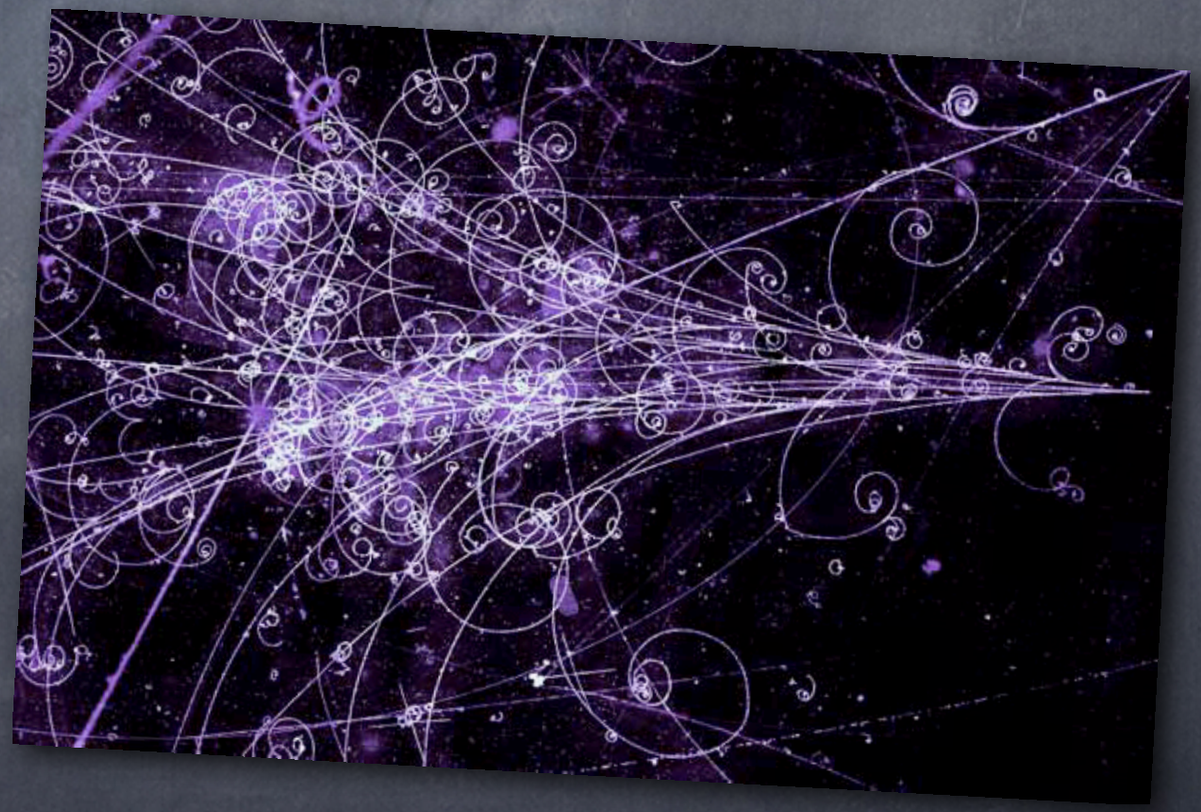
Novità dal mondo delle particelle:

nuova luce sull'astrofisica

Fabrizio Tavecchio
INAF-OAB

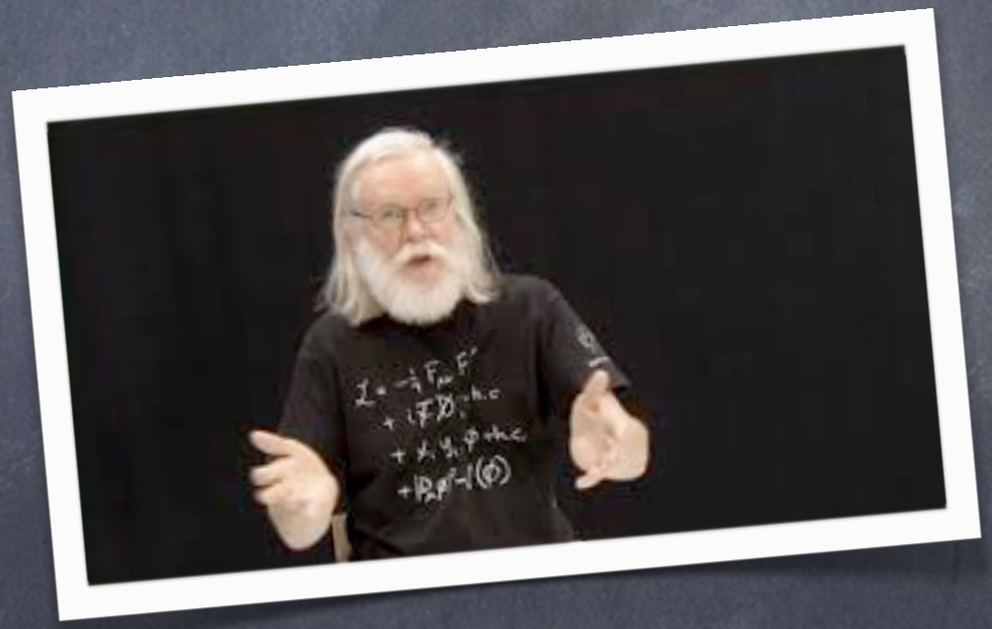
20 Gennaio 2016

Dal macro al micro ...
e viceversa

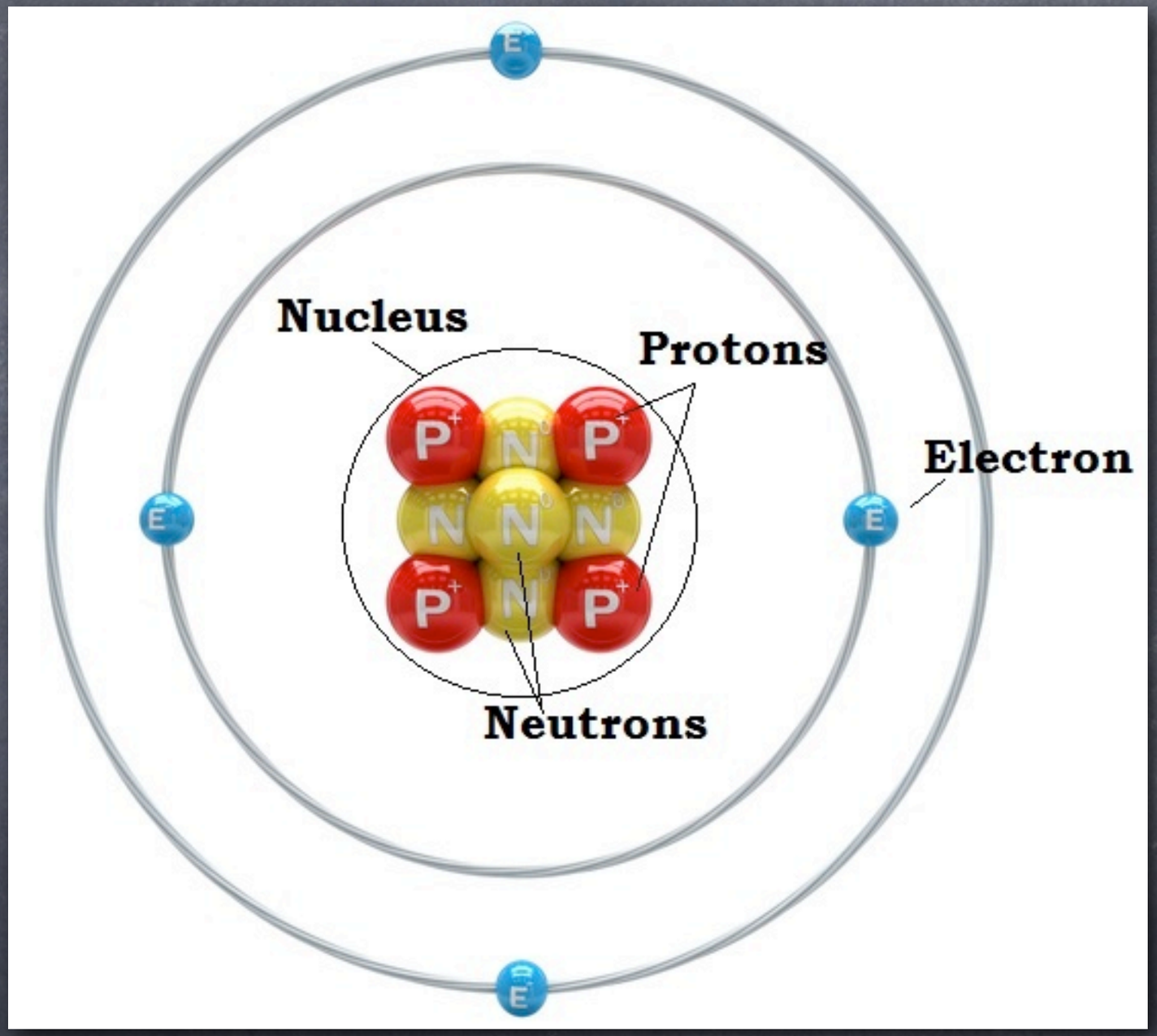


Preambolo

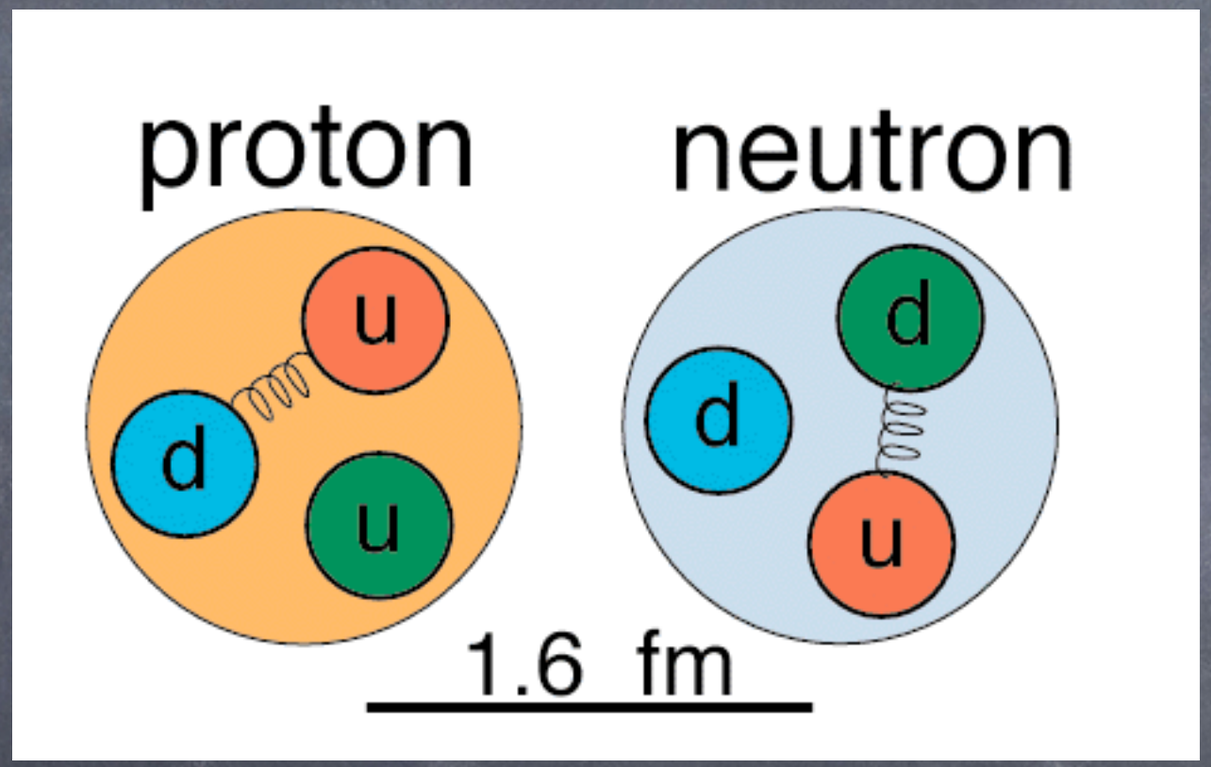
Il modello standard delle particelle elementari



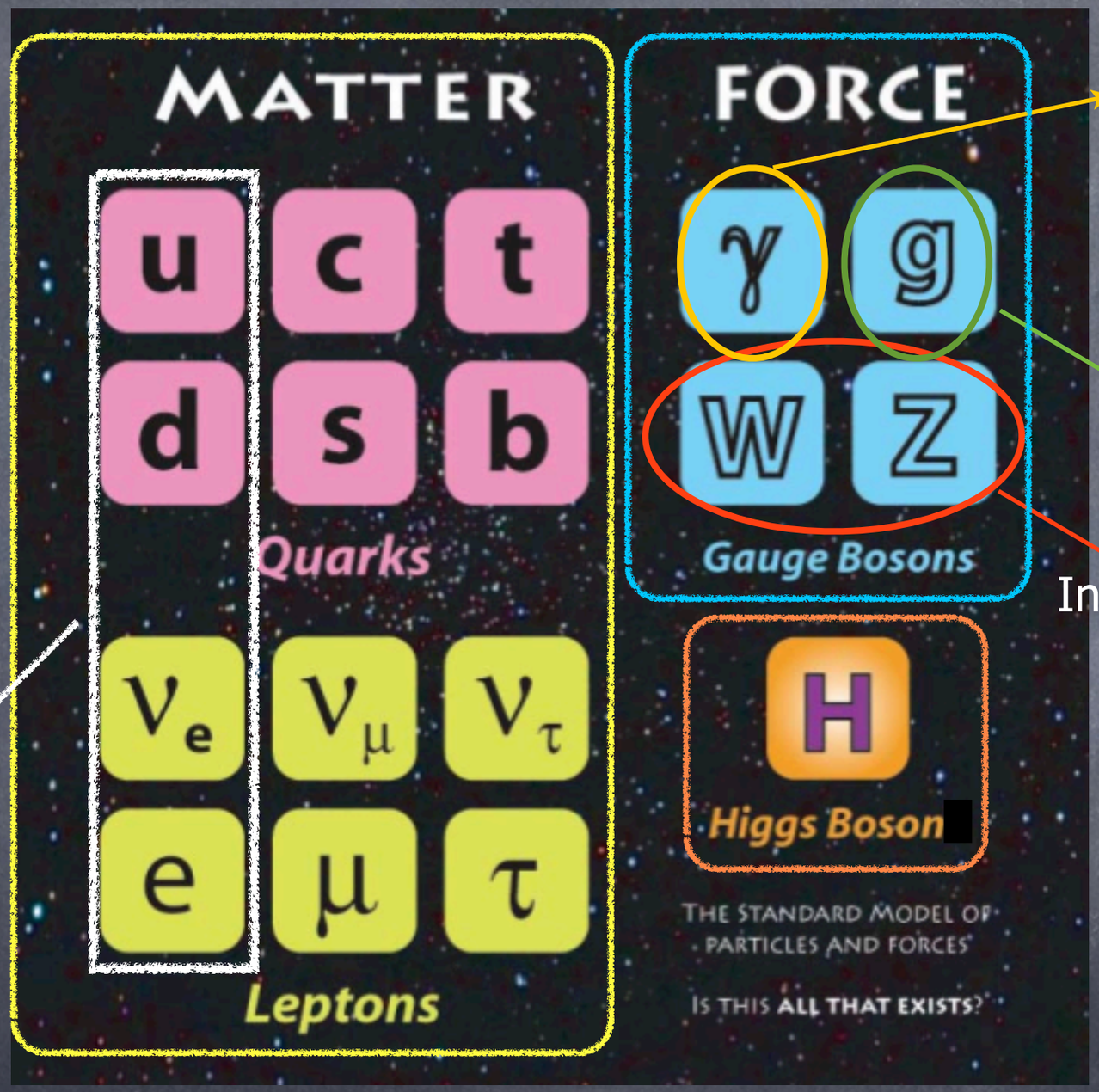
Atomo: elettroni, protoni, neutroni



Protoni e neutroni: quarks



Il modello standard delle particelle



Interazione e.m.

Interazione forte

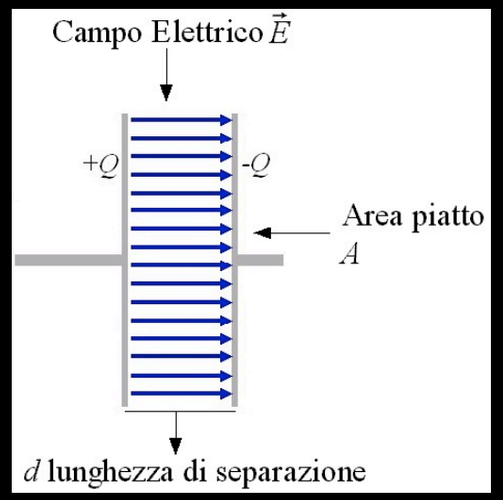
Interazione debole

Materia "normale"

Digressione: scale di energia

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

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

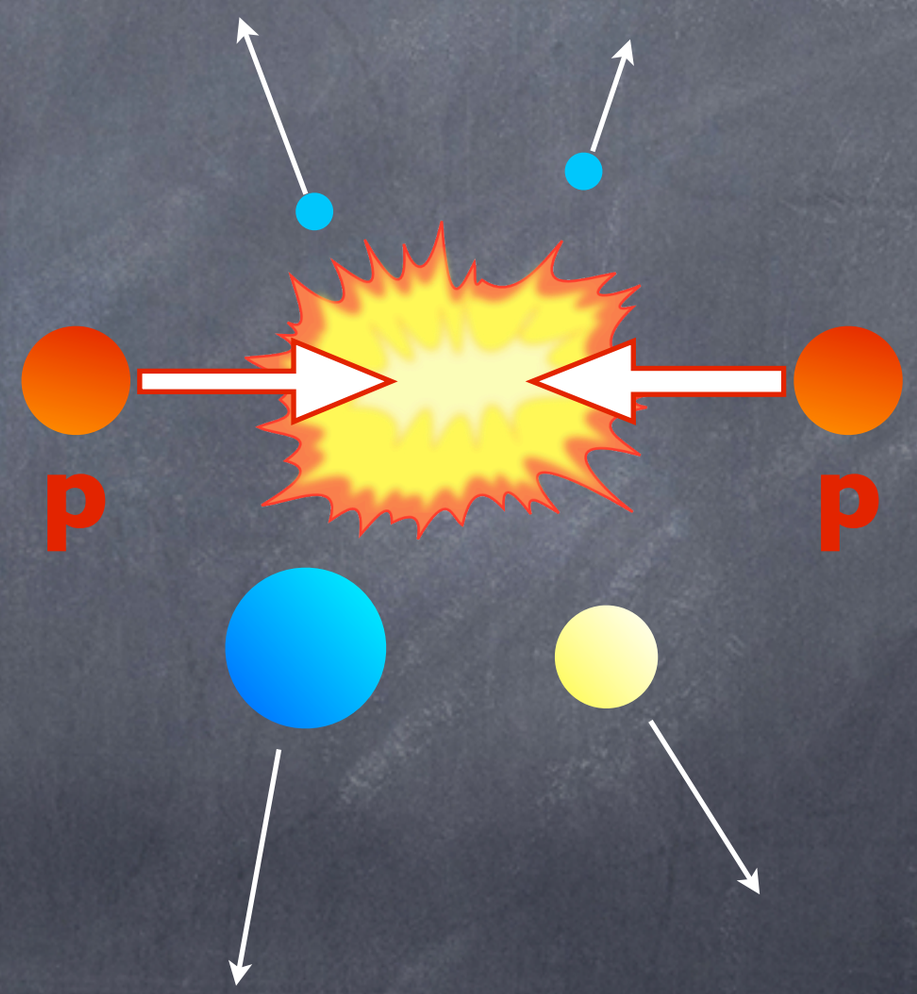


eV	keV	MeV	GeV	TeV-PeV
reazioni chimiche	raggi-X	reazioni nucleari		
	10^3	10^6	10^9	$10^{12\text{-}15}$

1TeV = 1.6 erg

LHC: 6.5 TeV

Produzione/distruzione di particelle



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 — γ

Carica elettrica: 0
Massa: 0
Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.

BOSONE *Z* — 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.

BOSONI W^+/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.

GLUONI — g

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.

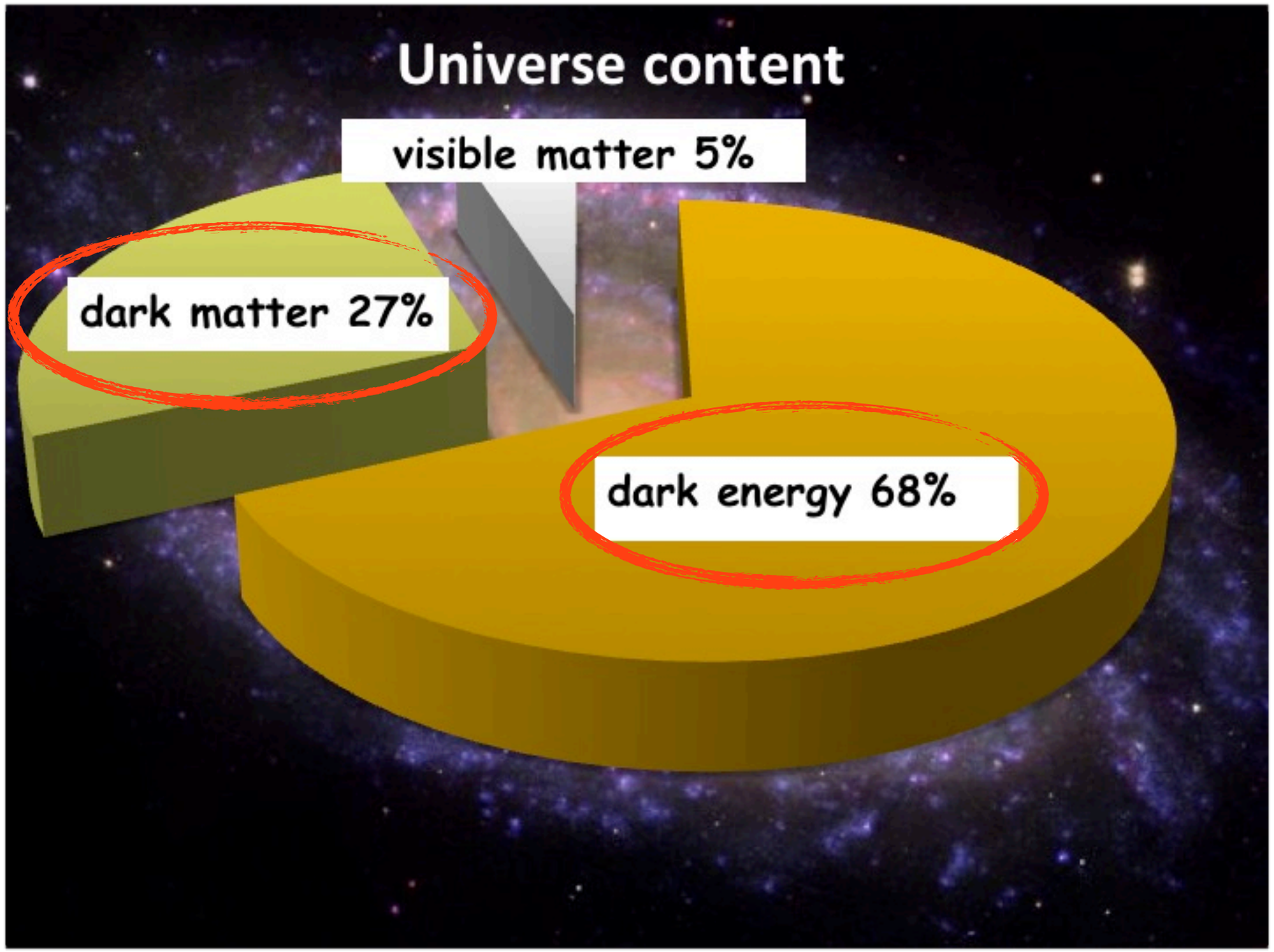
HIGGS — H

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*.

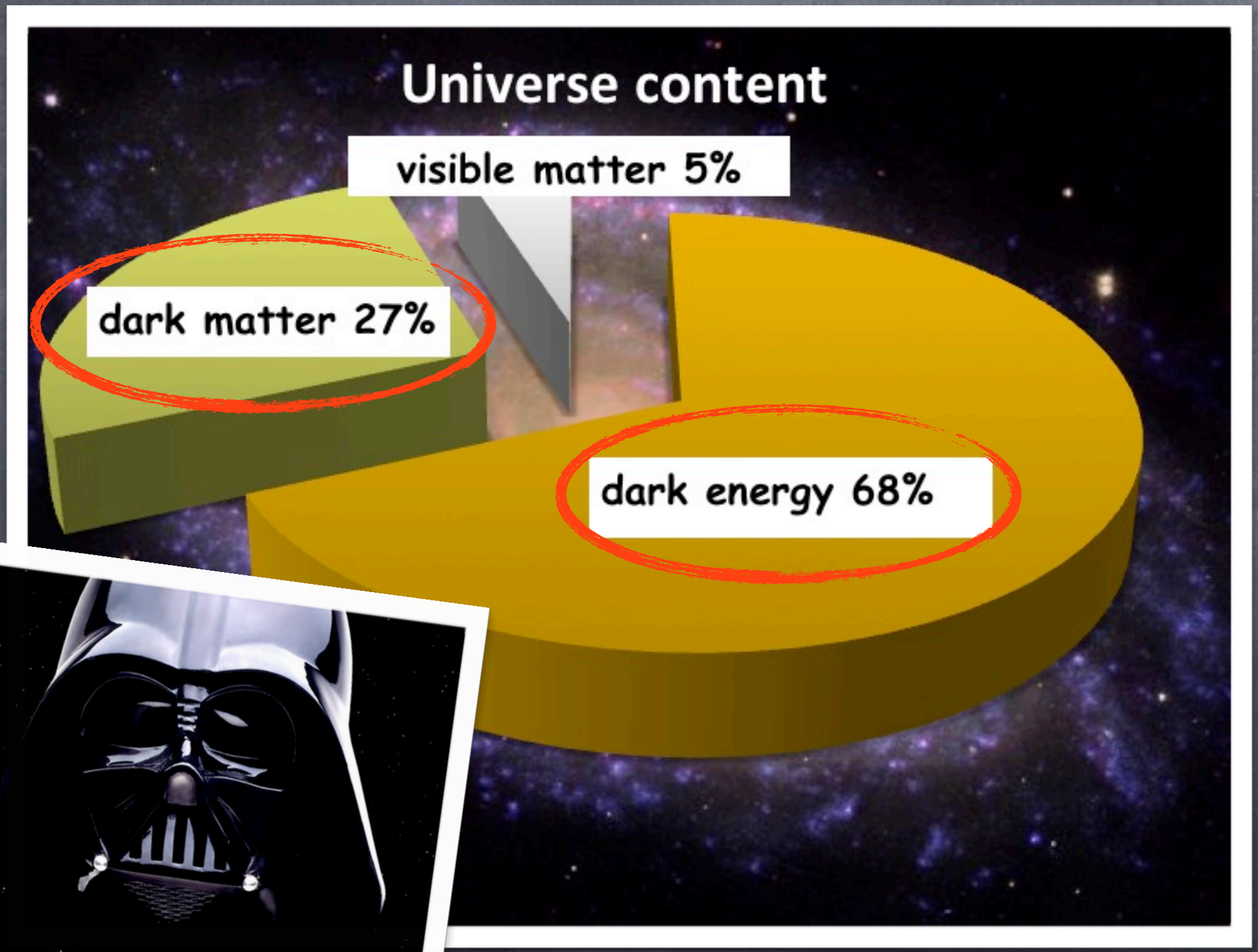
NEW!

C'E' ALTRO ?

Astrofisica: materia oscura



Astrofisica: materia oscura

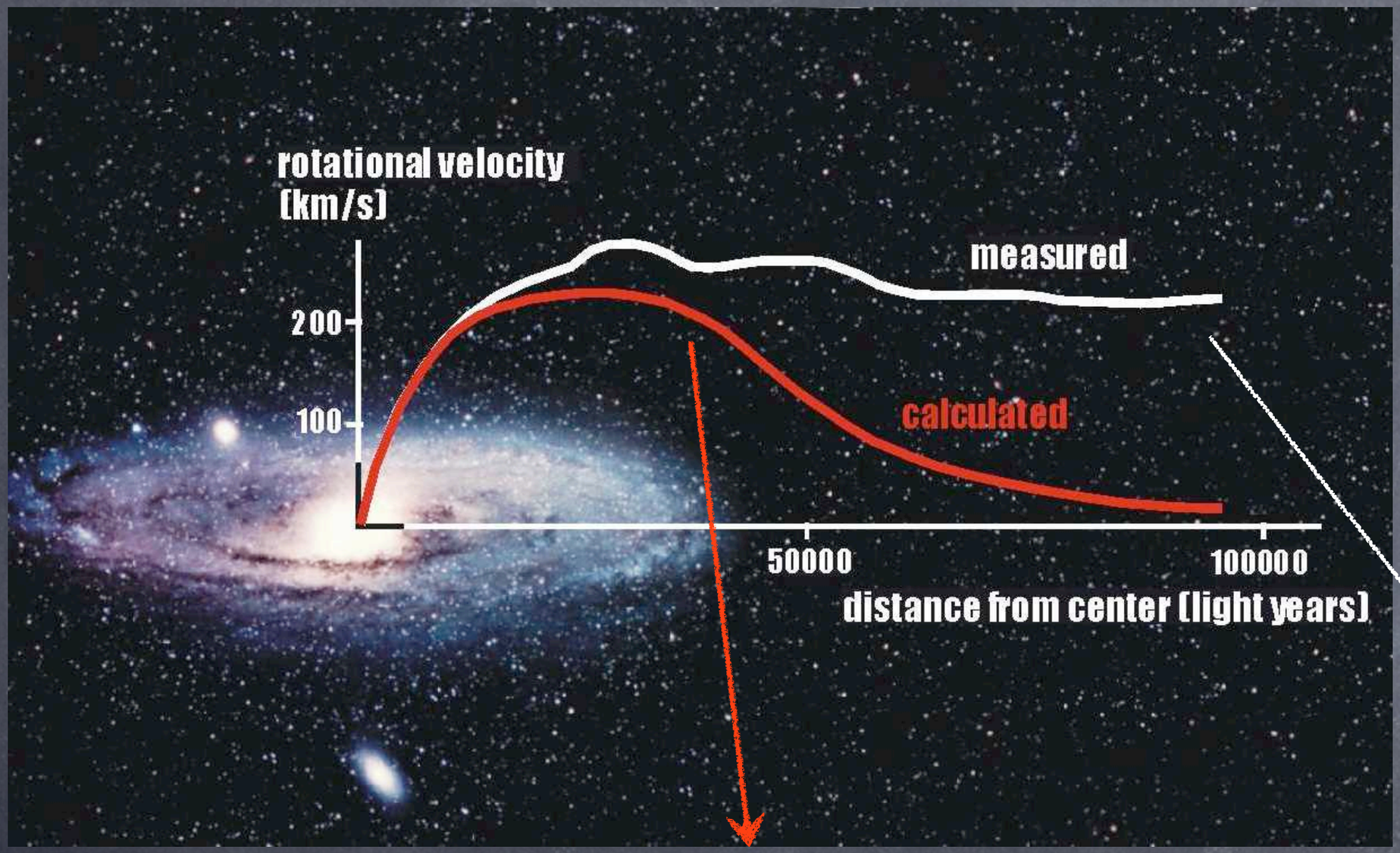


Il lato oscuro ...

Evidenze astronomiche

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

Curve di rotazione



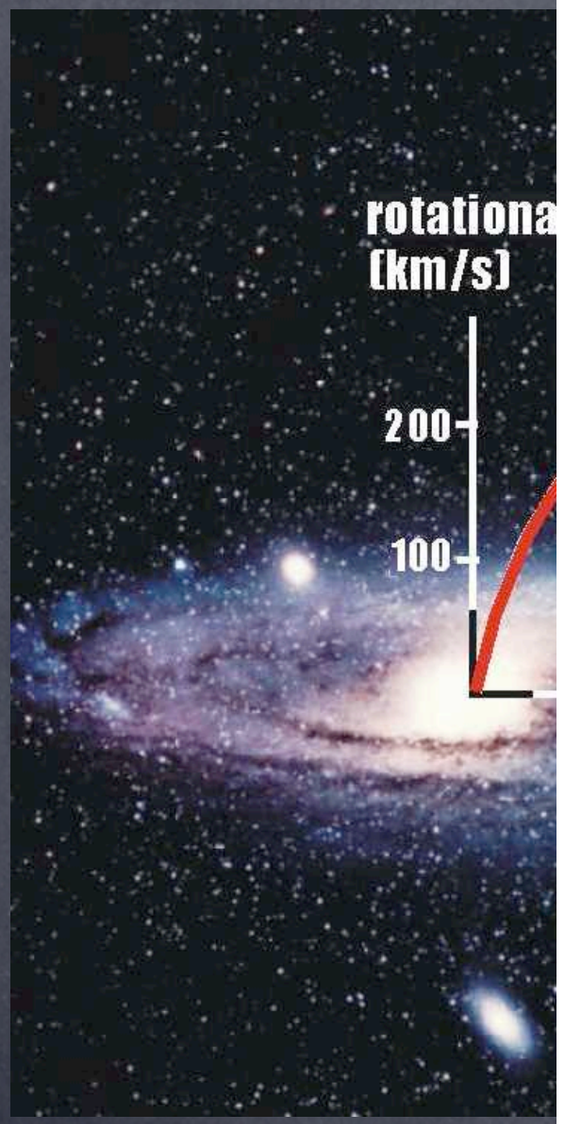
Calcolato

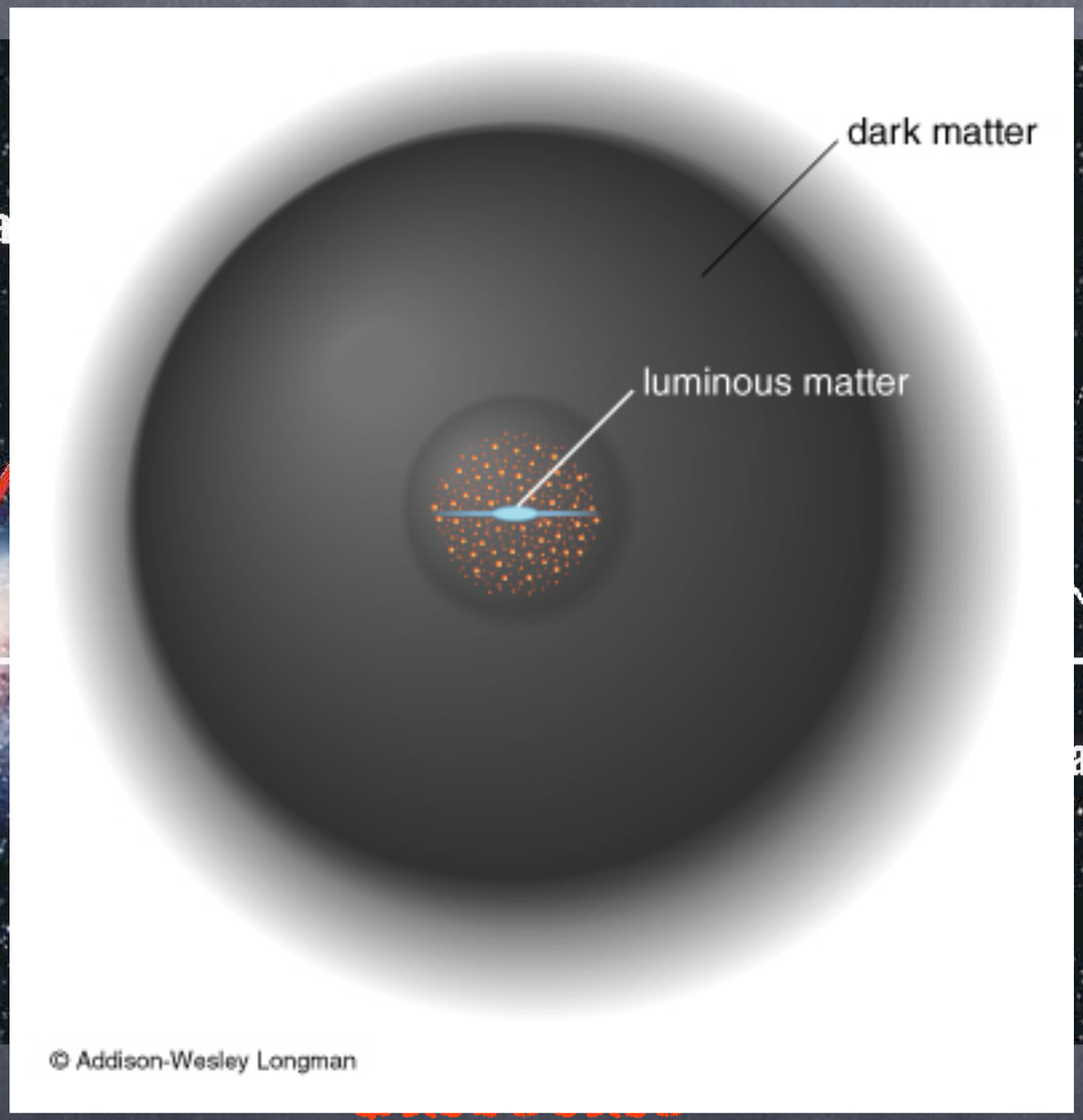
$$V(R)^2 \sim \frac{GM(R)}{R}$$

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

$$M(R) \sim R$$

Curve di rotazione





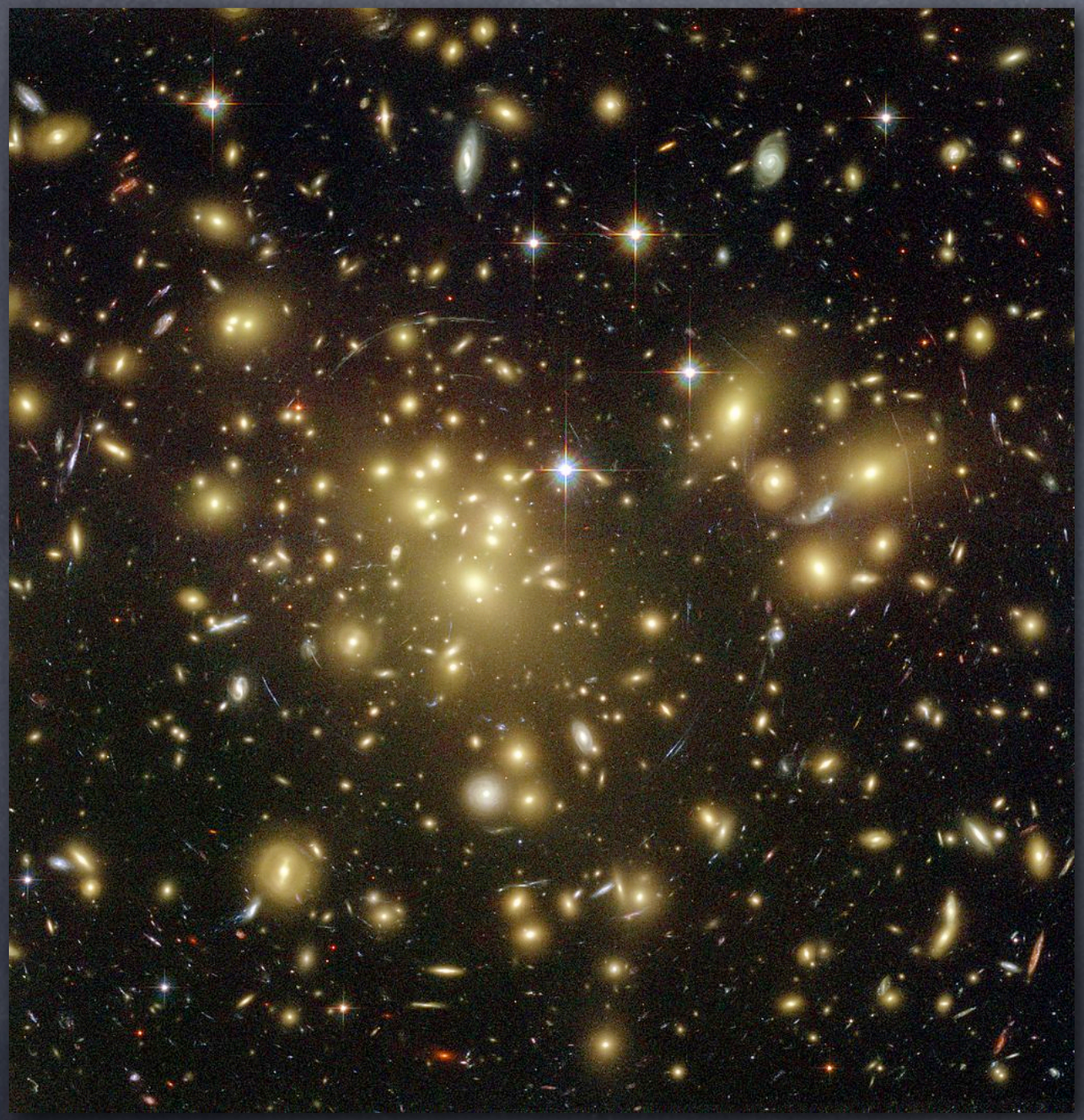
MGal solo
10-20%

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

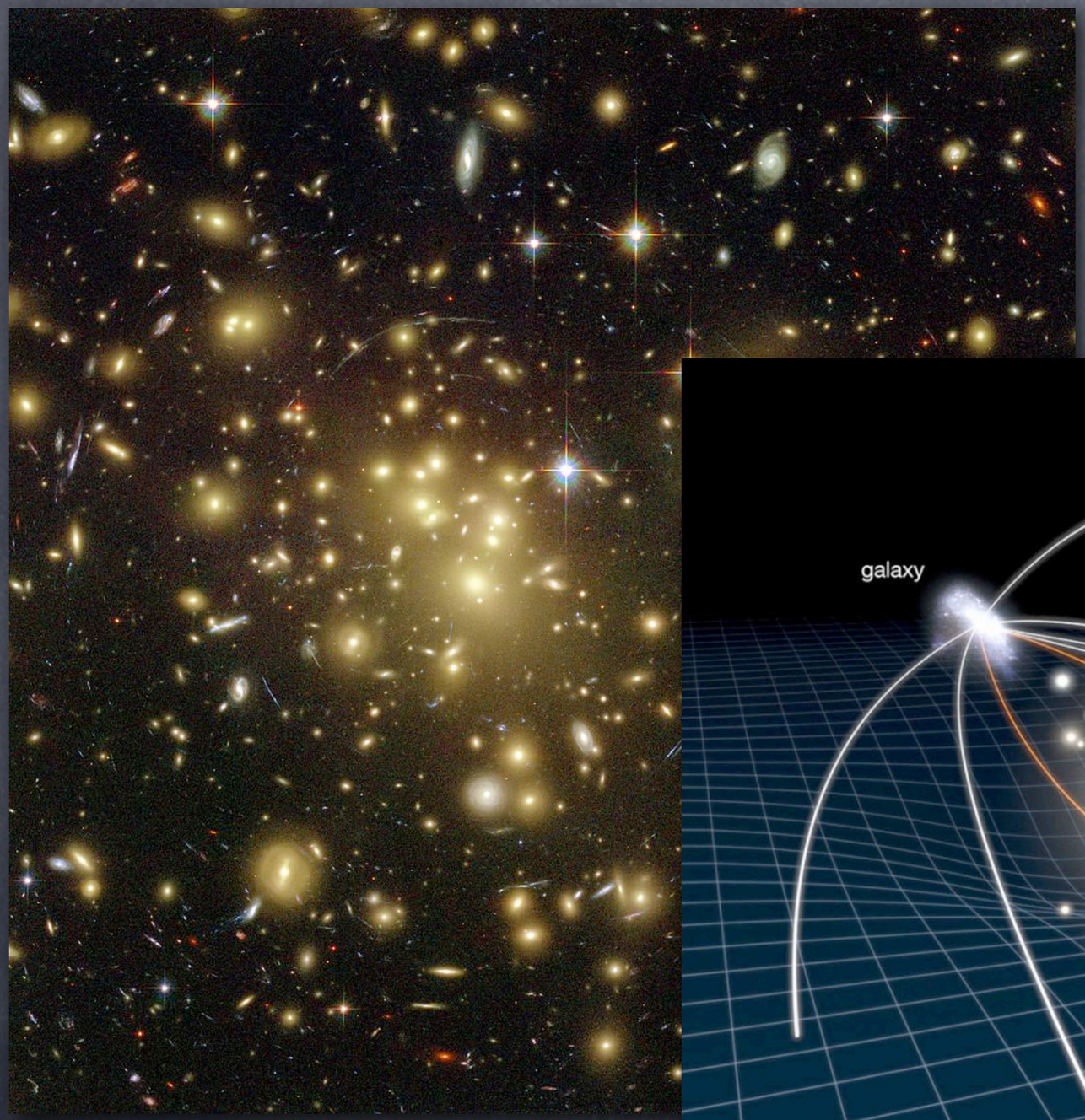
$$M(R > R_0) = M_0 \sim cost. \qquad V(R) \sim \frac{GM_0}{R^{1/2}}$$

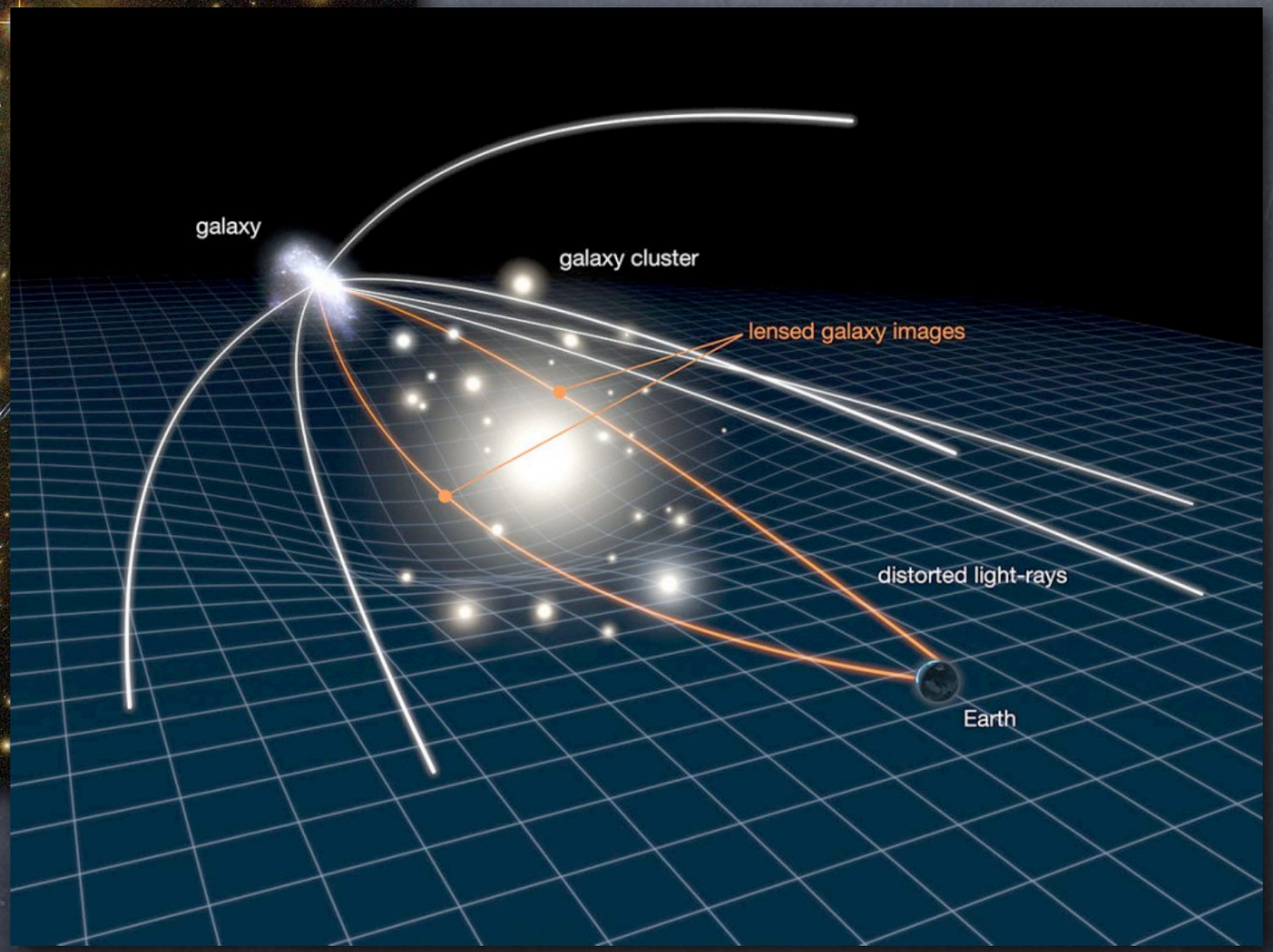
$$M(R) \sim R$$

Lenti gravitazionali

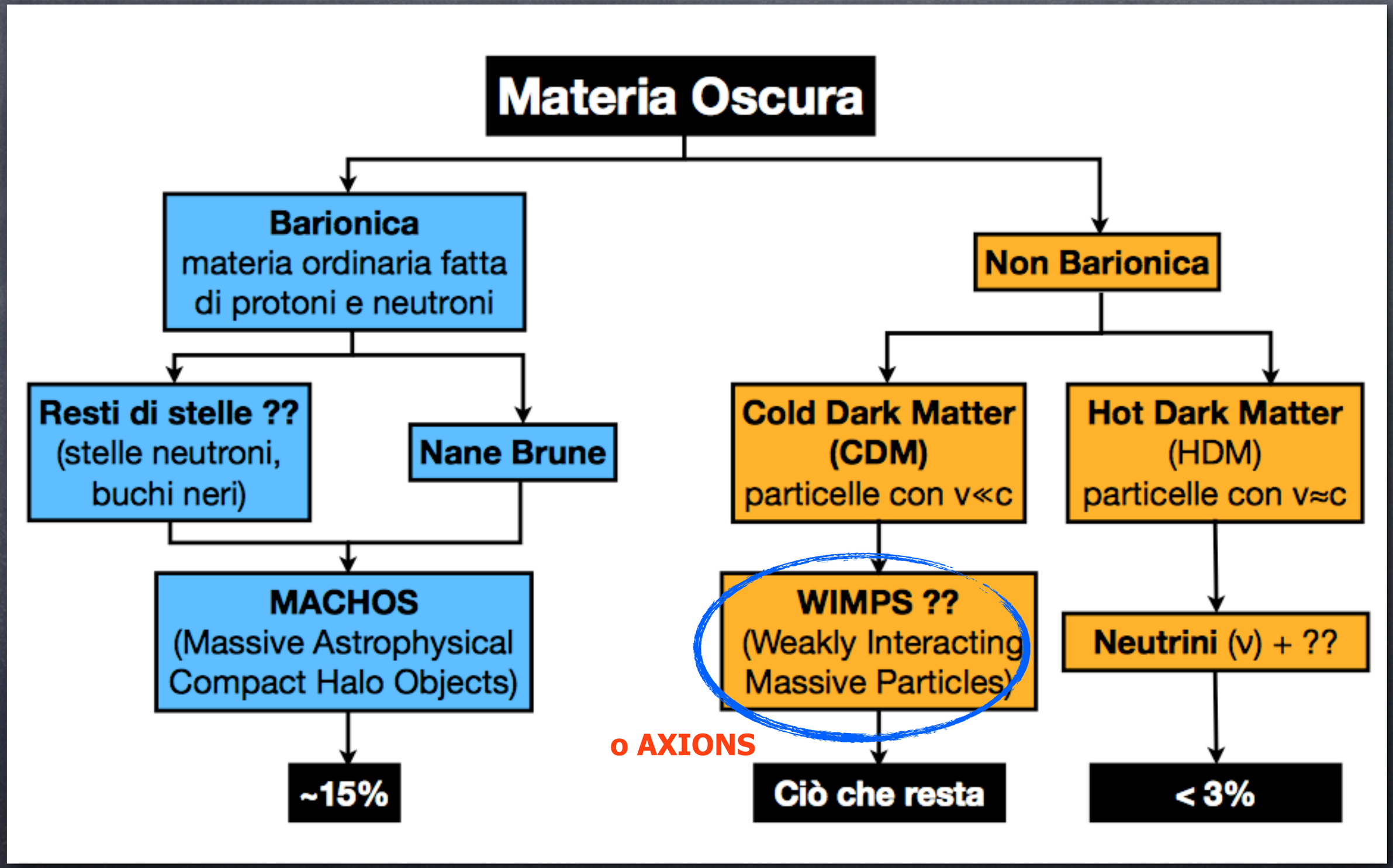


Lenti gravitazionali





Candidati


Materia Oscura
Barionica
materia ordinaria fatta di protoni e neutroni
Non Barionica
Resti di stelle ??
(stelle neutroni, buchi neri)
Nane Brune
Cold Dark Matter (CDM)
particelle con v≪c
Hot Dark Matter
(HDM)
particelle con v≈c
MACHOS
(Massive Astrophysical Compact Halo Objects)
WIMPS ??
(Weakly Interacting Massive Particles)
o AXIONS
Neutrini (ν) + ??
~15%
Ciò che resta
< 3%

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)

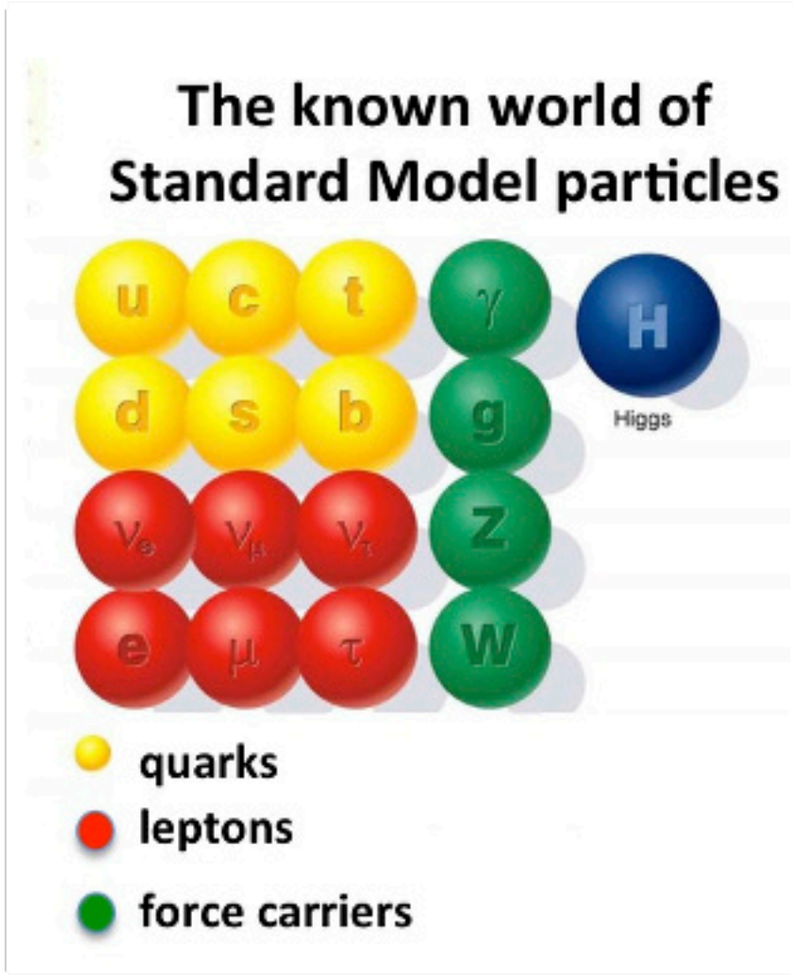
2) Massiccie (per poter essere "fredde")

3) Stabili (almeno su circa 15 mld di anni)

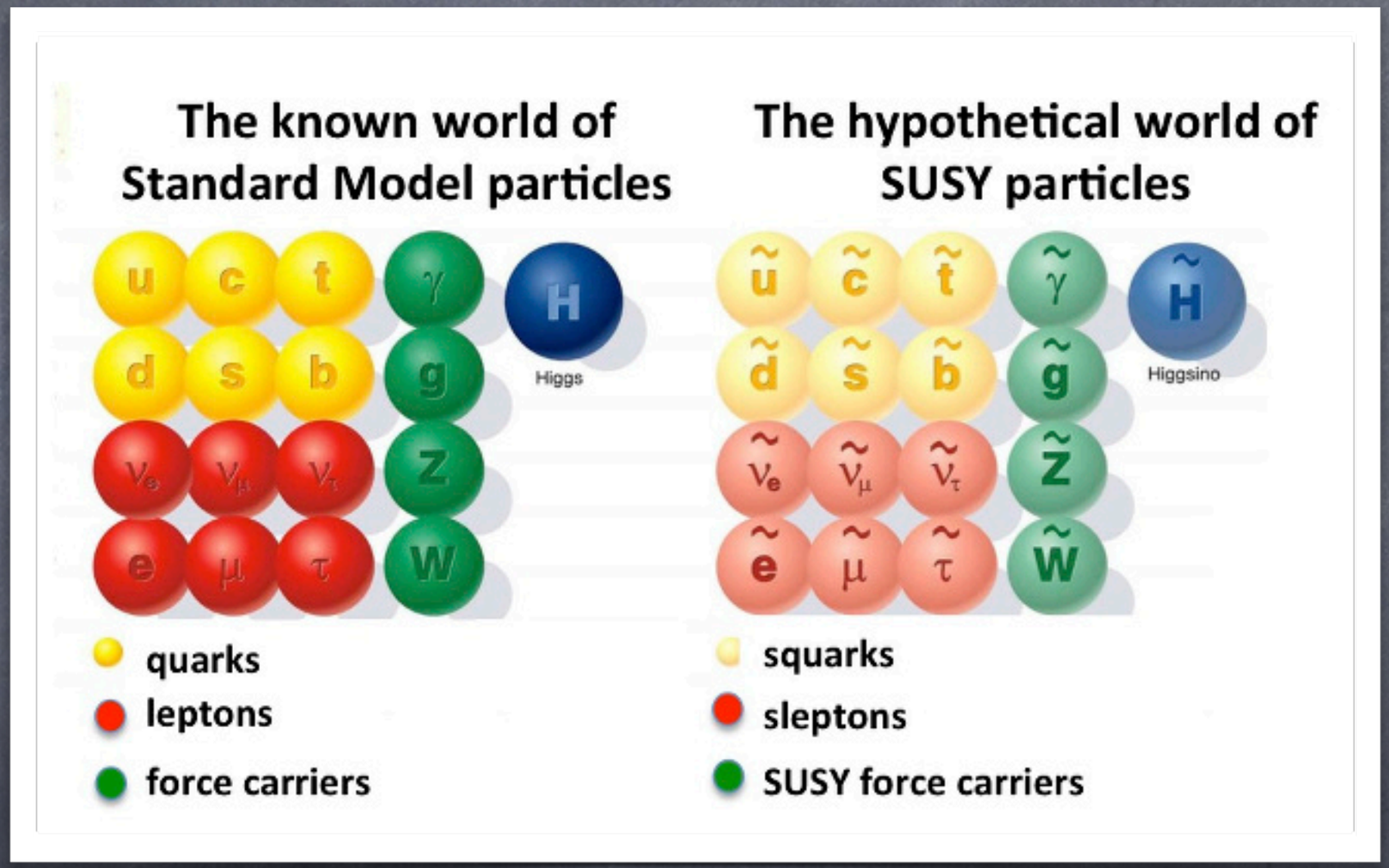
1) + cosmologia + fisica dell' int. debole ci fornisce anche indicazione della massa

→ M attorno al GeV o al TeV

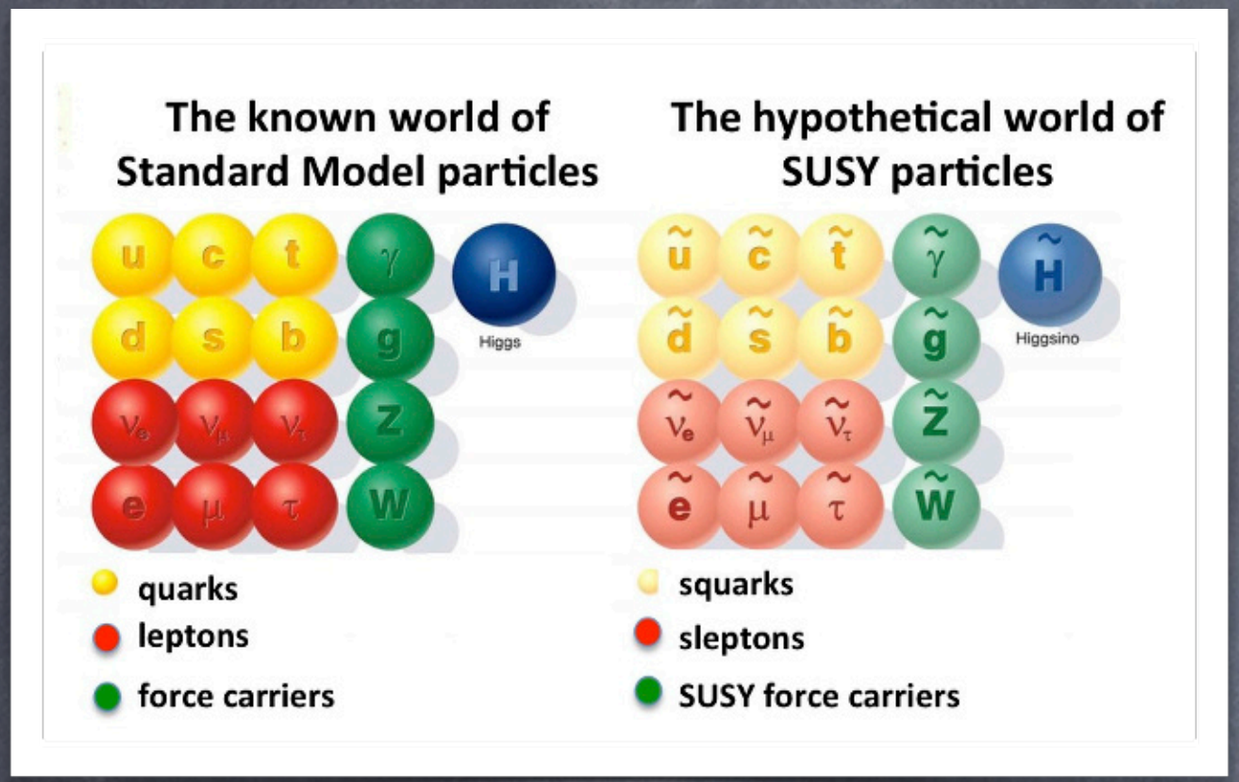
"Supersimmetria"



"Supersimmetria"

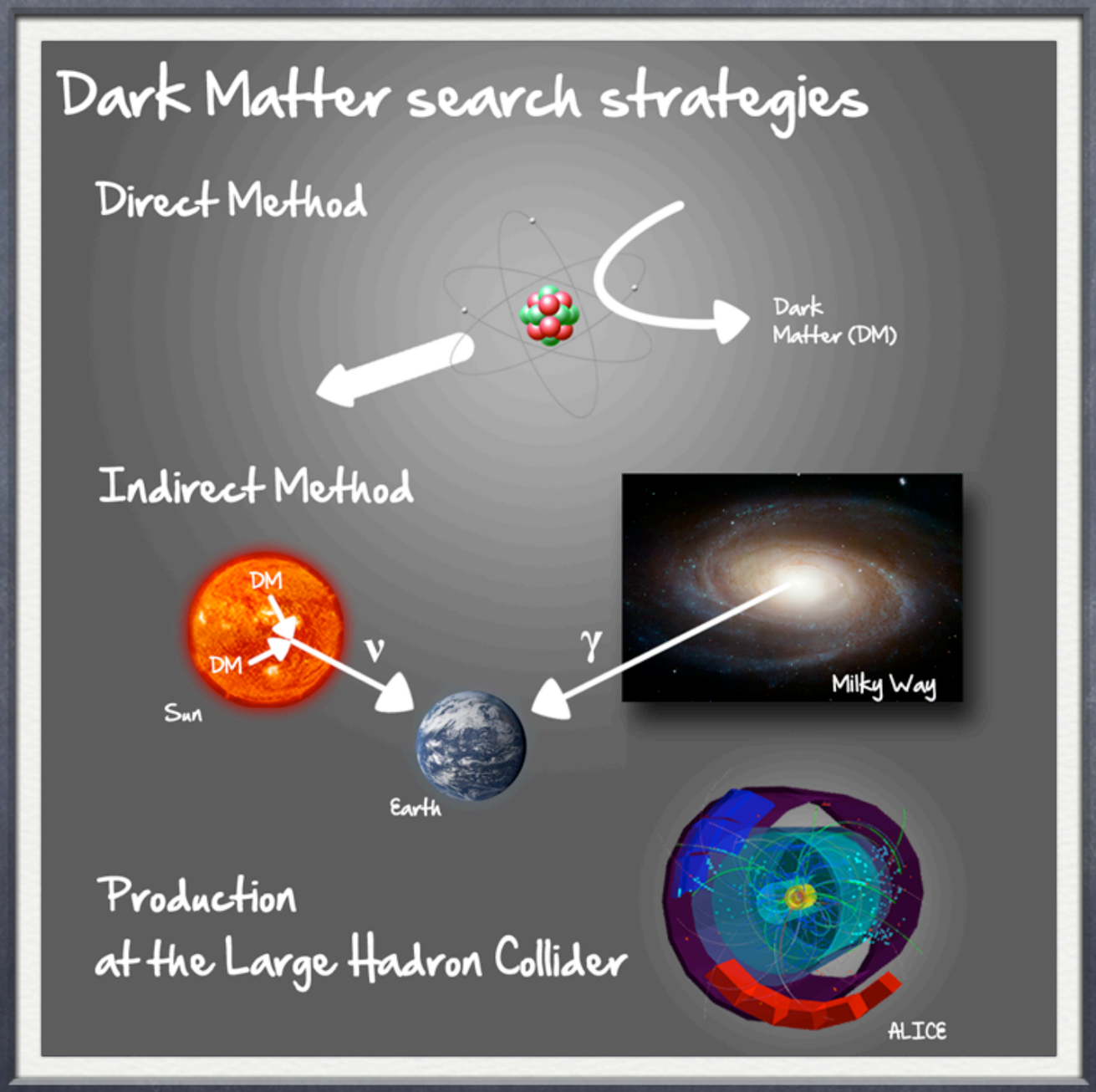


"Supersimmetria"

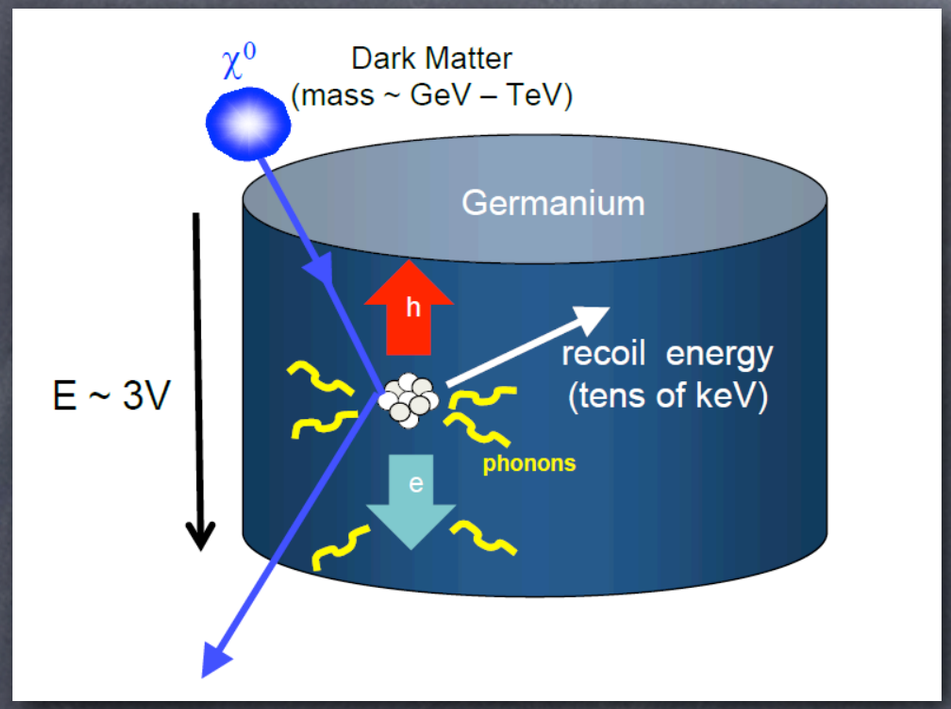


E' ragionevole pensare che le particelle pesanti decadano e oggi sia rimasta la particella supersimmetrica più leggera (LSP), chiamata **NEUTRALINO (χ)**

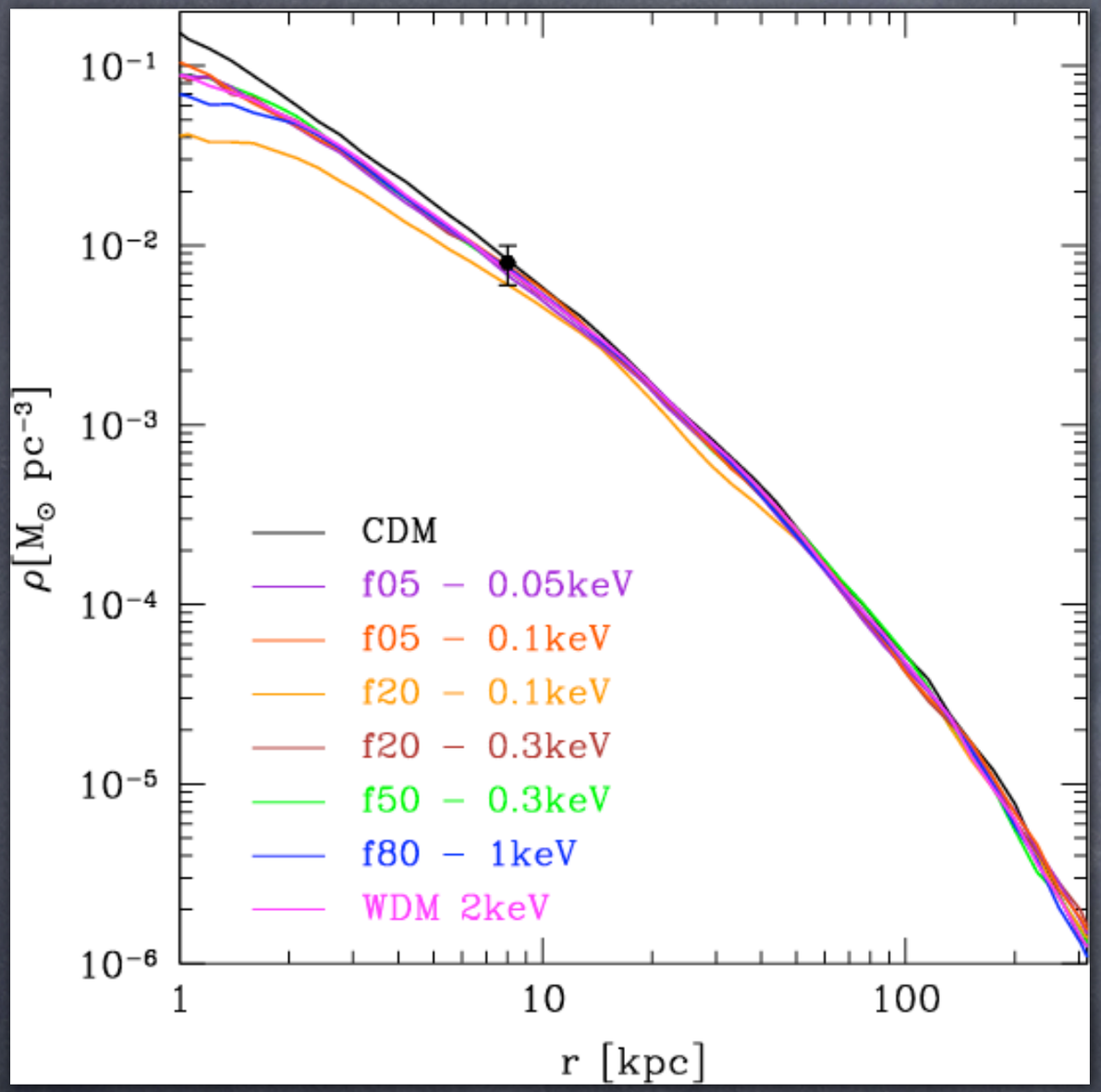
Alla ricerca della "schiappa"



Rivelazione diretta

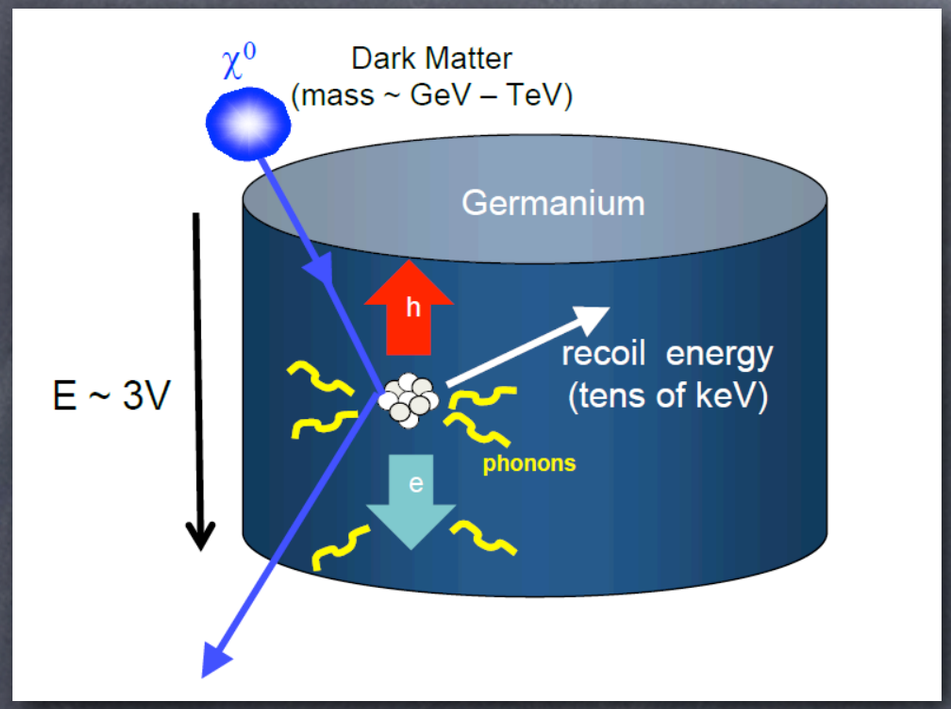


DAMA (Gran Sasso)
XENON (Gran Sasso)

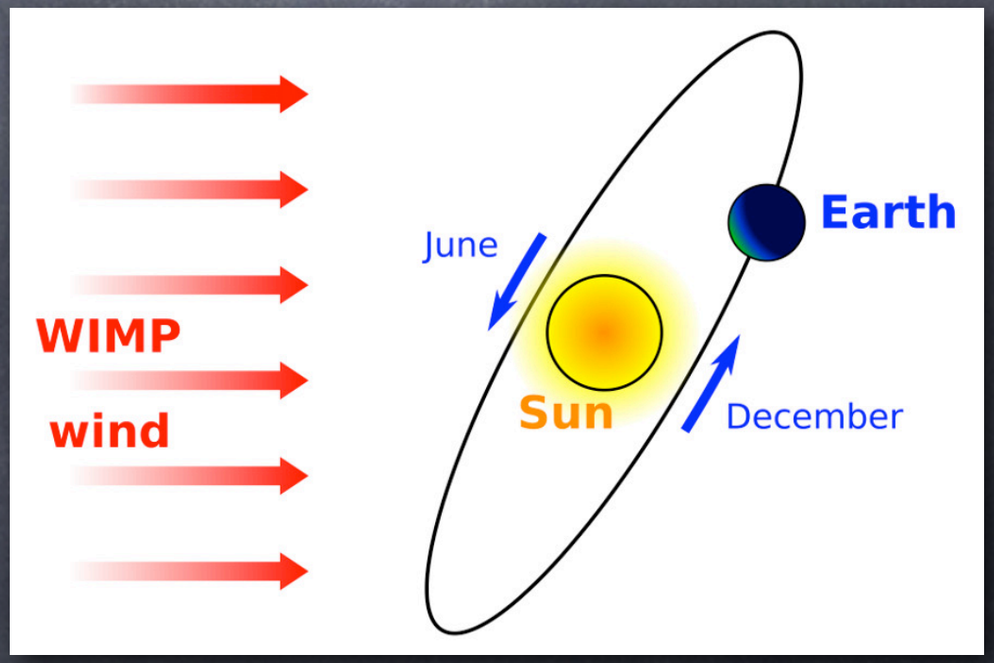


Alla distanza del sistema solare (8 kpc) la densita' e' di circa 300 part m^{-3} per una massa di un TeV

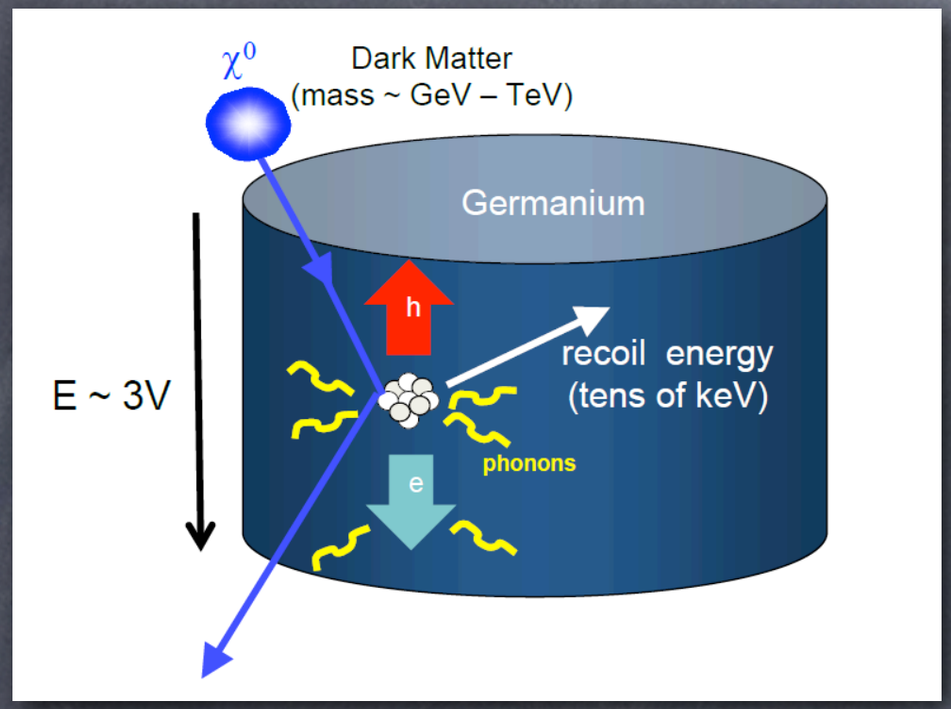
Rivelazione diretta



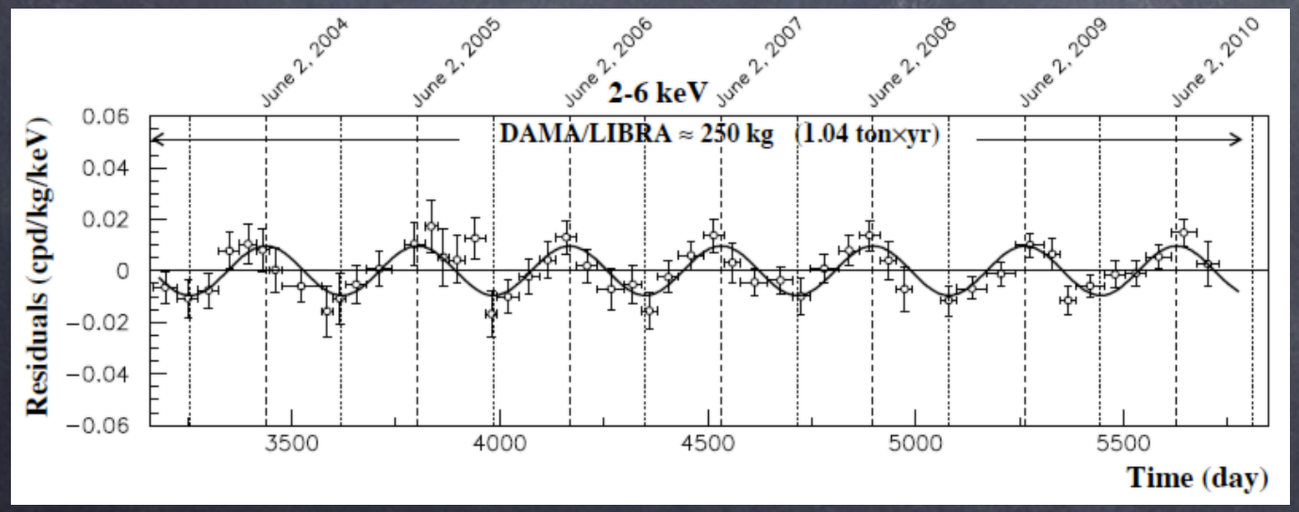
DAMA (Gran Sasso)
XENON (Gran Sasso)

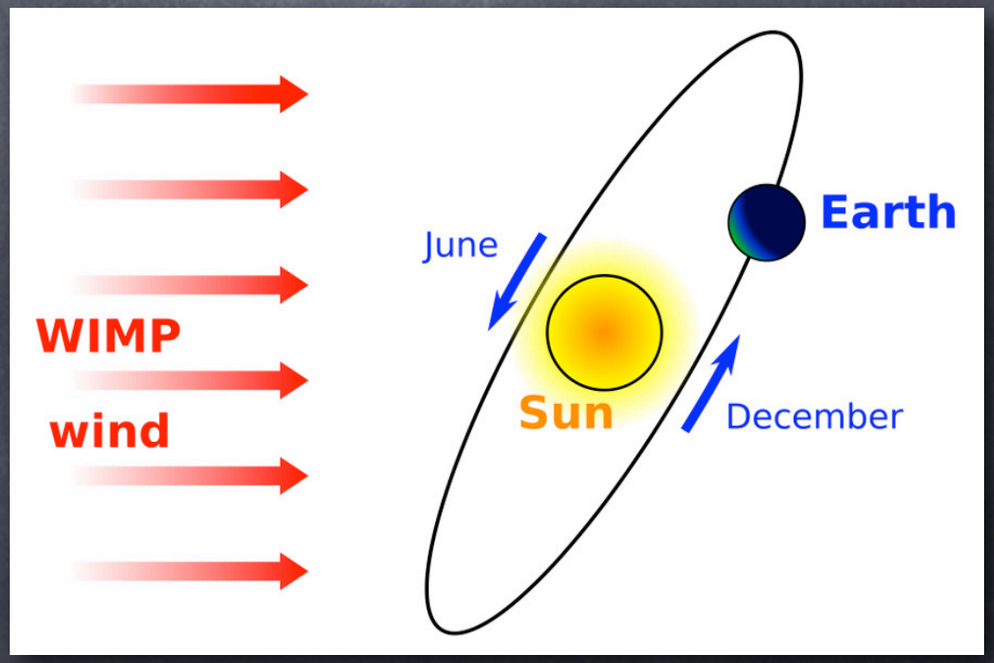


Rivelazione diretta

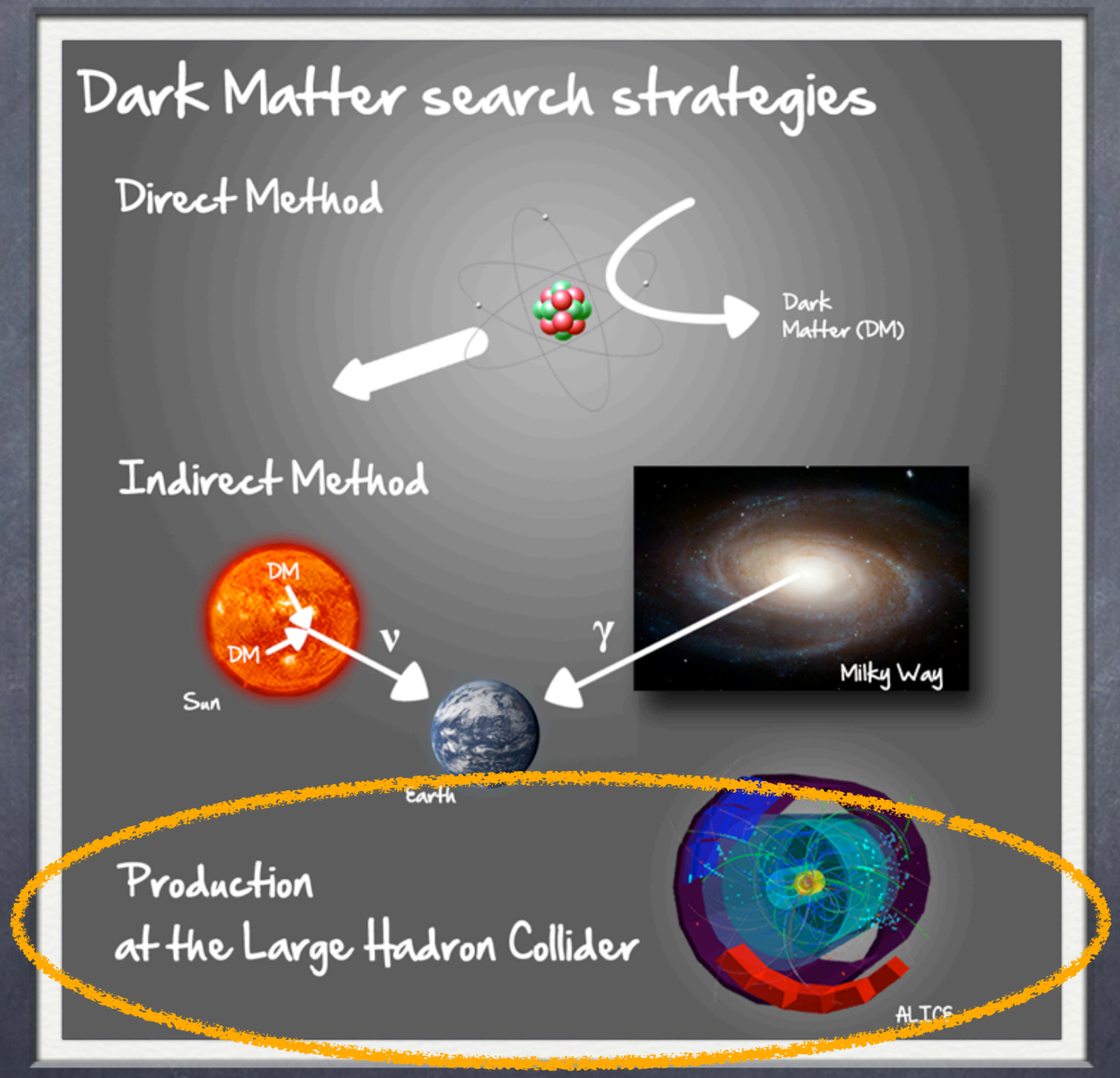


DAMA (Gran Sasso)
XENON (Gran Sasso)



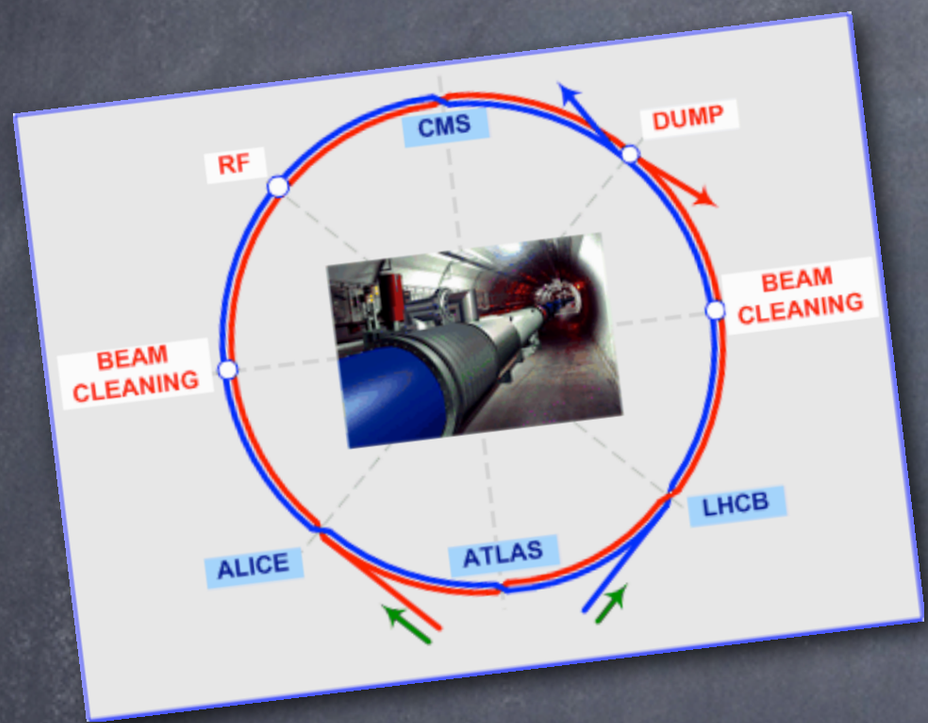


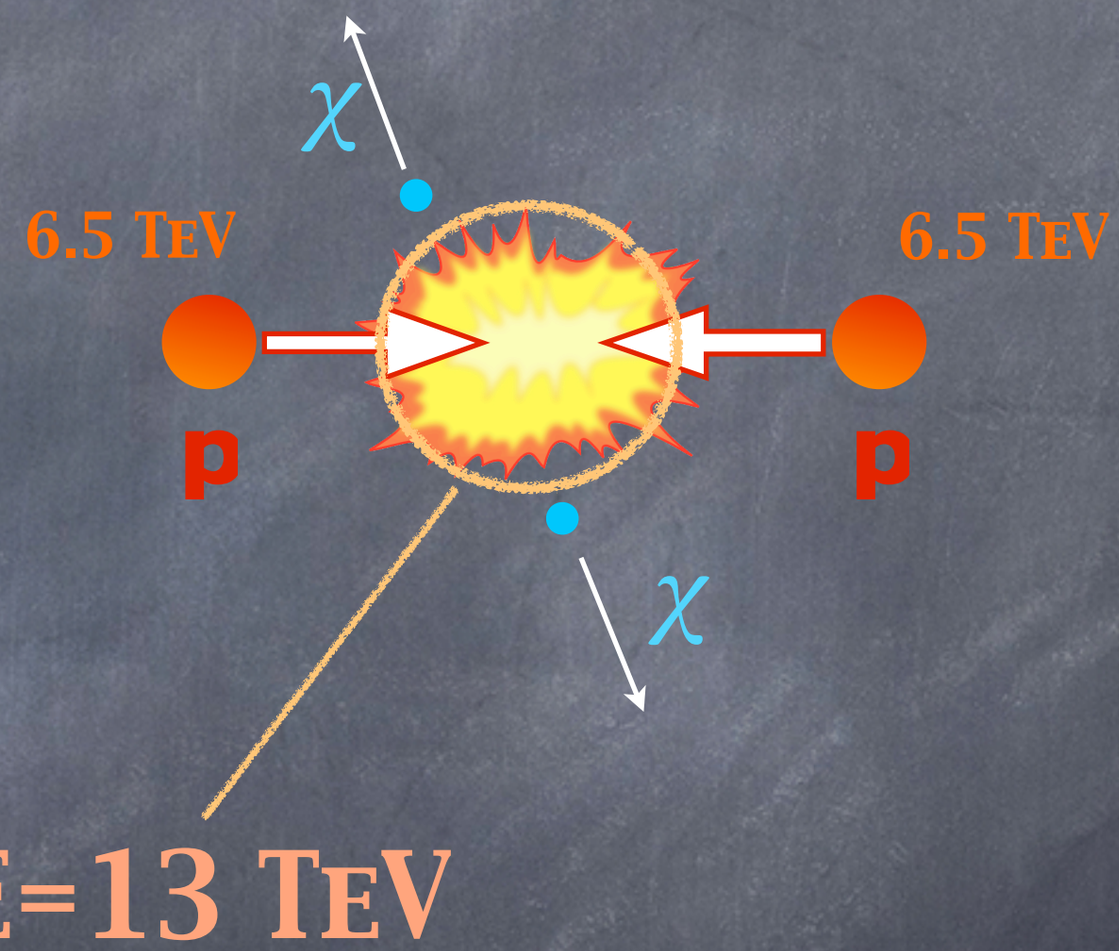
Alla ricerca della "schiappa"



Ricerca con gli acceleratori

Large Hadron Collider

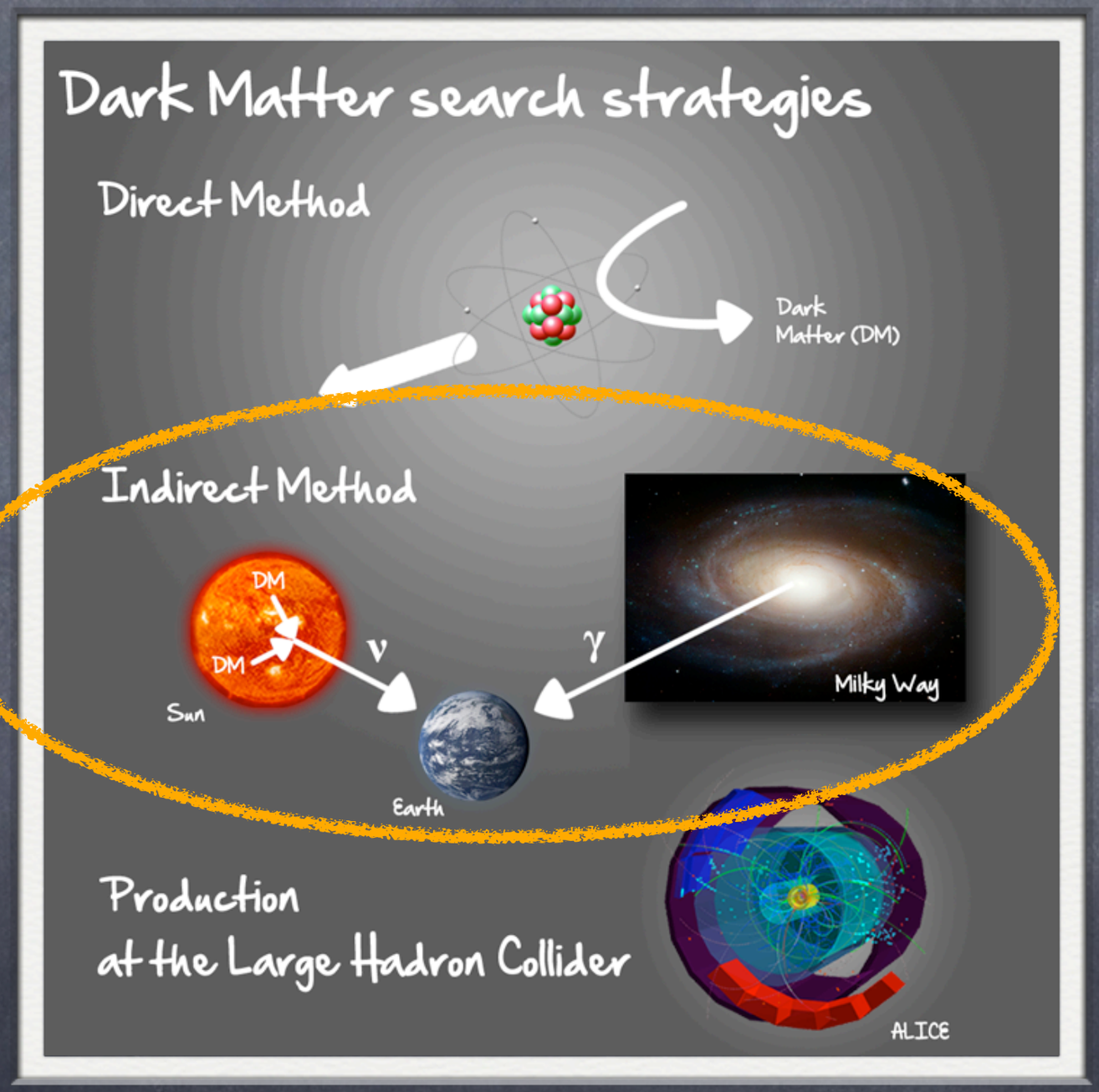




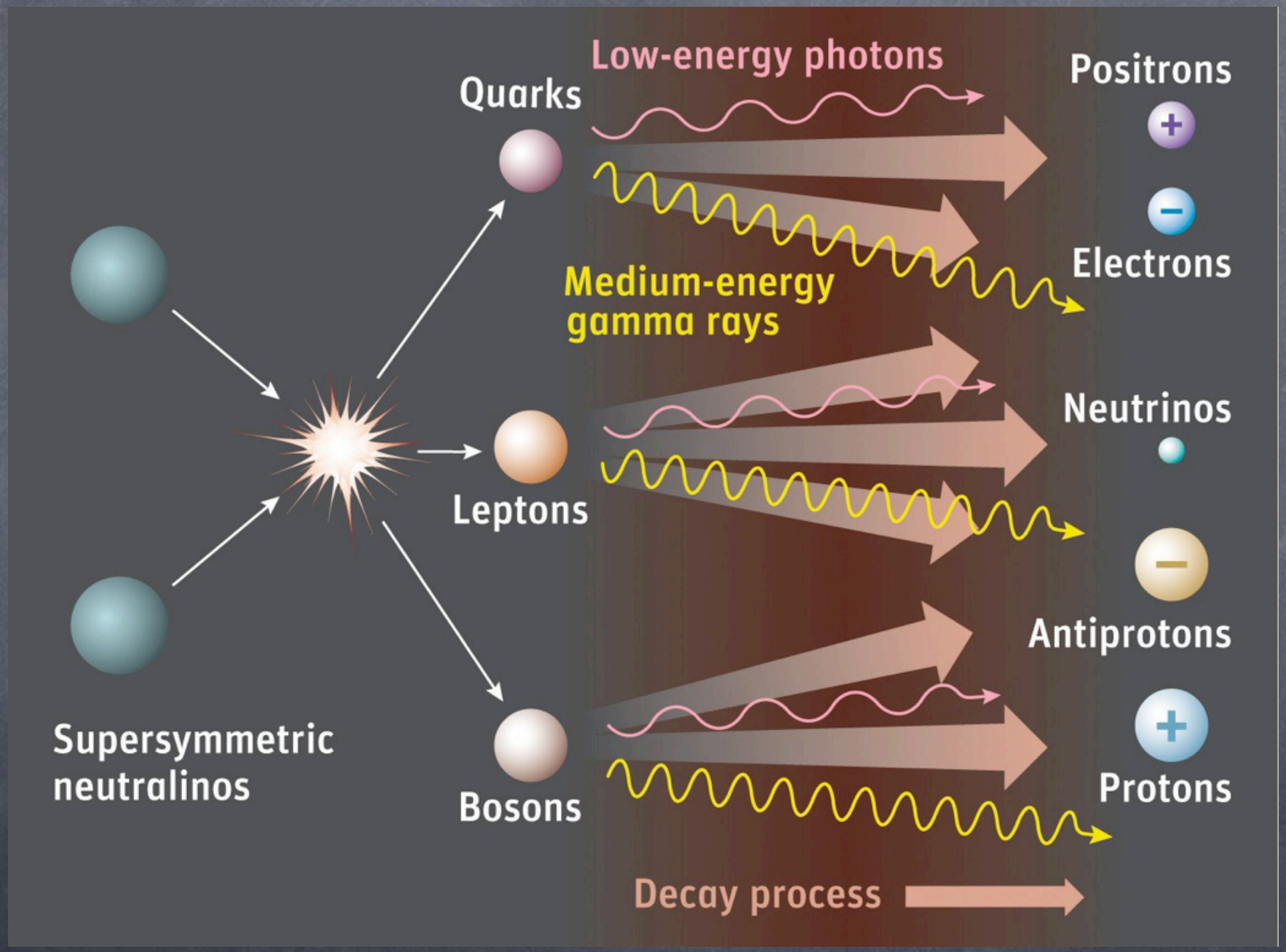
Nulla, per ora ...

Alla ricerca della "schiappa"

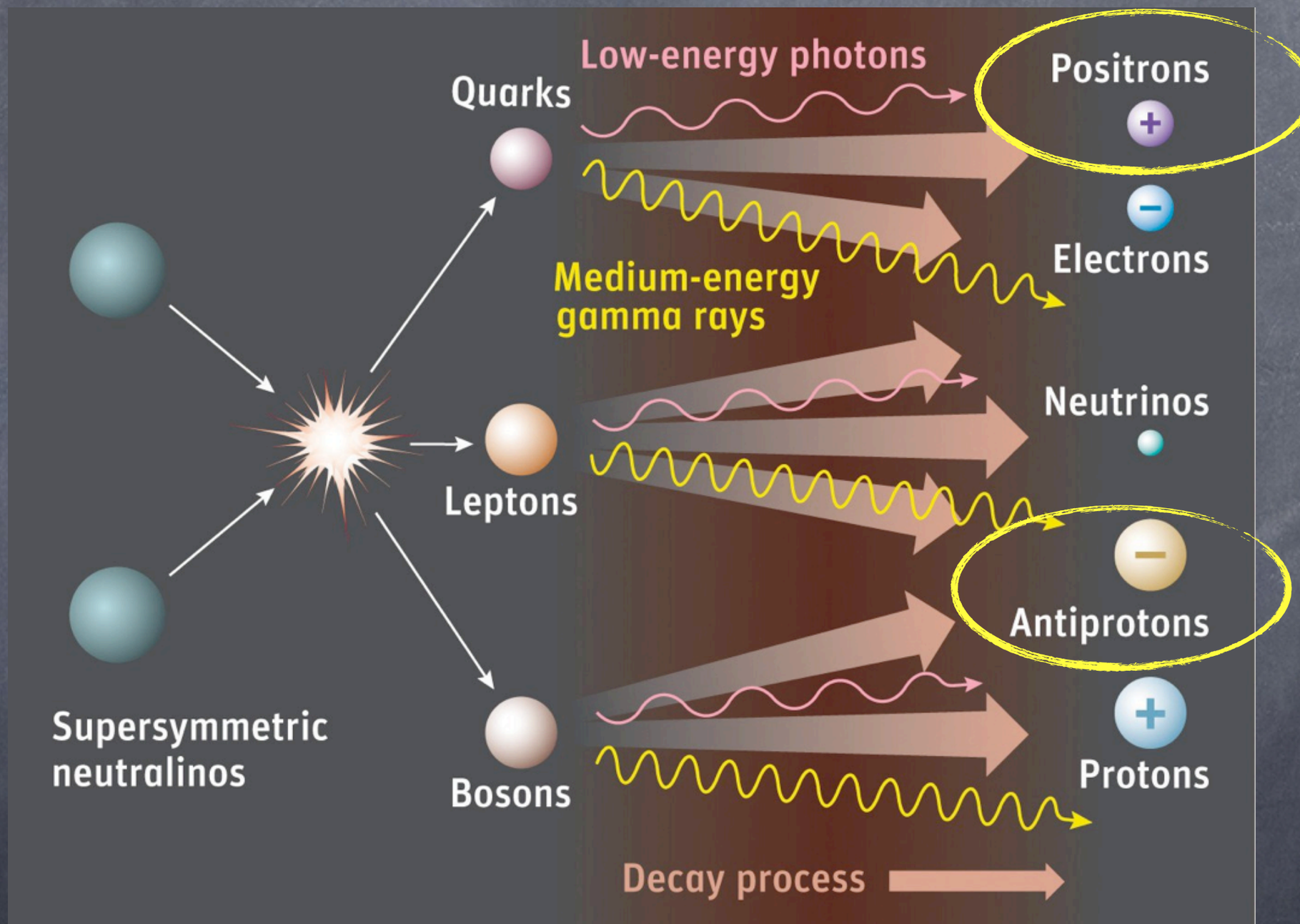
Astrofisica!



Astrofisica



Astrofisica



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

AMS-02 a bordo della ISS

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

Prodotto di decadimento della materia oscura?

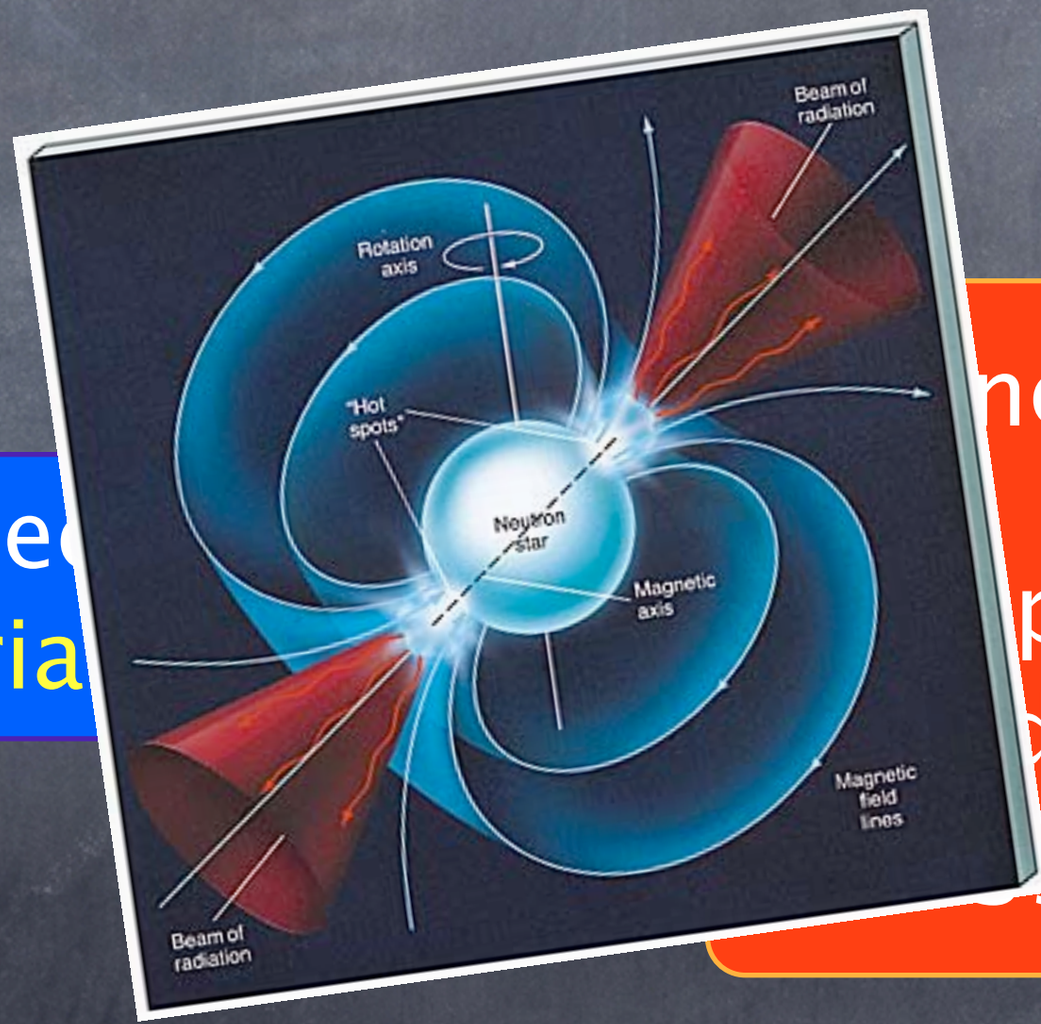
Origine astrofisica?

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)

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

Prodotto di de
della materia



ne astrofisica?

pulsars
di supernova
gi cosmici

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

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

ANSA.it

Scienza&Tecnica

NEWS | DOSSIER | GALLERIA FOTOGRAFICA | VIDEO | ragazzi

Spazio & Astronomia | Biotech | Tecnologie | Fisica & Matematica | Energia | Terra & Poli | Ricerca e Istituz

ANSA > Scienza&Tecnica > Fisica & Matematica > Strani segnali catturati dal cacciatore di materia oscura sulla Iss

Strani segnali catturati dal cacciatore di materia oscura sulla Iss

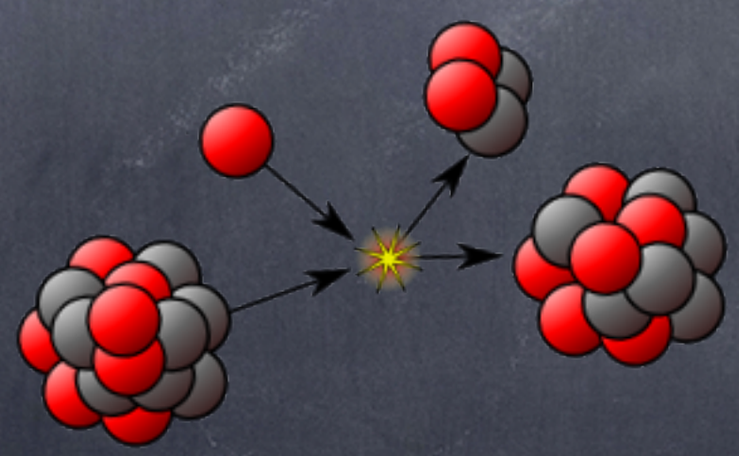
Forse tracce di una nuova particella

15 aprile, 17:35

G+1 27 Tweet Consiglia 2mila

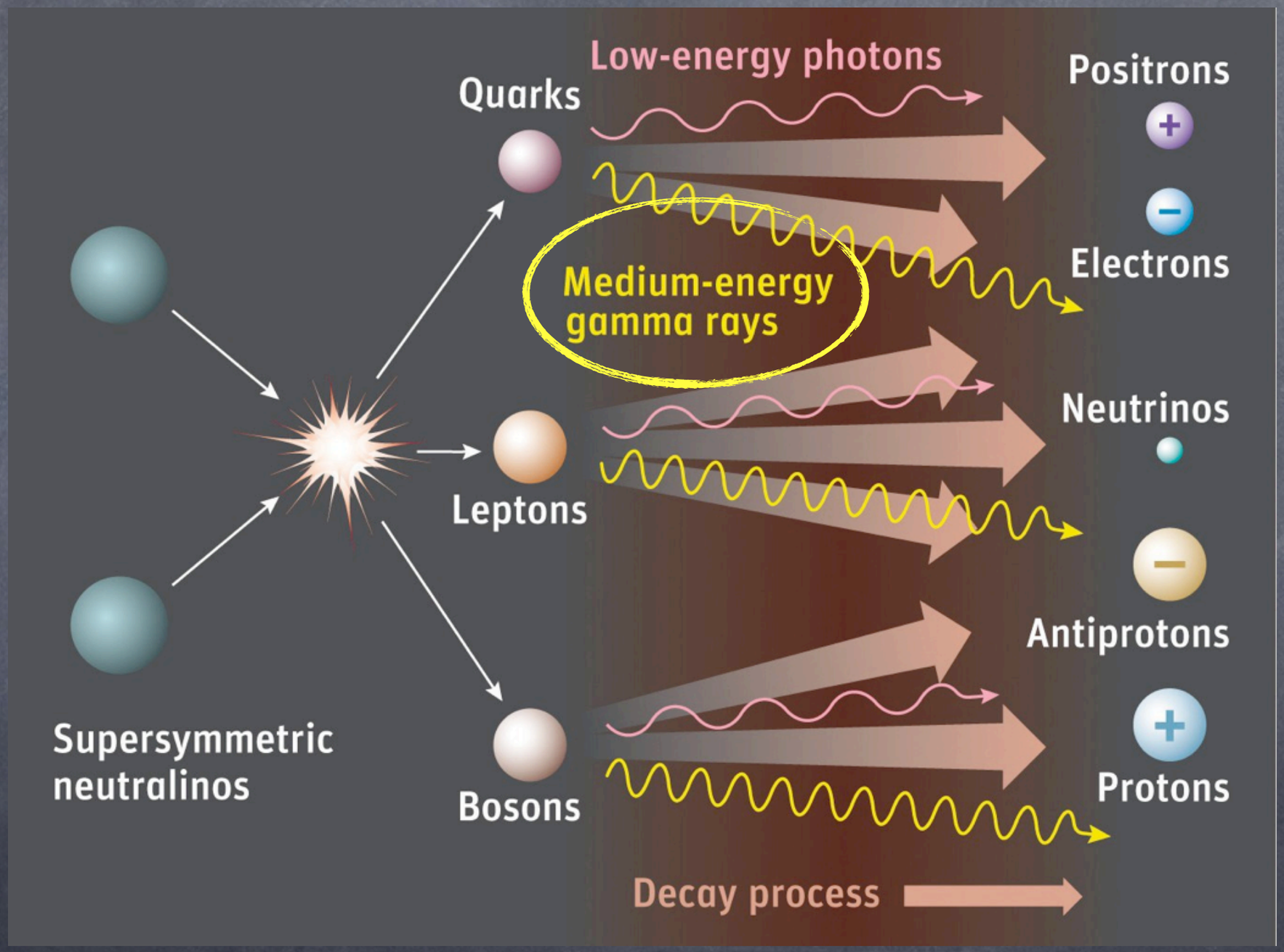
Eccesso di anti-protoni rilevato da diversi strumenti su satellite (LAT, AMS-02)

Prodotto di decadimento della materia oscura?



Origine astrofisica? raggi cosmici

Alla ricerca della "schiappa"

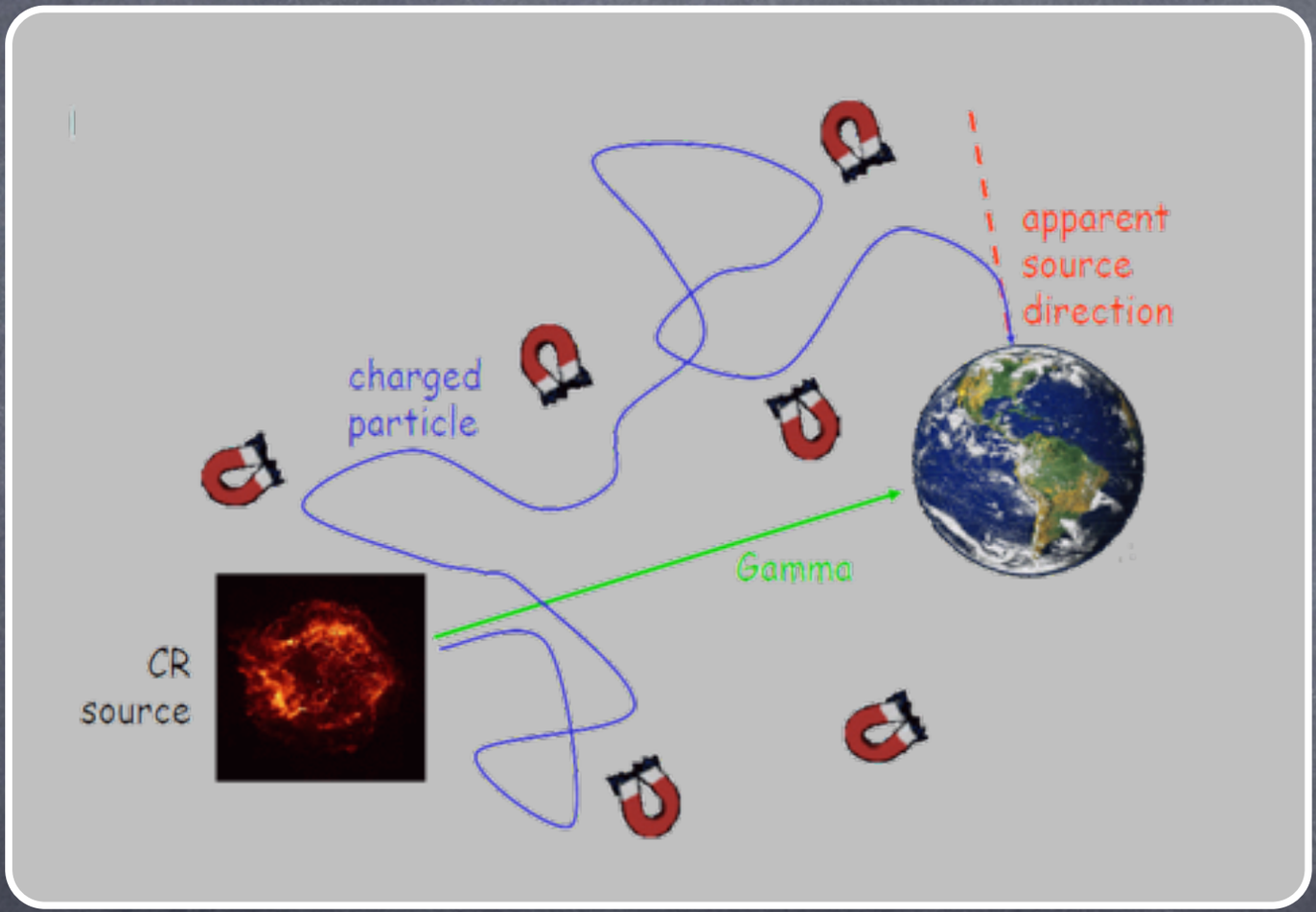


Raggi gamma

Da terra:
TeV

Dallo spazio:
GeV

Raggi gamma


apparent
source
direction
charged
particle
Gamma
CR
source

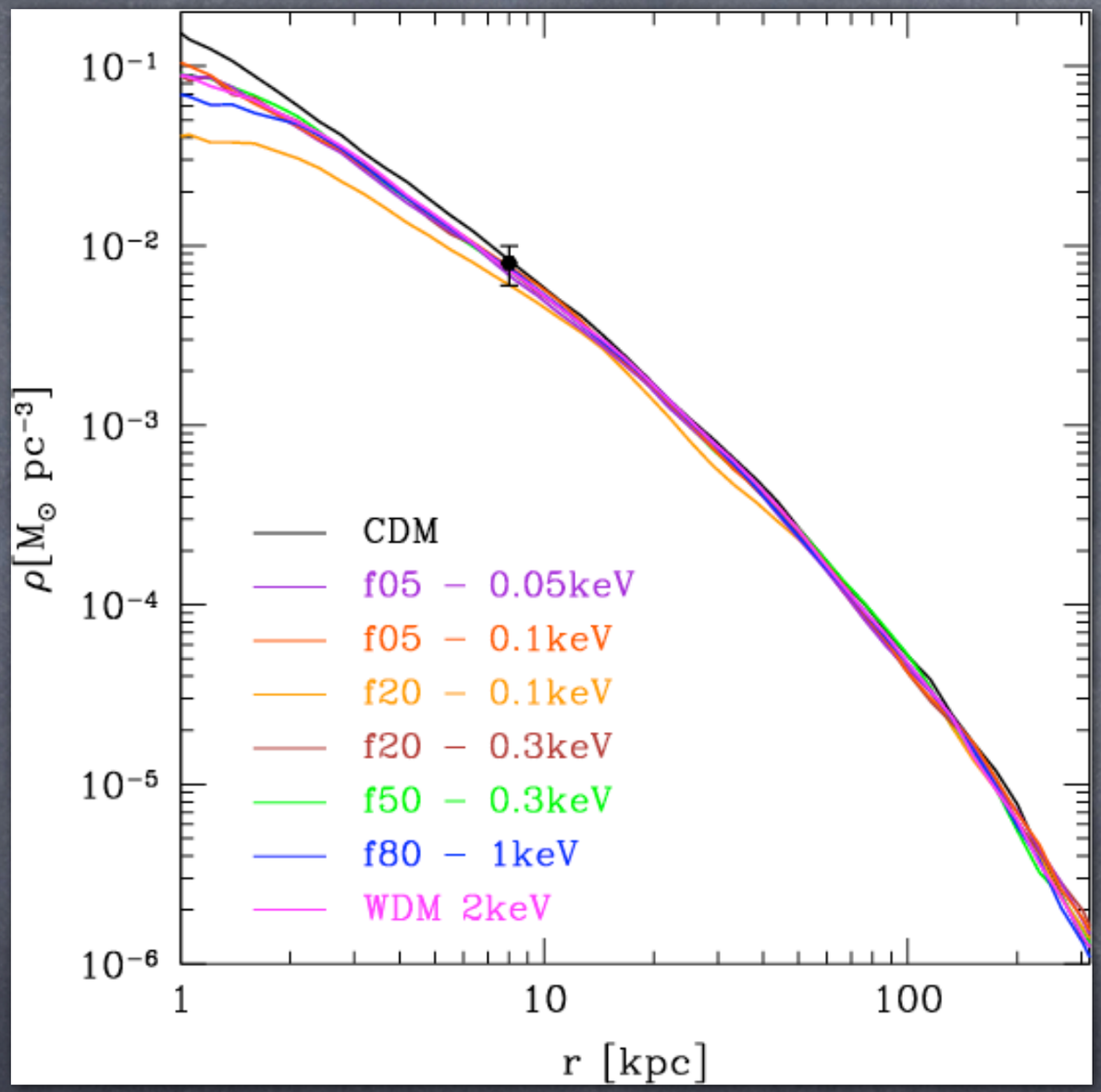
Raggi gamma

Flusso aspettato =

probabilita' di annichilazione x densita^2 / distanza^2

Fisica delle particelle (sezione d'urto)

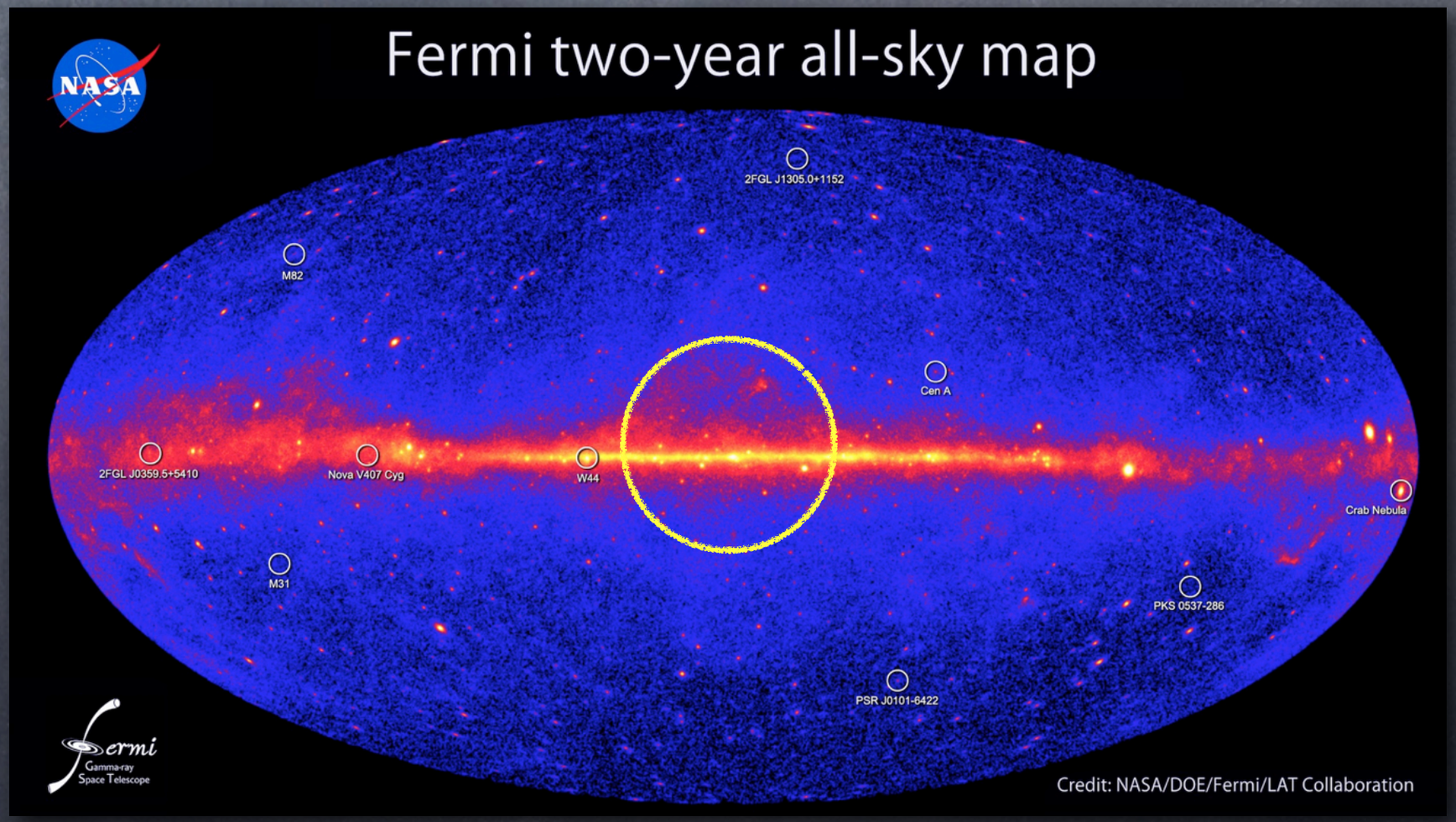
Astrofisica


10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
$\rho[M_\odot\ pc^{-3}]$
1
10
100
r [kpc]
CDM
f05 – 0.05keV
f05 – 0.1keV
f20 – 0.1keV
f20 – 0.3keV
f50 – 0.3keV
f80 – 1keV
WDM 2keV

Raggi gamma

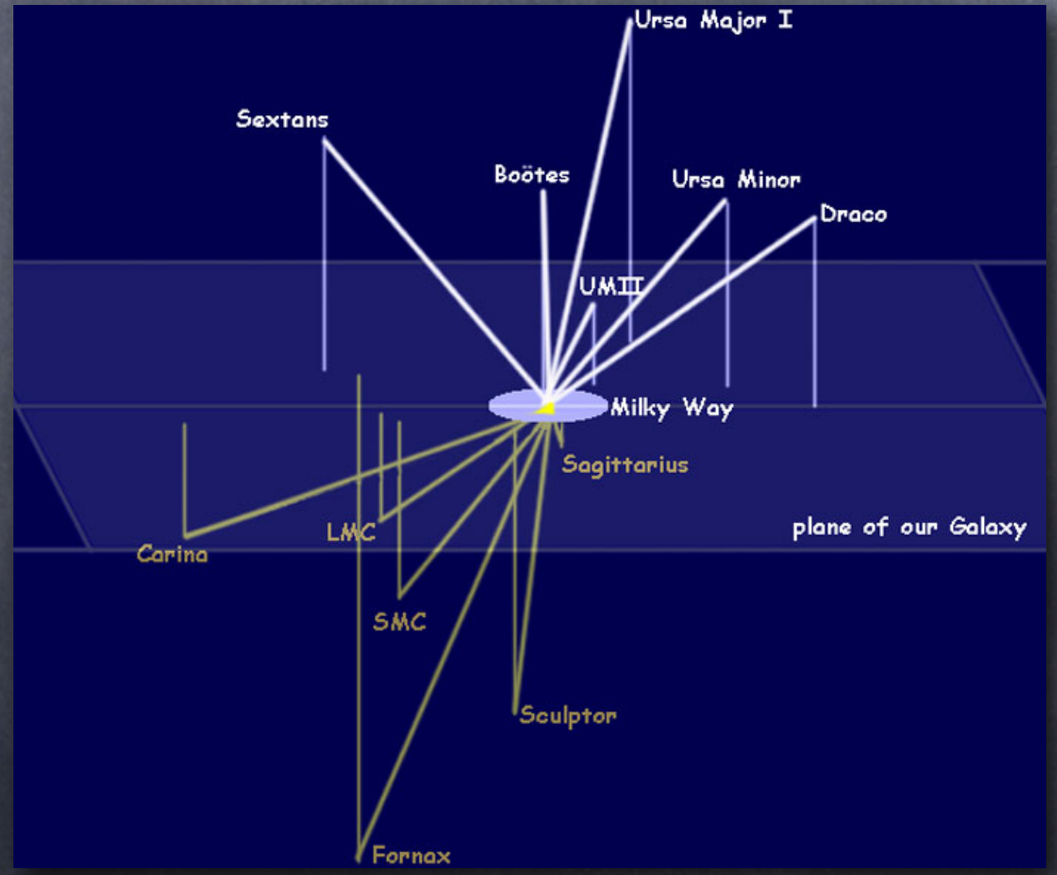
Obiettivo primario:
alta densità - piccola distanza

Centro galattico

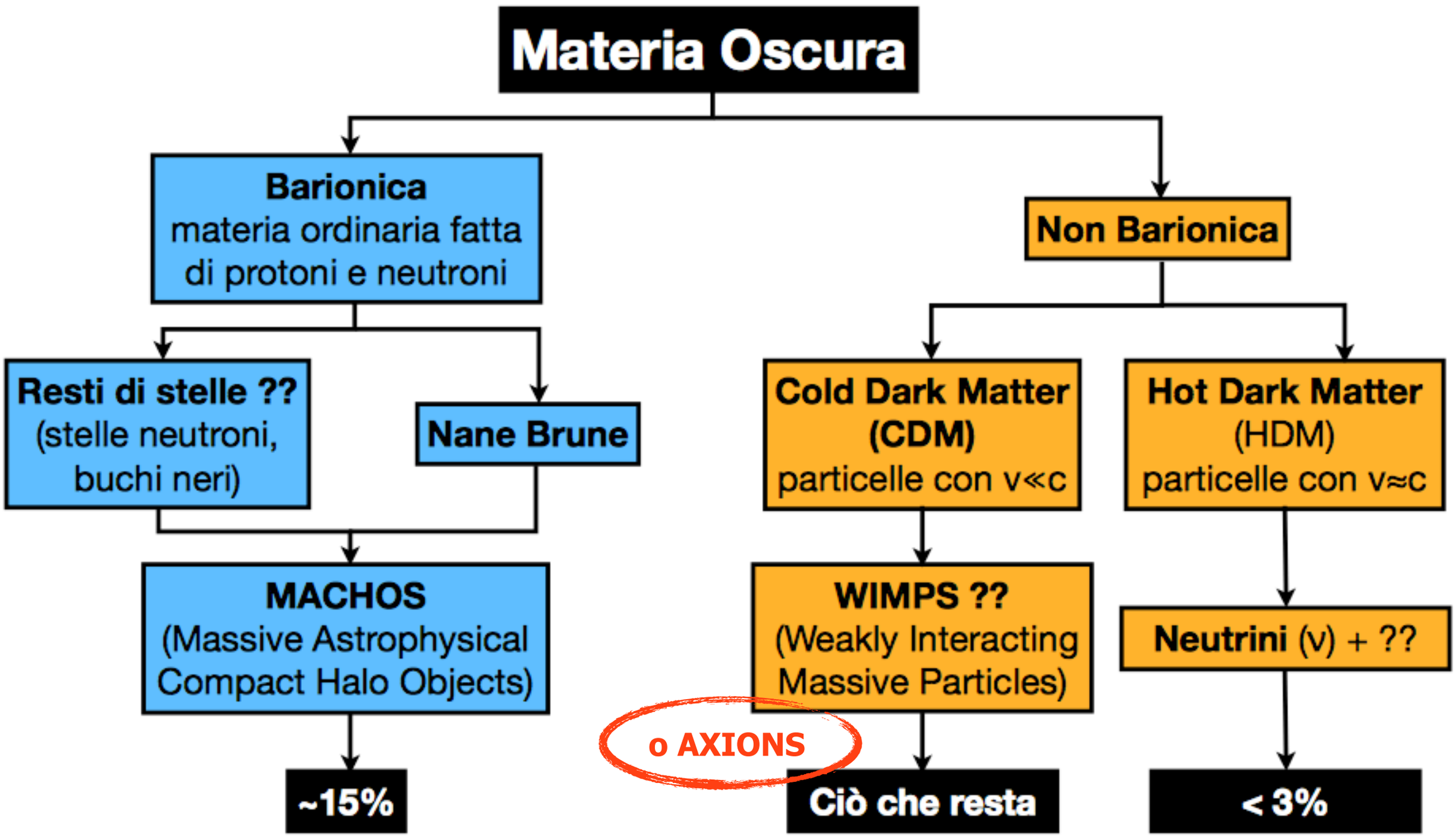


Galassie nane sferoidali

Minima contaminazione!



Candidati


Materia Oscura
Barionica
materia ordinaria fatta di protoni e neutroni
Non Barionica
Resti di stelle ??
(stelle neutroni, buchi neri)
Nane Brune
Cold Dark Matter (CDM)
particelle con v≪c
Hot Dark Matter
(HDM)
particelle con v≈c
MACHOS
(Massive Astrophysical Compact Halo Objects)
WIMPS ??
(Weakly Interacting Massive Particles)
Neutrini (ν) + ??
o AXIONS
~15%
Ciò che resta
< 3%

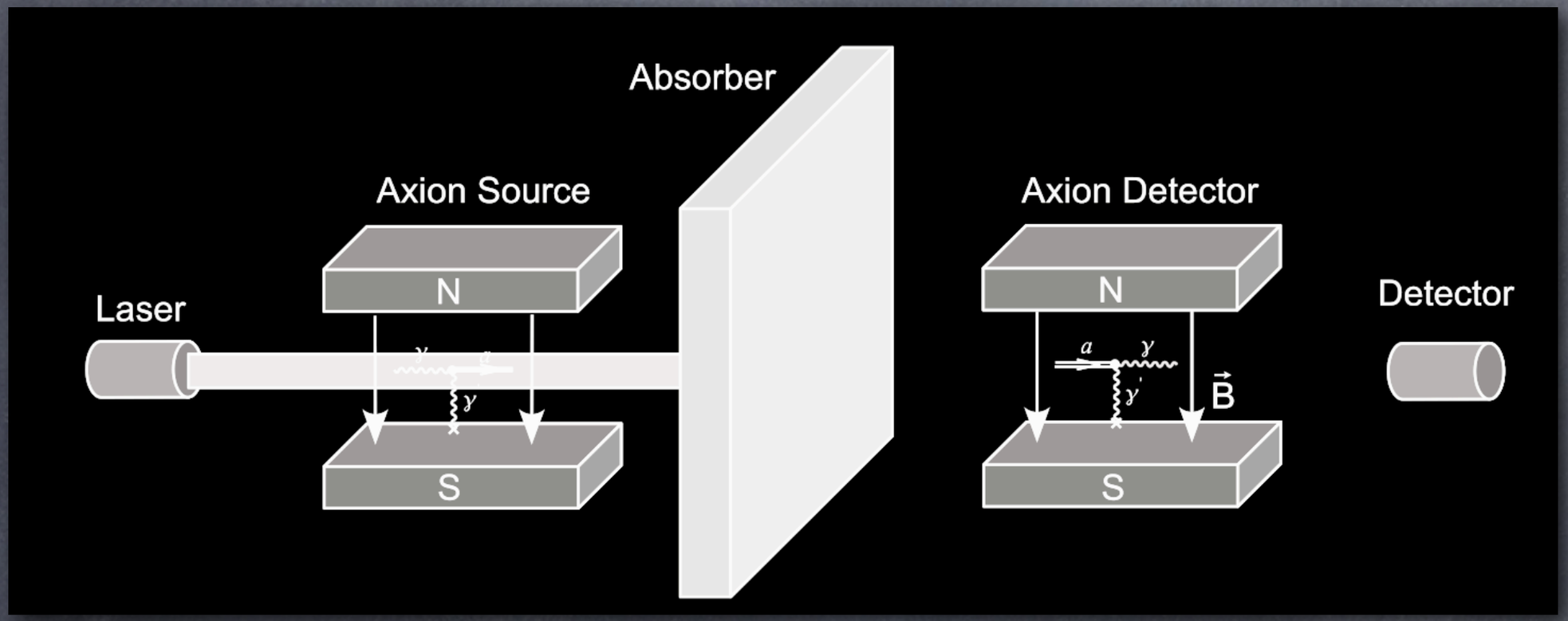
Assioni o axion-like particles (ALPs)

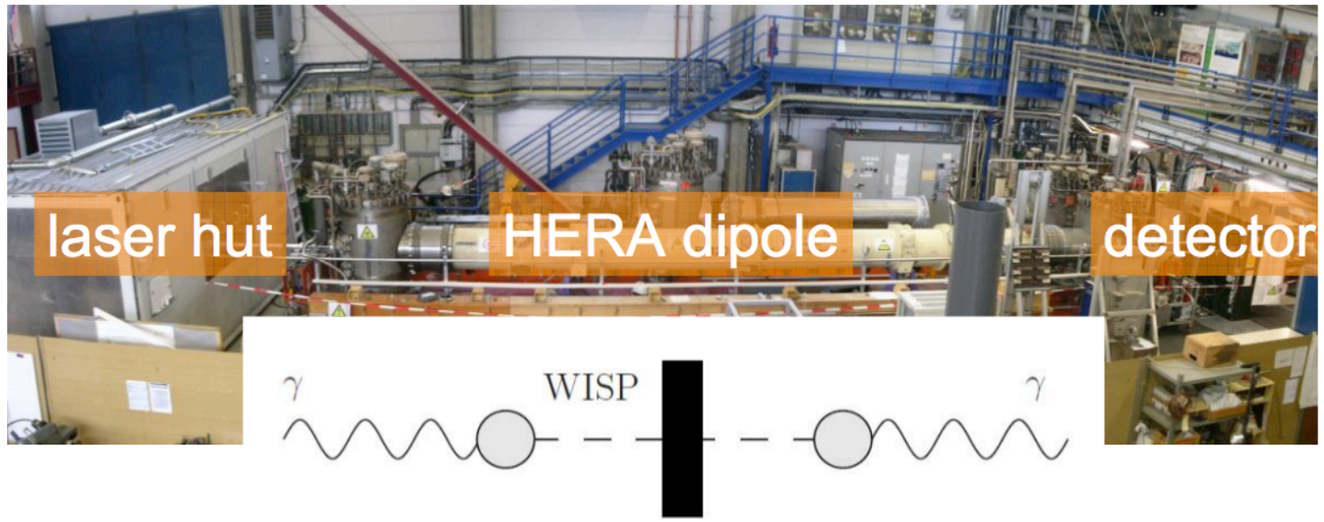
- Massa piccola
- Elettricamente neutri
- Poco interagenti

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

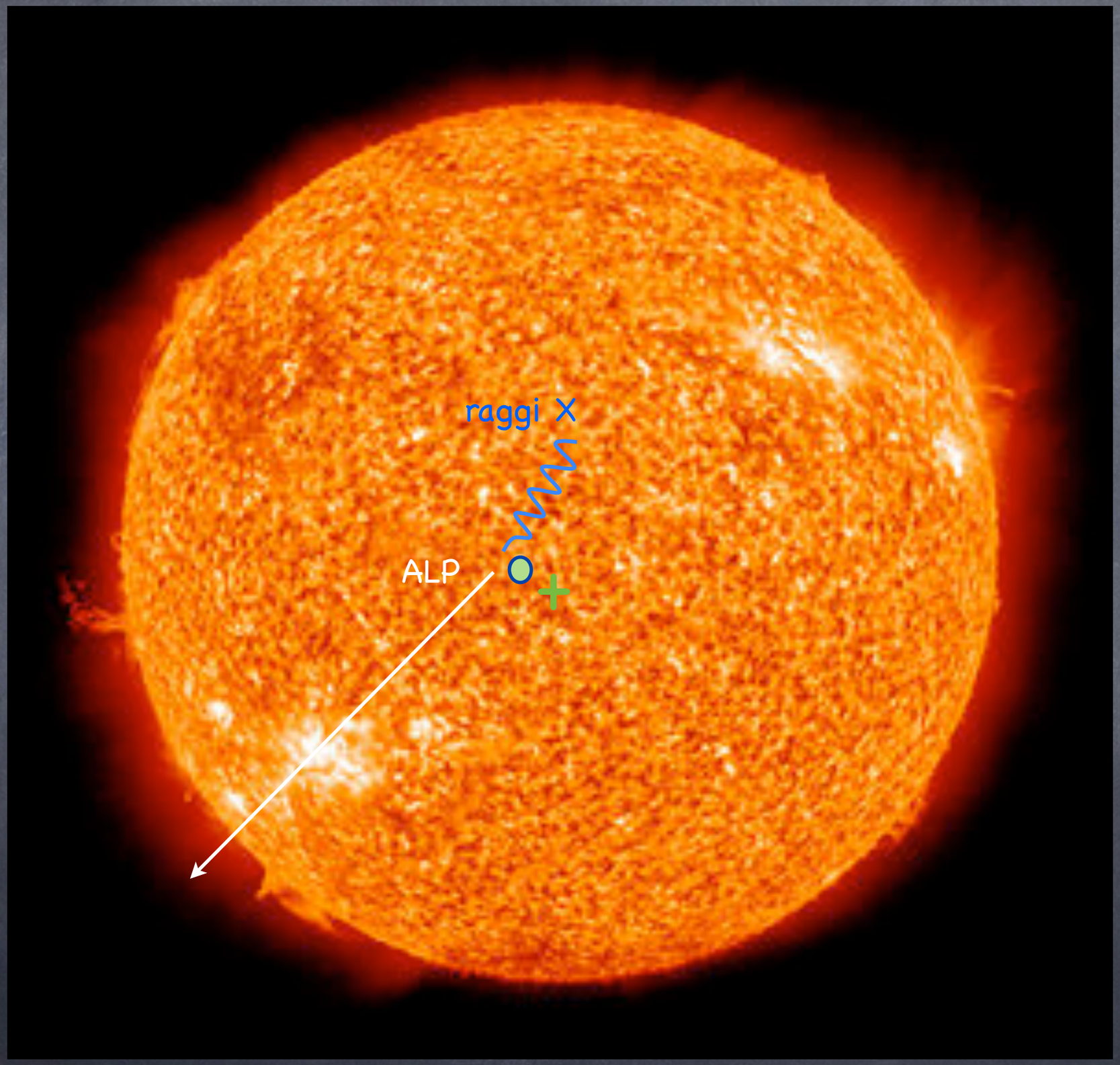
Esperimenti con parete



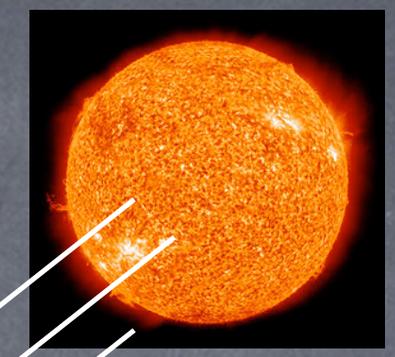


A “light-shining-through-a-wall” experiment

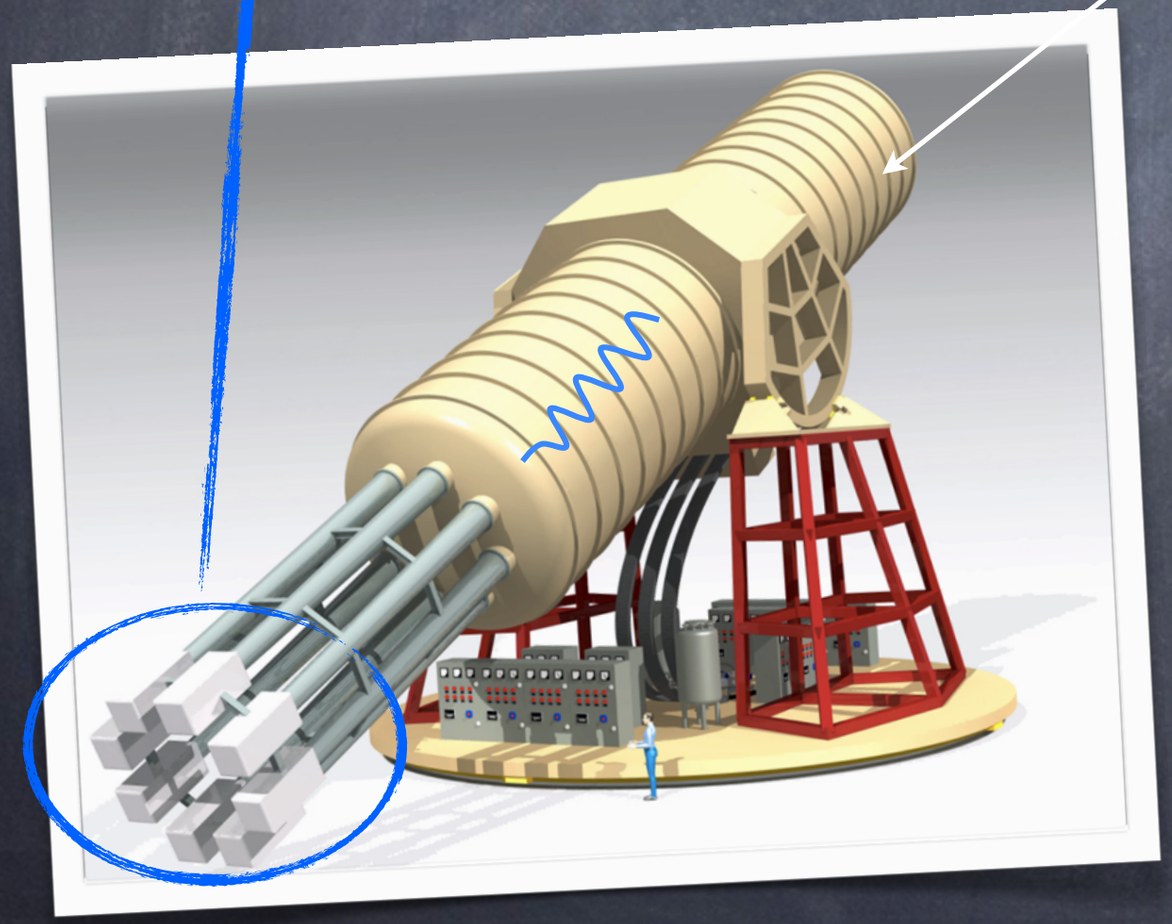
Il Sole come sorgente di ALP!



Il Sole come sorgente di ALP!

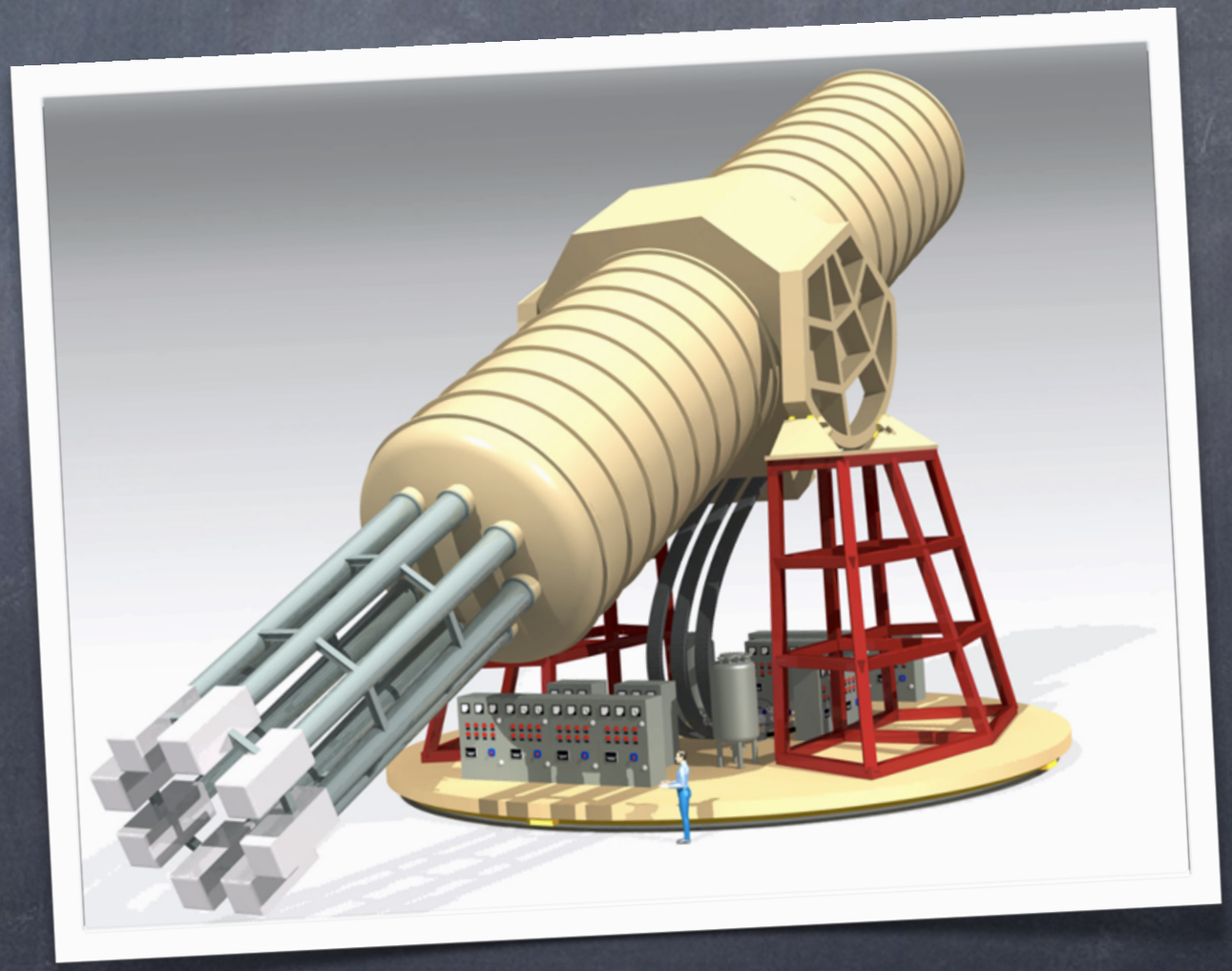


Rivelatore di raggi X

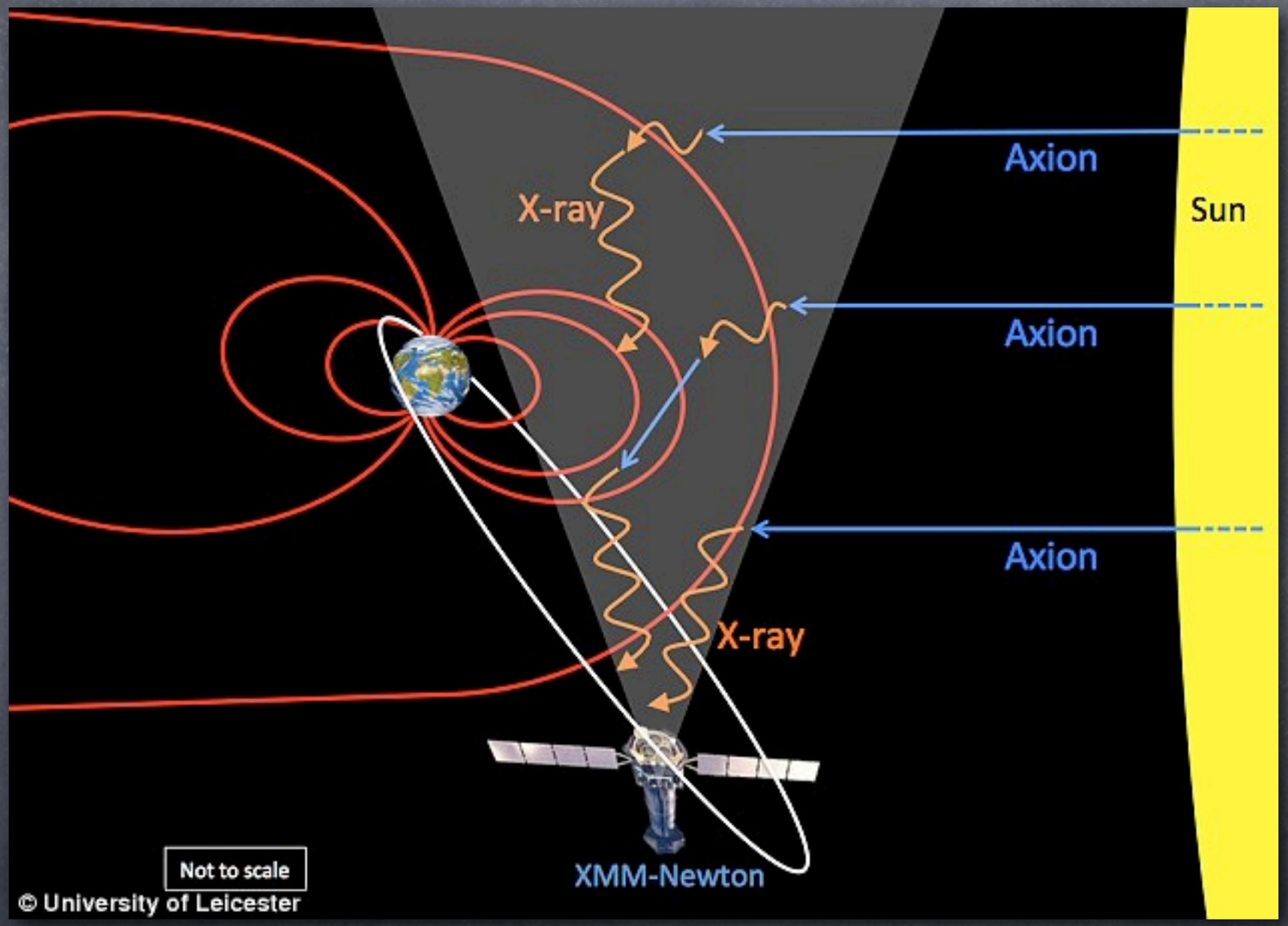


Il presente:
CAST (CERN)

Il futuro:
IAXO

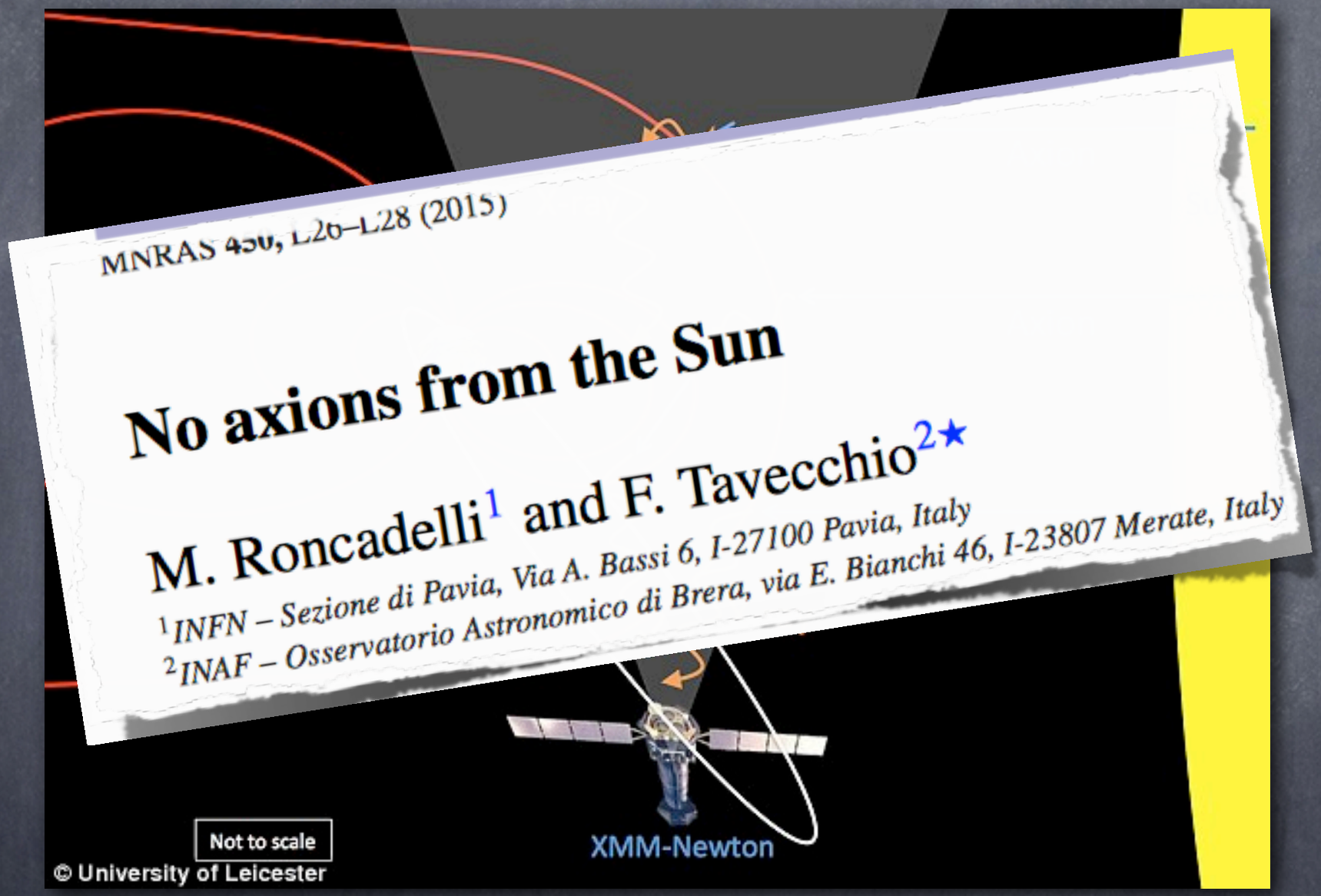


Il Sole come sorgente di ALP?



Fraser et al. 2014

Il Sole come sorgente di ALP?



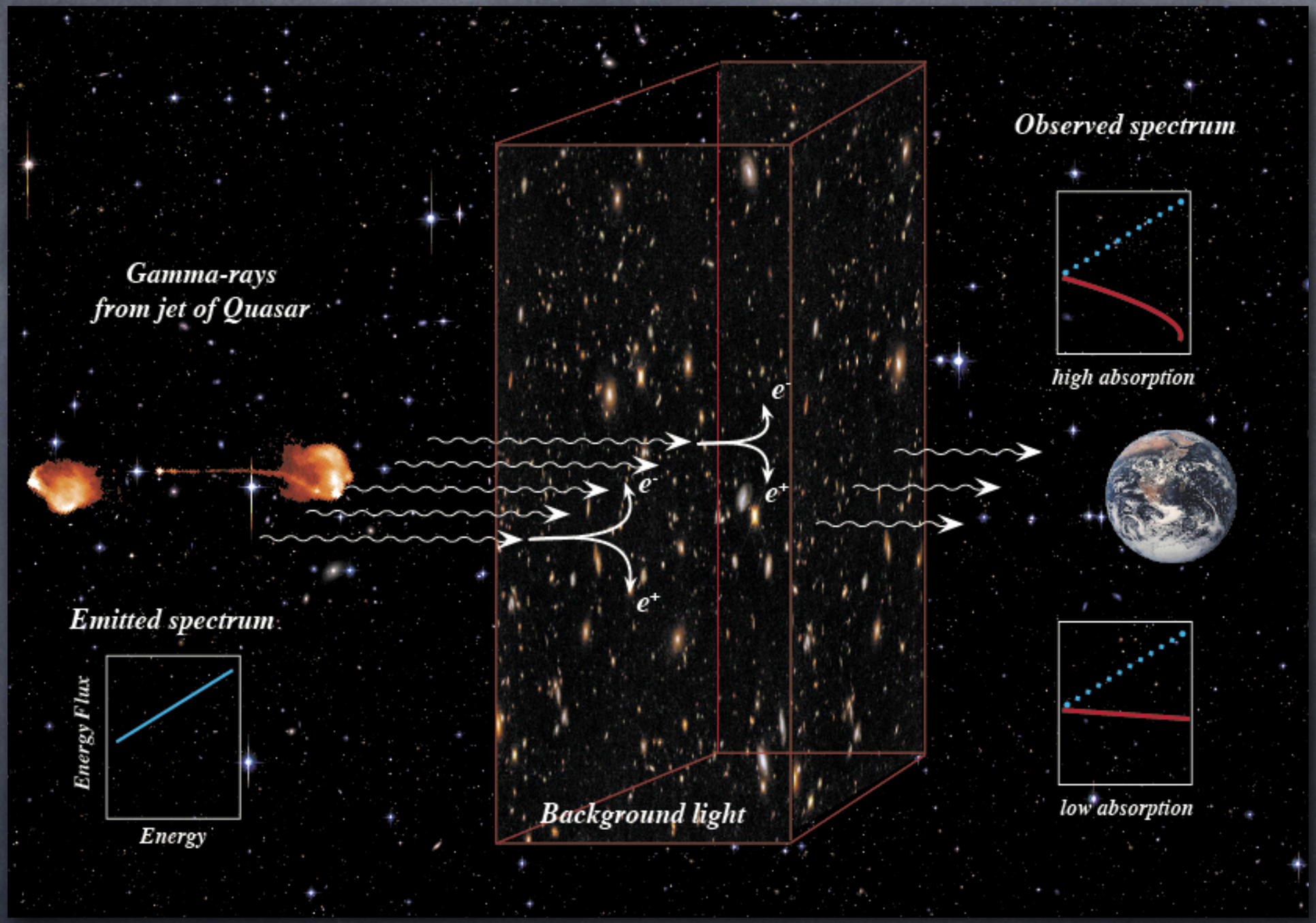
MNRAS 450, L26–L28 (2015)

No axions from the Sun

M. Roncadelli[1] and F. Tavecchio[2★]
[1]INFN – Sezione di Pavia, Via A. Bassi 6, I-27100 Pavia, Italy
[2]INAF – Osservatorio Astronomico di Brera, via E. Bianchi 46, I-23807 Merate, Italy

Fraser et al. 2014

ALPs e opacita' cosmica



ALPs e opacita' cosmica

Le oscillazioni ALP-fotone permetterebbero di vedere piu' lontano!

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 — γ

Carica elettrica: 0
Massa: 0
Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.

BOSONE *Z* — 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.

BOSONI W^+/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.

GLUONI — g

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.

HIGGS — H

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*.

Neutrini

"Sottoprodotto" di reazioni indotte da protoni/nuclei di alta energia

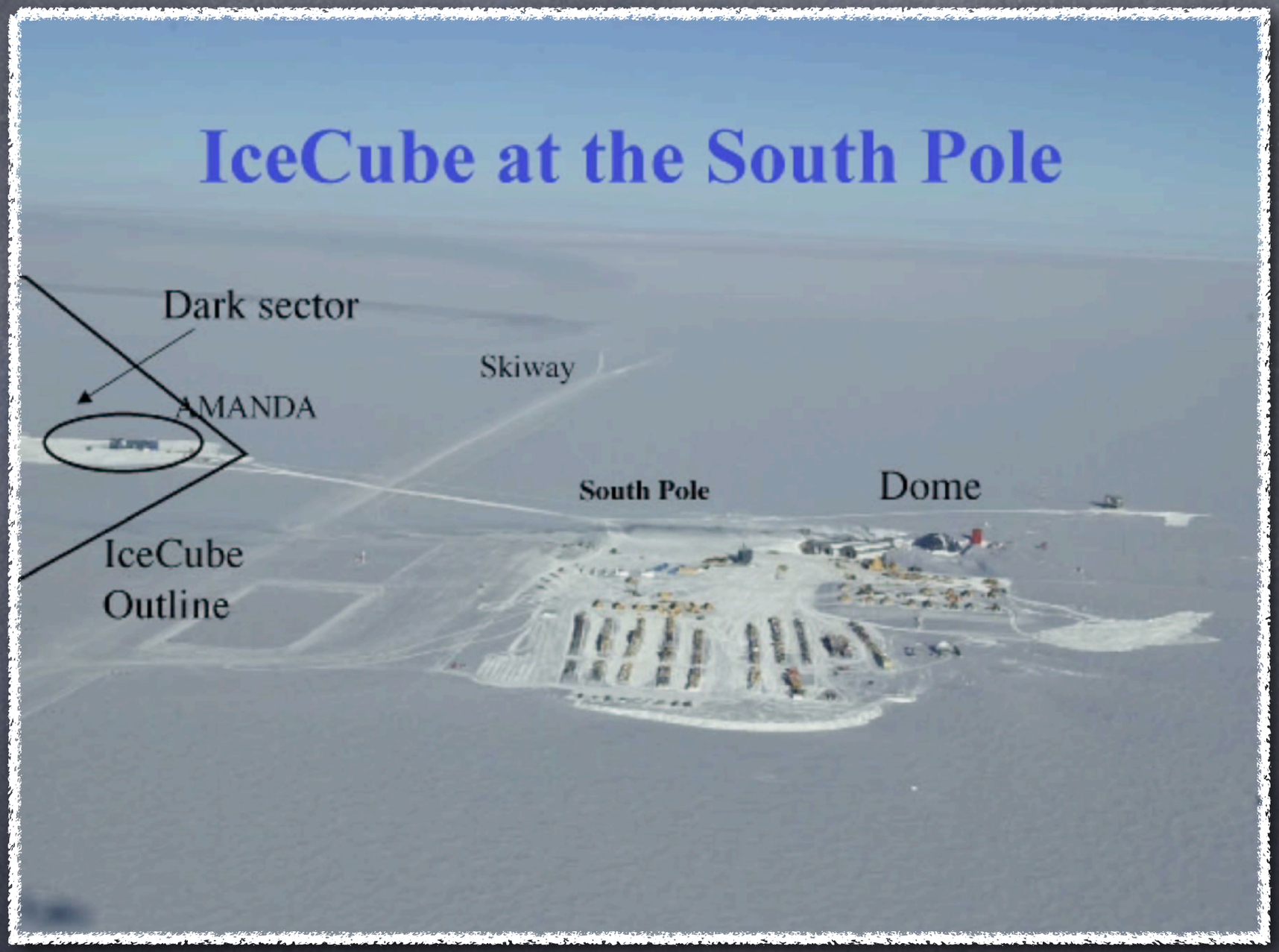
- Atmosfera
- Galassia
- Spazio extragalattico (raggi cosmici)
- Sorgenti astrofisiche

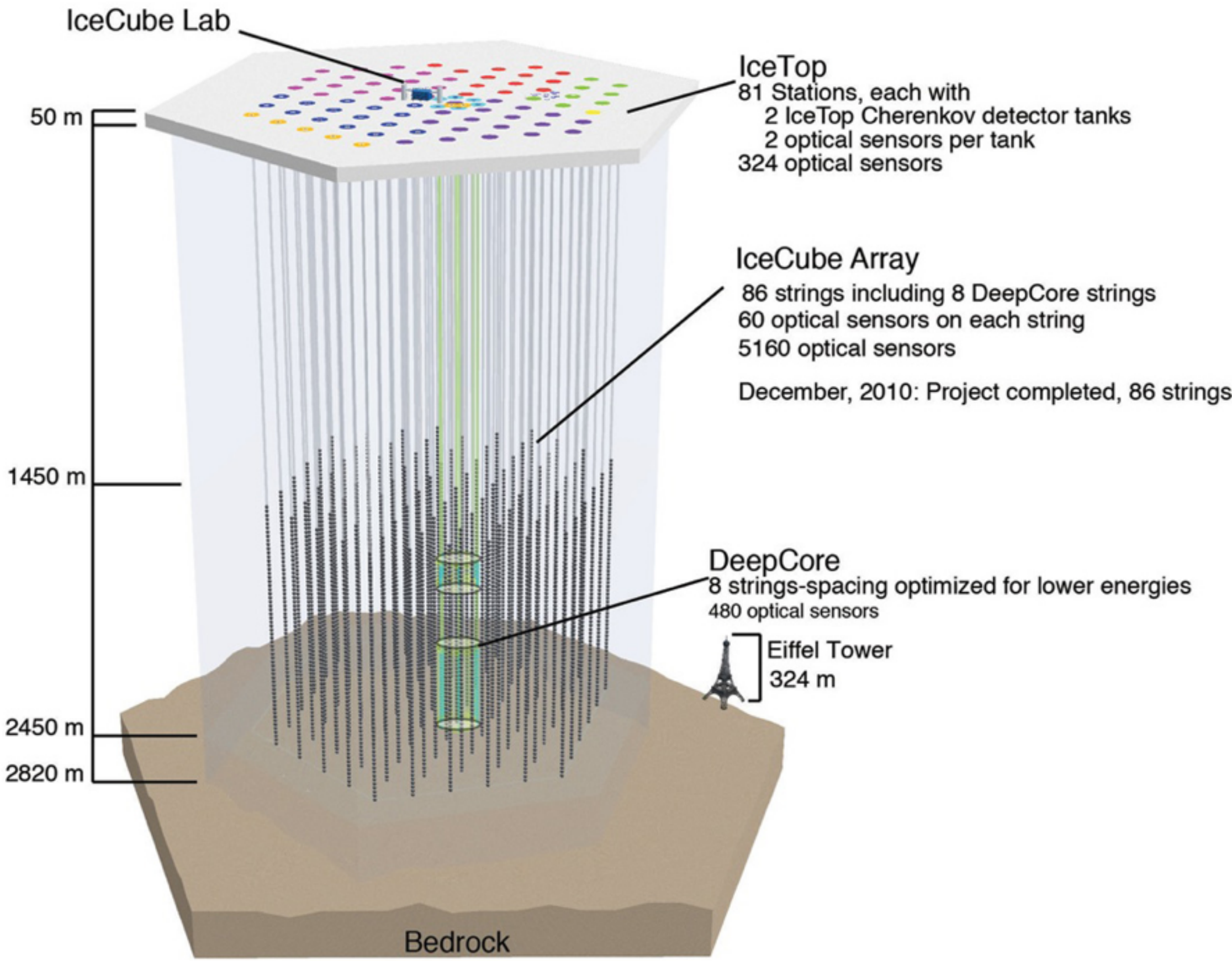
Neutrini

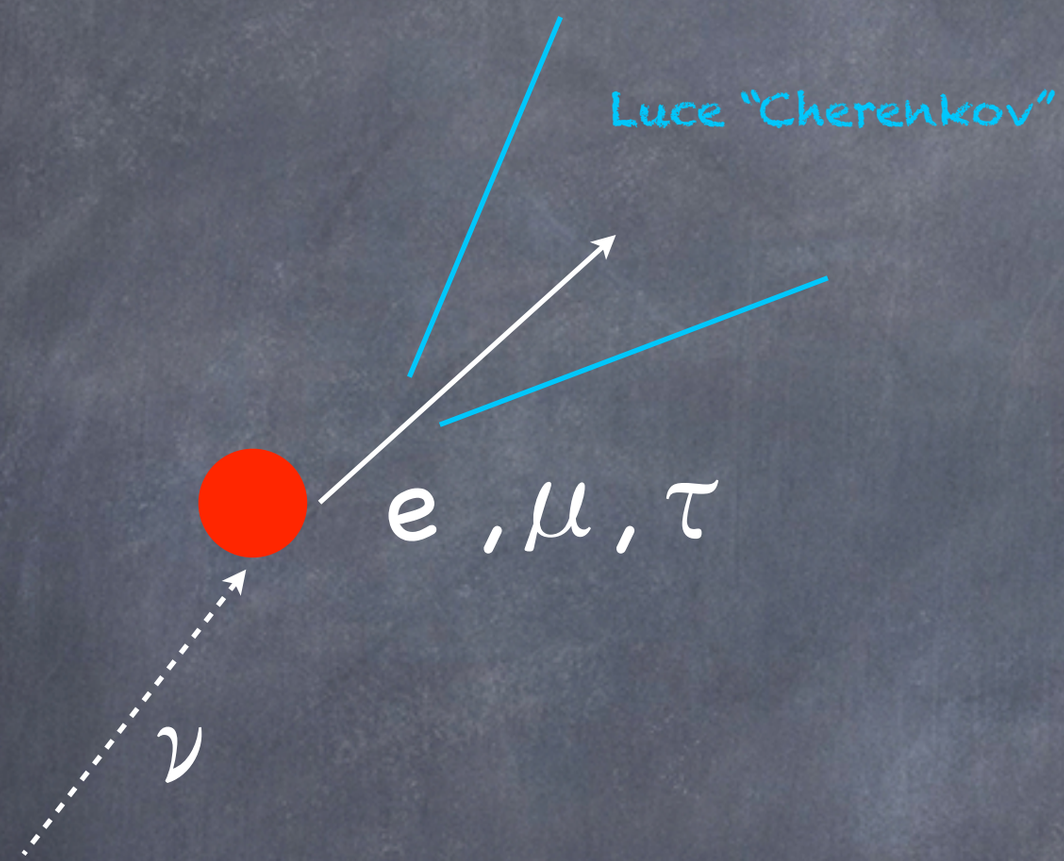
Pochissimo propensi ad interagire
(interazione debole)

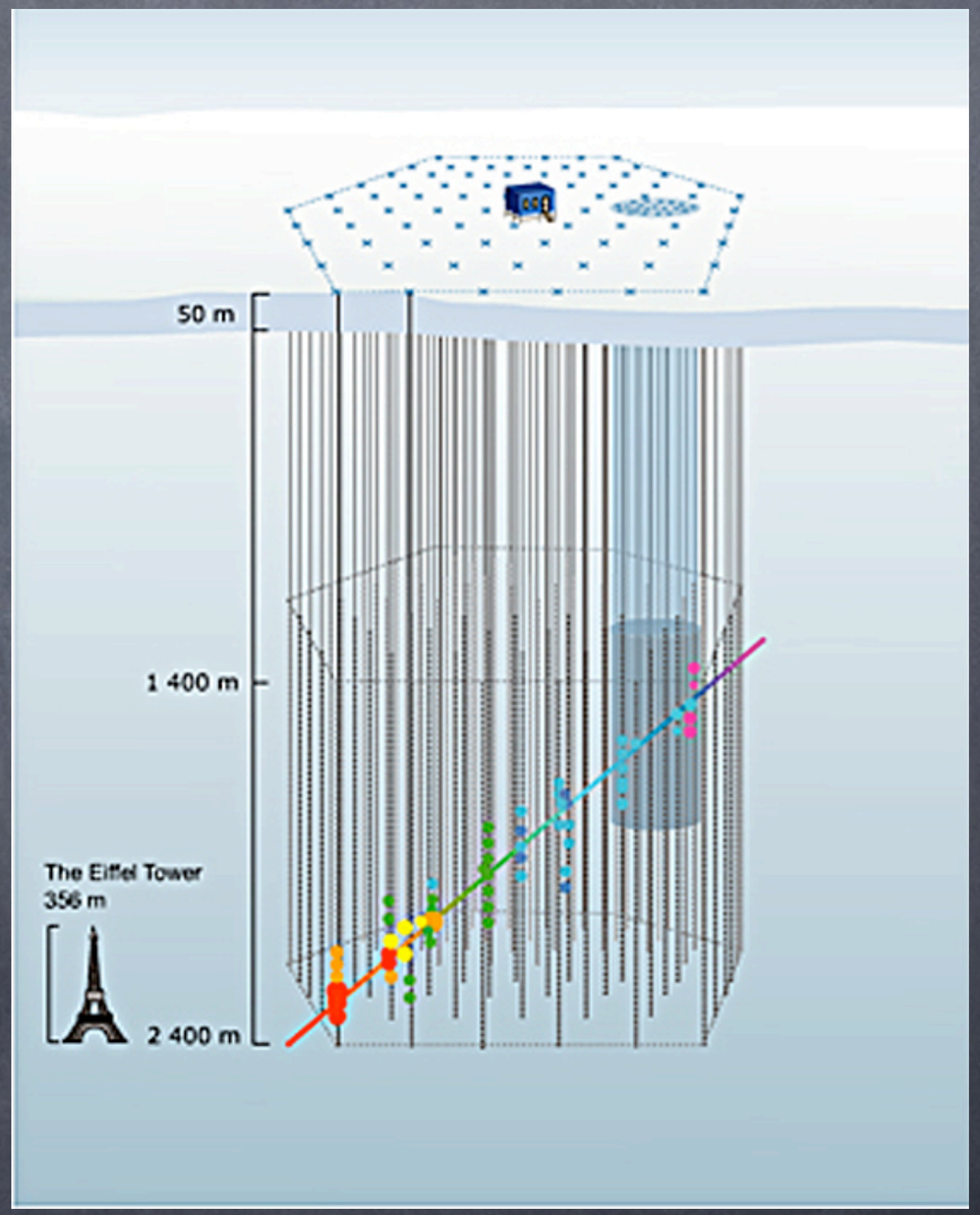
Rivelatori di grandi volumi
(tanti bersagli)

Neutrini

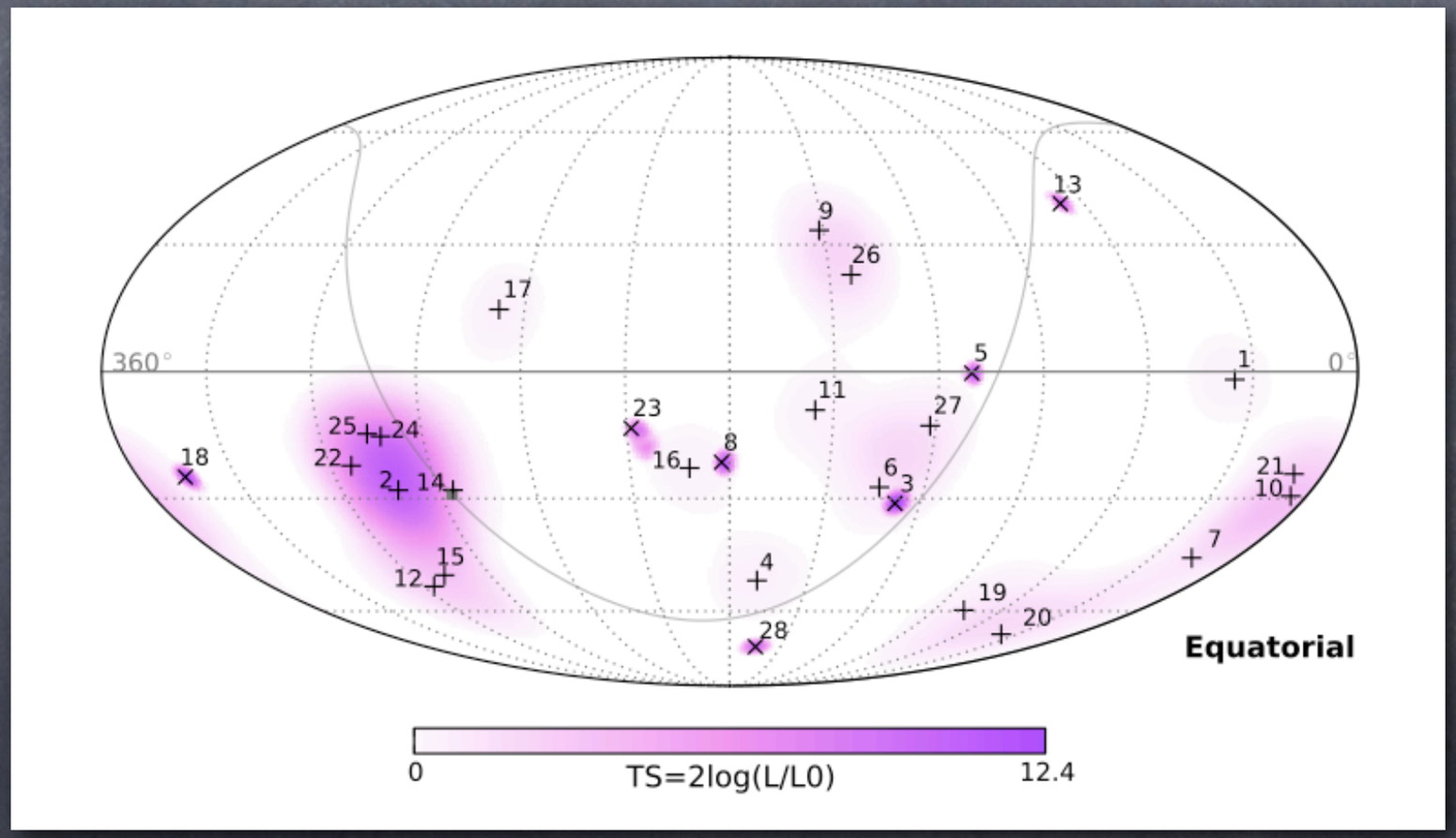

IceCube at the South Pole
Dark sector
Skiway
AMANDA
South Pole
Dome
IceCube
Outline


IceCube Lab
IceTop
81 Stations, each with
2 IceTop Cherenkov detector tanks
2 optical sensors per tank
324 optical sensors
50 m
IceCube Array
86 strings including 8 DeepCore strings
60 optical sensors on each string
5160 optical sensors
December, 2010: Project completed, 86 strings
1450 m
DeepCore
8 strings-spacing optimized for lower energies
480 optical sensors
Eiffel Tower
324 m
2450 m
2820 m
Bedrock


Luce "Cherenkov"
e , μ , τ
ν


50 m
1 400 m
The Eiffel Tower
356 m
2 400 m

2012: prima evidenza di 28 neutrini cosmici con energie di 100-1000 TeV



Neutrini

"Sottoprodotto" di reazioni indotte da protoni/nuclei di alta energia

- Galassia
- Sorgenti astrofisiche extragalattiche

Domande !?