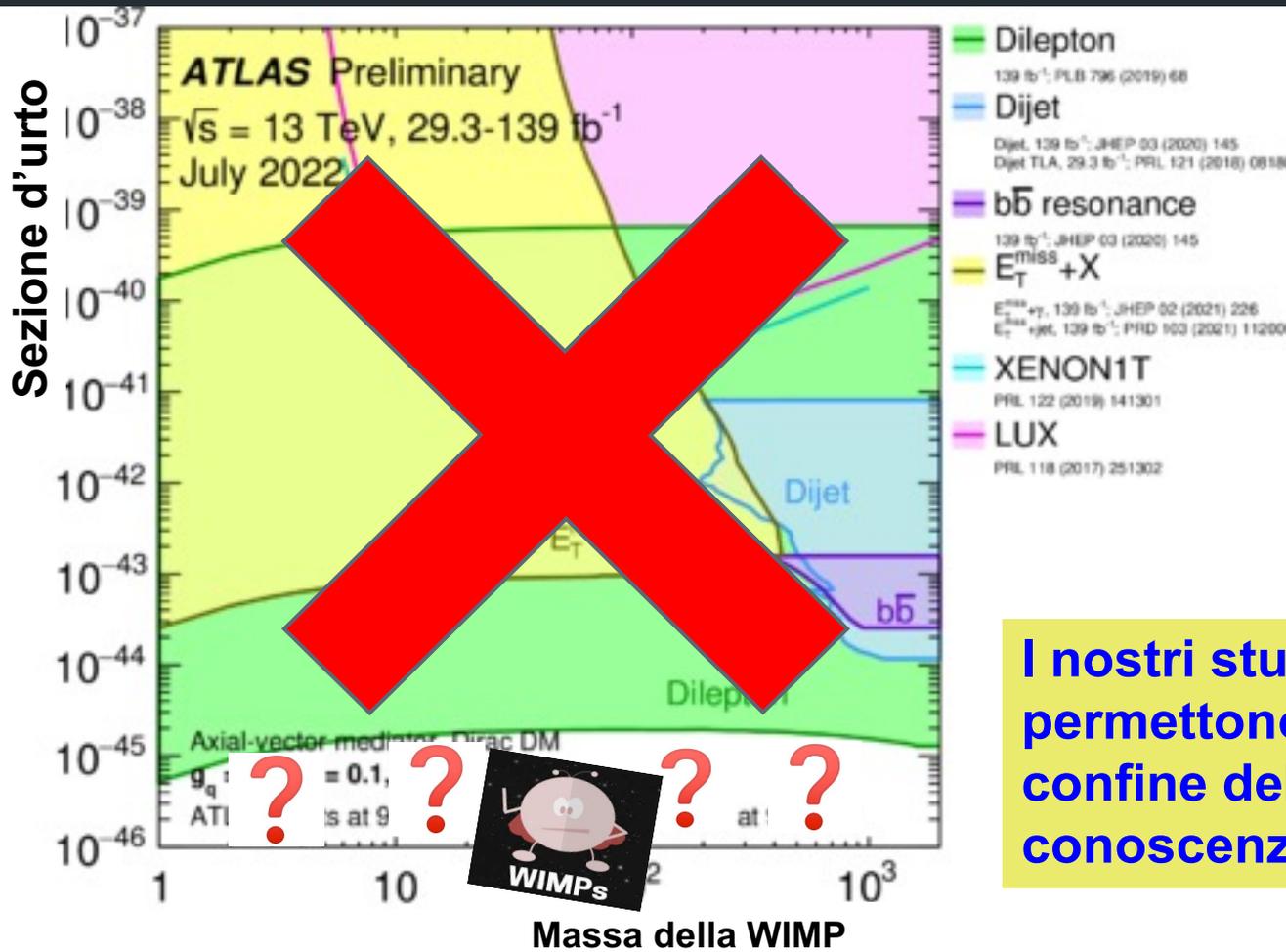
Per poter affermare di aver fatto una scoperta e' necessario che:

- Il rapporto tra il numero di eventi sperimentali e quelli di fondo sia alto
- Che tutti i possibili errori di misura (sistematici) siano considerati
- Che almeno un altro esperimento abbia un segnale simili

# Risultati fino ad oggi...

hanno permesso di mettere dei limiti sulla probabilita' (sezione d'urto) di rivelare la particella WIMP

Il grafico dice che la probabilita' di produrre una particella WIMP a LHC e' molto piccola, servono ancora piu' dati per completare i nostri studi



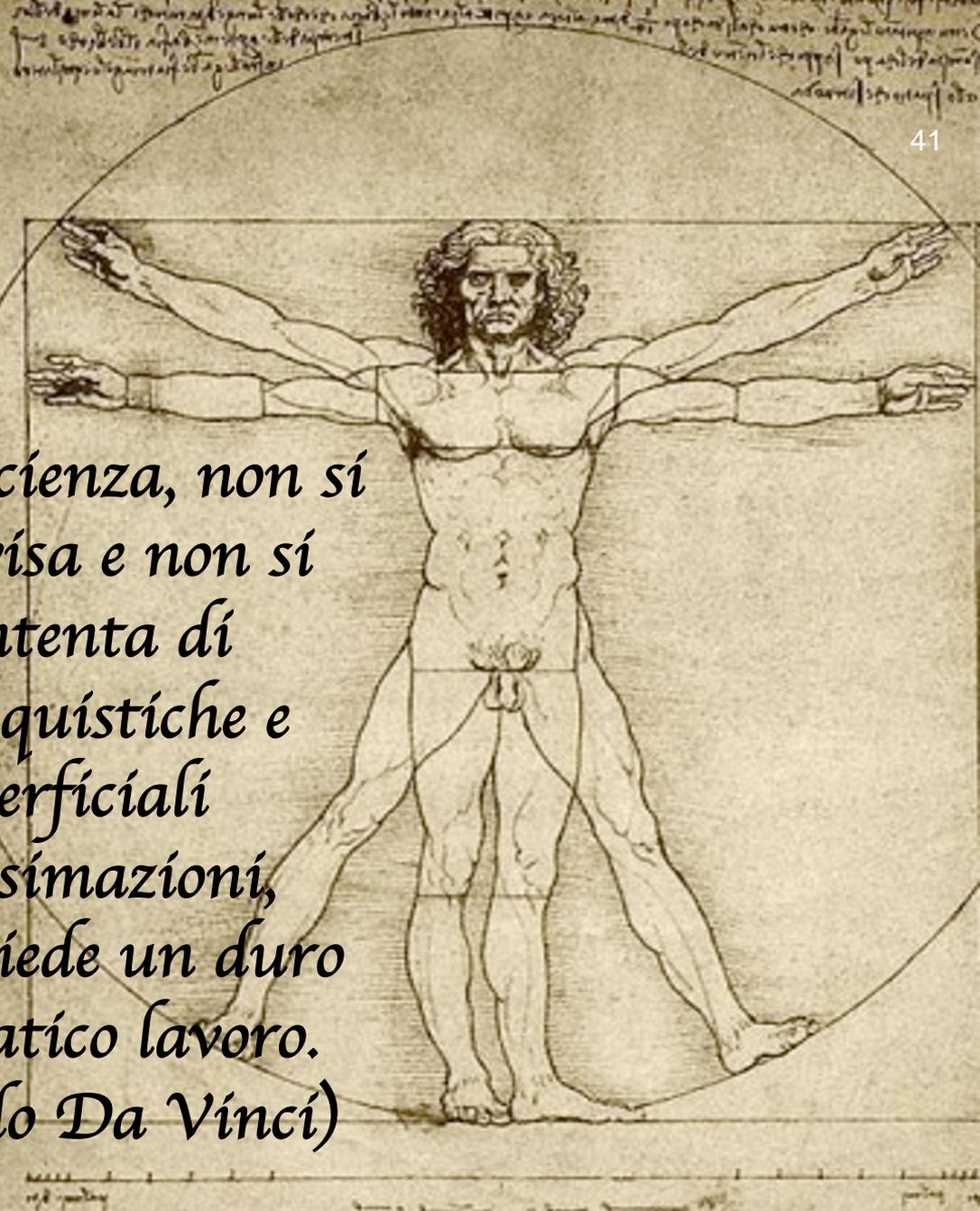
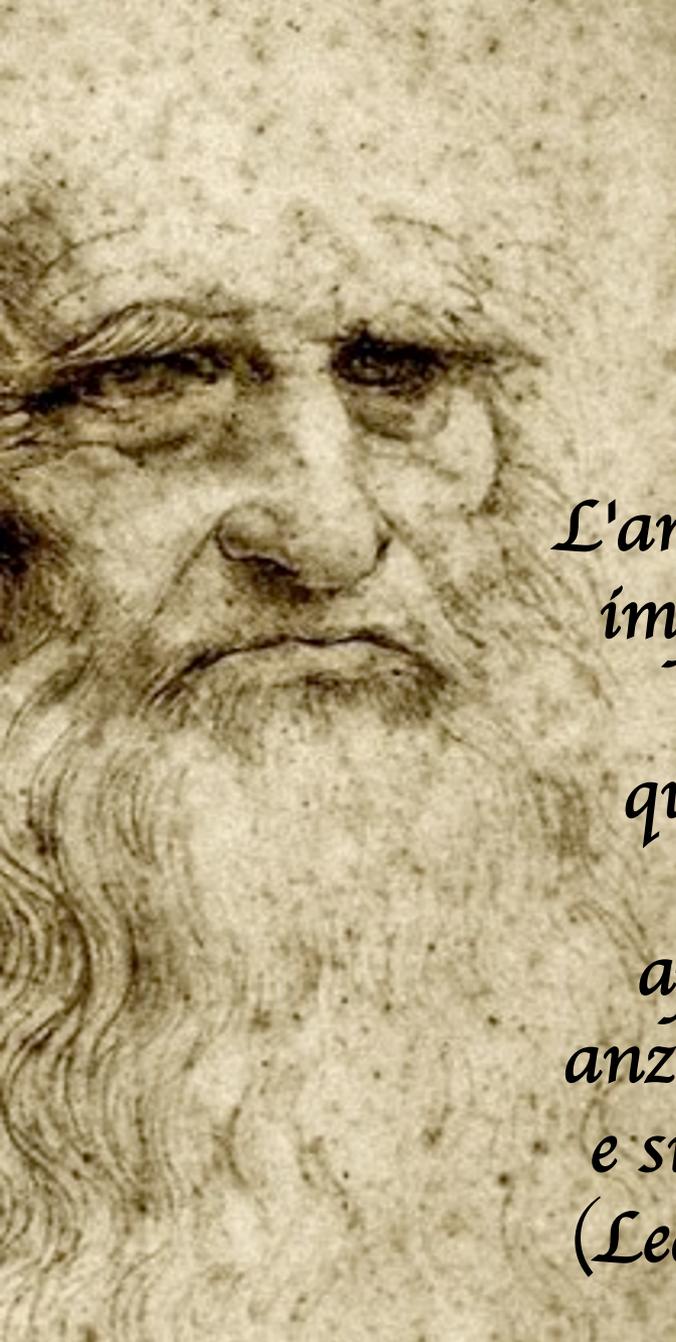
Tutta l'area colorata e' stata esclusa.

Ogni colore corrisponde a una ricerca diversa.

I nostri studi e pubblicazioni permettono di spostare il confine della nostra conoscenza!

# La caccia alla materia oscura e' ancora aperta !

- Esperimenti di osservazione diretta e indiretta sempre più sensibili e di maggiori dimensioni
- LHC inizierà una fase che permetterà di raccogliere un fattore 1000 in più di dati per aumentare le probabilità di scoperta
- Si sta pensando a nuovo acceleratore ancora più potente di LHC: FCC, il Future Circular Collider, un grande collisore di particelle di 100 km di circonferenza che dovrebbe raggiungere un'energia quasi 10 volte superiore all'energia attuale di LHC.



*L'arte è scienza, non si improvvisa e non si accontenta di qualunque e superficiali approssimazioni, anzi richiede un duro e sistematico lavoro.  
(Leonardo Da Vinci)*