

# Dove siamo con la ricerca sulla materia oscura?

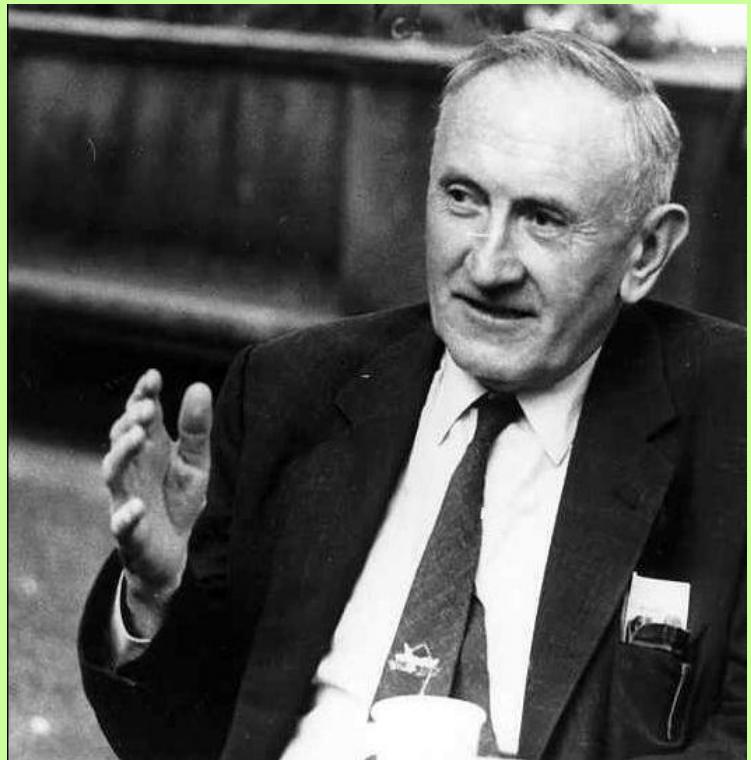
Seminari di Fisica

Dipartimento di Fisica  
dell'Università' di Torino  
26 gennaio 2016

Alessandro Bottino

- ★ Evidenze osservative di presenza di materia oscura nell'Universo
- ★ Come può essersi generata la materia oscura ?
- ★ Come misurare le particelle oscure ?
- ★ Produzione di particelle oscure agli acceleratori ?

# Le osservazioni astronomiche della materia oscura



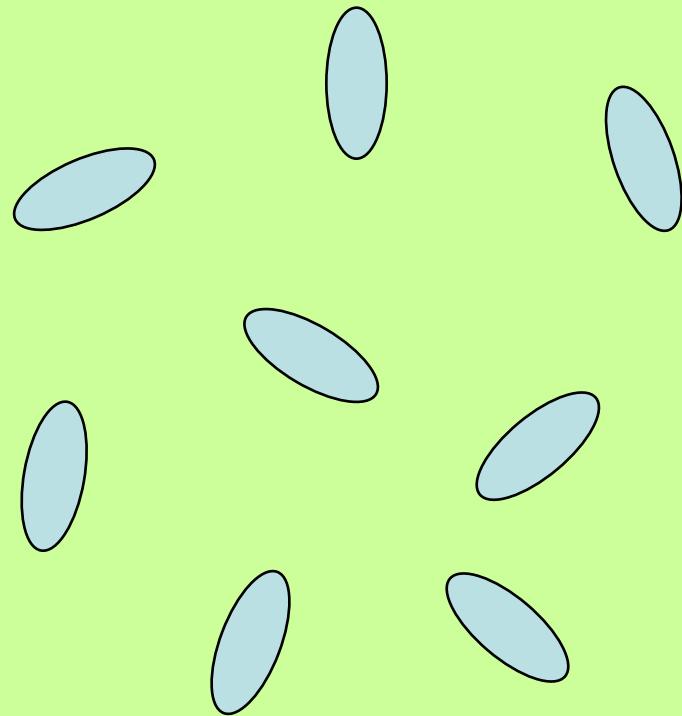
Fritz Zwicky



## Ammasso galattico COMA



Ammasso di galassie



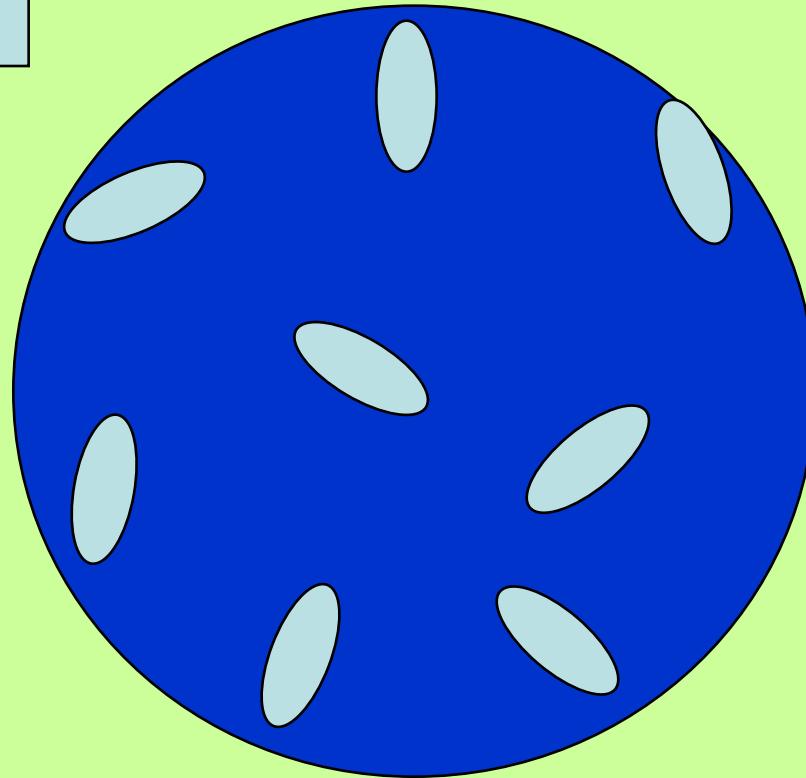
La massa visibile è **insufficiente** a spiegare le velocità osservate

distribuzione di velocita' delle galassie → massa totale dell'ammasso - massa visibile

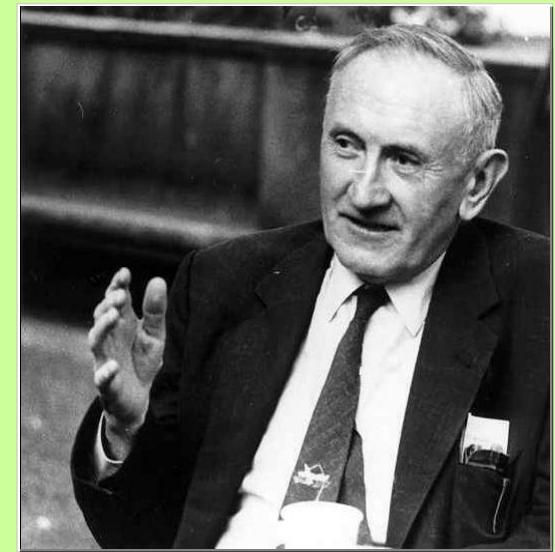
massa associata alla materia oscura

massa mancante

Ammasso di galassie



La massa visibile è **insufficiente** a spiegare le velocità osservate



Fritz Zwicky, 1933

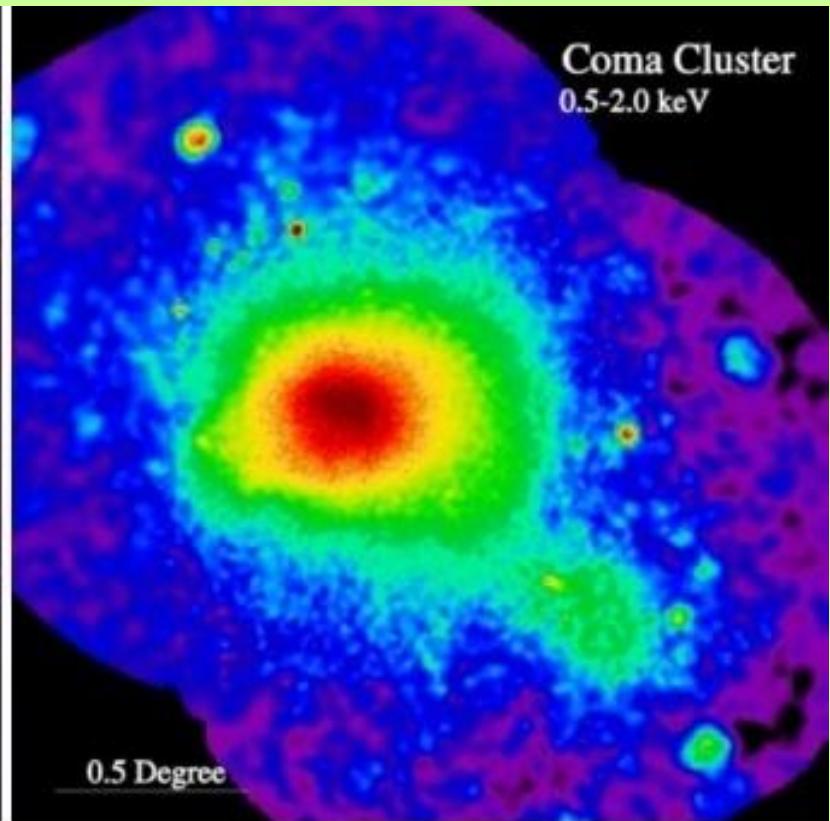
**deve esistere della massa  
dovuta a materia oscura**

## Ammasso Coma

immagine nell'ottico

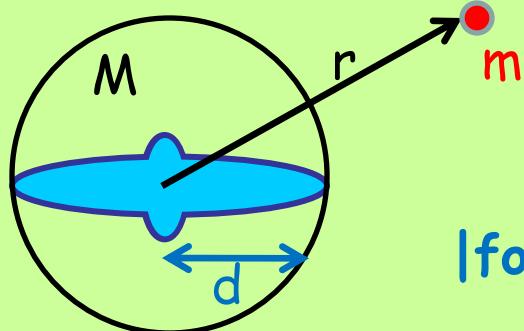


immagine a raggi-X  
satellite ROSAT



senza la presenza della materia, il gas caldo evaporerebbe

Per una stella in moto circolare ad una distanza  $r$  dal centro della galassia si ha:



$$\frac{G m M}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

|forza gravitazionale|                            |forza centrifugale|

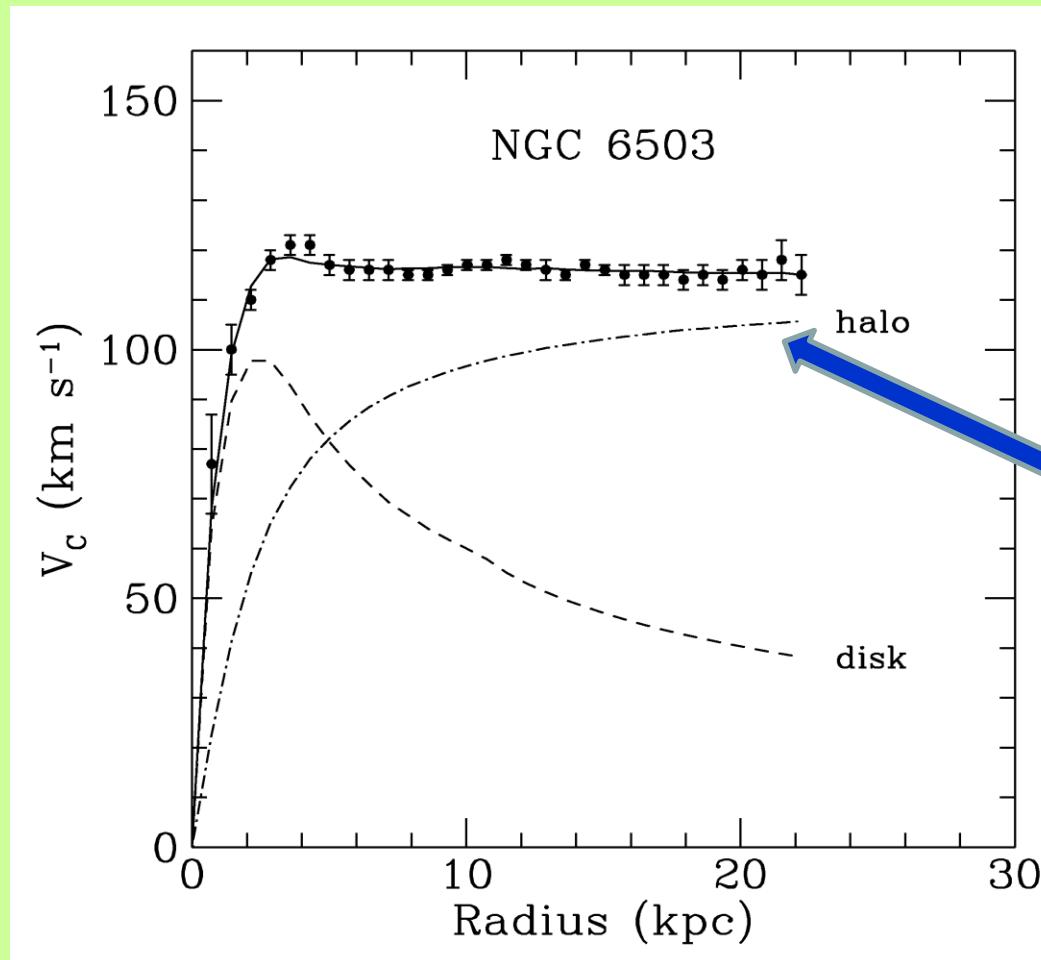
e quindi

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

Per  $r > d$ , la velocità  $v$  dovrebbe decrescere come  $1/\sqrt{r}$

E invece ...

# Curve rotazionali delle galassie

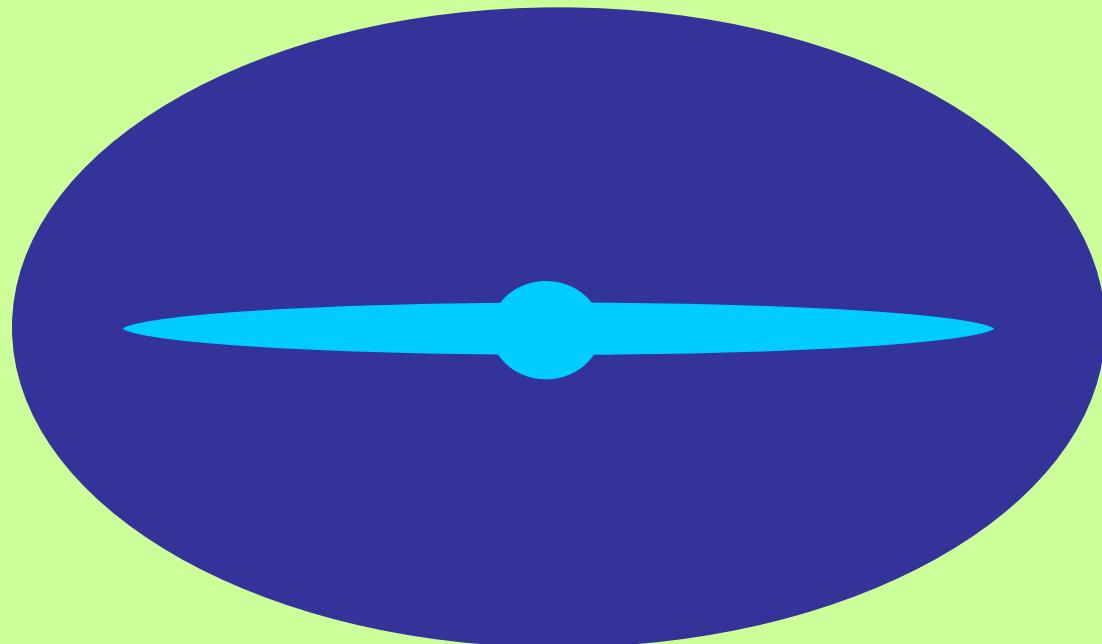


Vera Rubin

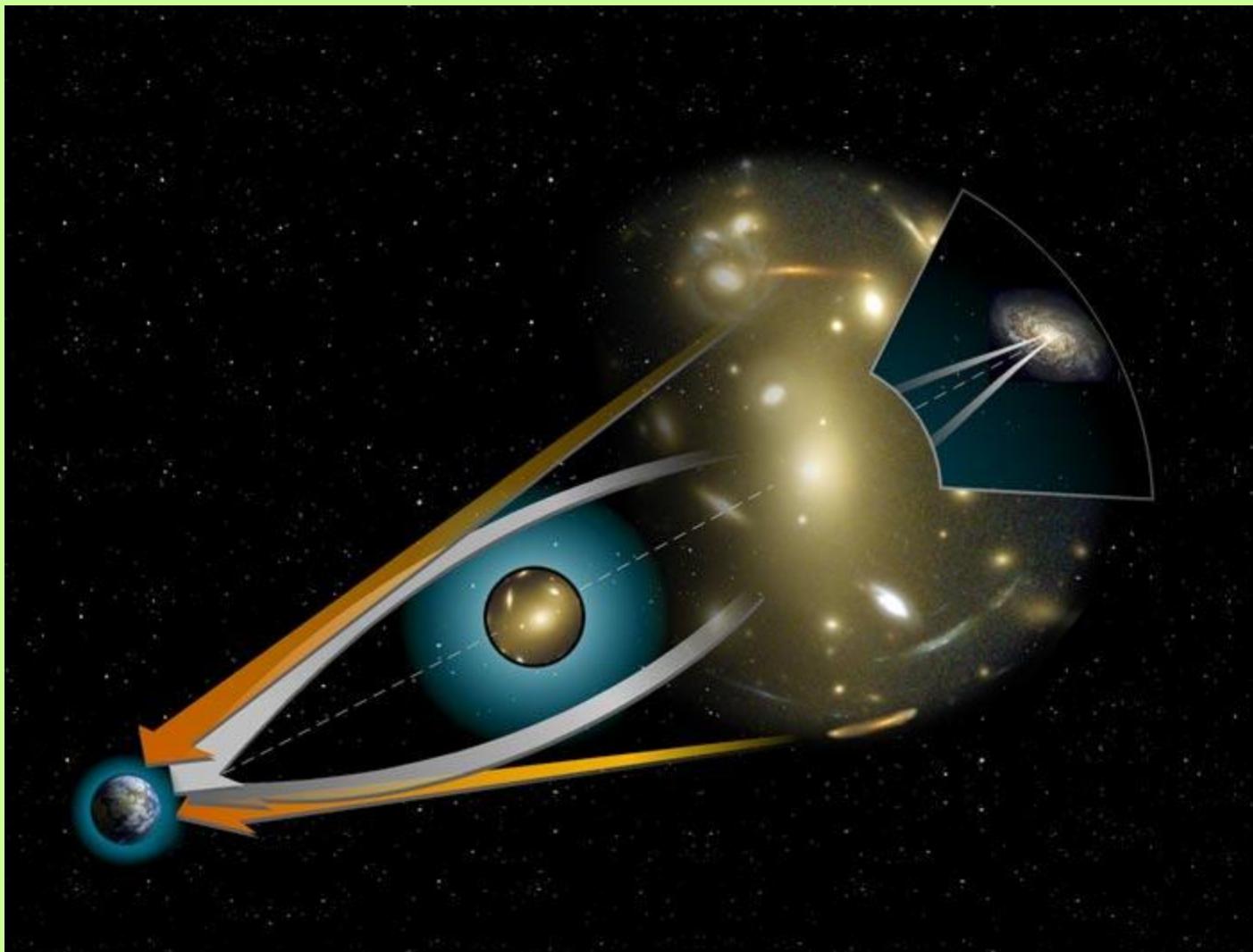
alone di  
materia oscura

Curva rotazionale della Galassia NGC 6503

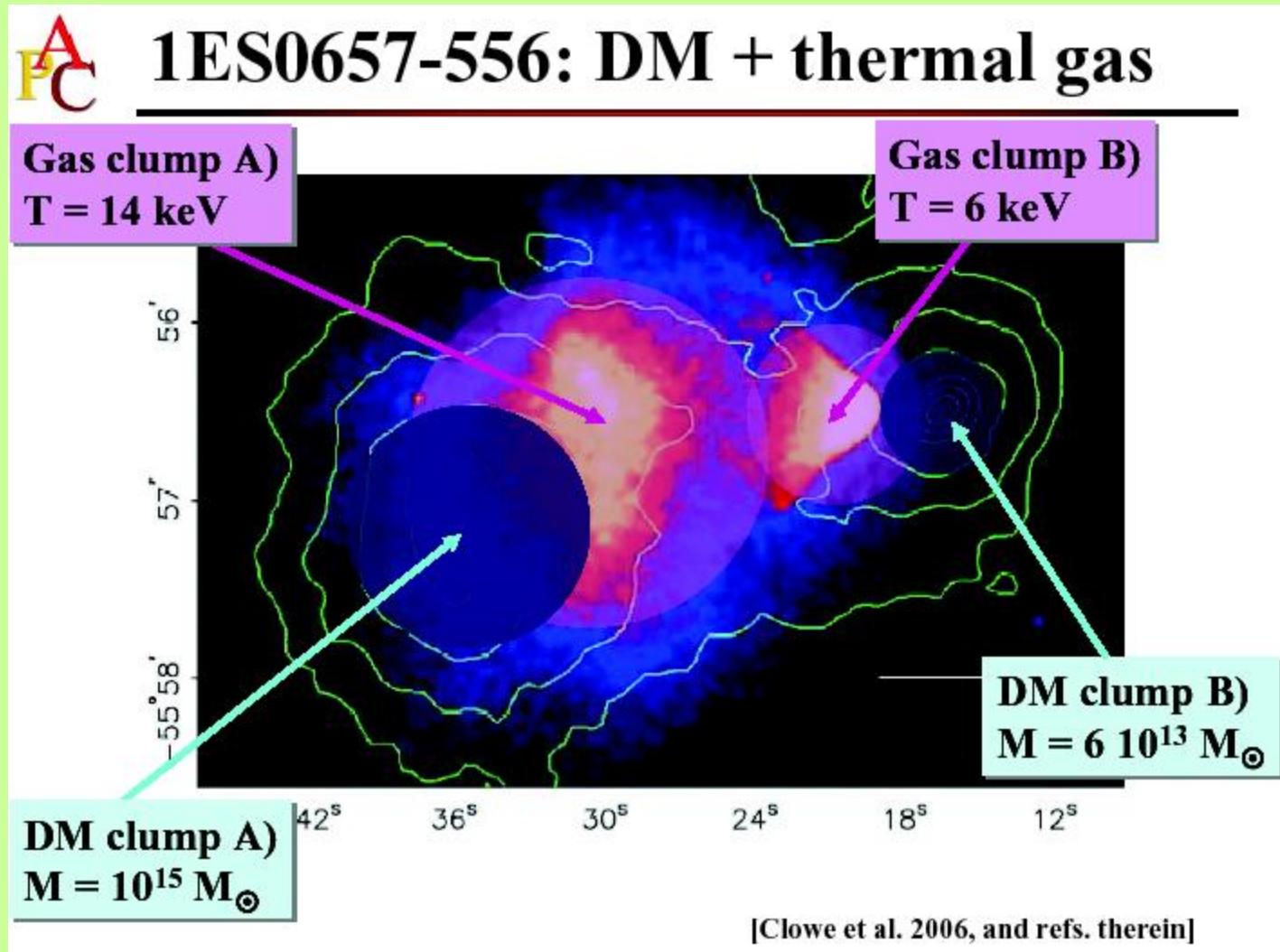
# Alone di materia oscura



# Lente gravitazionale



# Urto di due ammassi galattici avvenuto circa 100 milioni di anni fa. Bullet cluster



distanza tra i due centri di circa 720.000 parsec  
velocita' relativa 4.700 km al secondo

**Come può essersi generata  
la materia oscura ?**

primi istanti dell'Universo

adesso



fondo cosmico di fotoni

fondo cosmico di neutrini

elettroni

neutroni, protoni

atomi

materia oscura

In un plasma che si raffredda le particelle piu' pesanti scompaiono progressivamente, generando particelle piu' leggere

All'epoca attuale le sole particelle del cosiddetto Modello Standard della fisica delle particelle presenti nell'Universo sono:

elettroni, protoni e neutroni (strutture nucleari e atomiche)

fotoni del fondo cosmico a microonde a 2.73 gradi Kelvin

neutrini di 3 tipi in un fondo cosmico a 1.96 gradi Kelvin  
(fondo non ancora misurato)

Per avere materia oscura costituita da particelle, occorre che queste si siano disaccoppiate dal plasma primordiale; queste particelle devono essere stabili e neutre.

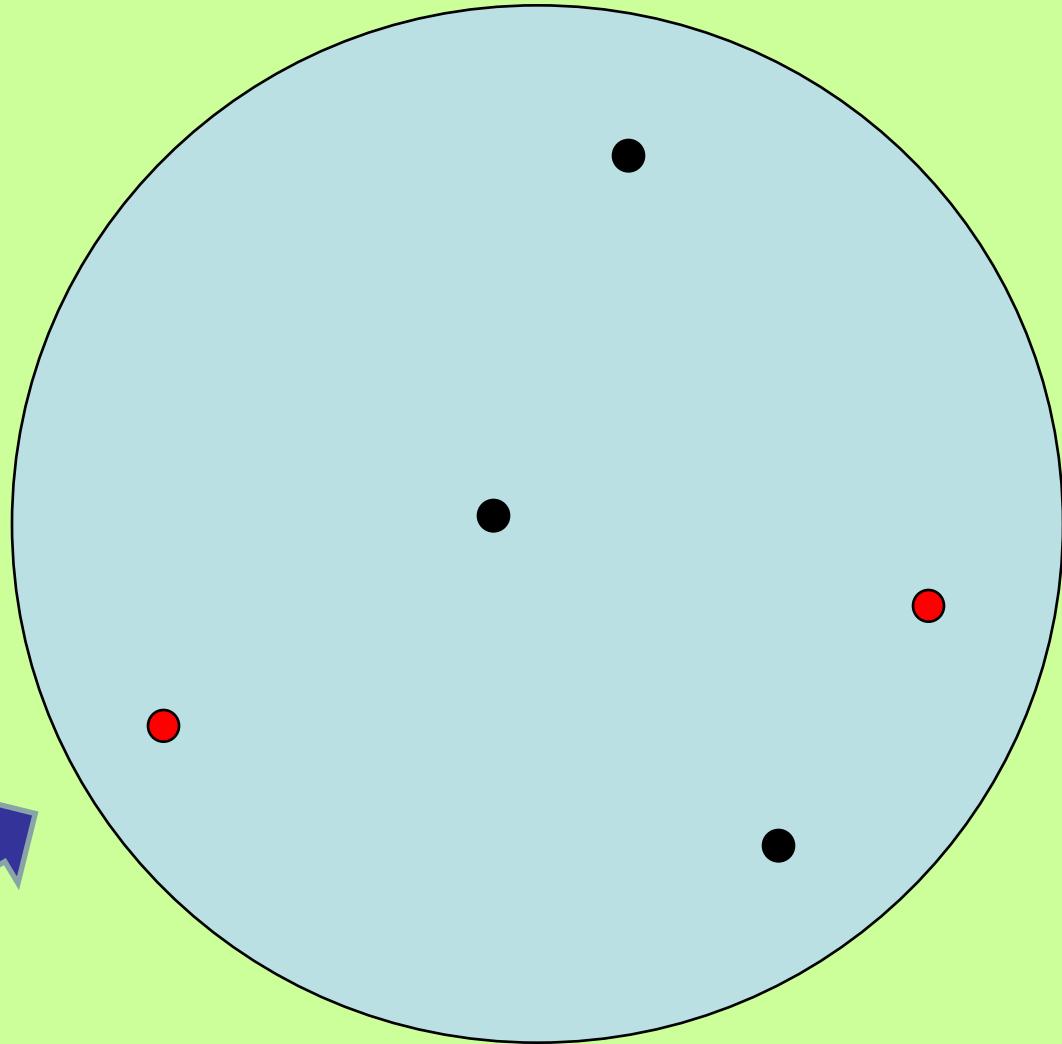
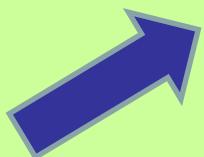
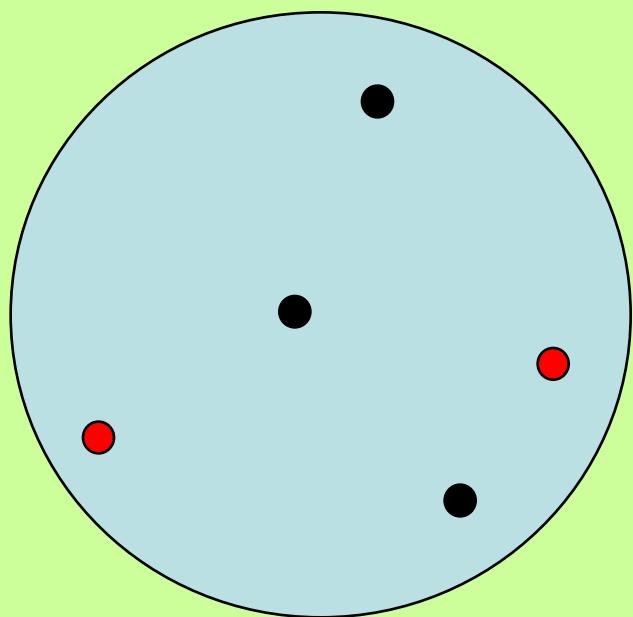
*l'Universo si espande:*

*le distanze relative tra*

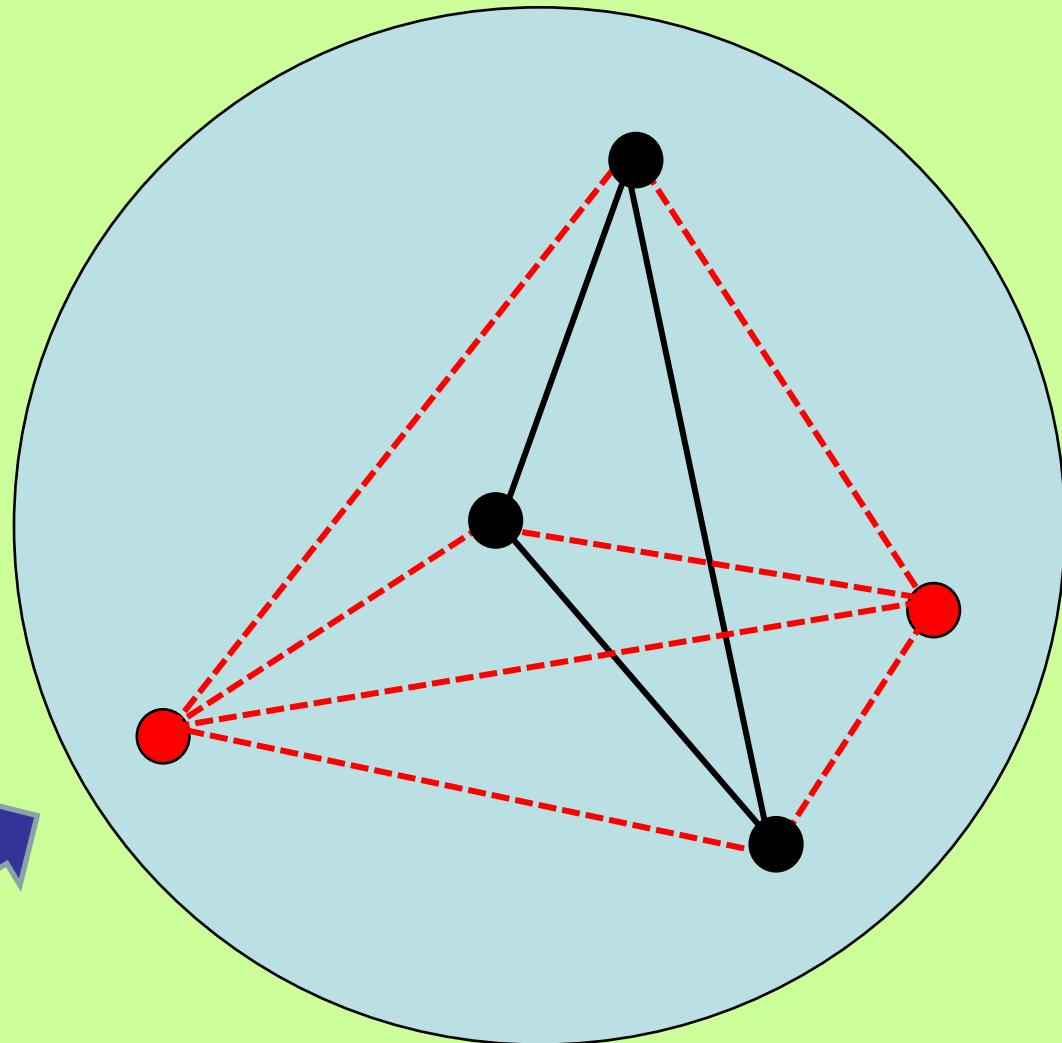
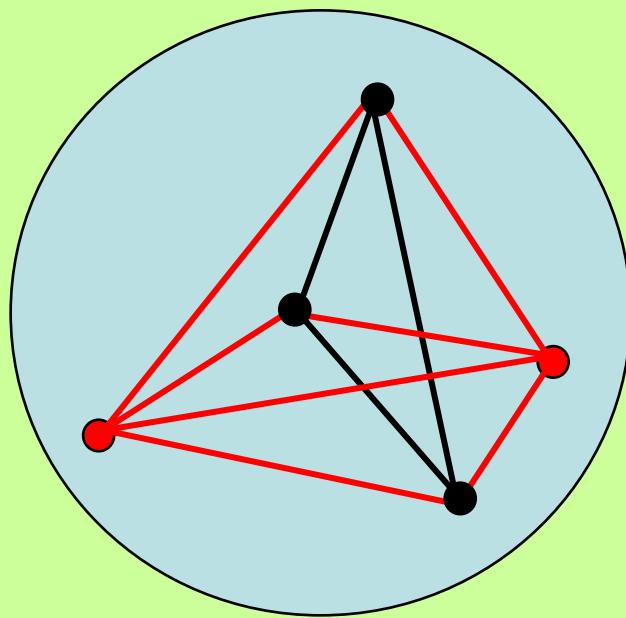
*coppie di particelle*

*aumentano di uno*

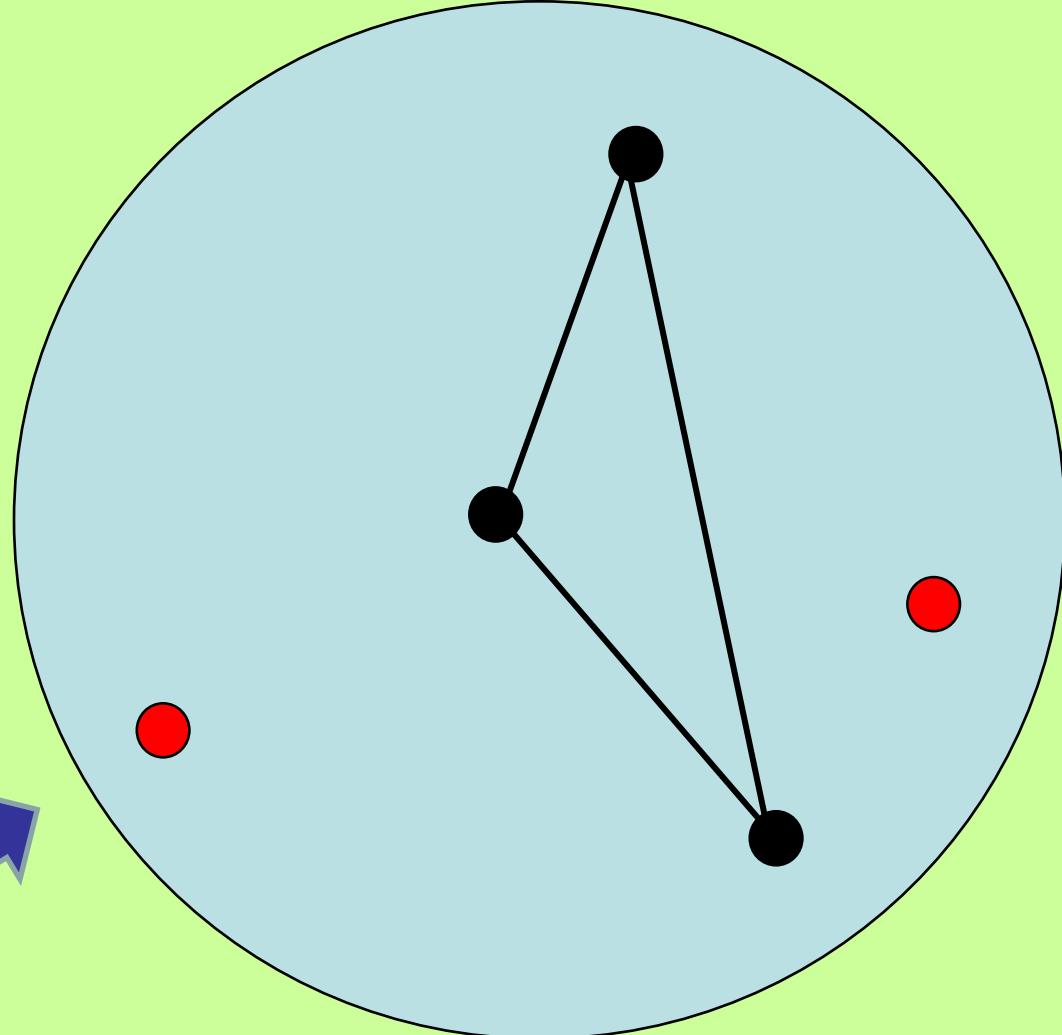
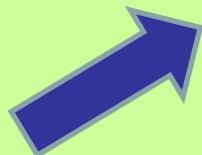
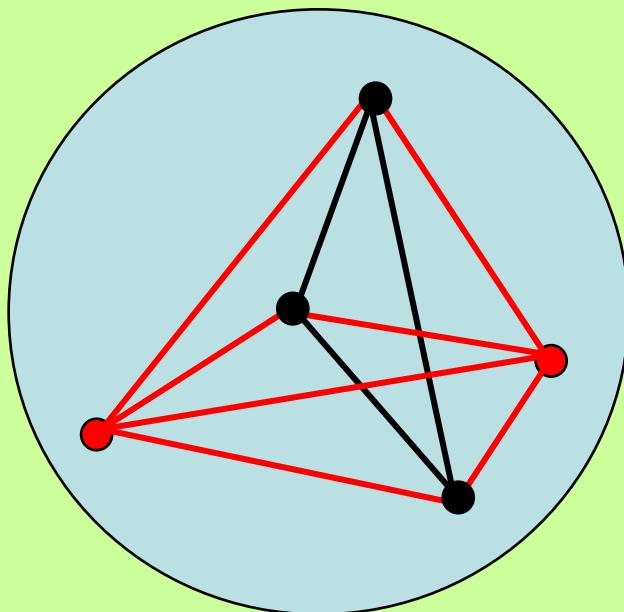
***stesso fattore***



le interazioni si affievoliscono  
nel corso dell'espansione, fino  
a che ...



le interazioni si affievoliscono  
nel corso dell'espansione, fino  
a che alcune particelle si  
**disaccoppiano** dal plasma



le particelle disaccoppiate non partecipano  
piu' all'equilibrio del plasma, pur partecipando  
all'espansione dell'Universo

le particelle disaccoppiate dal plasma interagiscono tra di loro e con le altre particelle solo tramite la forza gravitazionale:

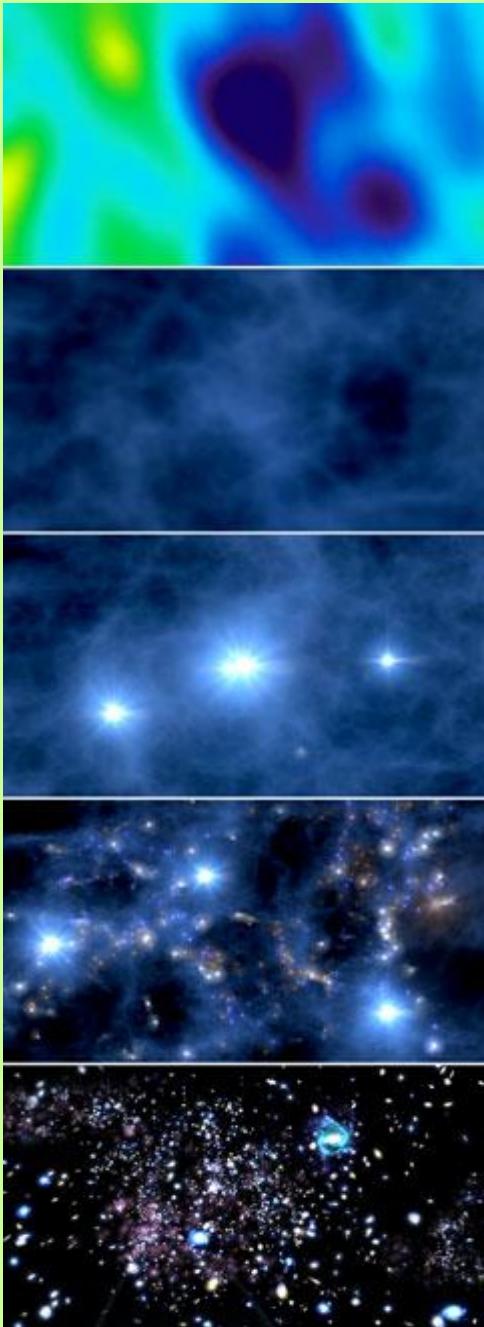
possono quindi costituire la materia oscura

2 categorie:

calde (con velocità prossima alla velocità della luce): neutrini

fredde (con velocità molto minori a quella della luce)

il ruolo delle particelle oscure fredde (cold dark matter) è cruciale per la formazione delle strutture cosmologiche (galassie, ammassi di galassie)



Fluttuazioni primordiali



Crescita delle fluttuazioni per effetto gravitazionale



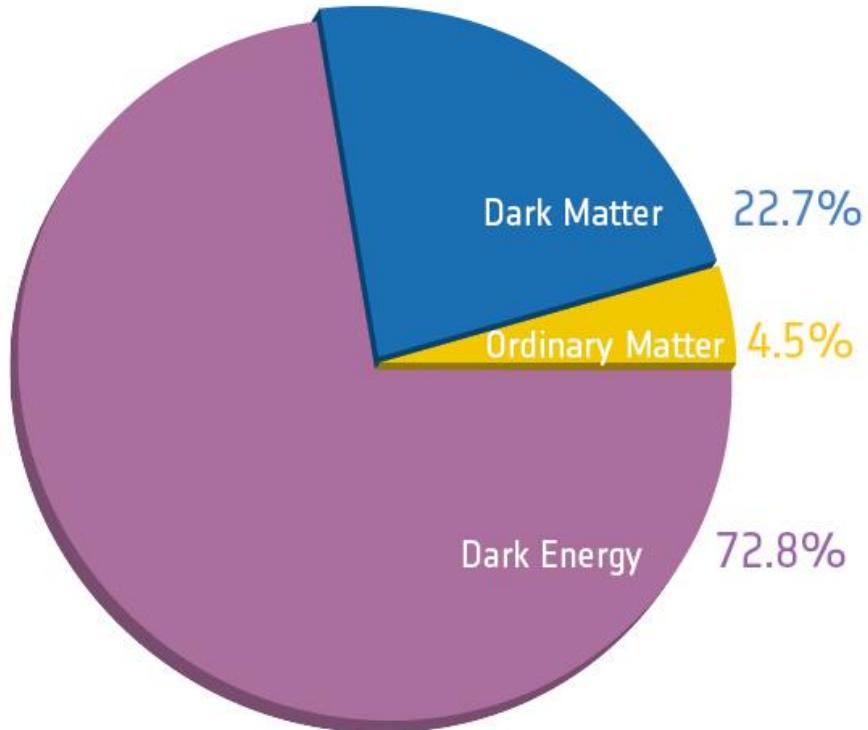
Qui e' fondamentale la  
presenza della materia  
oscura

Formazione di strutture

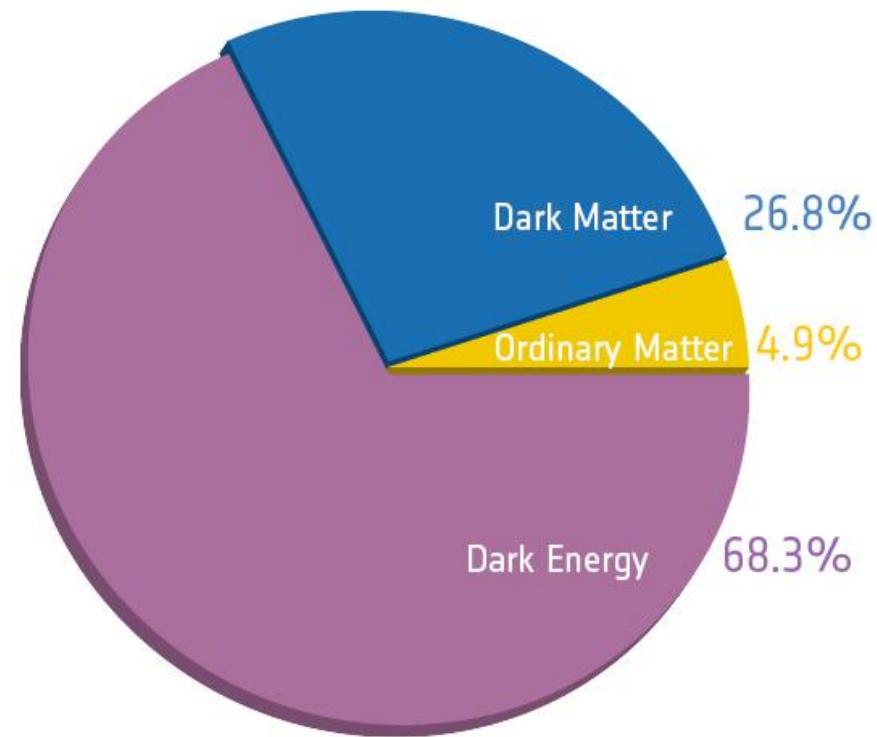
(galassie, ammassi di galassie)

- ★ per capire le proprieta' osservative della materia visibile  
e anche
- ★ per spiegare la formazione delle strutture cosmologiche visibili

*occorre ipotizzare che la maggior parte della materia  
nell'Universo sia oscura*



Before Planck

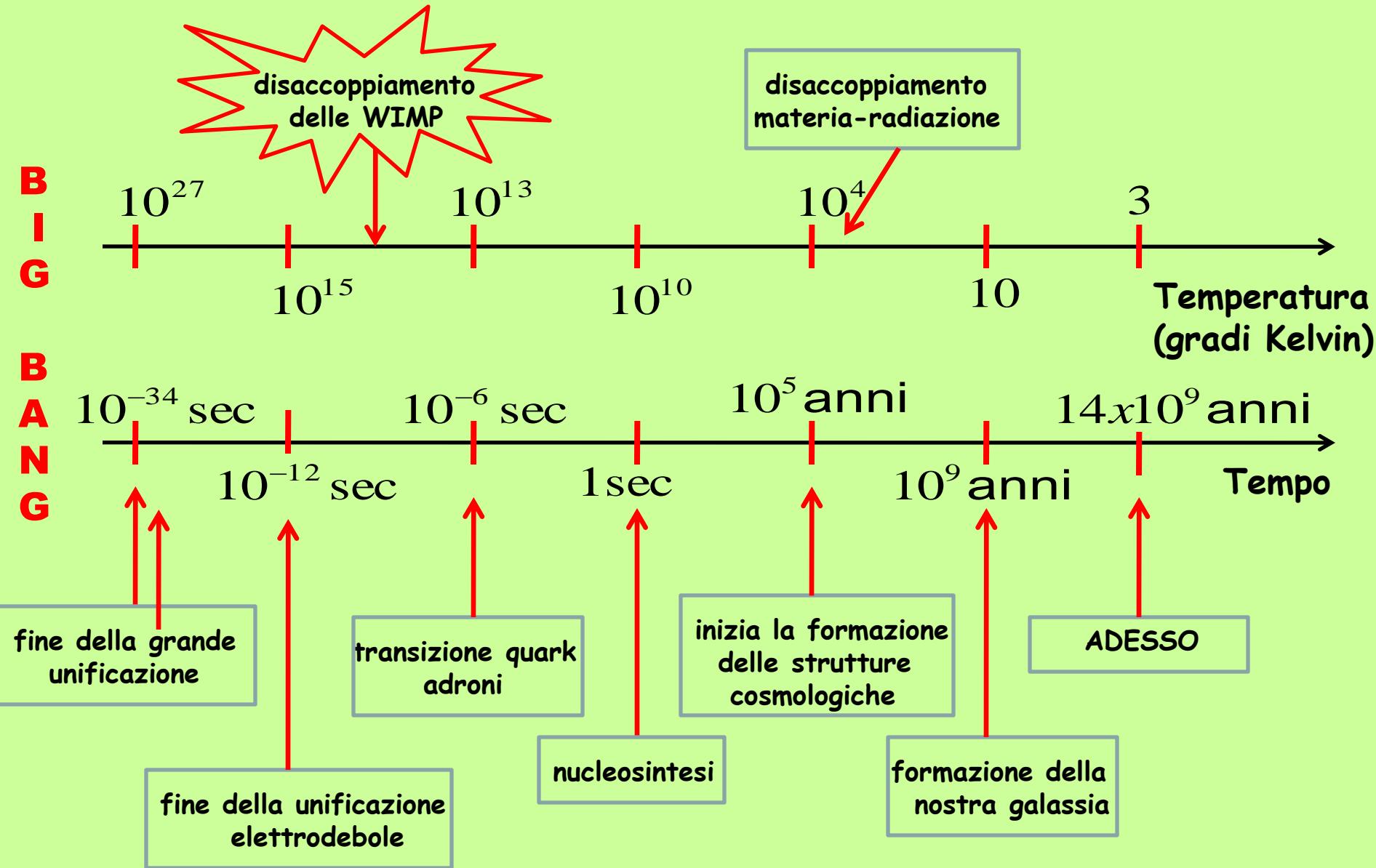


After Planck

Identikit per una particella costituente la materia oscura

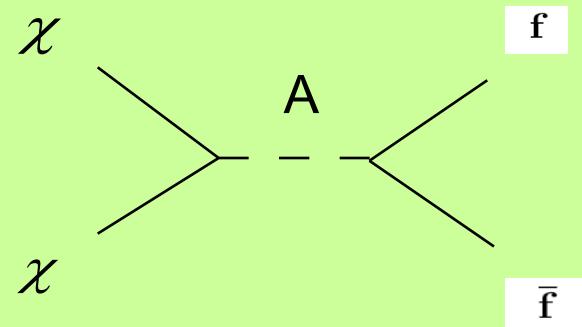
**Weakly Interacting Massive Particle**

**WIMP** = particelle pesanti debolmente interagenti

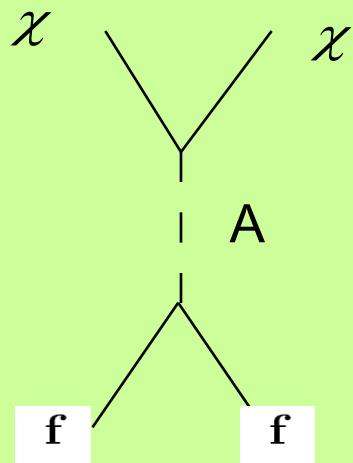


## interazione WIMP - materia ordinaria: un esempio

annichilazione WIMP-WIMP



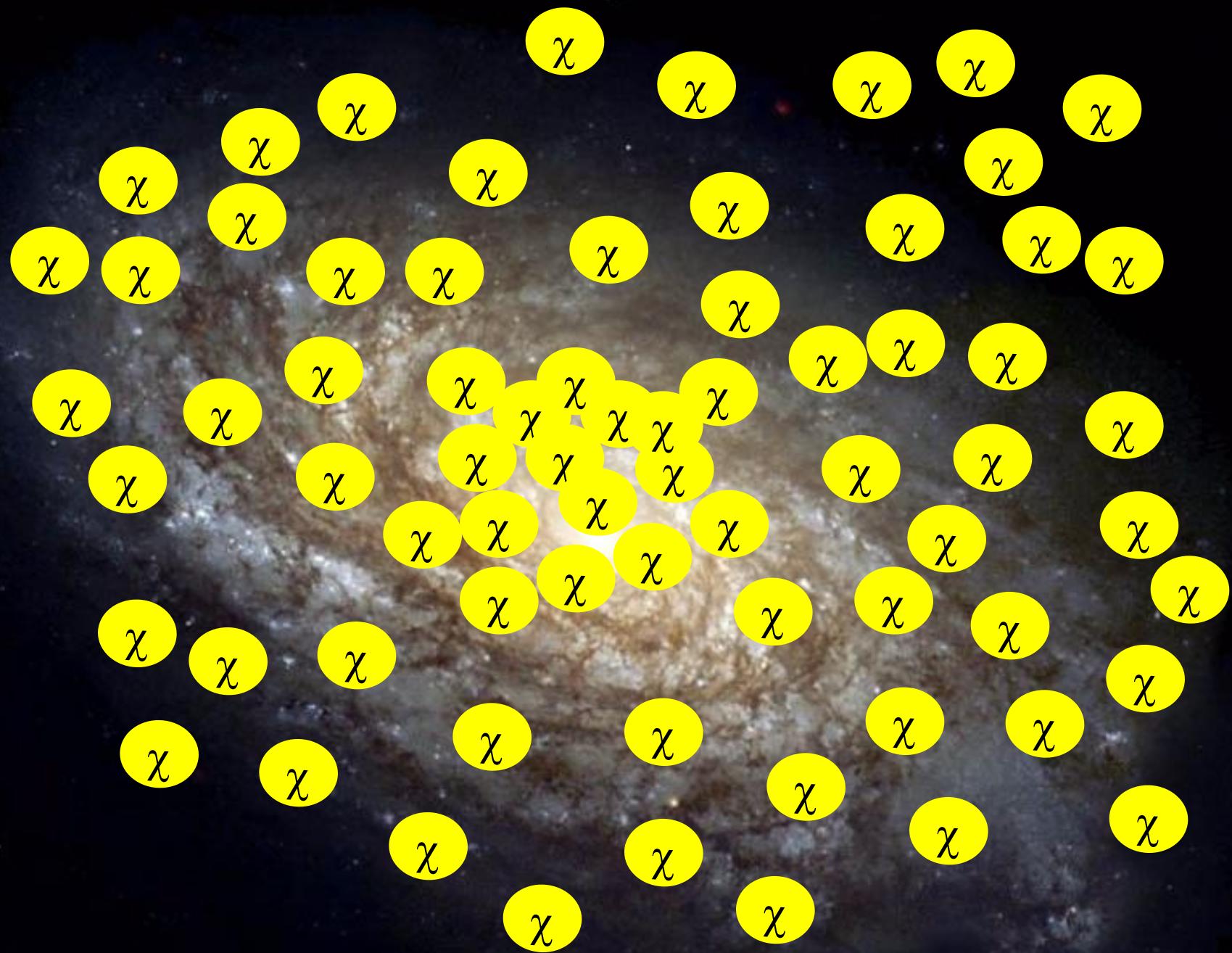
urto WIMP-quark



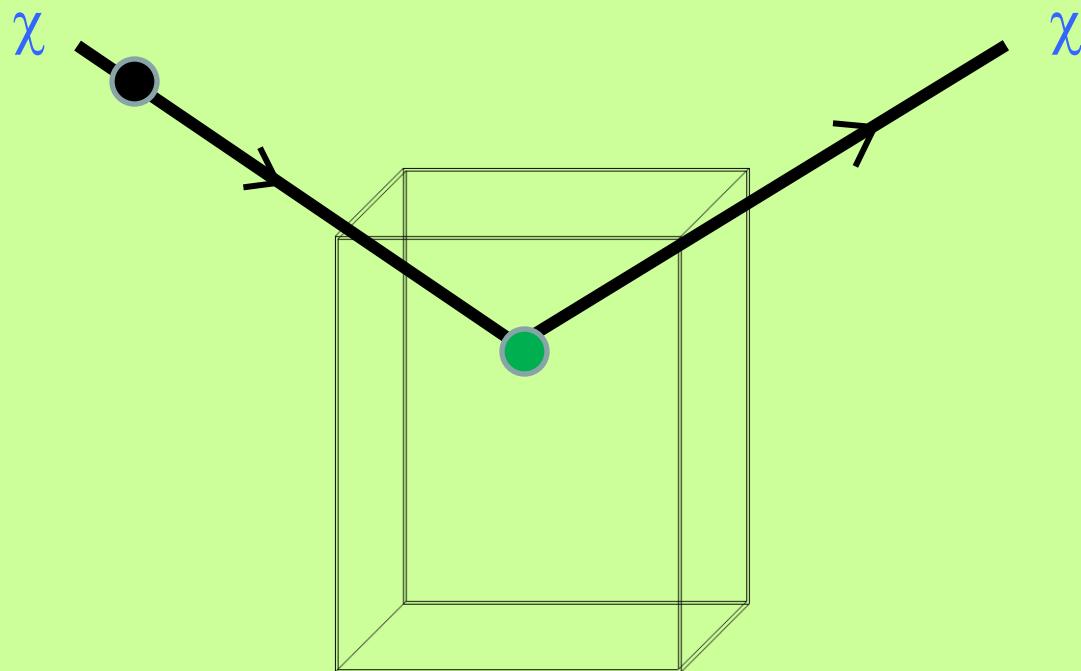
**Come misurare le particelle  
oscure ?**

Galassia a spirale M81 (simile alla nostra galassia)



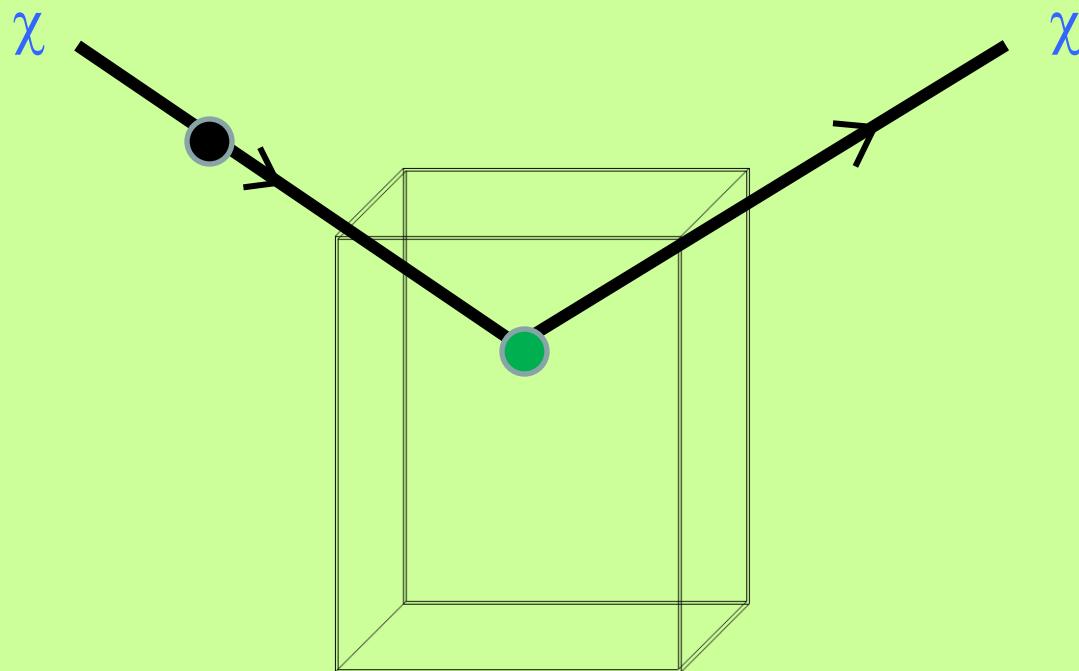


# Misure dirette di WIMP



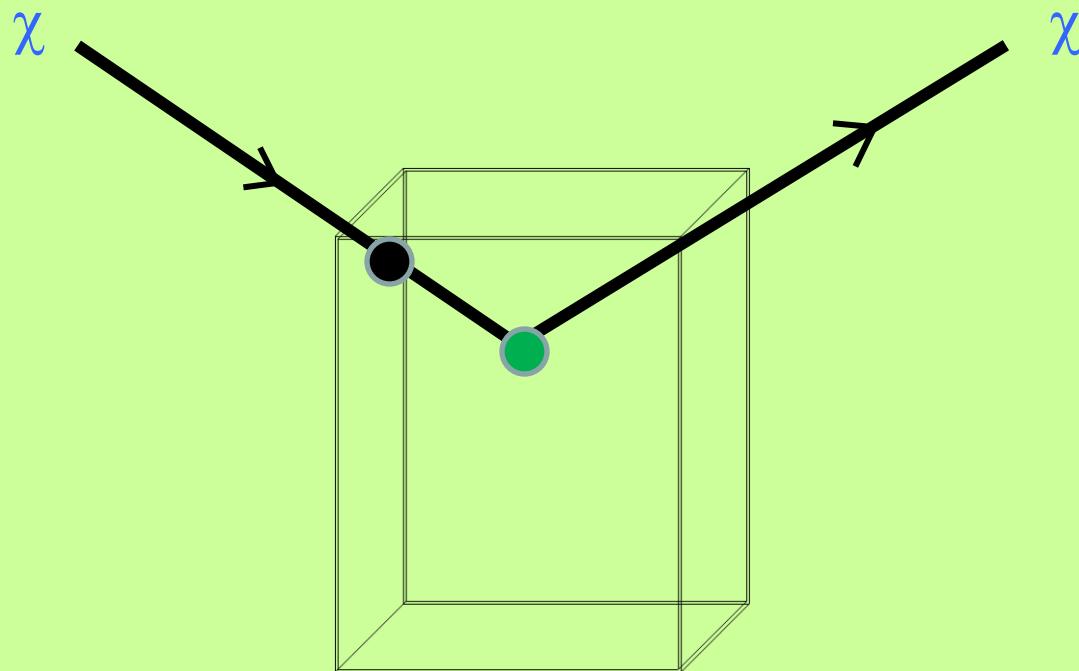
misura di rinculo nucleare

# Misure dirette di WIMP



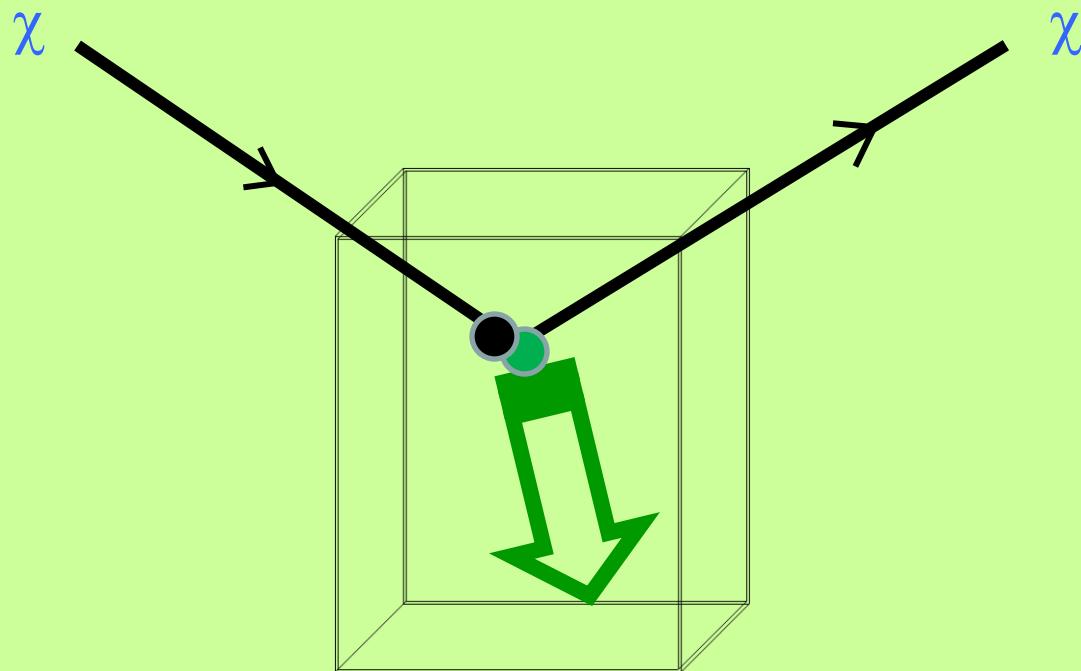
misura di rinculo nucleare

# Misure dirette di WIMP



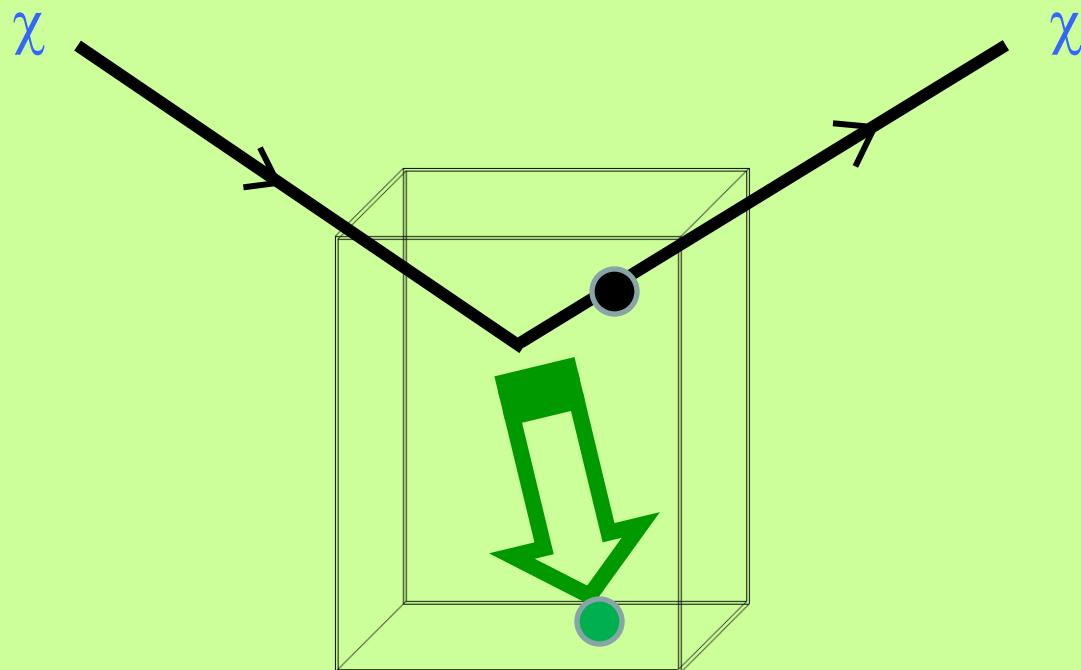
misura di rinculo nucleare

# Misure dirette di WIMP



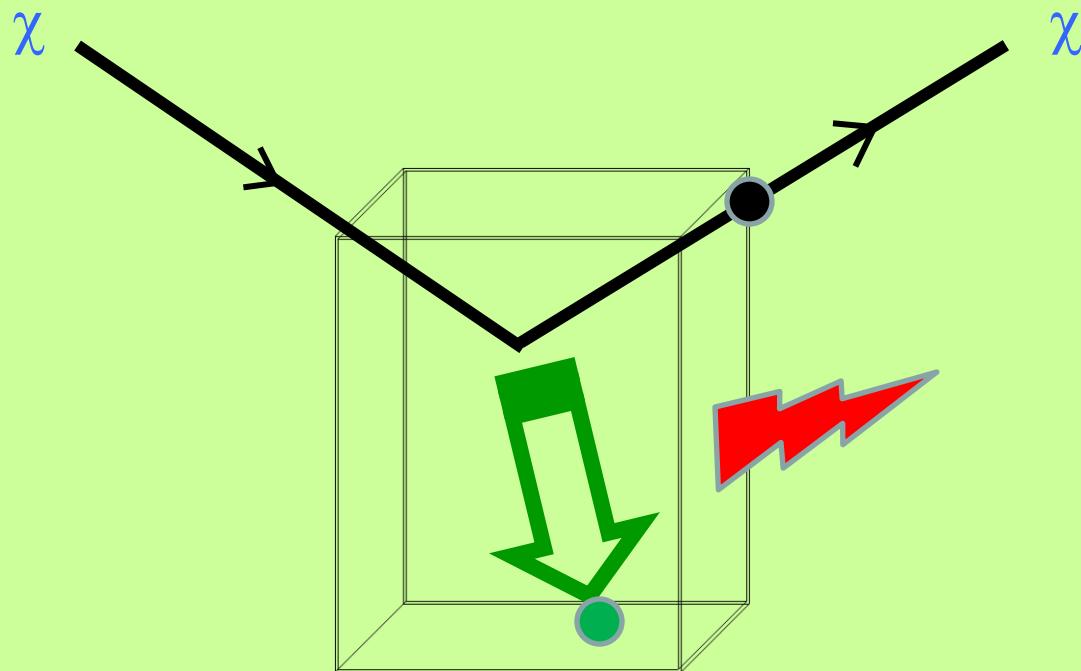
misura di rinculo nucleare

# Misure dirette di WIMP



misura di rinculo nucleare

# Misure dirette di WIMP



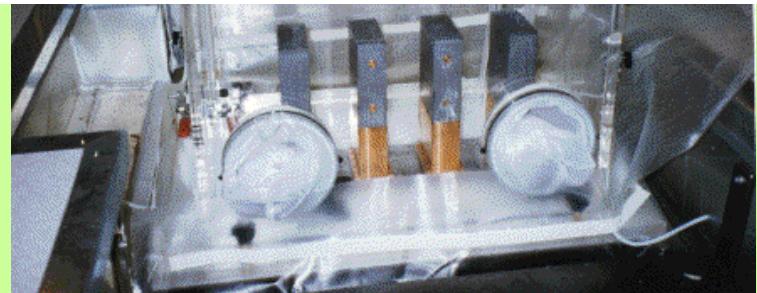
misura di rinculo nucleare

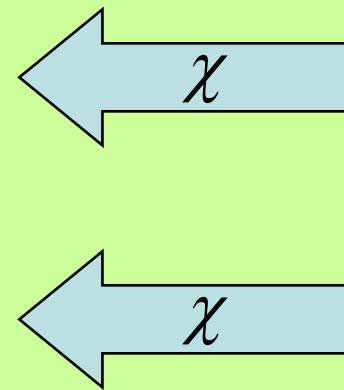
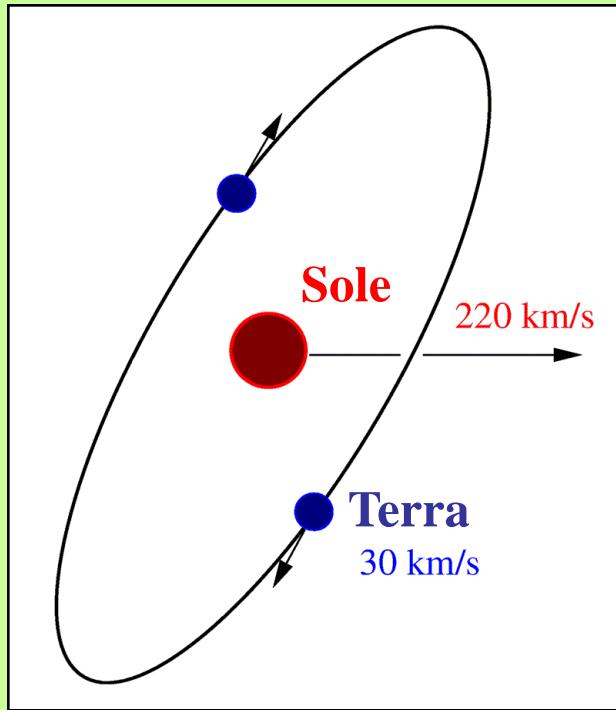
# Ricerche in luoghi protetti dalla radiazione cosmica



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Esperimento DAMA





Moto del sistema solare  
rispetto alle particelle  
dell'alone oscuro

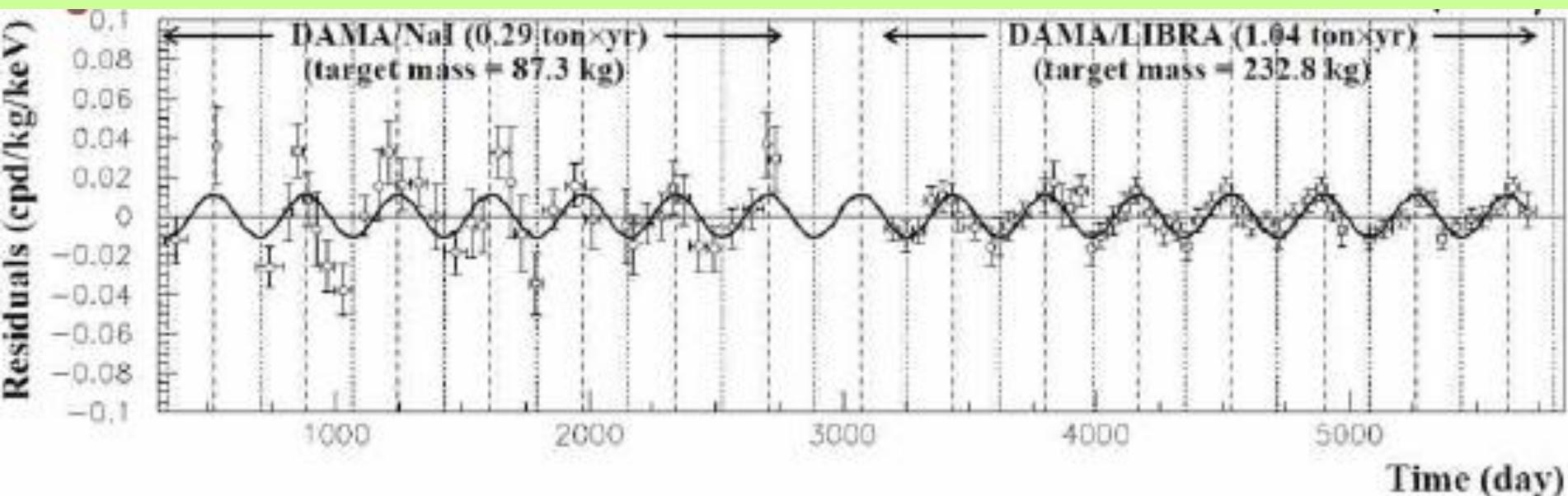
## Variazione annuale del segnale



# Esperimento DAMA presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Osservata una variazione annuale del segnale su di un periodo di più di 14 anni (esposizione totale = 1.33 tonnellate x anno)

$9.3 \sigma$  C.L.



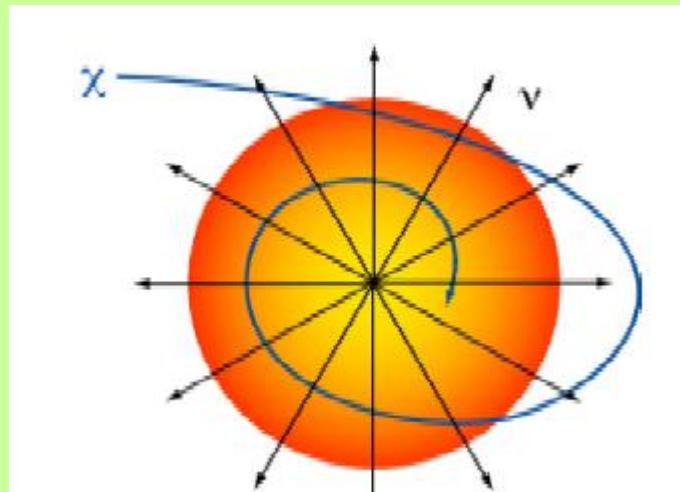
Altri esperimenti, non adeguati per la misura della modulazione annuale, si basano su **sottrazione dei fondi**: danno dei limiti superiori sulle sezioni d'urto di specifici processi WIMP-bersaglio.

Il confronto tra i risultati di esperimenti diversi ha senso solo se viene fissato il modello di MO. E questo modello è attualmente arbitrario.

# Misure indirette di WIMPs

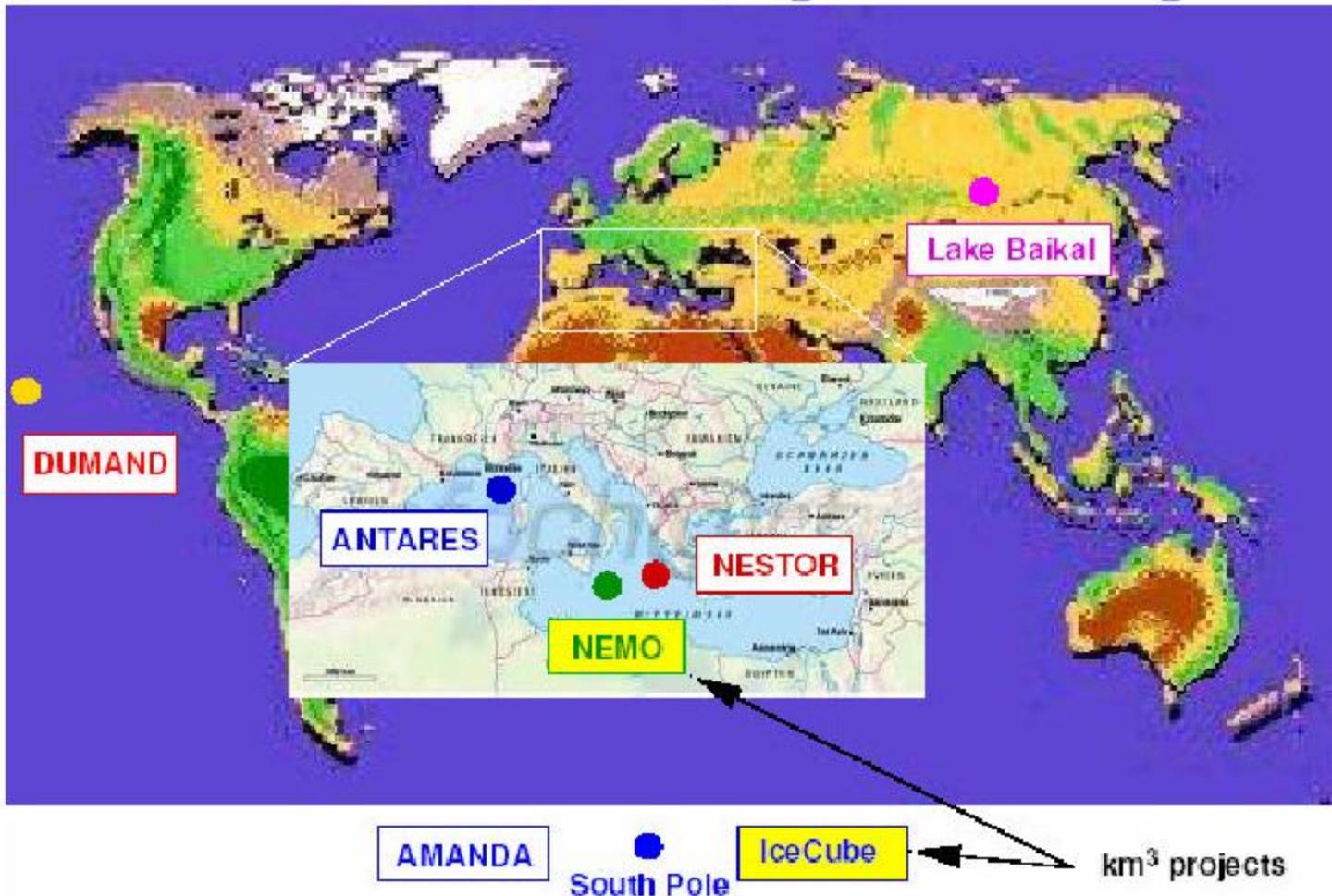
I WIMP possono venire catturati dalla Terra o dal Sole ...

... quindi accumularsi nel loro centro

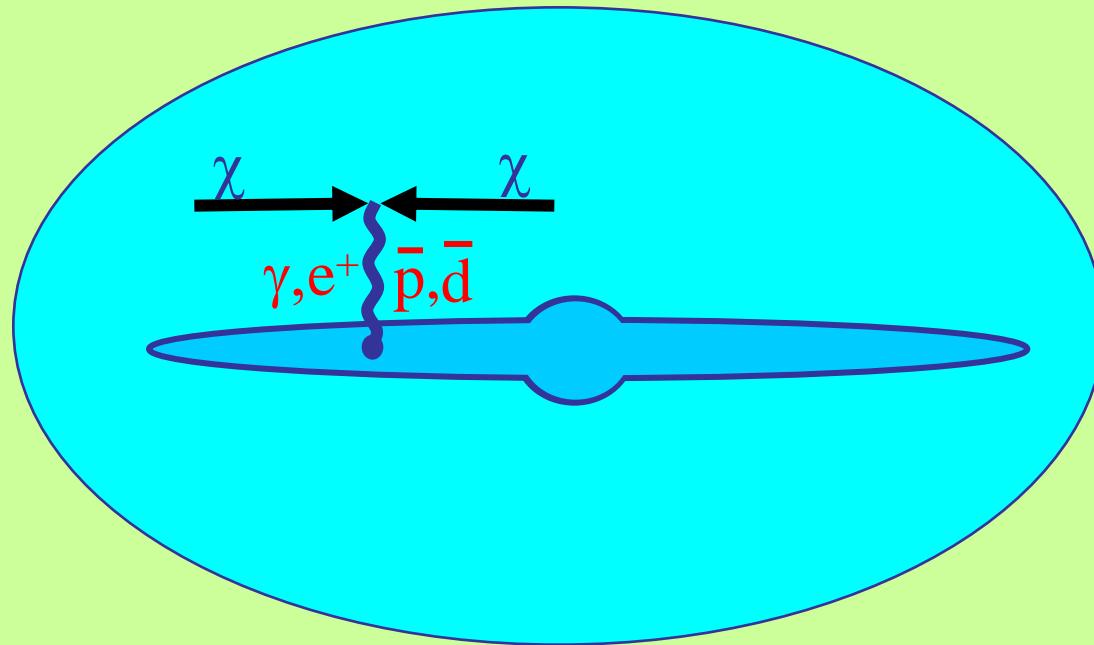


... e, a seguito di loro annichilazione, possono produrre dei neutrini

# The Neutrino Telescope world map

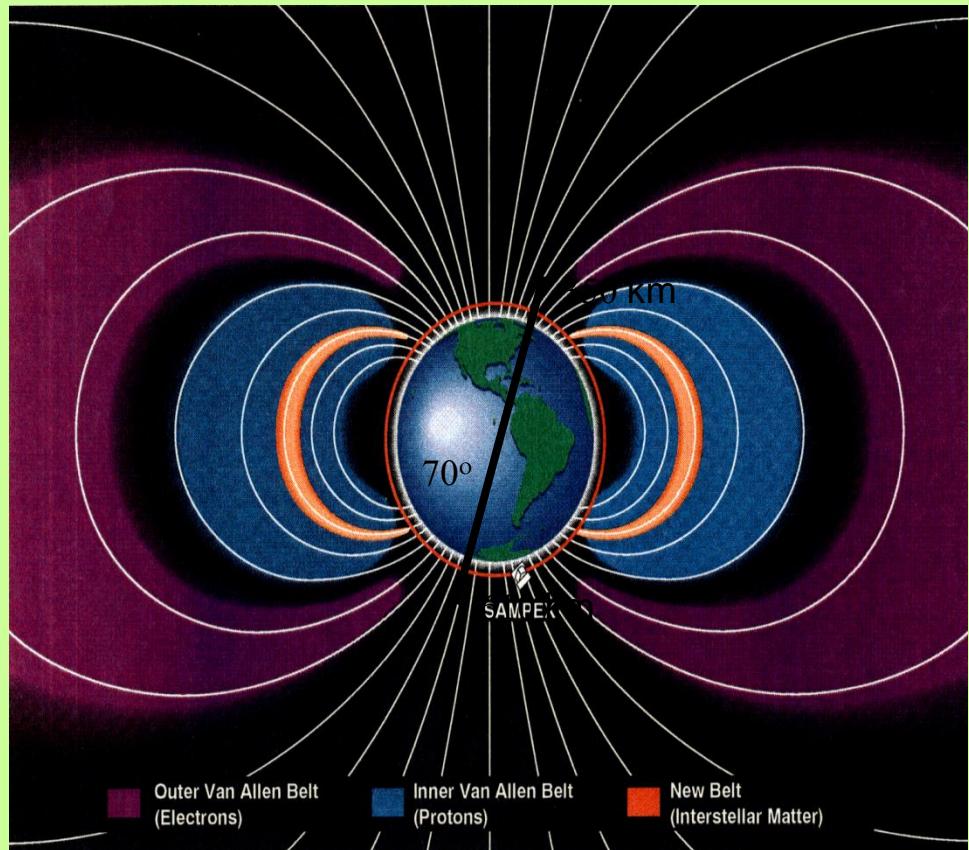
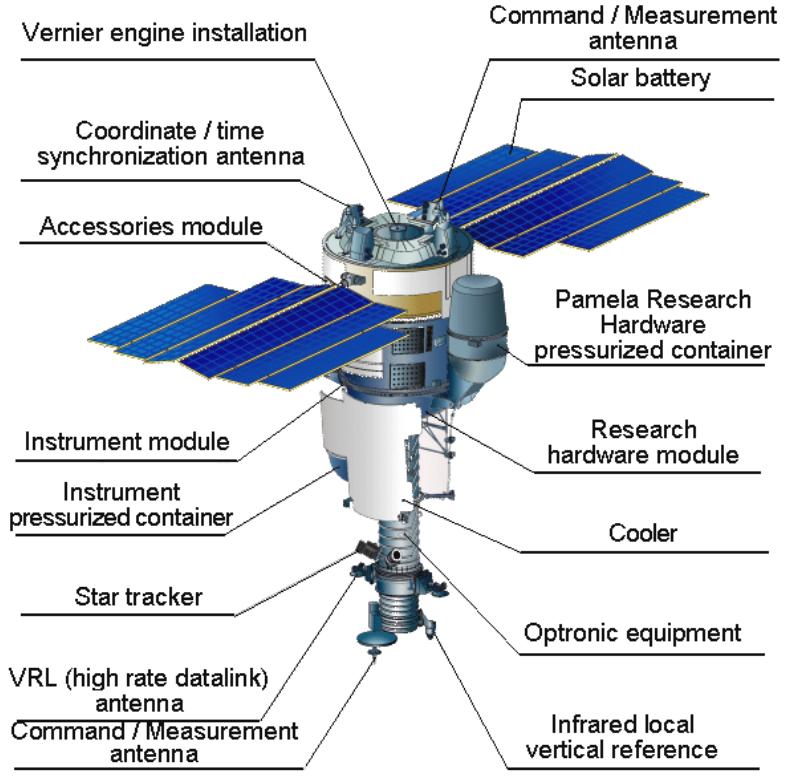


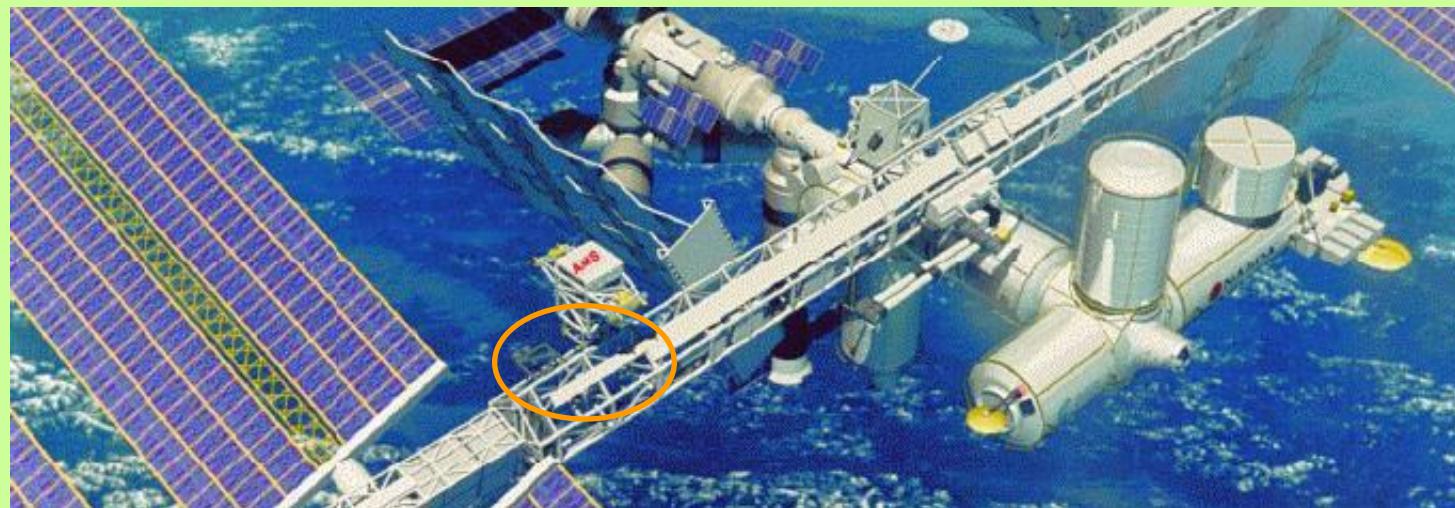
## Annichilazione di WIMPs nell'alone galattico



Produzione di particelle rare nei raggi cosmici

# Satellite Pamela

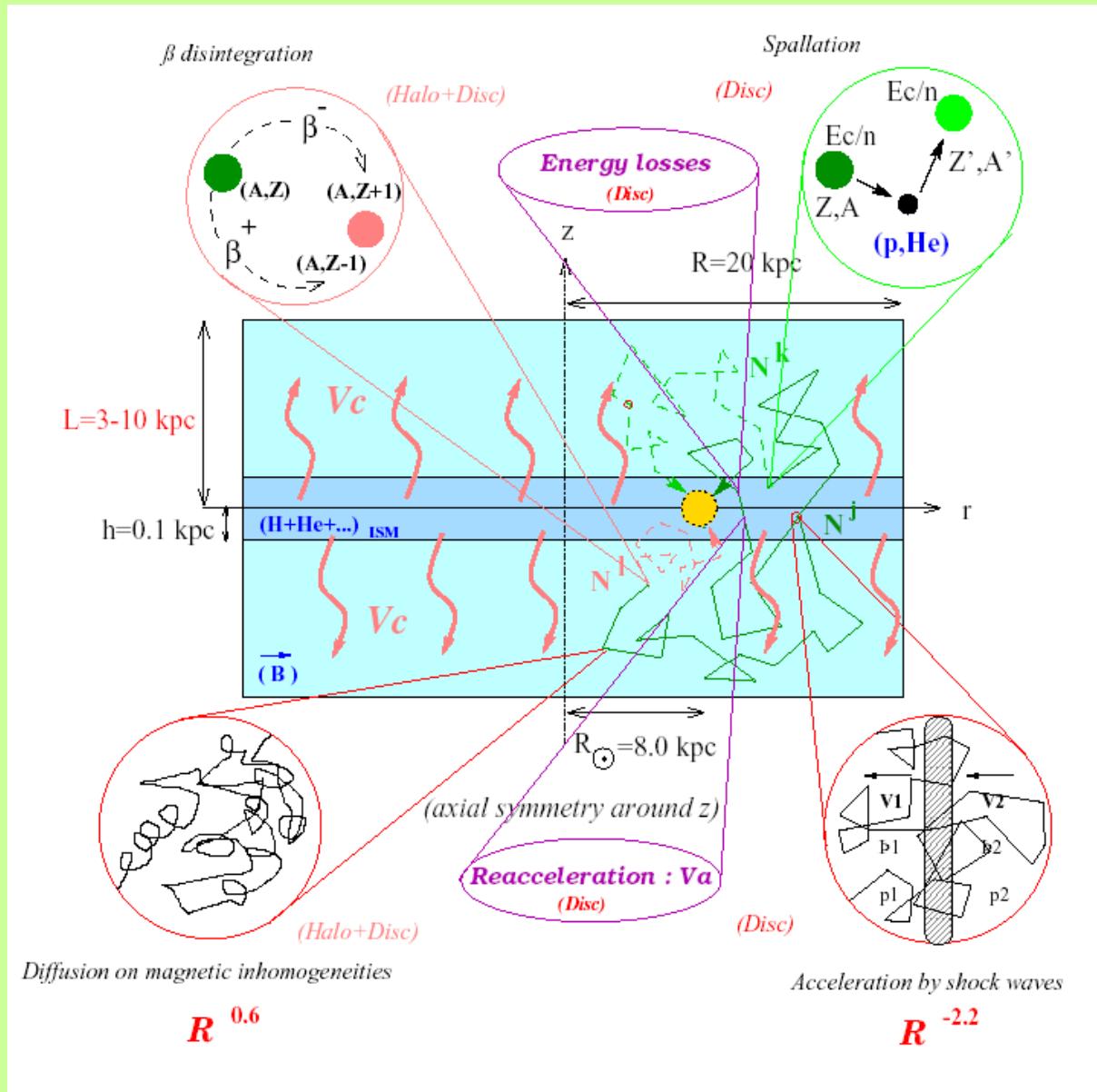


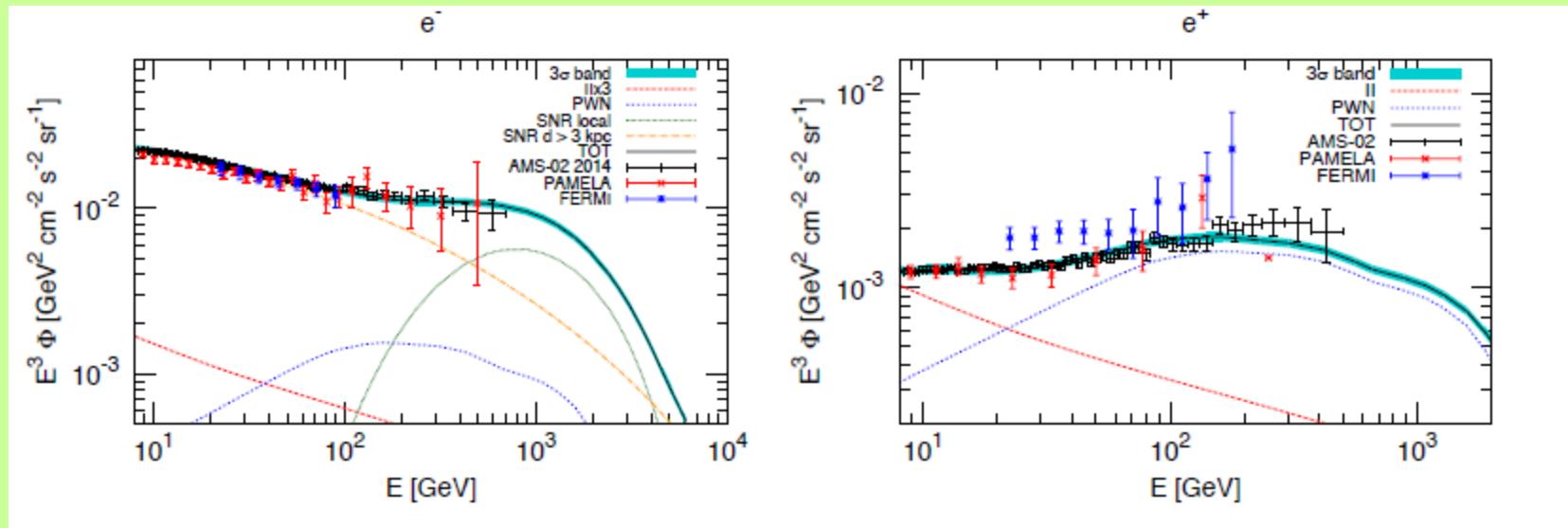


Esempio di un “segnale” particolarmente interessante: **positroni (ed elettroni)**

- **produzione secondaria**: reazioni di “spallazione” tra raggi cosmici primari (protoni, elio) su materia interstellare
- **produzione primaria**: supernove (elettroni), pulsars (elettroni e positroni)
- **produzione secondaria esotica**: annichilazione o decadimento di materia oscura
- **propagazione** di positroni e di elettroni nel mezzo interstellare e nell'eliosfera

# Propagation and diffusion of cosmic rays in the halo

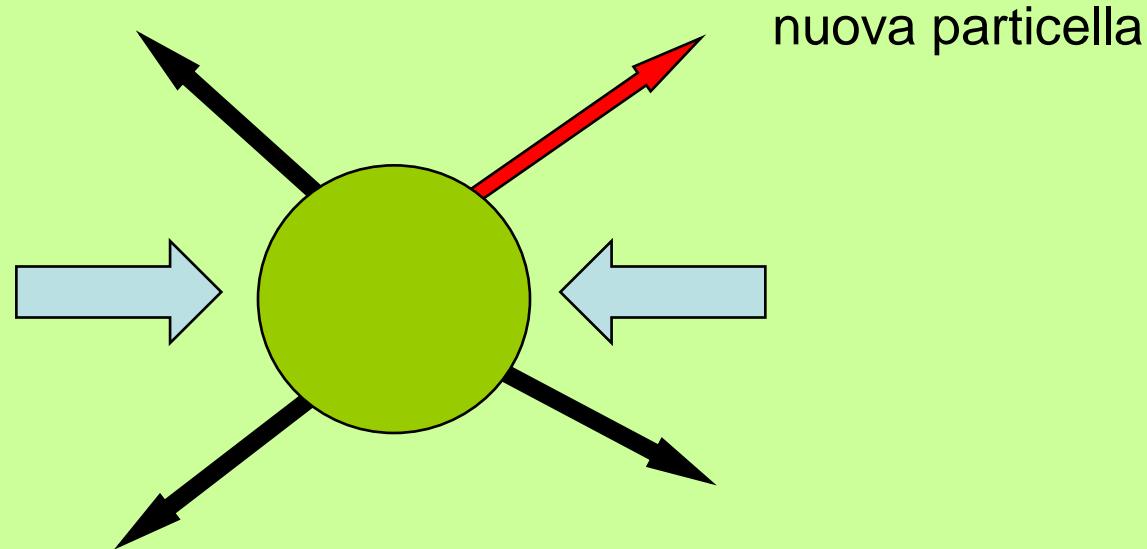




- i risultati di AMS-02 sono riprodotti bene da un modello puramente astrofisico (ossia senza materia oscura)
- l'introduzione di effetti dovuti a materia oscura può migliorare la riproducibilità dei dati sperimentali

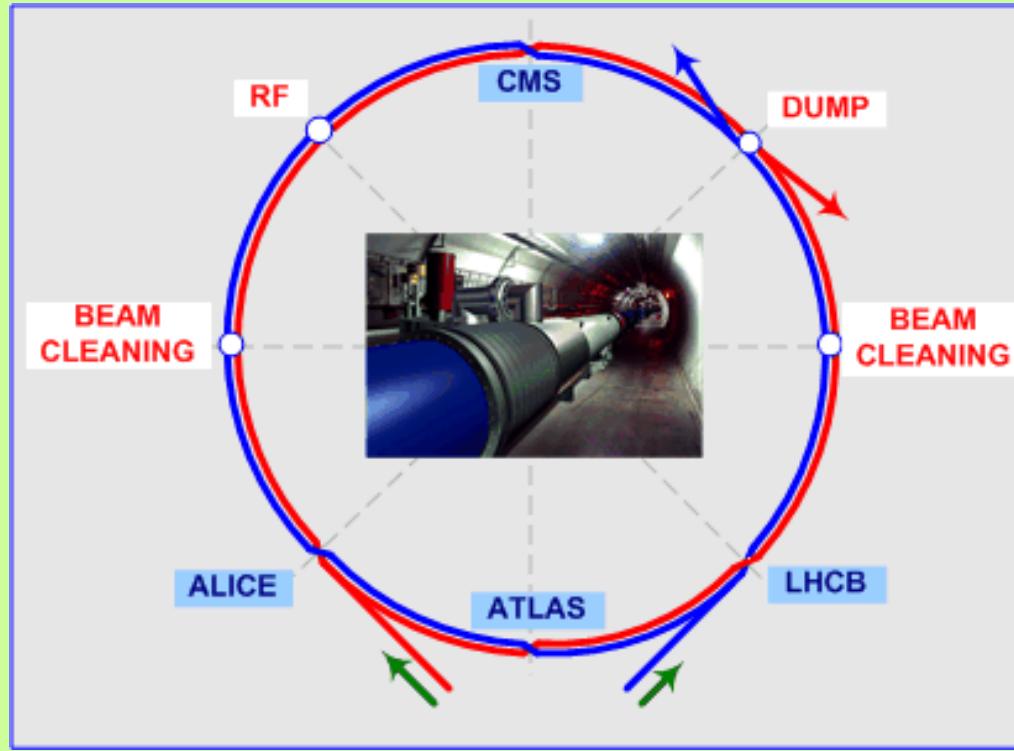
**Produzione di particelle “oscure”  
agli acceleratori?**

# produzione di una nuova particella in laboratorio



due particelle note vengono fatte collidere

# Large Hadron Collider (CERN)



- ★ circonferenza di 27 km - tunnel sotterraneo a 50 - 175 metri di profondita'
- ★ 2 fasci di protoni circolanti in verso opposto per provocare collisioni
- ★ ogni protone ha un'energia 7.000 volte piu' grande della propria energia di riposo

# Conclusioni

- ★ un gran numero di dati osservativi conferma **l'esistenza di materia oscura** nell'Universo: il 27% della materia/energia del Cosmo è oscura
- ★ l'indagine sulla natura di questa materia oscura è al centro di numerosissime ricerche di vario tipo:
  - **misure dirette** di urti di WIMPs in rivelatori
  - **misure indirette** su prodotti di annichilazione WIMP-WIMP
- ★ attualmente, l'unica misura compatibile con l'esistenza di WIMPs e non spiegabile con altri effetti è quella dell'**esperimento DAMA**

Per il file pdf di queste lezioni:

[http://www.alessandrobottino.it/Materia\\_oscura.pdf](http://www.alessandrobottino.it/Materia_oscura.pdf)