

Astri e Particelle: nuova luce sulla materia oscura

Fabrizio Tavecchio
INAF - Osservatorio Astronomico di Brera

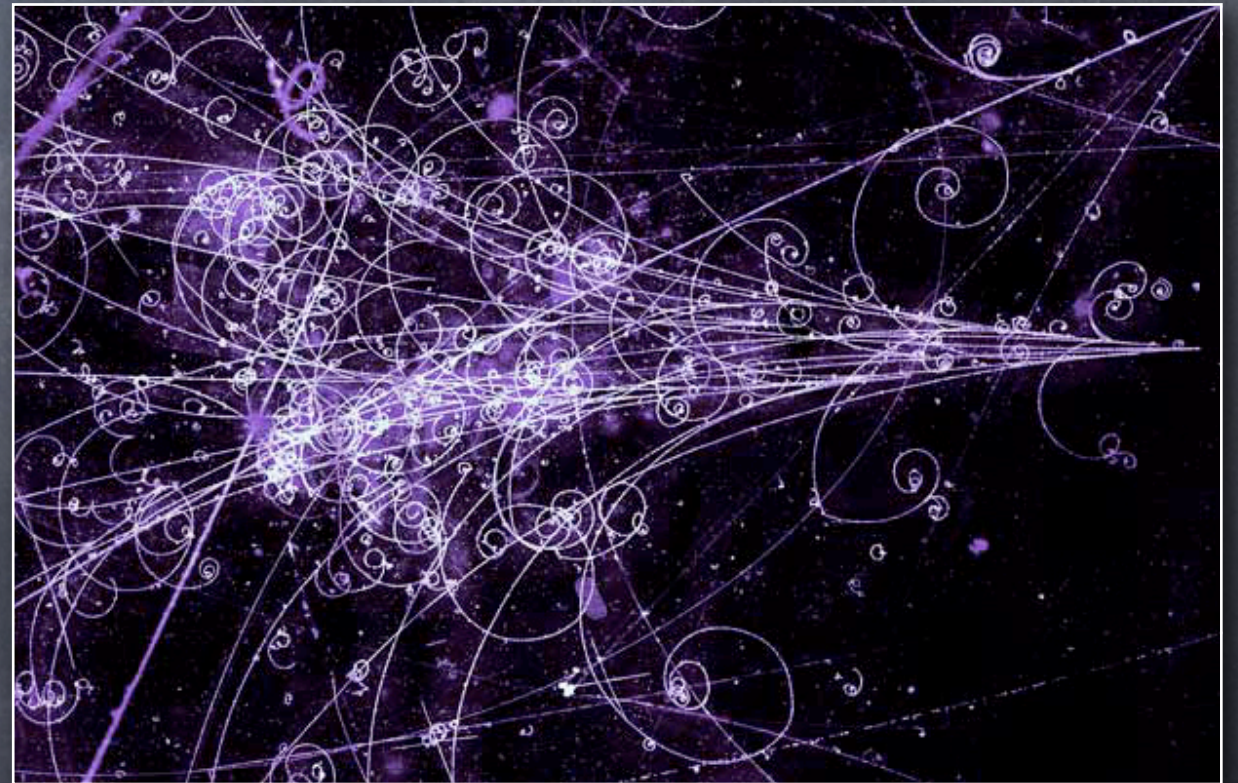
I cieli di Brera

Conferenze pubbliche 2016

In collaborazione con
Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere



Dal "macro" al "micro" ...
e viceversa



Preambolo

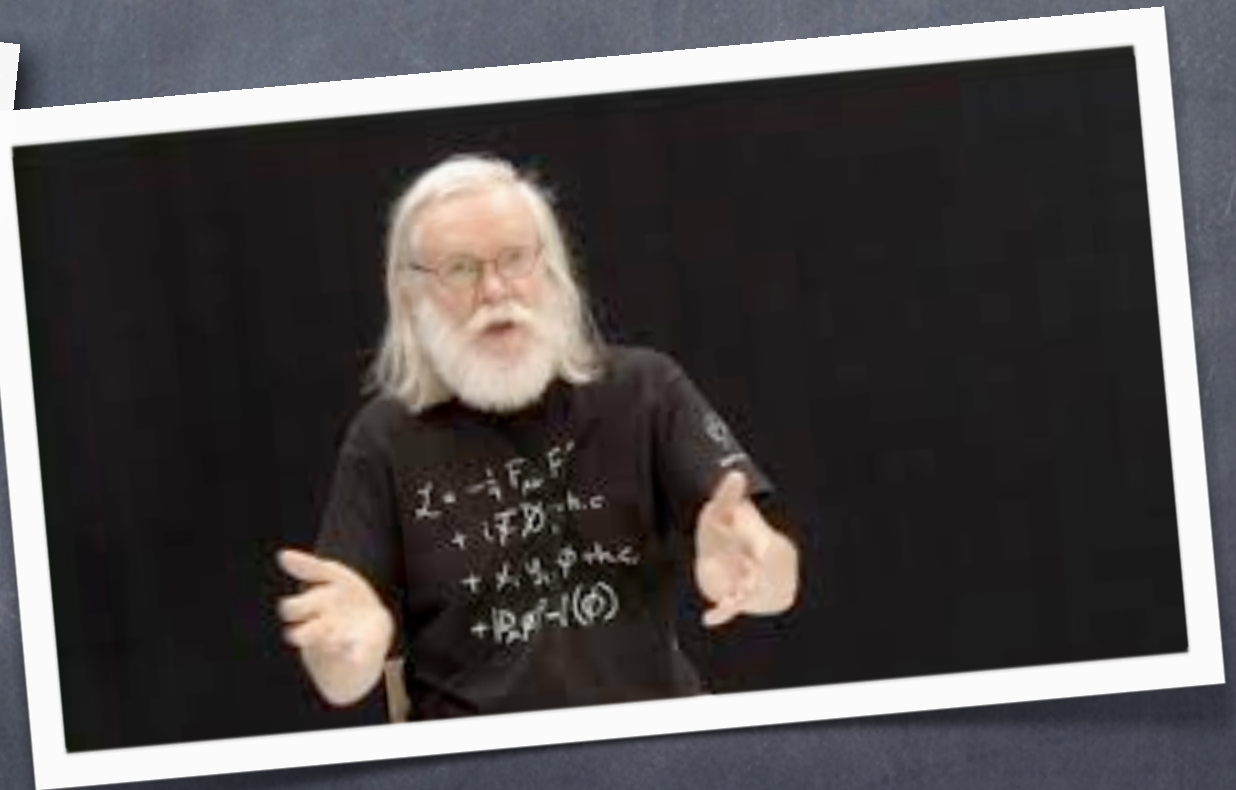
Il microcosmo:
un sintetico vocabolario

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

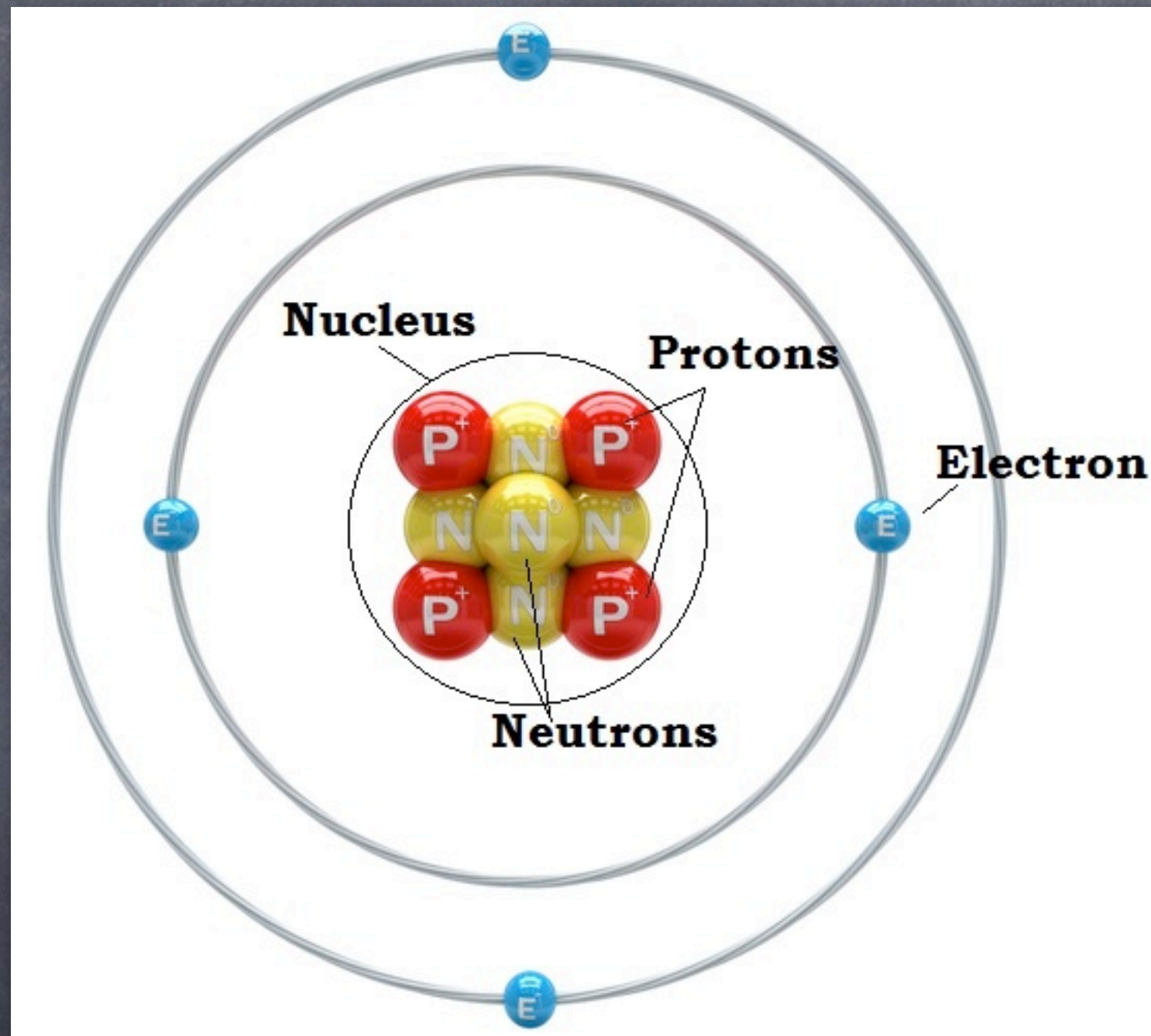
$$+ i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c.$$

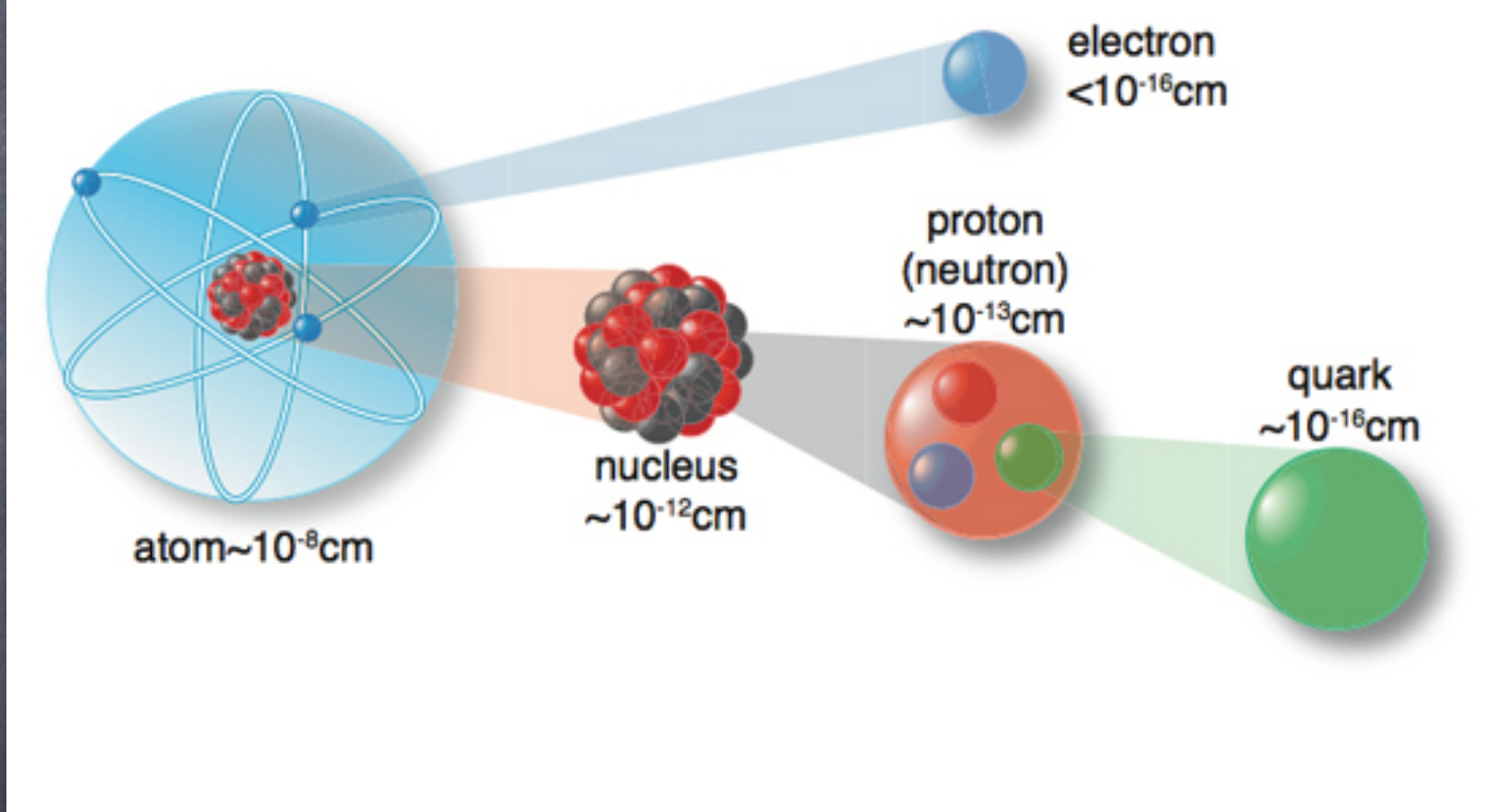
$$+ \bar{\Psi}_i y_{ij} \Psi_j \phi + h.c.$$

$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

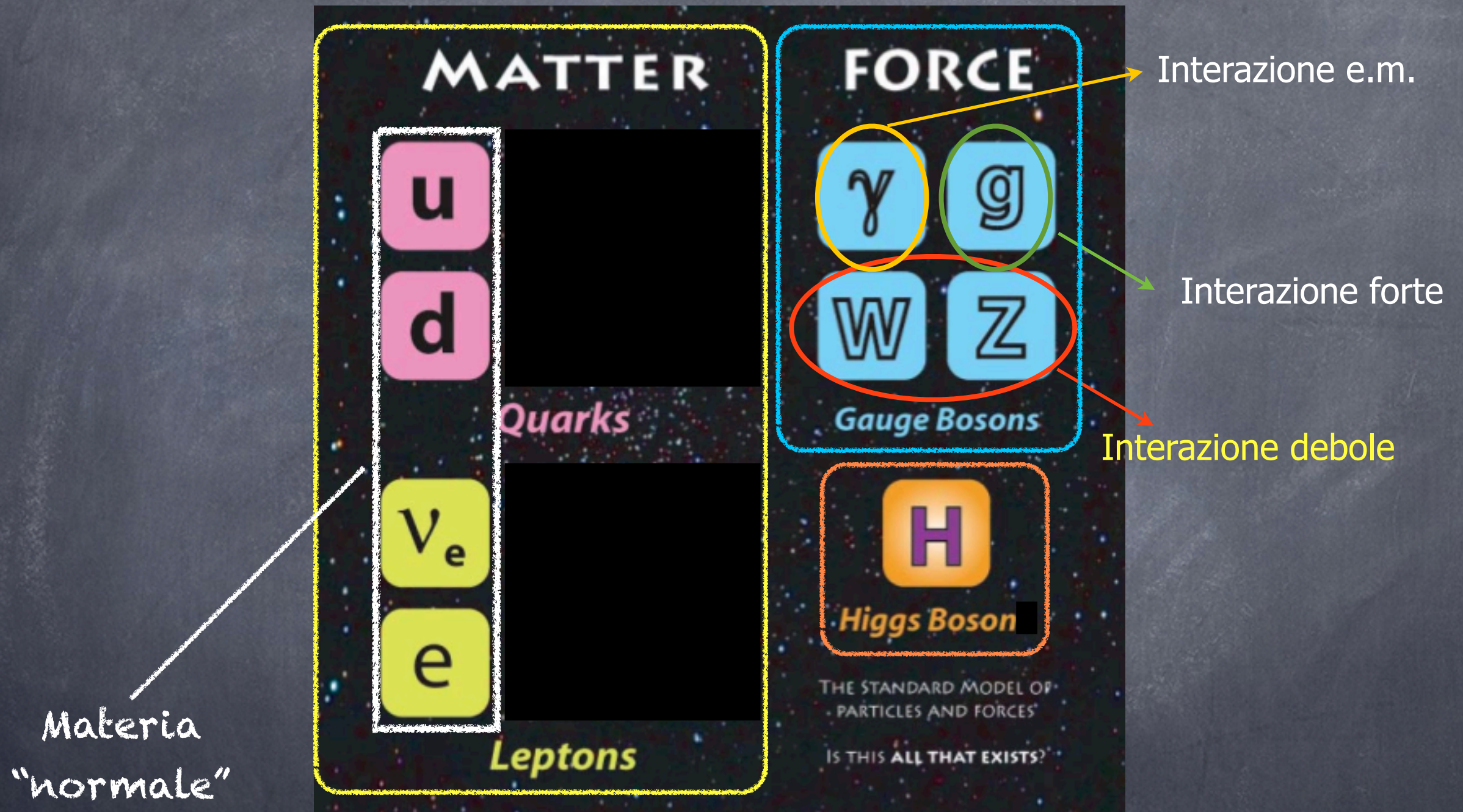


Atomo: elettroní, protoní, neutroní

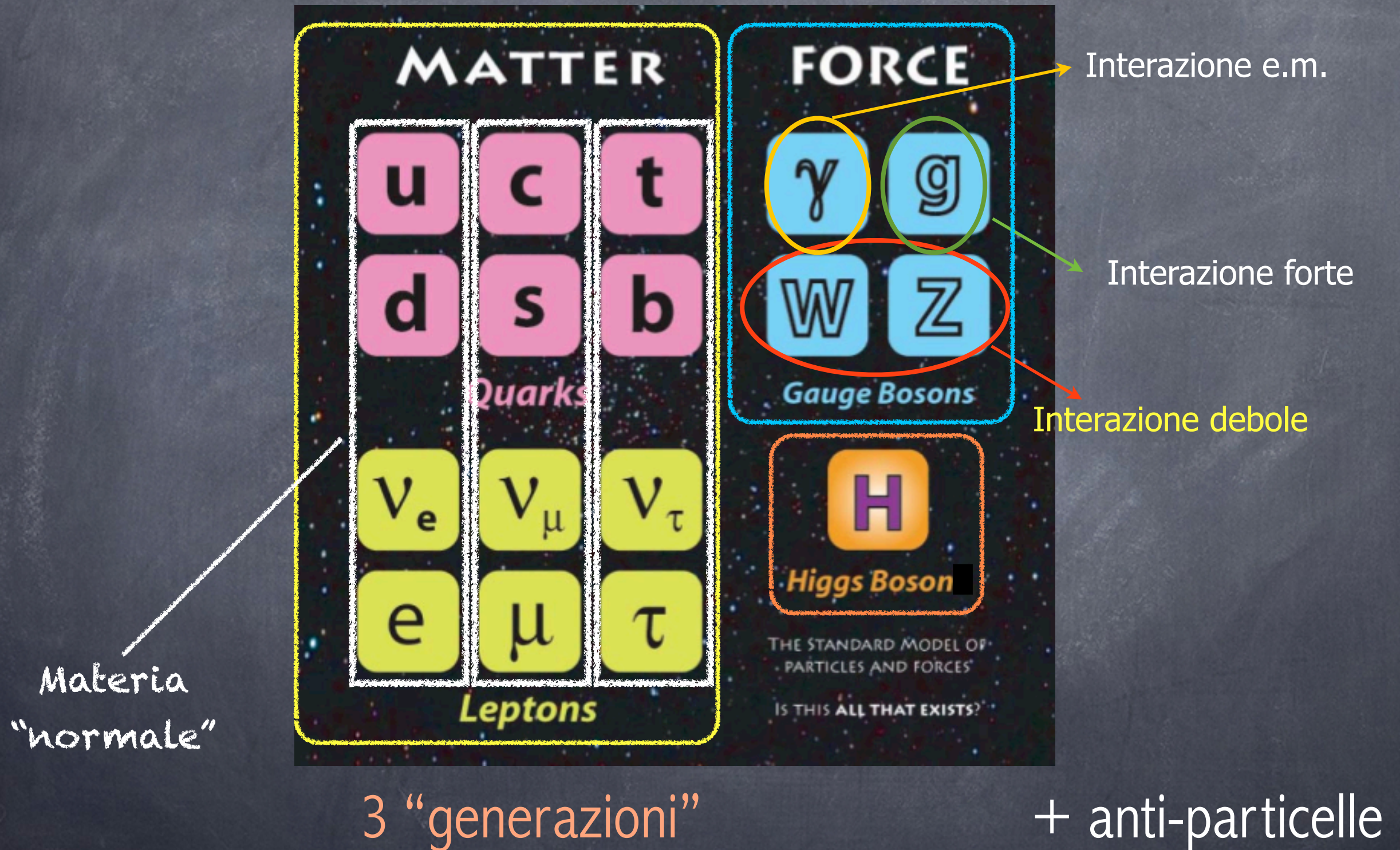




il modello "standard" delle particelle



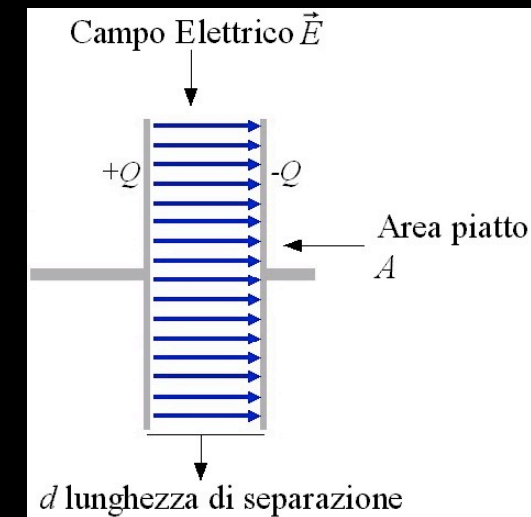
il modello "standard" delle particelle



Digressione: scale di energia

I fisici usano l'elettronvolt (e i suoi multipli)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$



eV	keV	MeV
reazioni chimiche	raggi-X	reazioni nucleari
	10^3	10^6

GeV	TeV-PeV
10^9	10^{12-15}

$$1 \text{ TeV} = 1.6 \text{ erg}$$



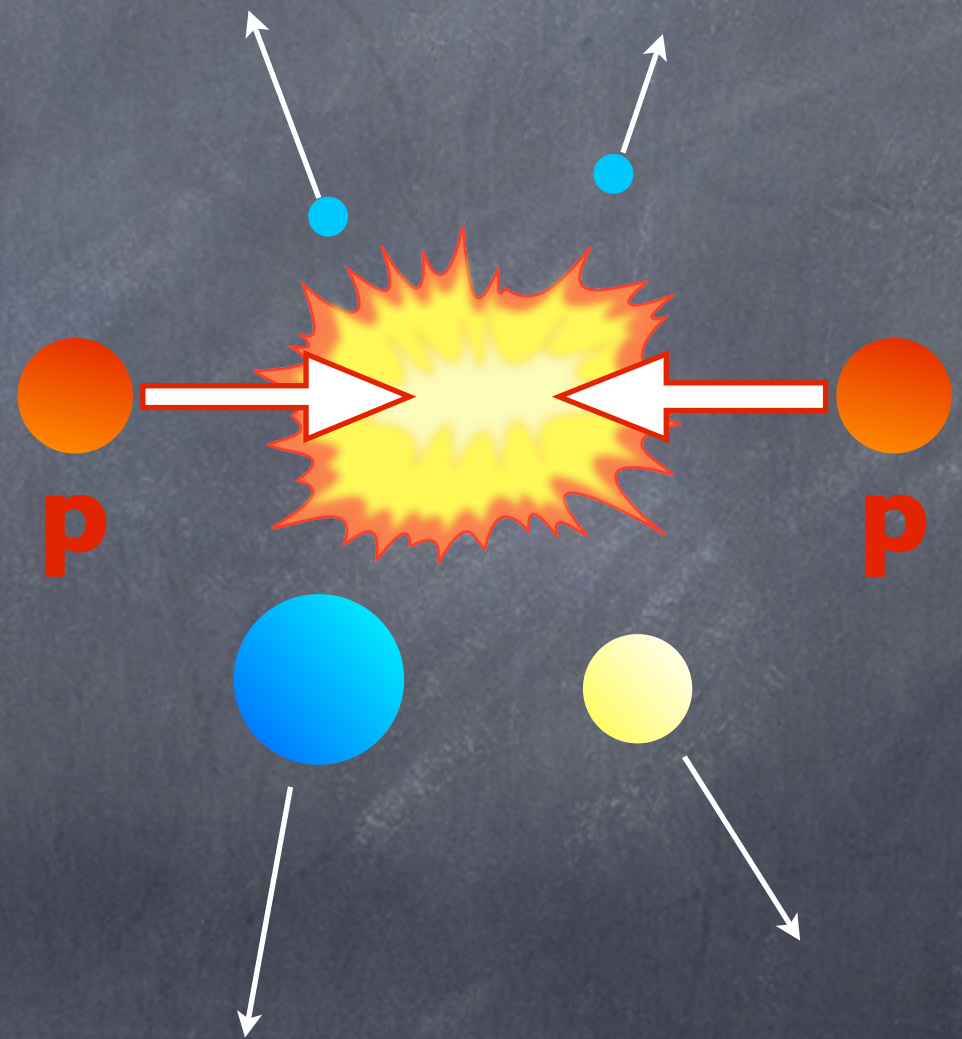
LHC: 6.5 TeV



Produzione/distruzione di particelle



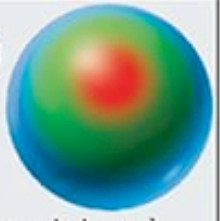
Massa $\longleftrightarrow$ Energia



PARTICELLE DI MATERIA

QUARK

Queste particelle formano i protoni, i neutroni e un vero e proprio zoo di altre particelle meno note. Non sono mai stati osservati isolatamente.

UP  u Carica elettrica: $+2/3$ Massa: 2 MeV Costituente della materia ordinaria; un protone è composto da due quark up e uno down.	CHARM  c Carica elettrica: $+2/3$ Massa: 1,25 GeV Cugino instabile e più pesante del quark up, scoperto come costituente della particella J/ψ .	TOP  t Carica elettrica: $+2/3$ Massa: 171 GeV È la particella più pesante, ha massa paragonabile a un atomo di osmio e una vita media molto breve.
DOWN  d Carica elettrica: $-1/3$ Massa: 5 MeV Costituente della materia ordinaria; un neutrone è composto da due quark down e uno up.	STRANGE  s Carica elettrica: $-1/3$ Massa: 95 MeV Cugino instabile e più pesante del quark down, è il costituente del più studiato kaone, altra particella.	BOTTOM  b Carica elettrica: $-1/3$ Massa: 4,2 GeV Altra copia instabile e ancora più pesante del quark down, è un costituente del mesone B.

LEPTONI

Queste particelle sono immuni all'interazione forte e si osservano isolatamente. Ogni neutrino mostrato qui in realtà è una combinazione di neutrini diversi, ciascuno con massa non più grande di pochi eV.

NEUTRINO ELETTRONICO  ν_e Carica elettrica: 0 Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi.	NEUTRINO MU  ν_μ Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.	NEUTRINO TAU  ν_τ Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.
ELETTRONE  e Carica elettrica: -1 Massa: 0,511 MeV La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici.	MUONE  μ Carica elettrica: -1 Massa: 106 MeV Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.	TAU  τ Carica elettrica: -1 Massa: 1,78 GeV Un'altra versione instabile e ancora più pesante dell'elettrone con una vita media di 0,3 picosecondi.

PARTICELLE DI FORZA

BOSONI

A livello quantistico, ognuna delle forze fondamentali è mediata da una specifica particella o insieme di particelle.

FOTONE Carica elettrica: 0 Massa: 0 Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.	 γ
BOSONE Z Carica elettrica: 0 Massa: 91 GeV Il mediatore delle reazioni deboli che non modificano l'identità delle particelle. Il suo raggio d'azione è di appena 10^{-18} metri circa.	Z 
BOSONI W^+/W^- Carica elettrica: +1 o -1 Massa: 80,4 GeV Sono i mediatori dell'interazione debole, che modifica il sapore e la carica delle particelle. Il raggio d'azione di queste interazioni è di appena 10^{-18} metri circa.	W 
GLUONI Carica elettrica: 0 Massa: 0 Otto specie di gluoni mediano l'interazione forte, interagendo con i quark e con altri gluoni. Queste particelle non risentono delle interazioni elettromagnetiche e delle interazioni deboli.	 g
HIGGS Carica elettrica: 0 Massa: 125 gigaelettronvolt Il bosone di Higgs conferisce la proprietà della massa ai quark, ai leptoni e ai bosoni W e Z .	H 

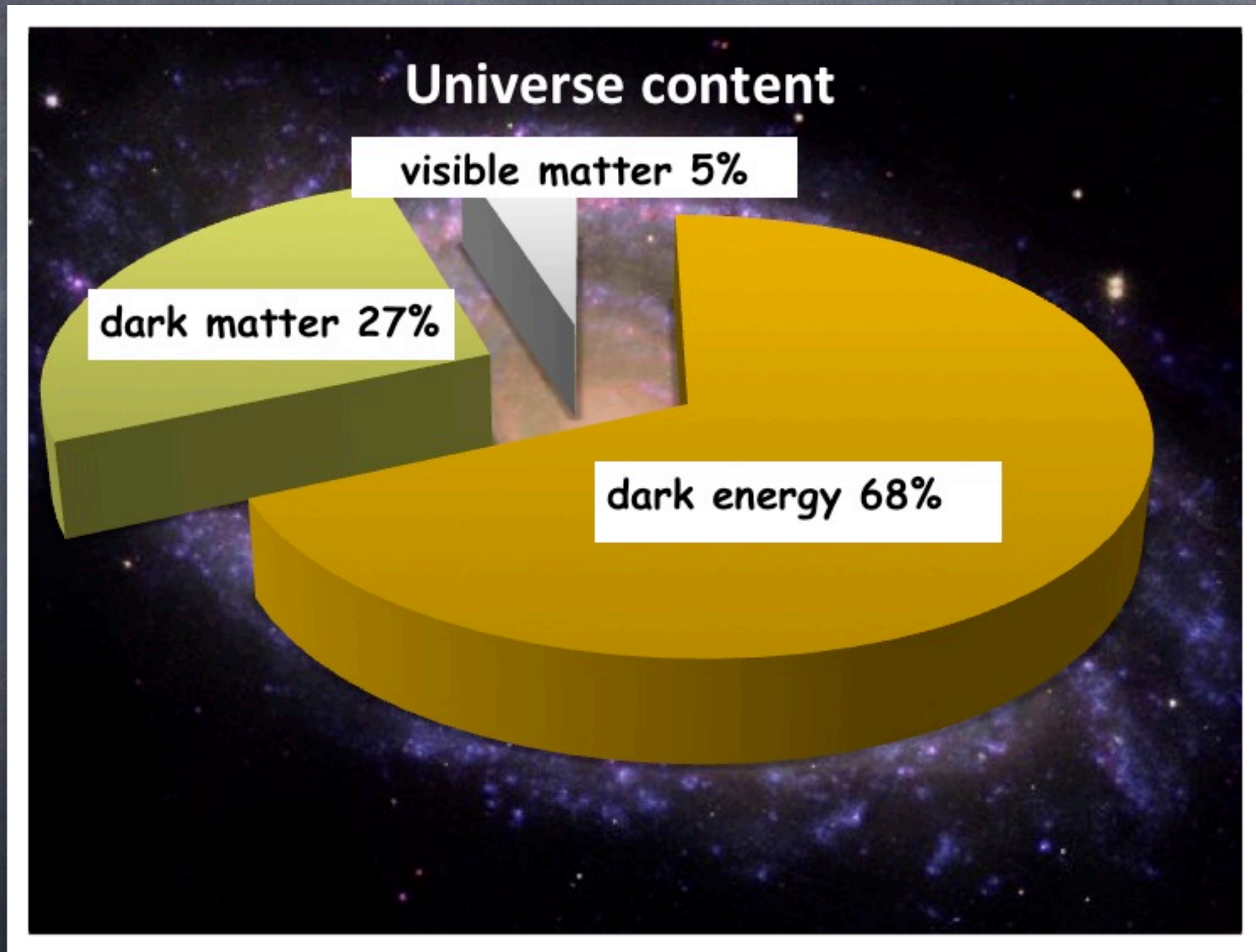
NEW

NEW!

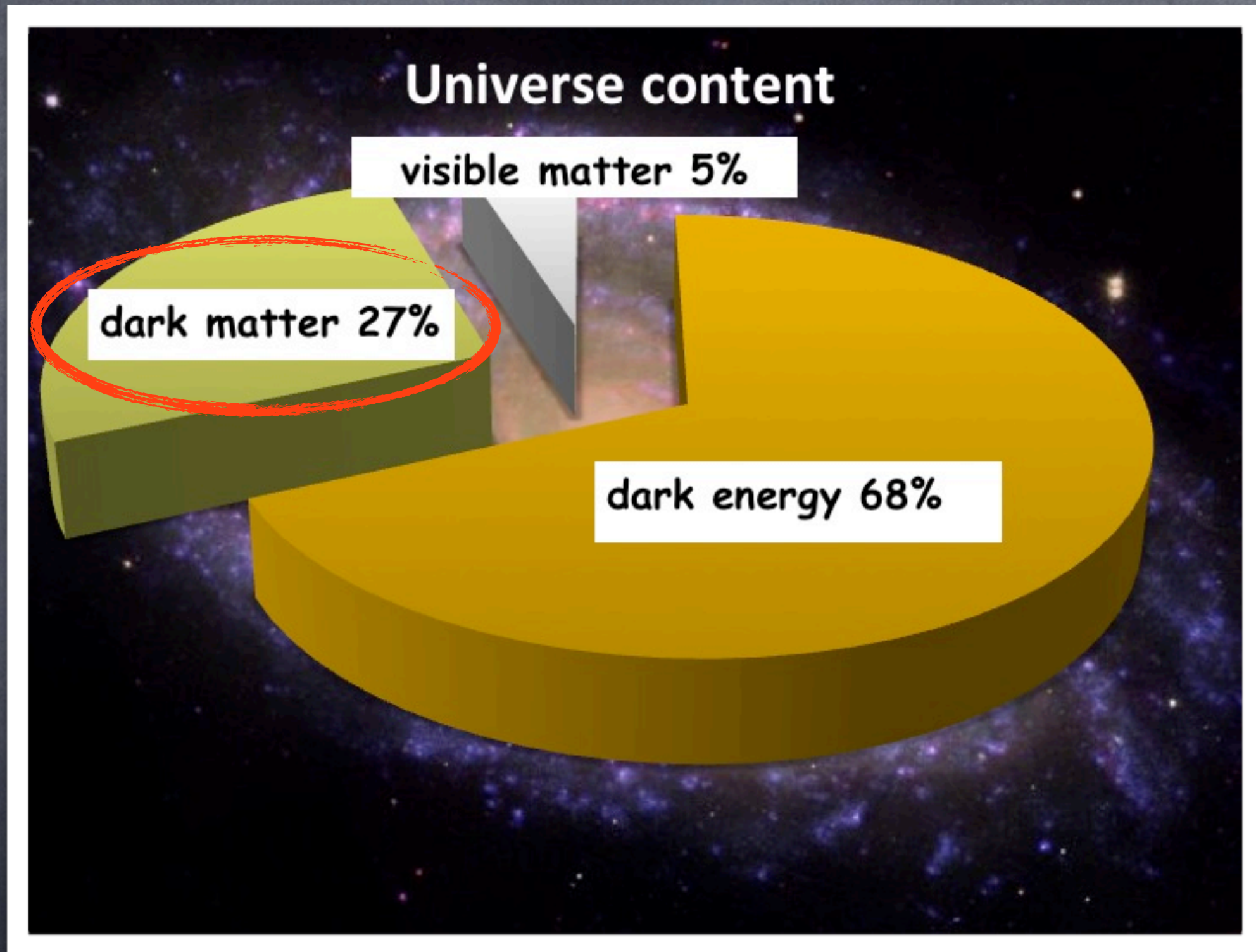
C'e' altro?



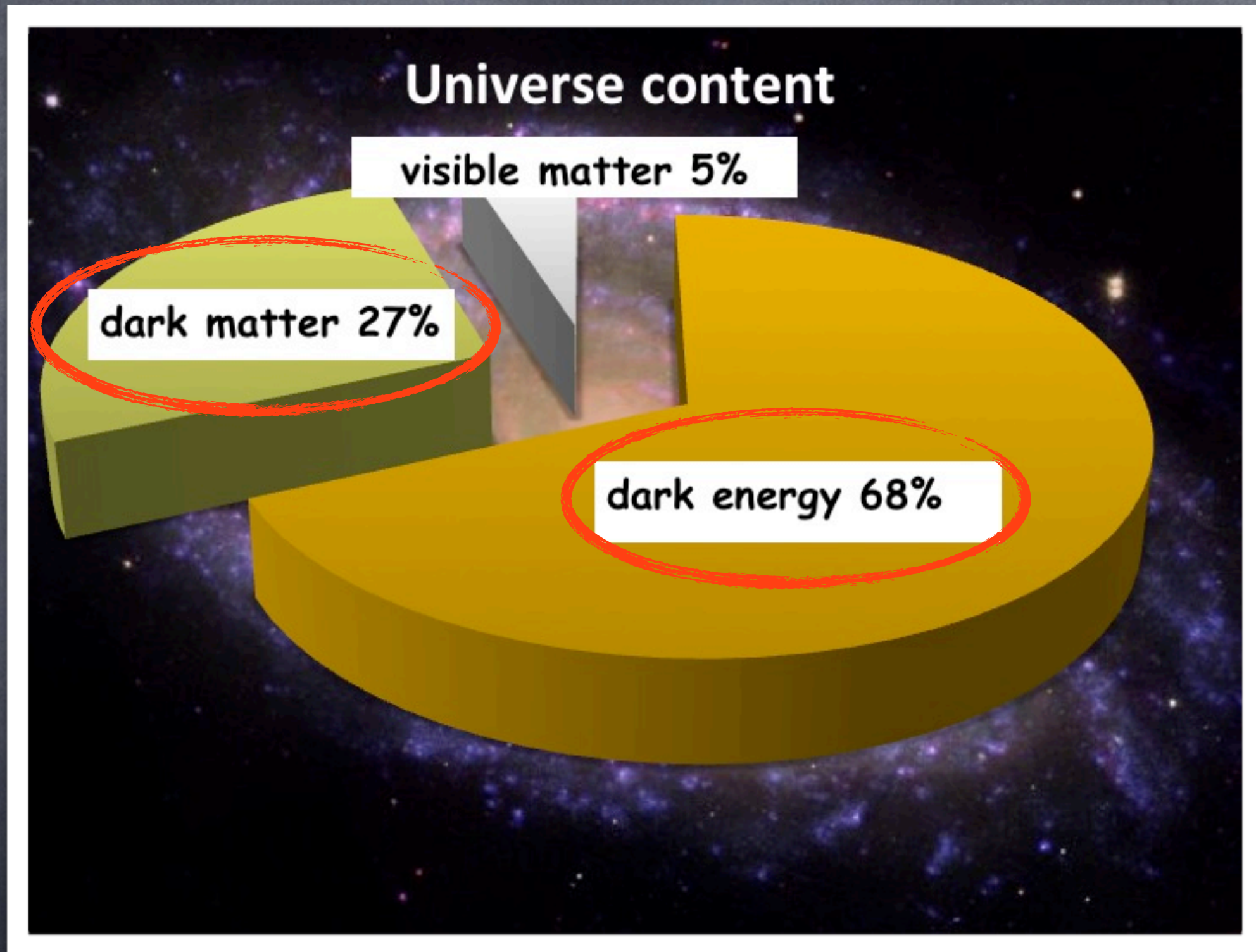
Astrofísica: materia (ed energía) oscura



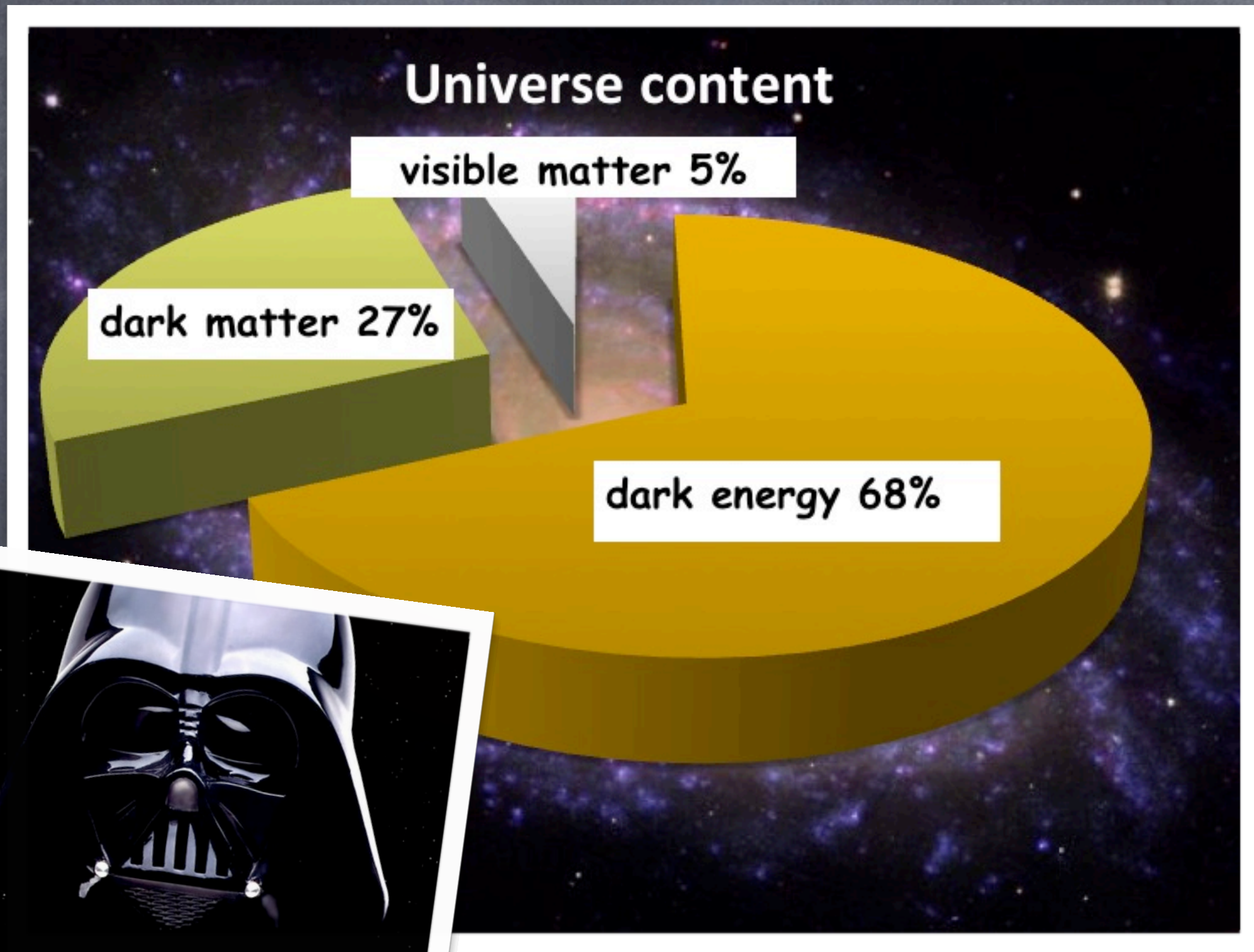
Astrofísica: materia (ed energía) oscura



Astrofísica: materia (ed energía) oscura

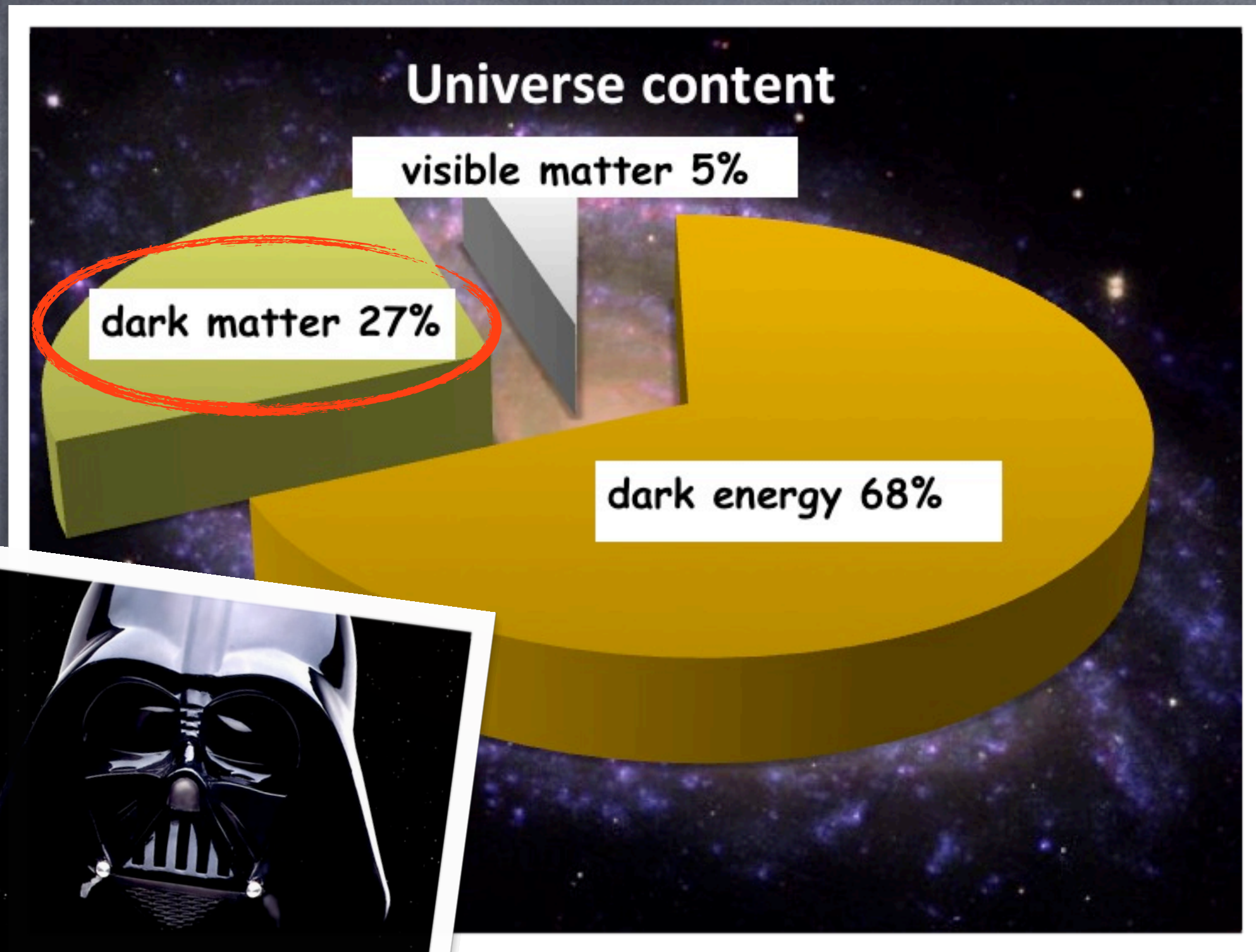


Astrofisica: materia (ed energia) oscura



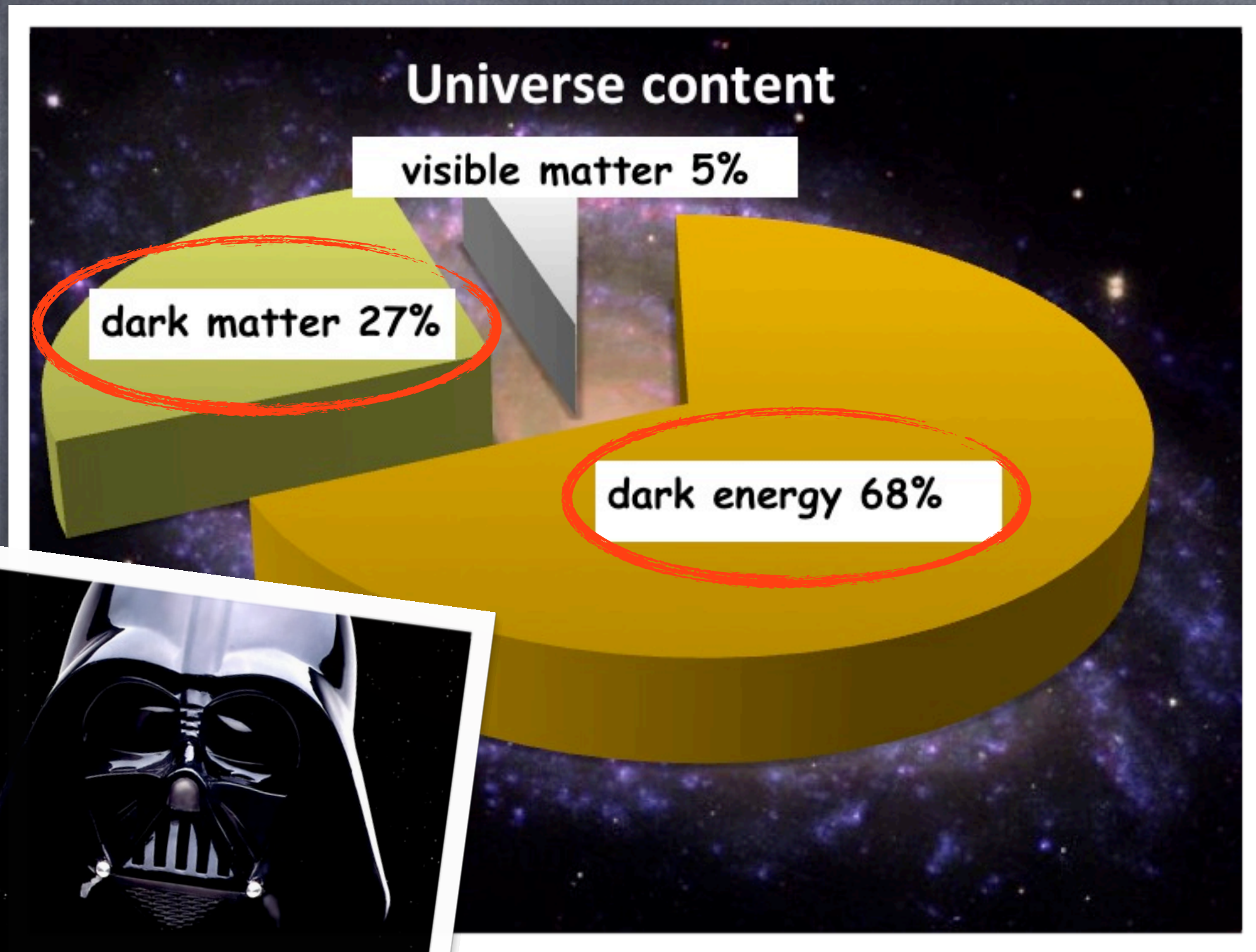
IL “LATO OSCURO”

Astrofisica: materia (ed energia) oscura



IL “LATO OSCURO”

Astrofisica: materia (ed energia) oscura

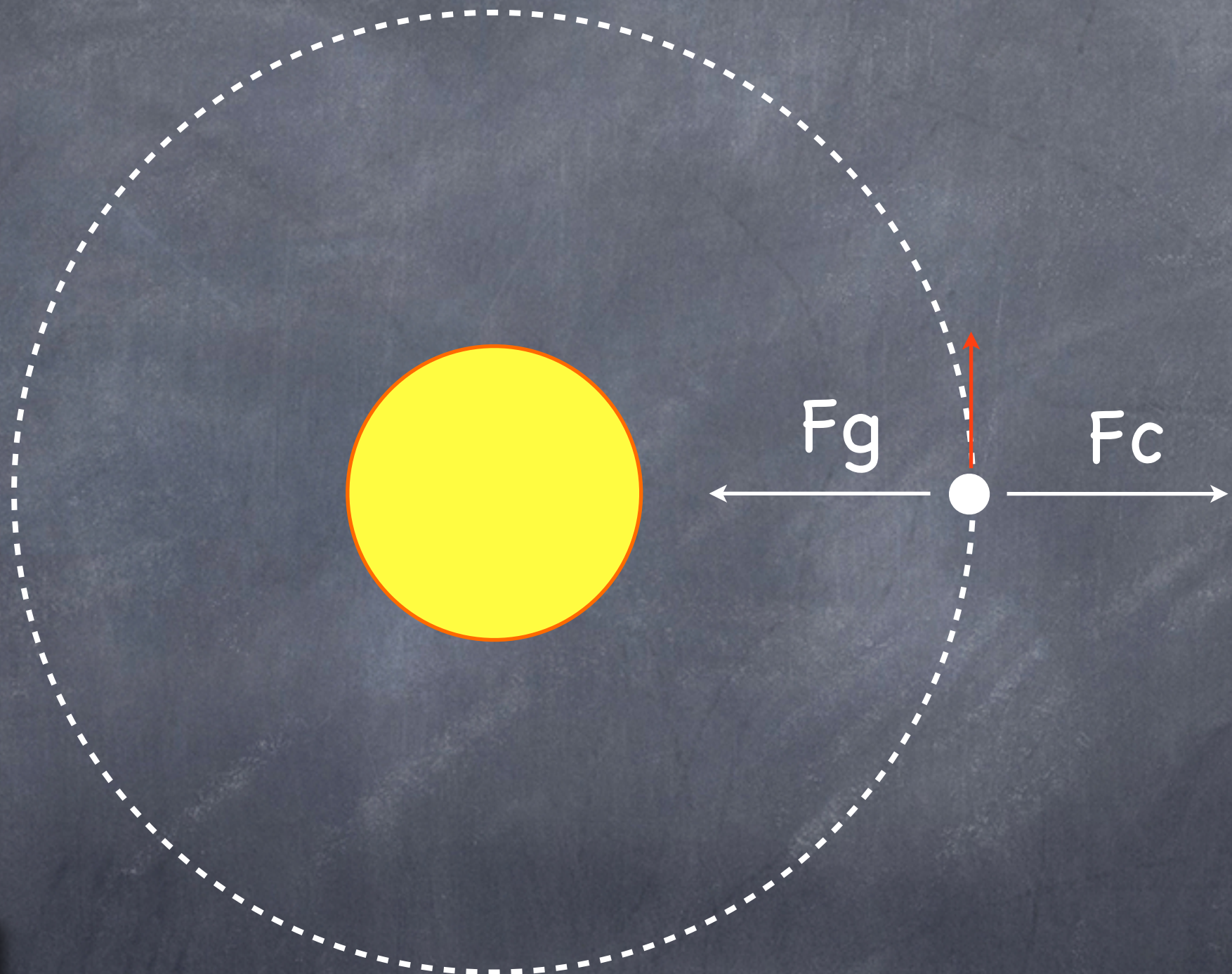


IL “LATO OSCURO”

Evidenze astronomiche

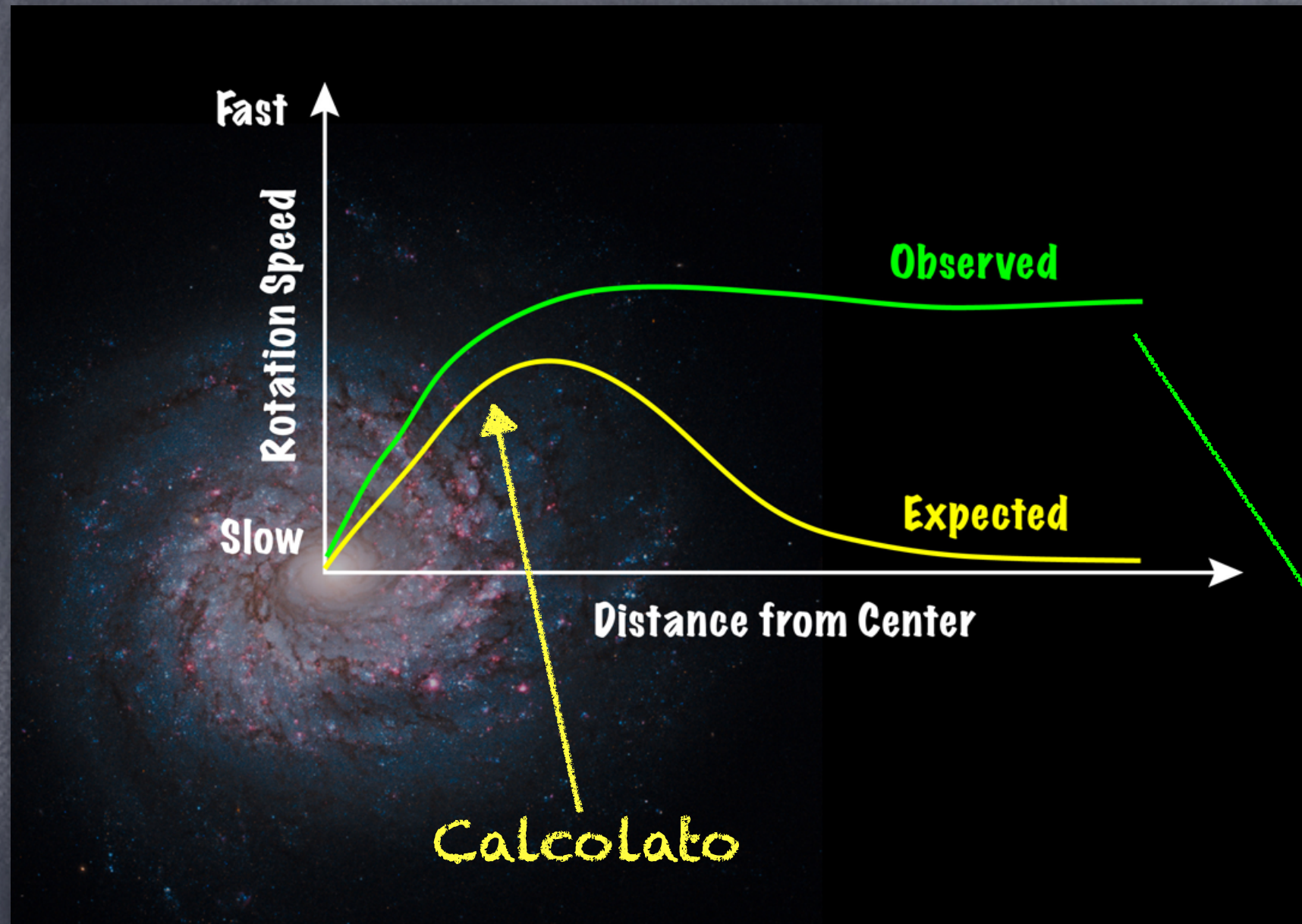
- Curve di rotazione/dispersione di galassie
- Ammassi di galassie
- "Gravitational lensing"
- Formazione delle strutture cosmiche

Curve di rotazione



$$V(R)^2 \sim \frac{GM(R)}{R}$$

Curve di rotazione

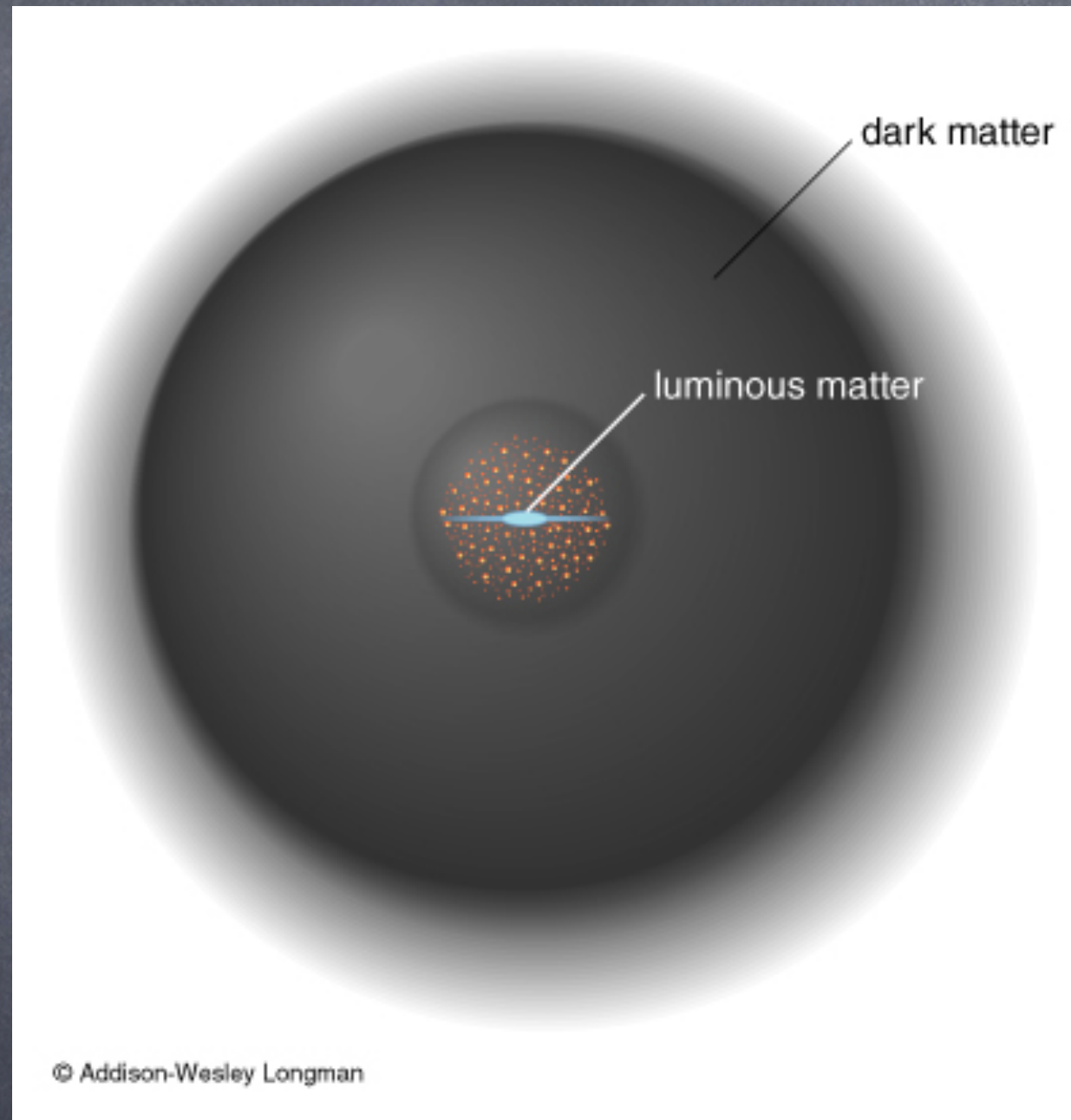


$$V(R)^2 \sim \frac{GM(R)}{R}$$

$$M(R > R_0) = M_0 \sim \text{cost.} \quad V(R) \sim \frac{GM_0}{R^{1/2}}$$

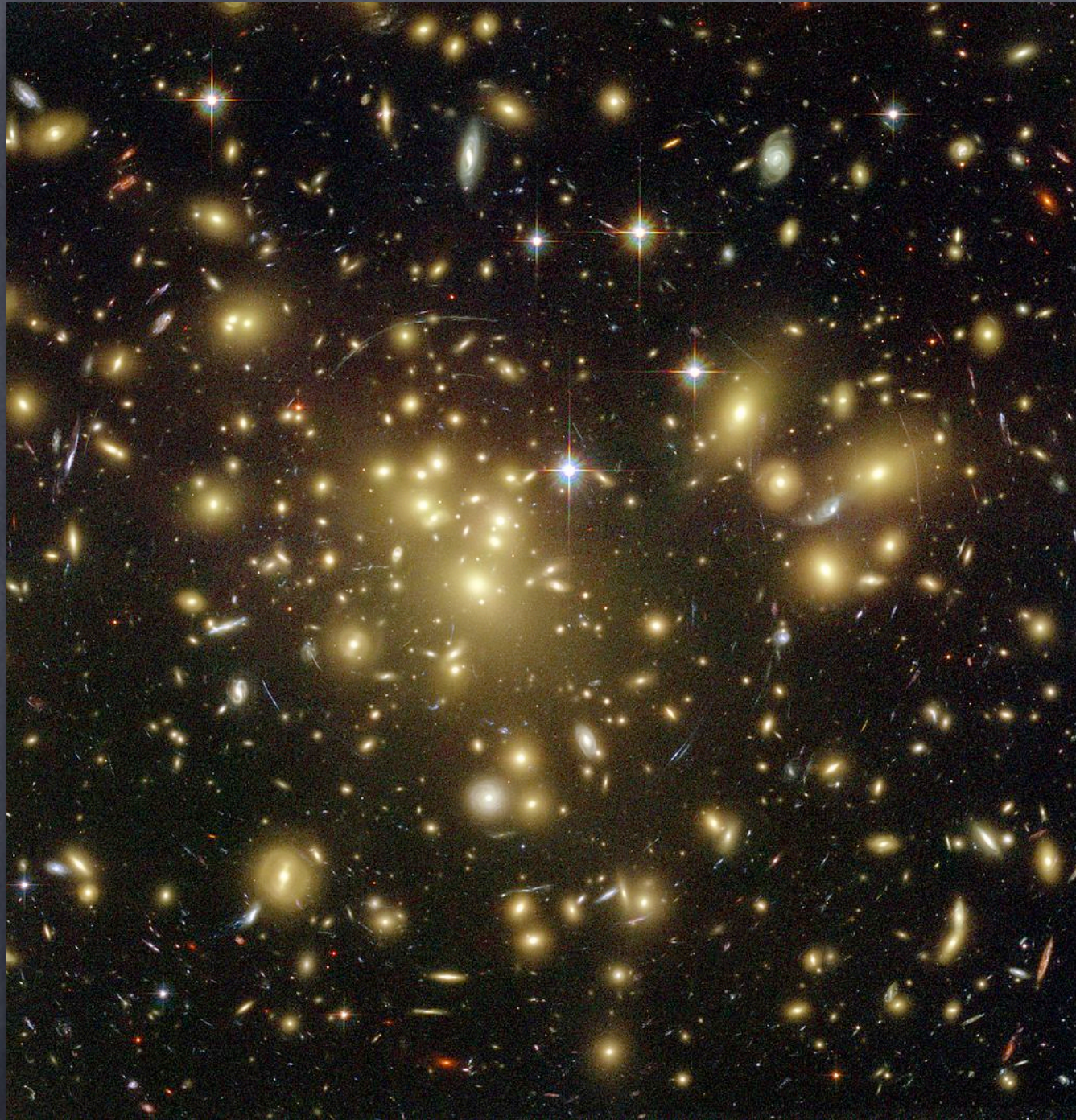
$$M(R) \sim R$$

Curve di rotazione

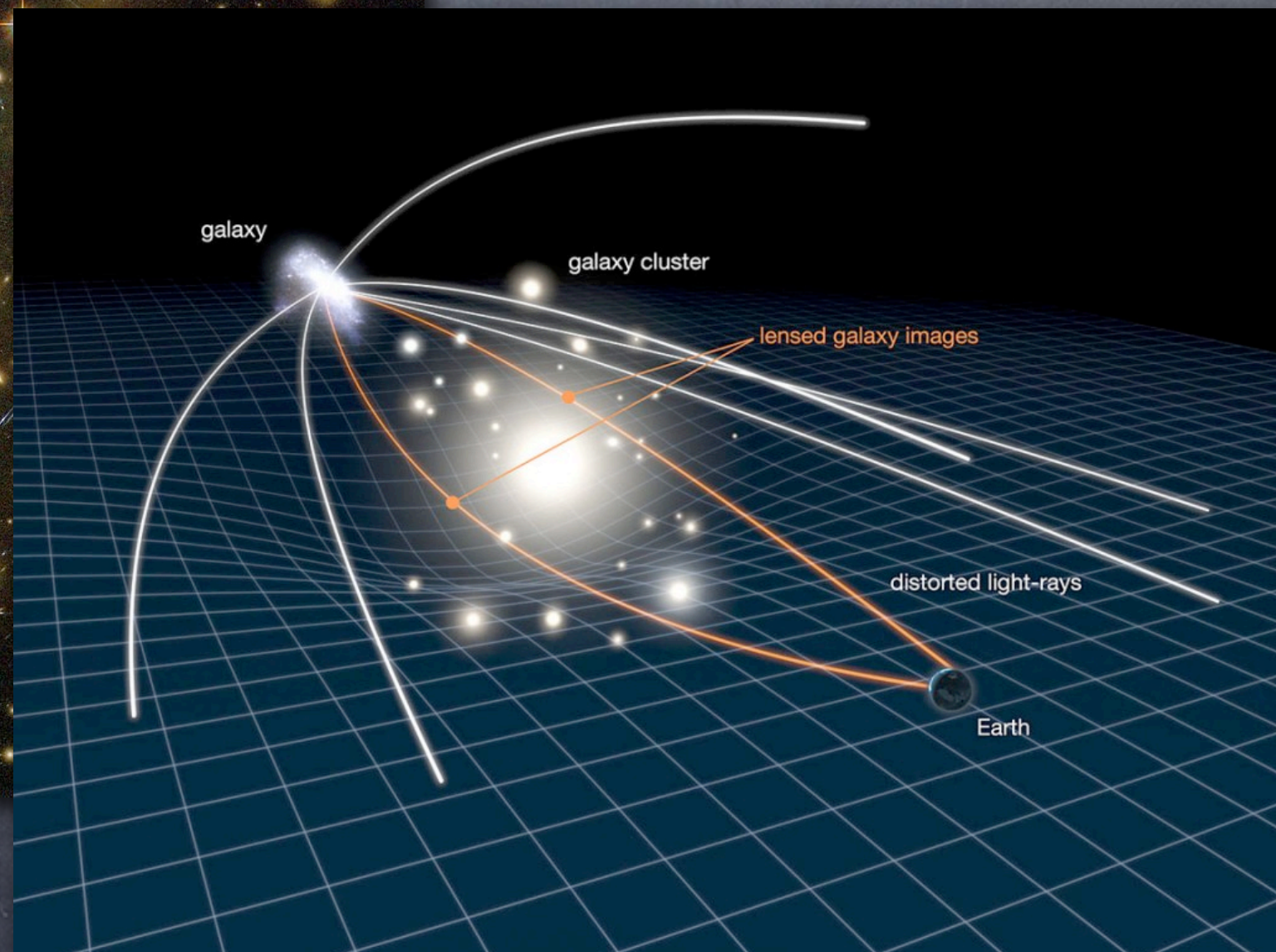
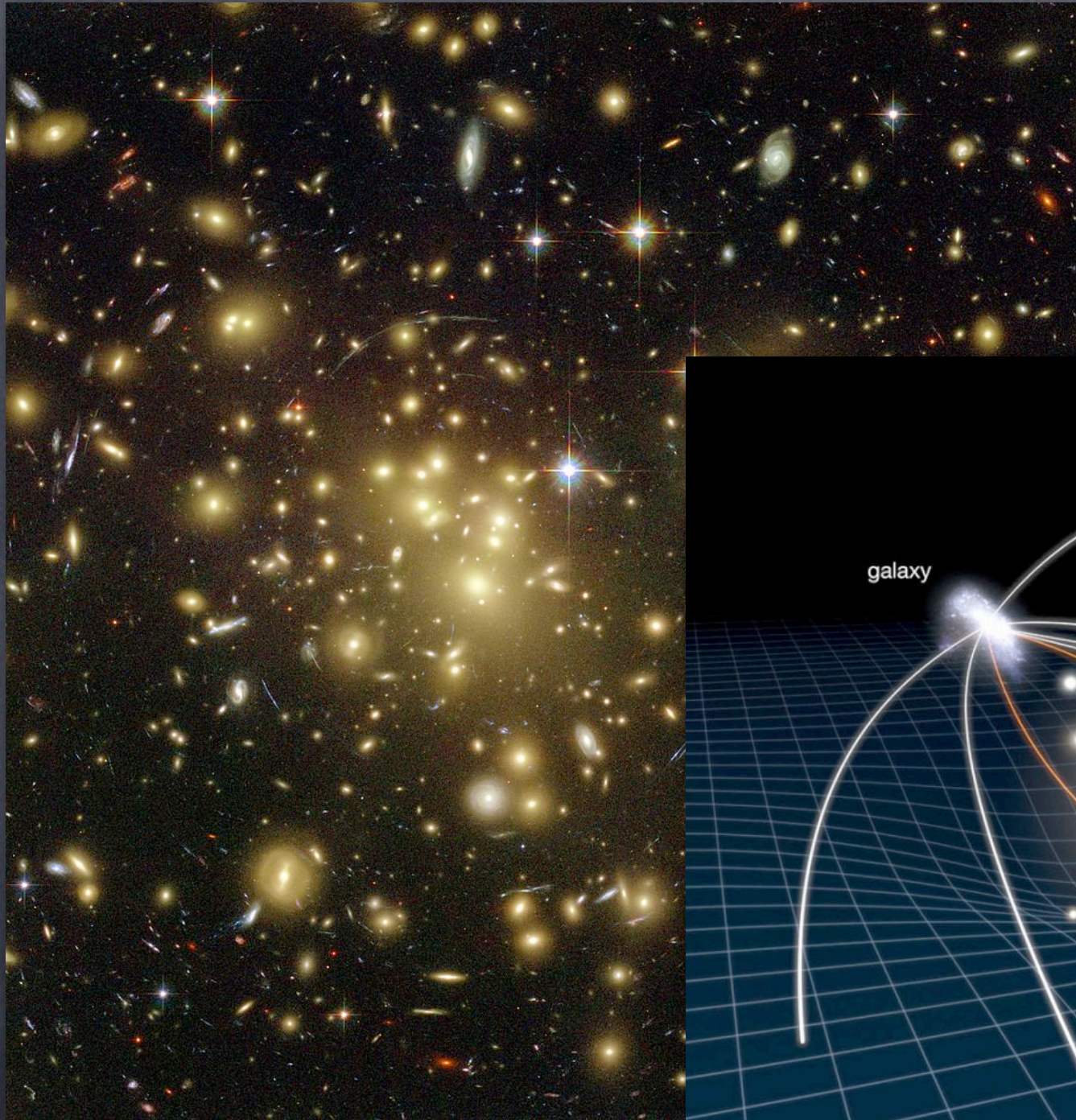


MGal solo
10-20%

Lenti gravitazionali



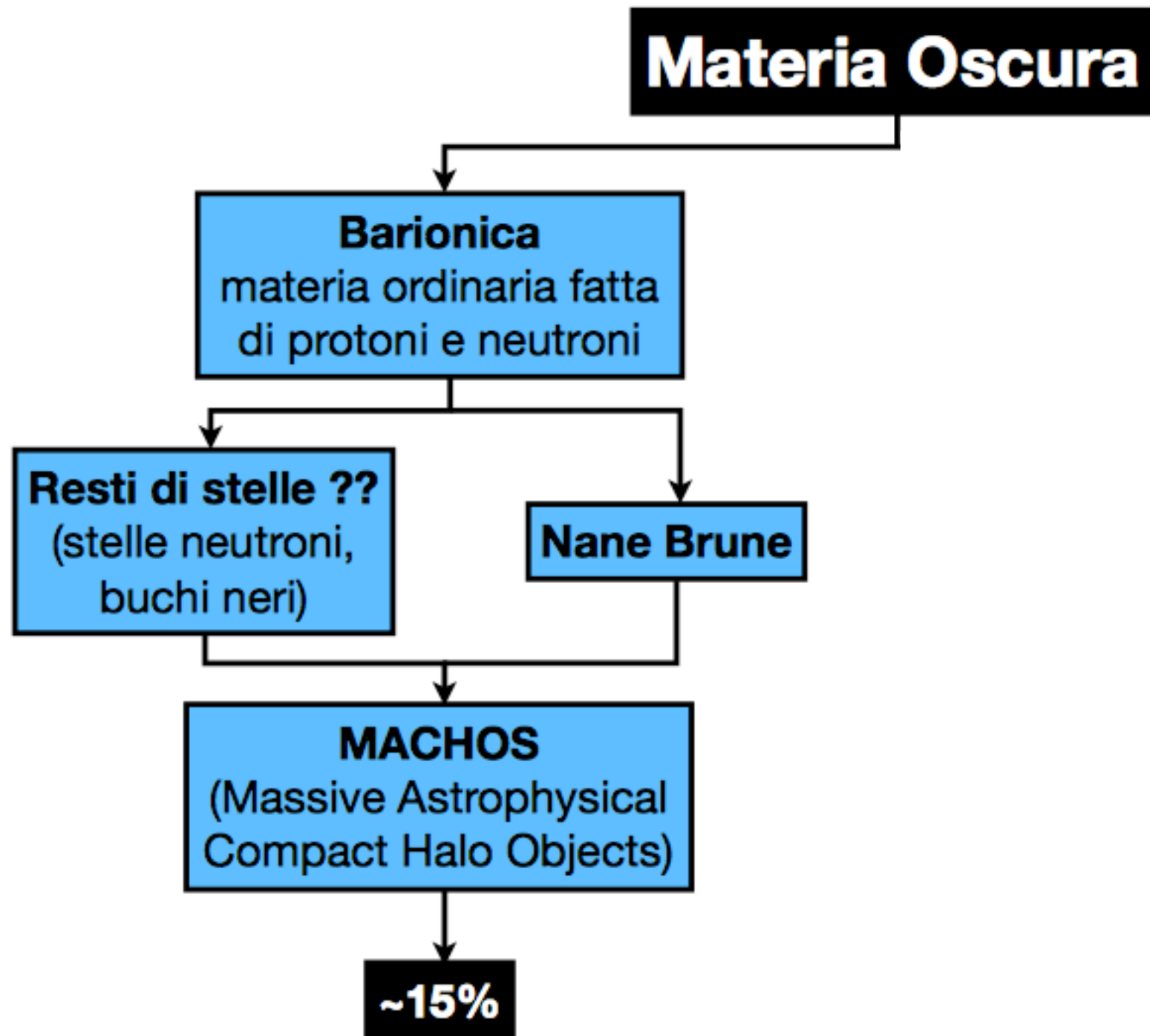
Lenti gravitazionali



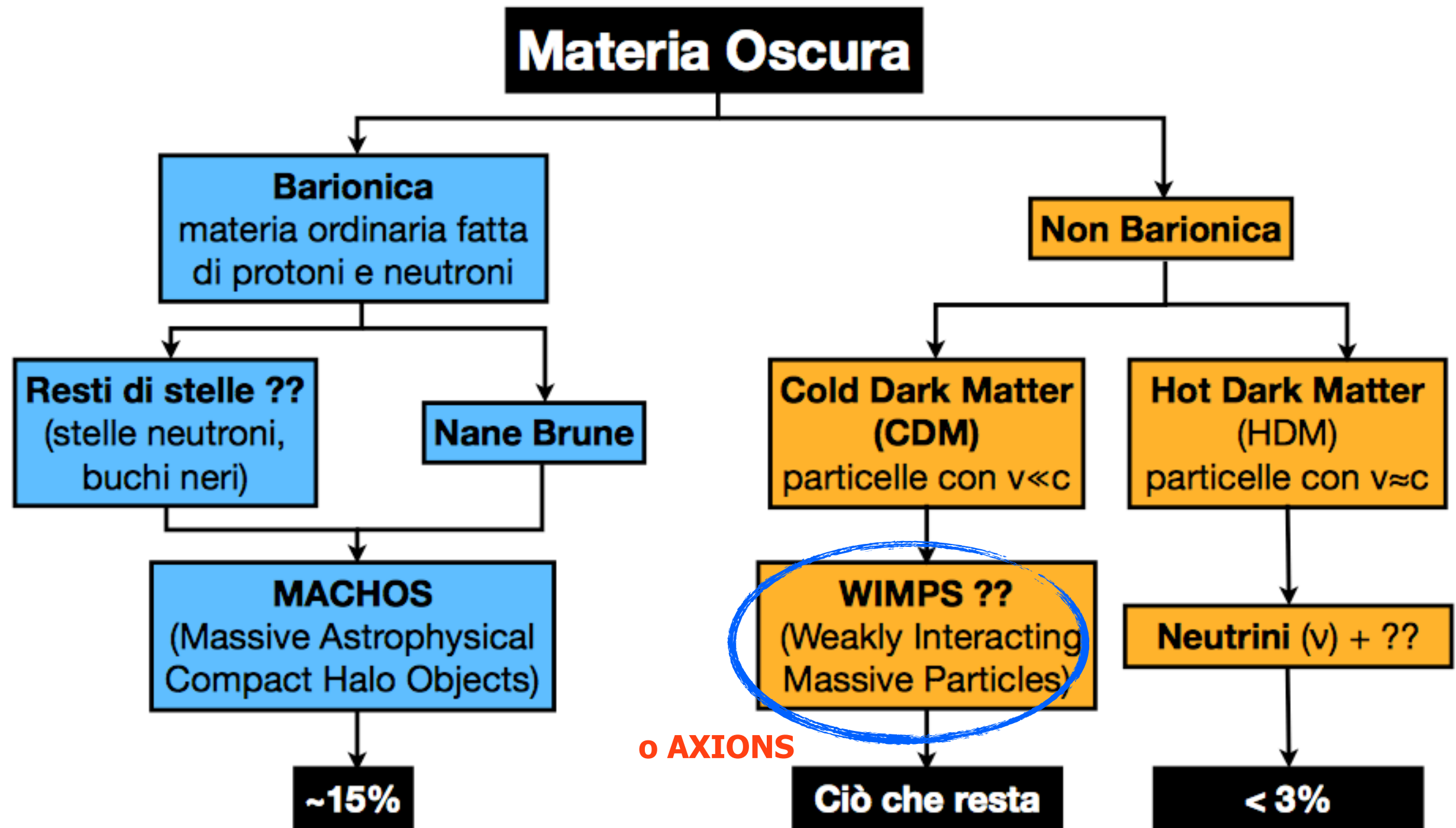
Candidati

Materia Oscura

candidati



candidati



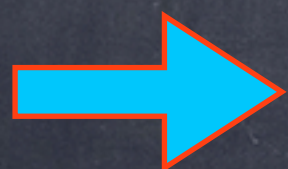
WIMPs

- 1) Debolmente interagenti (inter. debole)
- 2) Massiccie (per poter essere "fredde")
- 3) Stabili (almeno su circa 15 mld di anni)

WIMPs

- 1) Debolmente interagenti (inter. debole)
- 2) Massiccie (per poter essere "fredde")
- 3) Stabili (almeno su circa 15 mld di anni)

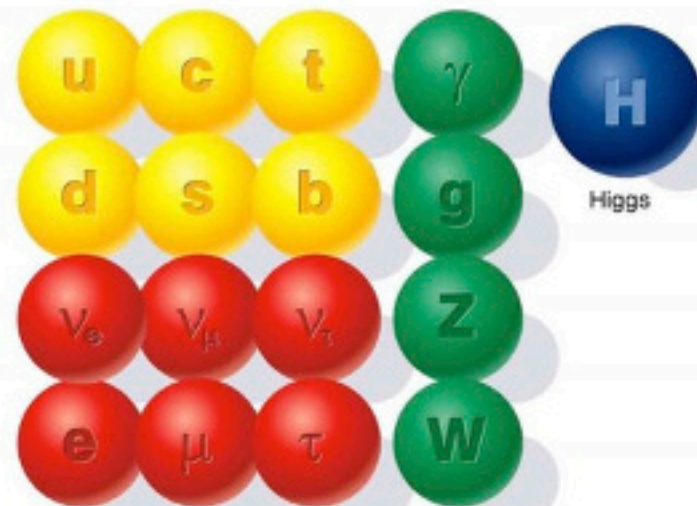
1) + cosmologia + fisica dell' int. debole ci fornisce anche indicazione della massa



M attorno al GeV o al TeV

"Supersimetría"

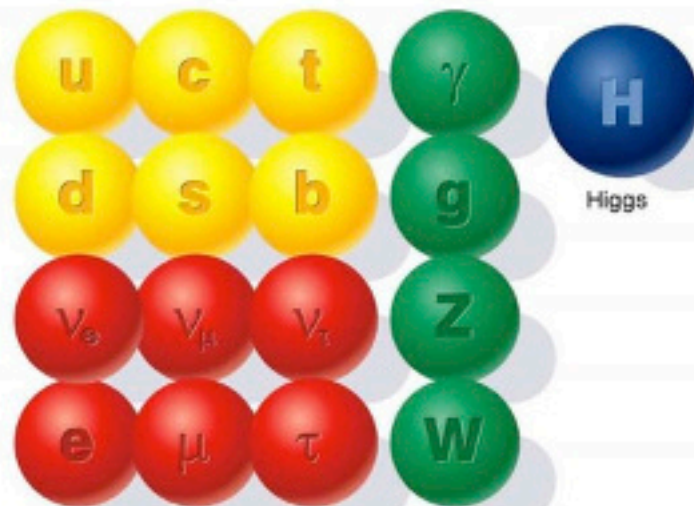
The known world of Standard Model particles



- quarks
- leptons
- force carriers

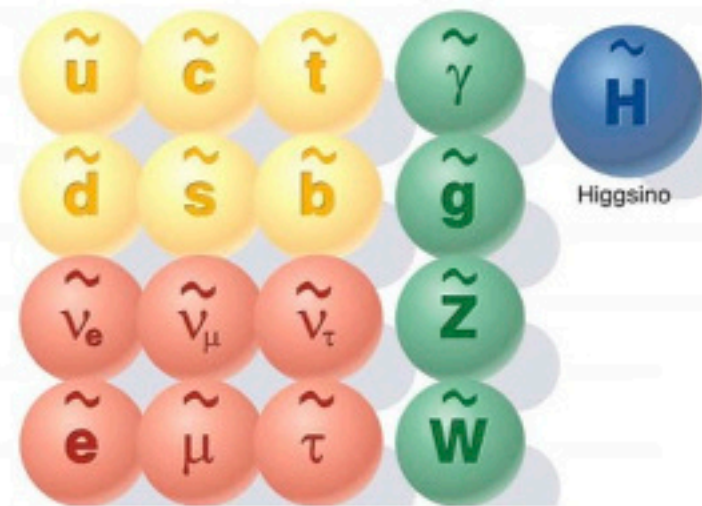
"Supersimetría"

The known world of
Standard Model particles



- quarks
- leptons
- force carriers

The hypothetical world of
SUSY particles

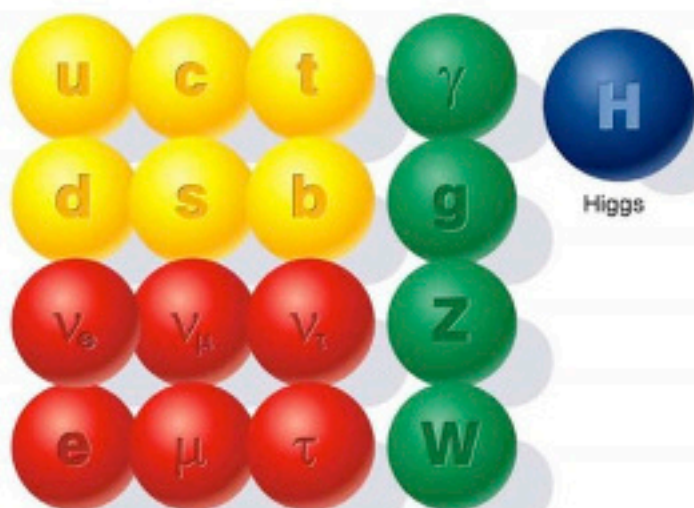


- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

"Supersimetría"

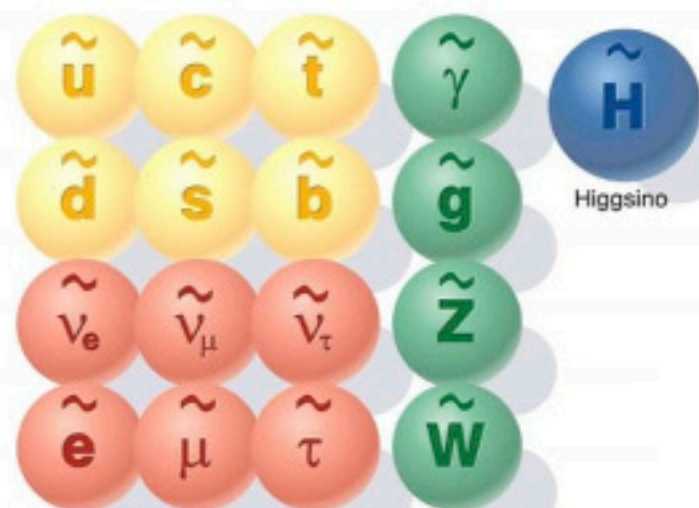


The known world of Standard Model particles



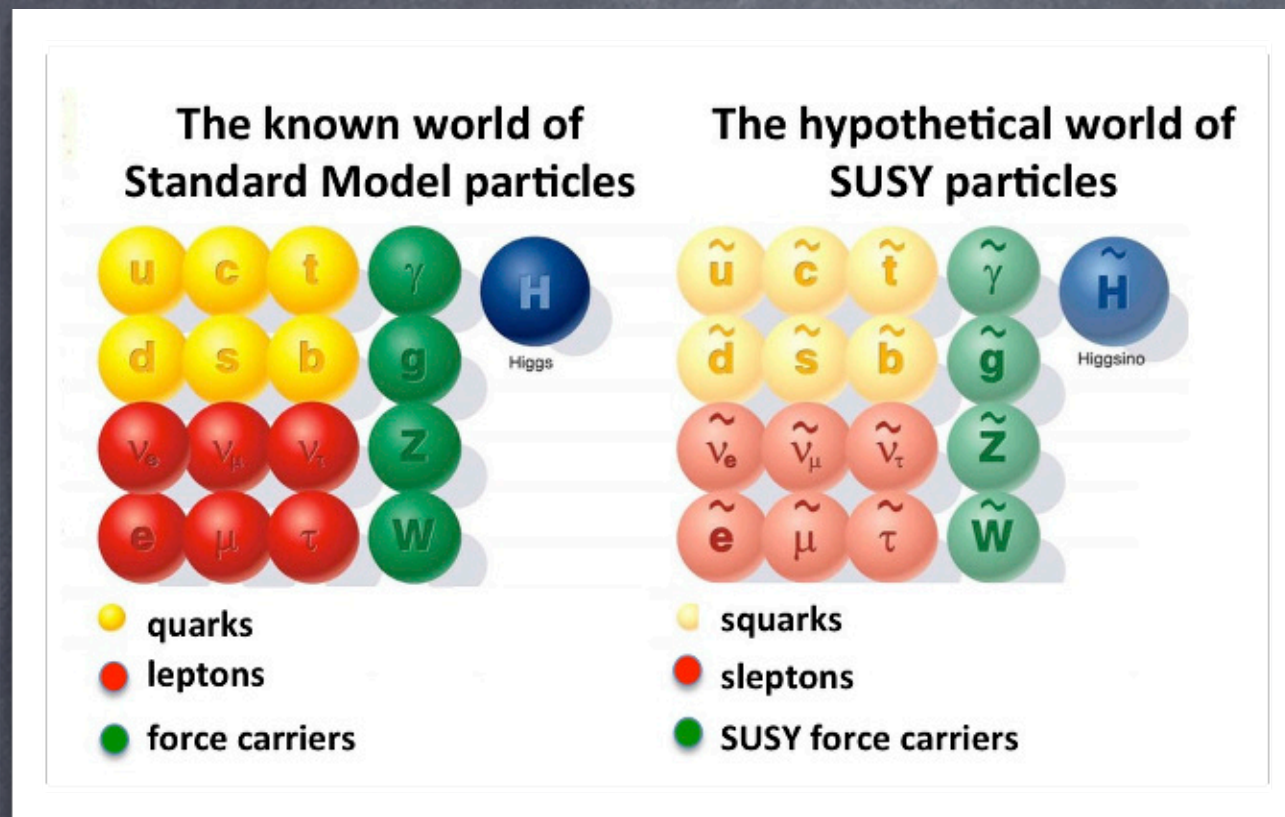
- quarks
- leptons
- force carriers

The hypothetical world of SUSY particles



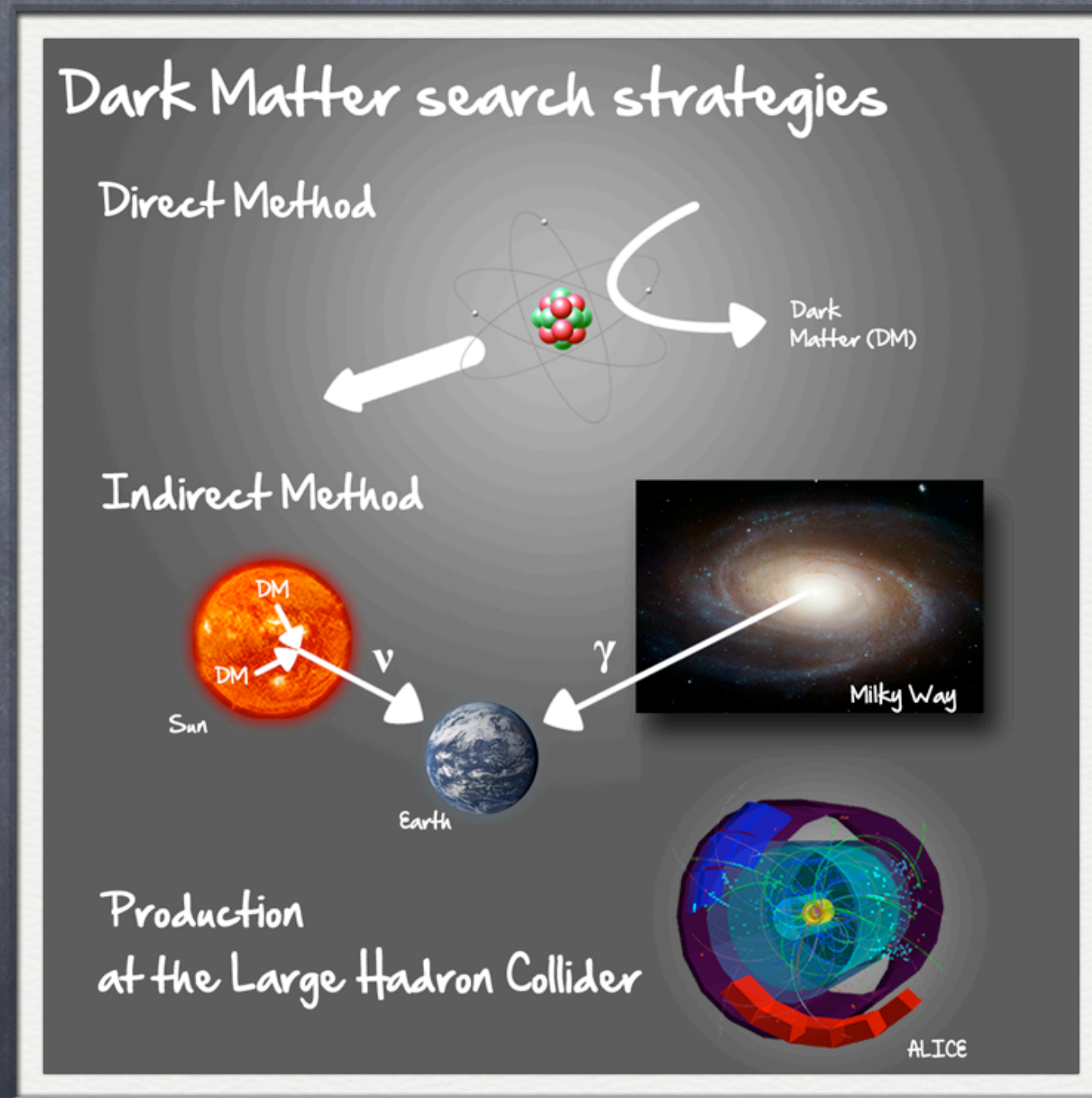
- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

"Supersimmetria"



Si pensa che oggi sia rimasta la particella supersimmetrica più leggera, chiamata **NEUTRALINO (X)**

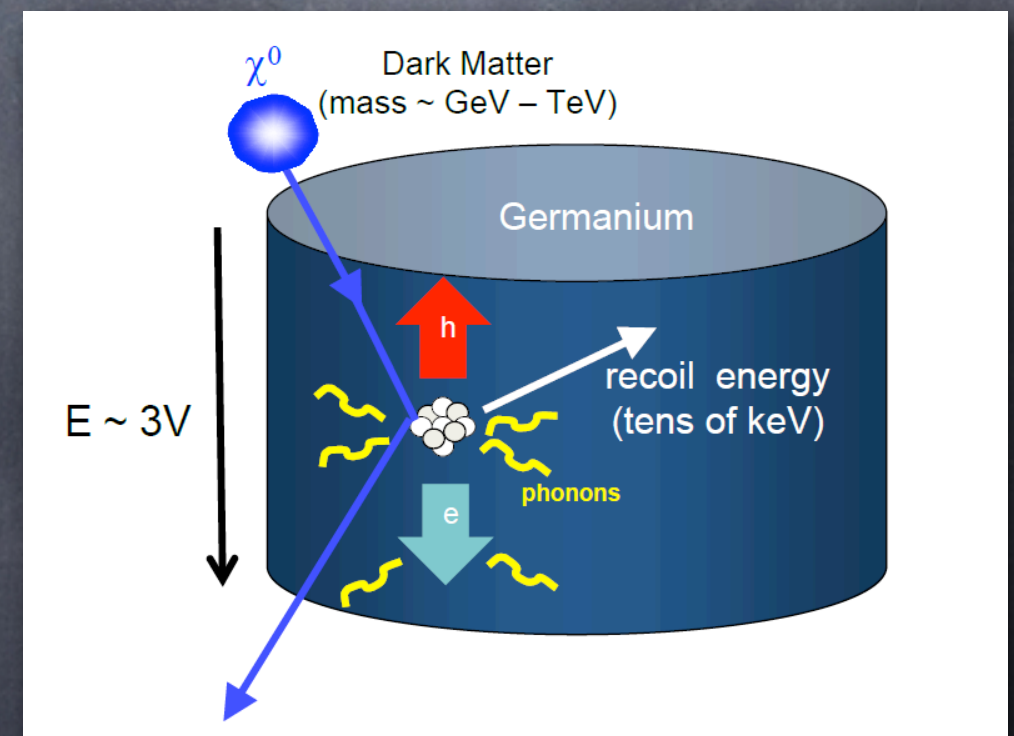
Alla ricerca della "schiappa"



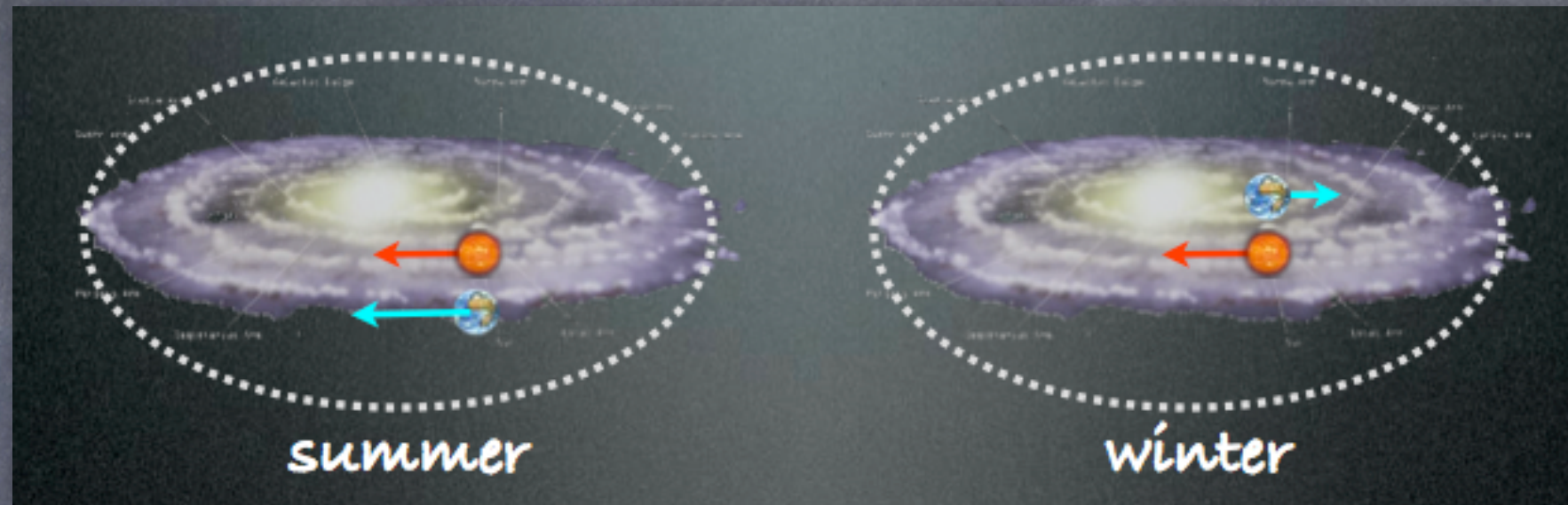
Rivelazione diretta



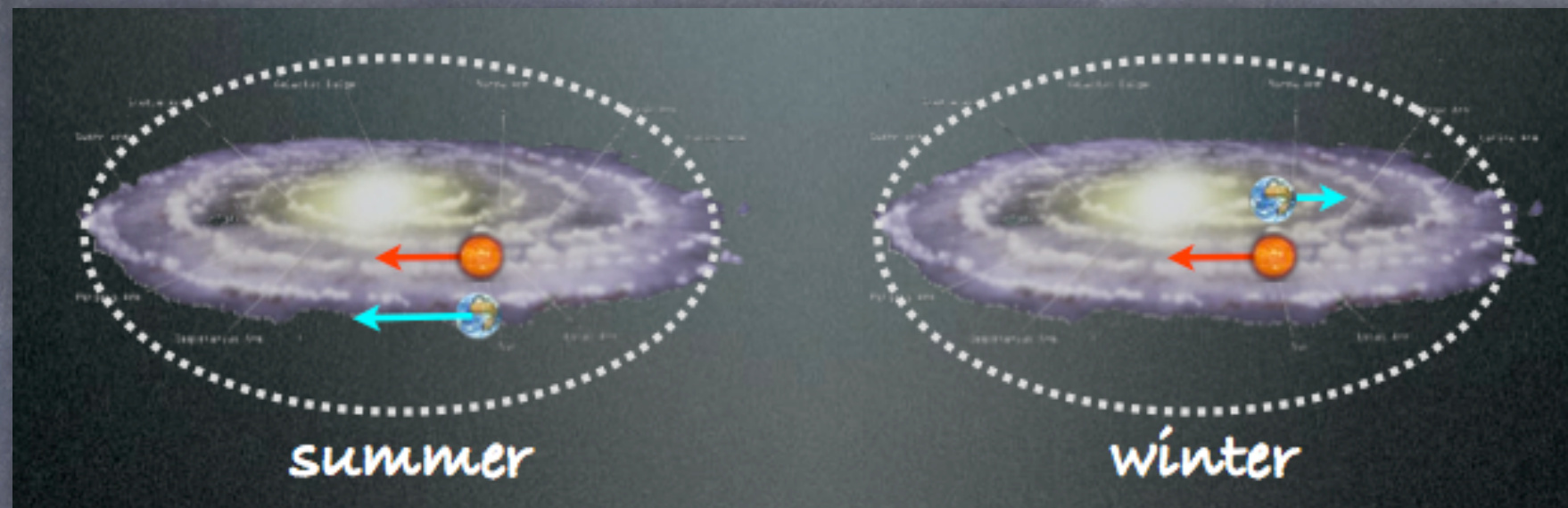
DAMA (Gran Sasso)
XENON (Gran Sasso)



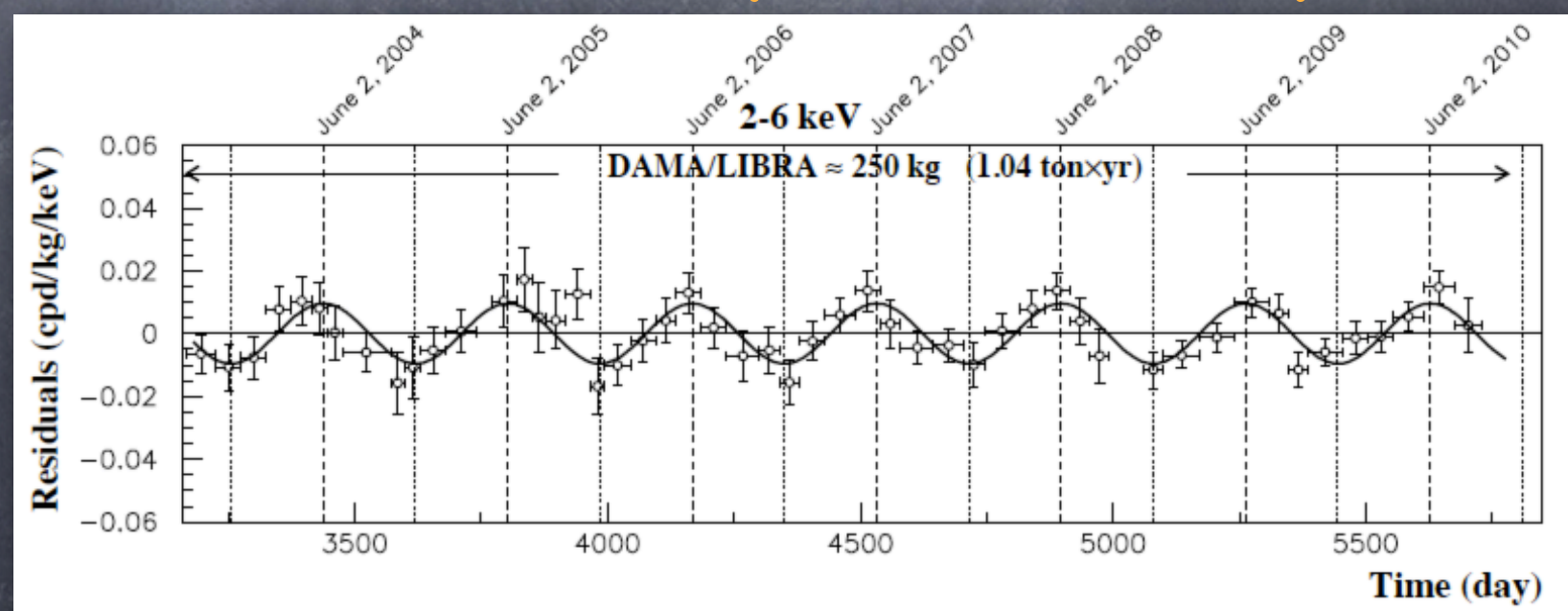
Rivelazione diretta



Rivelazione diretta

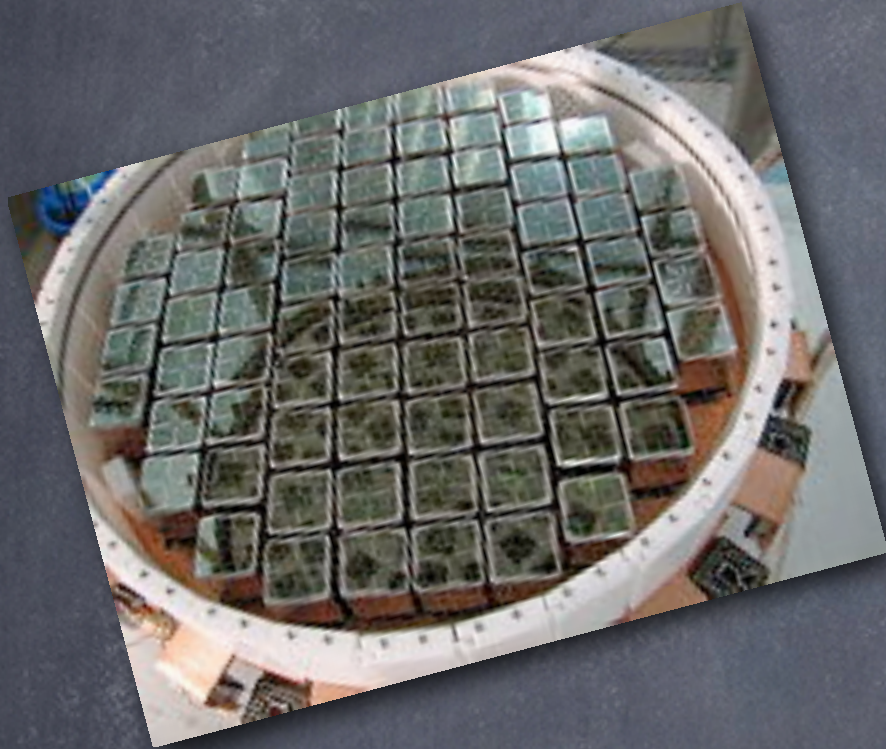


DAMA (Gran Sasso)



Rivelazione diretta

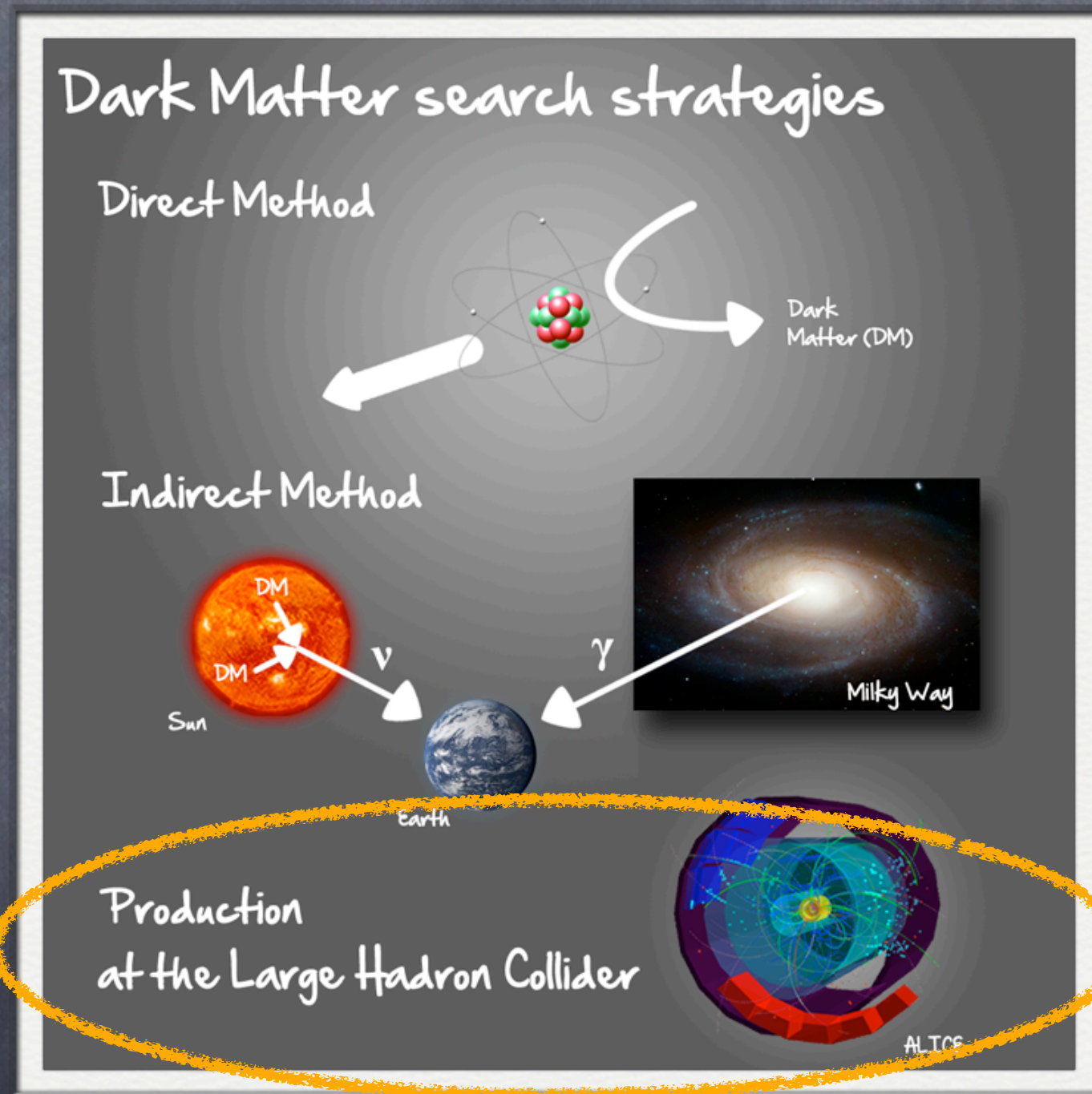
XENON100 (Gran Sasso)



Nessuna modulazione!

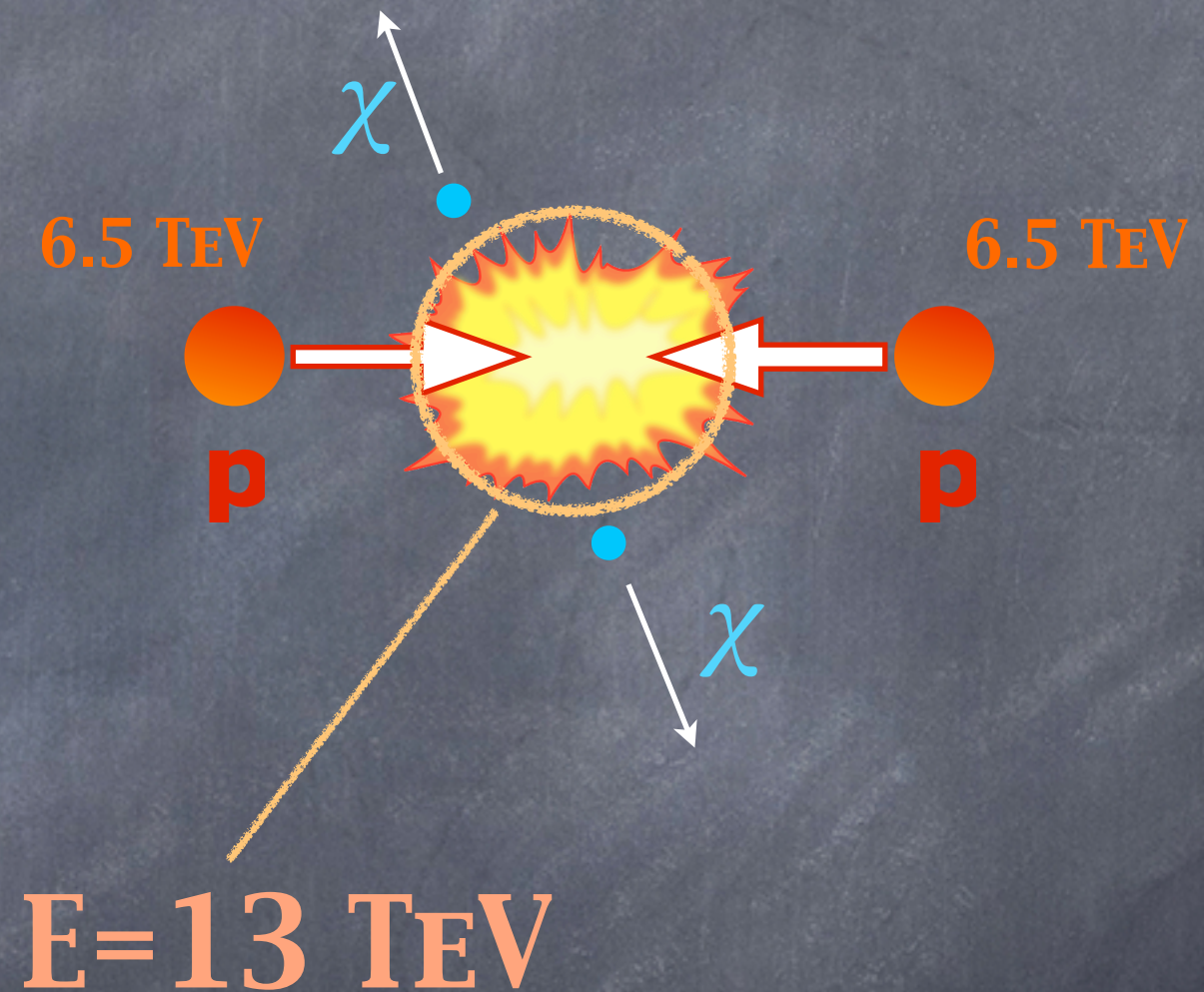


Alla ricerca della "schiappa"



Ricerca con gli acceleratori

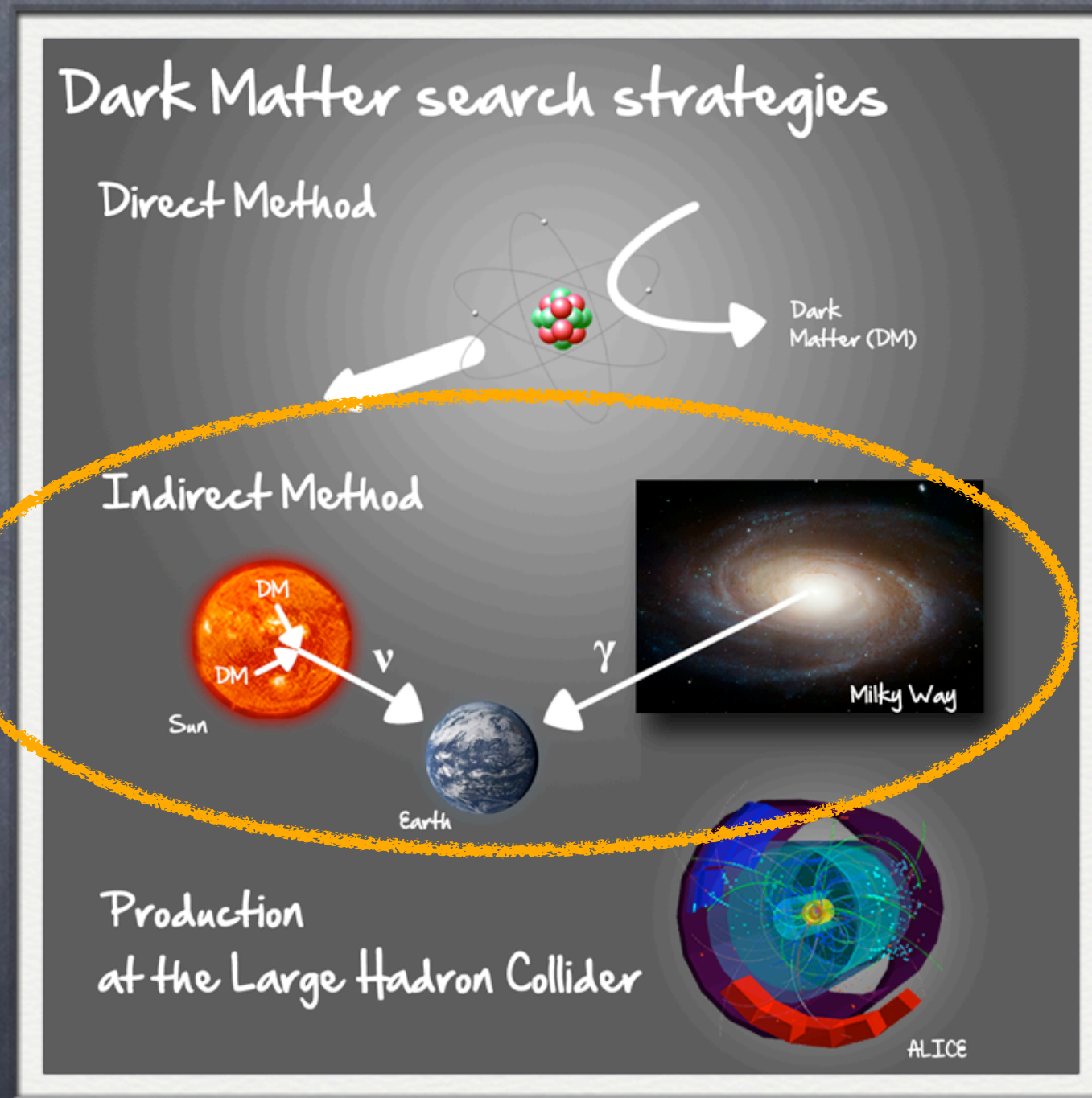
LARGE HADRON COLLIDER



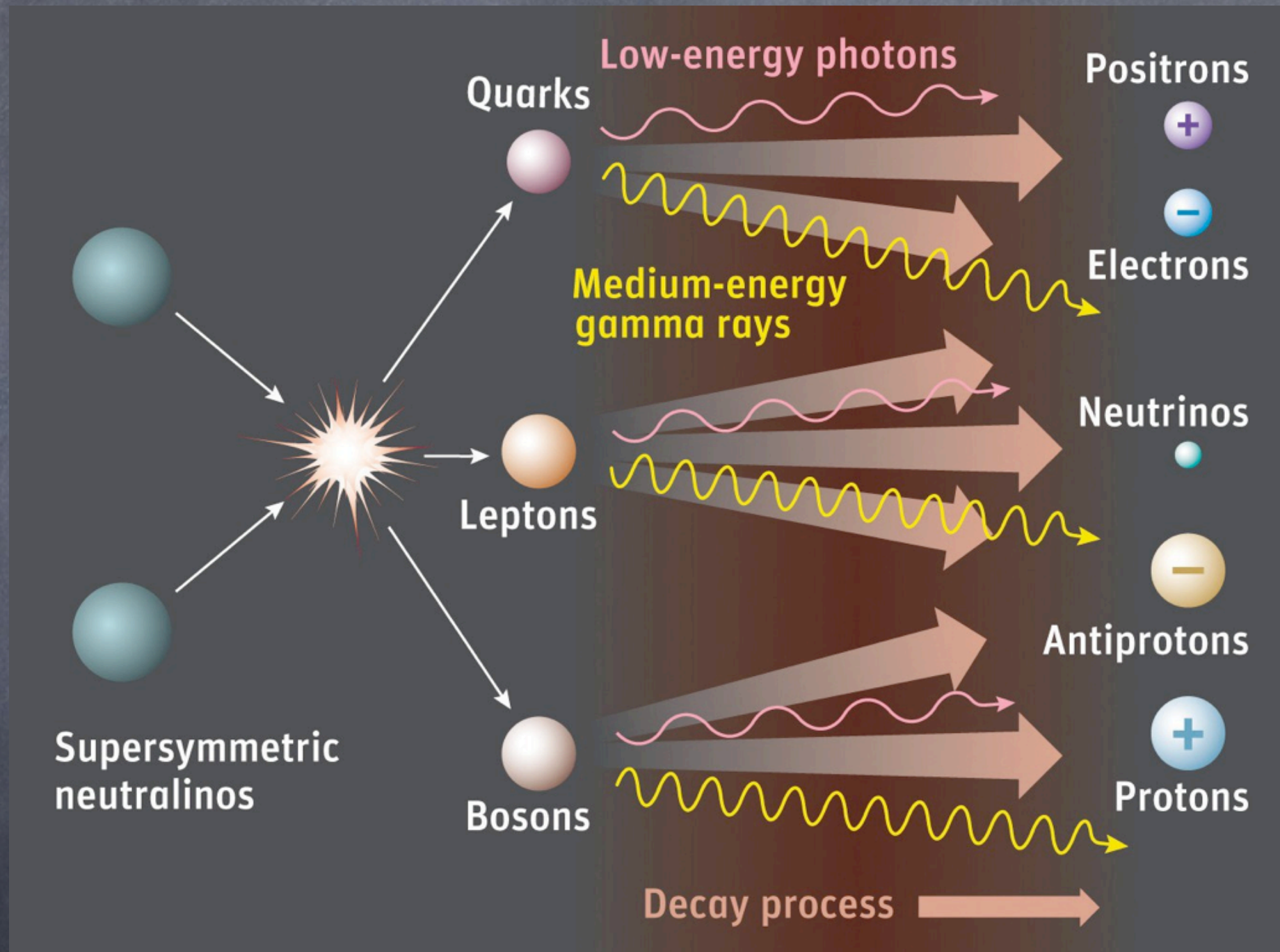
Nessun segnale, per ora ...

Alla ricerca della "schiappa"

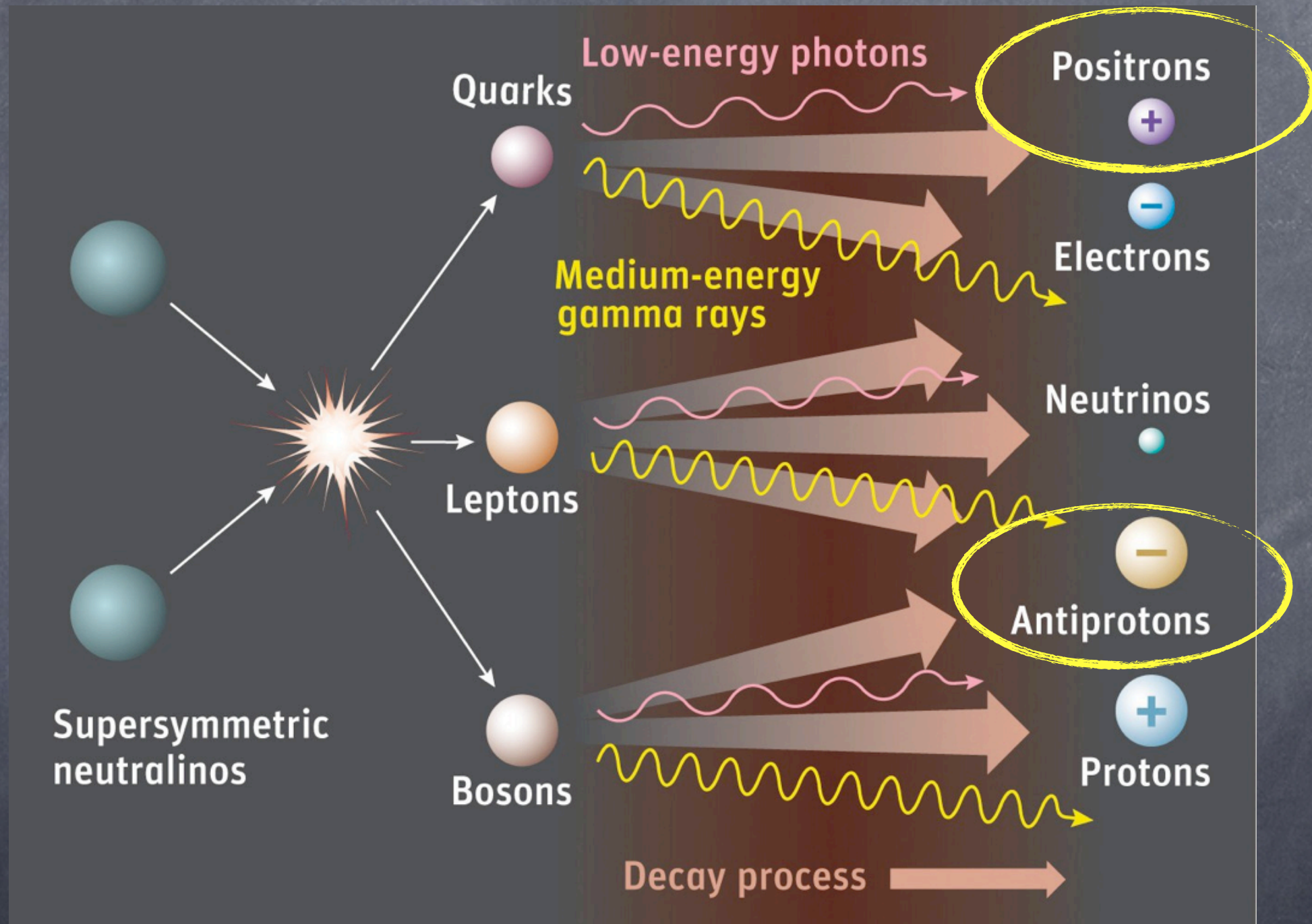
Astrofisica!



Astrofísica



Astrofísica



Flusso di **positroni** rilevato da diversi strumenti su satellite (PAMELA, LAT, AMS-02)



AMS-02 a bordo della ISS

Flusso di **positroni** rilevato da diversi strumenti su satellite (PAMELA, LAT, AMS-02)

Prodotto di decadimento
della **materia oscura**?

Origine **astrofisica**?

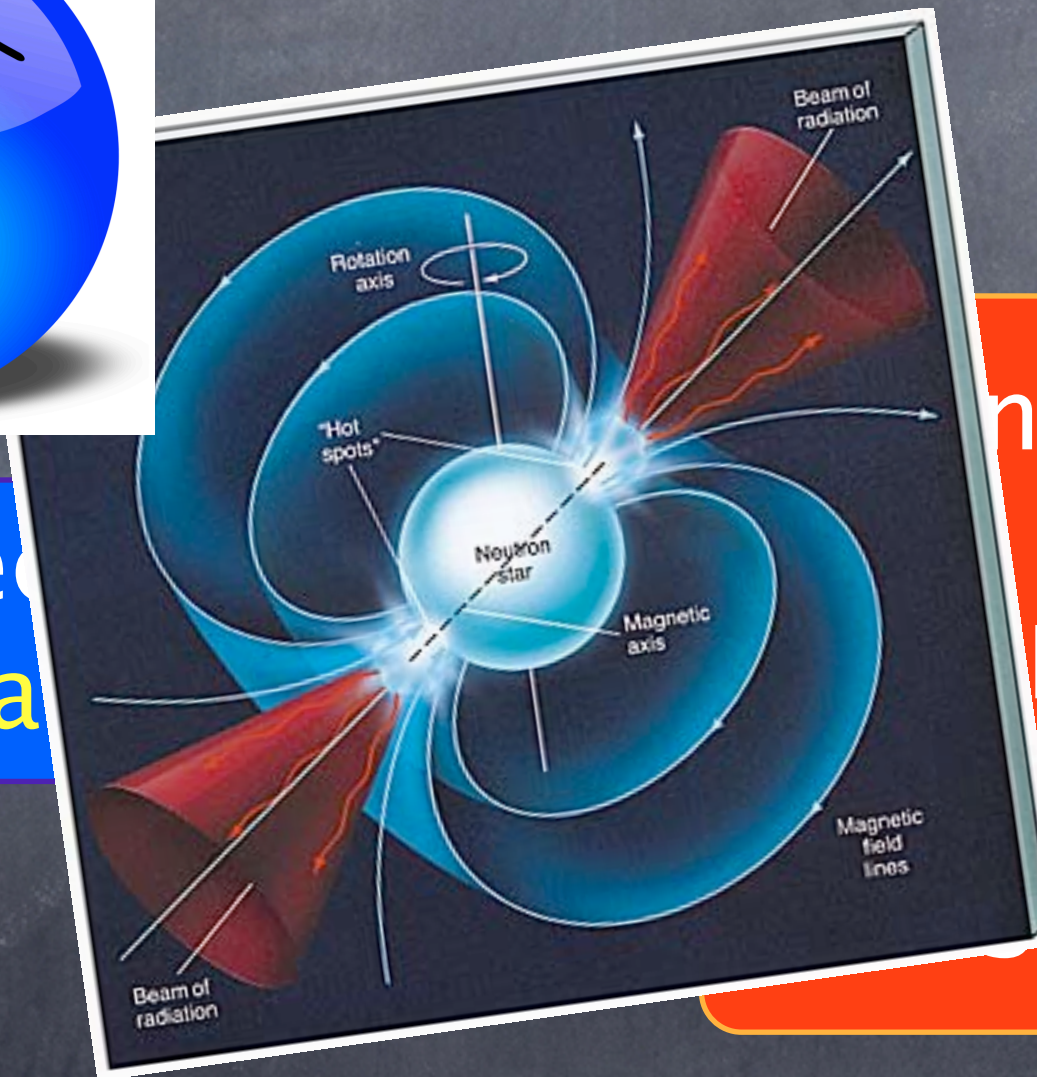
pulsars
resti di supernova
raggi cosmici

“Therefore, we conclude by saying that both DM and astrophysical sources are perfectly viable interpretations of AMS-02 measurements” (Luglio 2015)

Flusso di **positroni** rilevato da diversi
strumenti su satellite (PAMELA, LAT, AMS-02)



Prodotto di decadimento
della **materia**



ne **astrofisica?**

pulsars
di supernova
raggi cosmici

Eccesso di **anti-protoni** rilevato da diversi strumenti su satellite (PAMELA, LAT, AMS-02)



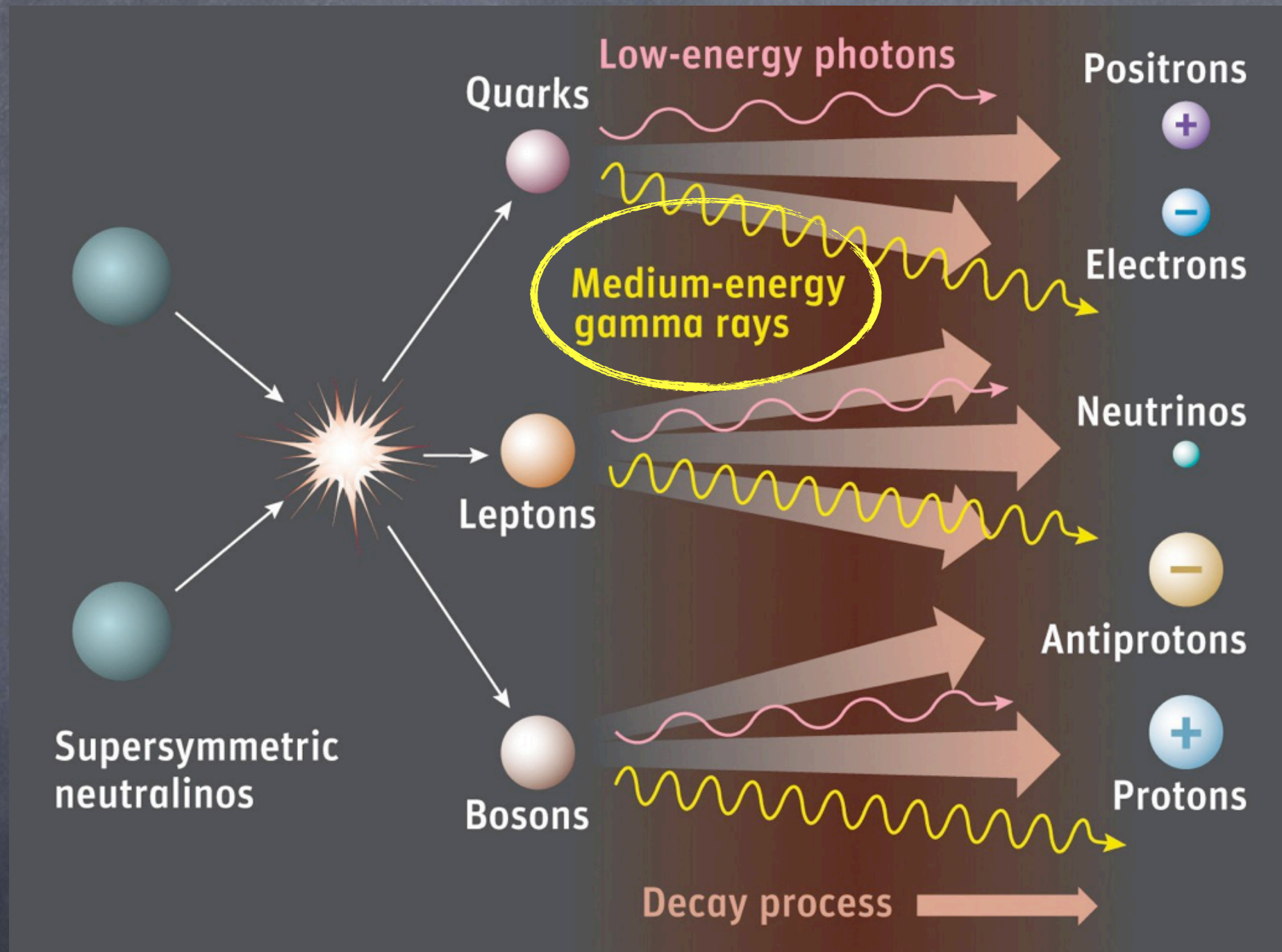
Eccesso di **anti-protoni** rilevato da diversi strumenti su satellite (PAMELA, LAT, AMS-02)

Prodotto di decadimento
della **materia oscura**?



Origine **astrofisica**?
raggi cosmici

Alla ricerca della "schiappa"



Raggi gamma



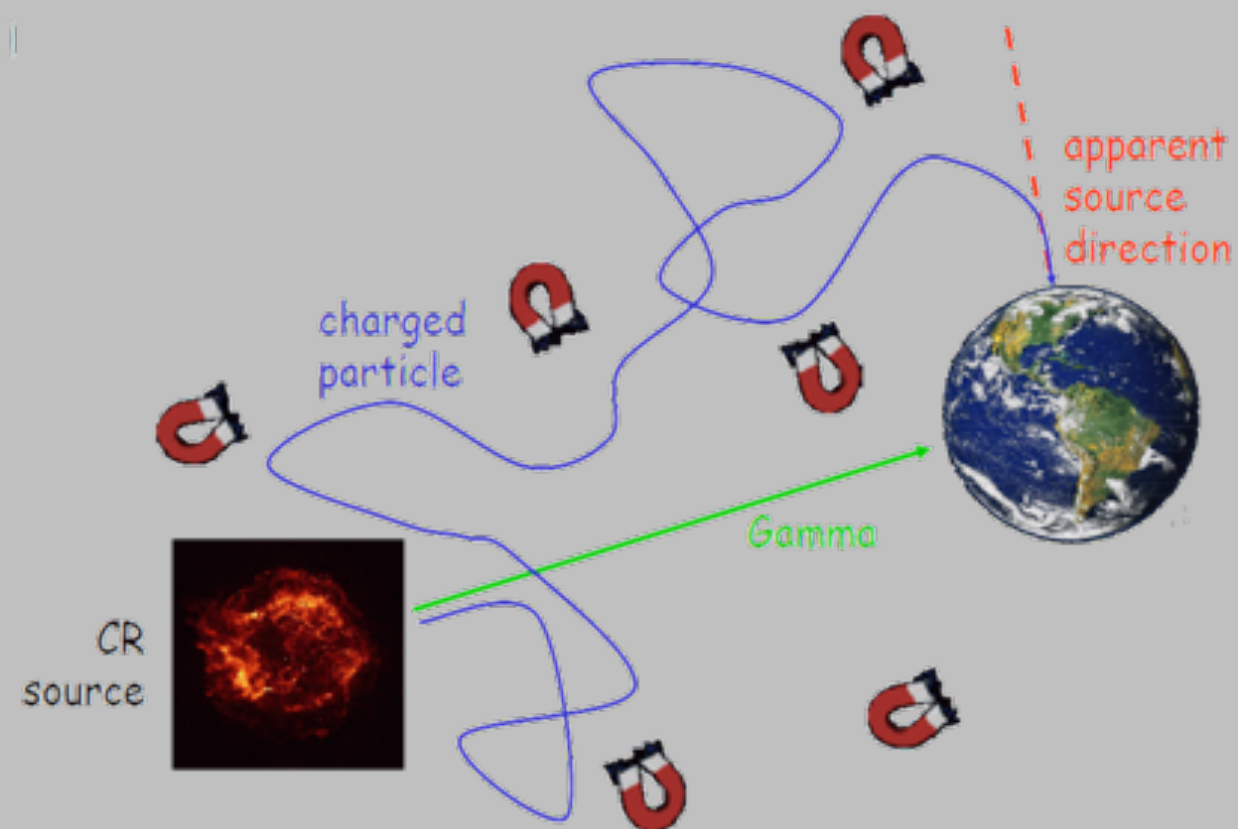
Da spazio:
GeV

Da terra:
TeV



Raggi gamma

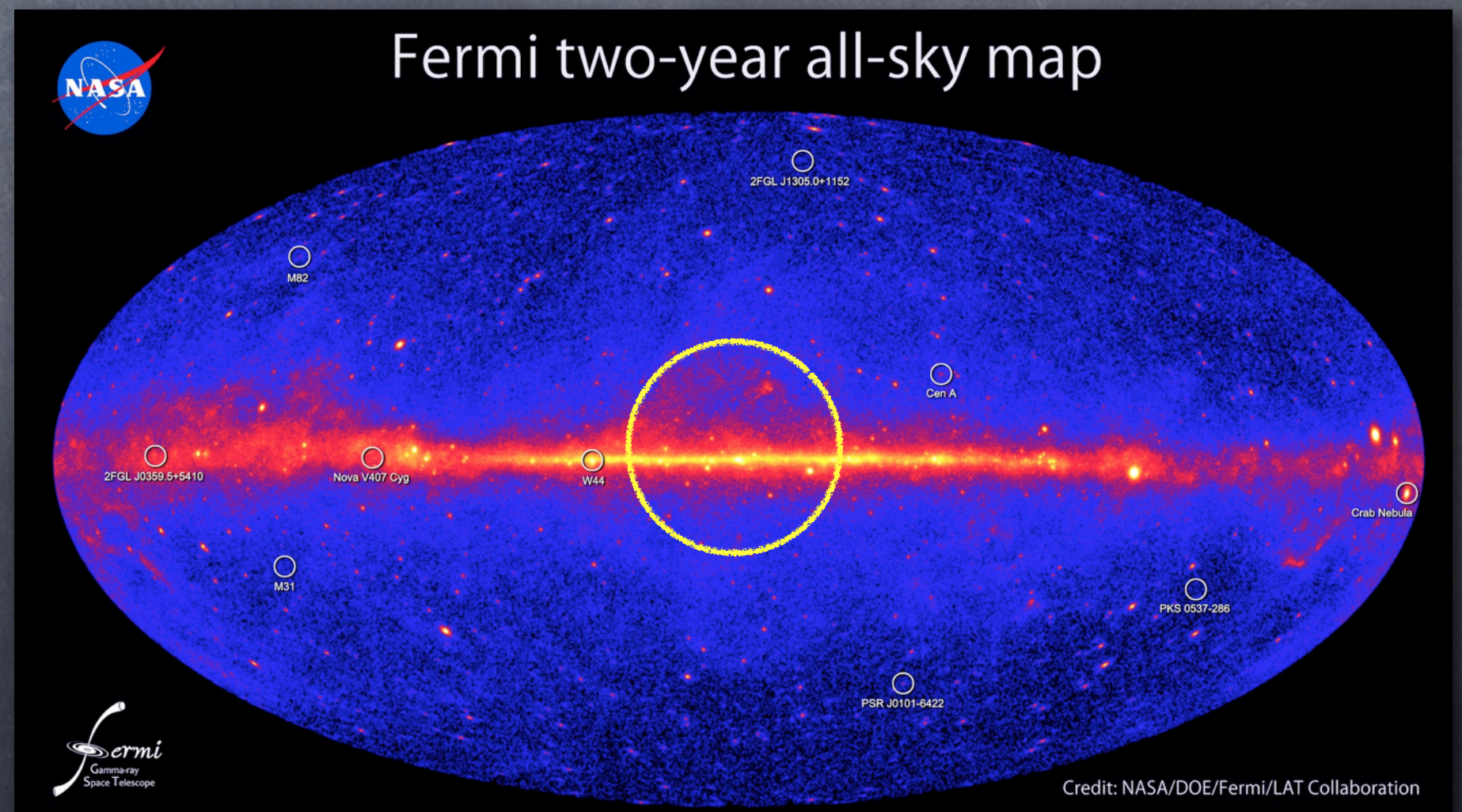
||



Raggi gamma

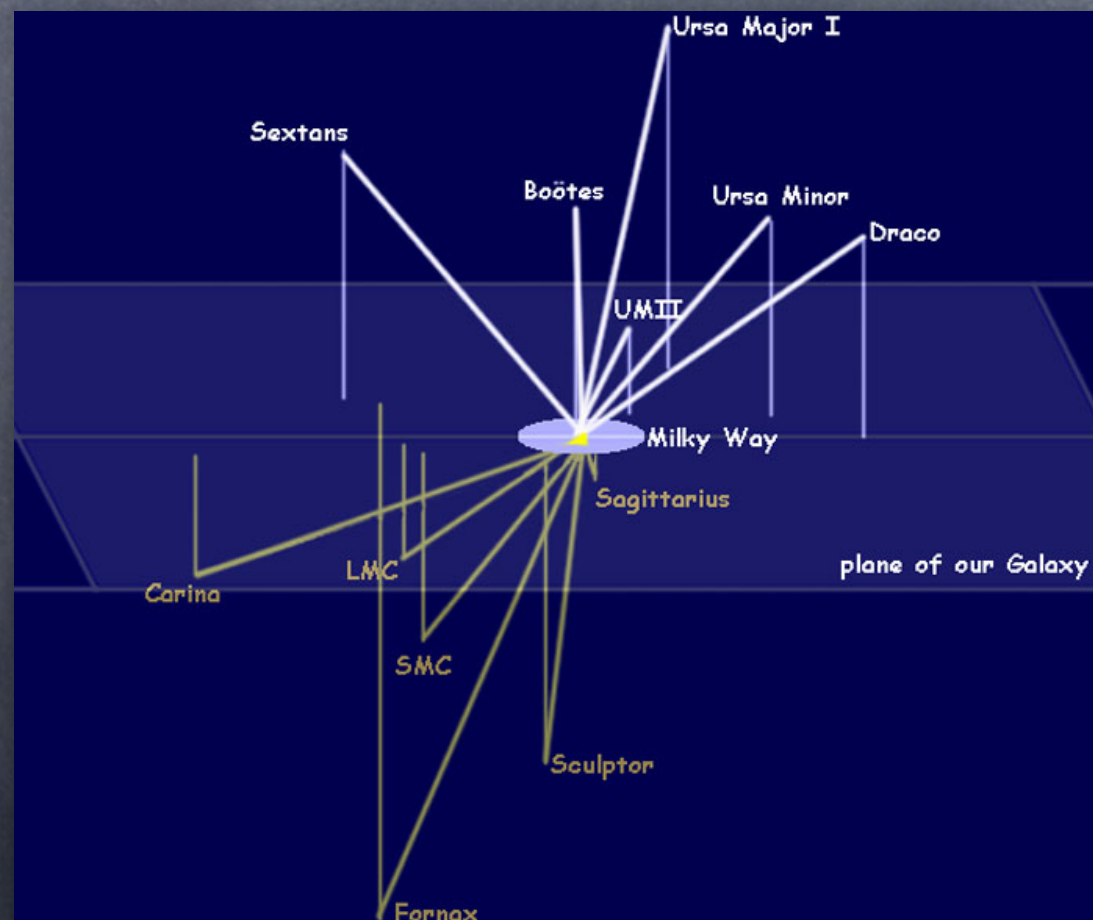
Obiettivo primario:
alta densità - piccola distanza

**Centro
galattico**



Galassie nane sferoidali

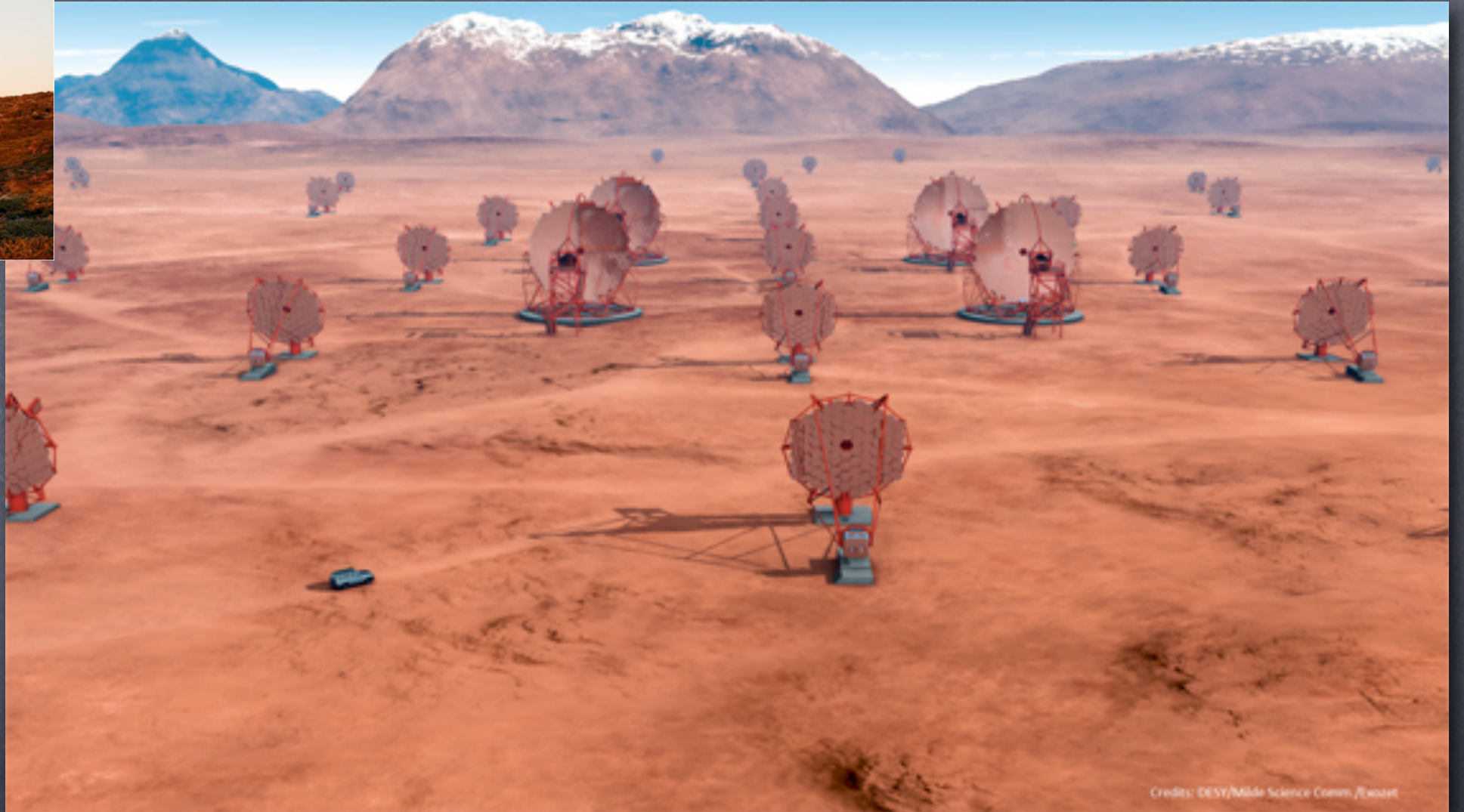
Minima contaminazione!



Raggi gamma

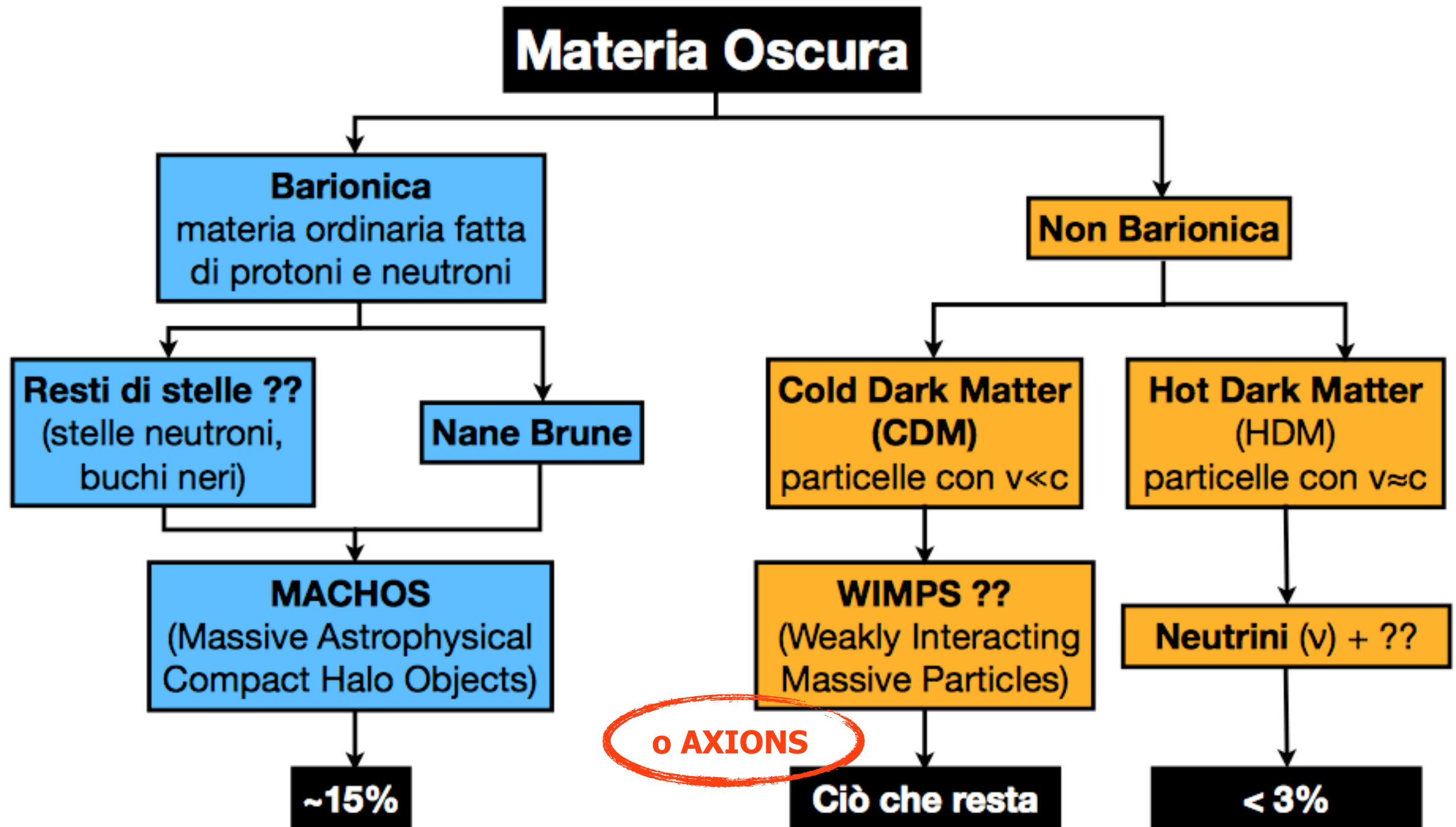


Oggi



Domani: CTA

candidati



Assioni o axion-like particles (ALPs)

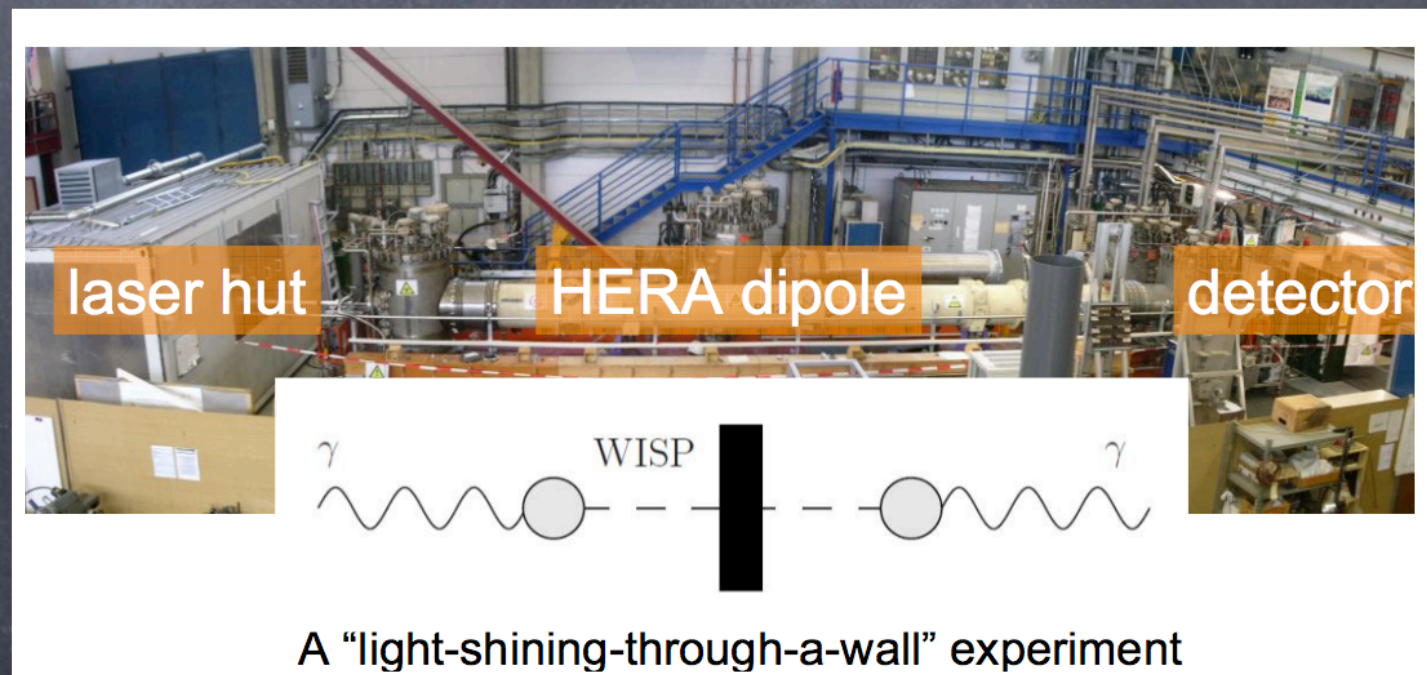
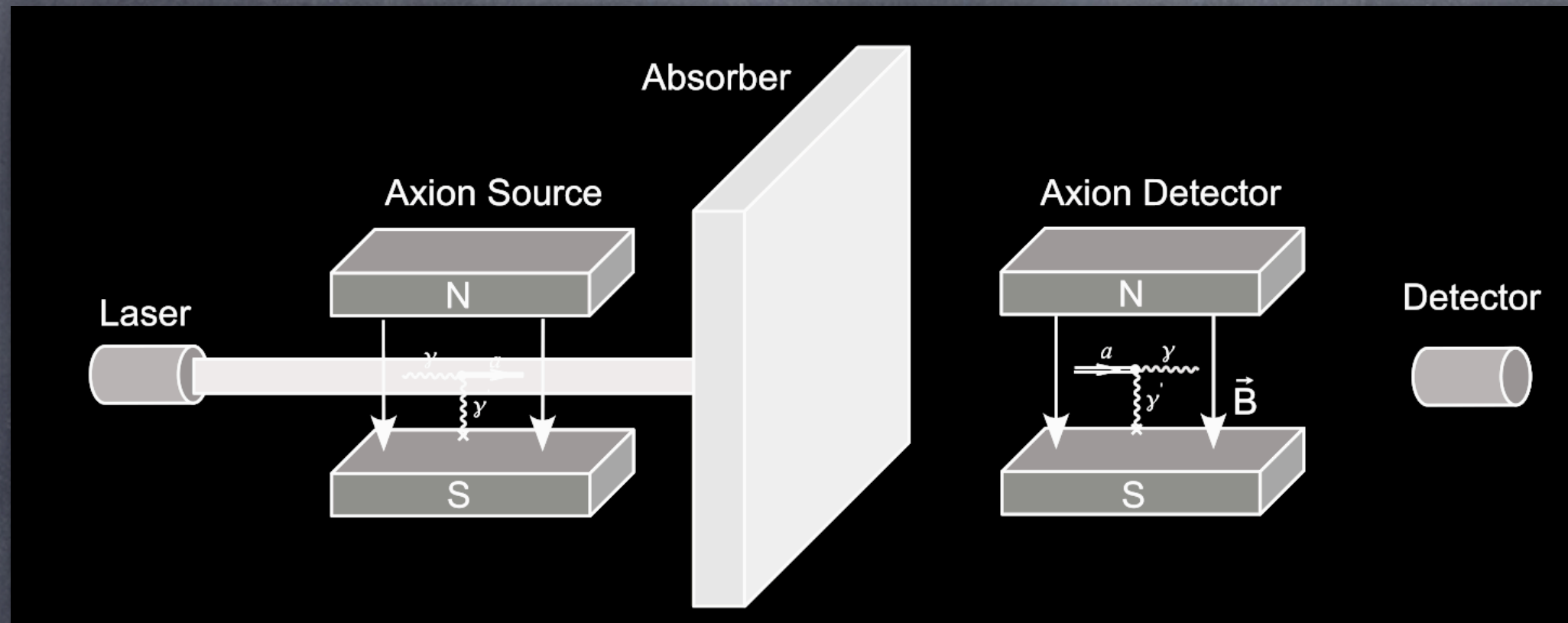
- Massa piccola
- Elettricamente neutri
- Poco interagenti

Previste in diverse teorie che estendono il modello standard (es. stringhe)

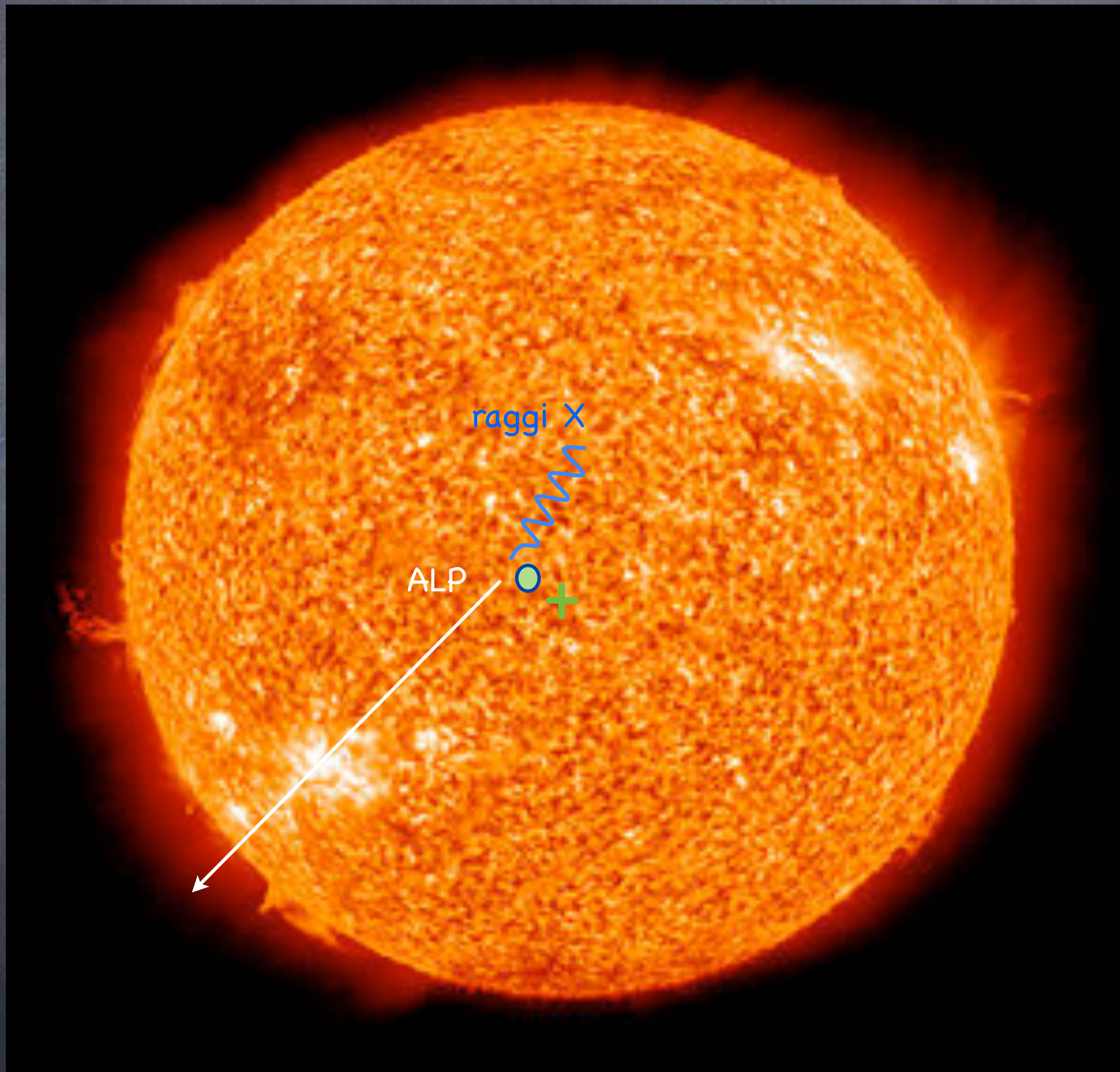


ALPs si possono trasformare in fotoni (e viceversa) in presenza di un campo magnetico/elettrico

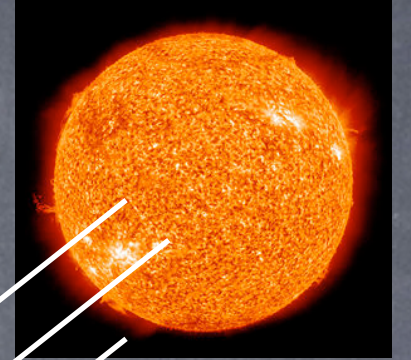
Esperimenti con parete



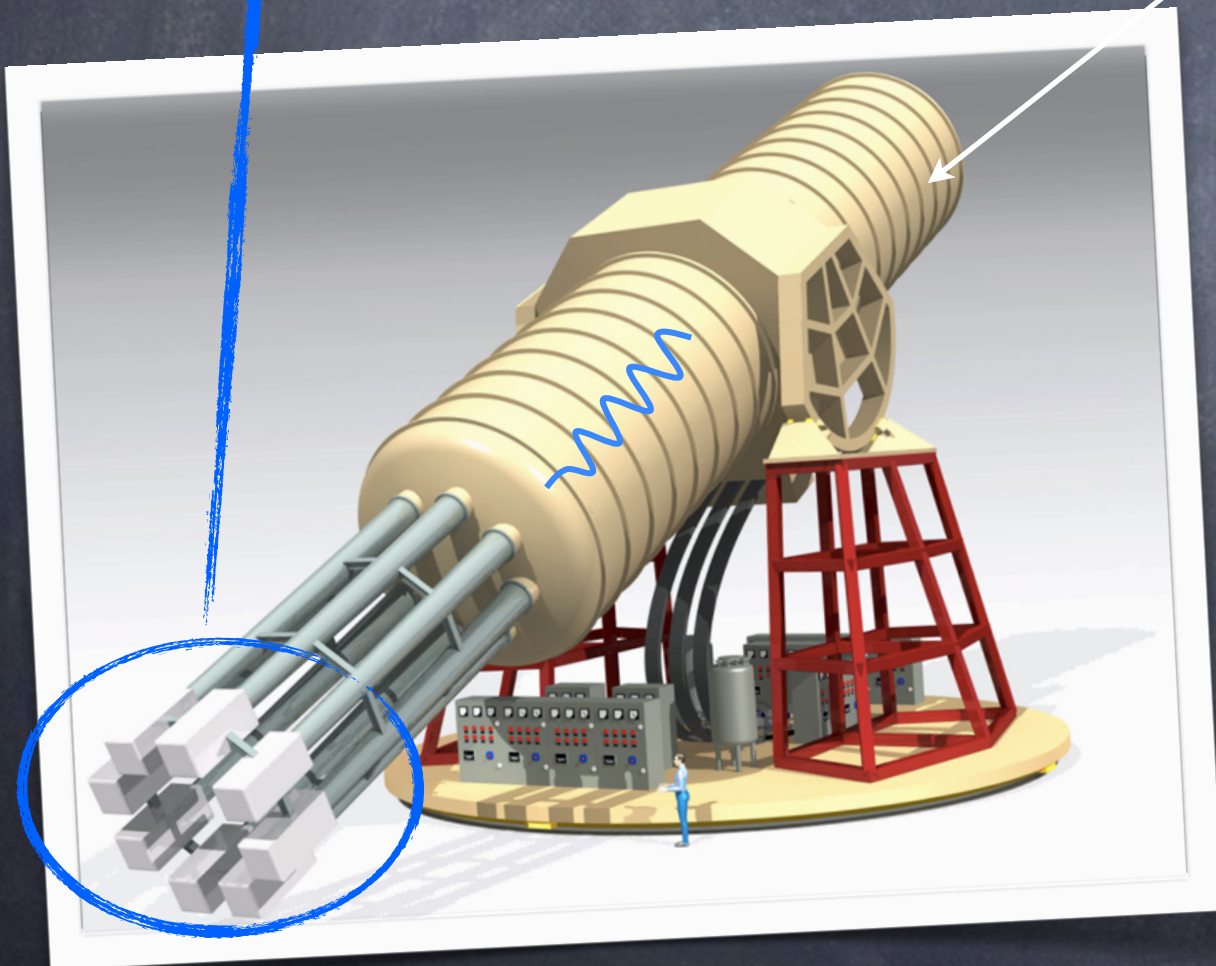
il Sole come sorgente di ALP!

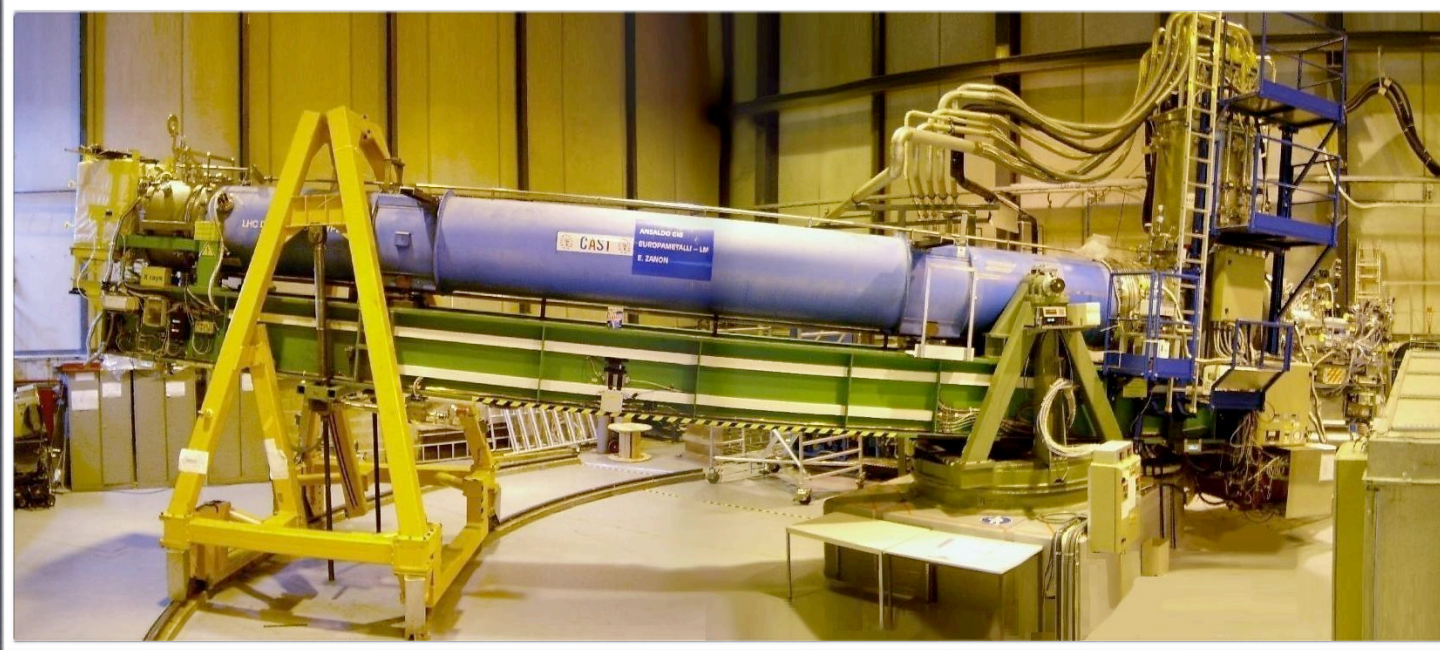


Il Sole come sorgente di ALP!



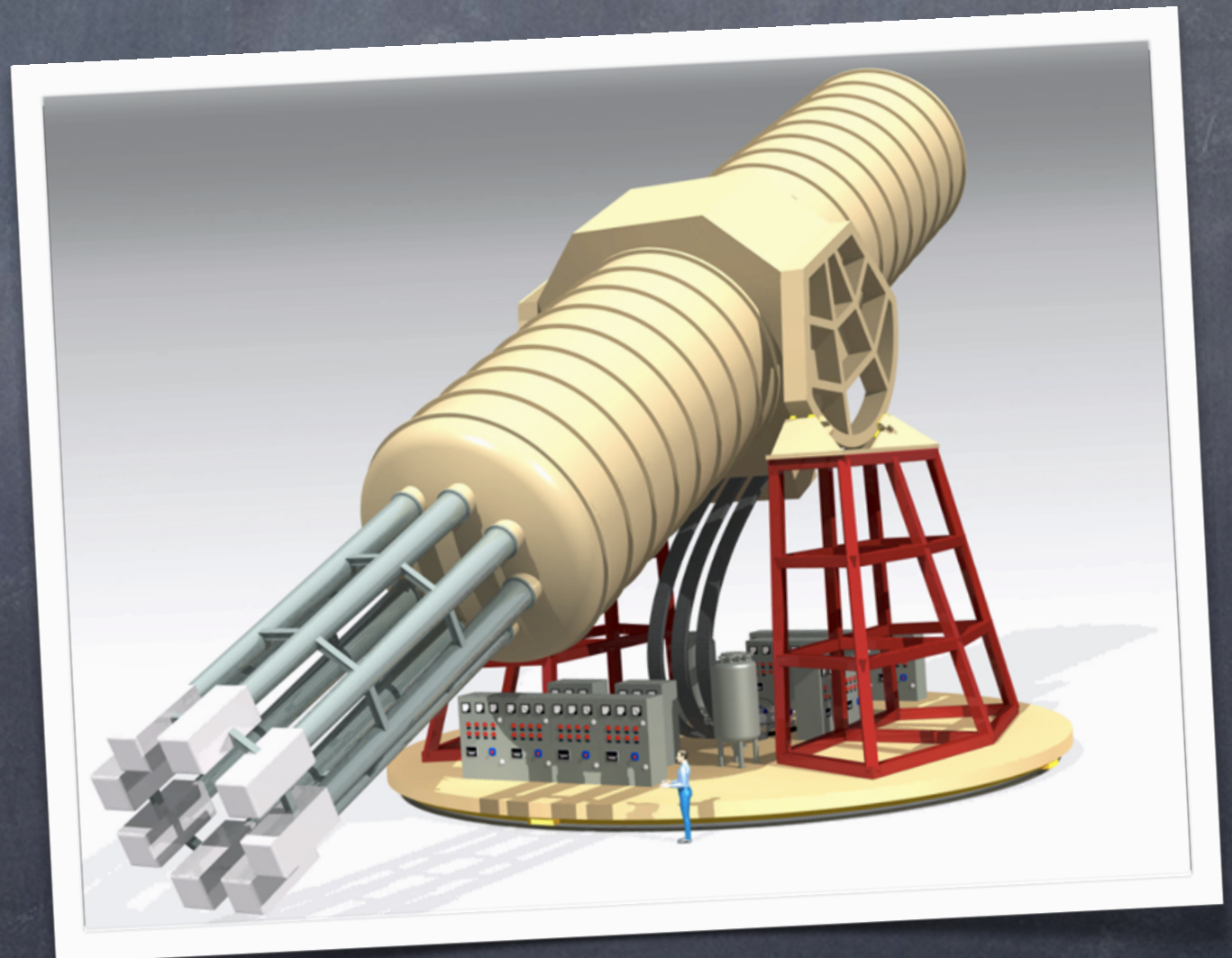
Rivelatore di raggi X





Il presente:
CAST (CERN)

Il futuro:
IAXO?



La caccia continua ...