

24 aprile 2020
ITP Zoom lecture, in quarantena

Alla ricerca della materia nascosta dell'Universo

Marco Cirelli

(CNRS LPTHE Jussieu & Sorbonne U, Paris)



24 aprile 2020
ITP Zoom lecture, in quarantena

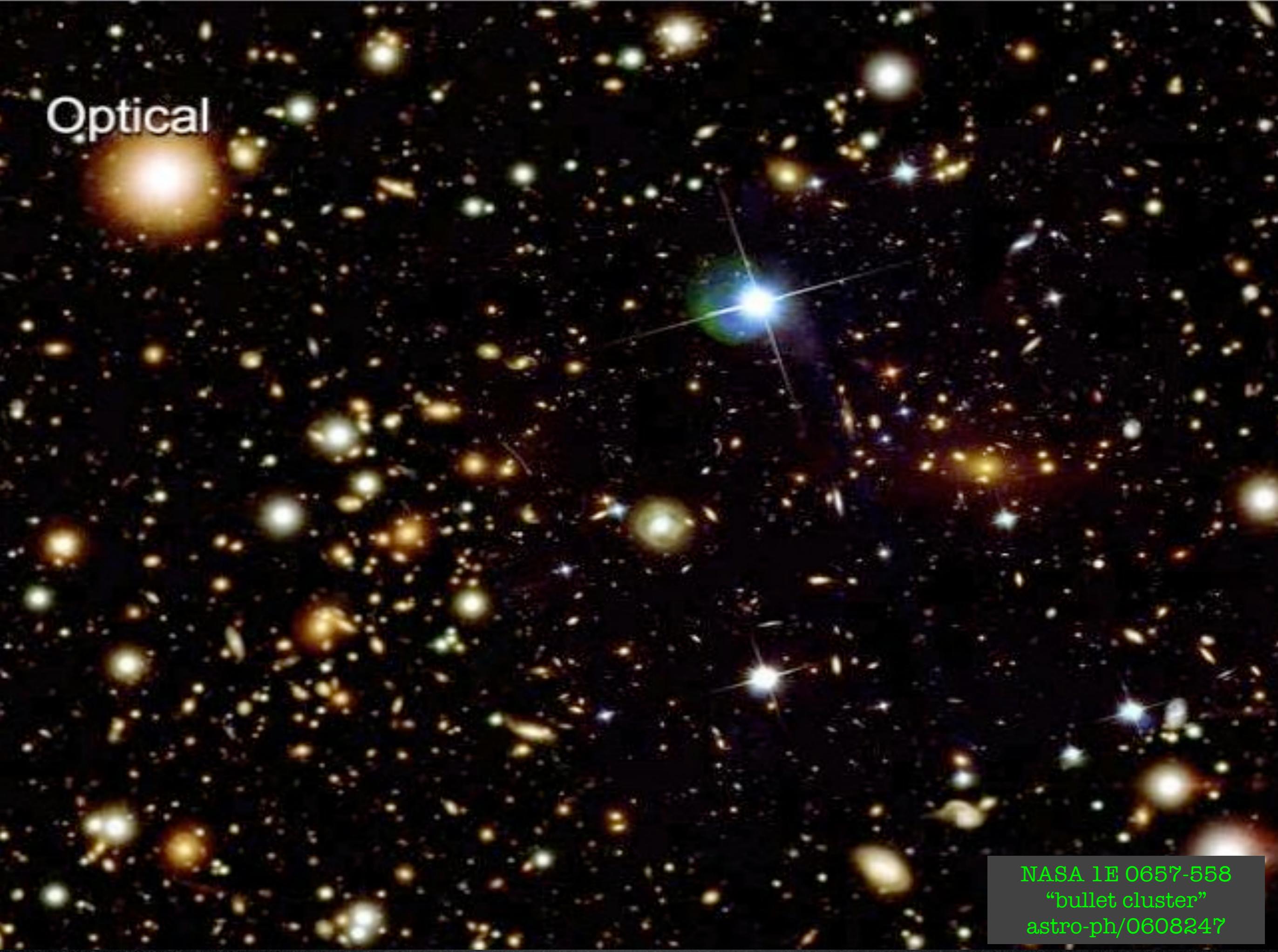
Alla ricerca della **materia nascosta** dell'Universo

Marco Cirelli

(CNRS LPTHE Jussieu & Sorbonne U, Paris)

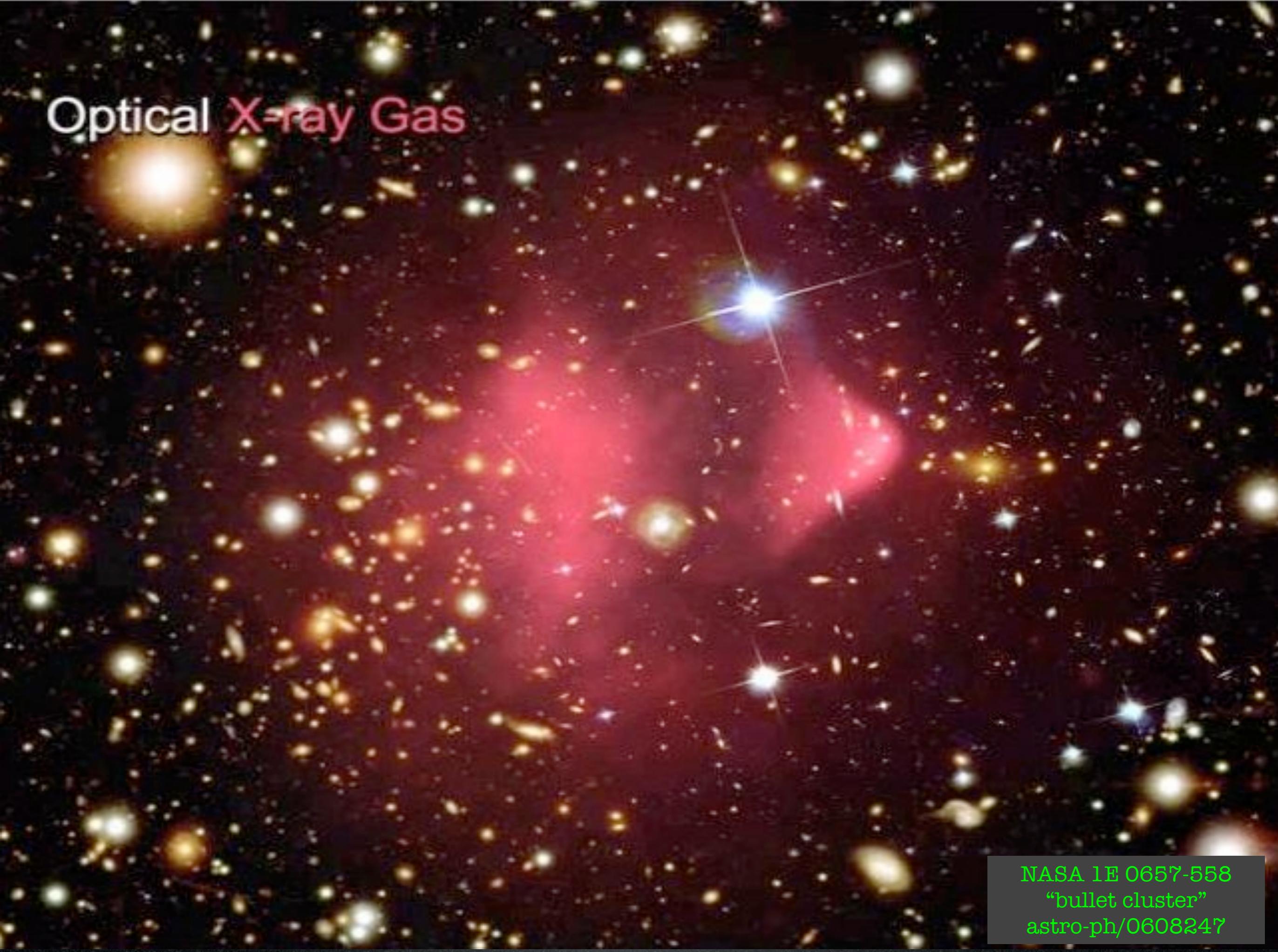


Optical



NASA 1E 0657-558
"bullet cluster"
astro-ph/0608247

Optical X-ray Gas



NASA 1E 0657-558
"bullet cluster"
astro-ph/0608247

Optical Dark Matter



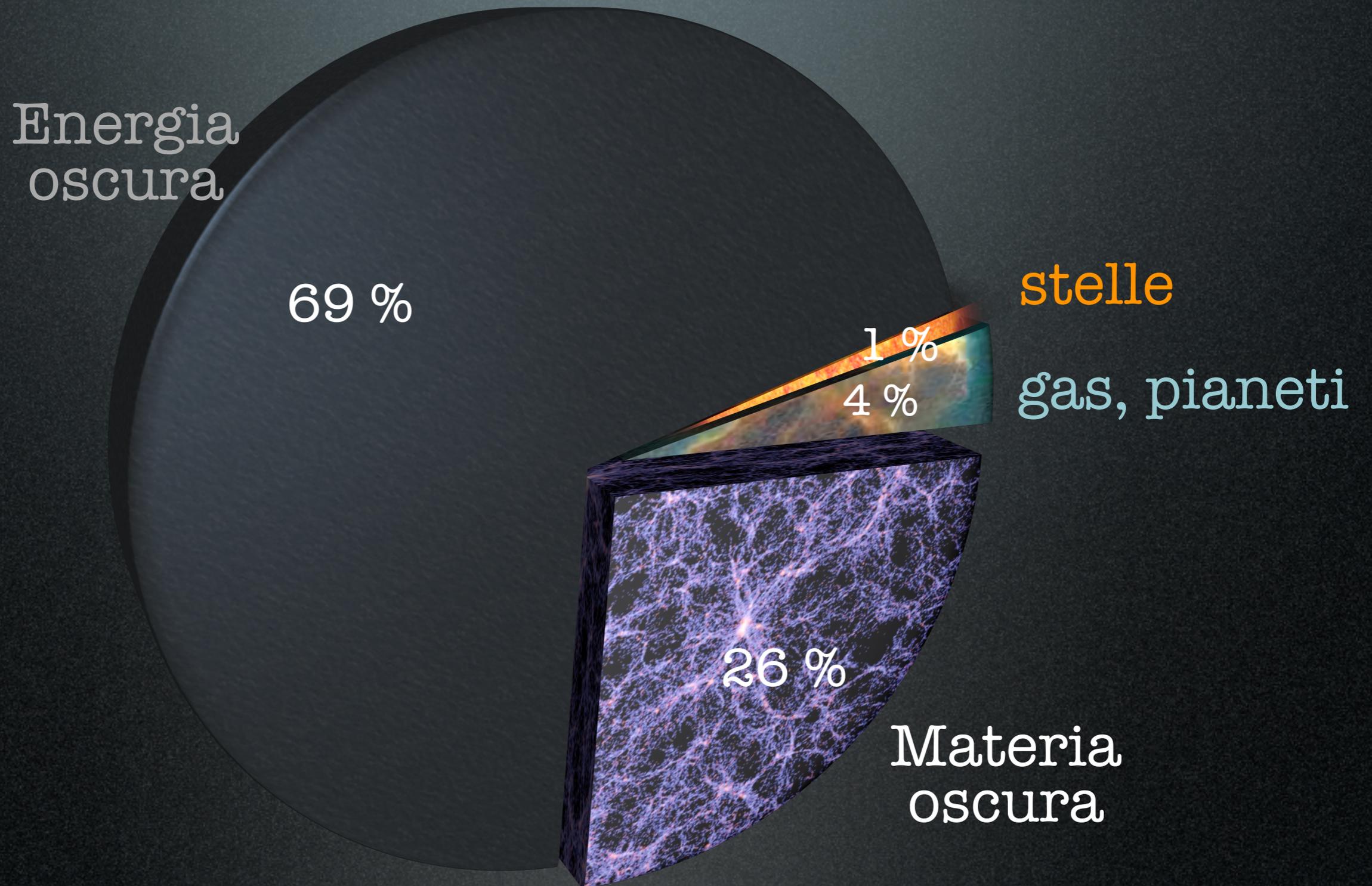
NASA 1E 0657-558
"bullet cluster"
astro-ph/0608247

Optical Dark Matter X-ray Gas

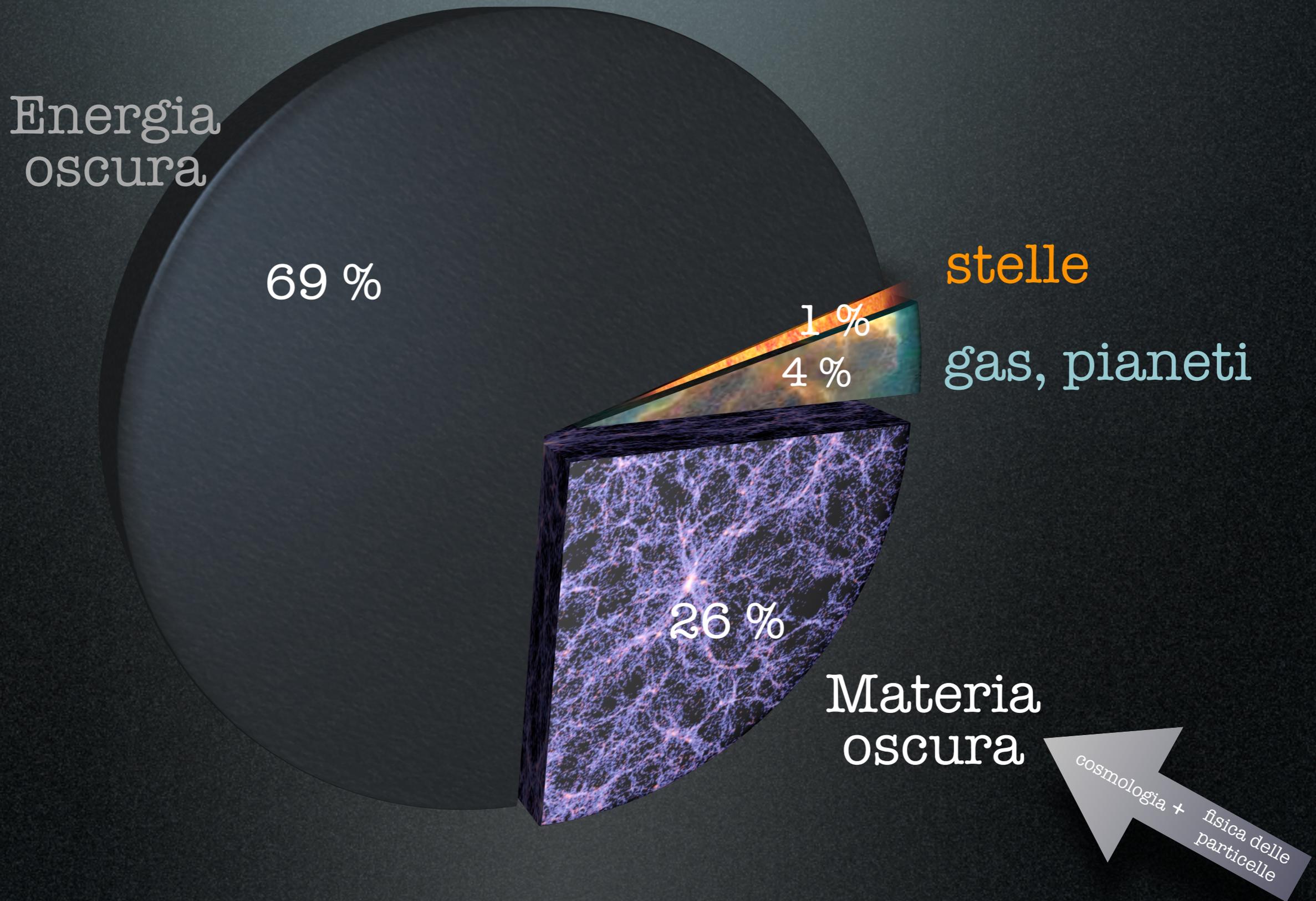


NASA 1E 0657-558
"bullet cluster"
astro-ph/0608247

Il 95% dell'Universo è sconosciuto, oscuro



Il 95% dell'Universo è sconosciuto, oscuro



Quali sono le prove
dell'**esistenza**
della Materia Oscura?

Prove dell'esistenza

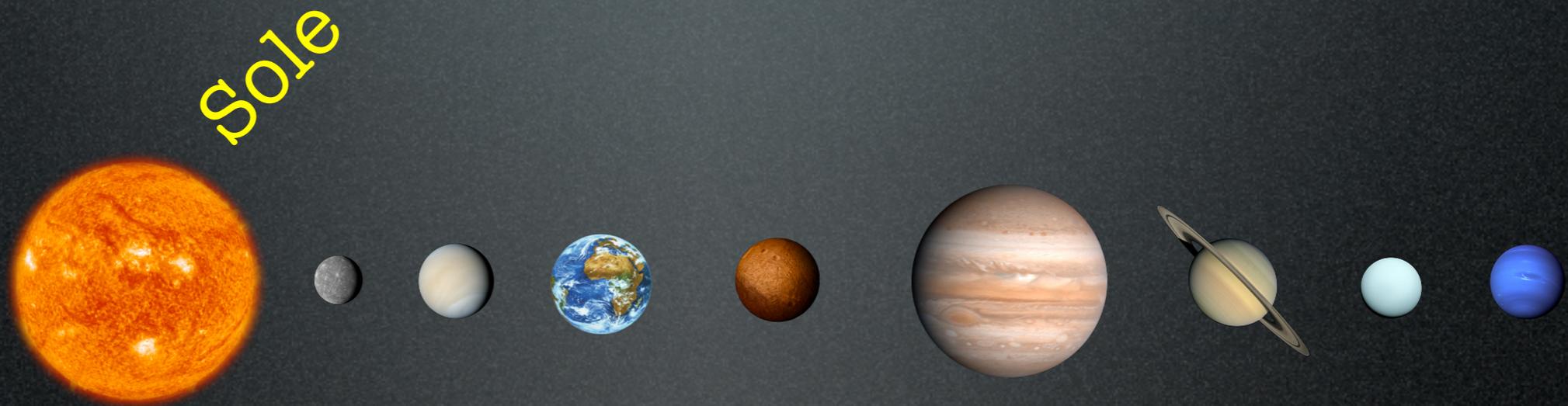
- 1) curve di rotazione galattiche
- 2) ammassi di galassie
- 3) 'cosmologia di precisione'

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione
galattiche

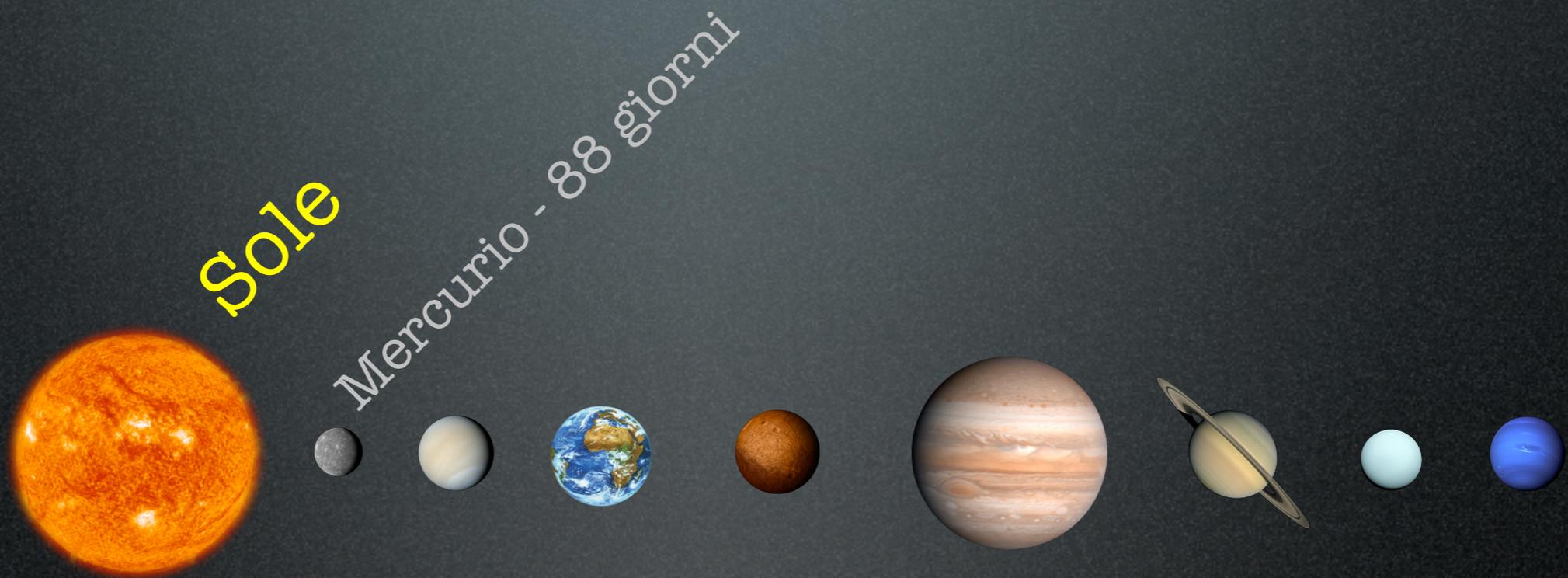
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



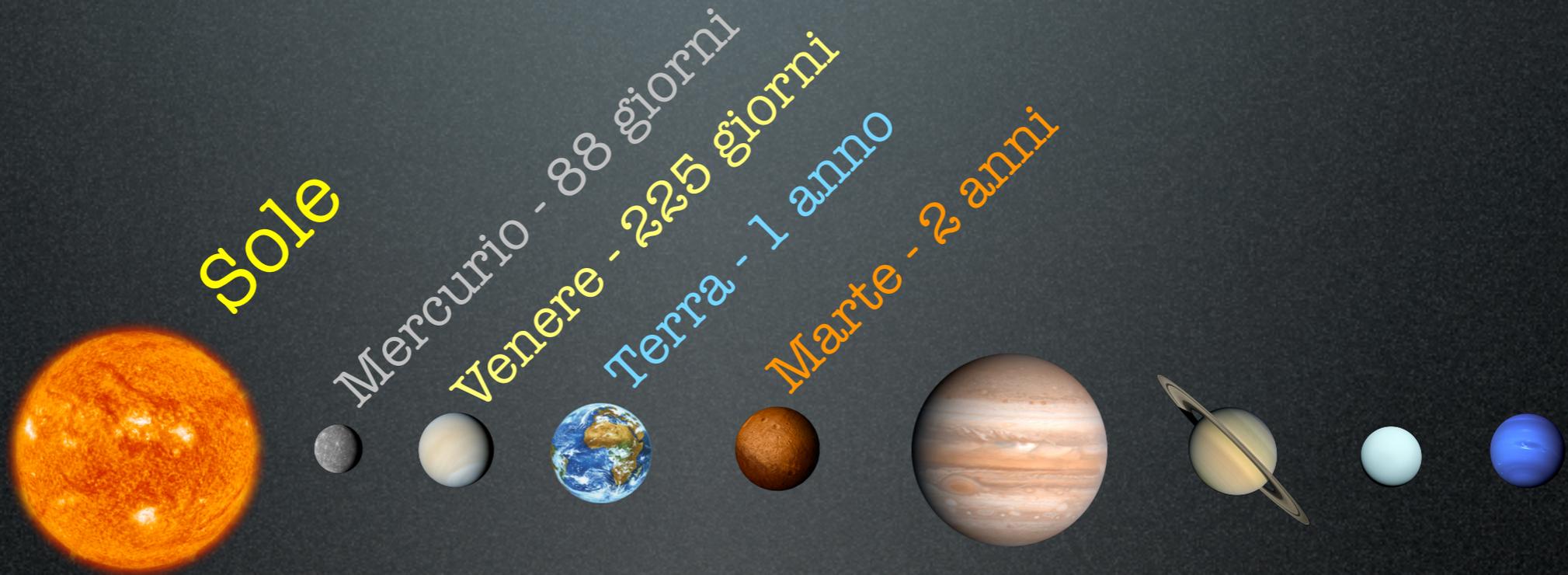
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



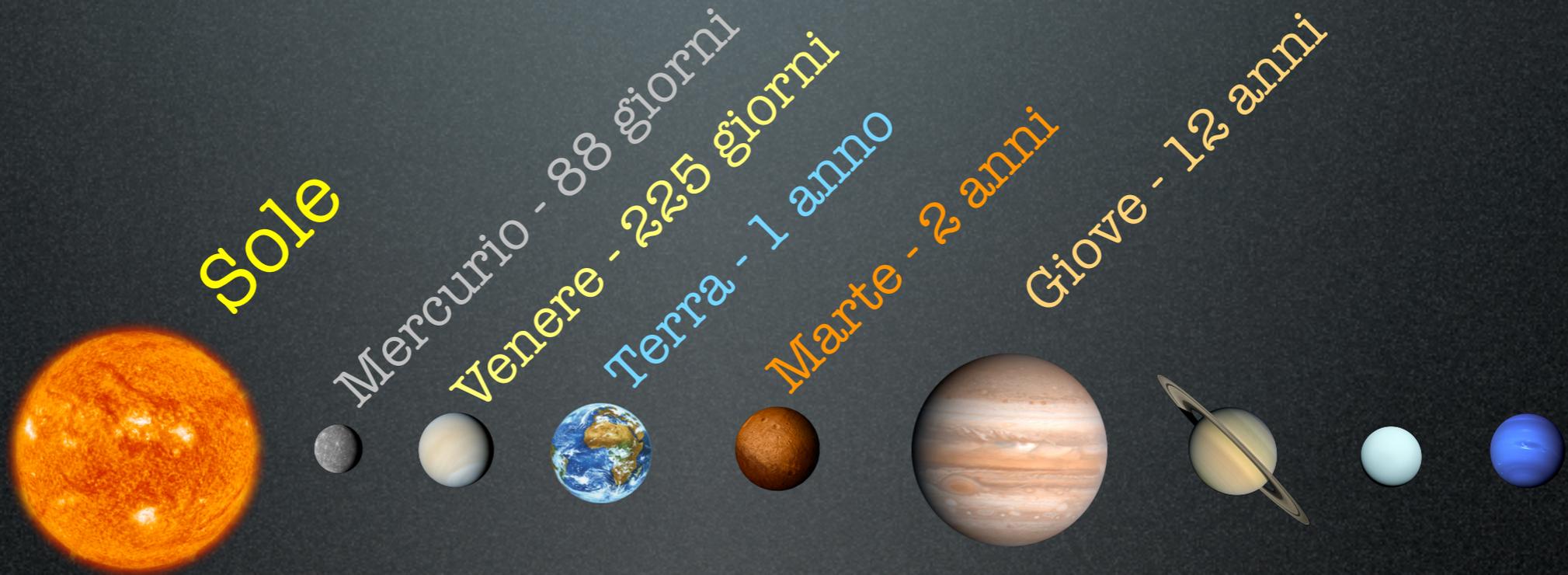
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



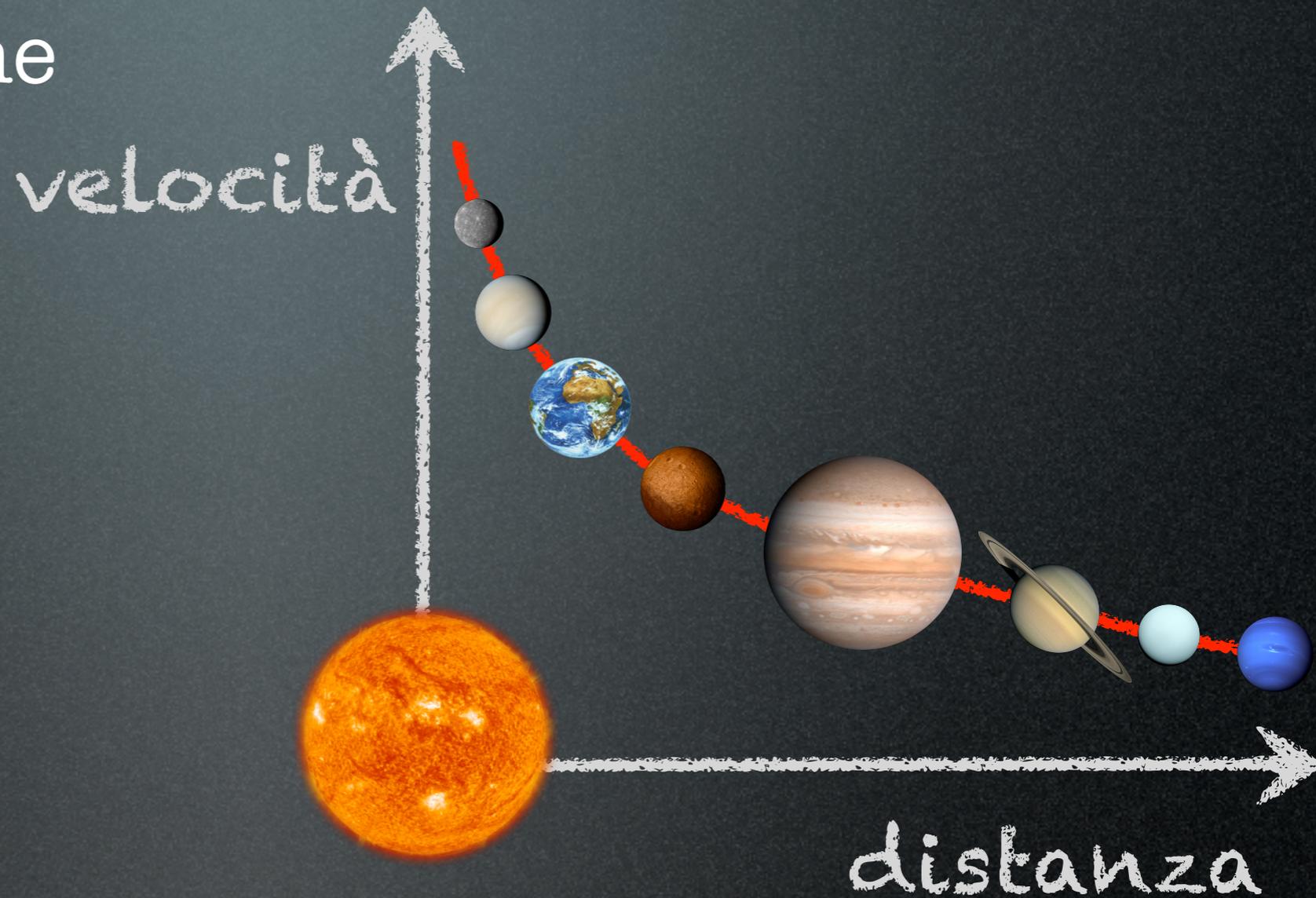
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



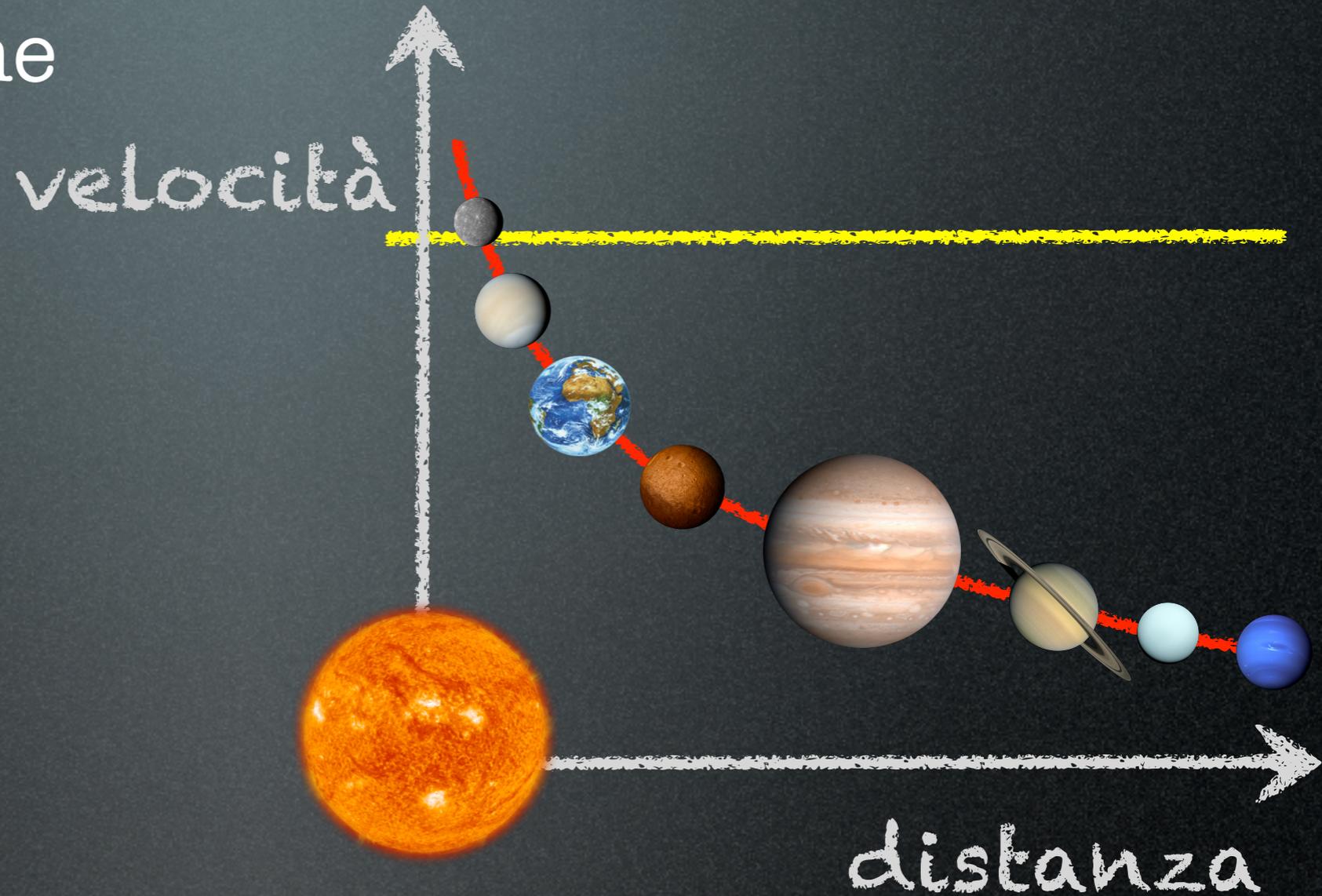
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



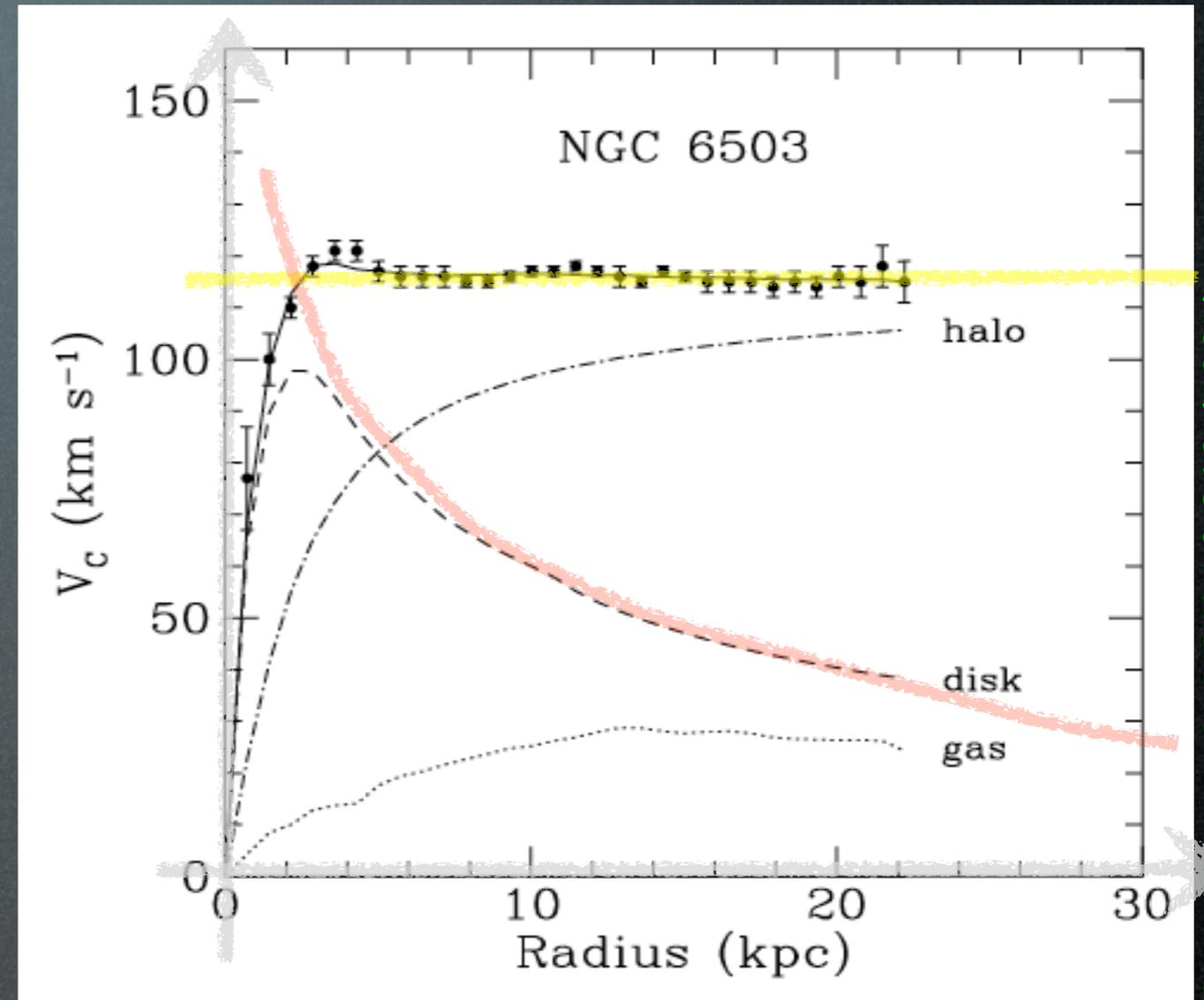
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

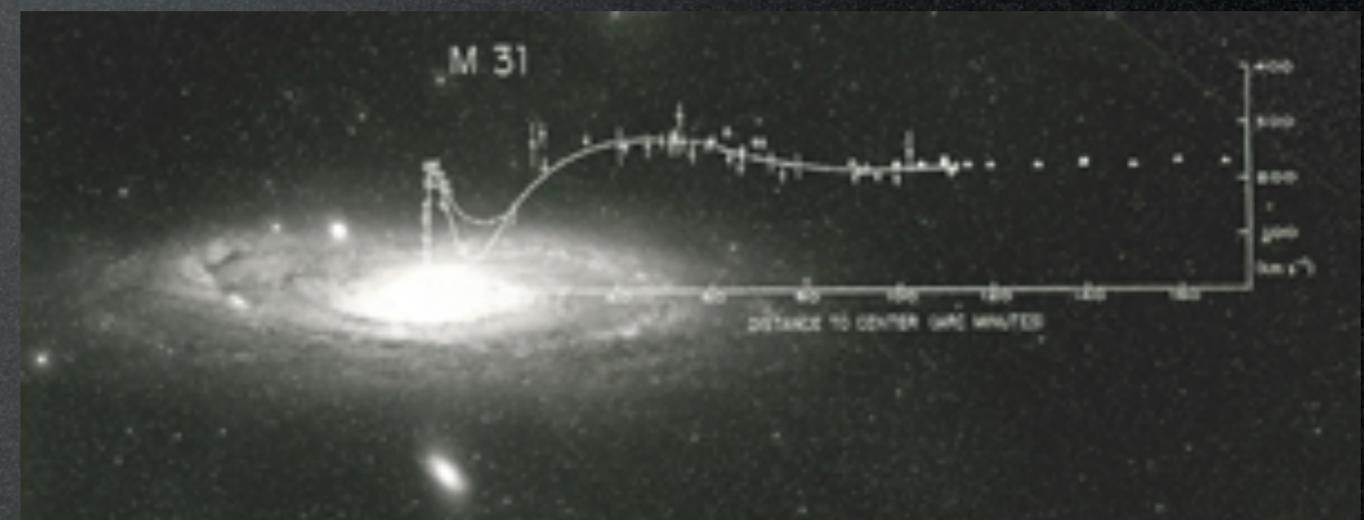


Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



Begelman et al., MNRAS 249 (1991)

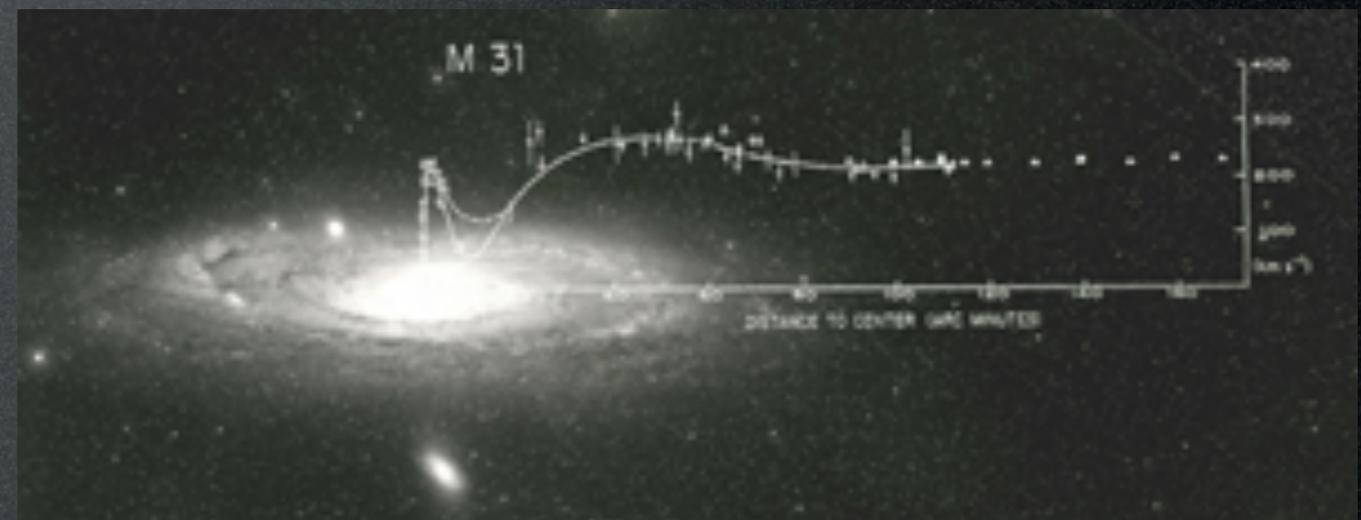
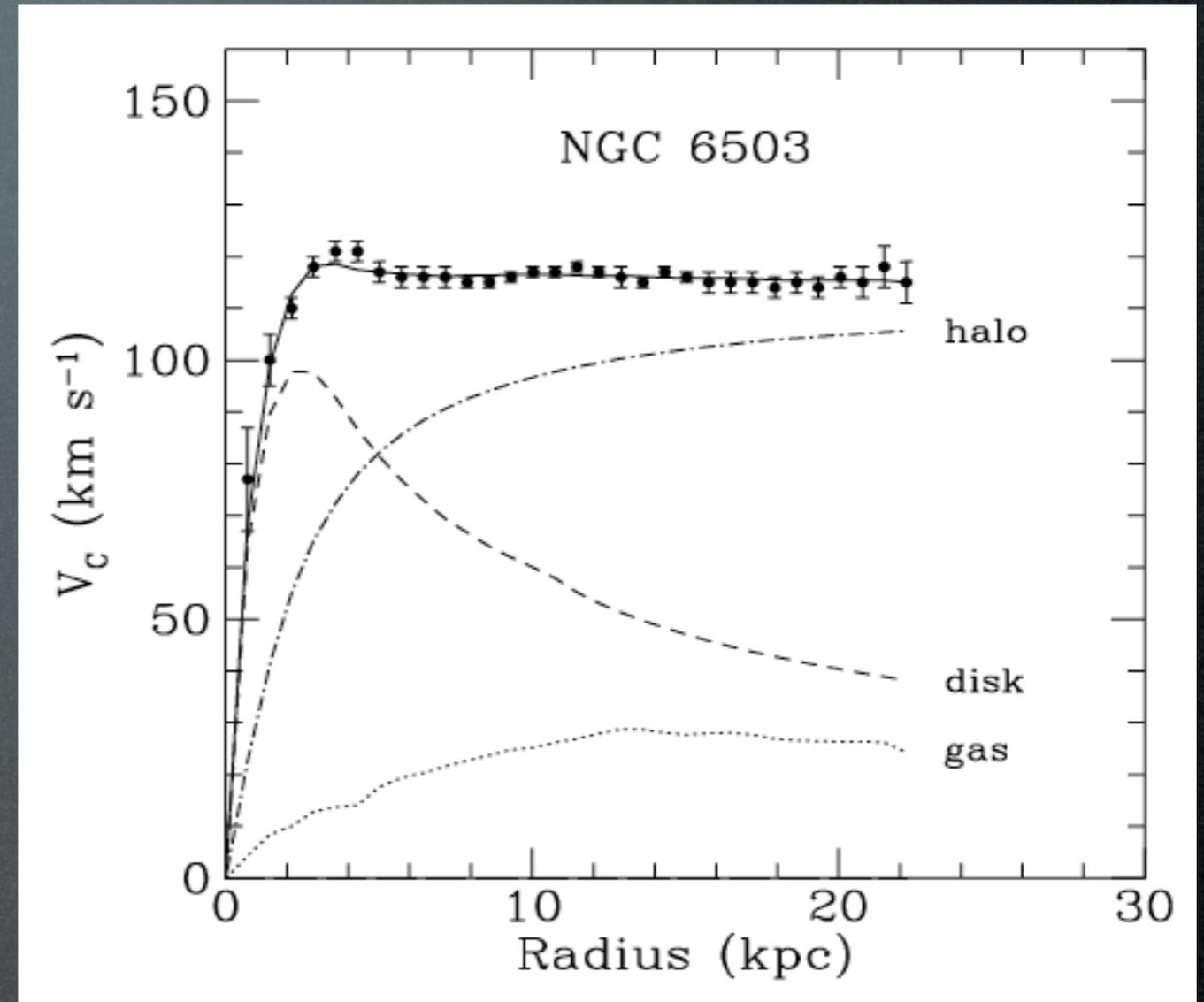


Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'

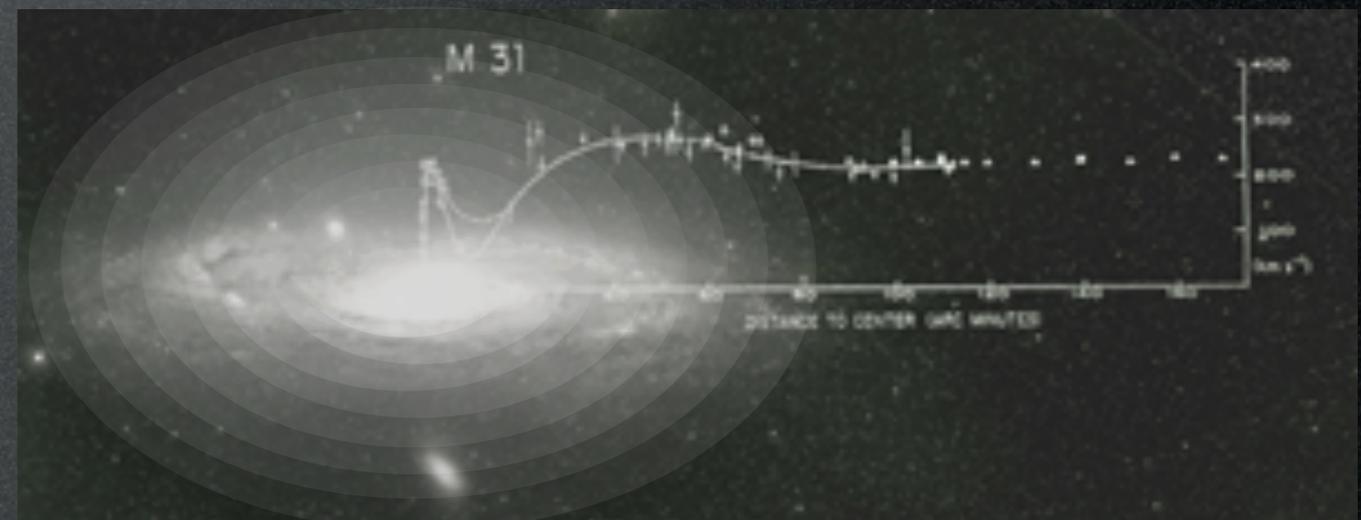
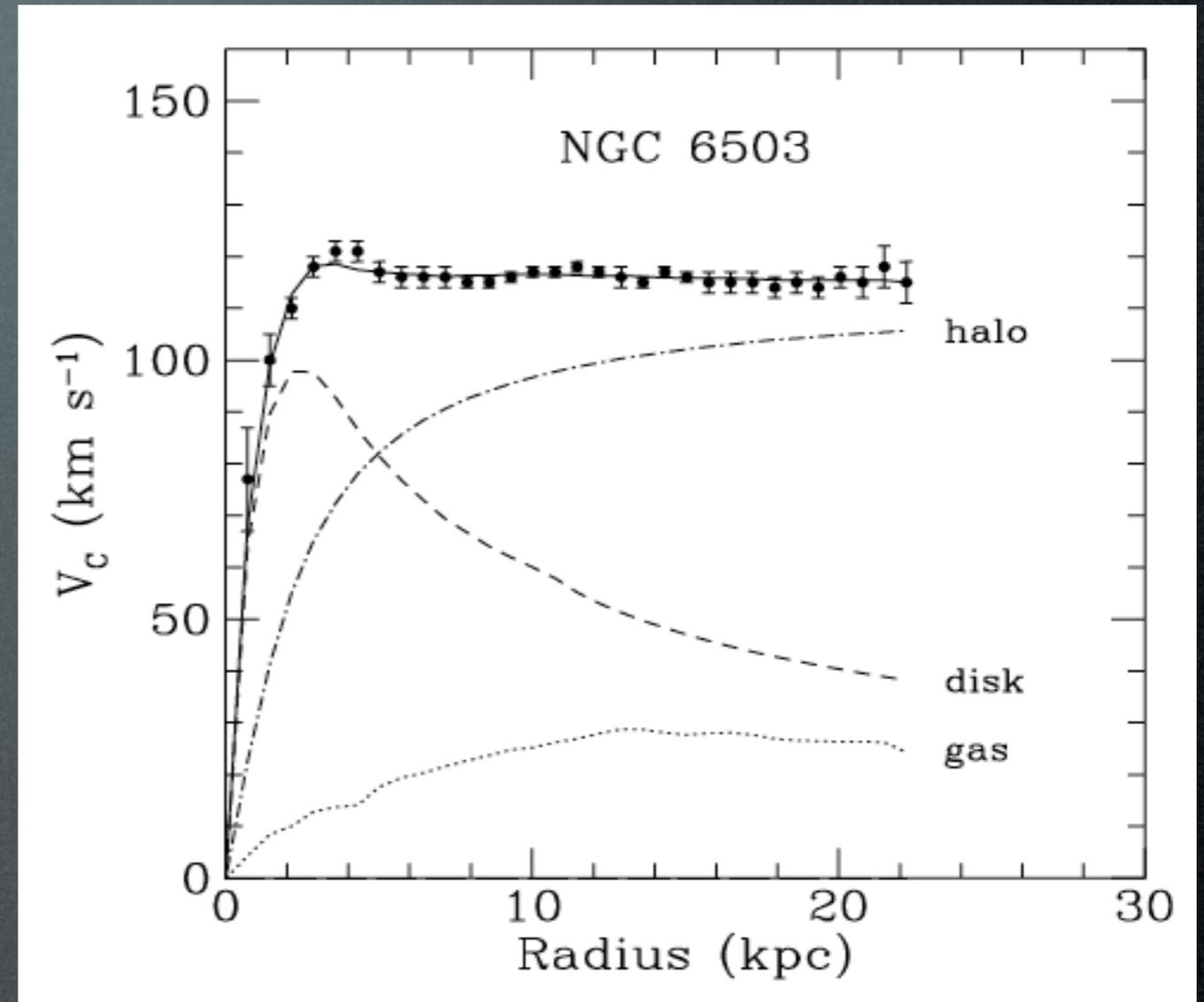


Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

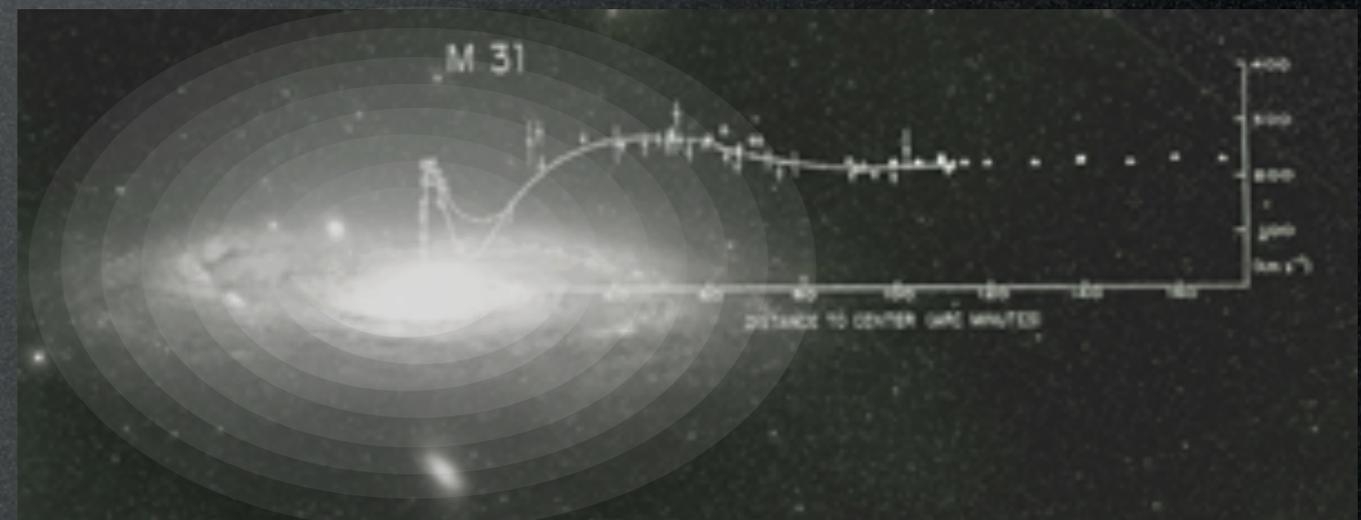
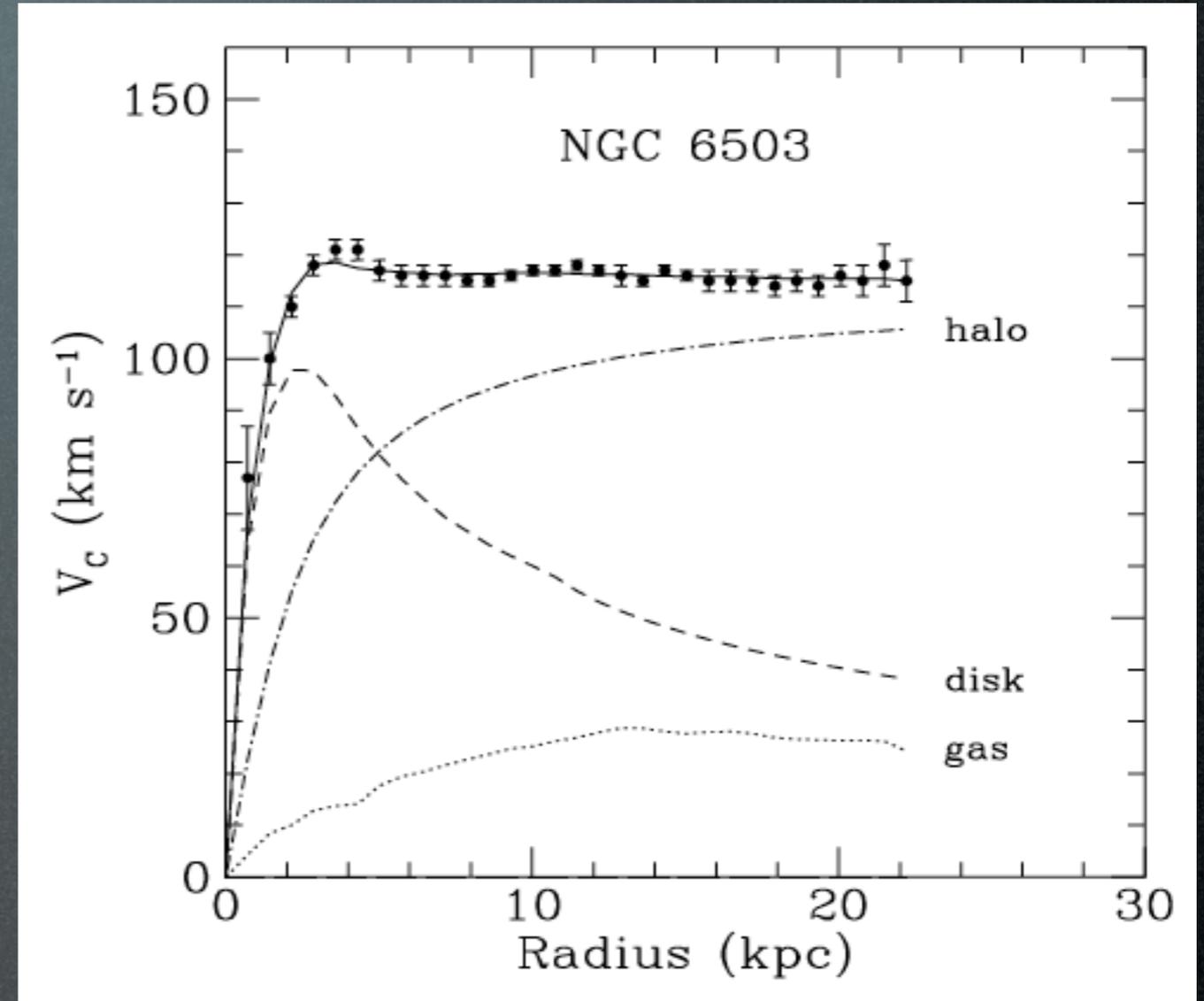
$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'

1933



Fritz Zwicky
(1898-1974)



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'

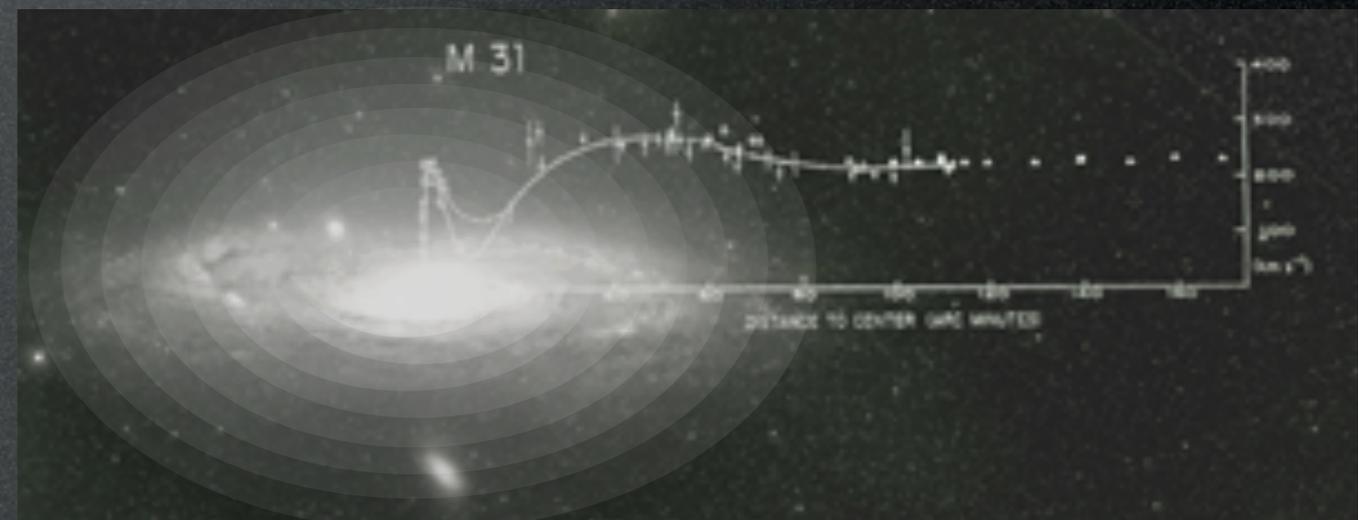
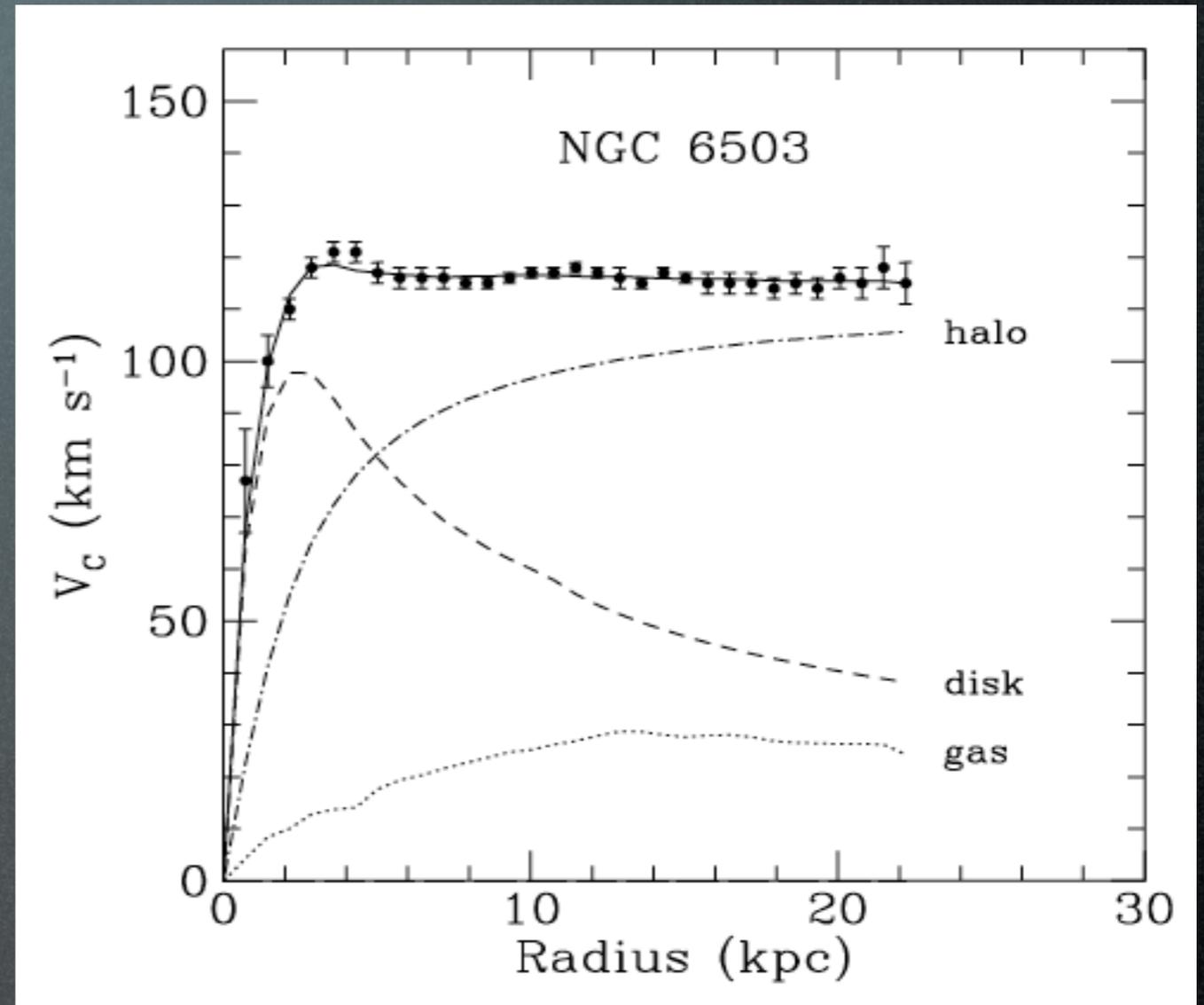
1933

~ 1970



Fritz Zwicky
(1898-1974)

Vera Rubin
(1928-2016)



Prove dell'esistenza

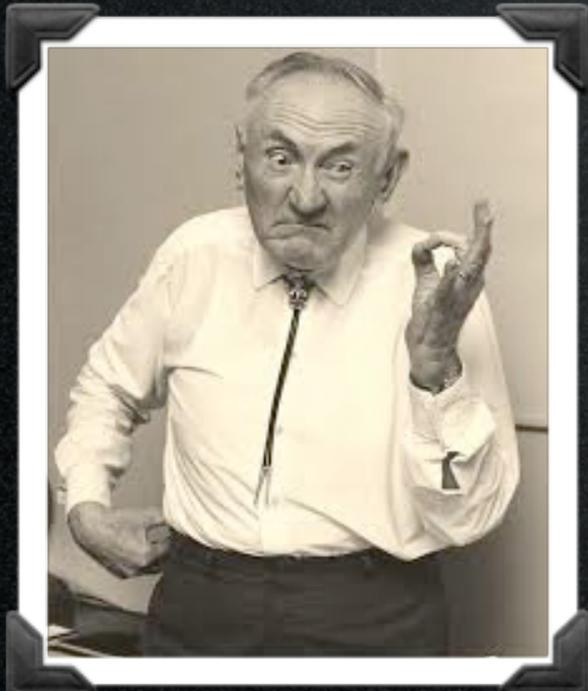
1) curve di rotazione galattiche

$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'

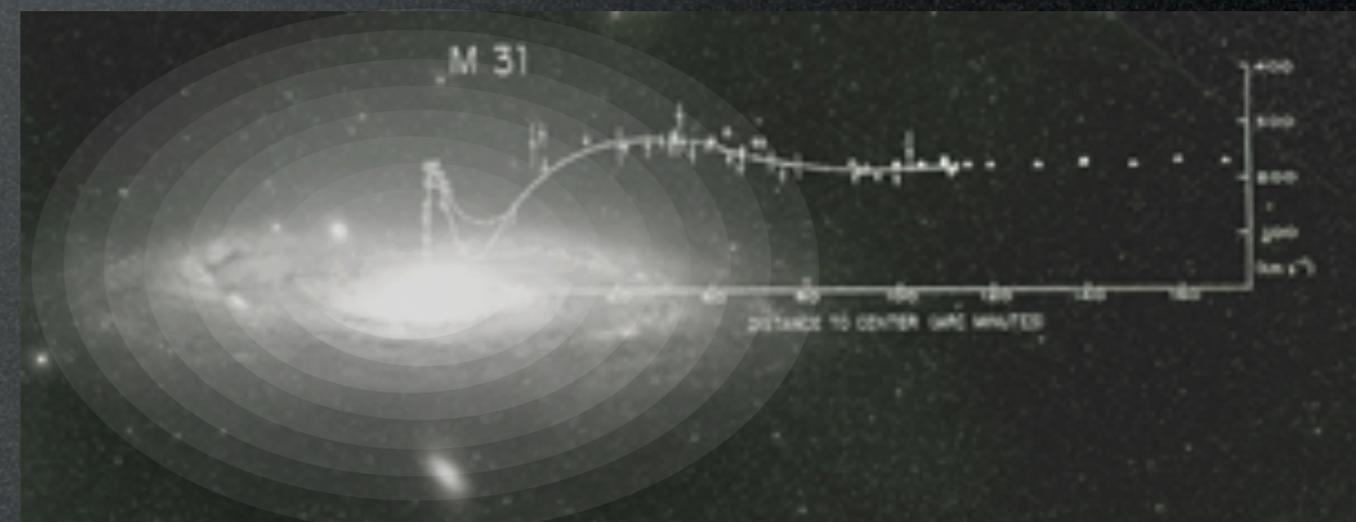
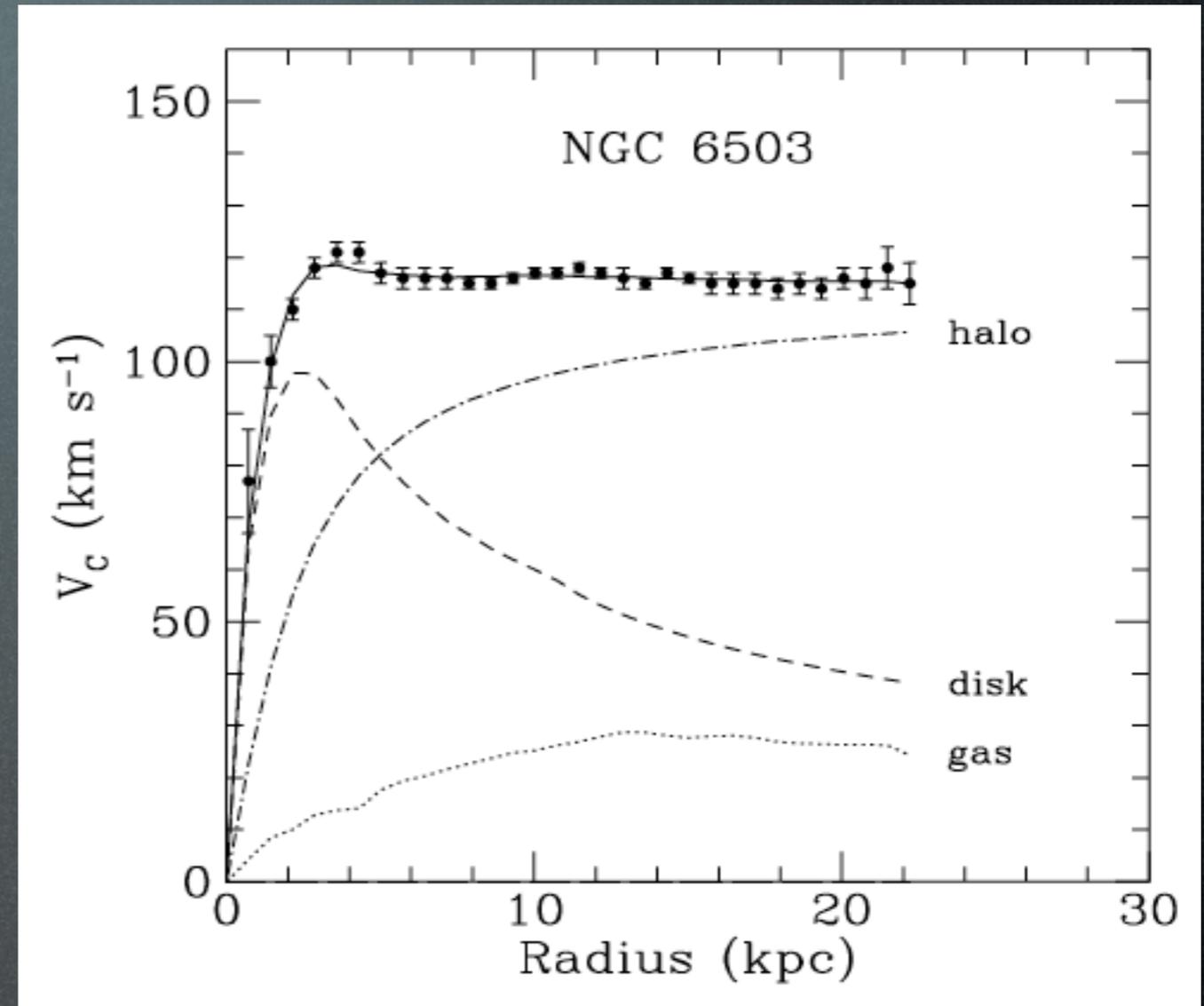
1933

~ 1970



Fritz Zwicky
(1898-1974)

Vera Rubin
(1928-2016)



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuga' 'centripeta'

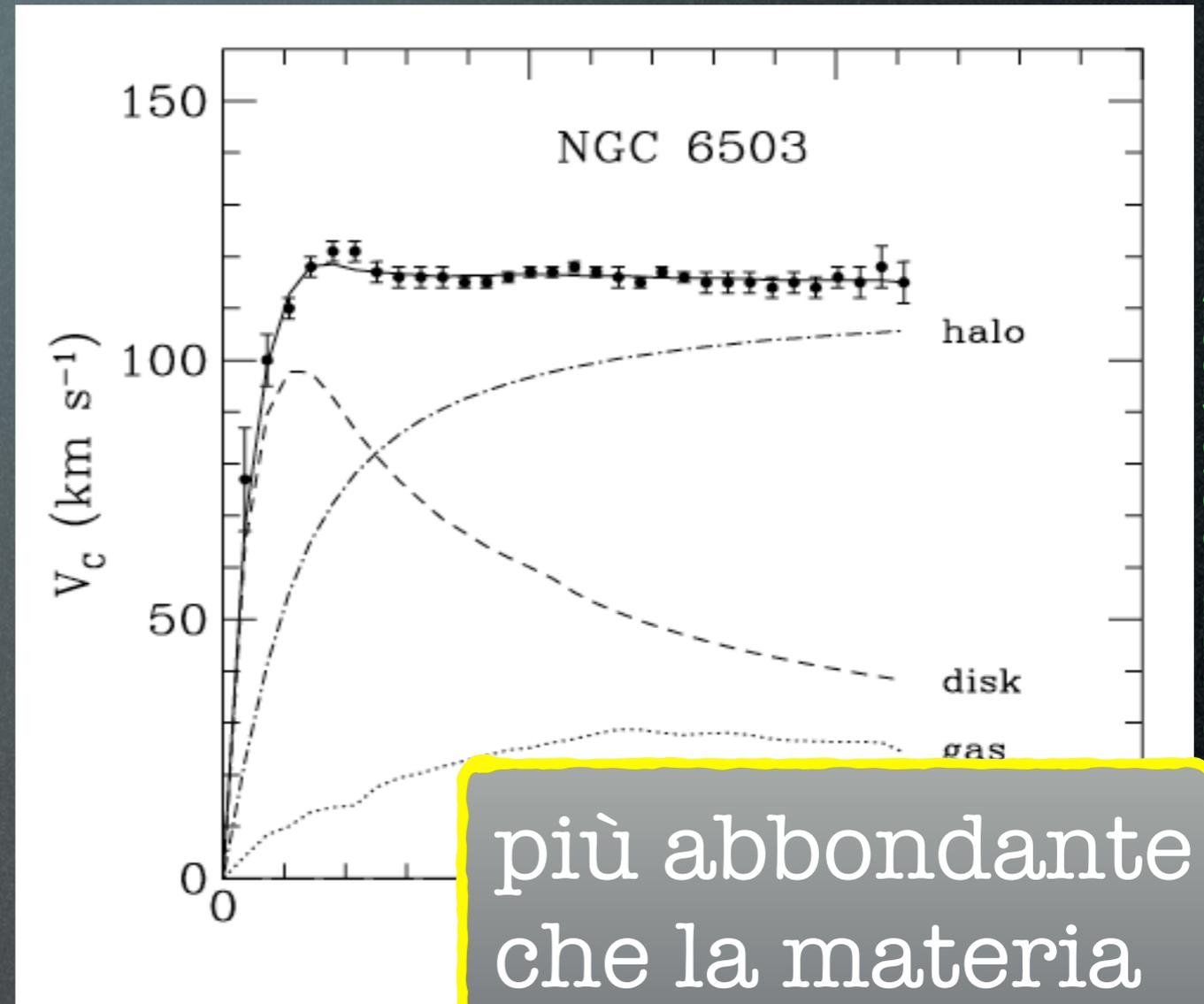
1933

~ 1970



Fritz Zwicky
(1898-1974)

Vera Rubin
(1928-2016)

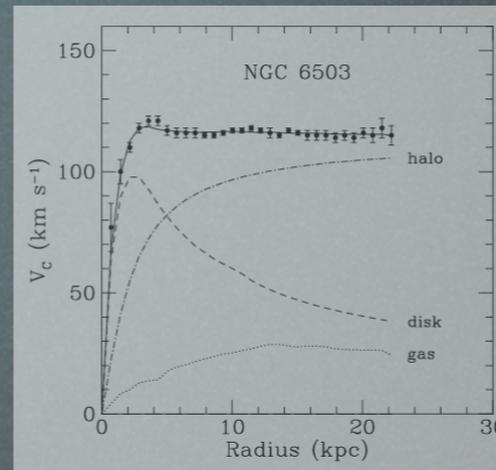


più abbondante
che la materia
ordinaria!



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali

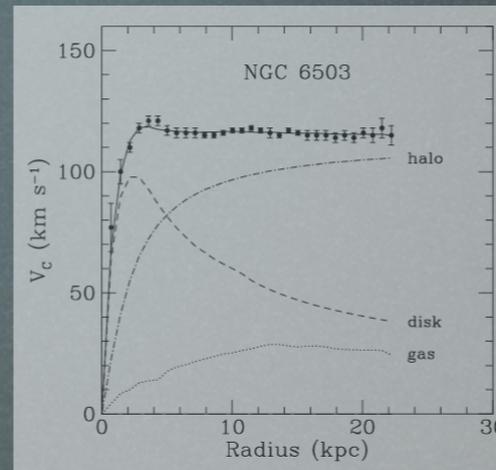


“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

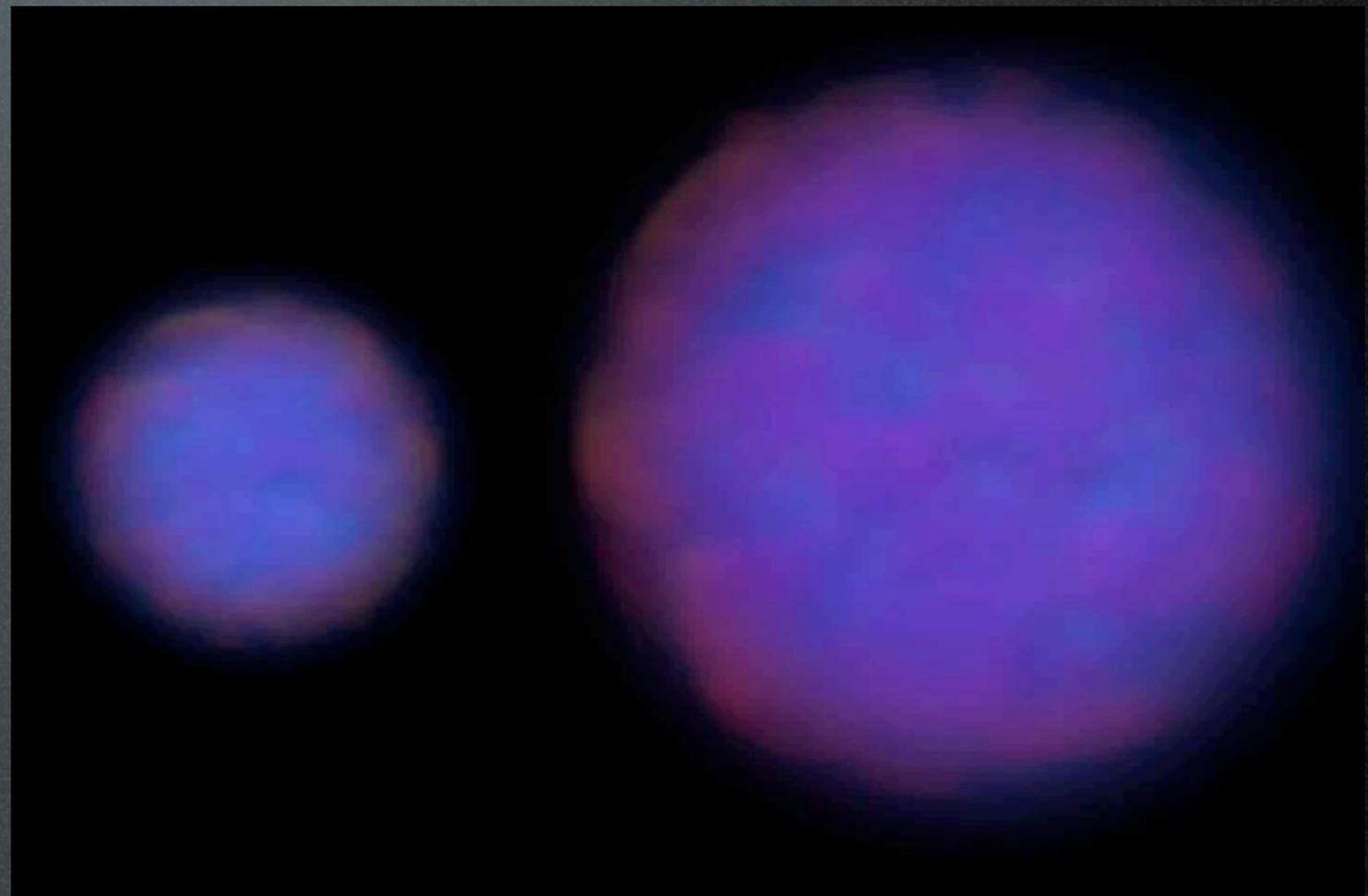
[further developments]

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

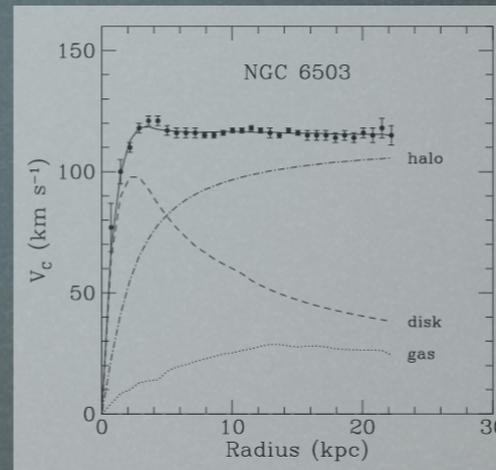


2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



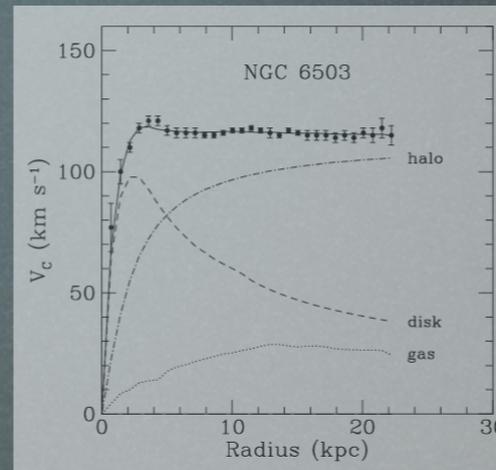
2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



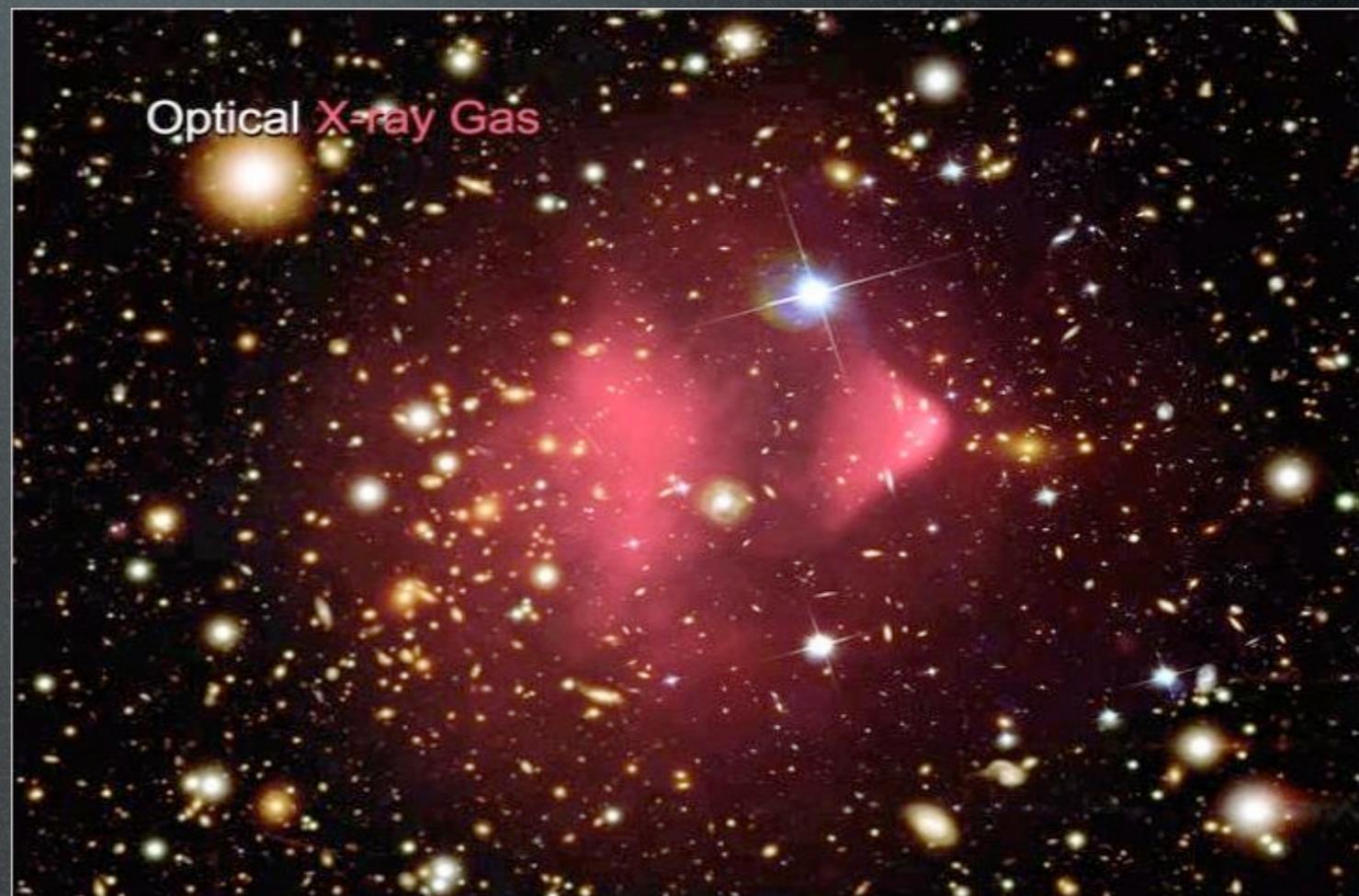
“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



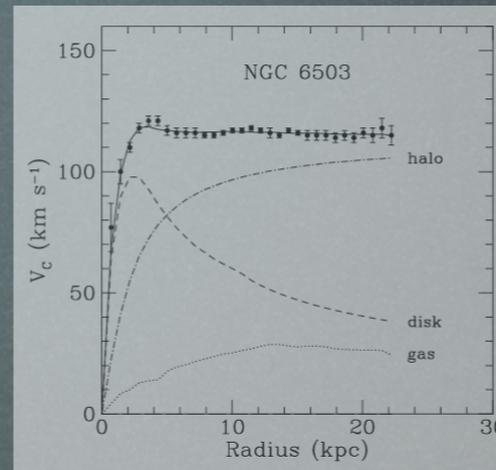
2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



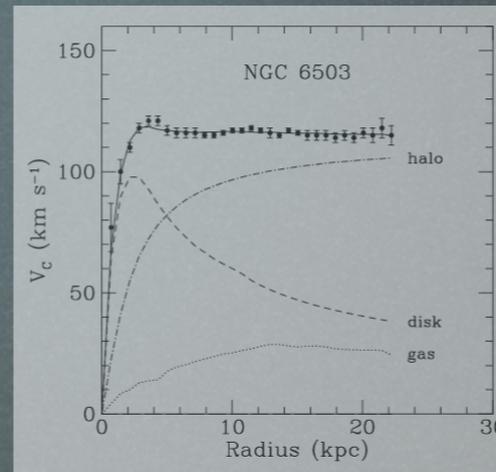
2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



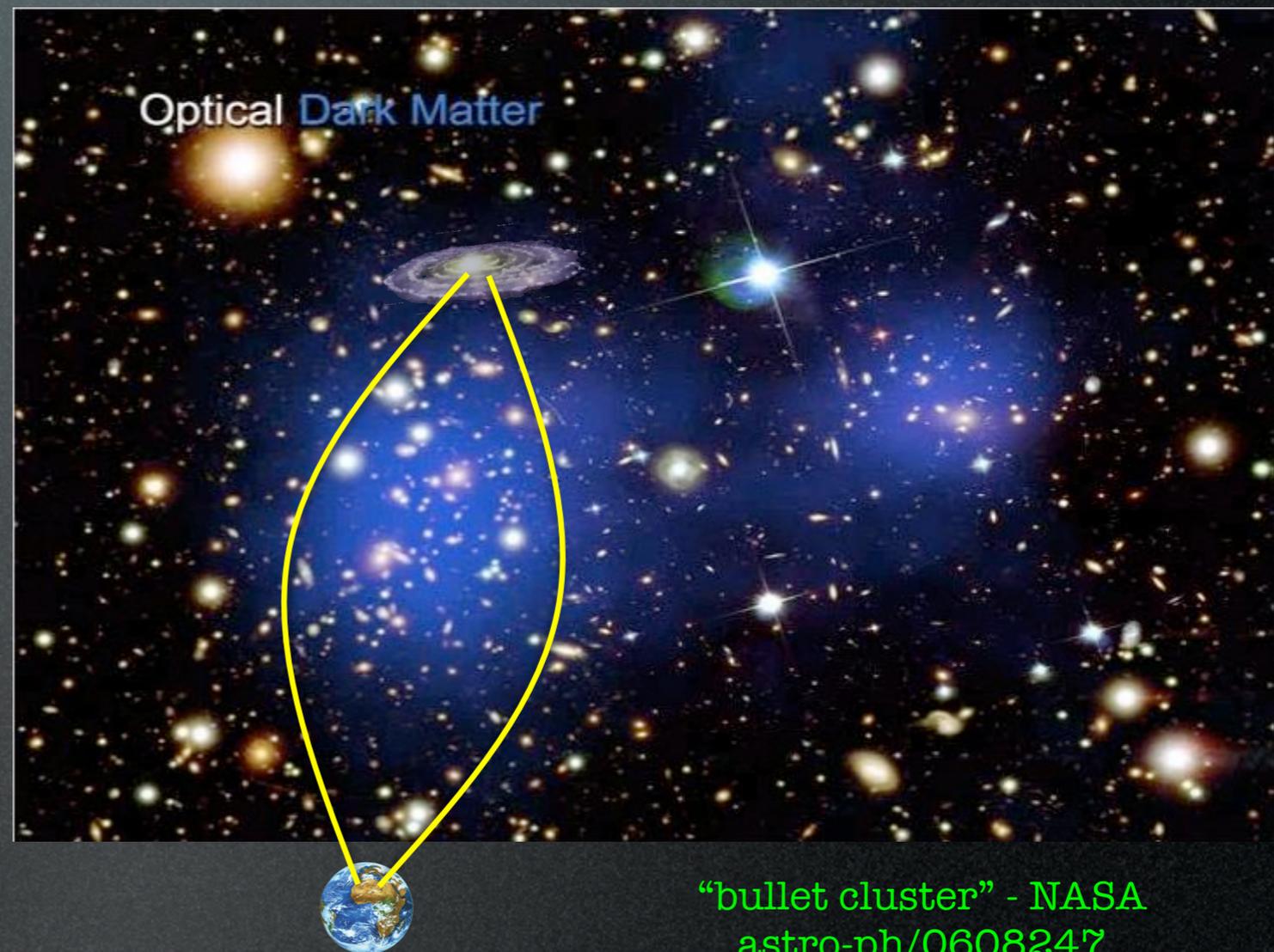
“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche

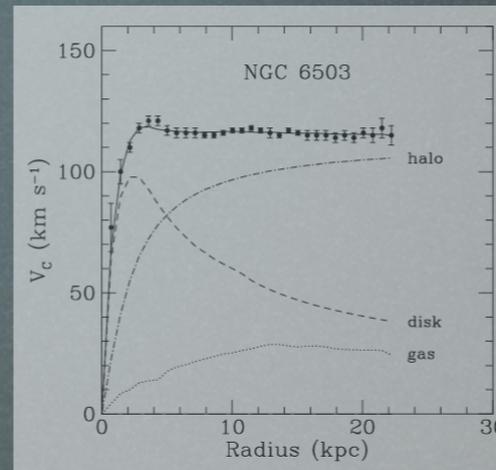


2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



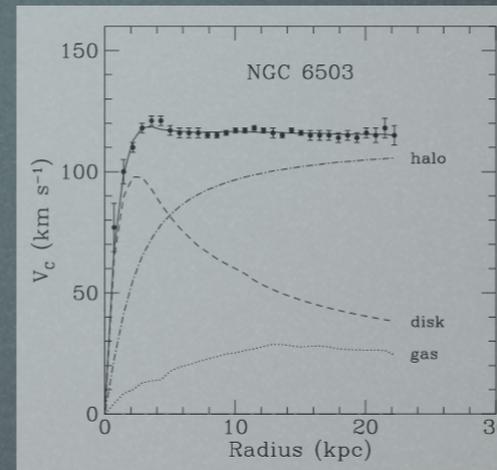
2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



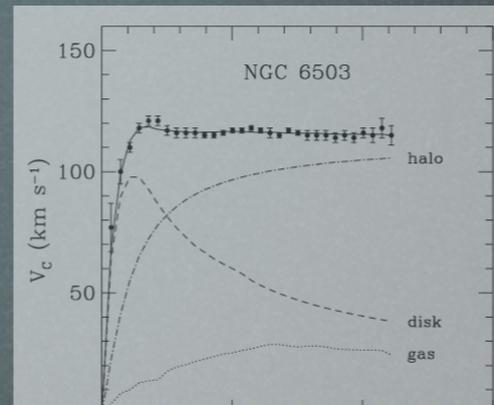
2) ammassi di galassie
- lenti gravitazionali



“bullet cluster” - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



2) ammassi
- lenti gravitazionali

non emette luce,
è 'neutra'

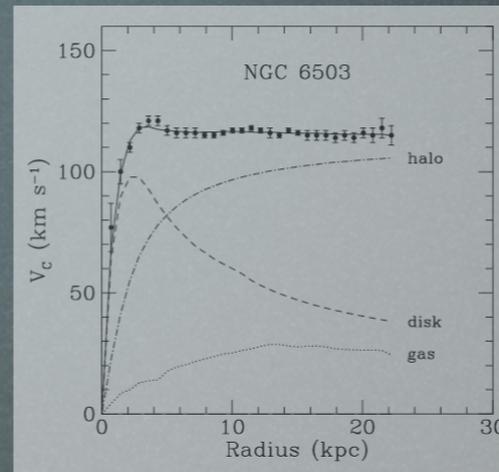
nessuna interazione
(o molto debole)



"bullet cluster" - NASA
astro-ph/0608247

Prove dell'esistenza

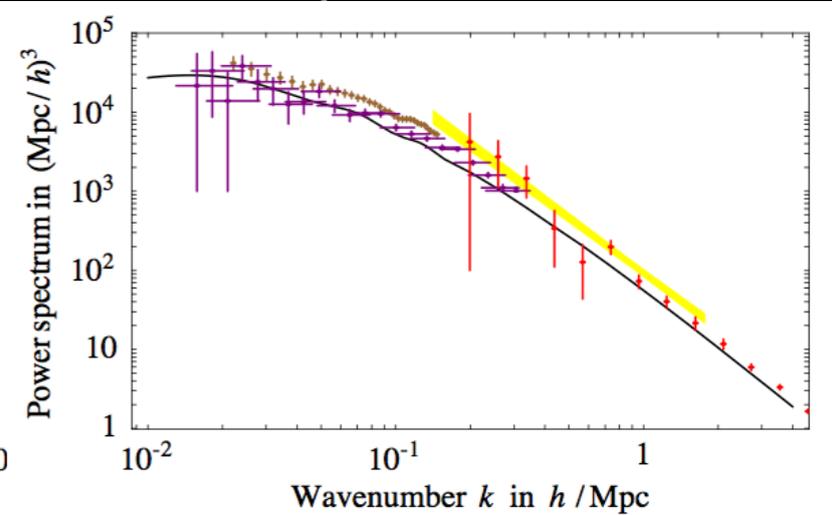
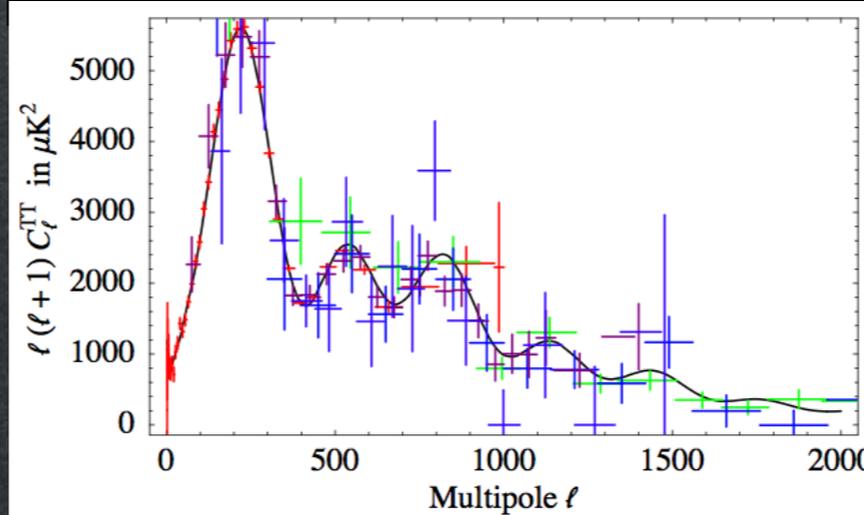
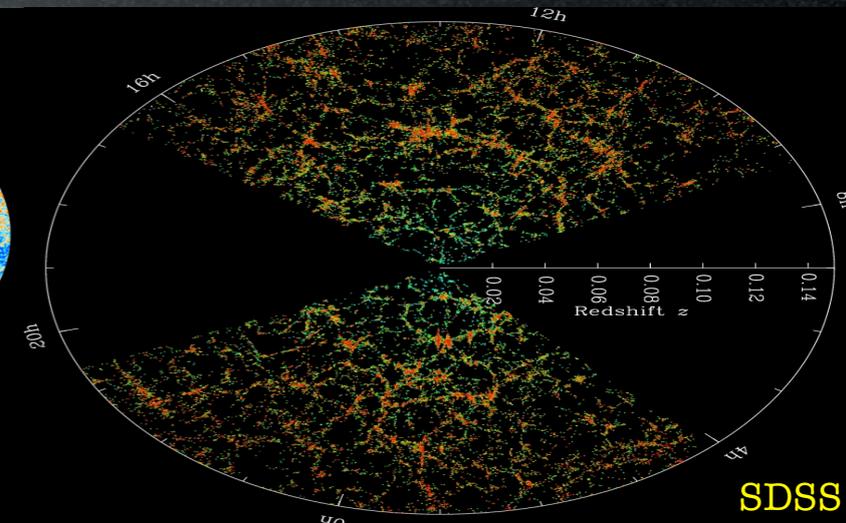
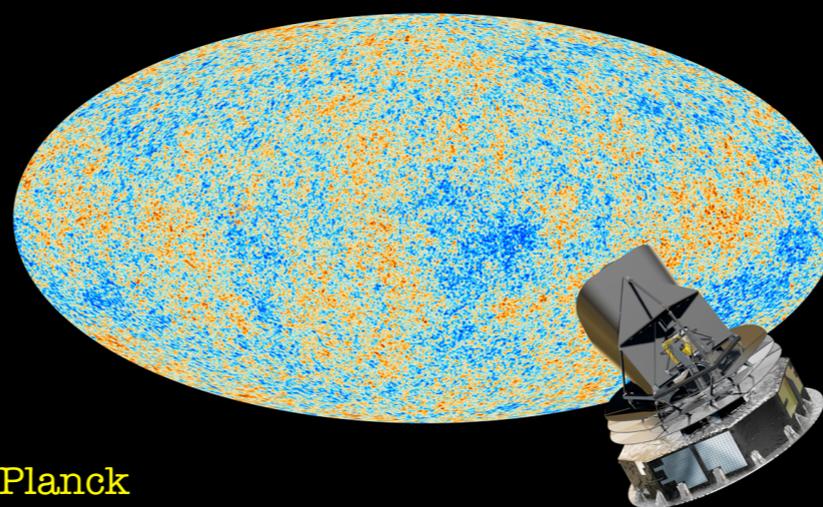
1) curve di rotazione galattiche



2) ammassi di galassie

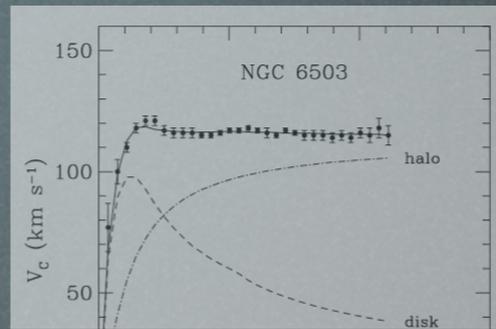


3) 'cosmologia di precisione'



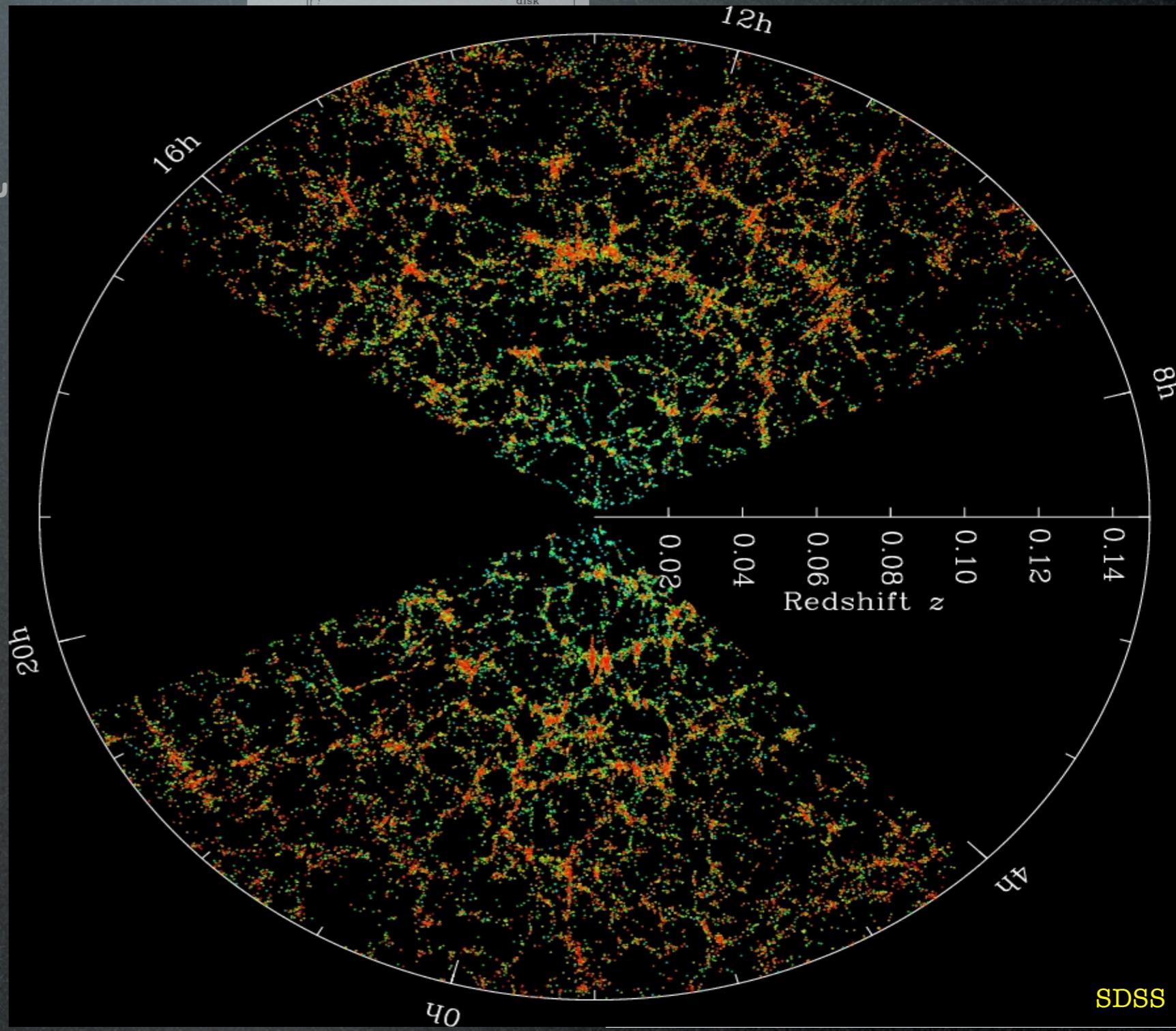
Prove dell'esistenza

1) curve di rotazione galattiche



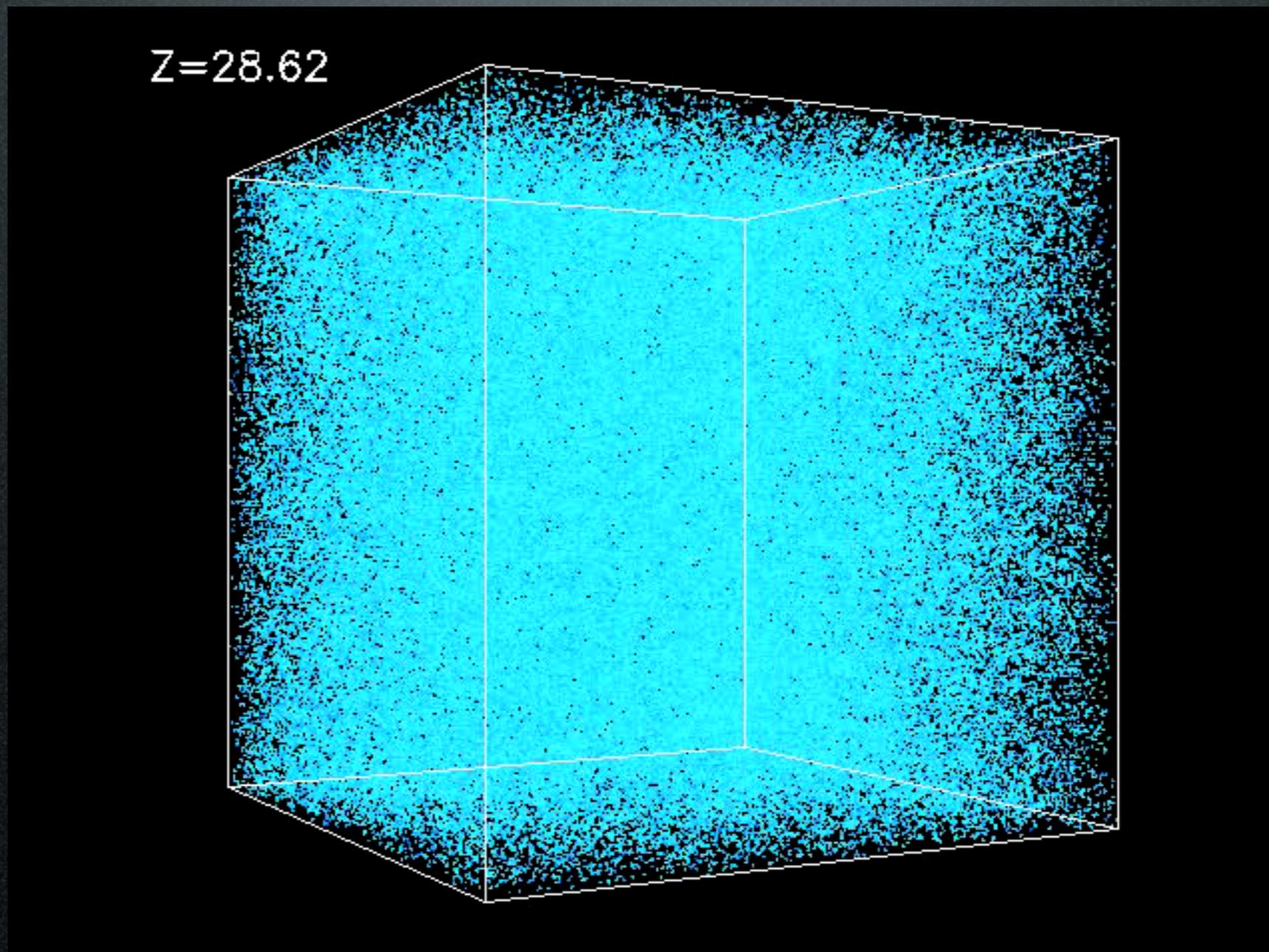
2) ammassi di galassie

3) 'cosmologia di precisione'



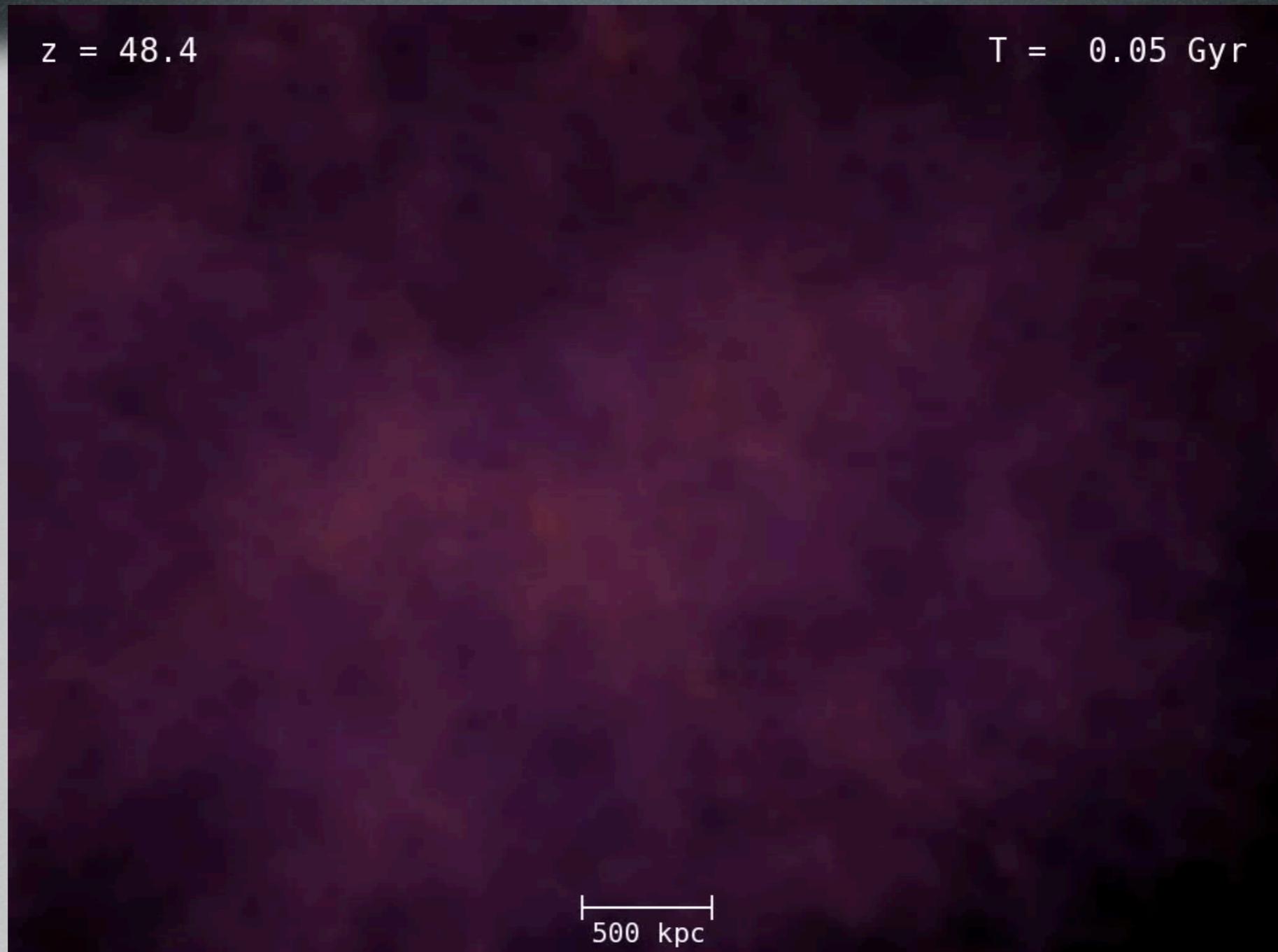
Prove dell'esistenza

$2 \cdot 10^6$ particelle di CDM, scatola di 43 Mpc di lato



Prove dell'esistenza

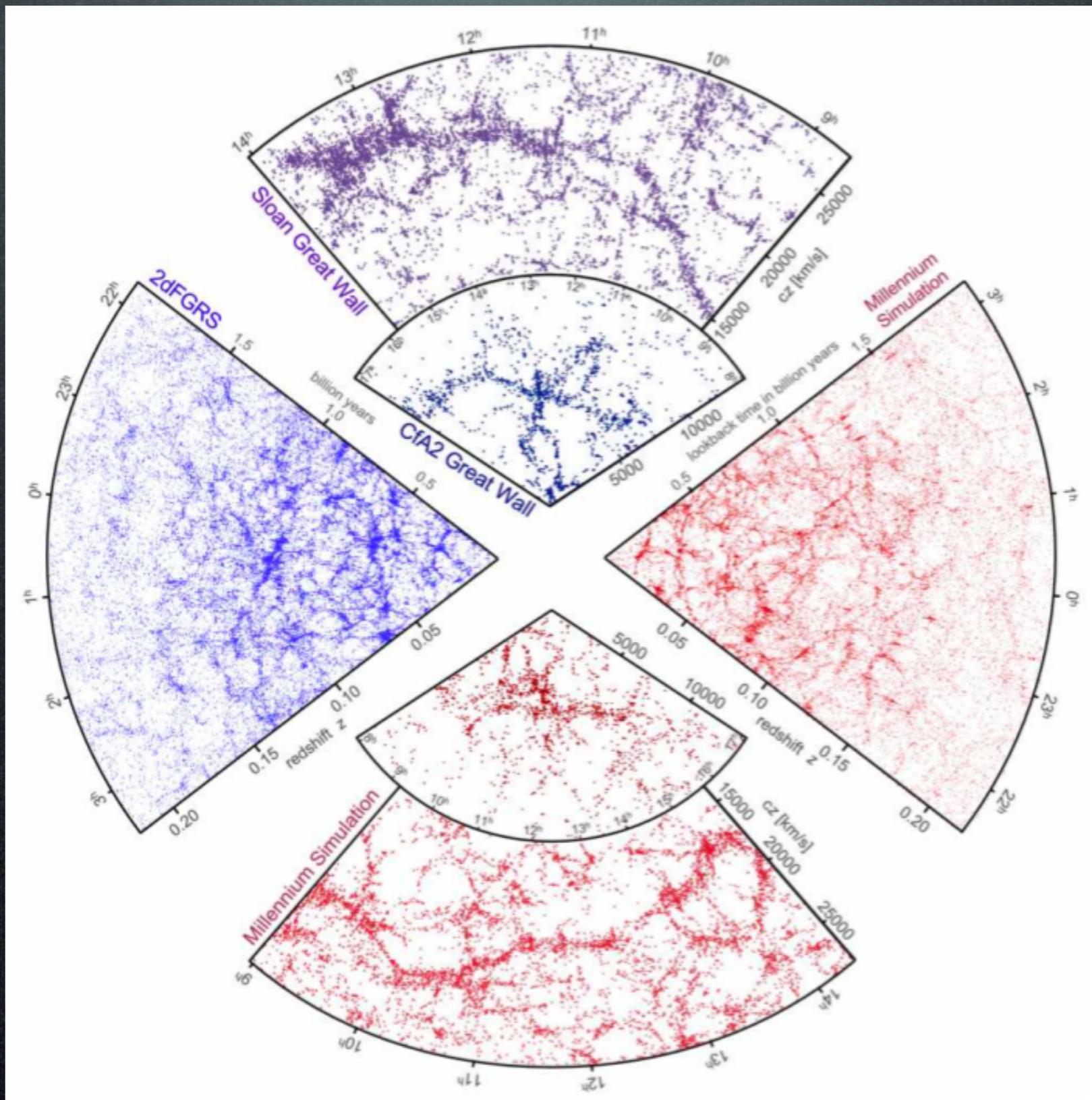
Progetto Aquarius della collaborazione VIRGO:
1.5 10^9 particelle di CDM, un solo alone galattico



Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi
di anni luce



Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1}$ Mpc

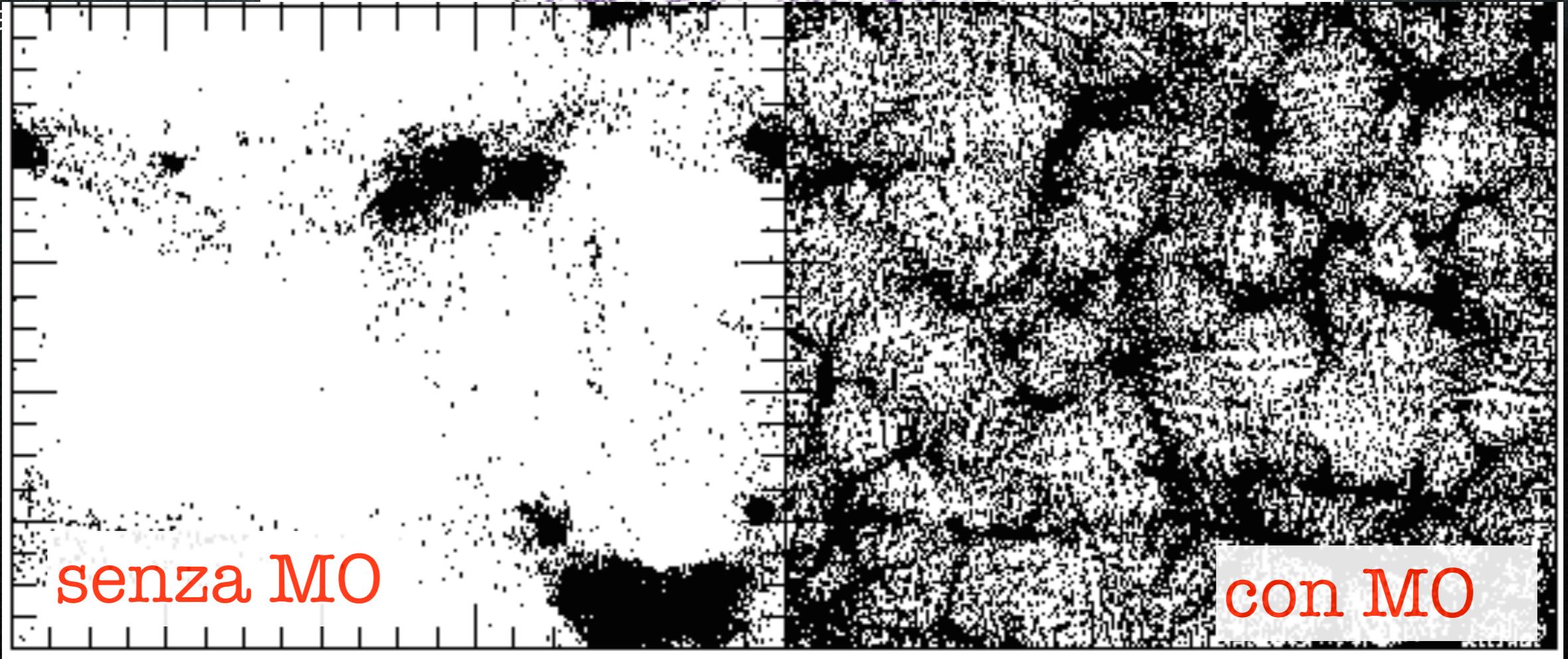
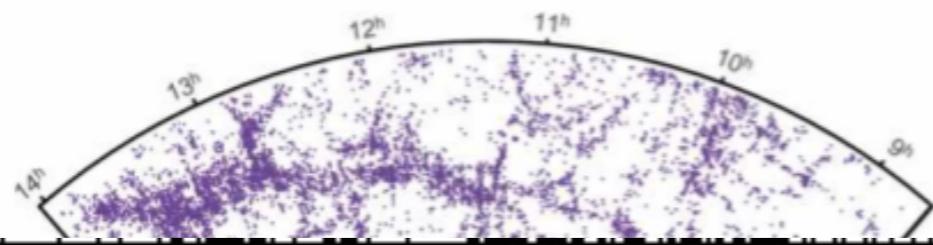
Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

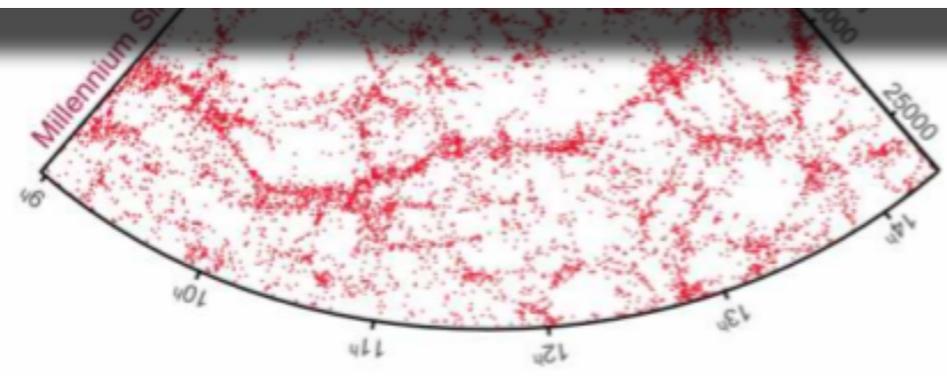
SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi

di a



senza MO

con MO



Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

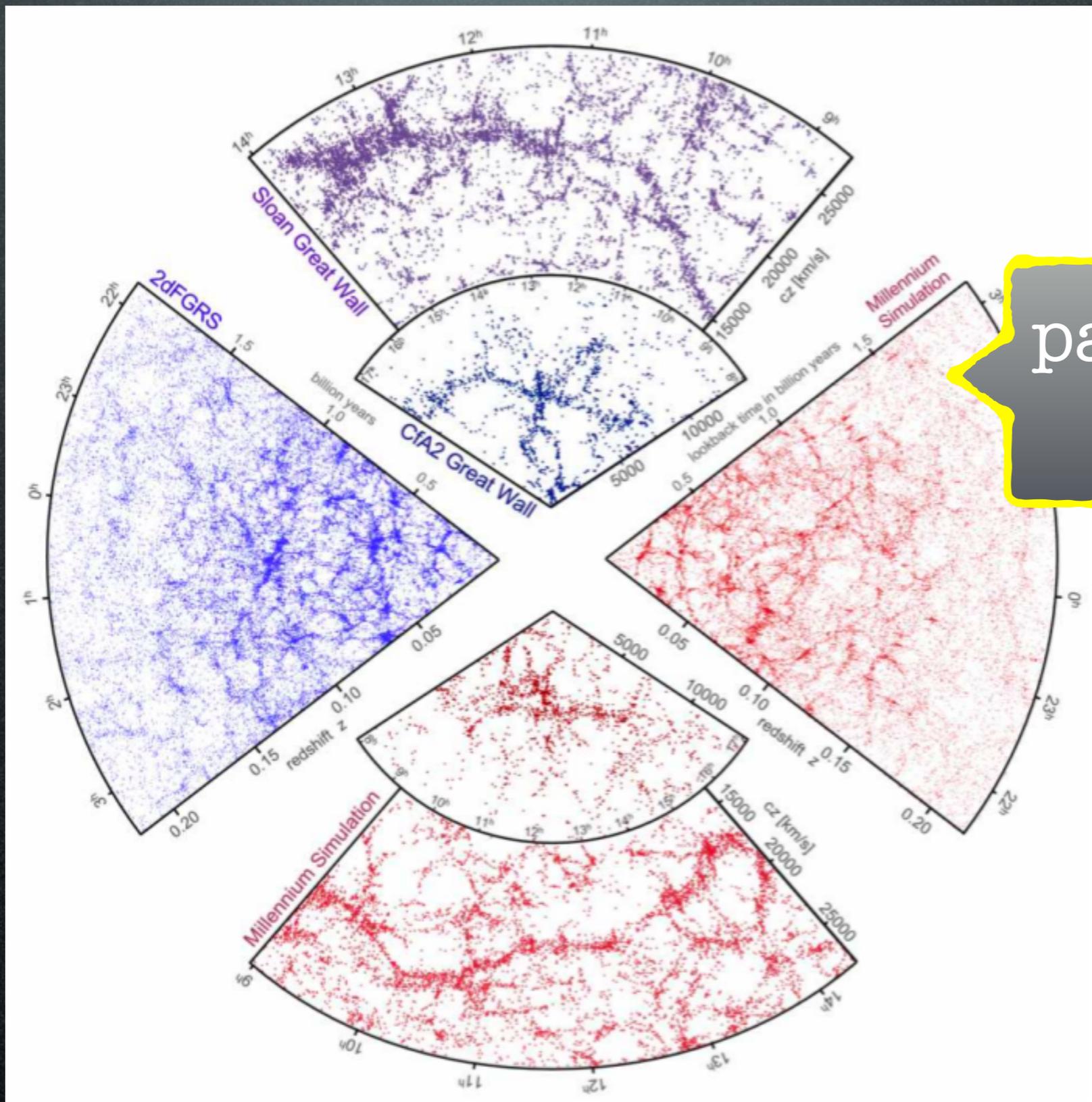
Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1} \text{ Mpc}$

A. Nusser, 0109016, MNRAS 331 (2002)

Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi
di anni luce



particelle

Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1} \text{ Mpc}$

Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

DETOUR



Modificare la legge di gravità?

Modificare la legge di gravità?

1846



Urbain Le Verrier

Modificare la legge di gravità?

1846



Urbain Le Verrier

Urano



Modificare la legge di gravità?

1846

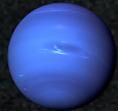


Urbain Le Verrier

Urano



Nettuno



Modificare la legge di gravità?

1846

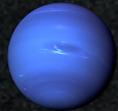


Urbain Le Verrier

Urano



Nettuno



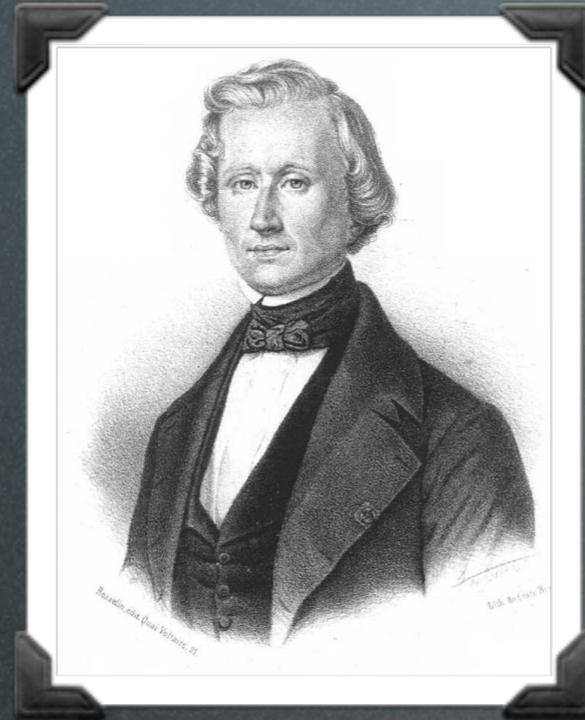
Modificare la legge di gravità?

1846



Urbain Le Verrier

1859

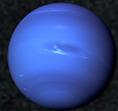


Urbain Le Verrier

Urano



Nettuno



Mercurio



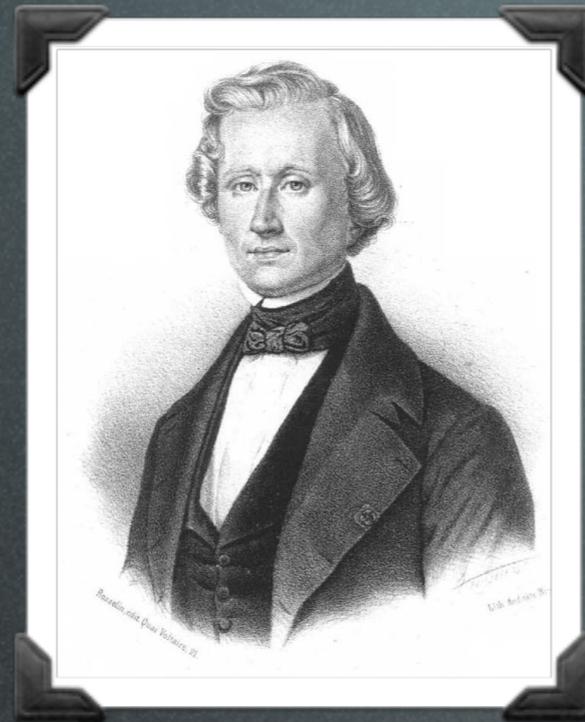
Modificare la legge di gravità?

1846



Urbain Le Verrier

1859

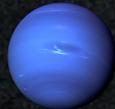


Urbain Le Verrier

Urano



Nettuno



Mercurio



Vulcano?



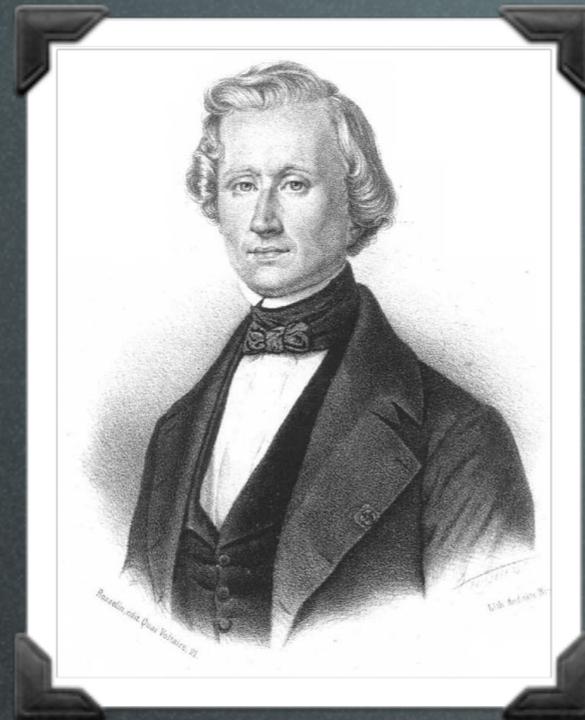
Modificare la legge di gravità?

1846

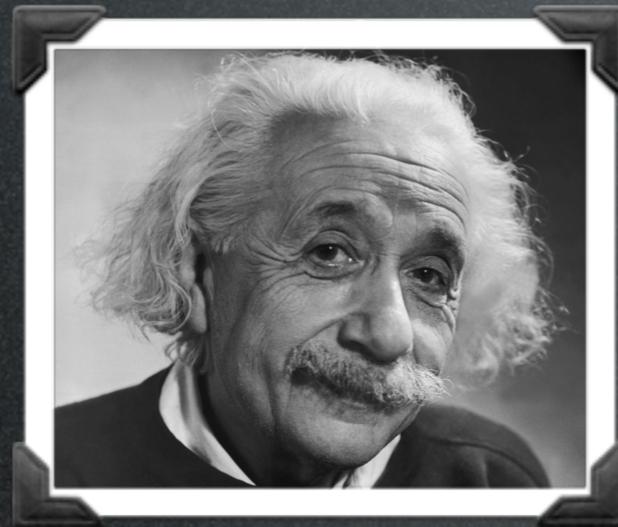


Urbain Le Verrier

1859



Urbain Le Verrier



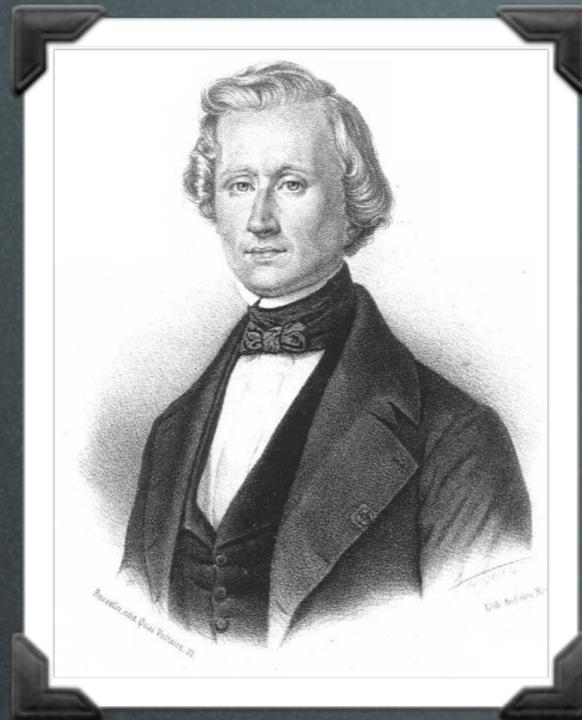
Modificare la legge di gravità?

1846

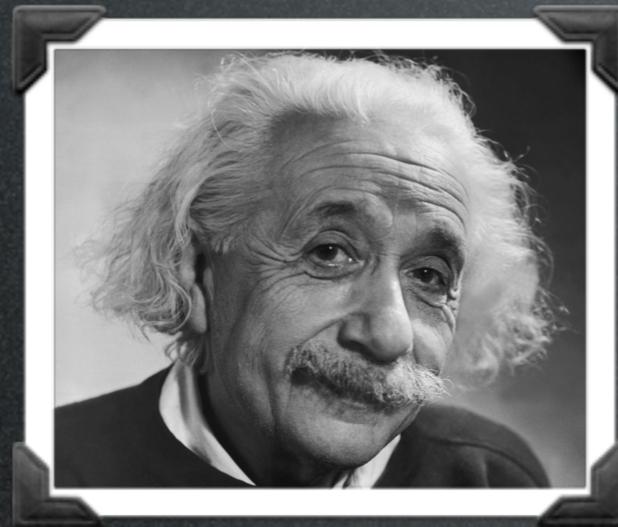


Urbain Le Verrier

1859



Urbain Le Verrier



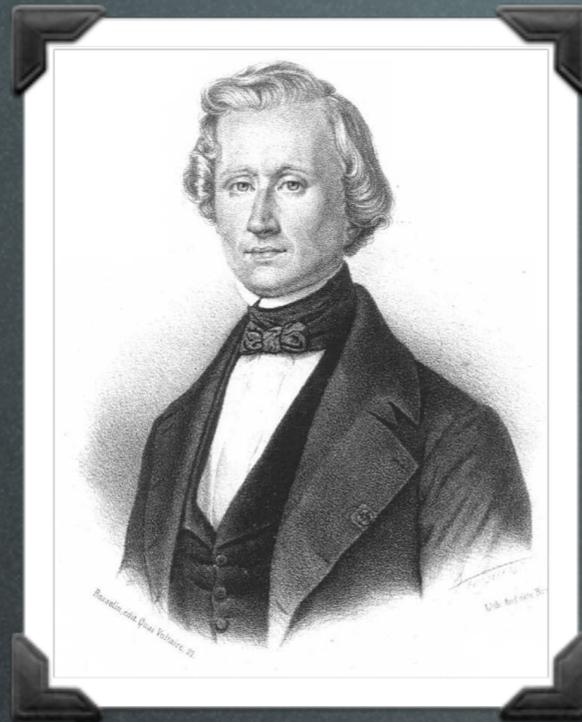
Modificare la legge di gravità?

1846



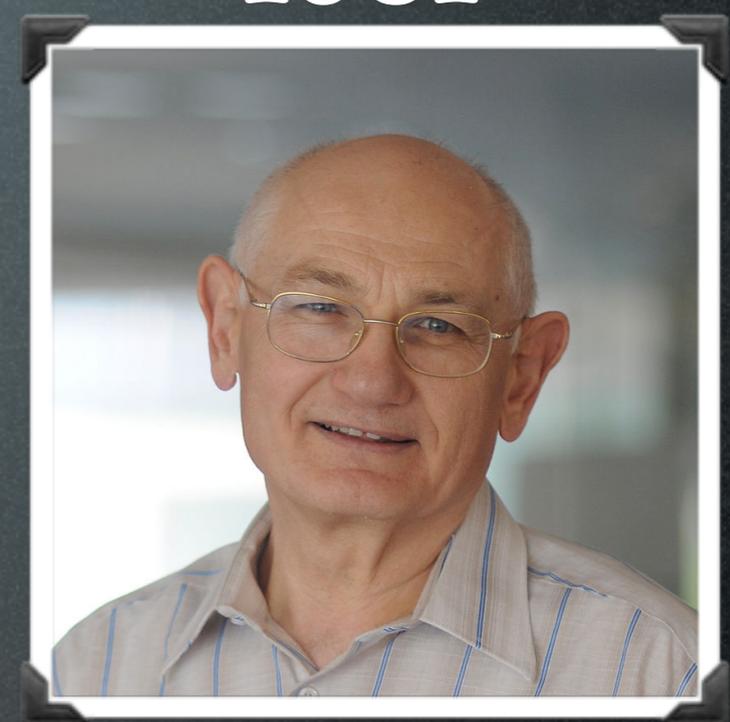
Urbain Le Verrier

1859



Urbain Le Verrier

1981

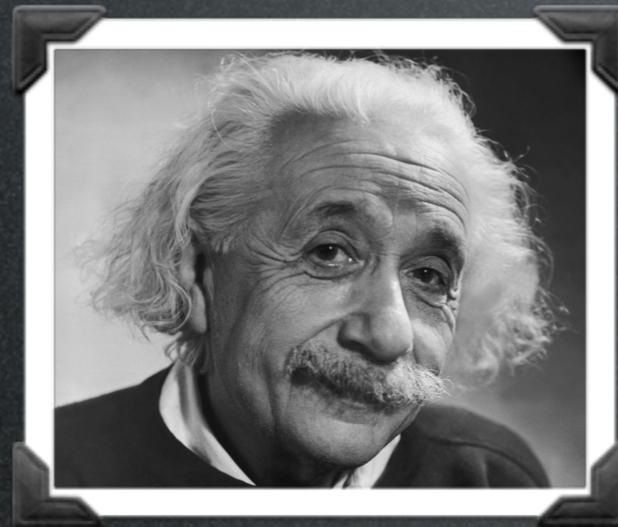
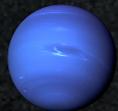


Mordehai Milgrom

Urano



Nettuno



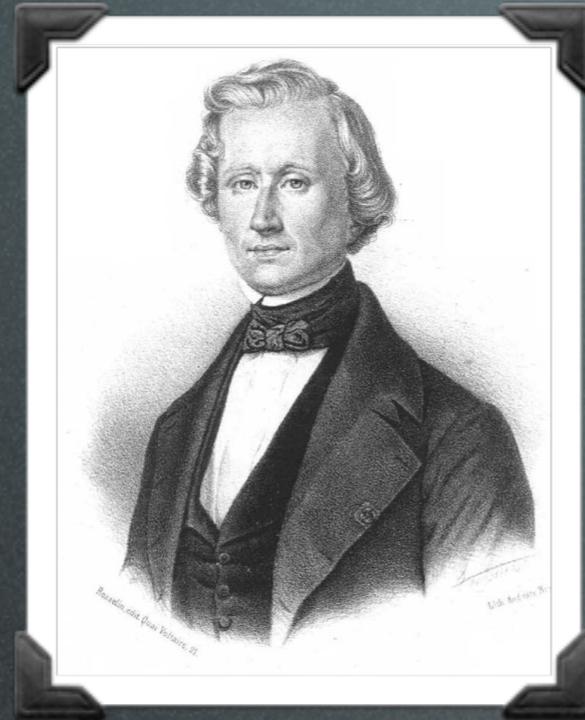
Modificare la legge di gravità?

1846



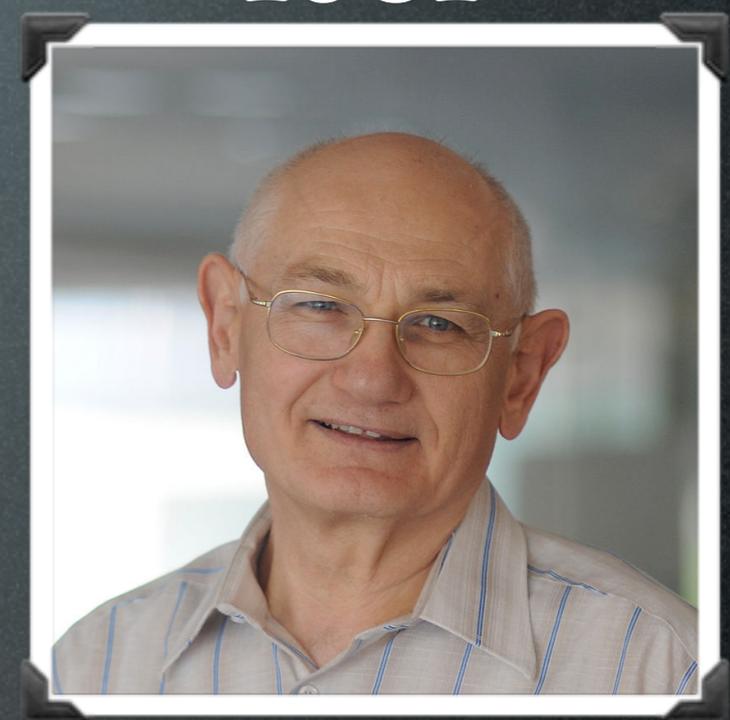
Urbain Le Verrier

1859



Urbain Le Verrier

1981

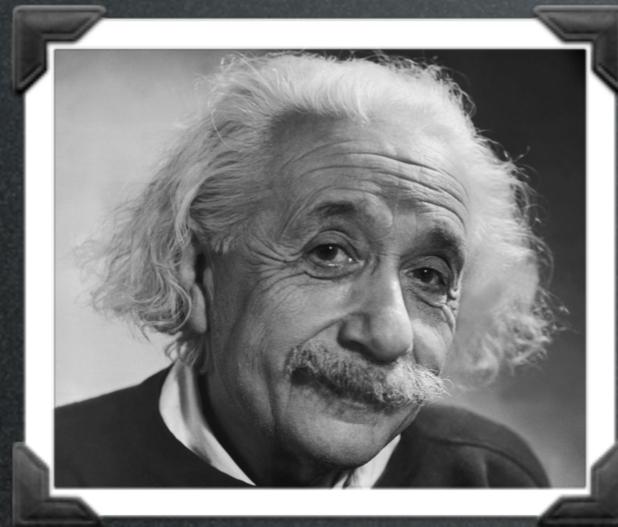
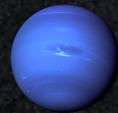


Mordehai Milgrom

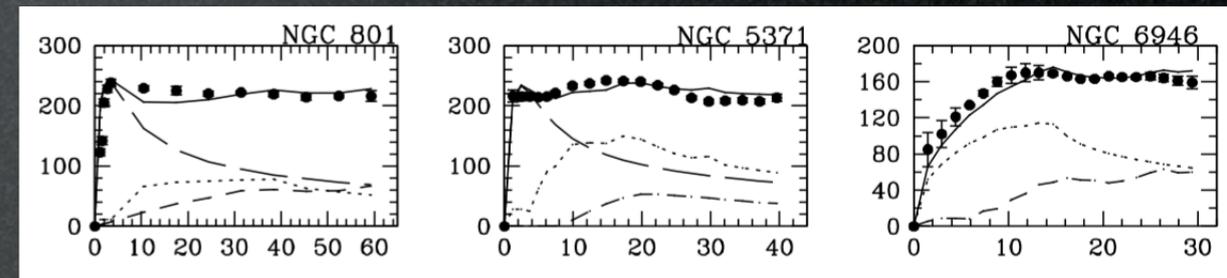
Urano



Nettuno



$$F = m a \longrightarrow F = m a \cdot \mu(a)$$



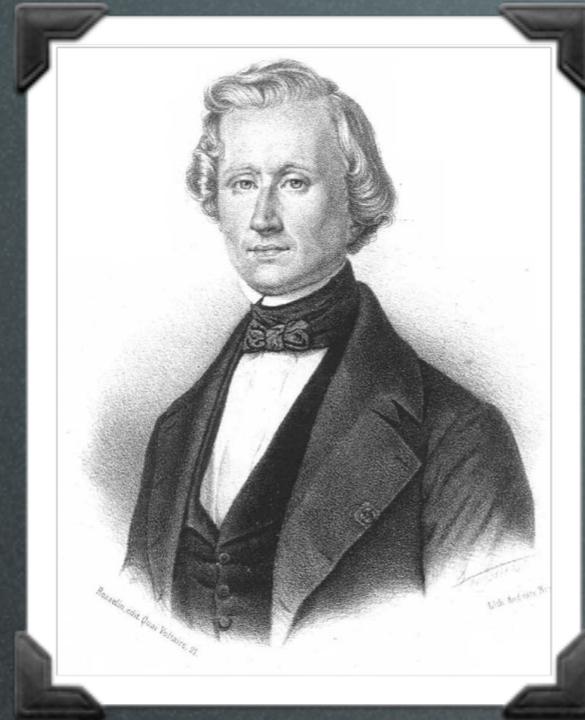
Modificare la legge di gravità?

1846



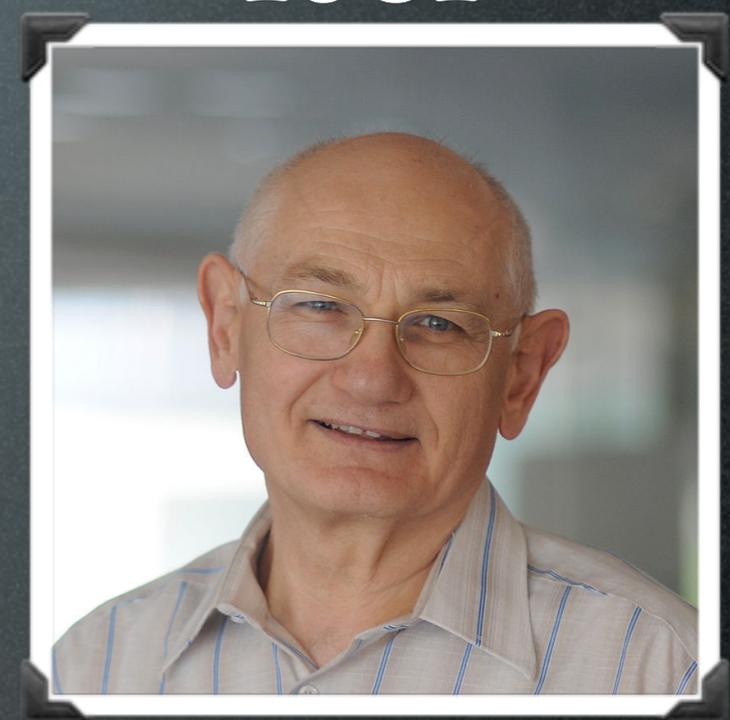
Urbain Le Verrier

1859



Urbain Le Verrier

1981

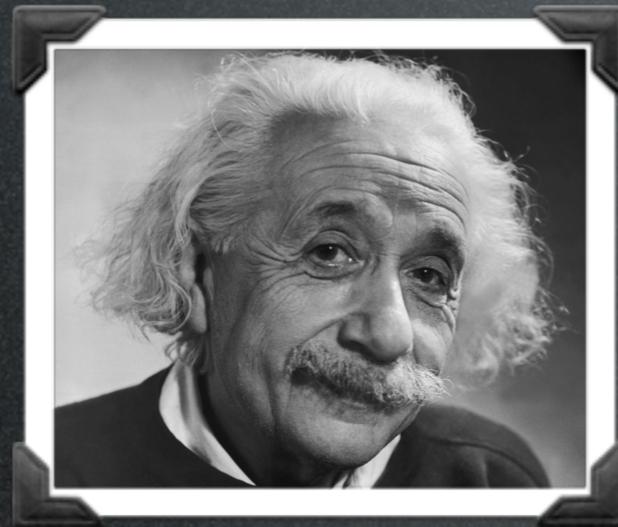
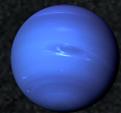


Mordehai Milgrom

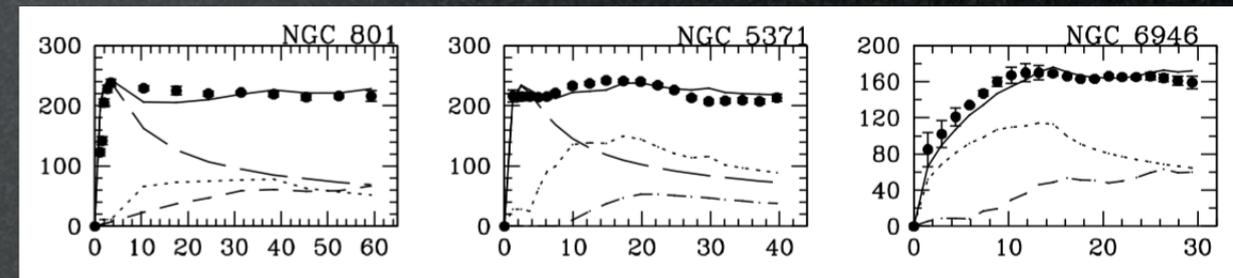
Urano



Nettuno



$$F = m a \longrightarrow F = m a \cdot \mu(a)$$



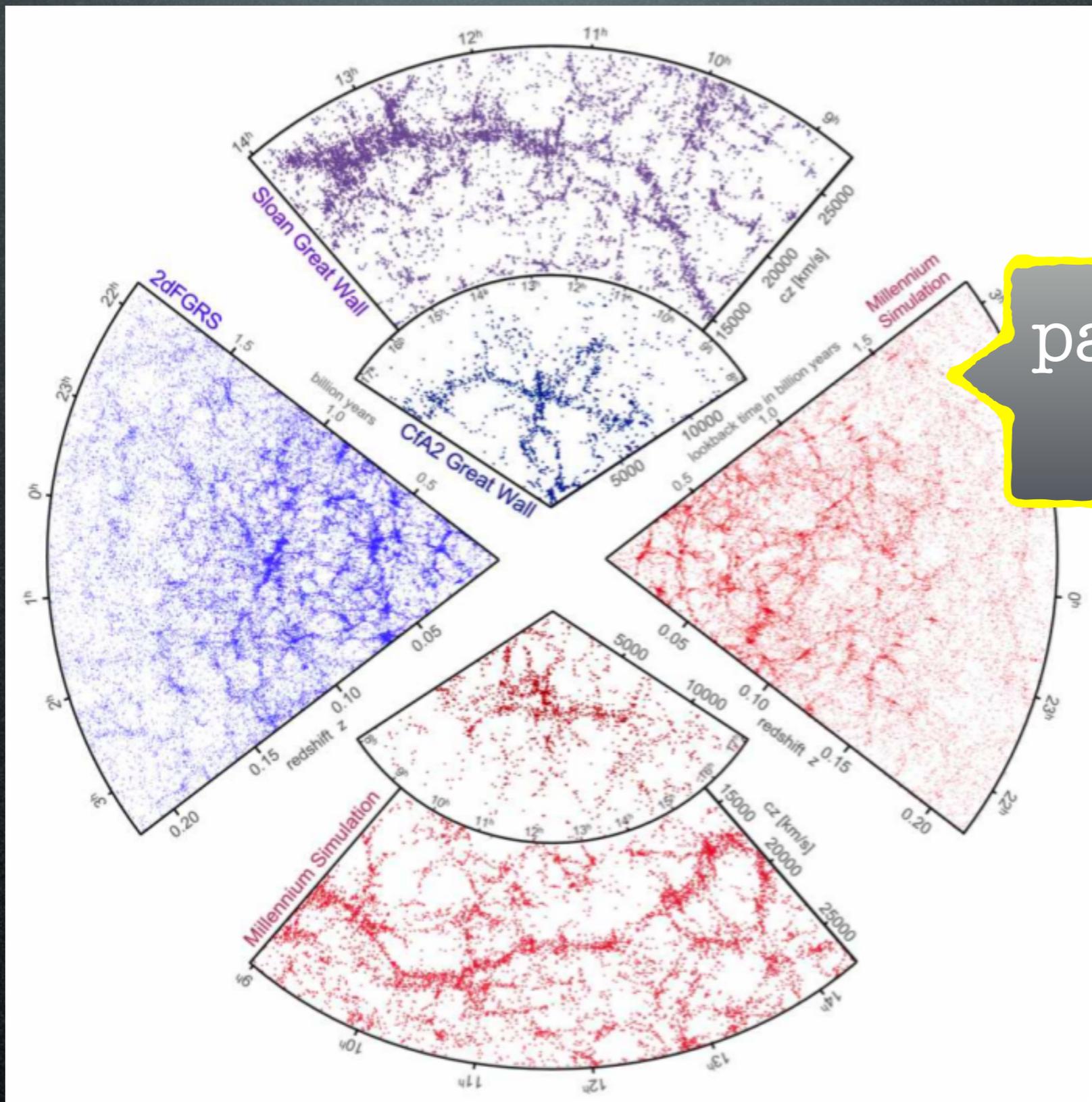
DETOUR



Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi
di anni luce



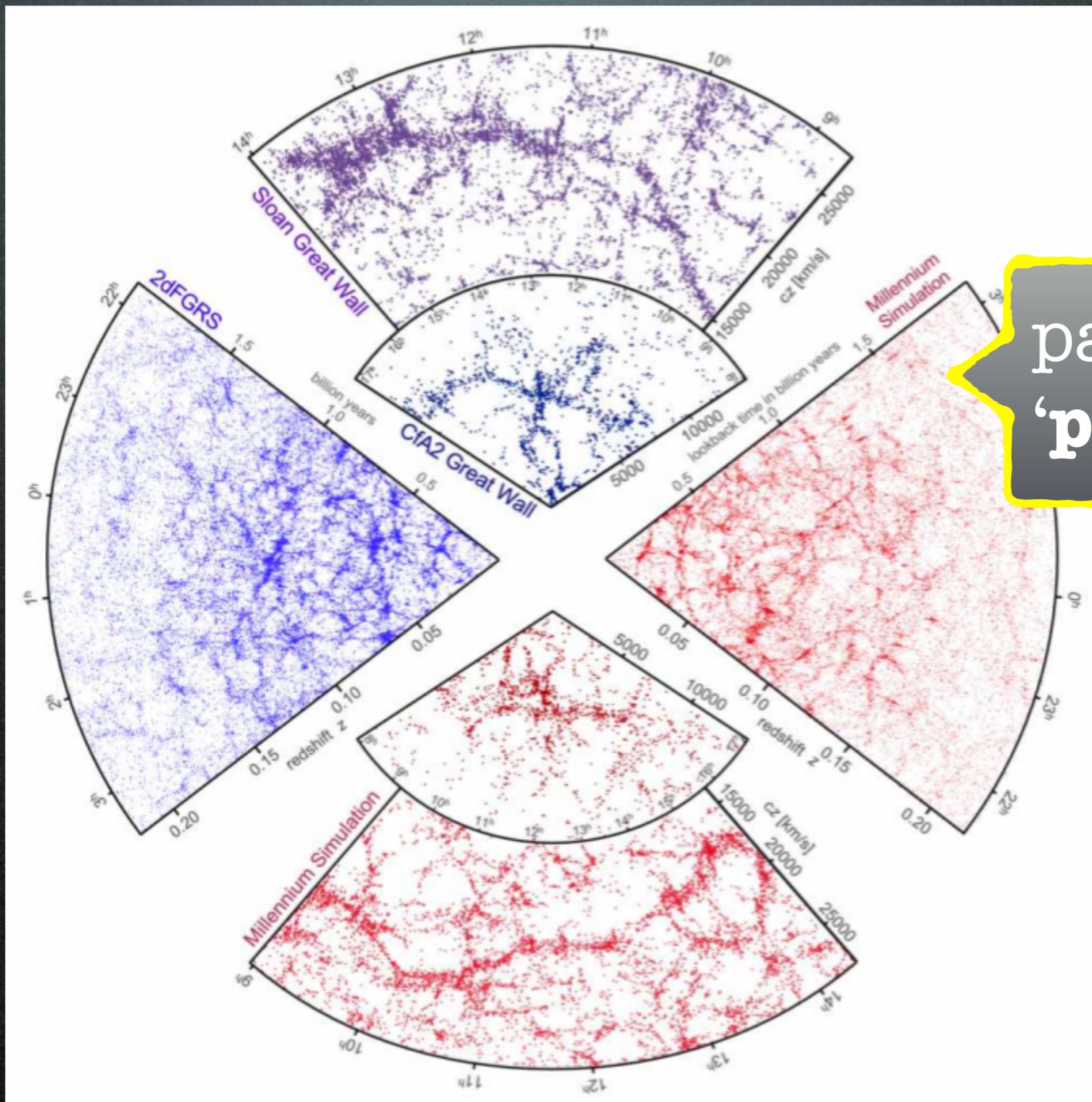
Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1} \text{ Mpc}$

Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi
di anni luce



particelle
'pesanti'

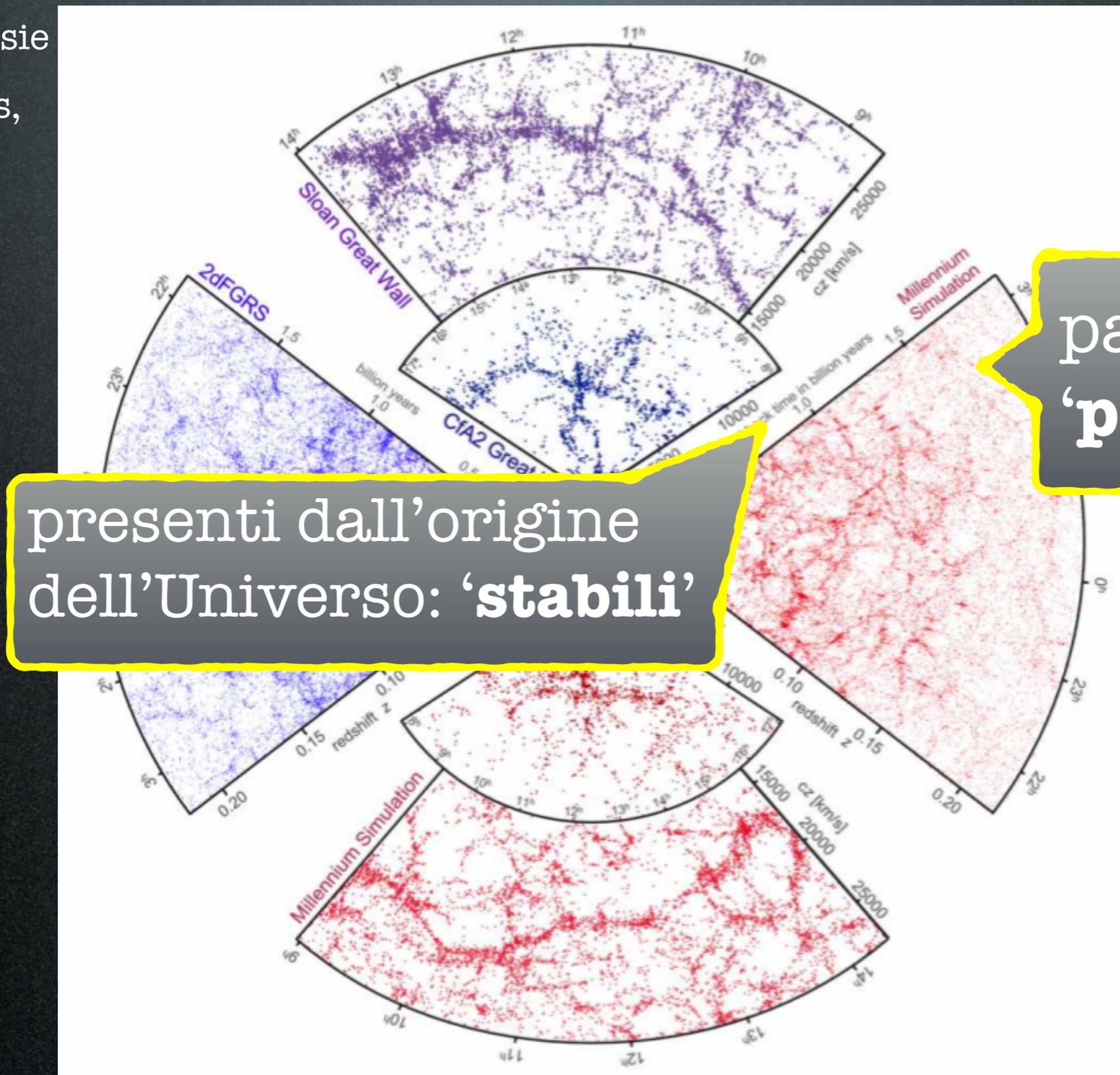
Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1} \text{ Mpc}$

Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

Prove dell'esistenza

2dF: $2.2 \cdot 10^5$ galassie

SDSS: 10^6 galaxies,
2 miliardi
di anni luce



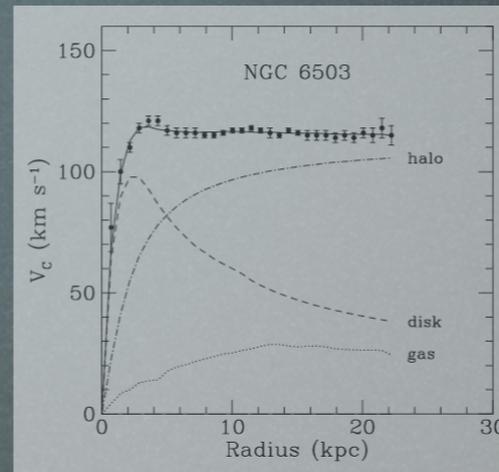
presenti dall'origine
dell'Universo: **'stabili'**

particelle
'pesanti'

Millennium:
 10^{10} particelle,
 $500 h^{-1} \text{ Mpc}$

Prove dell'esistenza

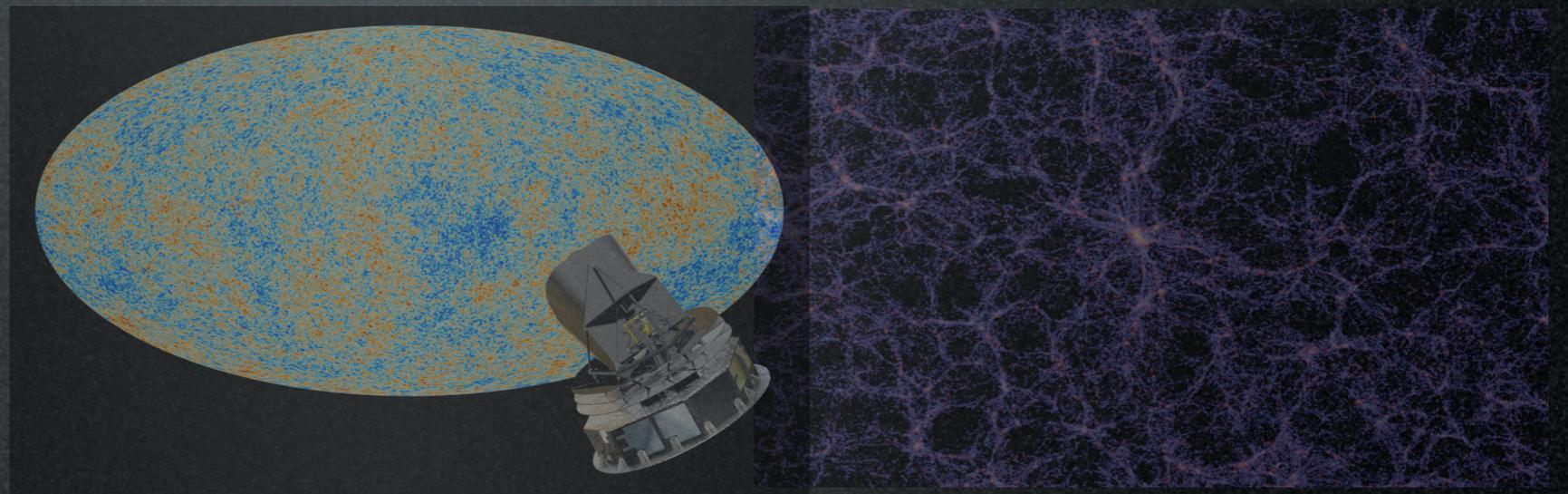
1) curve di rotazione galattiche



2) ammassi di galassie



3) 'cosmologia di precisione'



Cosa sappiamo
delle sue
proprietà?

Proprietà e natura

non emette luce,
è 'neutra'

particelle
'**pesanti**'

presenti dall'origine
dell'Universo: '**stabili**'

più abbondante
che la materia
ordinaria!

nessuna interazione
(o molto debole)

Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni

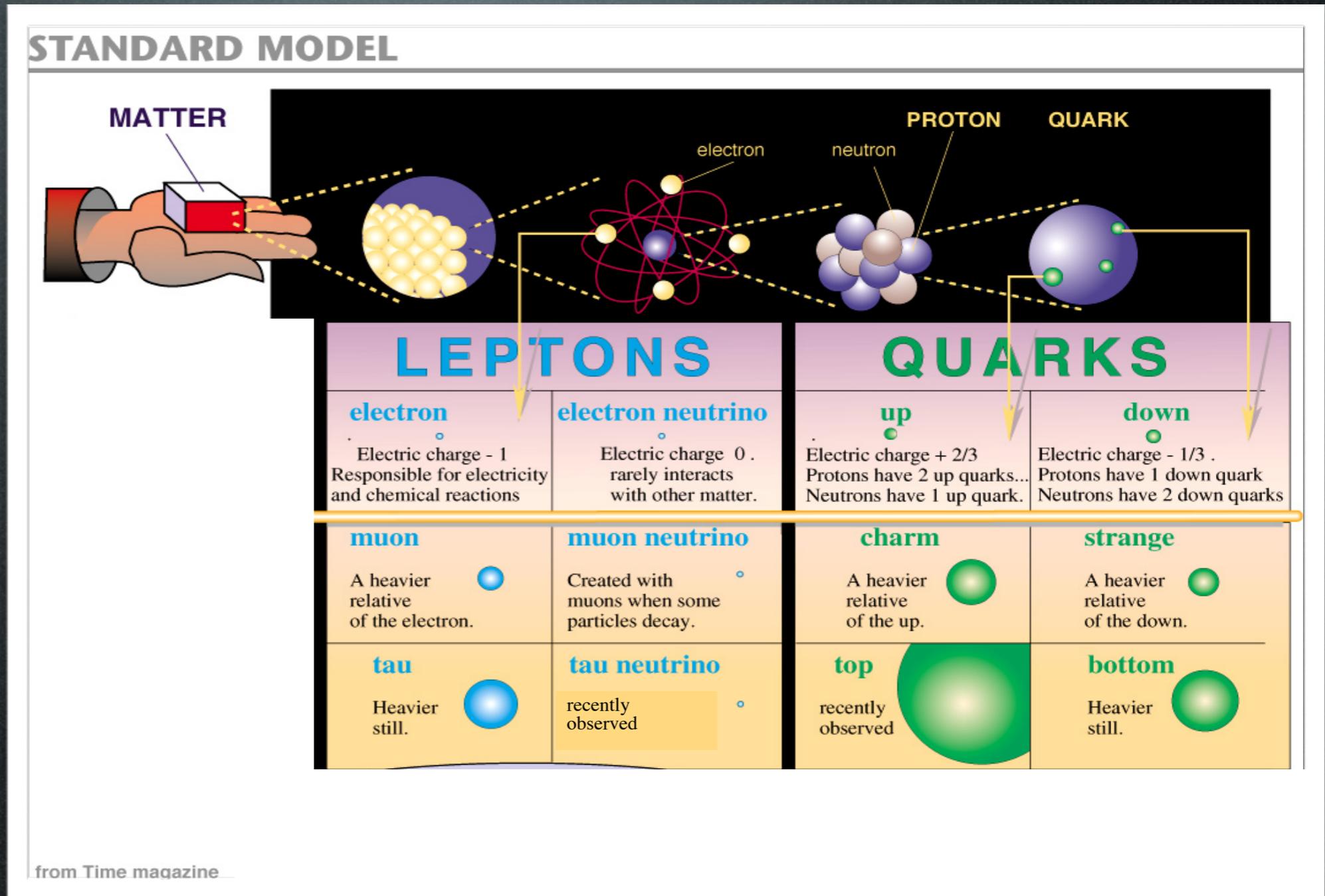
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



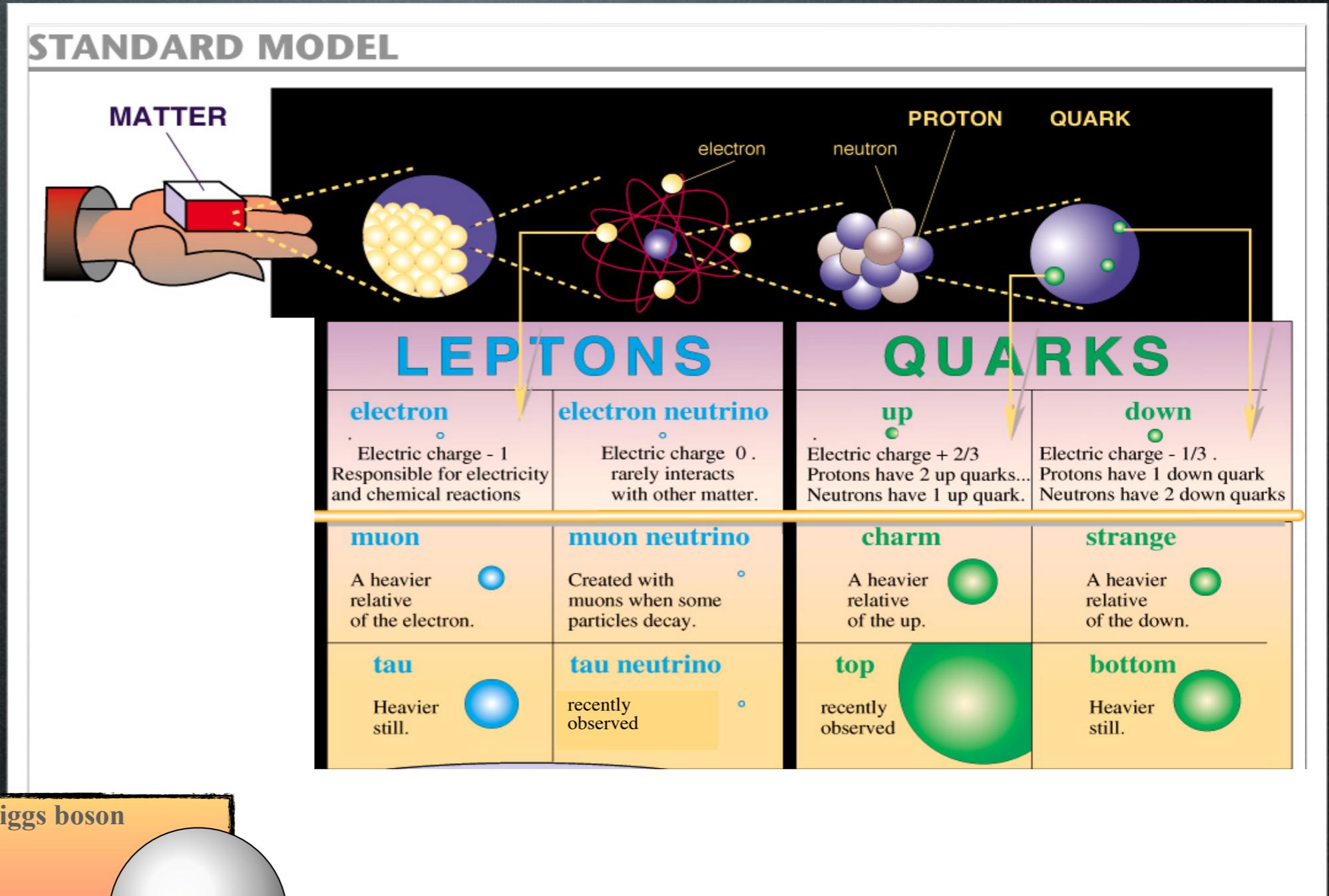
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



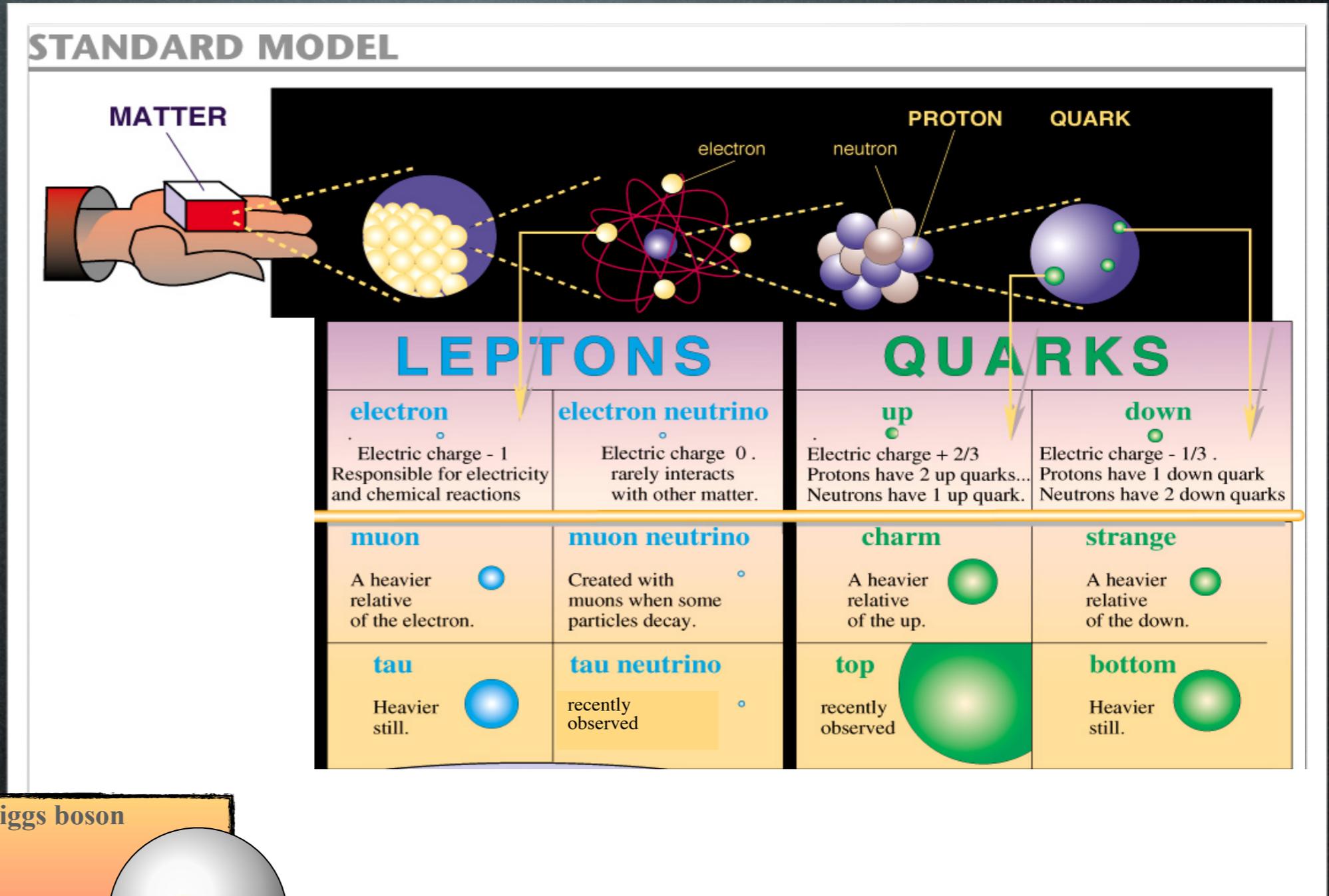
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



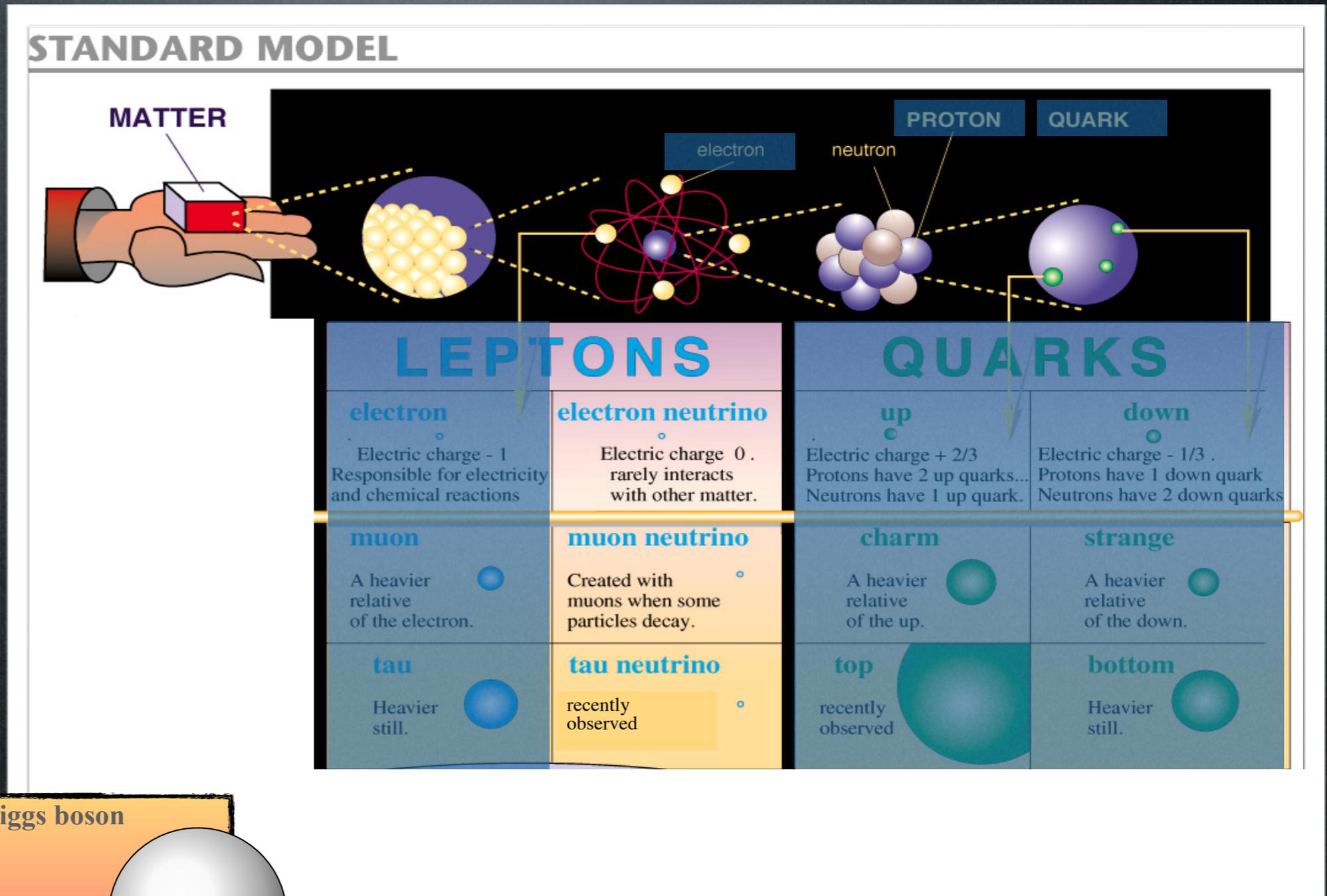
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



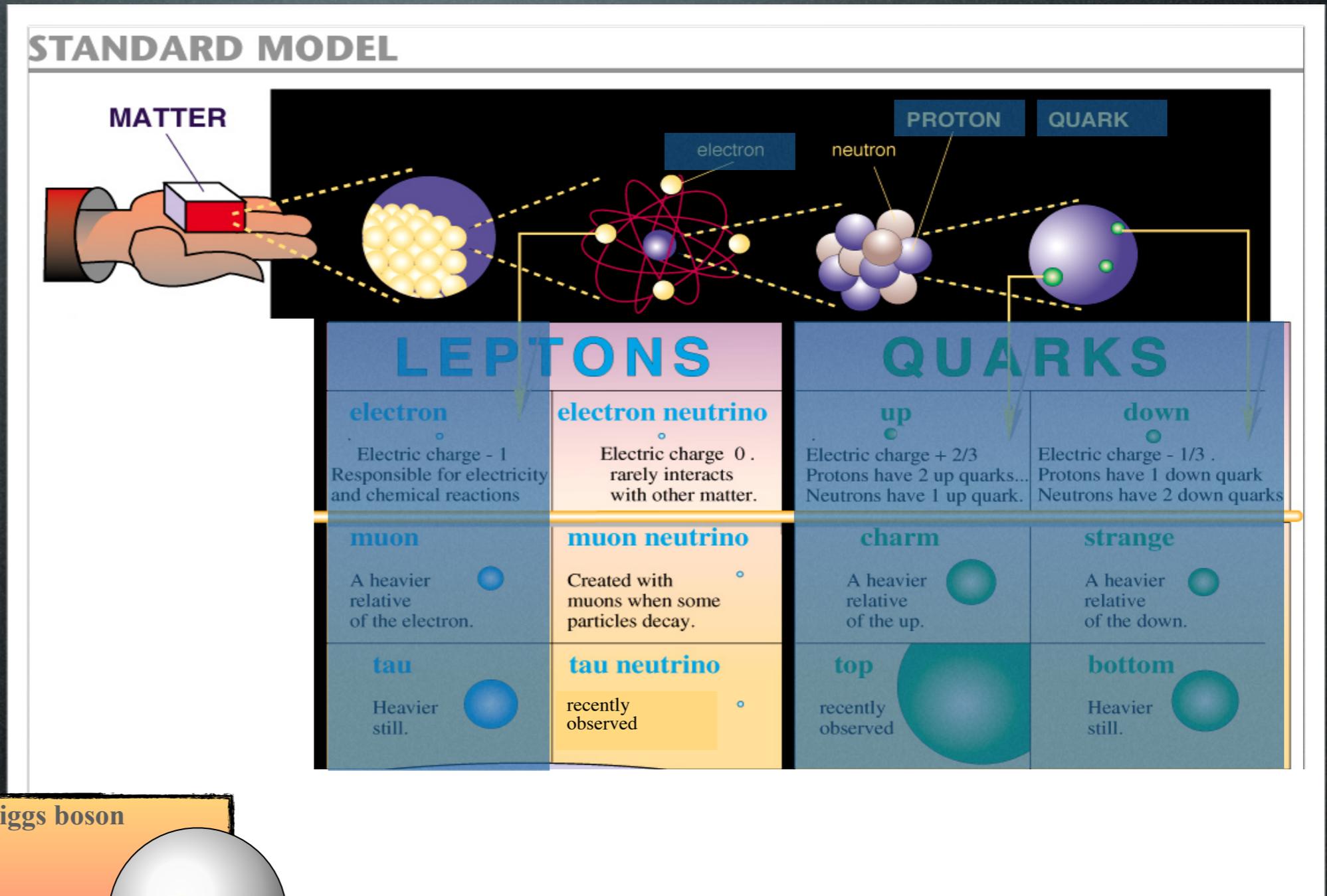
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



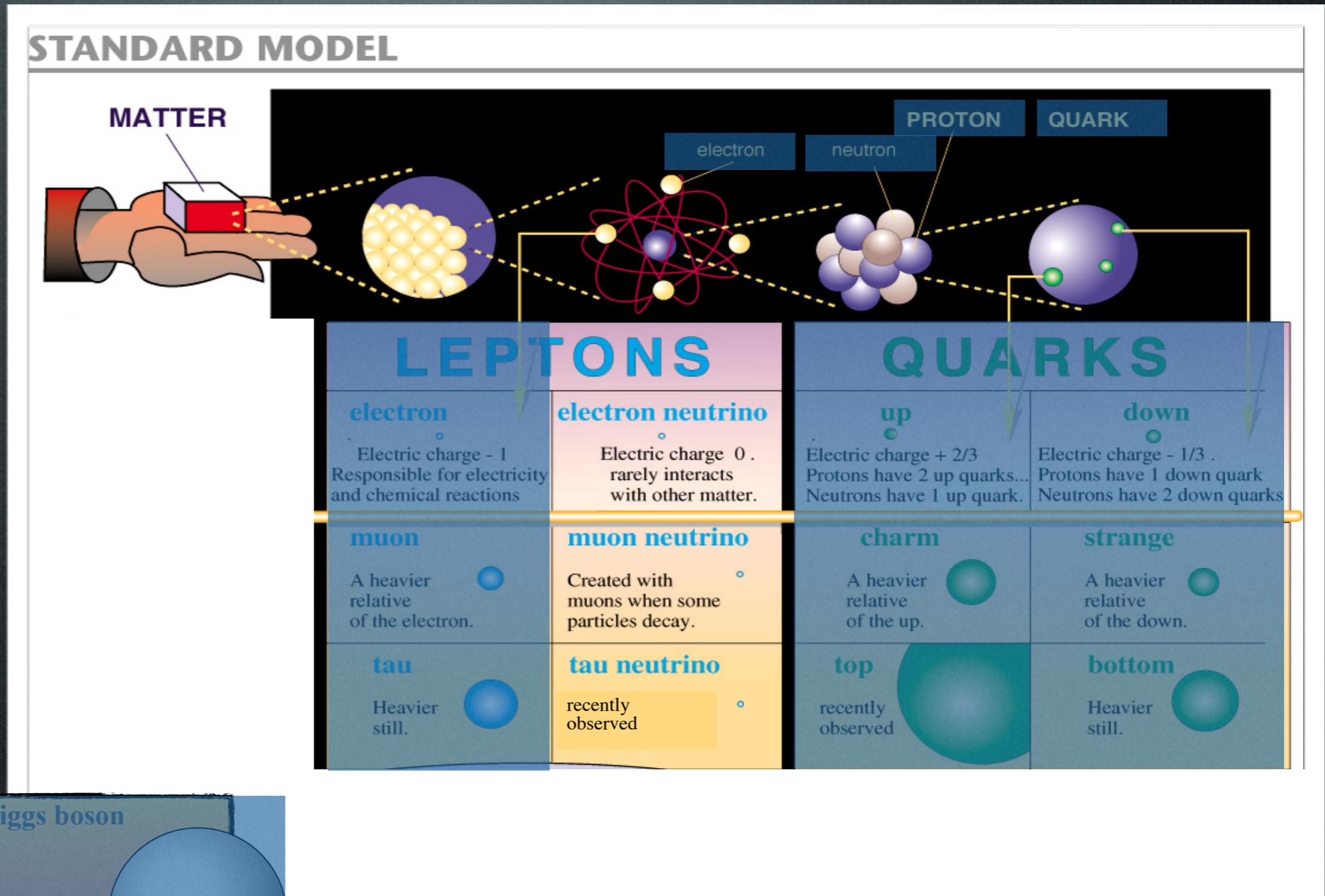
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



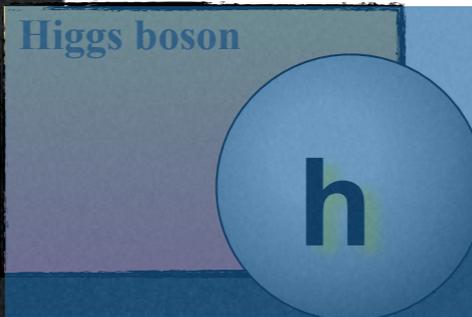
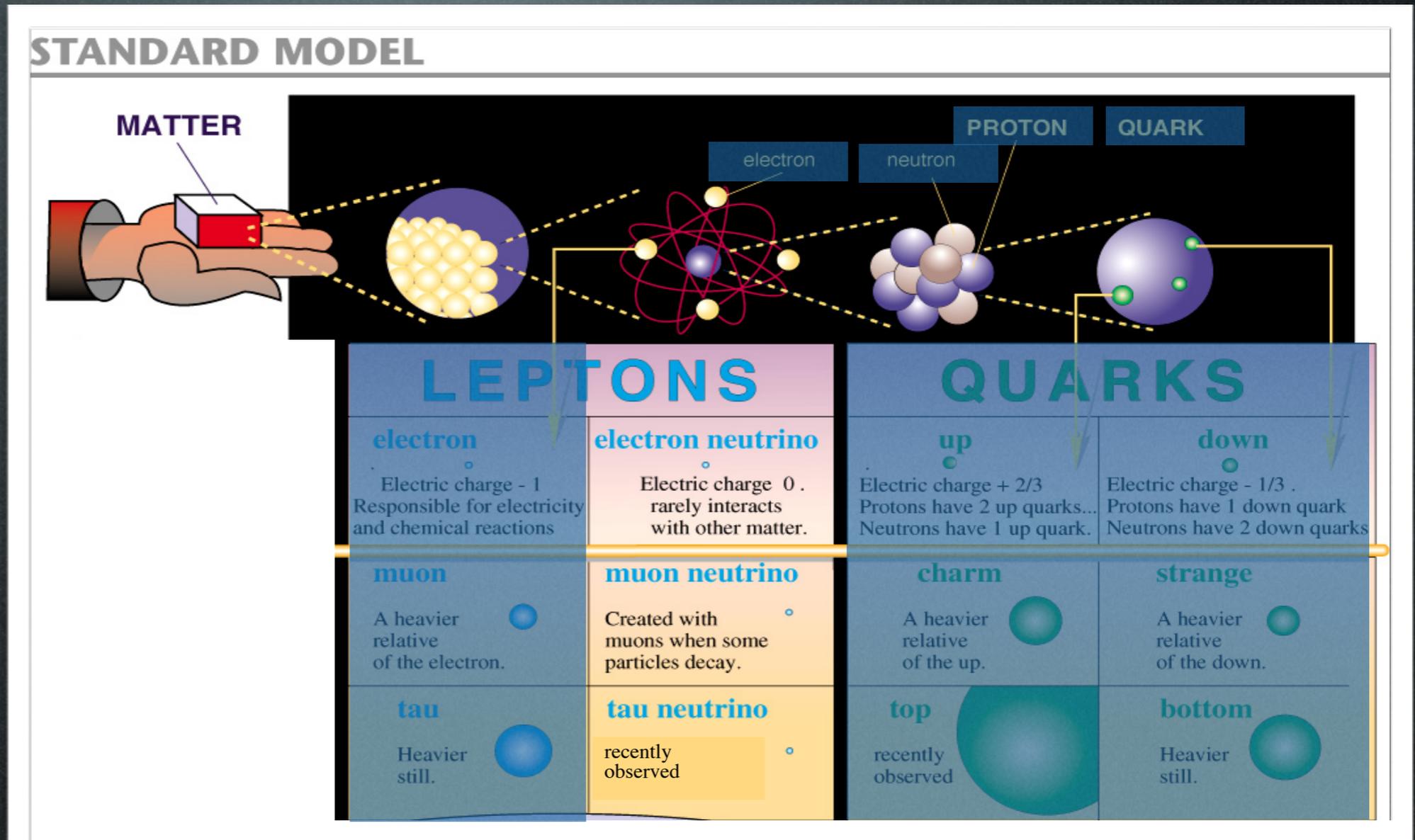
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



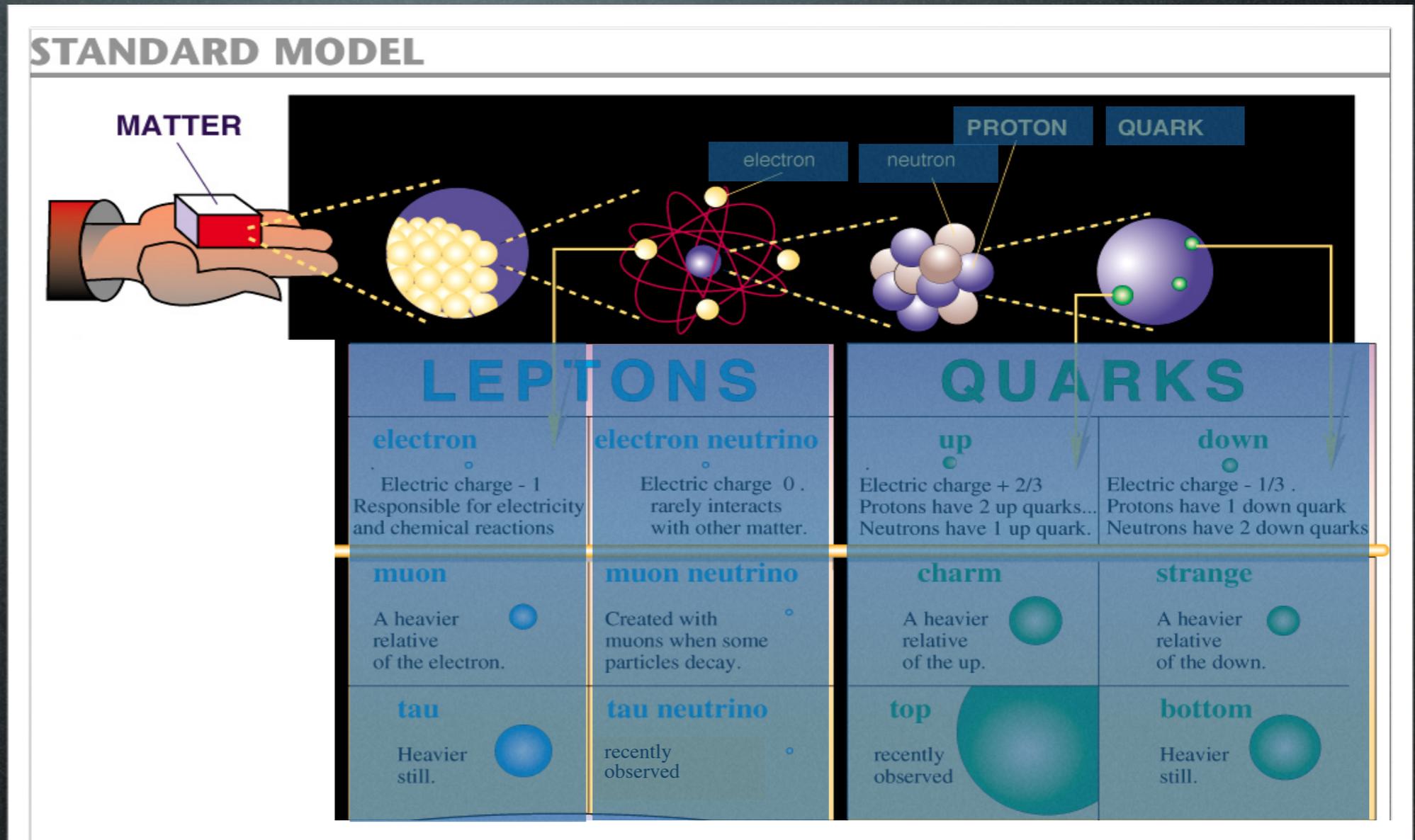
Proprietà e natura

particelle
'pesanti'

'neutre'

'stabili'

quasi senza
interazioni



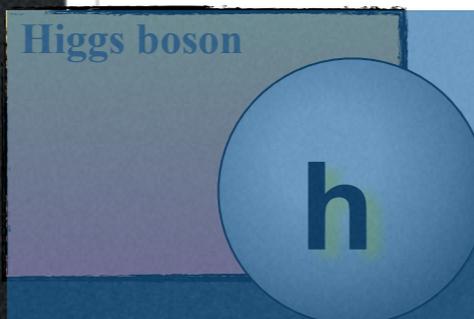
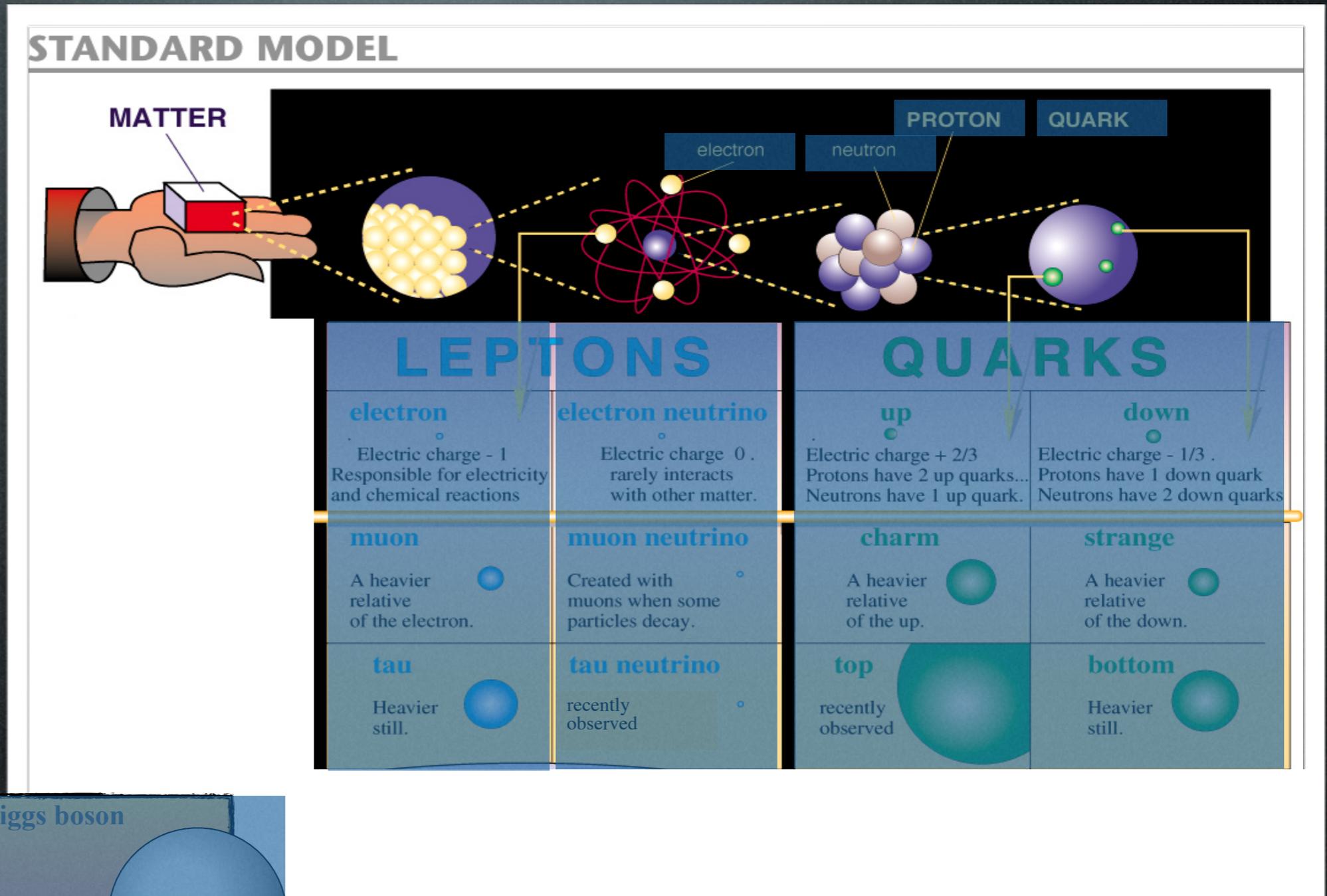
Proprietà e natura

particelle
'**pesanti**'

'**neutre**'

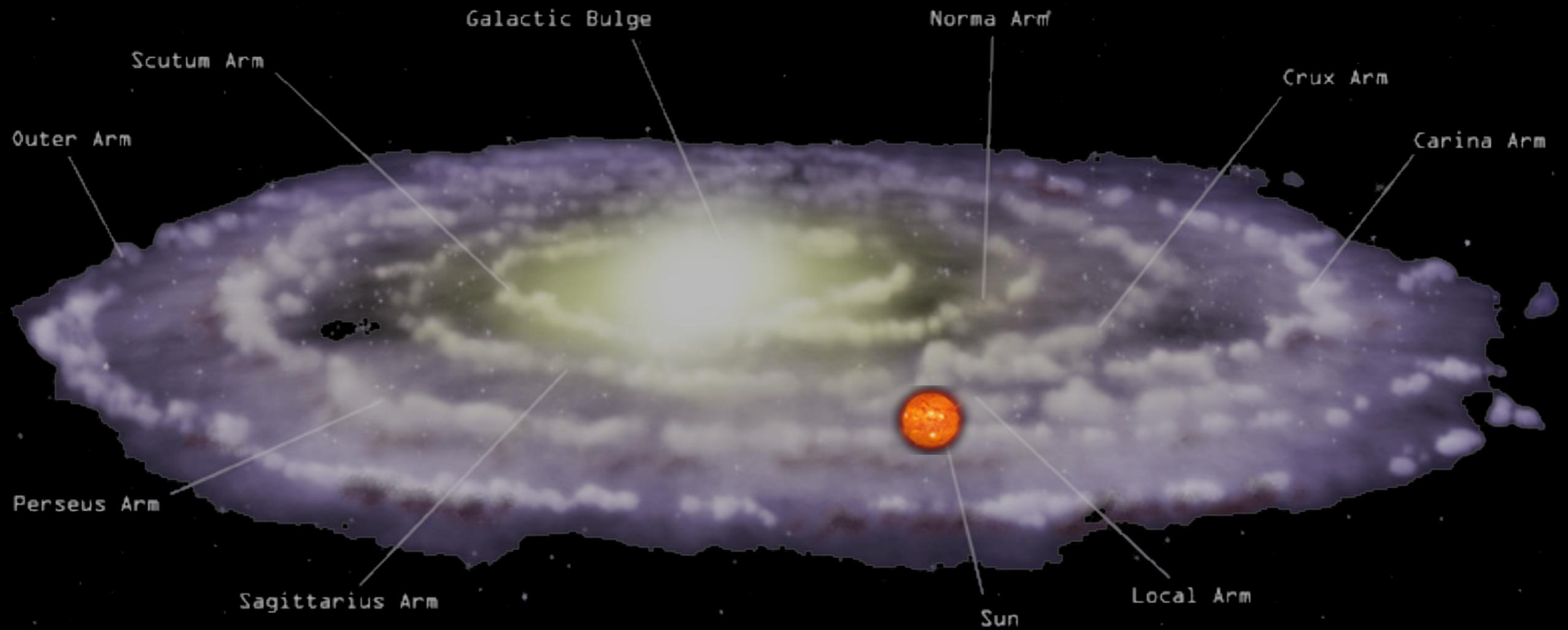
'**stabili**'

quasi senza
interazioni



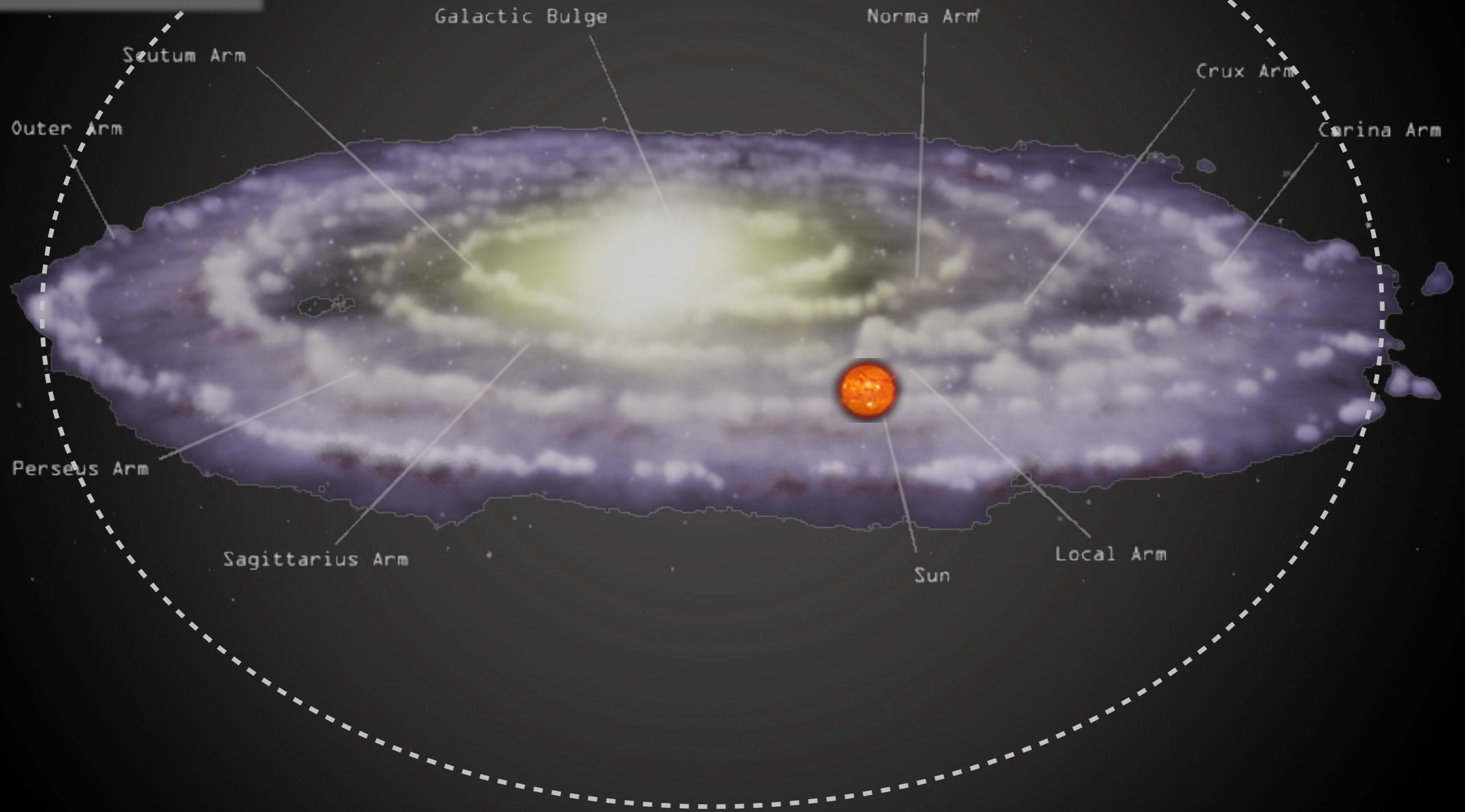
una **nuova** particella,
ancora **ignota**

E nella Via Lattea ?



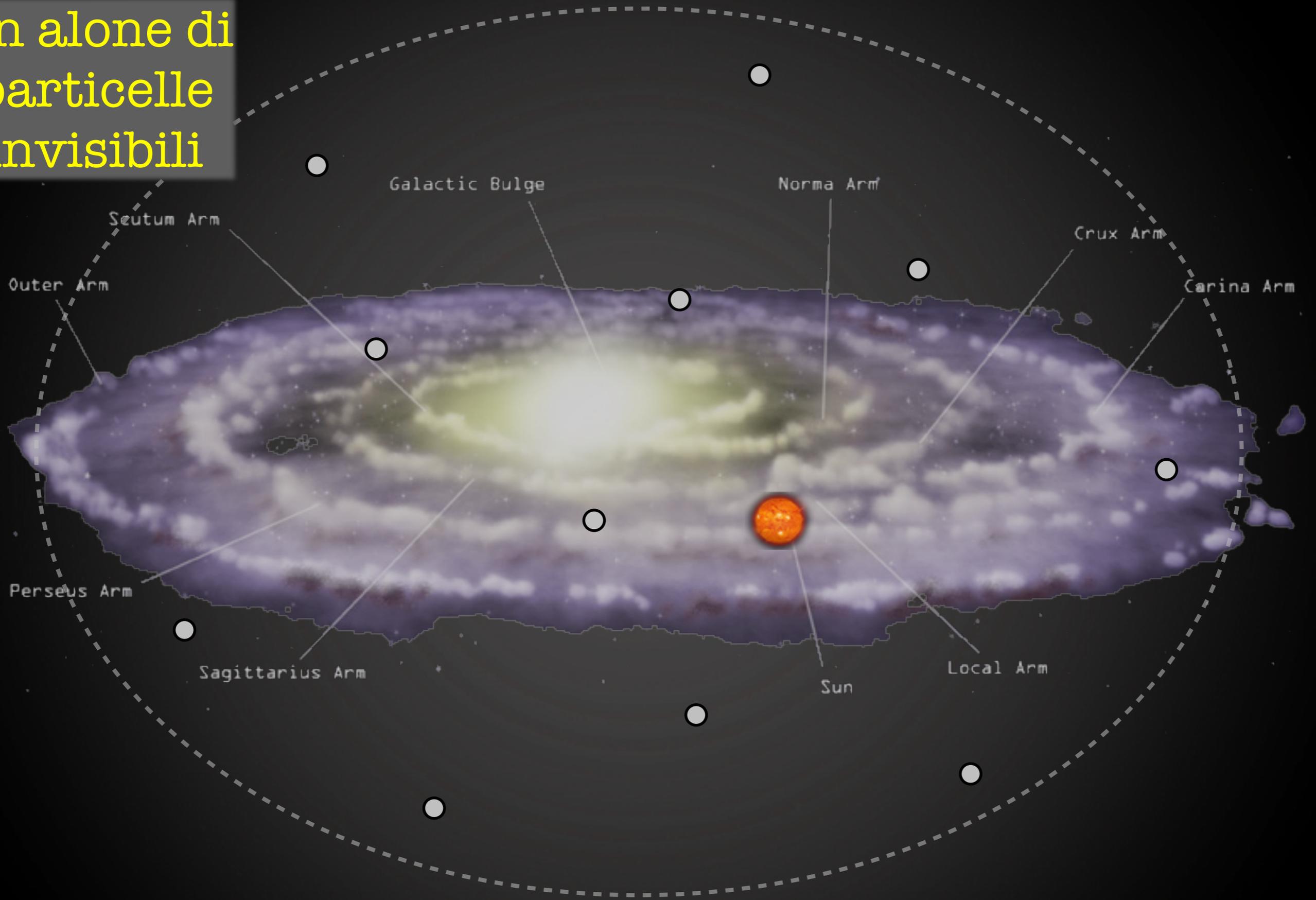
E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili



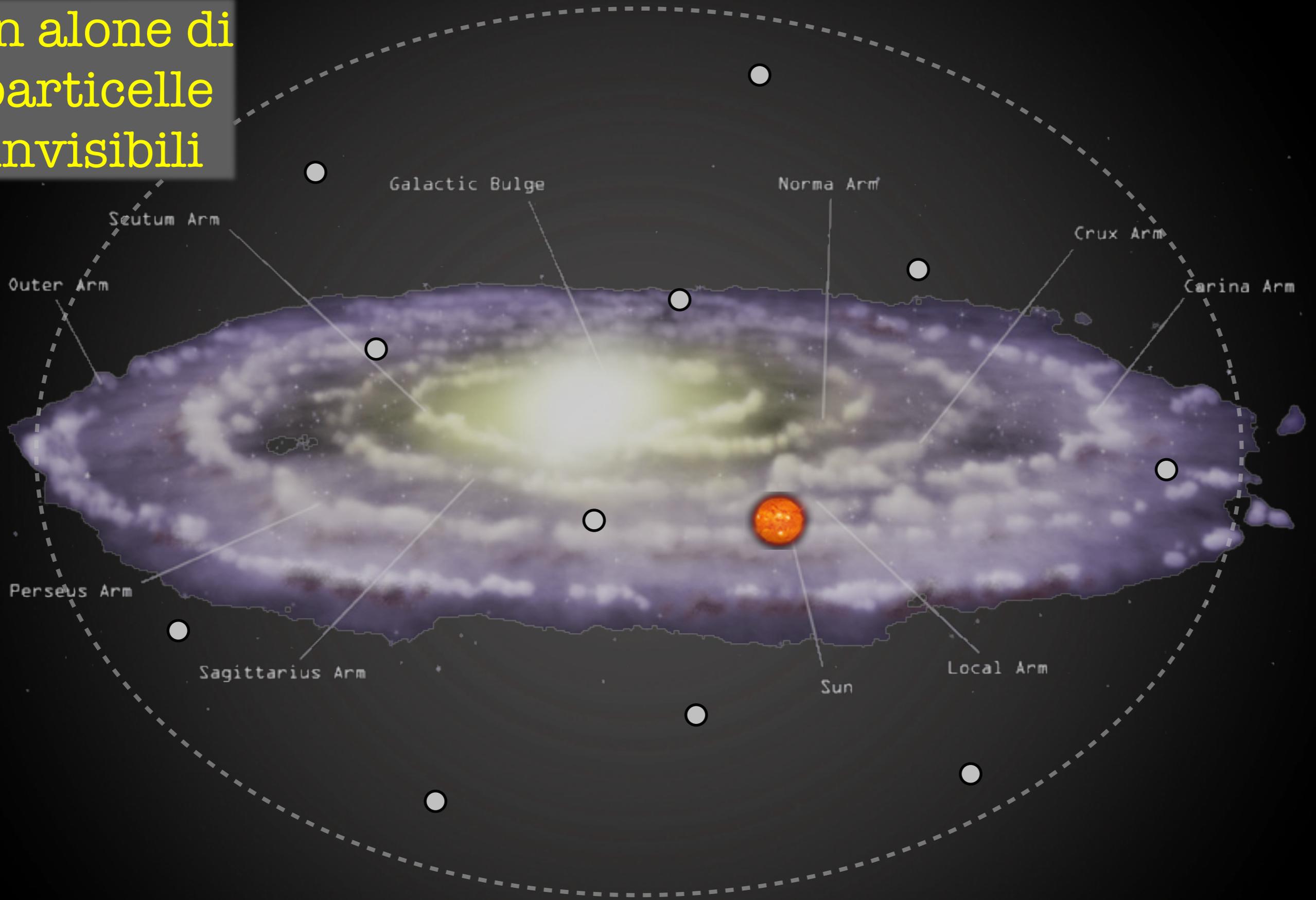
E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili



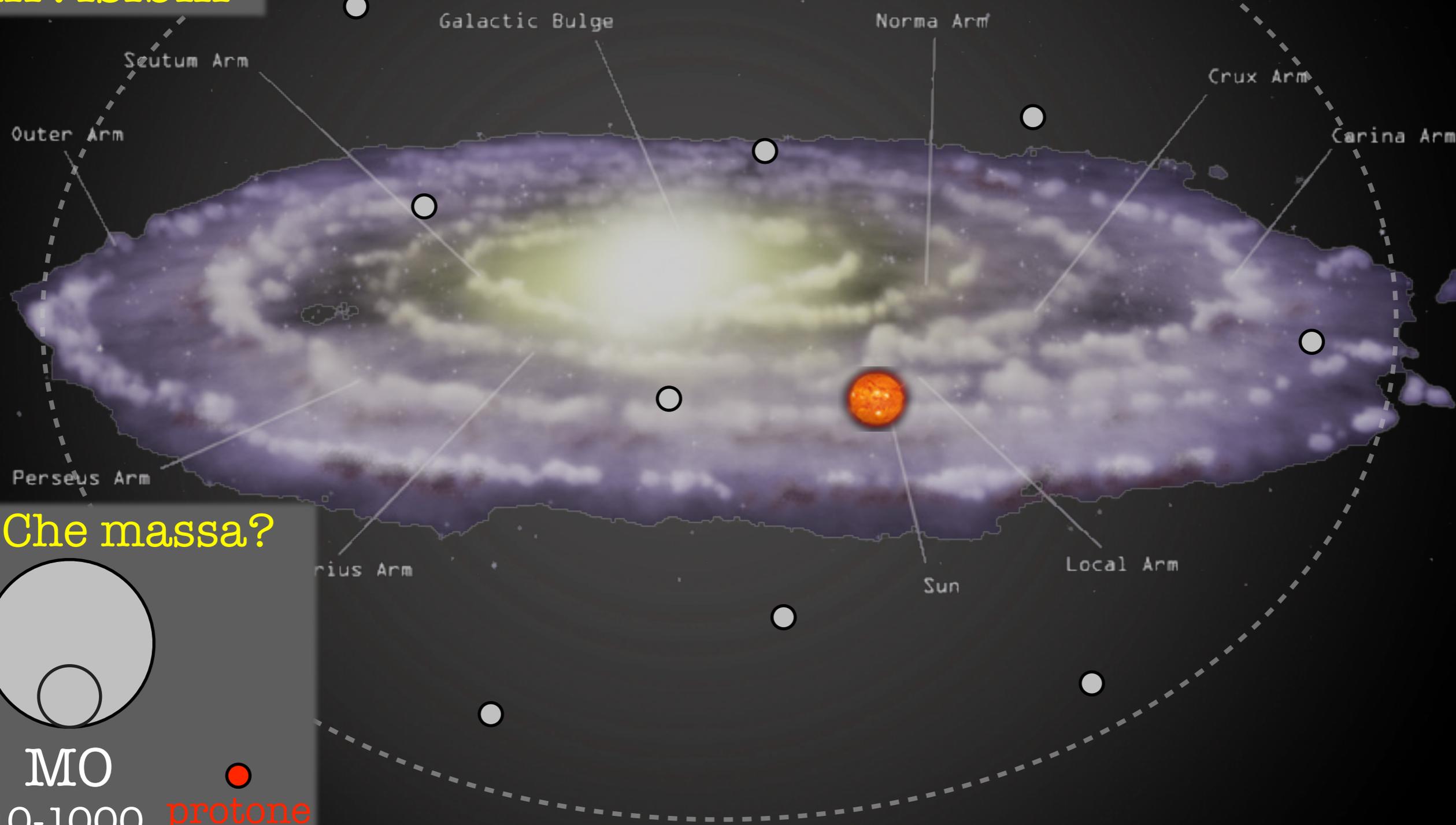
E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili

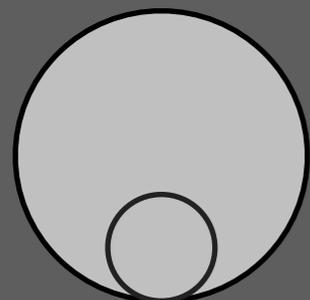


E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili



Che massa?



M_{\odot}

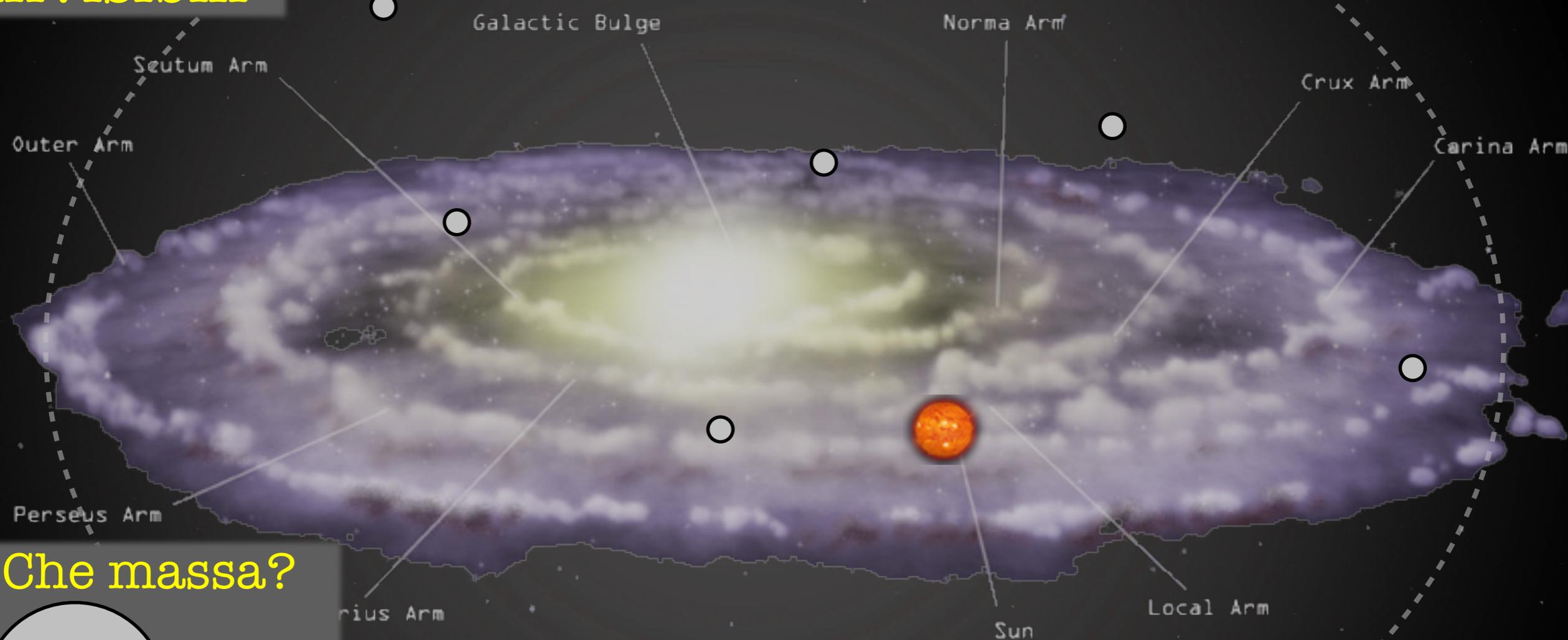
10-1000
GeV



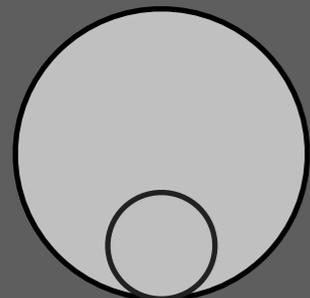
protone
1 GeV

E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili

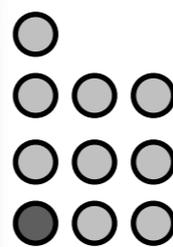


Che massa?



MO
10-1000 GeV
●
protone
1 GeV

Che densità?

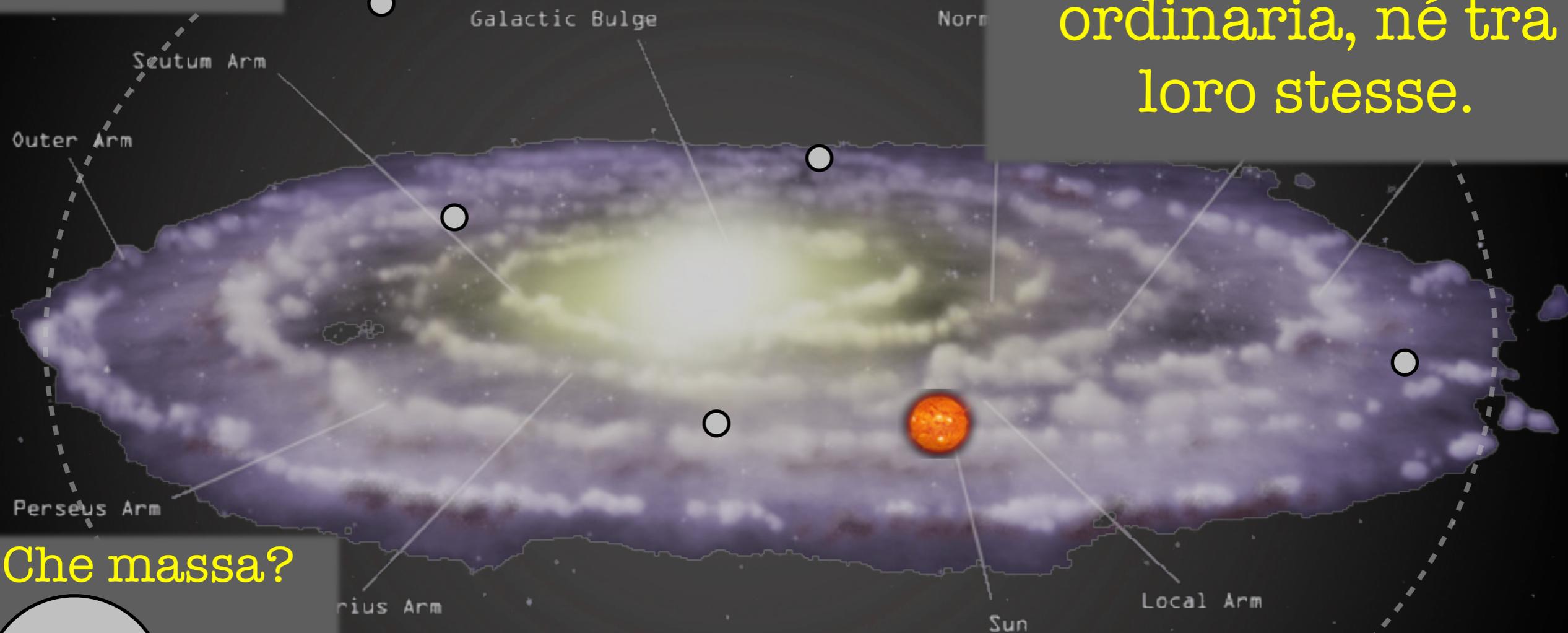


10 GeV
100 GeV

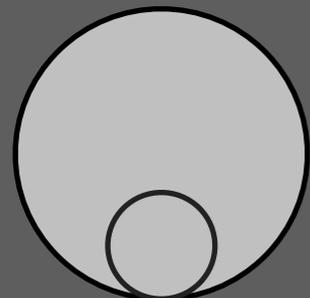
E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili

Non interagiscono
con la materia
ordinaria, né tra
loro stesse.



Che massa?

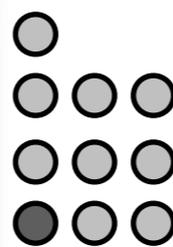


MO

10-1000
GeV

●
protone
1 GeV

Che densità?



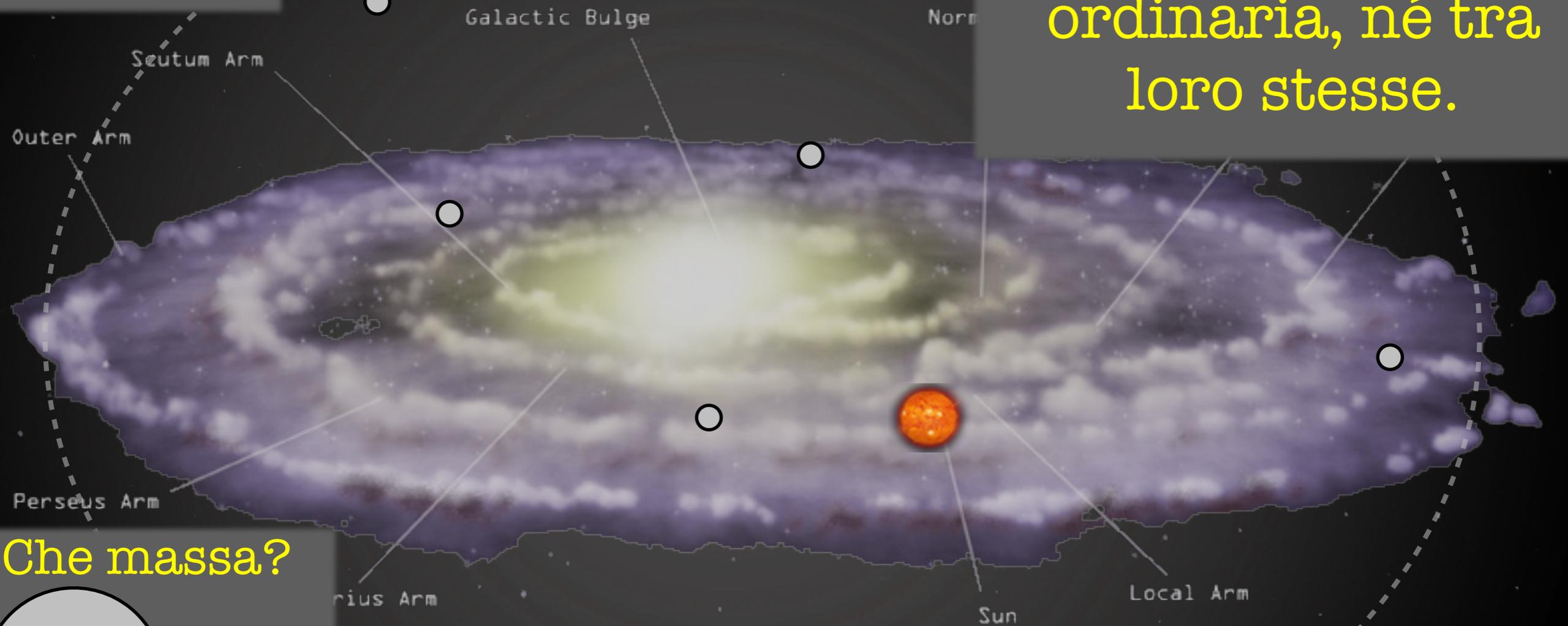
10 GeV

100 GeV

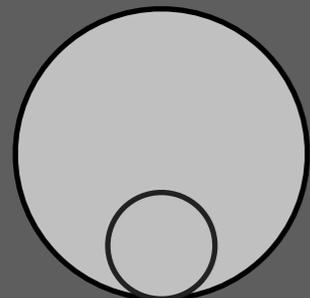
E nella Via Lattea ?

Un alone di
particelle
invisibili

Non interagiscono
con la materia
ordinaria, né tra
loro stesse.

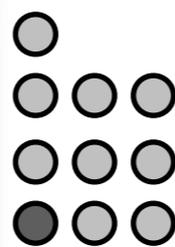


Che massa?



MO
10-1000 GeV
●
protone
1 GeV

Che densità?



10 GeV
100 GeV

O forse sì,
interagiscono un po'...

Come
rivelare
la Materia Oscura?





Fisica sotterranea



'rivelazione diretta'



Fisica sotterranea

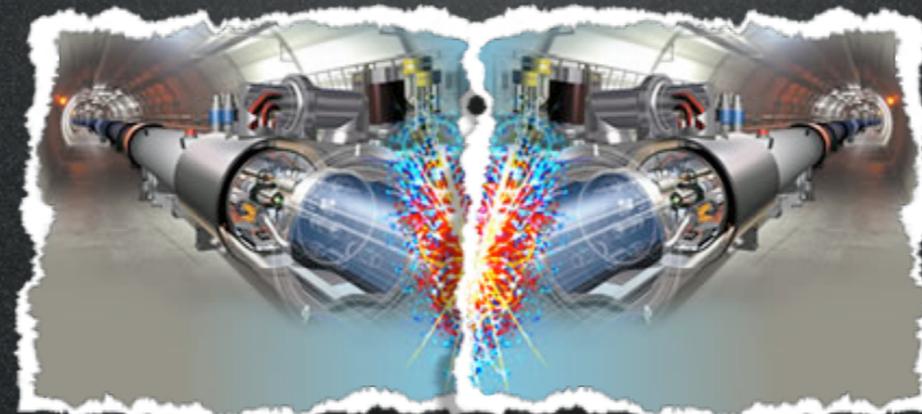


'rivelazione diretta'



Materia
Oscura

'produzione'



Fisica agli acceleratori

Fisica spaziale



Fisica sotterranea

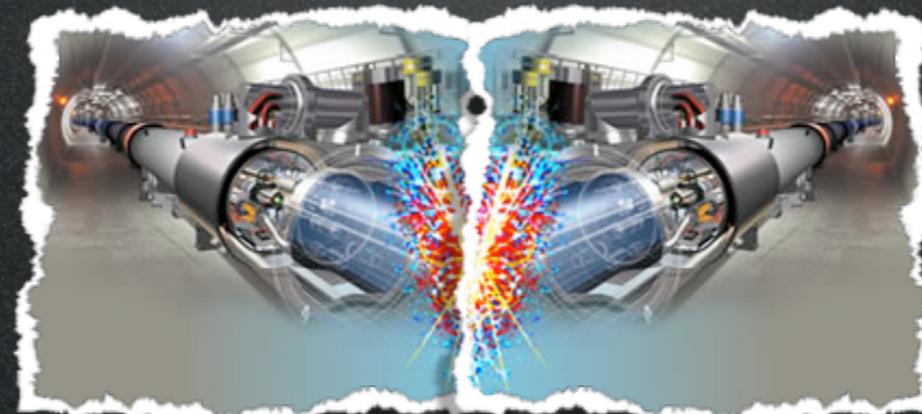


‘rivelazione indiretta’

‘rivelazione diretta’



‘produzione’



Fisica agli acceleratori

Rivelazione diretta



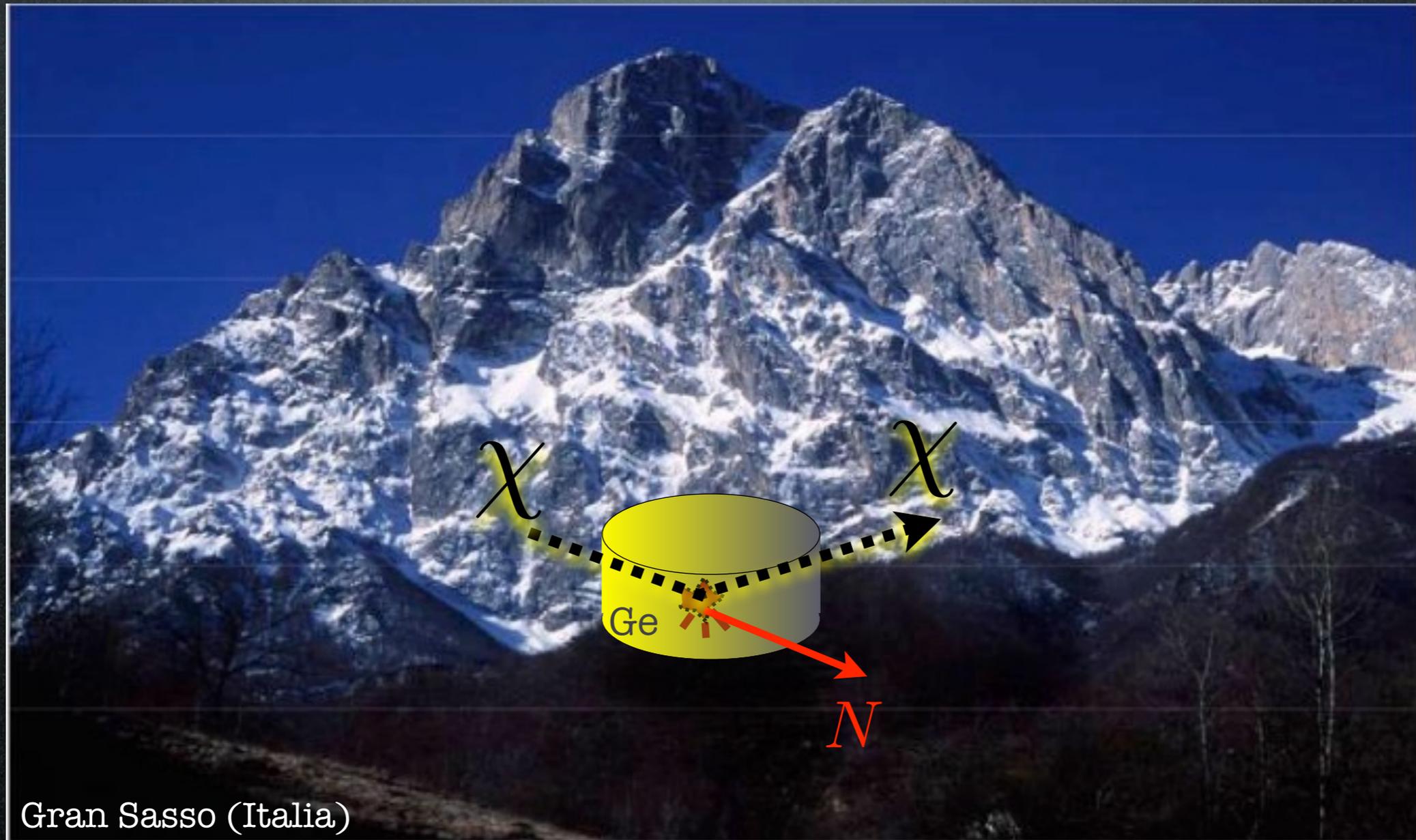
Gran Sasso (Italia)

Rivelazione diretta



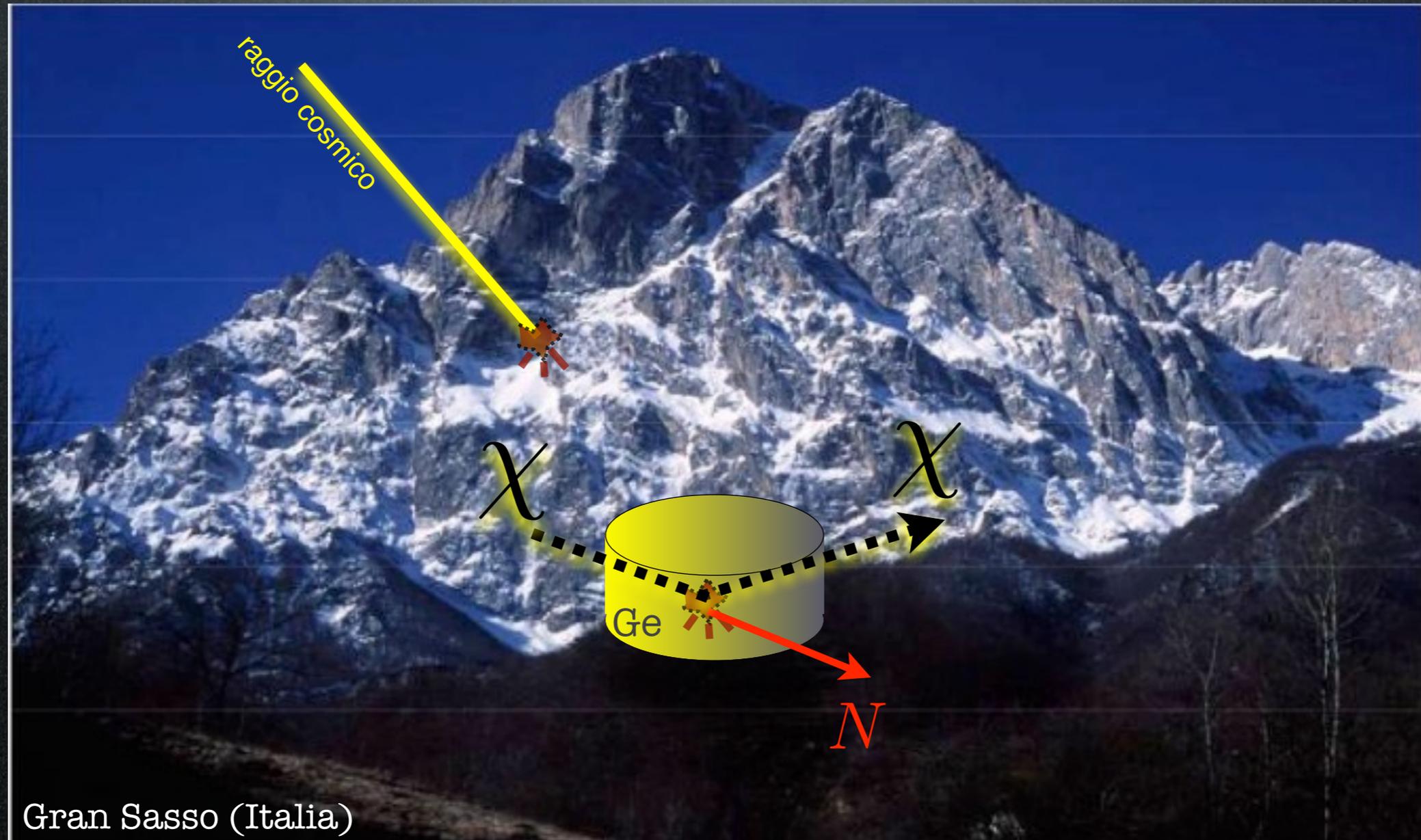
Gran Sasso (Italia)

Rivelazione diretta



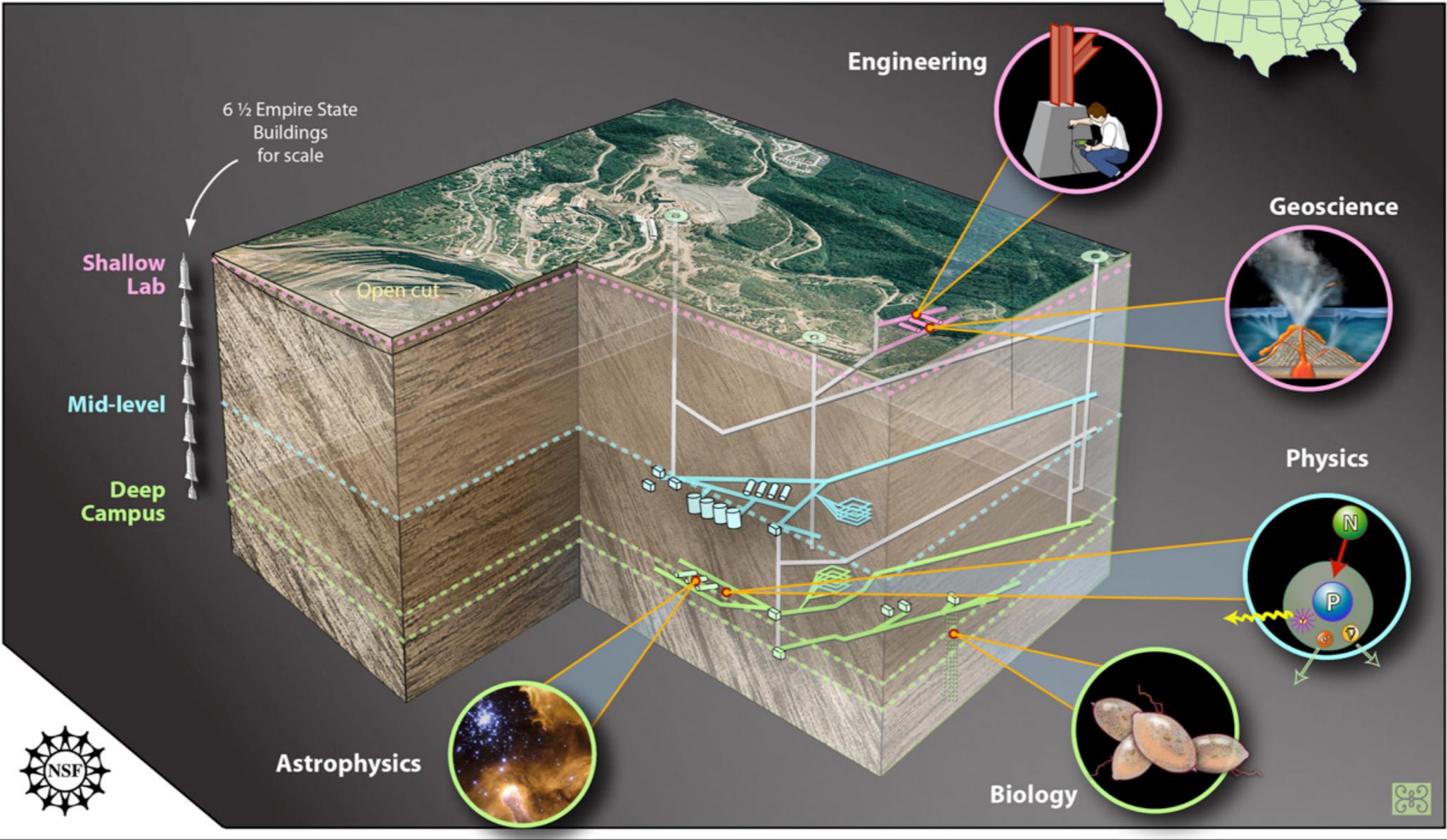
Gran Sasso (Italia)

Rivelazione diretta



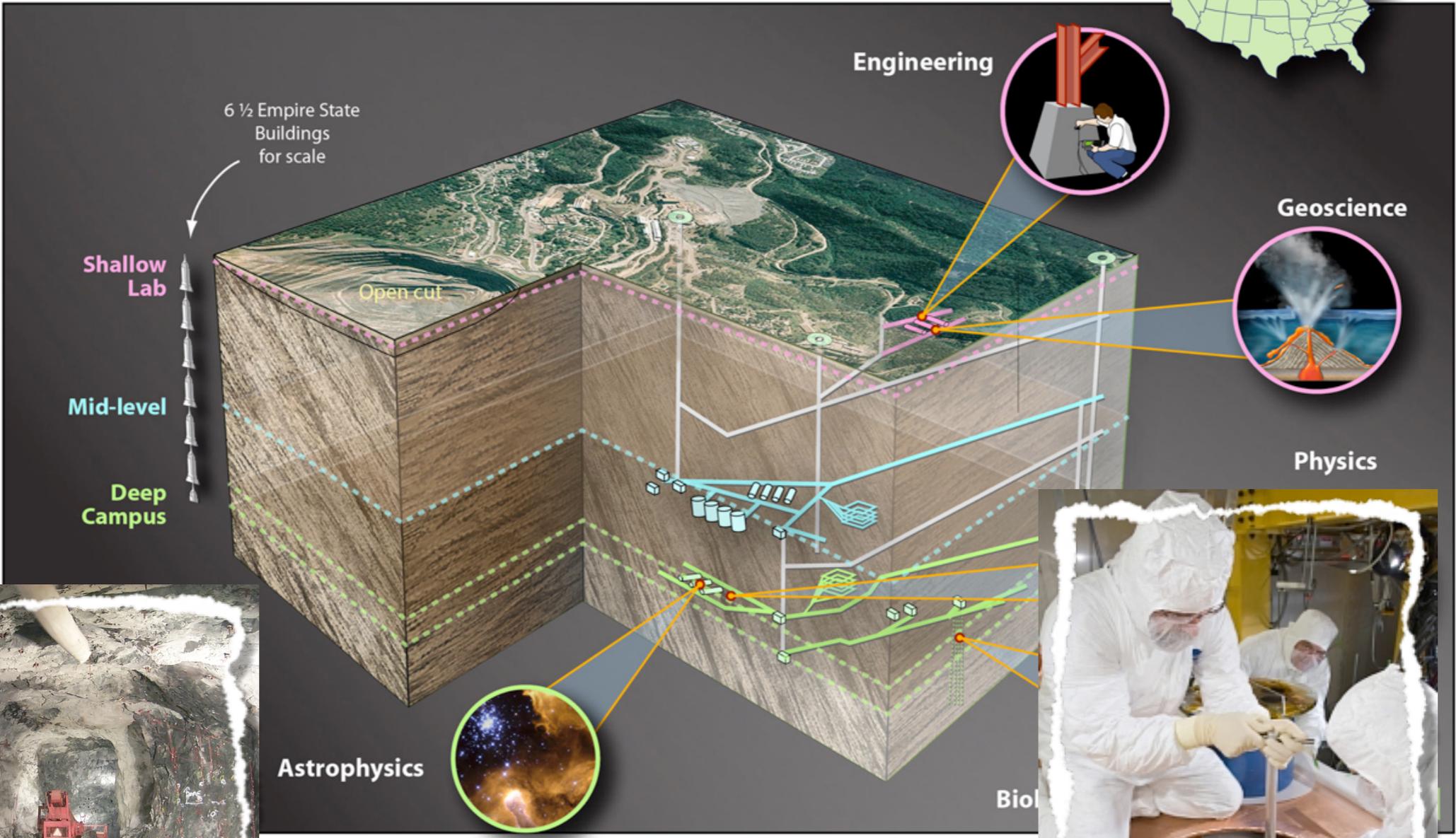
Rivelazione diretta

DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD



Rivelazione diretta

DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD



Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

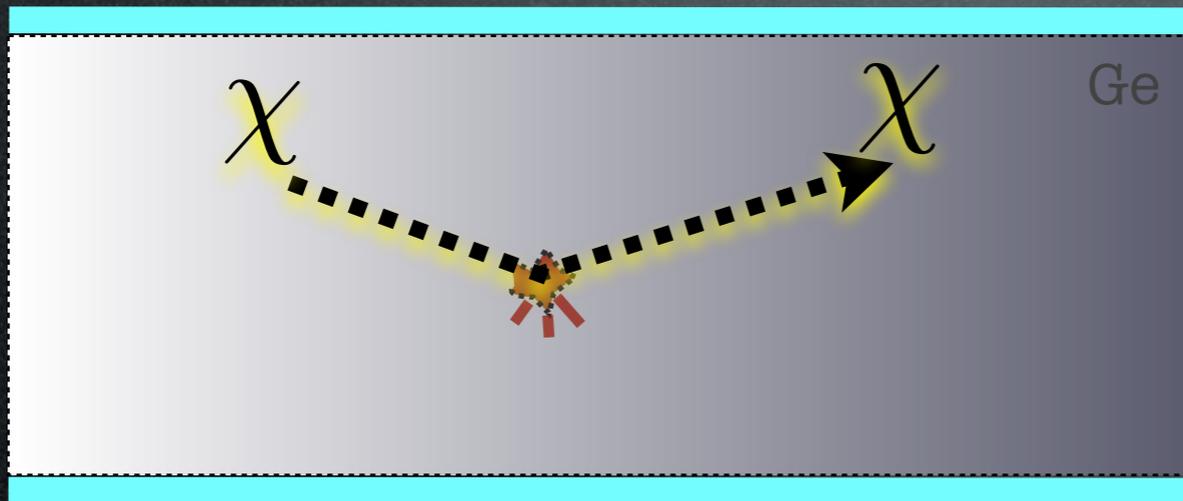
misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. Edelweiss:



Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. Edelweiss:

ionizzazione



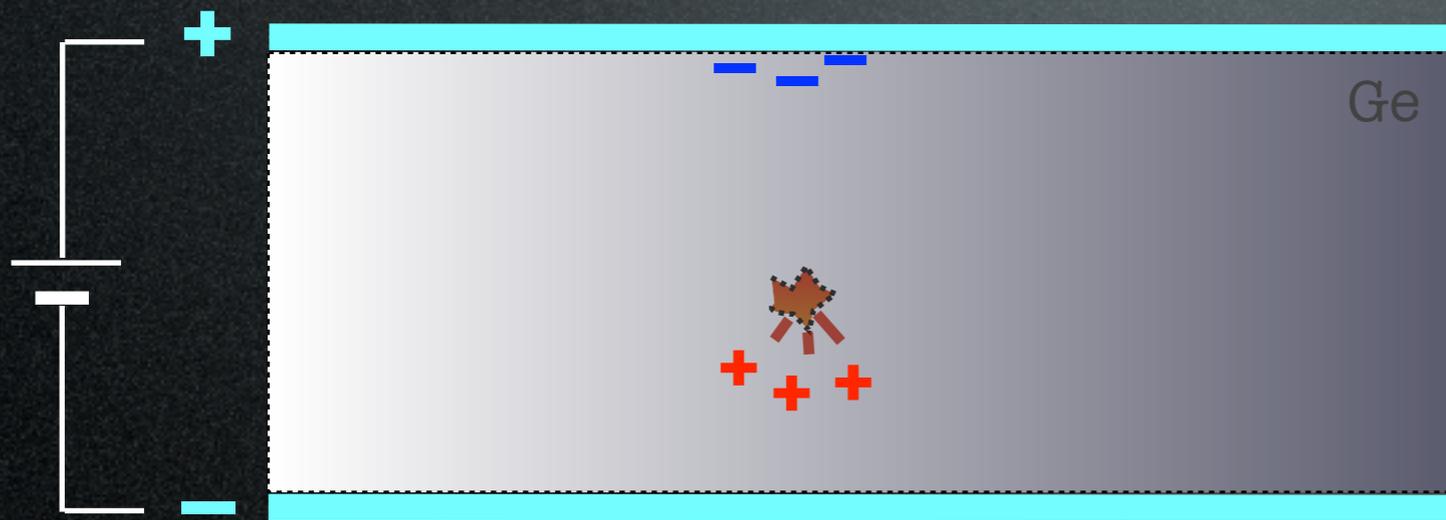
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. Edelweiss:

ionizzazione

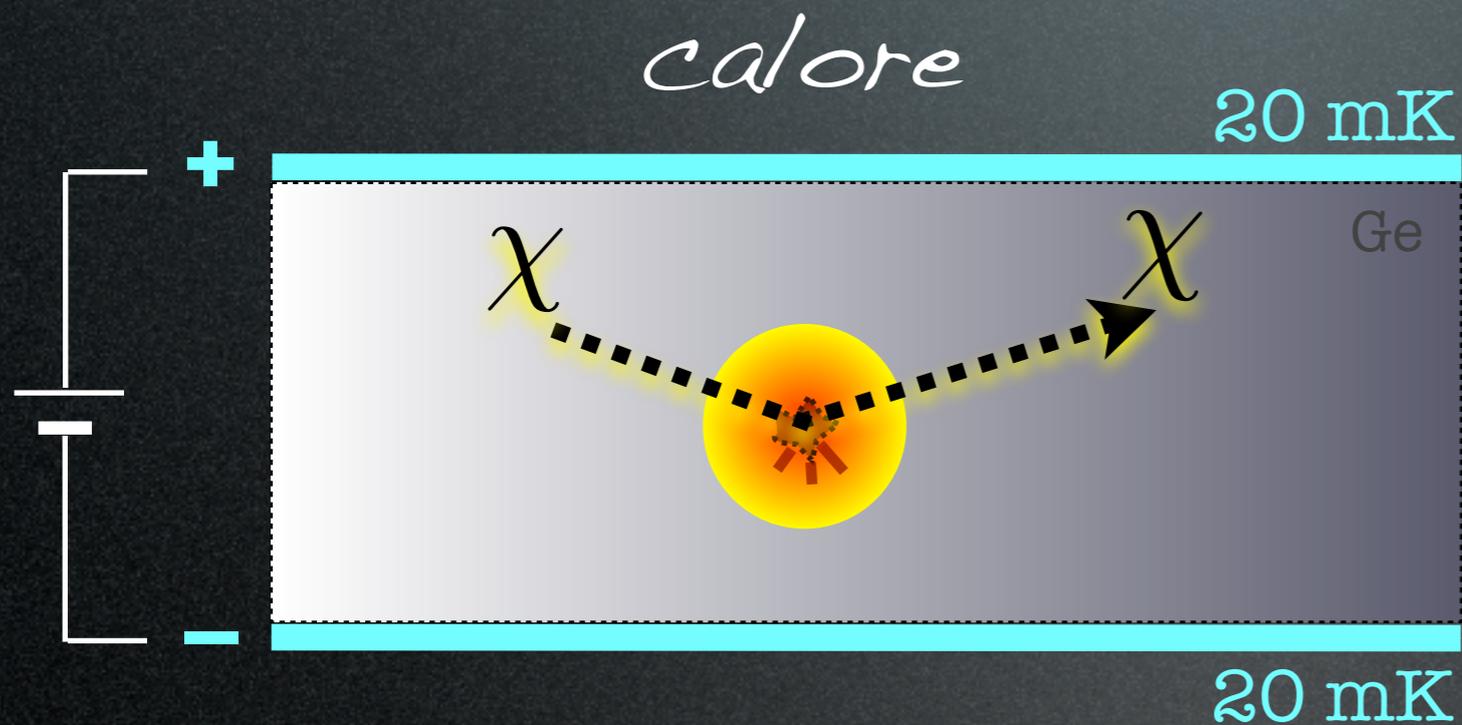


Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

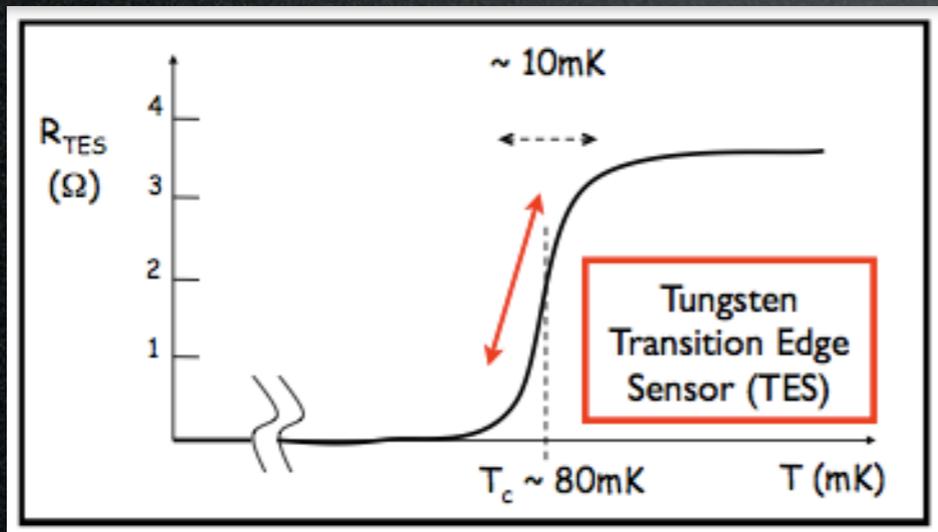
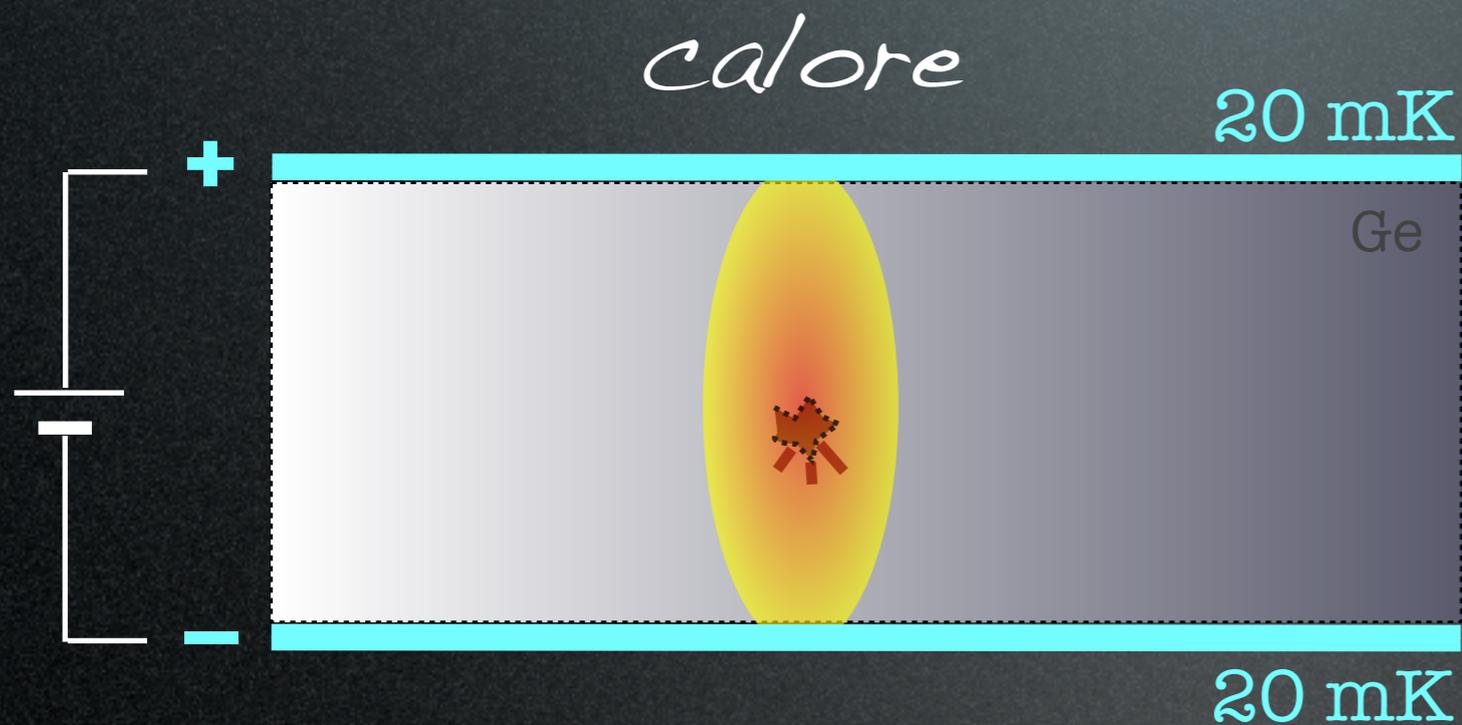


Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. Edelweiss:



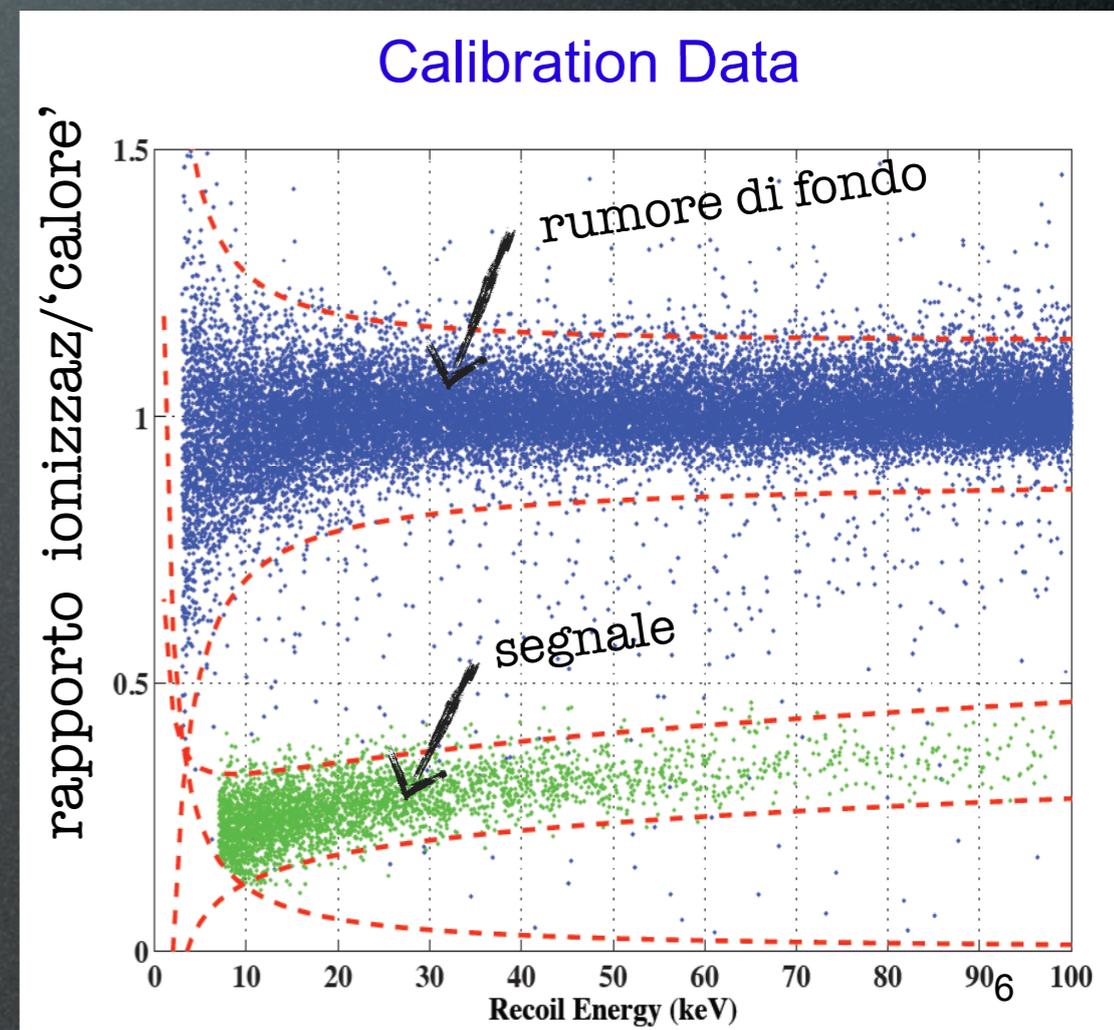
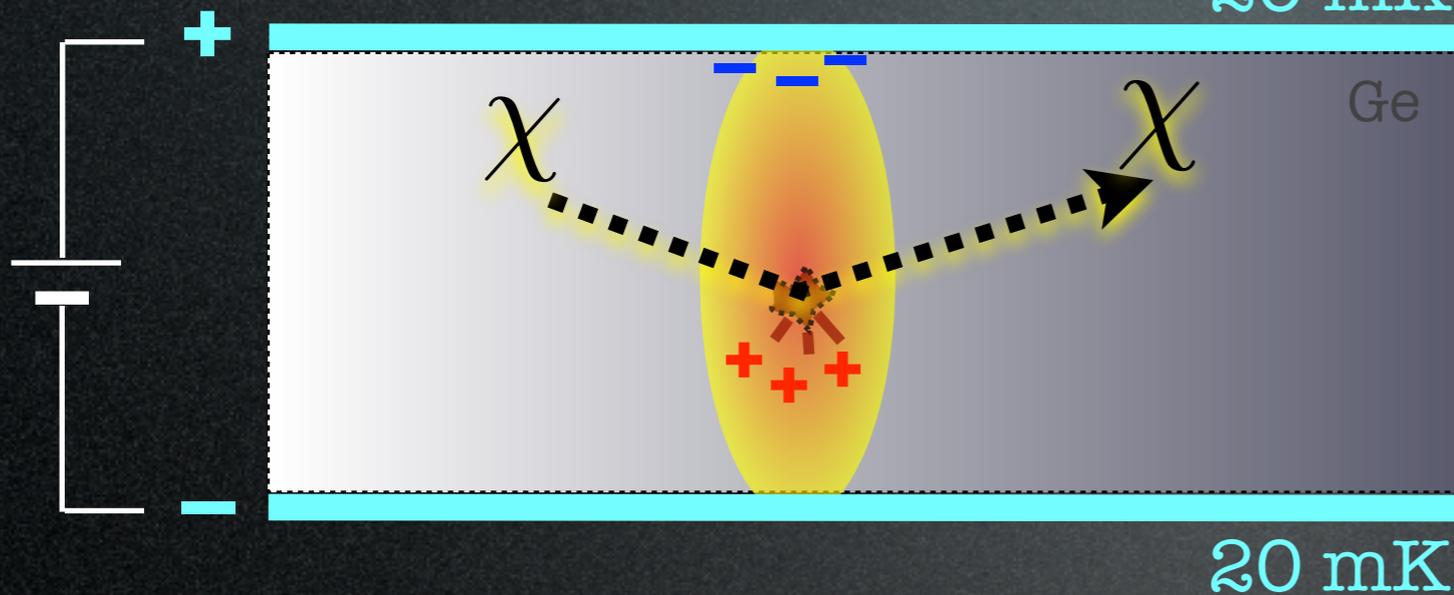
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll.

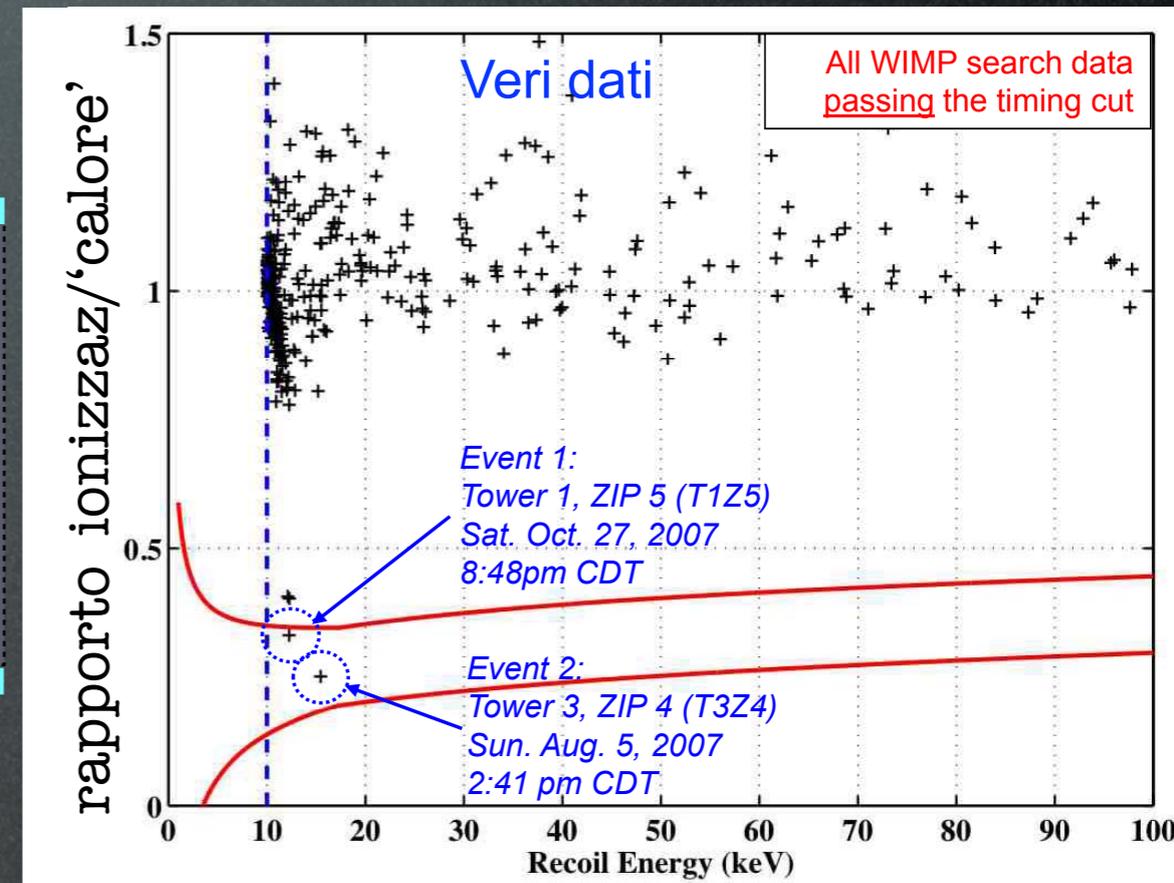
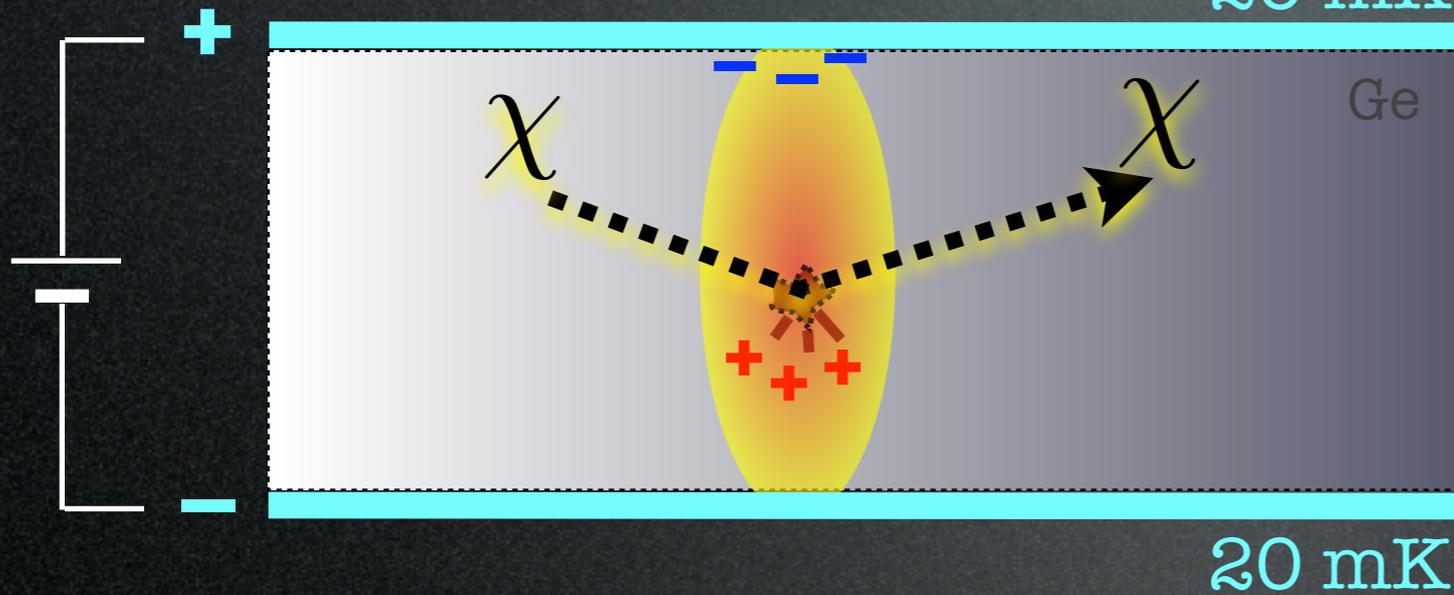
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

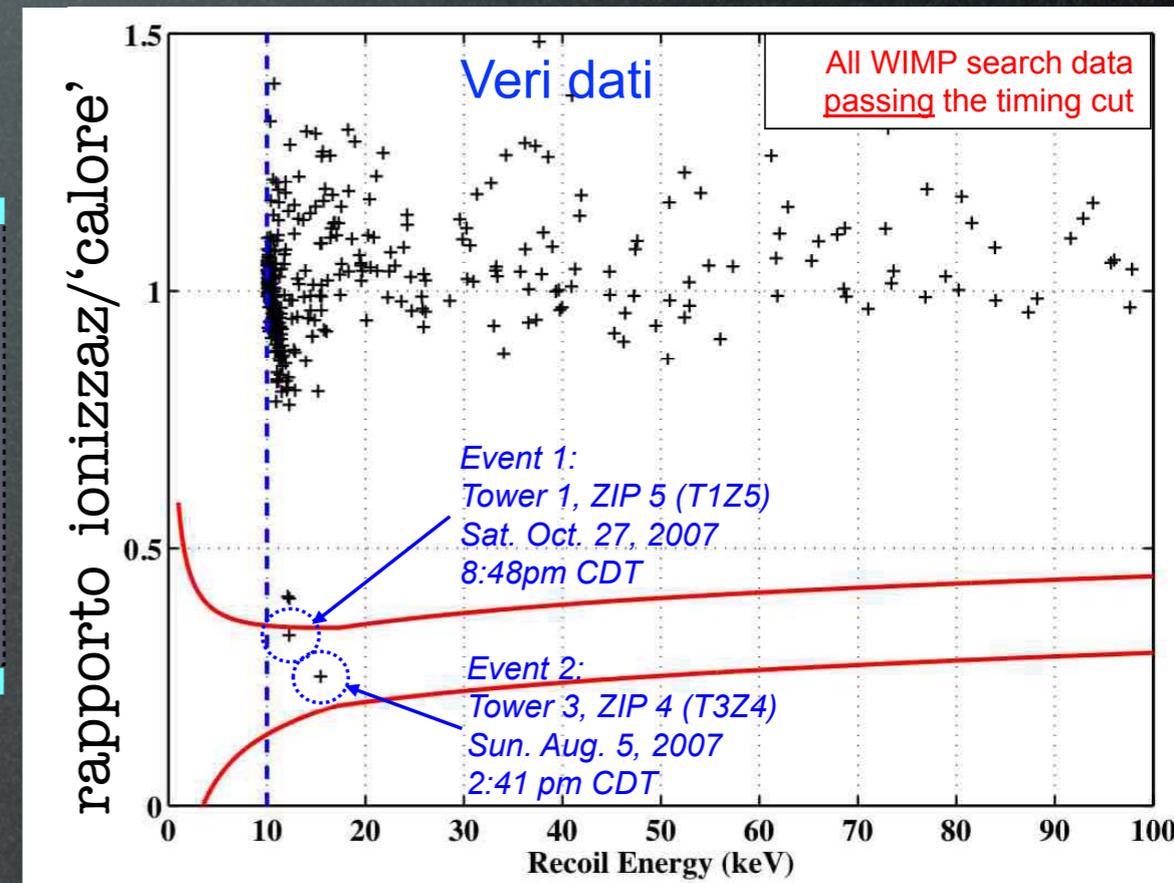
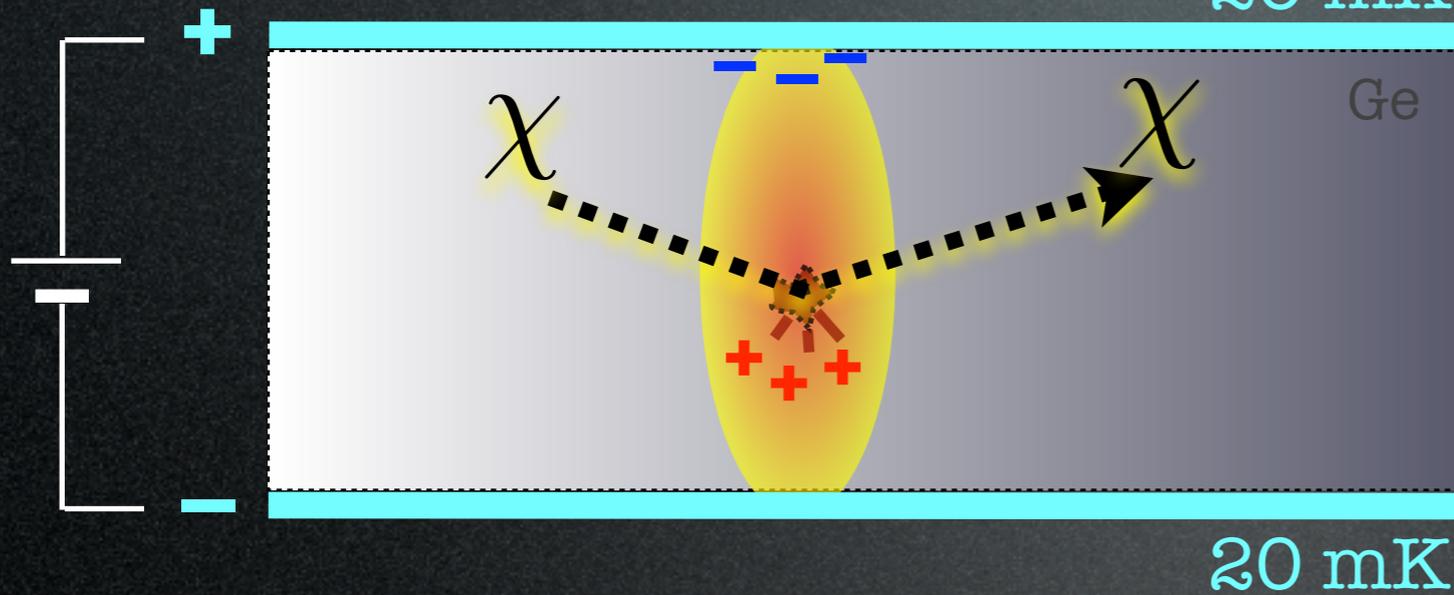
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 evento/kg/anno!

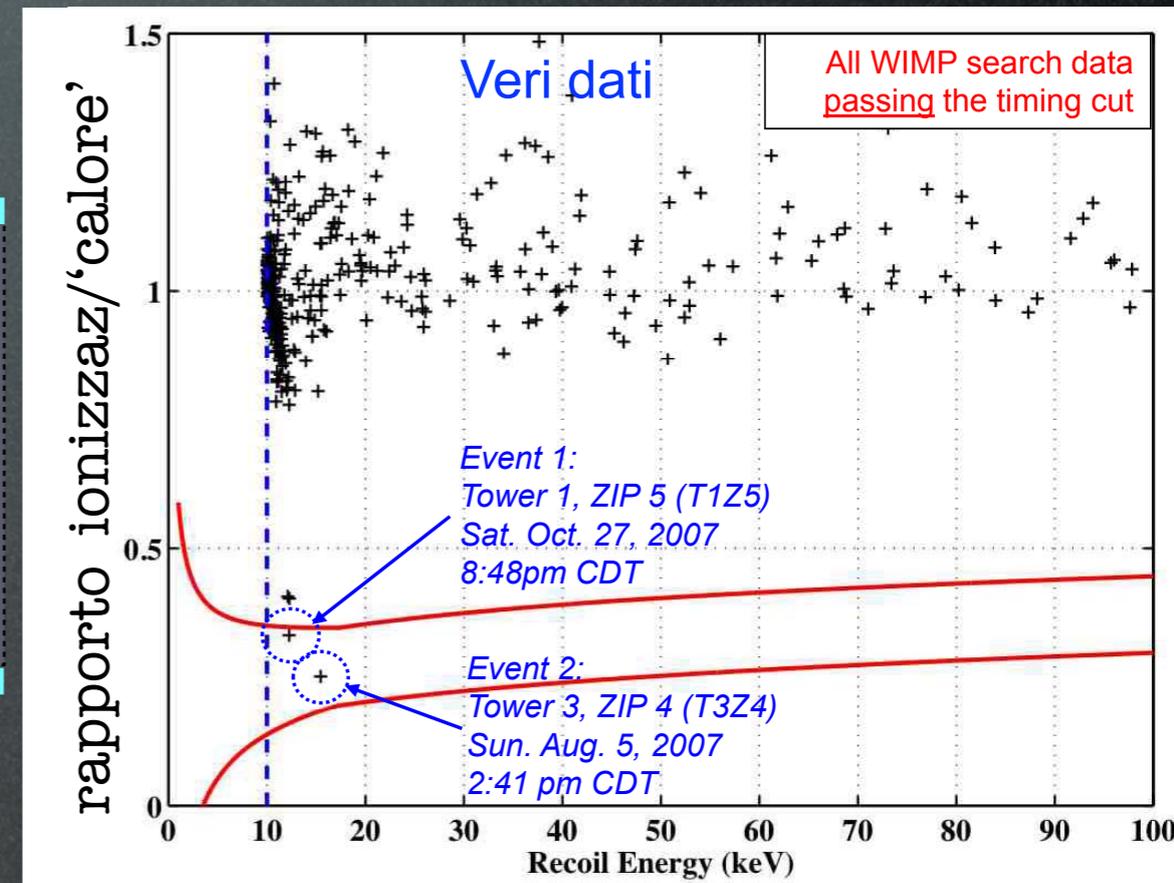
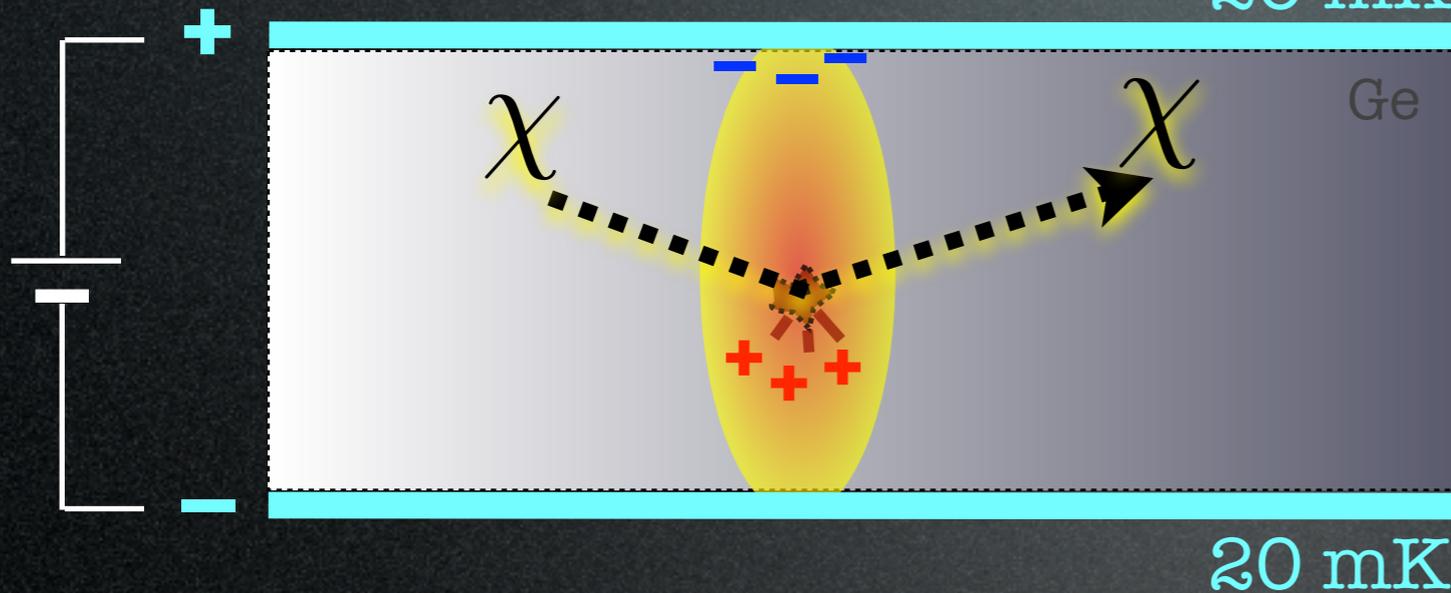
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 evento/kg/anno!

Nel corpo umano: 10^{10} evt/kg/anno

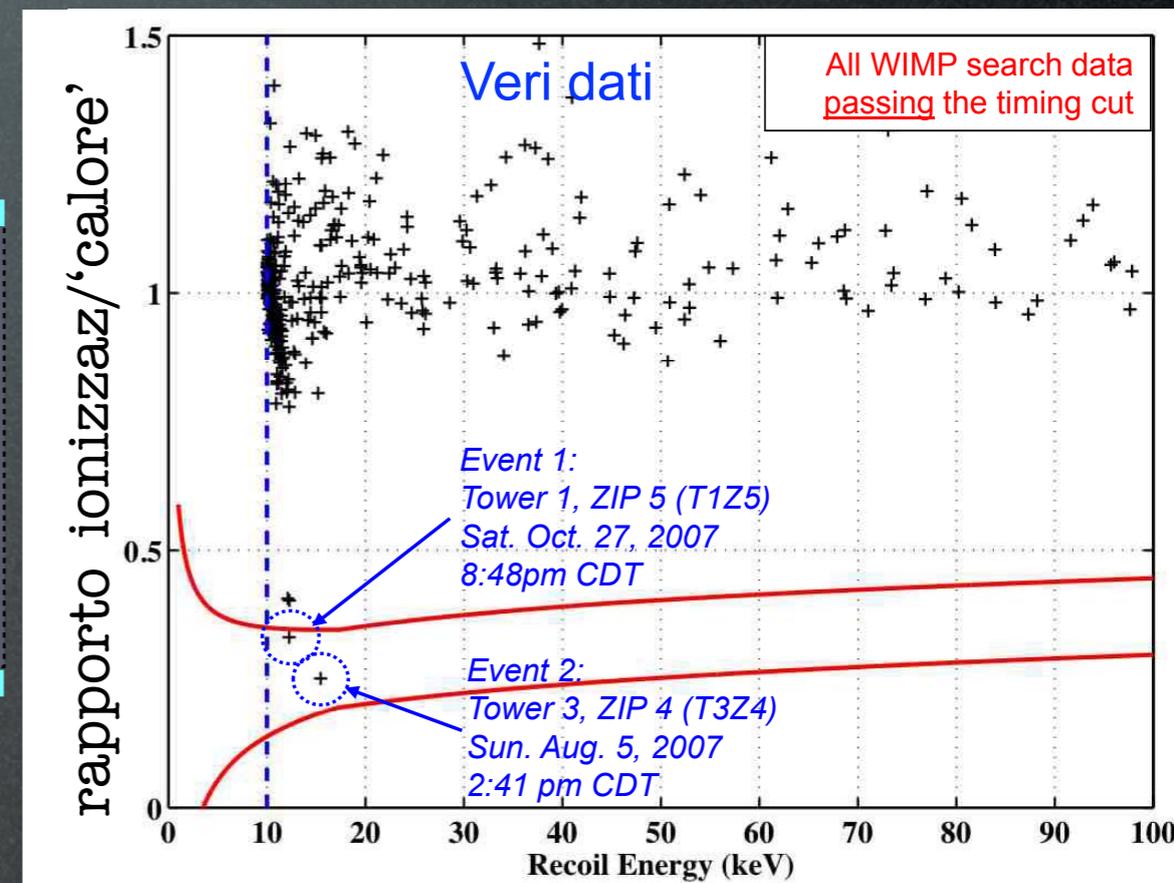
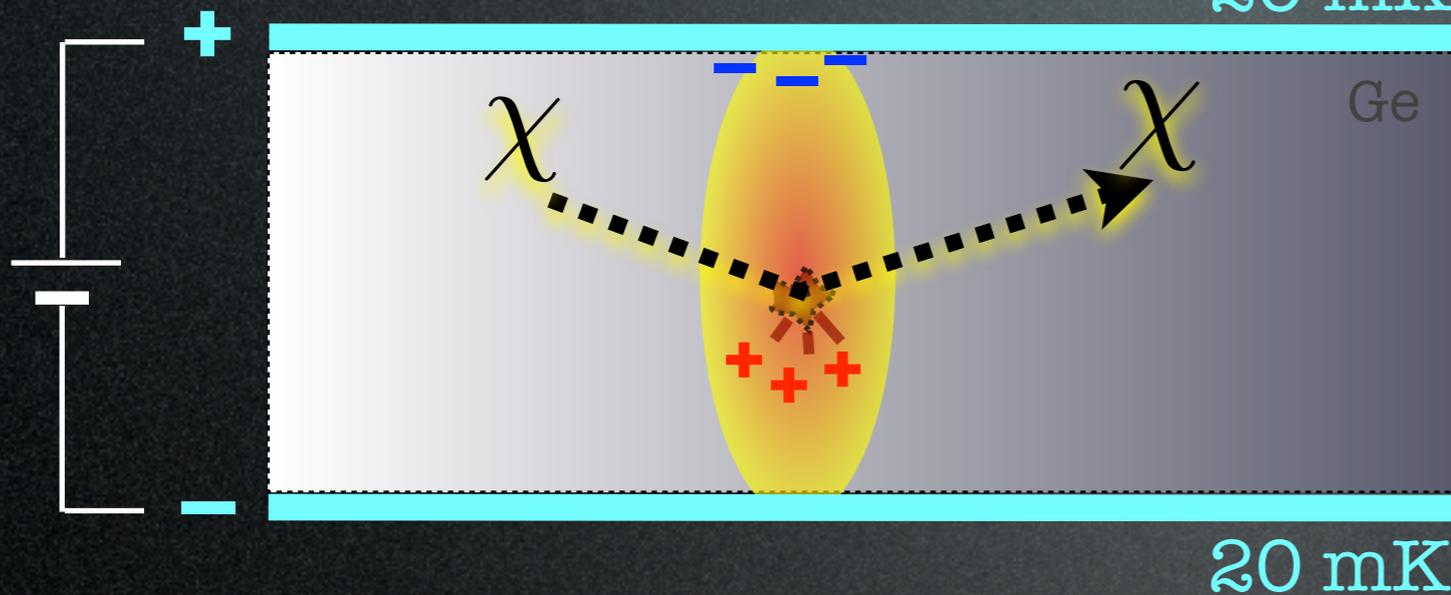
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 evento/kg/anno!

Nel corpo umano: 10^{10} evt/kg/anno

In un kilo di banane: 10^{12} evt/kg/anno

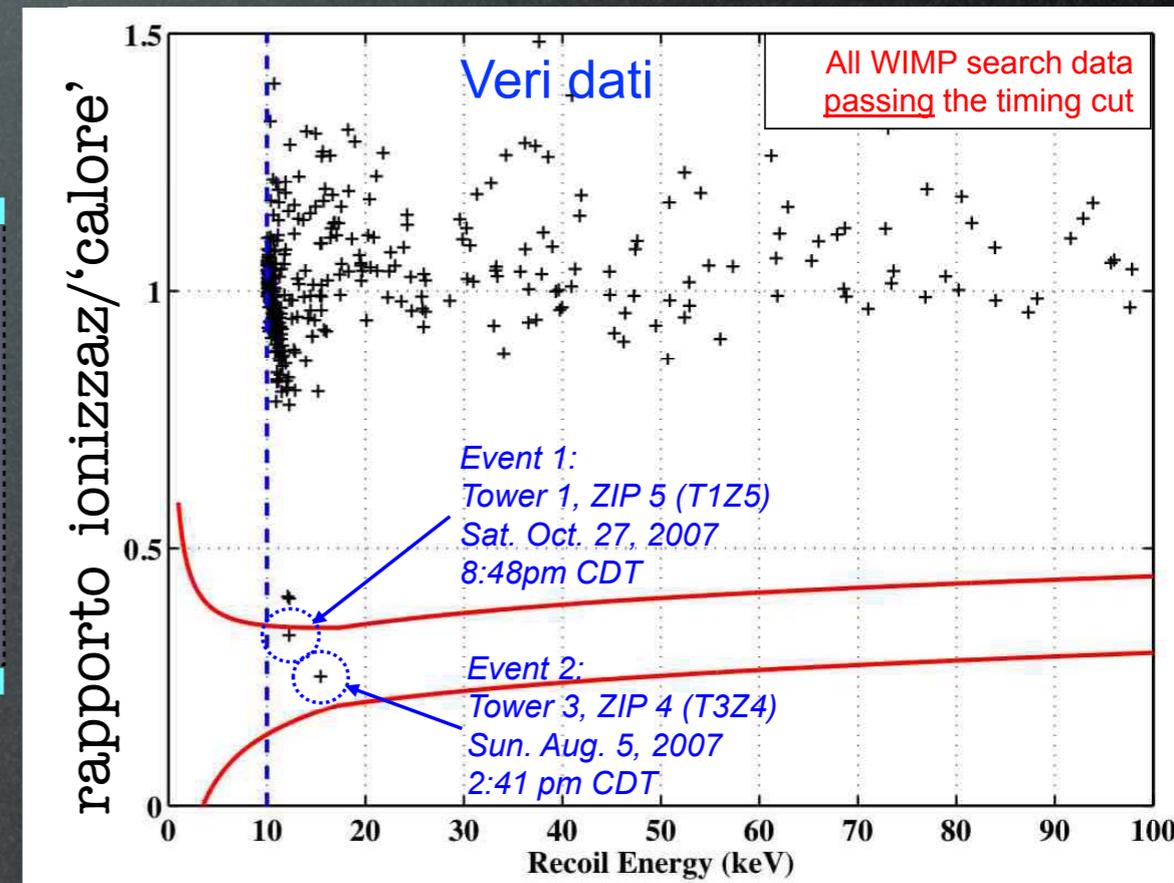
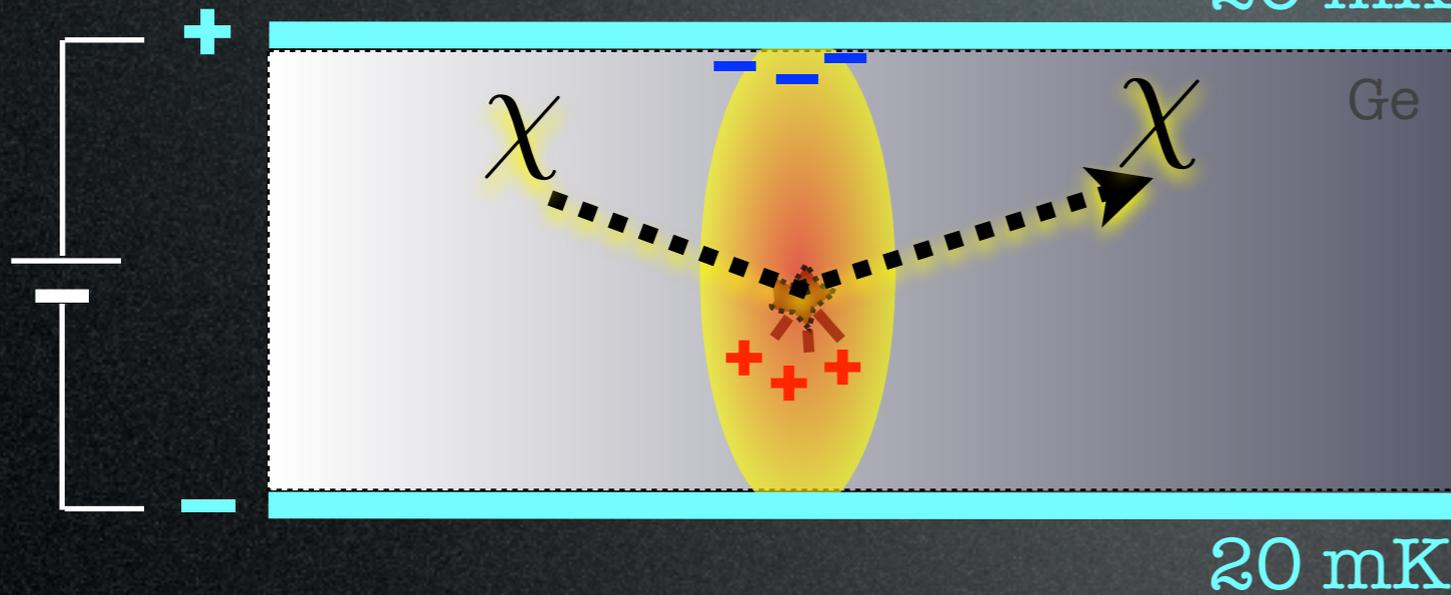
Rivelazione diretta

Strategia n.1: zittire l'Universo

misurare due quantità per distinguere il Segnale dal Fondo,
per ogni evento

E.g. **Edelweiss**:

ionizzazione & calore
20 mK



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 evento/kg/anno!

Nel corpo umano: 10^{10} evt/kg/anno

In un kilo di banane: 10^{12} evt/kg/anno

Edelweiss



10 miliardi di tonn



contro

Rivelazione diretta

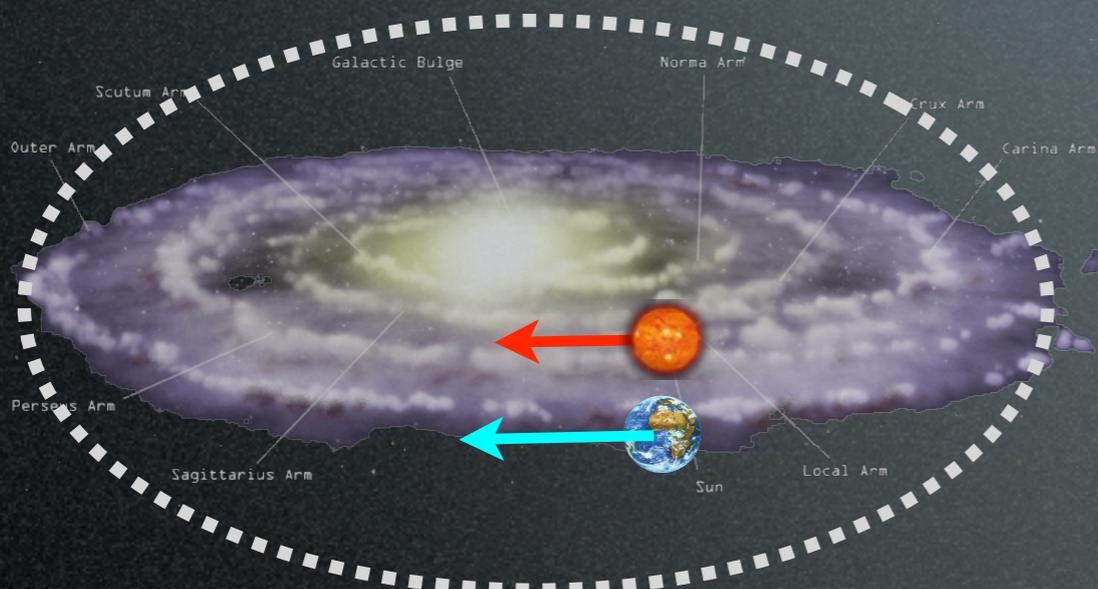
Strategia n.2: surfare sull'onda oscura

raccogliere tutti gli eventi,
e rivelare una modulazione annuale

Rivelazione diretta

Strategia n.2: surfare sull'onda oscura

raccogliere tutti gli eventi,
e rivelare una modulazione annuale

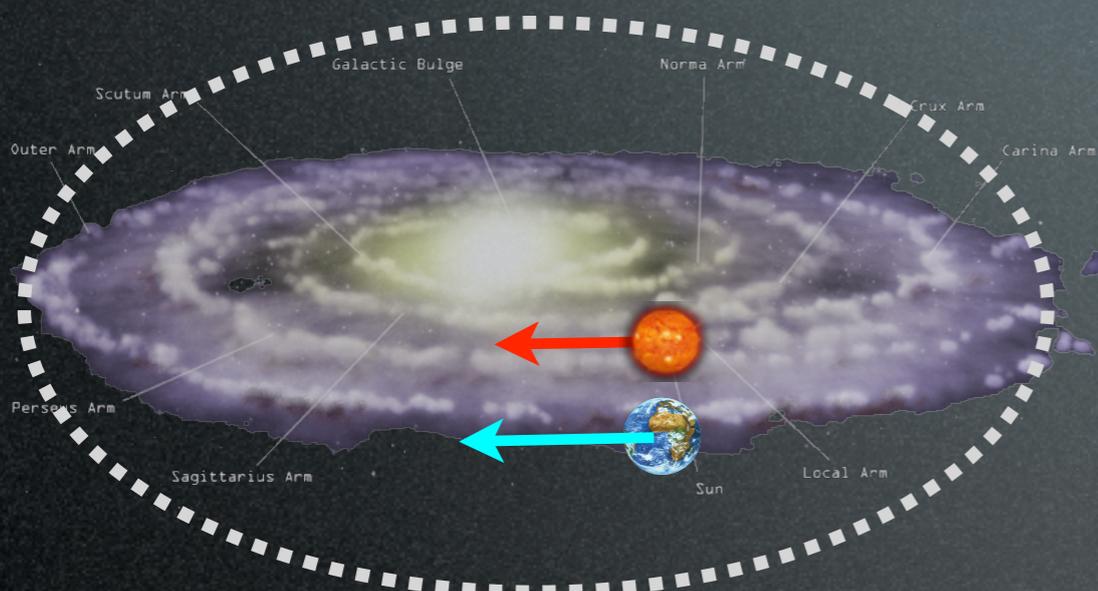


maggio/giugno

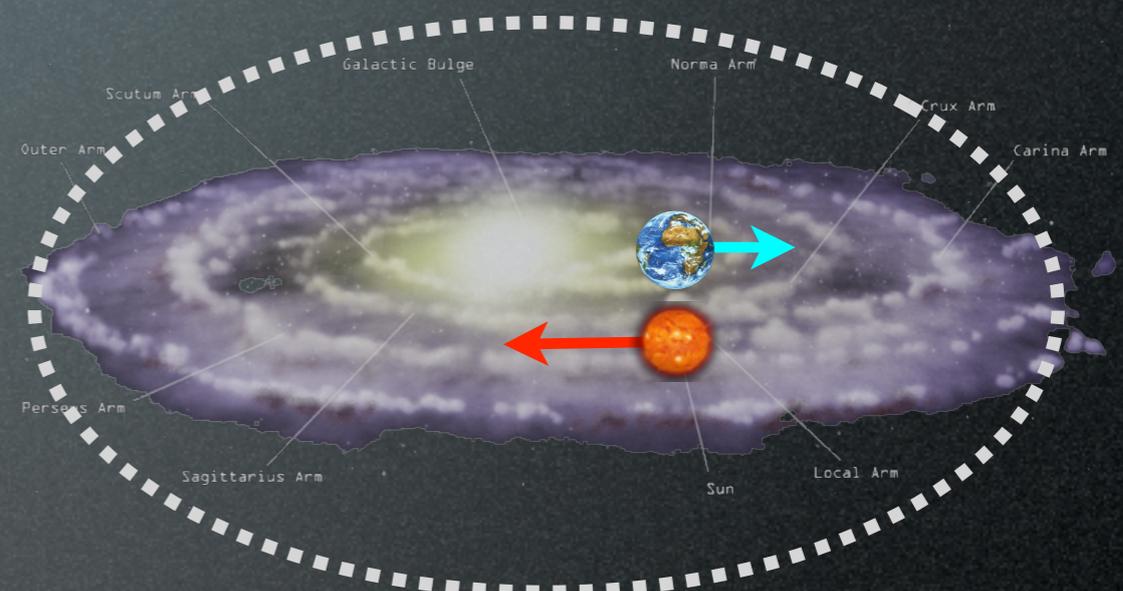
Rivelazione diretta

Strategia n.2: surfare sull'onda oscura

raccogliere tutti gli eventi,
e rivelare una modulazione annuale



maggio/giugno

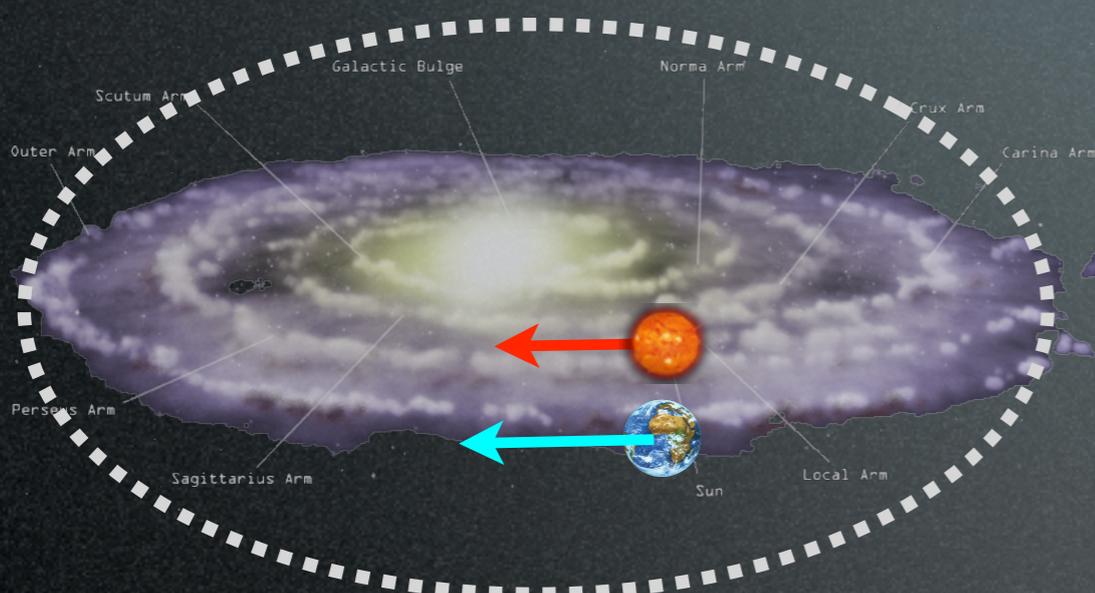


novembre/dicembre

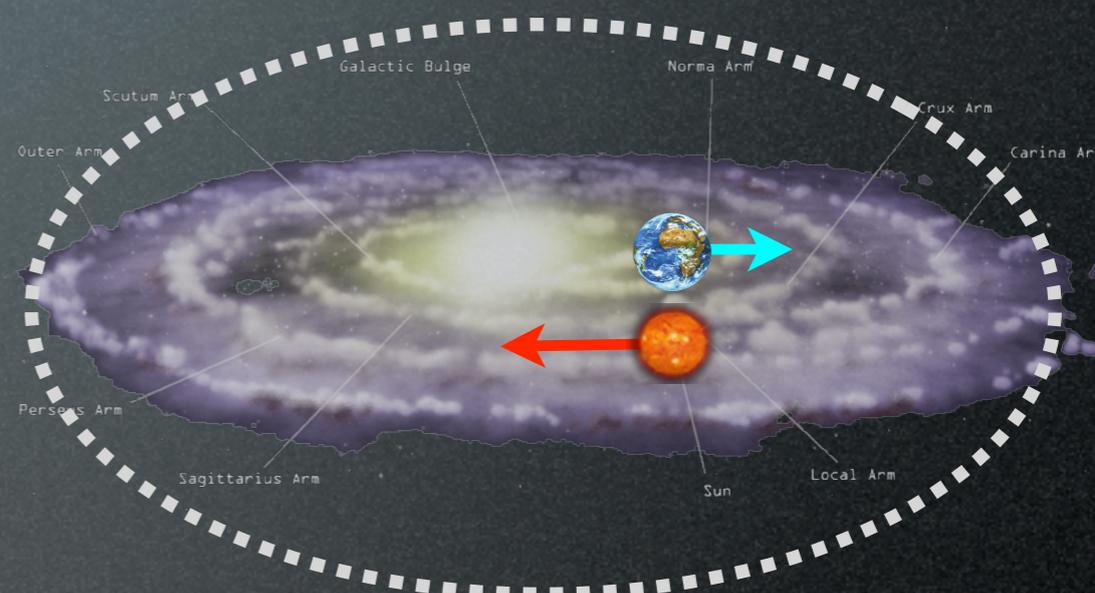
Rivelazione diretta

Strategia n.2: surfare sull'onda oscura

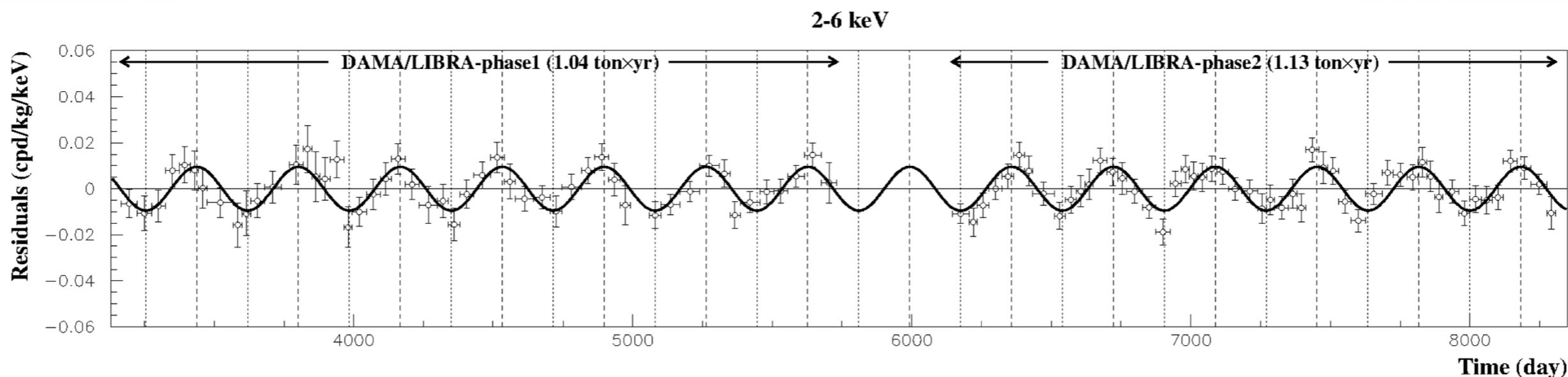
raccogliere tutti gli eventi,
e rivelare una modulazione annuale



maggio/giugno



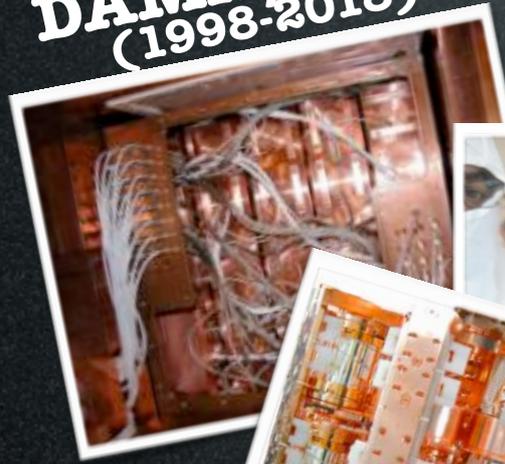
novembre/dicembre



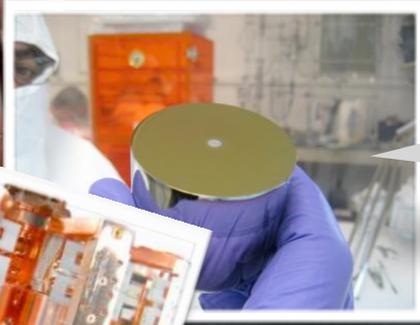
Rivelazione diretta: stato attuale

Rivelazione diretta: stato attuale

DAMA/Libra
(1998-2018)



CoGeNT
(2010-2011)



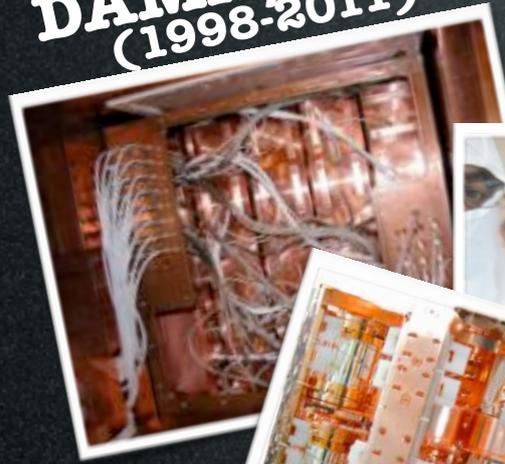
CRESST
(2011)

Sì! Sì!
Materia Oscura!

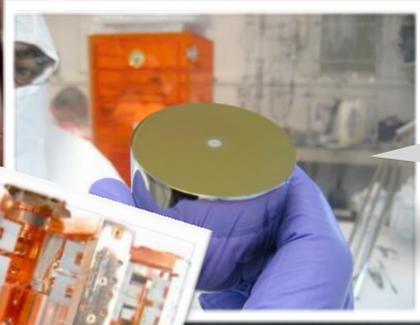
Eccesso di eventi e/o **modulazione** annuale.

Rivelazione diretta: stato attuale

DAMA/Libra
(1998-2011)



CoGeNT
(2010-2011)



CRESST
(2011)

Sì! Sì!
Materia Oscura!

Eccesso di eventi e/o **modulazione** annuale.

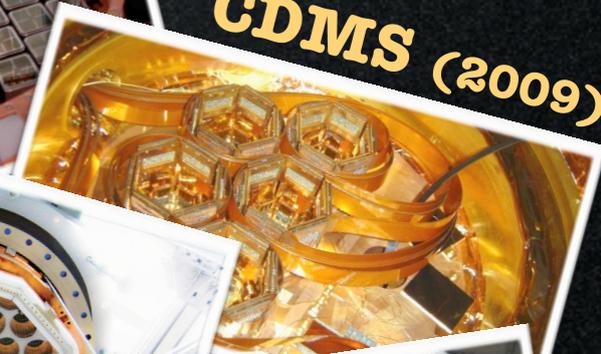
Manco
per niente.

Silenzio cosmico,
niente da segnalare.

XENON100
(2009-2011)



CDMS (2009)



LUX (2013)



XENON1ton
(2017)

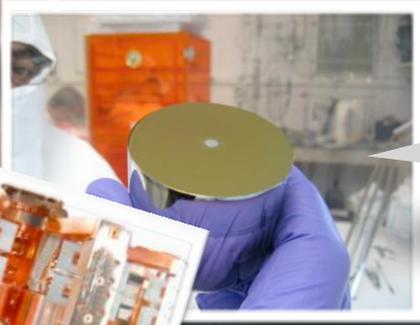


Rivelazione diretta: stato attuale

DAMA/Libra
(1998-2011)



CoGeNT
(2010-2011)



CRESST
(2011)

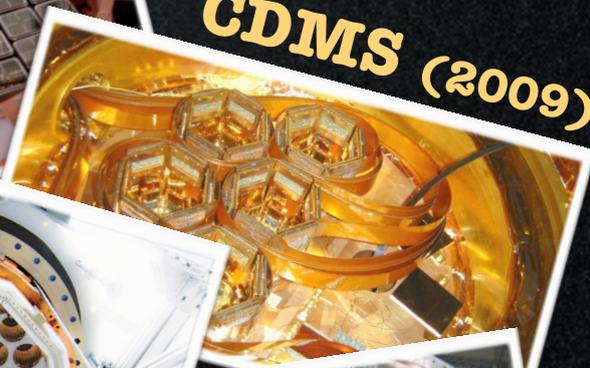
Sì! Sì!
Materia Oscura!
Eccesso di eventi e/o modulazione annuale.

Manco
per niente.
Silenzio cosmico,
niente da segnalare.

XENON100
(2009-2011)



CDMS (2009)



LUX (2017)



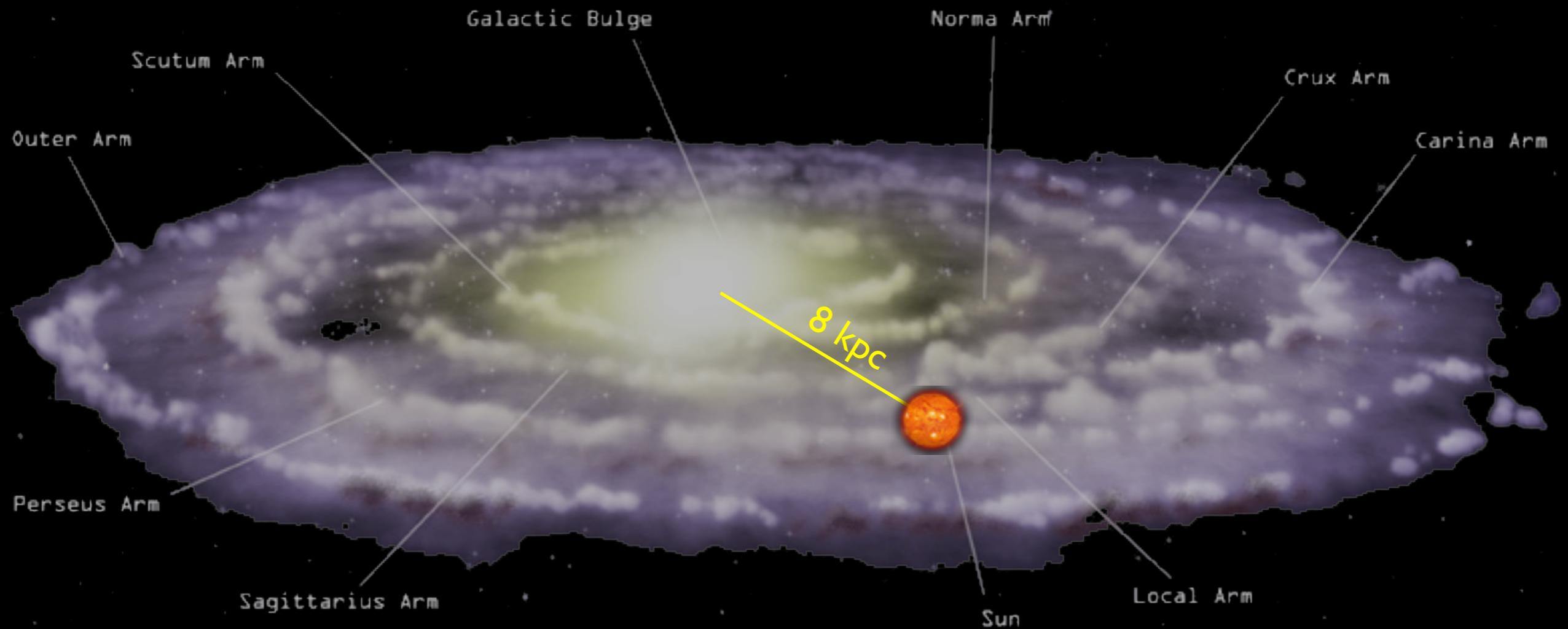
XENON1ton
(2017)



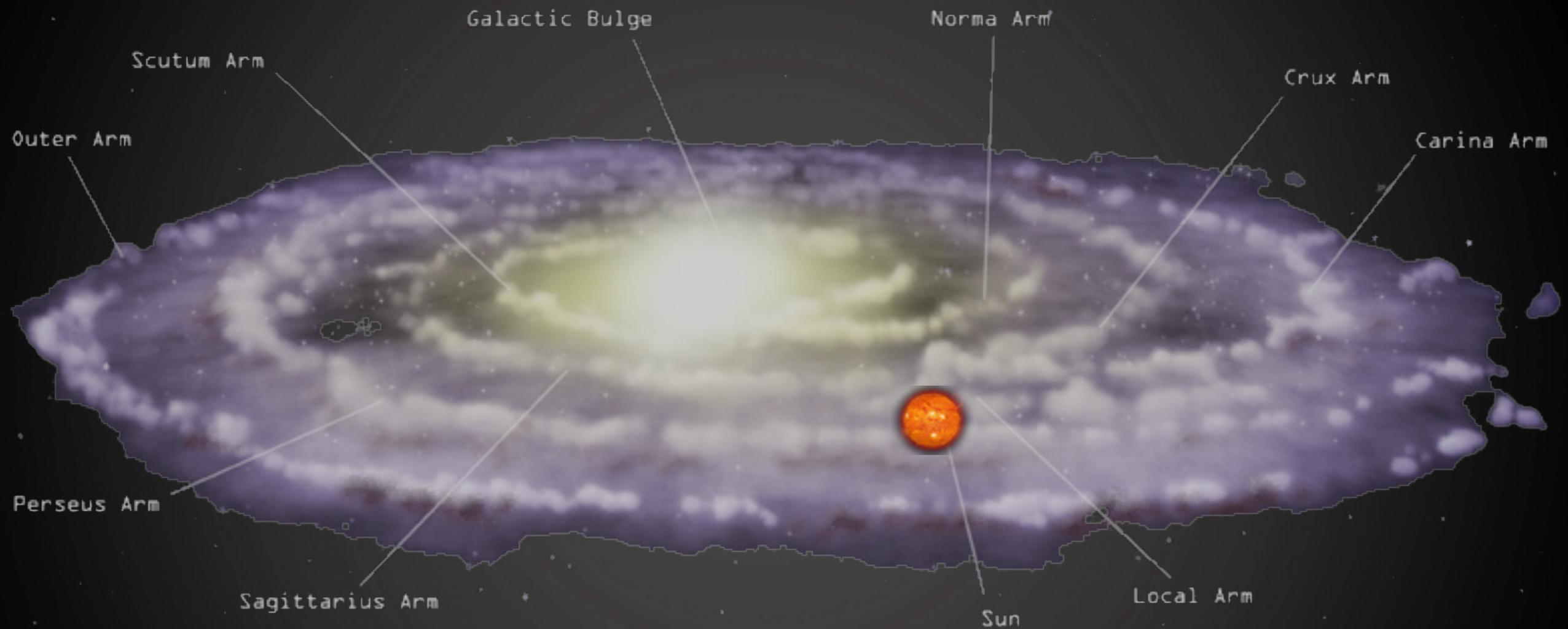
Il teorico medio

Rivelazione indiretta

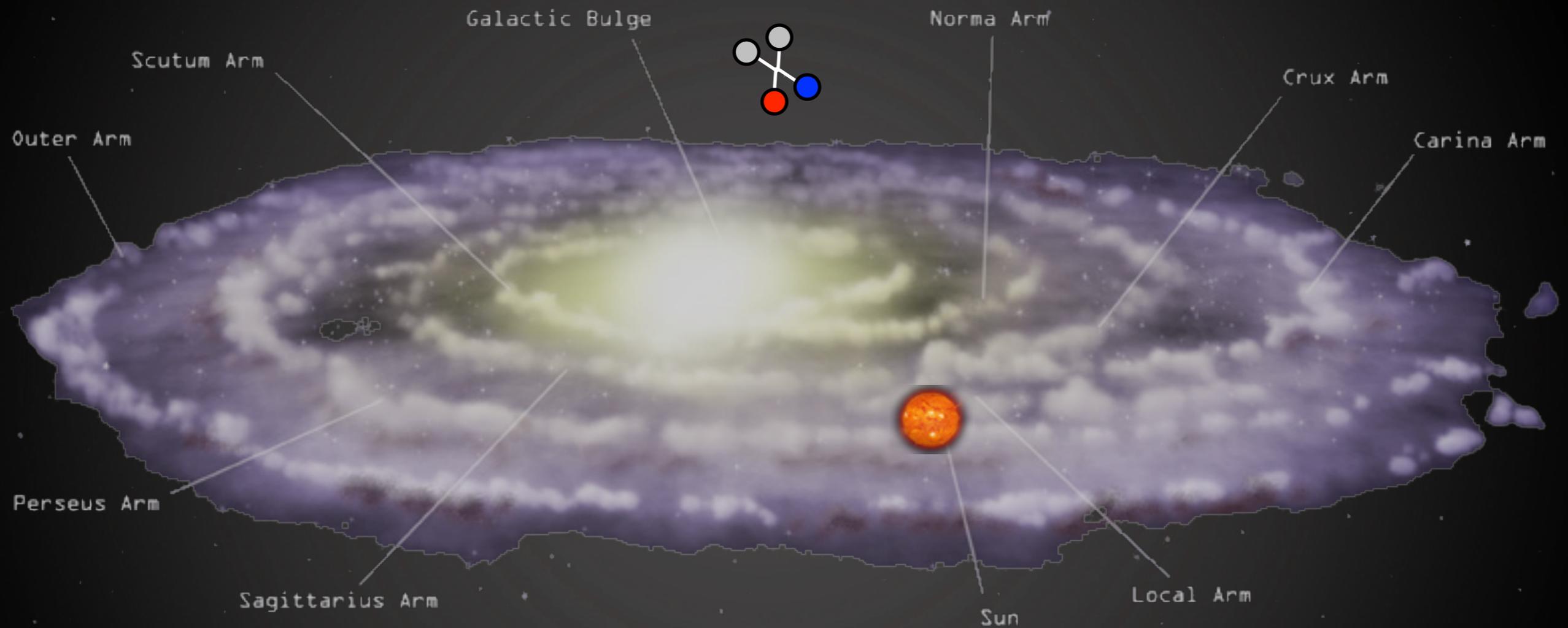
Rivelazione indiretta



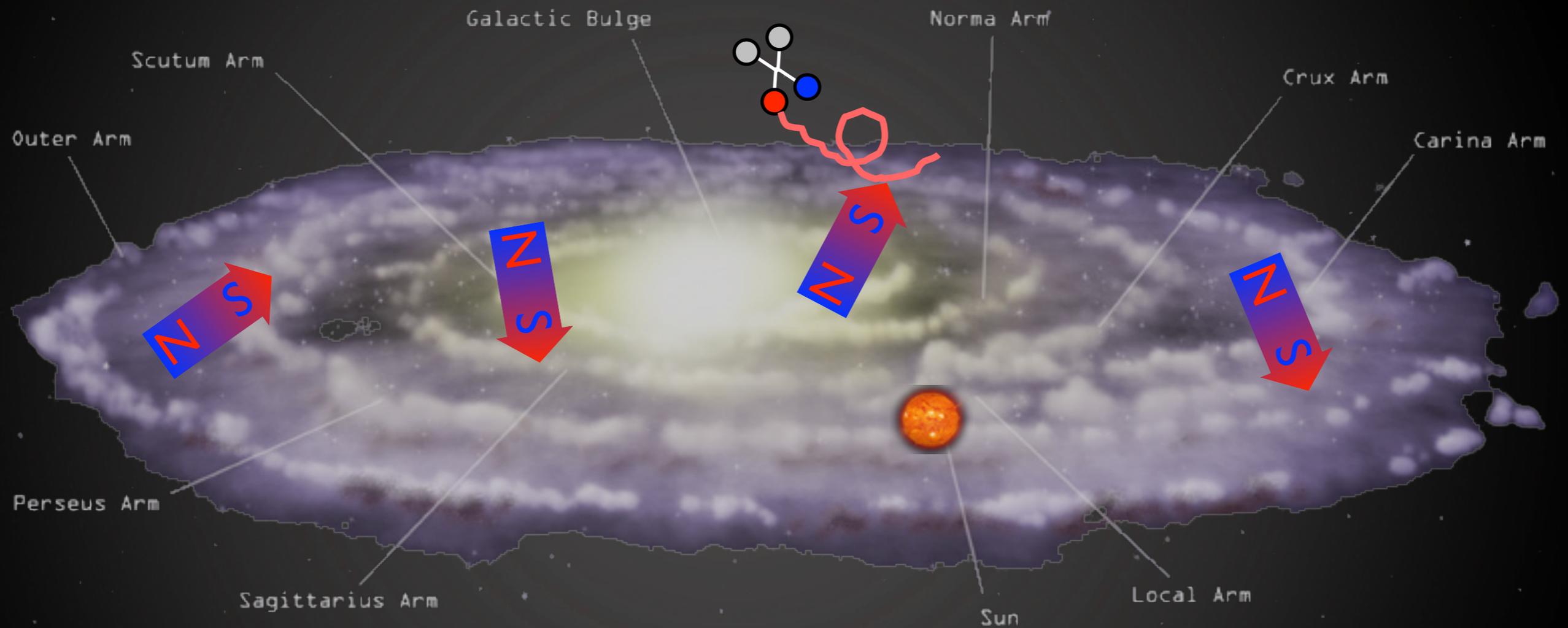
Rivelazione indiretta



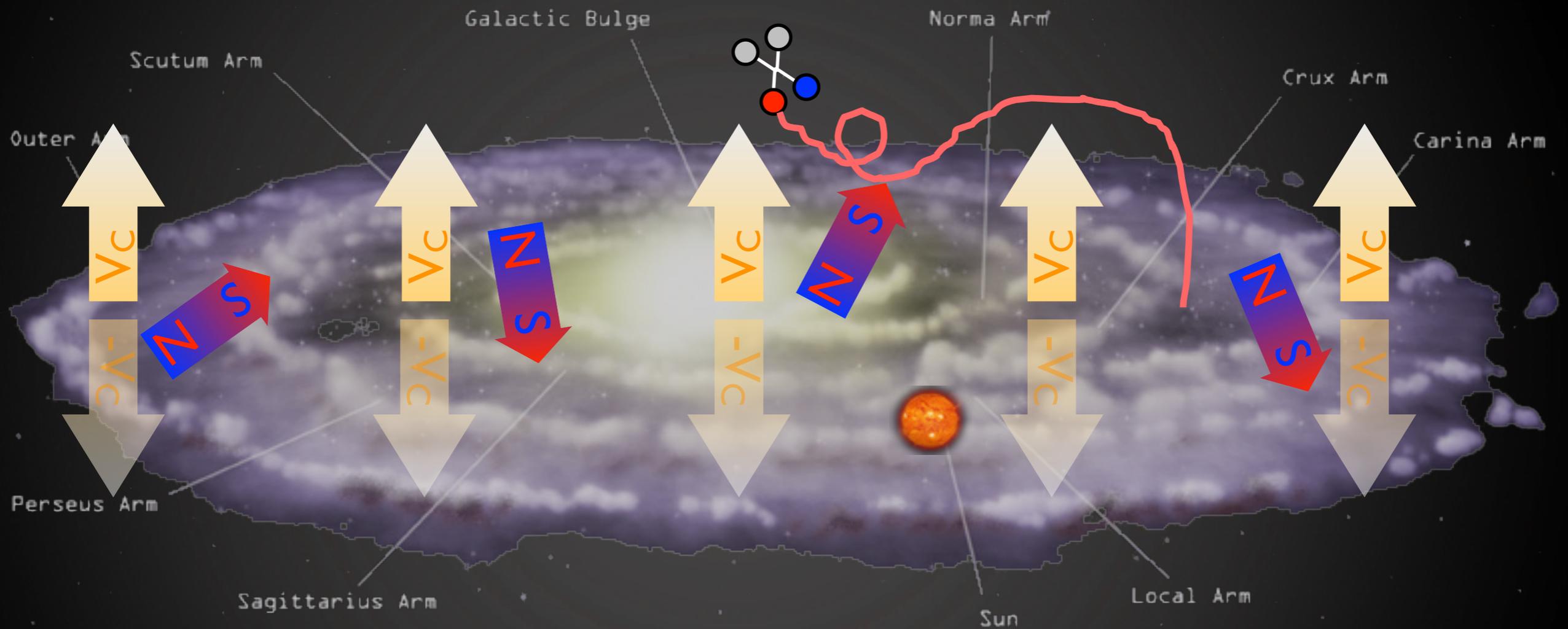
Rivelazione indiretta



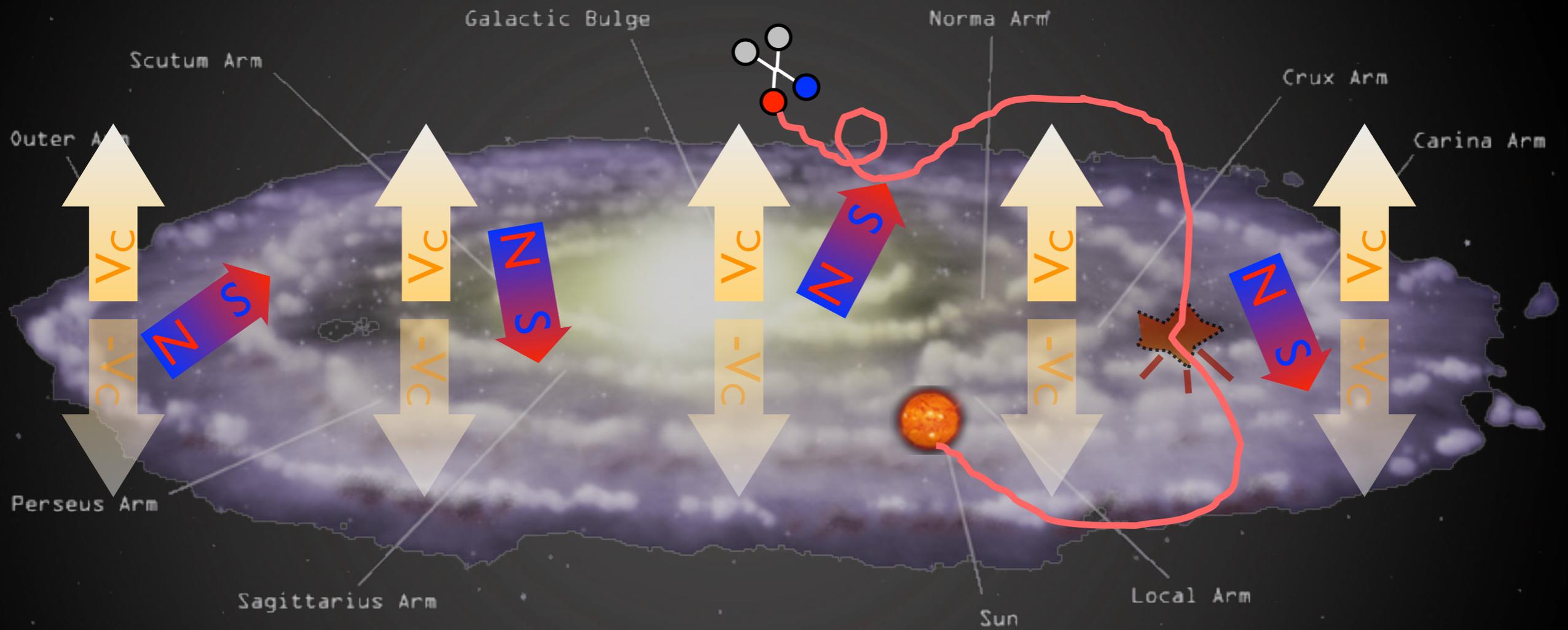
Rivelazione indiretta



Rivelazione indiretta

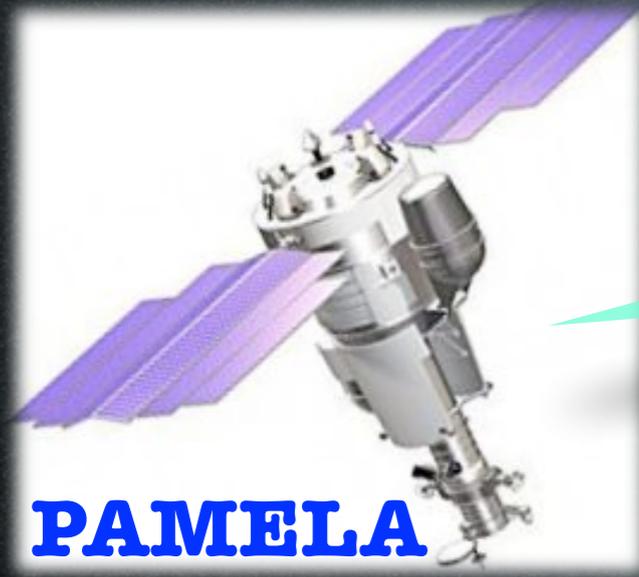


Rivelazione indiretta



Rivelazione indiretta: stato attuale

Rivelazione indiretta: stato attuale

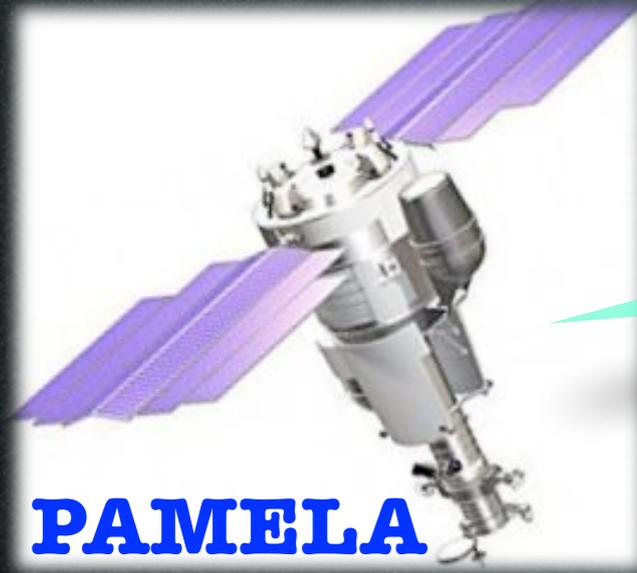


Sì! Materia Oscura!

Eccesso di **positroni**

2008

Rivelazione indiretta: stato attuale



Sì! Materia Oscura!

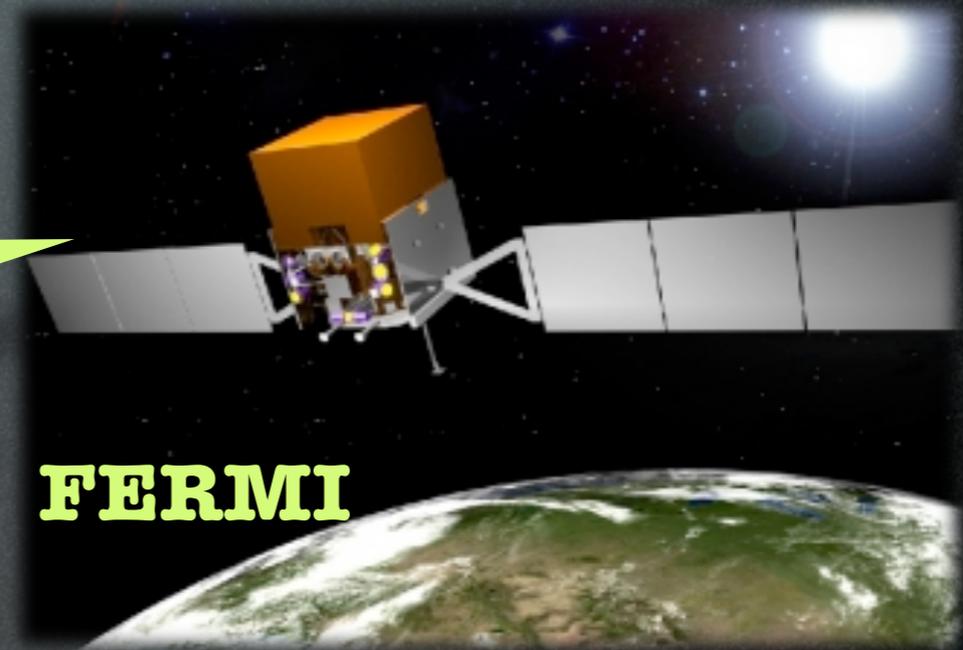
Eccesso di **positroni**

2008

Materia Oscura!

Ma non la stessa:
c'è anche un eccesso di **raggi gamma**.

2009-2016



Rivelazione indiretta: stato attuale



Sì! Materia Oscura!

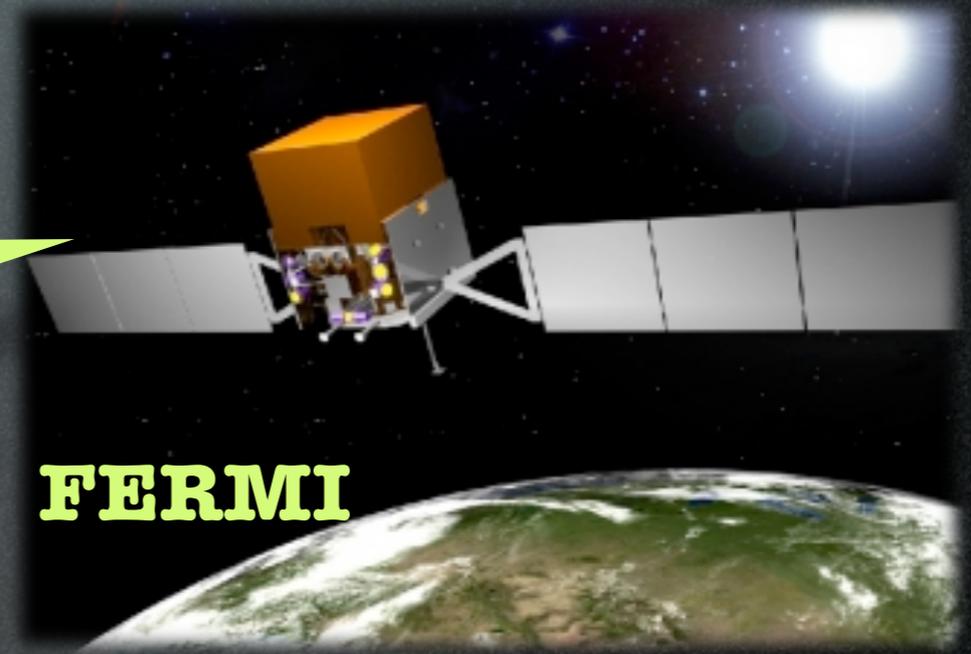
Eccesso di **positroni**

2008

Materia Oscura!

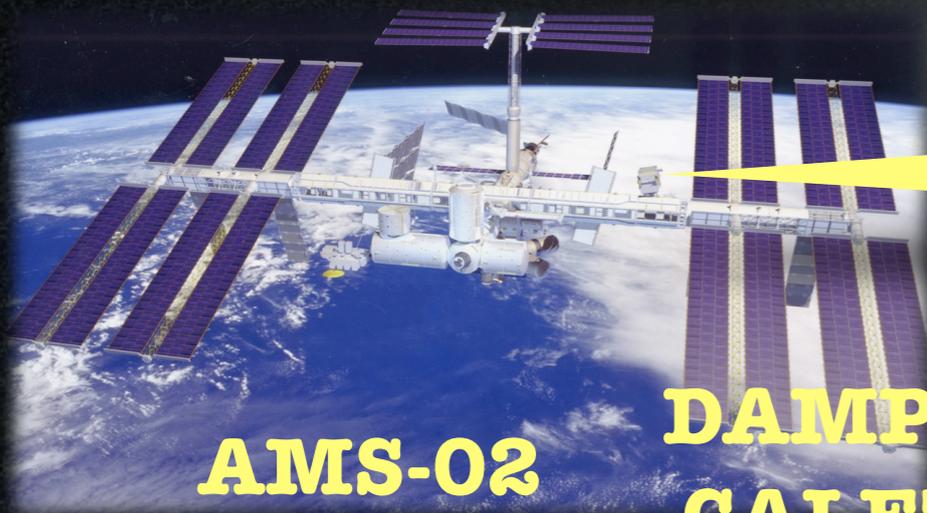
Ma non la stessa:
c'è anche un eccesso di **raggi gamma**.

2009-2016



Andiamo a vedere...

2011-2018...



DAMPE
CALET

Rivelazione indiretta: stato attuale



Sì! Materia Oscura!

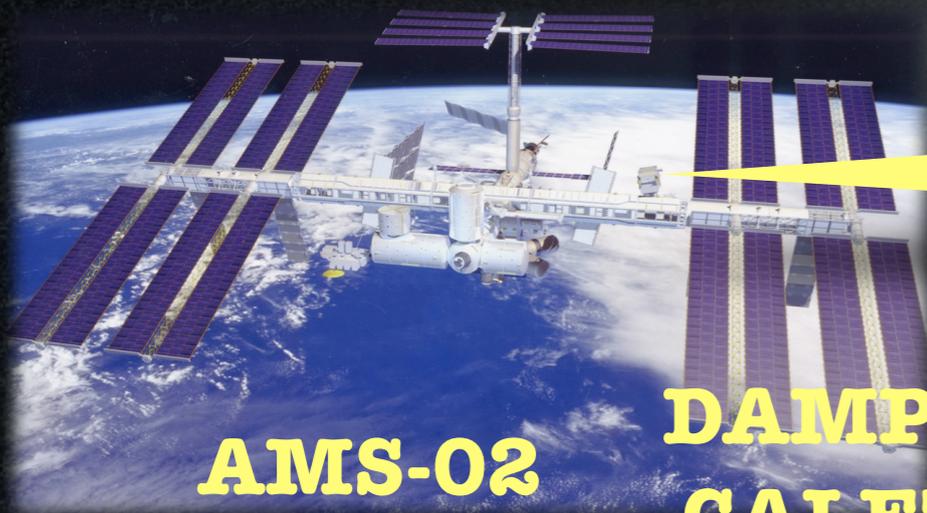
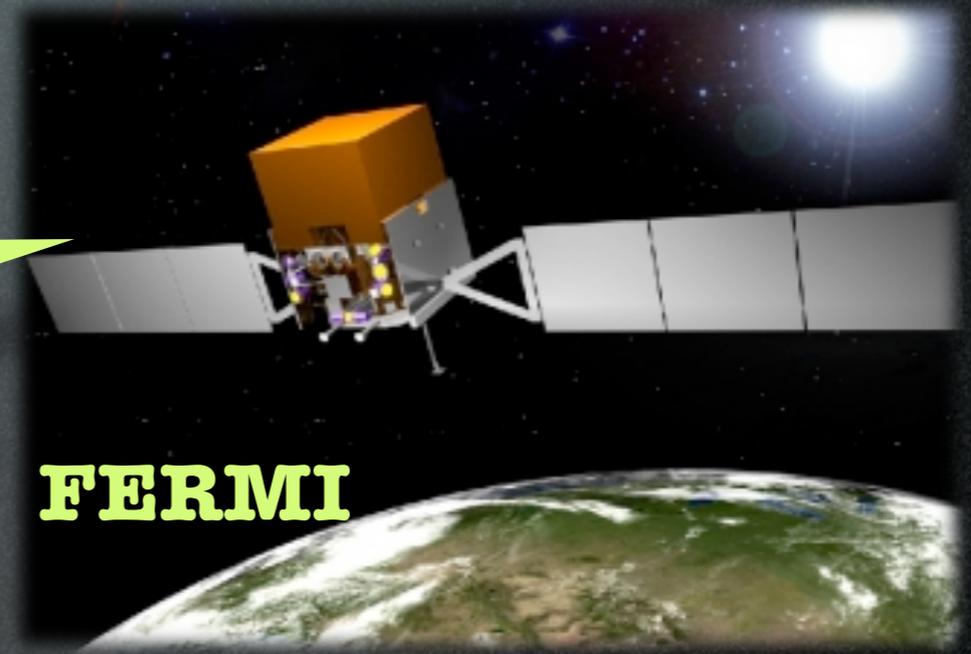
Eccesso di **positroni**

2008

Materia Oscura!

Ma non la stessa:
c'è anche un eccesso di **raggi gamma**.

2009-2016



DAMPE
CALET

2011-2018...

Andiamo a vedere...

Il teorico medio



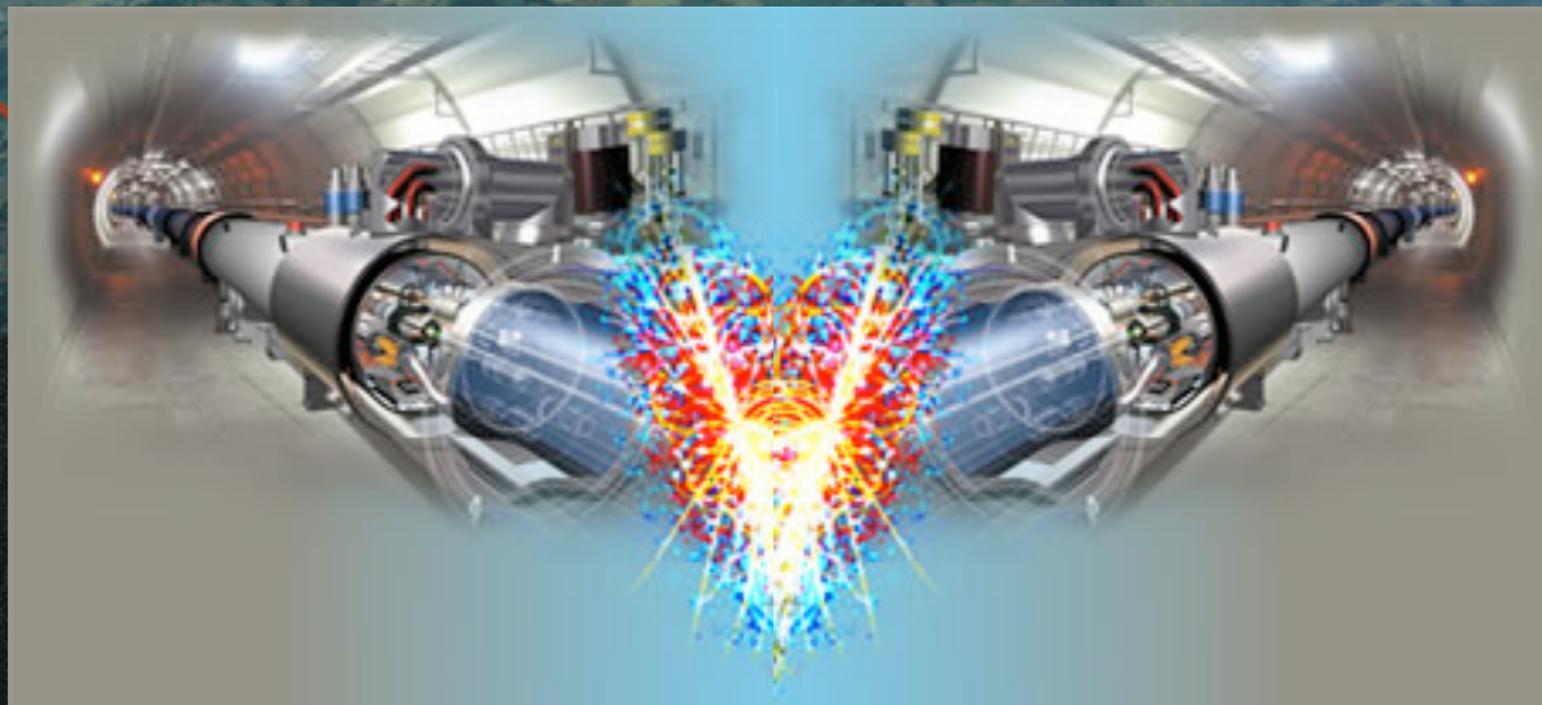
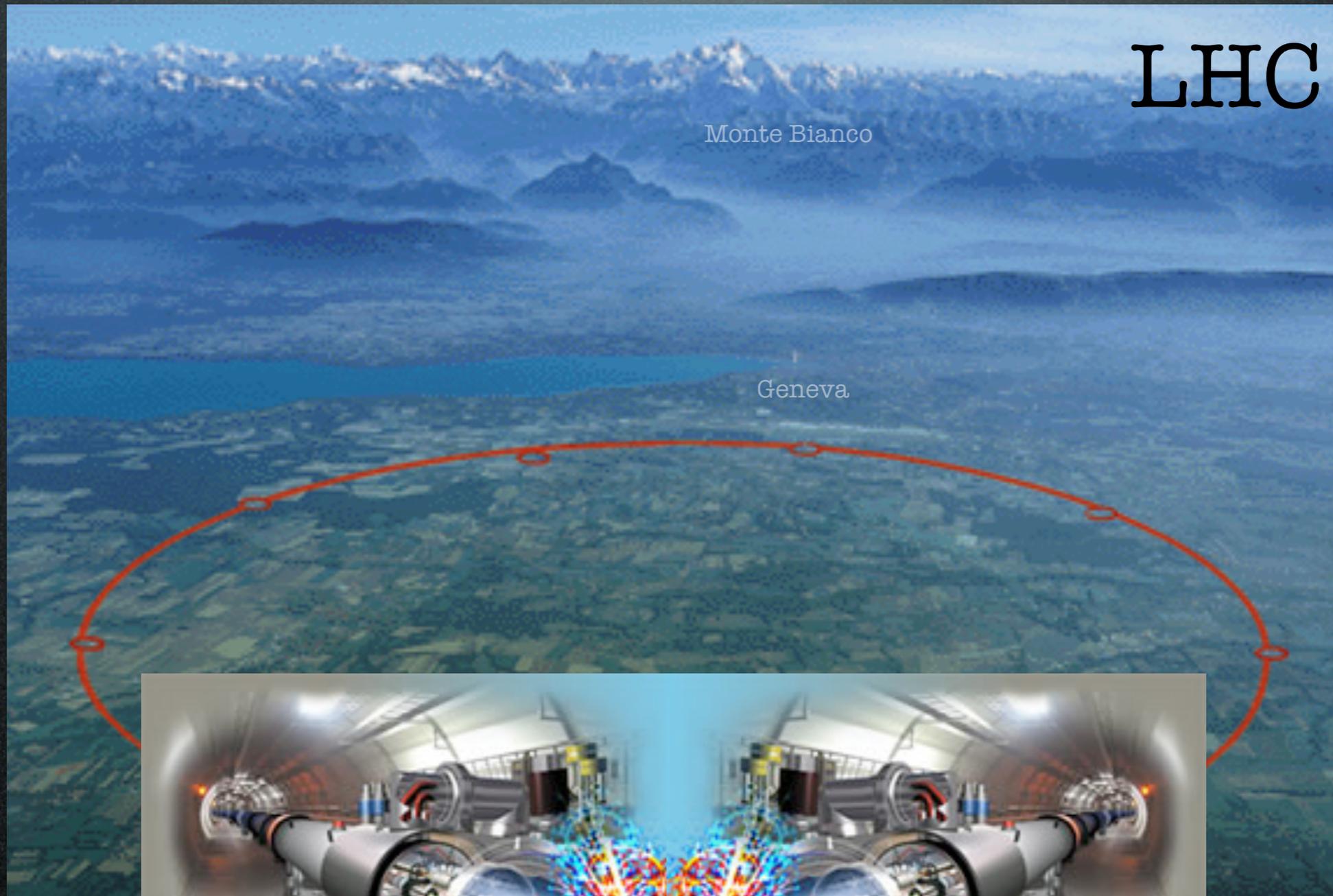
Produzione agli acceleratori

Produzione agli acceleratori

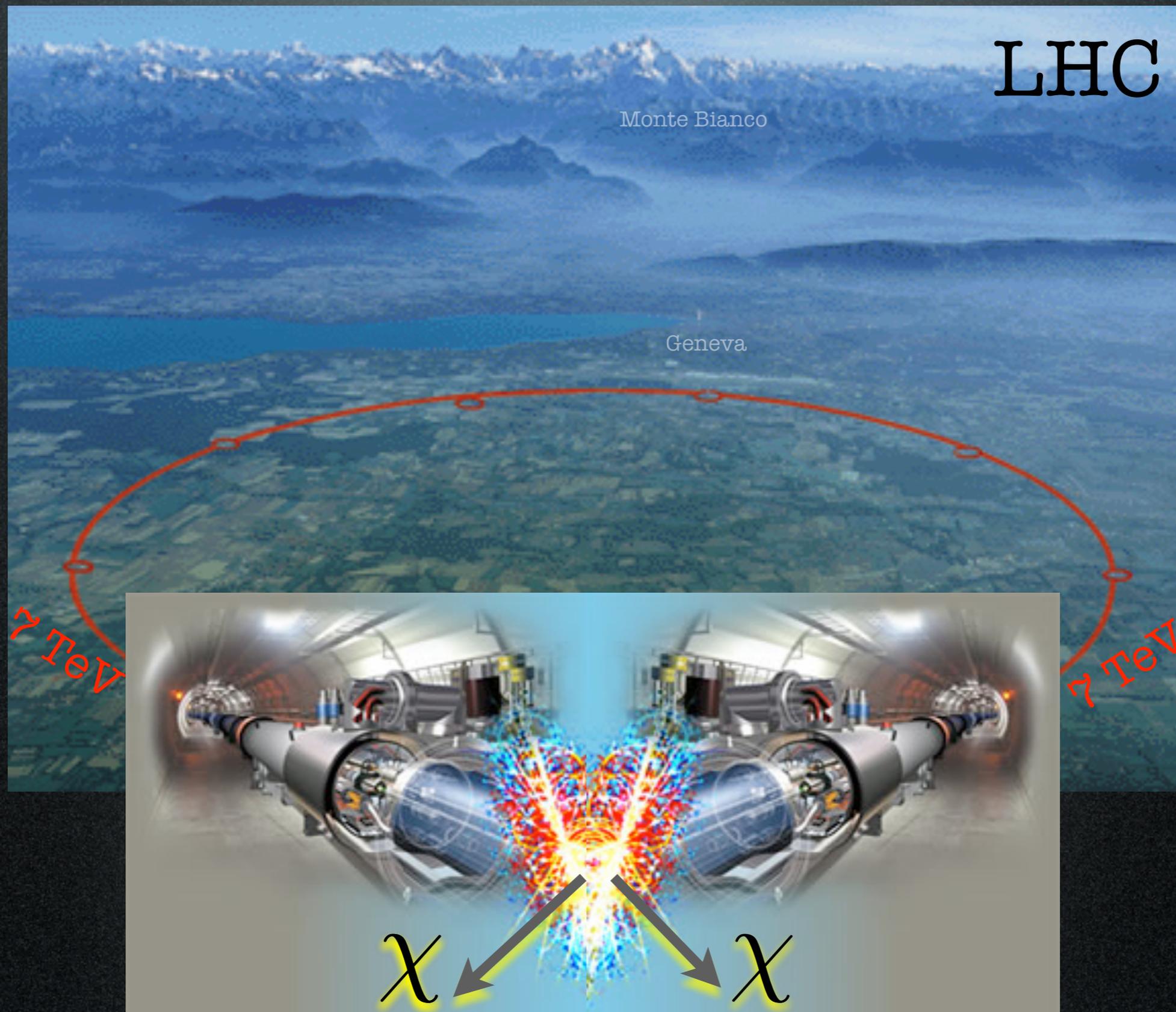


Special guest star:
Fabio Cirelli

Produzione agli acceleratori

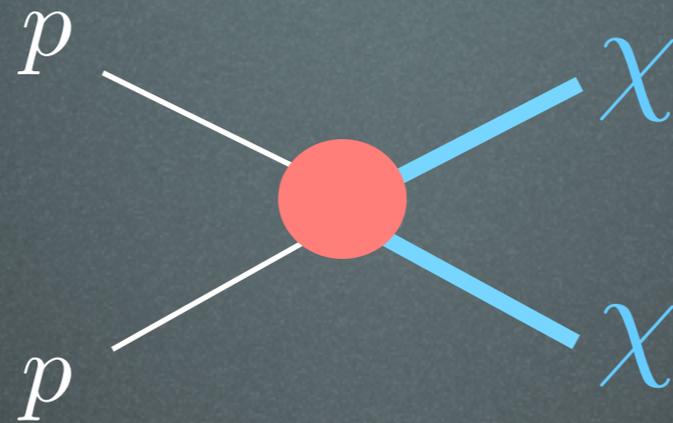


Produzione agli acceleratori



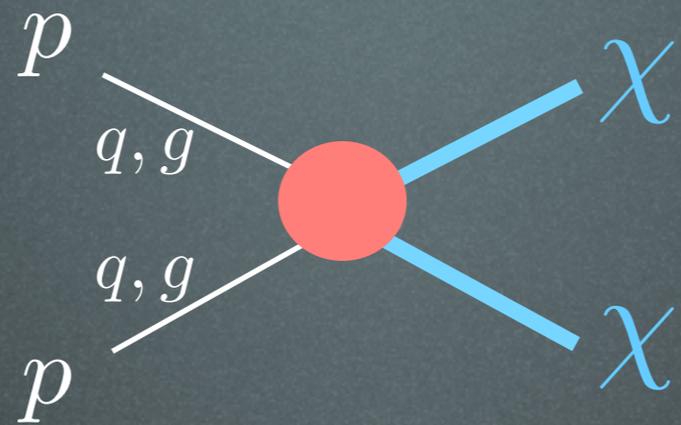
Produzione agli acceleratori

All'LHC:



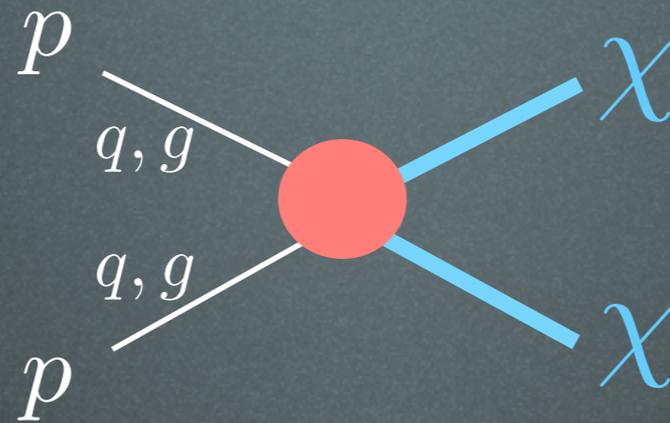
Produzione agli acceleratori

All'LHC:



Produzione agli acceleratori

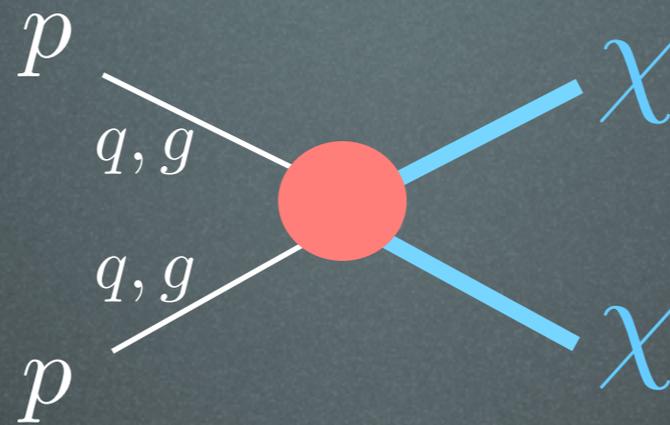
All'LHC:



Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

Produzione agli acceleratori

All'LHC:

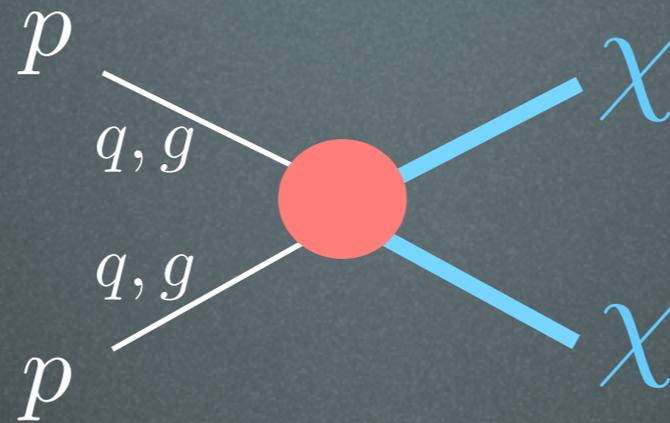


Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

La prova è: **energia mancante**

Produzione agli acceleratori

All'LHC:

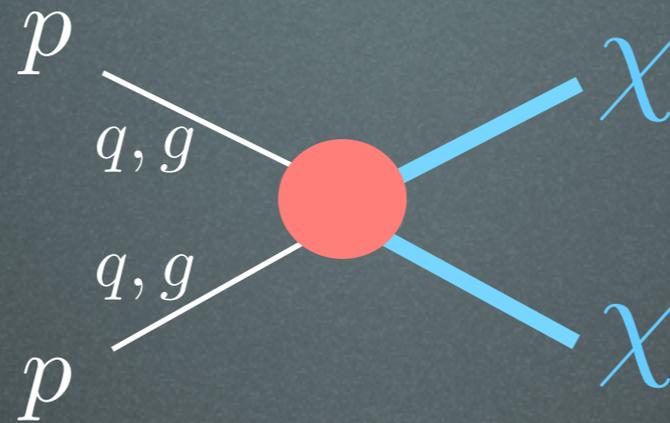


Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

La prova è: **energia mancante**
trasversale

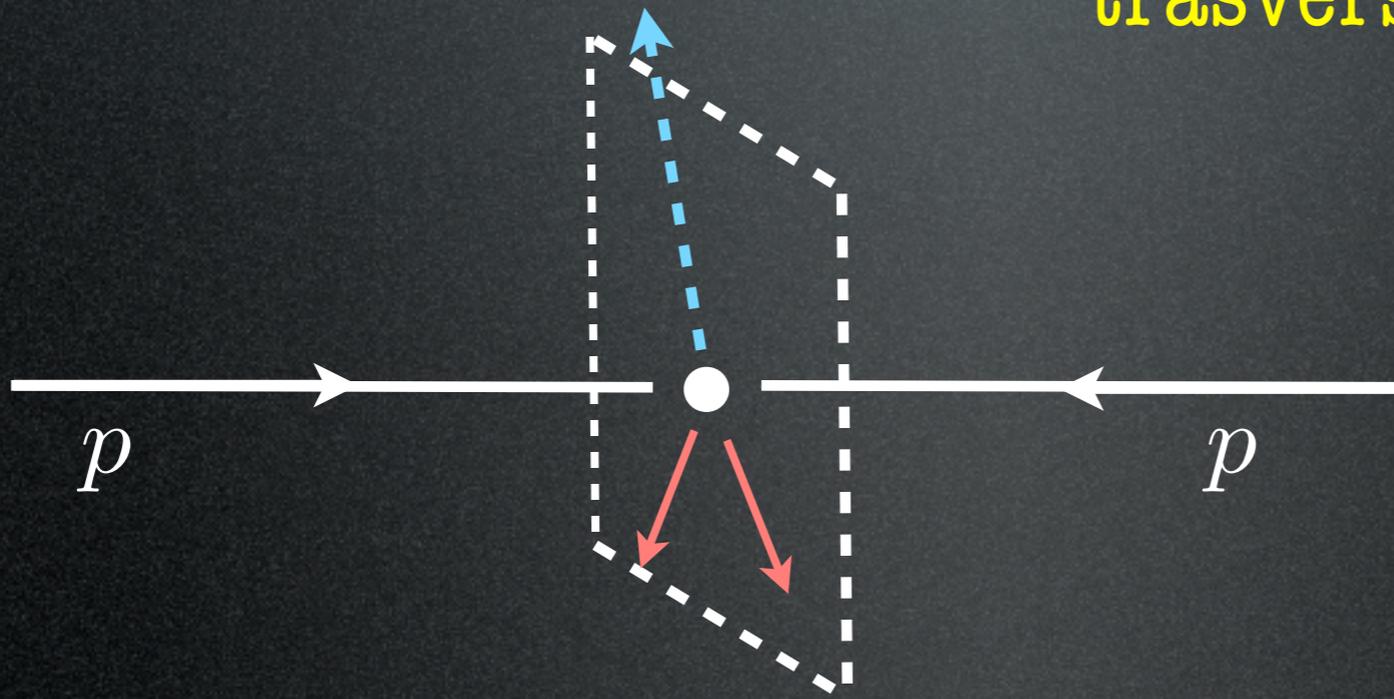
Produzione agli acceleratori

All'LHC:



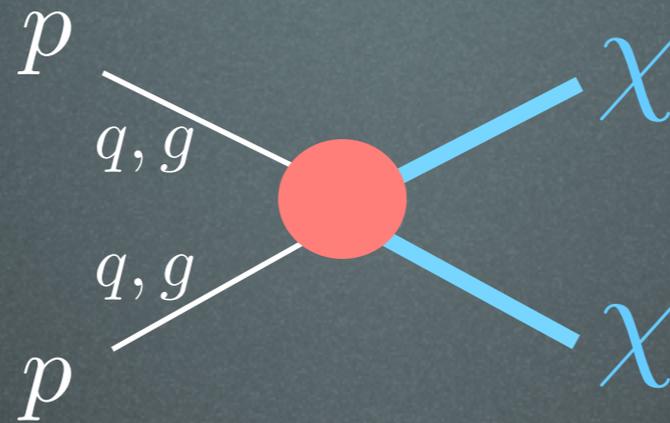
Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

La prova è: **energia mancante**
trasversale



Produzione agli acceleratori

All'LHC:

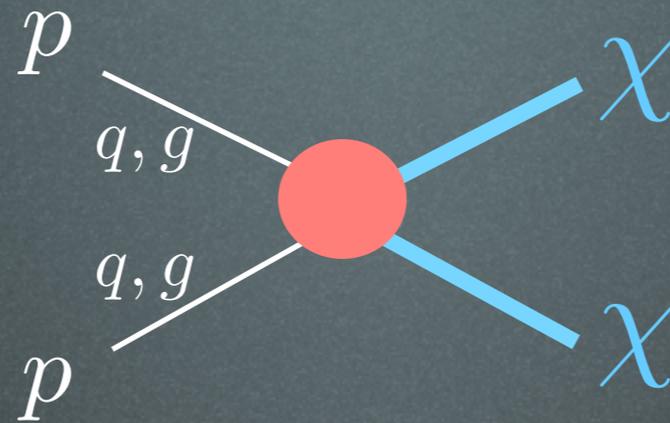


Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

La prova è: **energia mancante**
trasversale

Produzione agli acceleratori

All'LHC:



Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

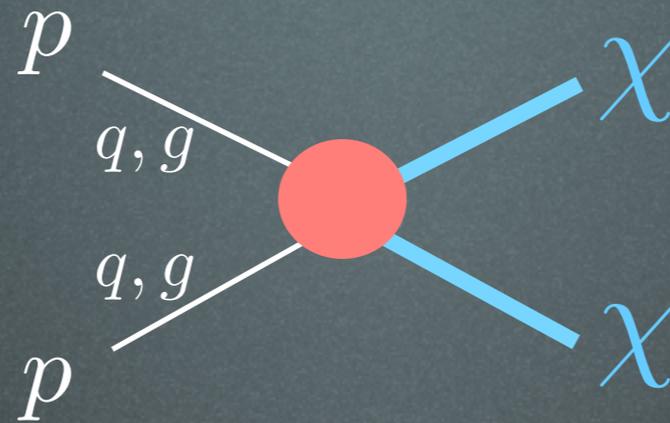
La prova è: **energia mancante**
trasversale

Status:

Per il momento,
nessun segno di
energia mancante.
Nessuno.

Produzione agli acceleratori

All'LHC:



Il 'problema' è: la materia oscura non lascia tracce

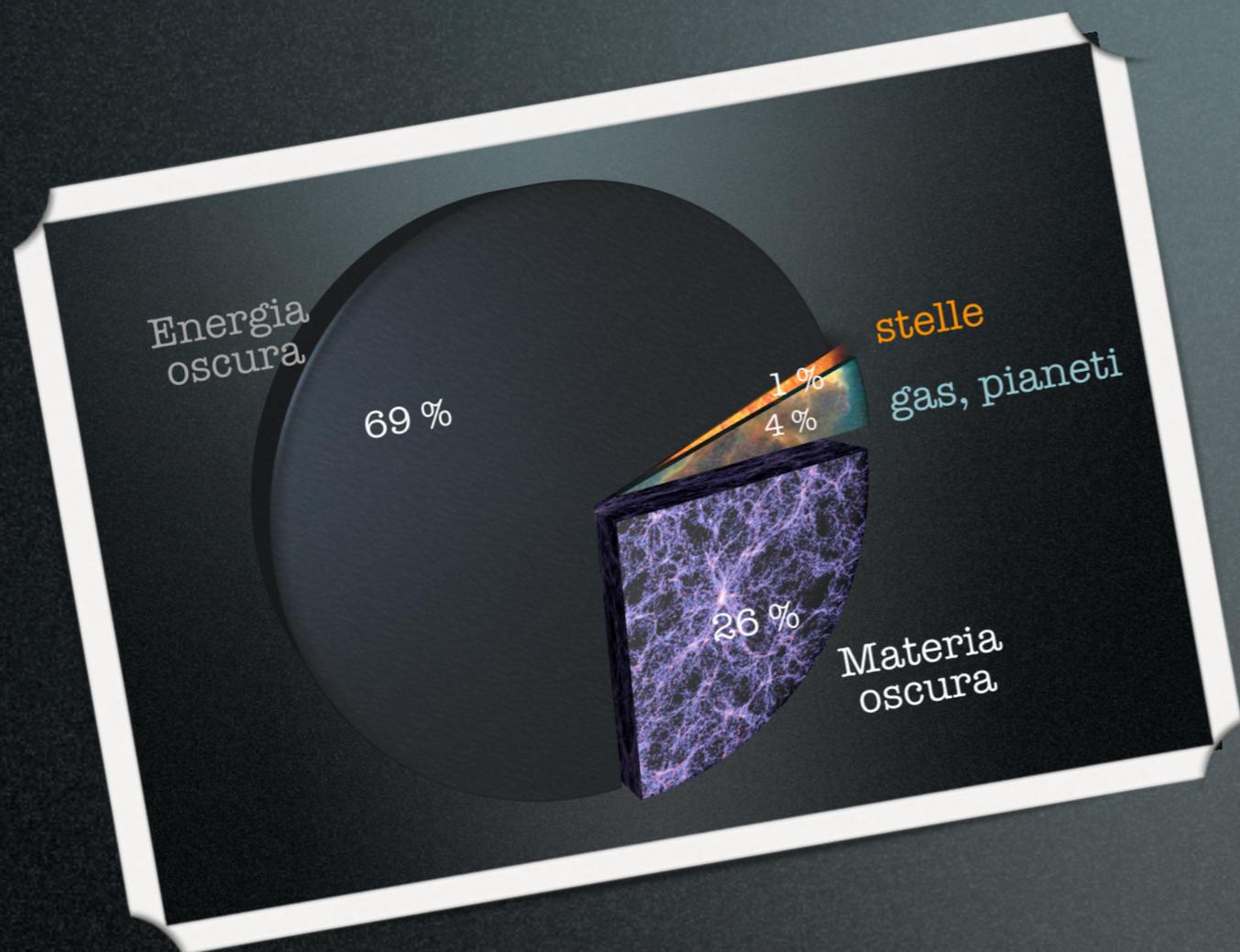
La prova è: **energia mancante**
trasversale

Status:

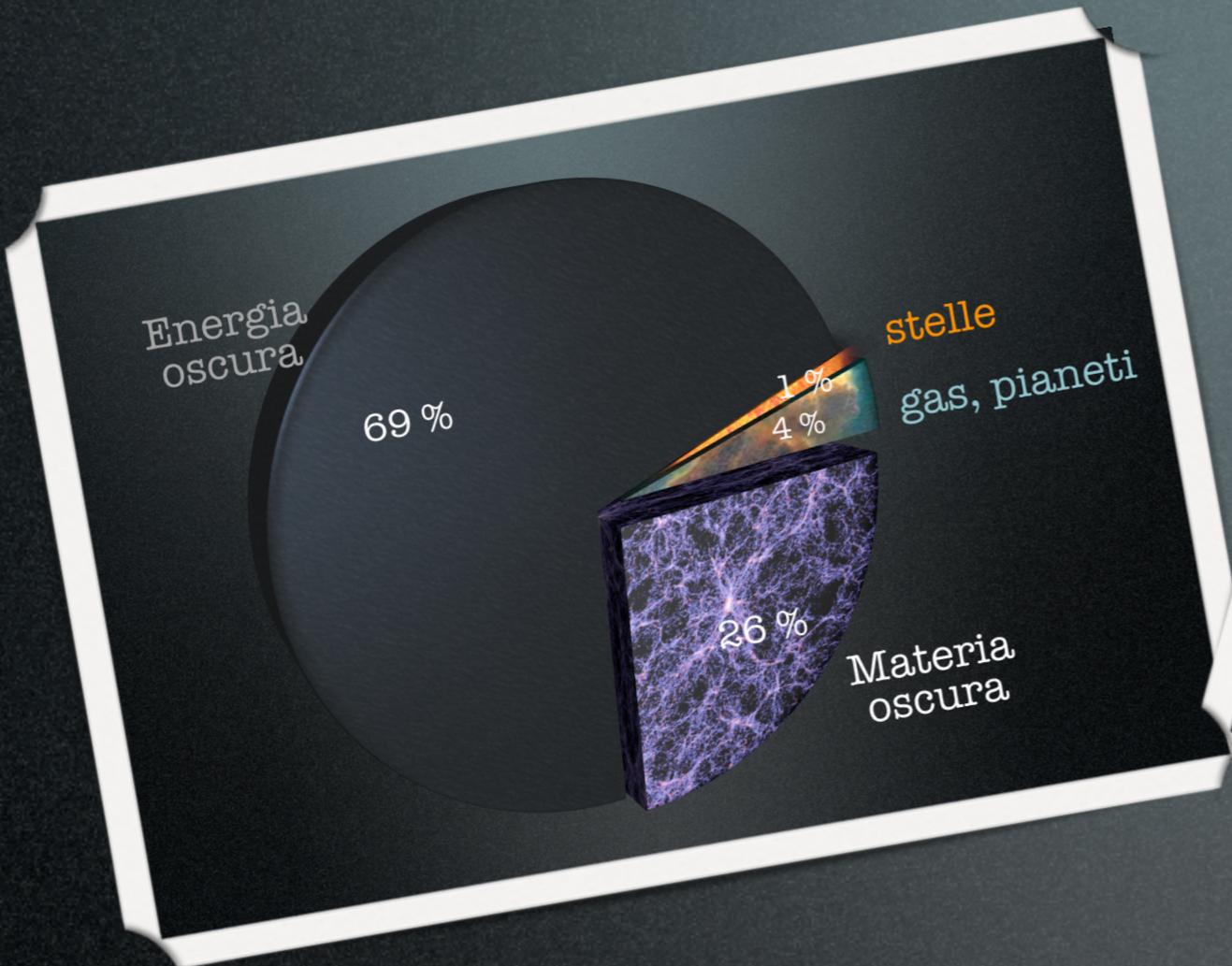
Per il momento,
nessun segno di
energia mancante.
Nessuno.



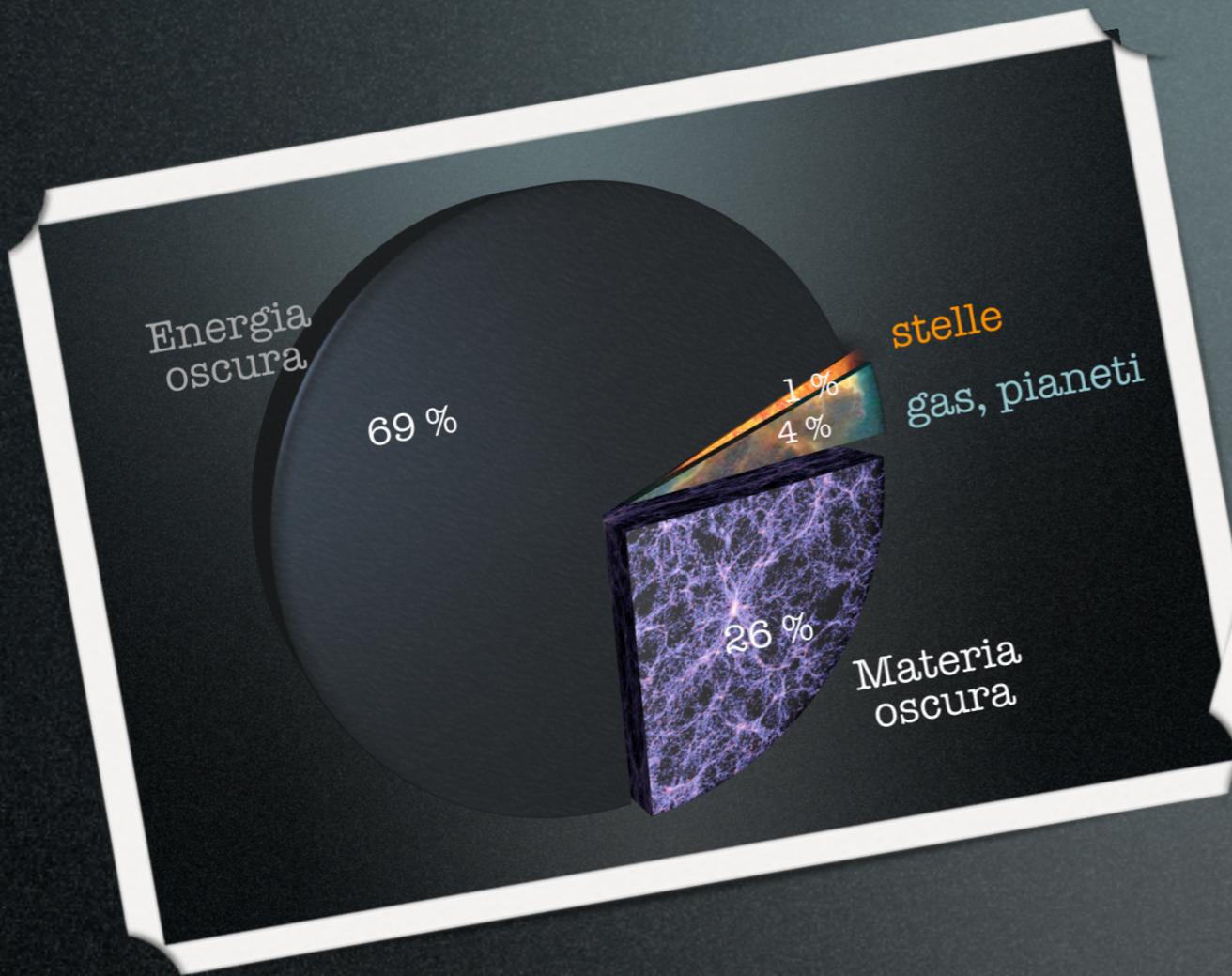
Di cosa è fatto l'Universo?



Di cosa è fatto l'Universo?



Di cosa è fatto l'Universo?

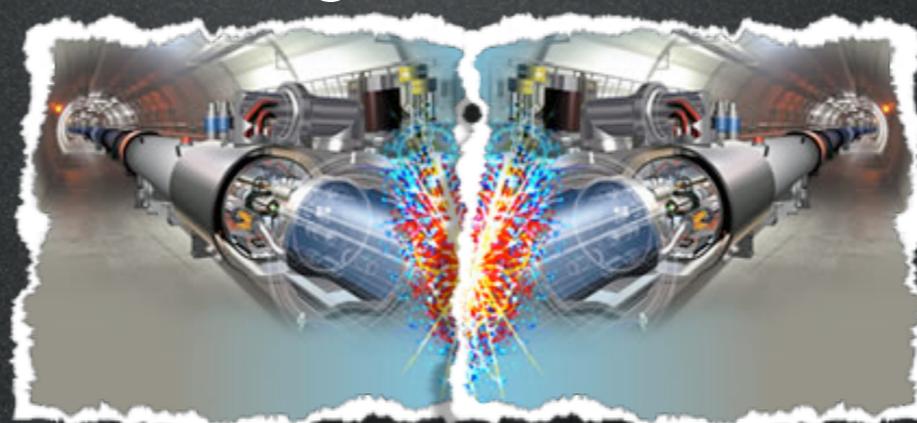


Fisica spaziale



‘rivelazione indiretta’

Fisica agli acceleratori



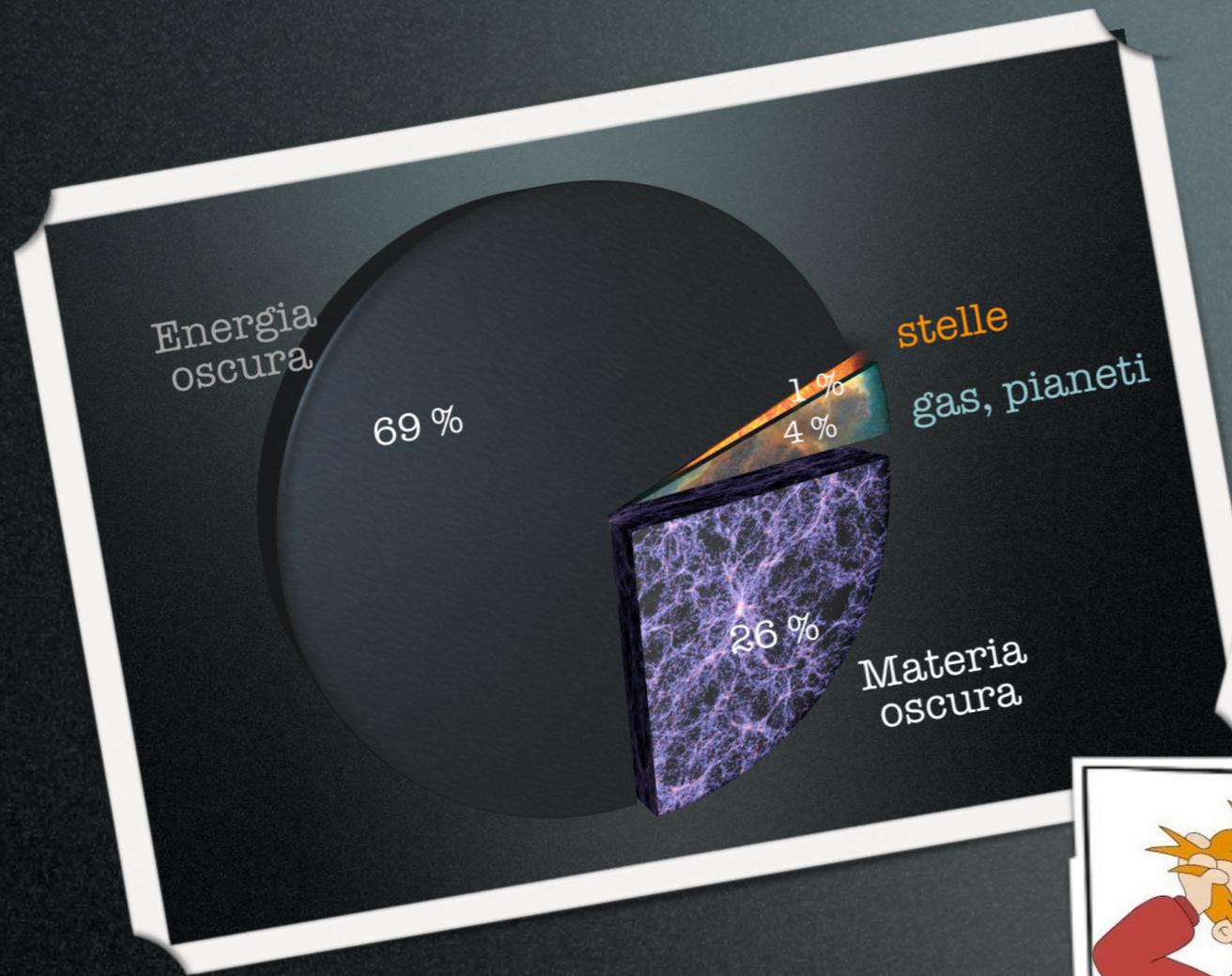
‘produzione’

Fisica sotterranea



‘rivelazione diretta’

Di cosa è fatto l'Universo?

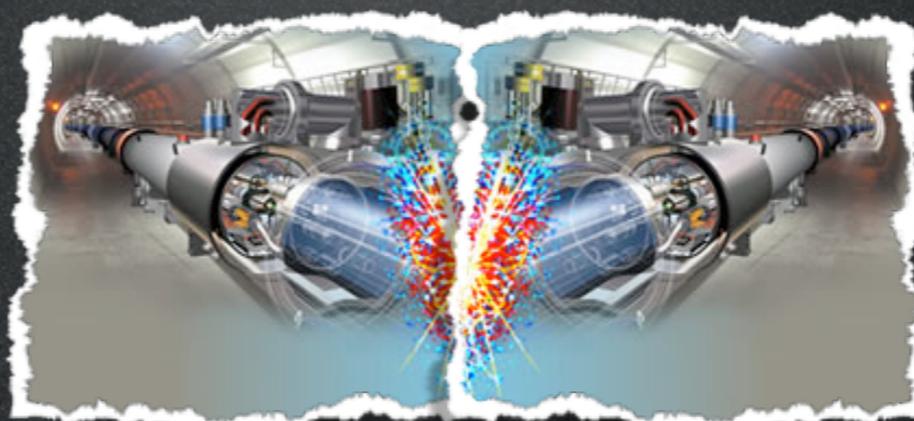


Fisica spaziale



‘rivelazione indiretta’

Fisica agli acceleratori



‘produzione’

Fisica sotterranea



‘rivelazione diretta’

Back-up slides

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- neutrons
- gas
- Black Holes
- brown dwarves

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~
- gas
- Black Holes
- brown dwarves

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~

- ~~gas~~

- Black Holes

- brown dwarves

DM can **NOT** be:

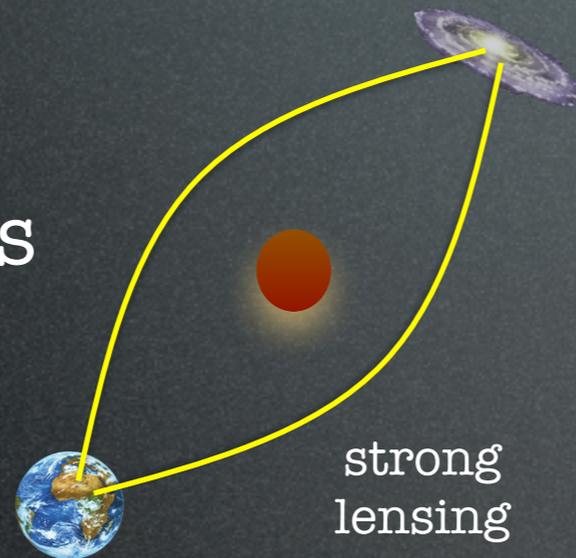
an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~

- ~~gas~~

- ~~Black Holes~~

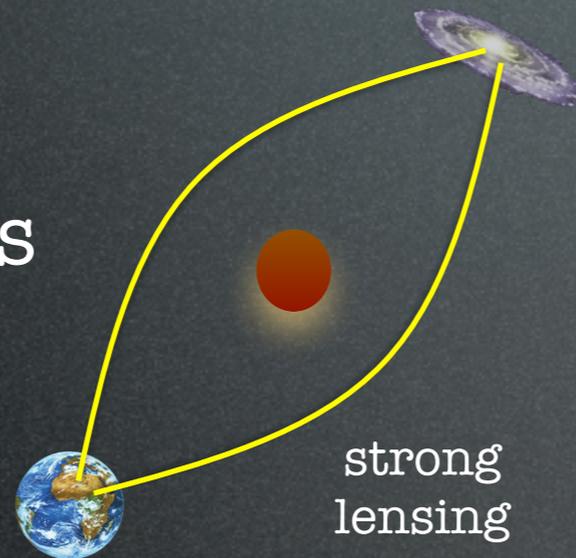
- ~~brown dwarves~~



DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~
- ~~gas~~
- ~~Black Holes~~
- ~~brown dwarves~~



a baryon of the SM:

DM can **NOT** be:

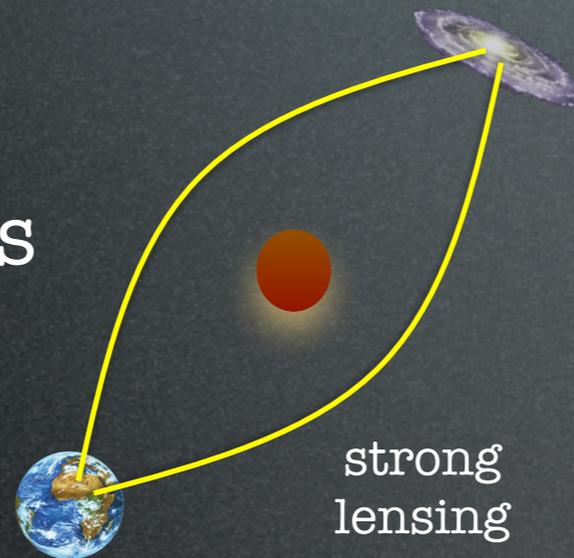
an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~

- ~~gas~~

- ~~Black Holes~~

- ~~brown dwarves~~



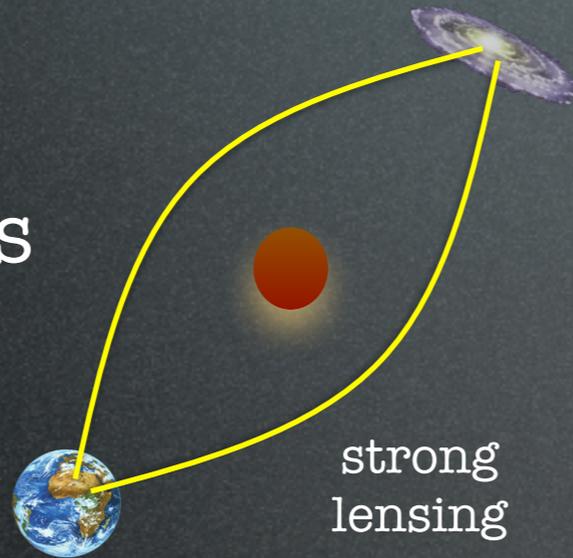
a ~~baryon of the SM~~:

- BBN computes the abundance of He in terms of primordial baryons:
too much baryons => Universe full of Helium
- CMB says baryons are 4% max

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~
- ~~gas~~
- ~~Black Holes~~
- ~~brown dwarves~~



a ~~baryon of the SM~~:

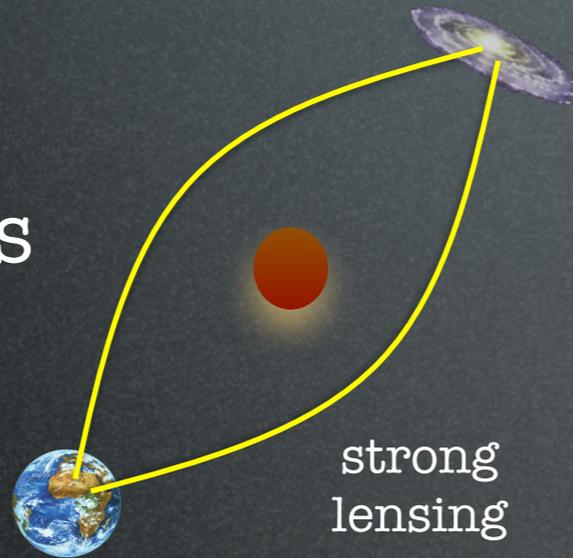
- BBN computes the abundance of He in terms of primordial baryons:
too much baryons => Universe full of Helium
- CMB says baryons are 4% max

neutrinos:

DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~
- ~~gas~~
- ~~Black Holes~~
- ~~brown dwarves~~



~~a baryon of the SM:~~

- BBN computes the abundance of He in terms of primordial baryons:
too much baryons => Universe full of Helium
- CMB says baryons are 4% max

~~neutrinos:~~
too light!

$$m_\nu \lesssim 1 \text{ eV}$$

do not have enough mass to act as gravitational attractors in galaxy collapse

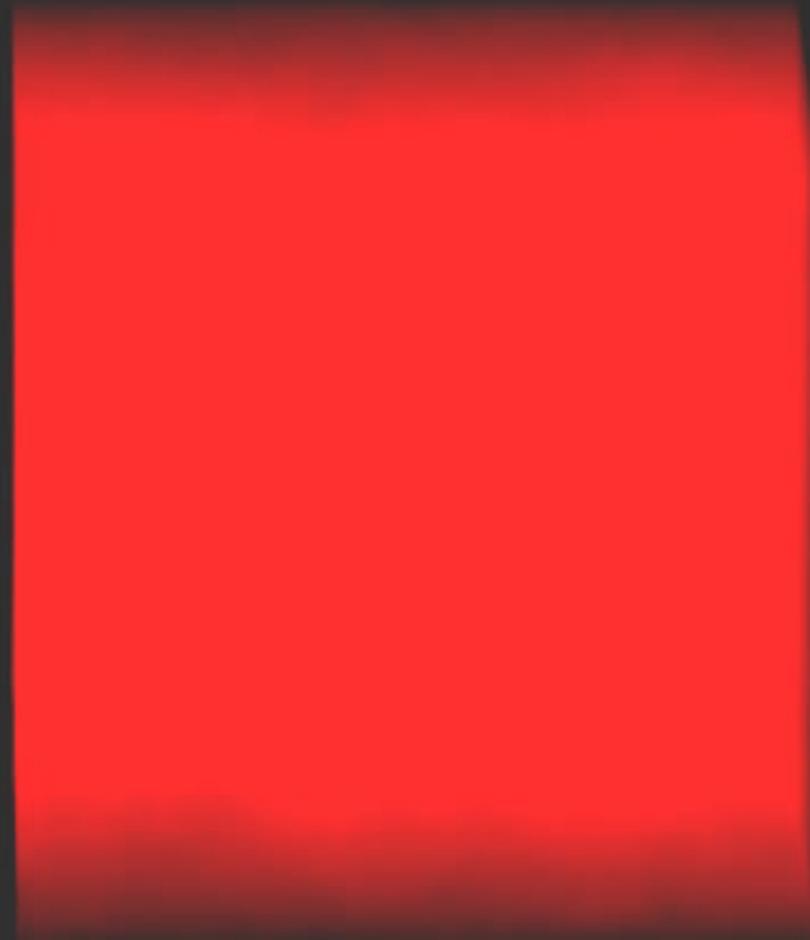
(Neutrino) DM

Z=32.33



no HDM

$$\sum m_\nu = 0$$



some HDM

$$\sum m_\nu = 6.9 \text{ eV}$$

Λ CDM - Gadget2 - 768 Mpc³