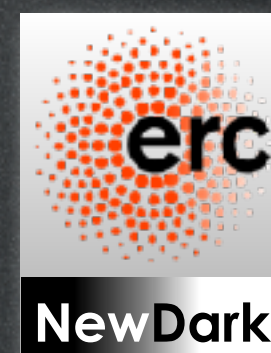


16 décembre 2017  
Commission Cosmologie - SAF, Paris

# À la recherche de la **Matière Noire**

Marco Cirelli

(CNRS LPTHE Jussieu & Sorbonne U, Paris)



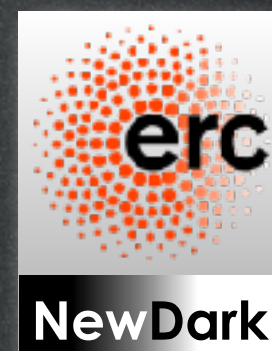


16 décembre 2017  
Commission Cosmologie - SAF, Paris

# À la recherche de la **Matière Noire**

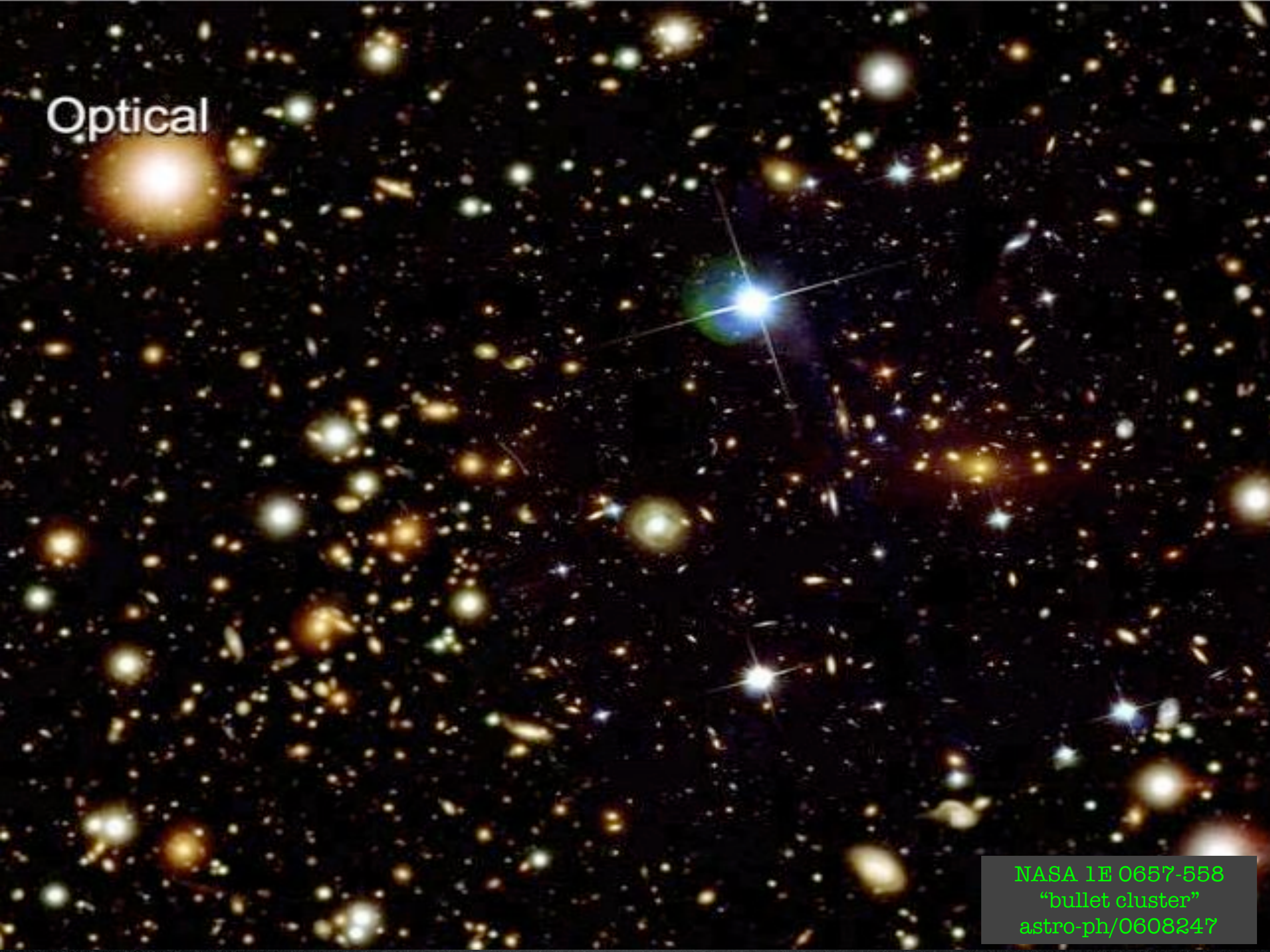
Marco Cirelli

(CNRS LPTHE Jussieu & Sorbonne U, Paris)





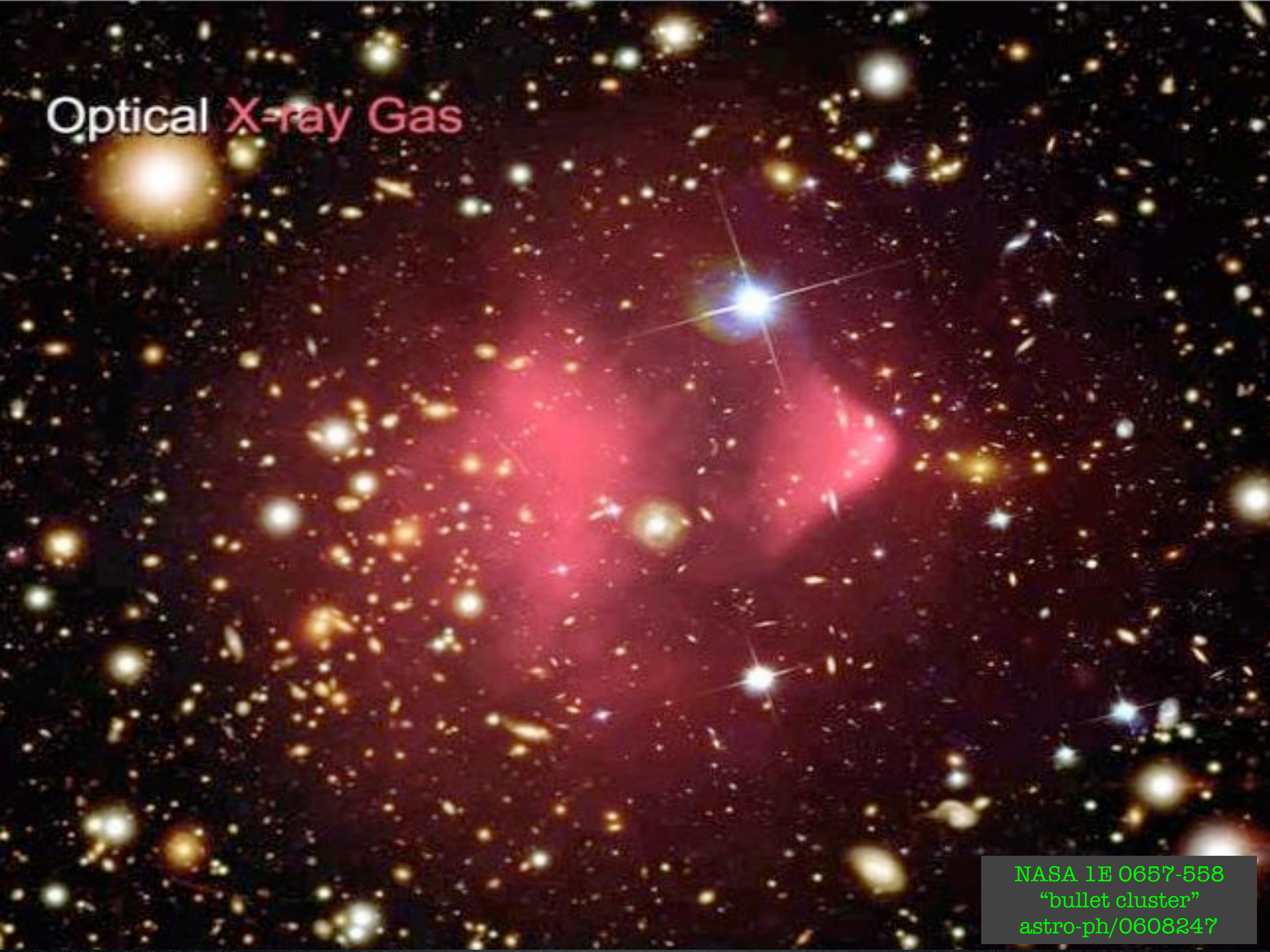
Optical



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



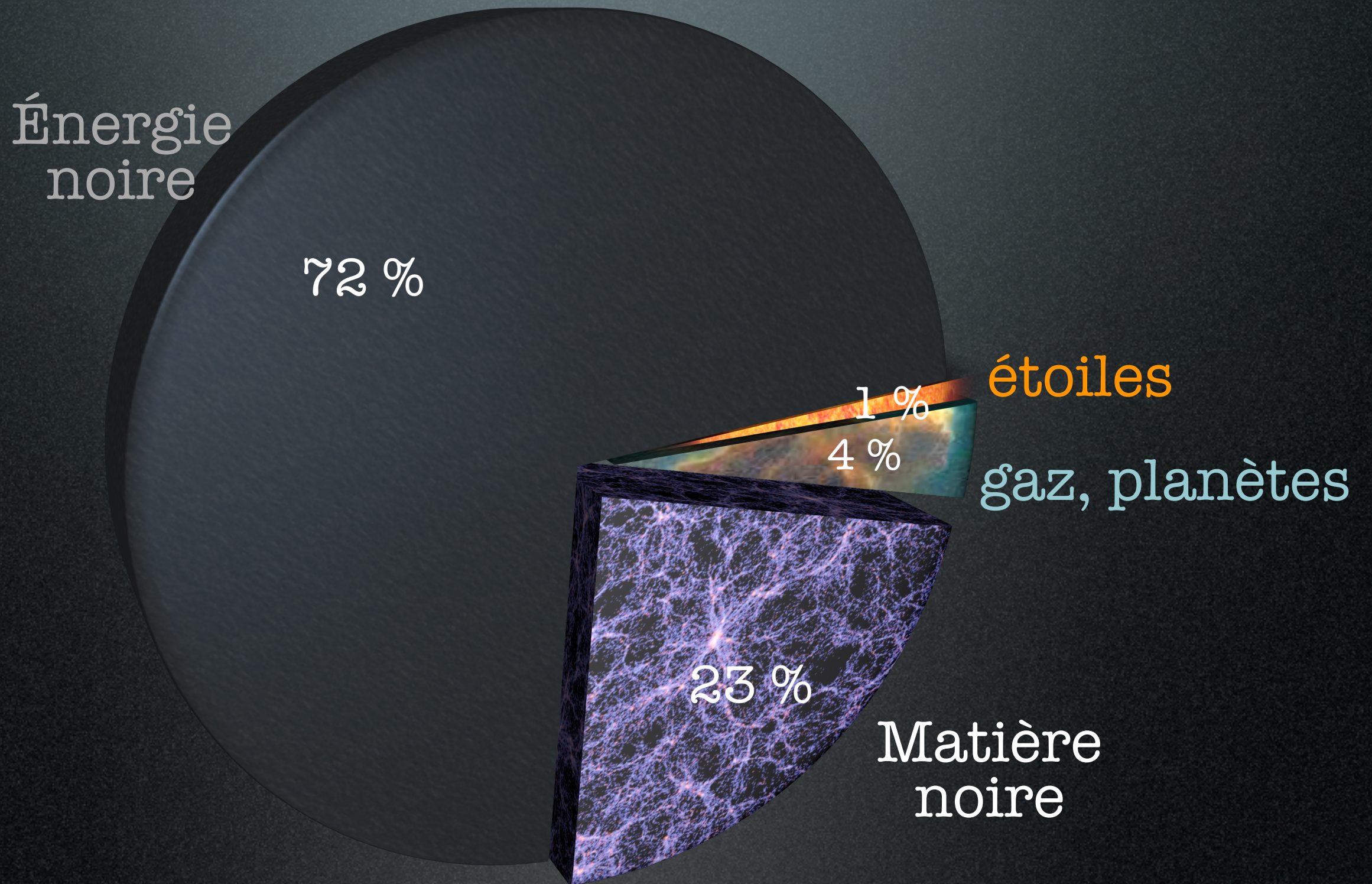
Optical Dark Matter X-ray Gas



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

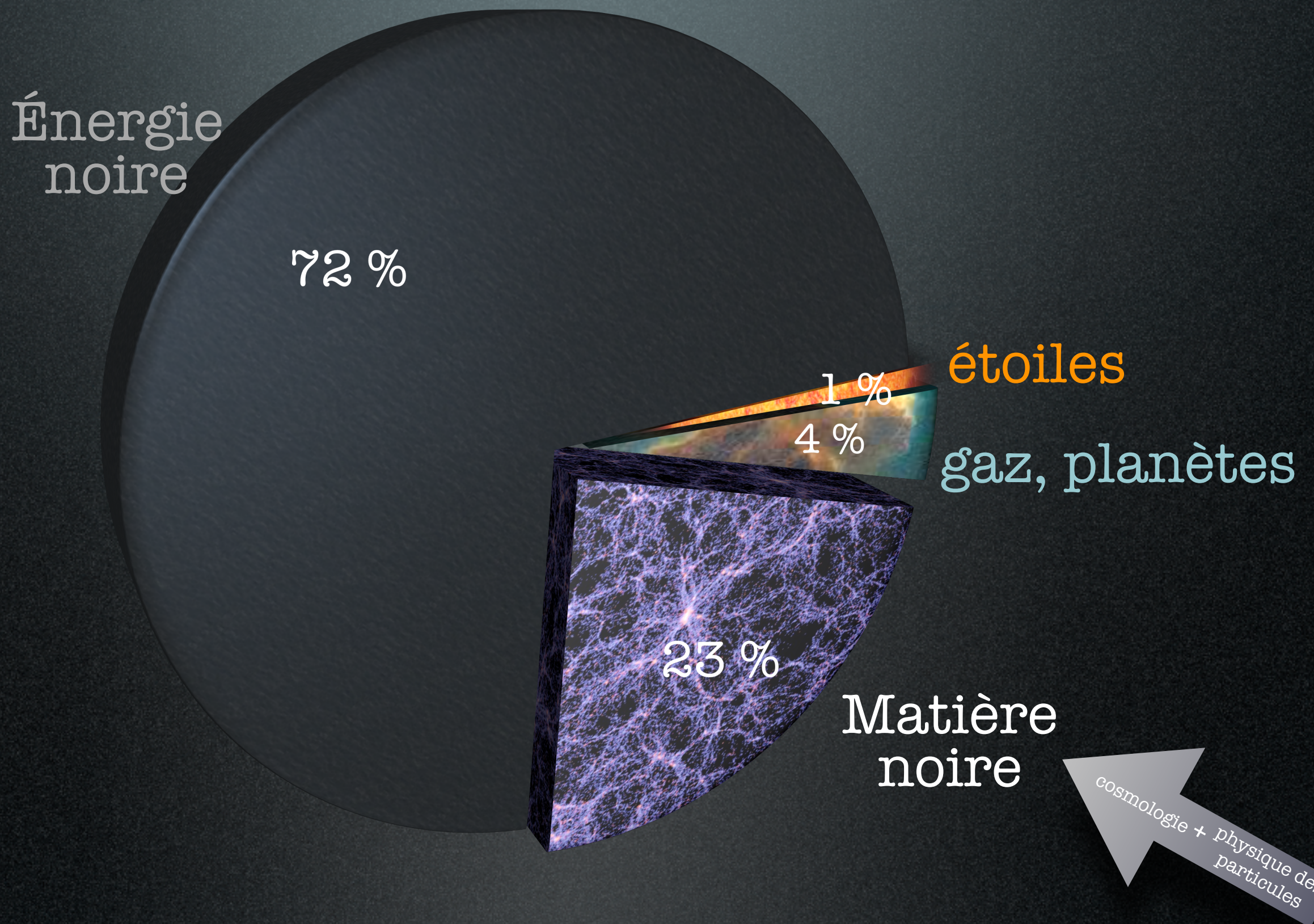


# 95% de notre Univers est inconnu, noir





# 95% de notre Univers est inconnu, noir





**Existence**  
et  
**propriétés**



# Preuves d'existence

1) courbes de rotation  
galactiques

2) amas de galaxies

3) 'cosmologie  
de précision'



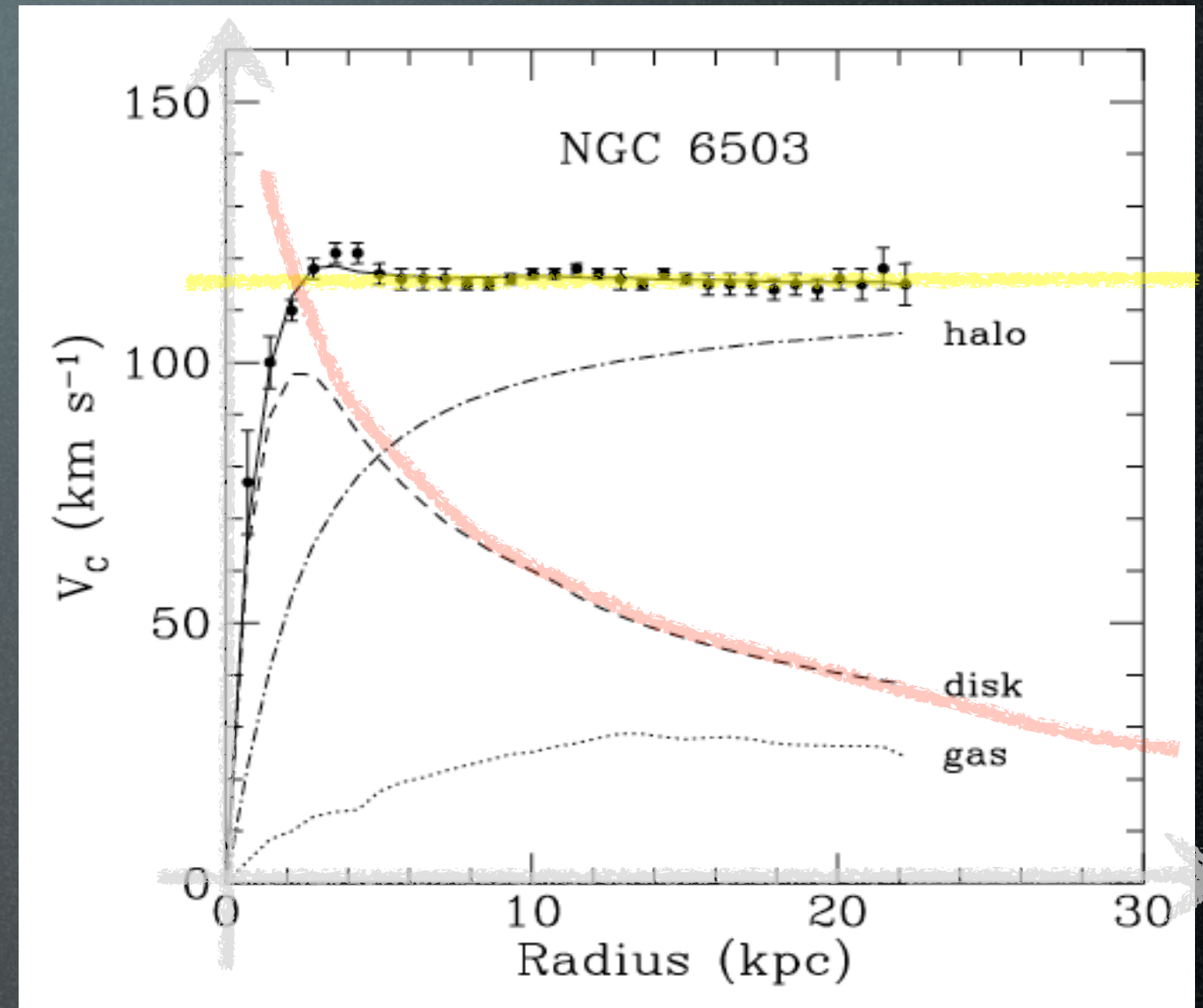
# Preuves d'existence

1) courbes de rotation  
galactiques

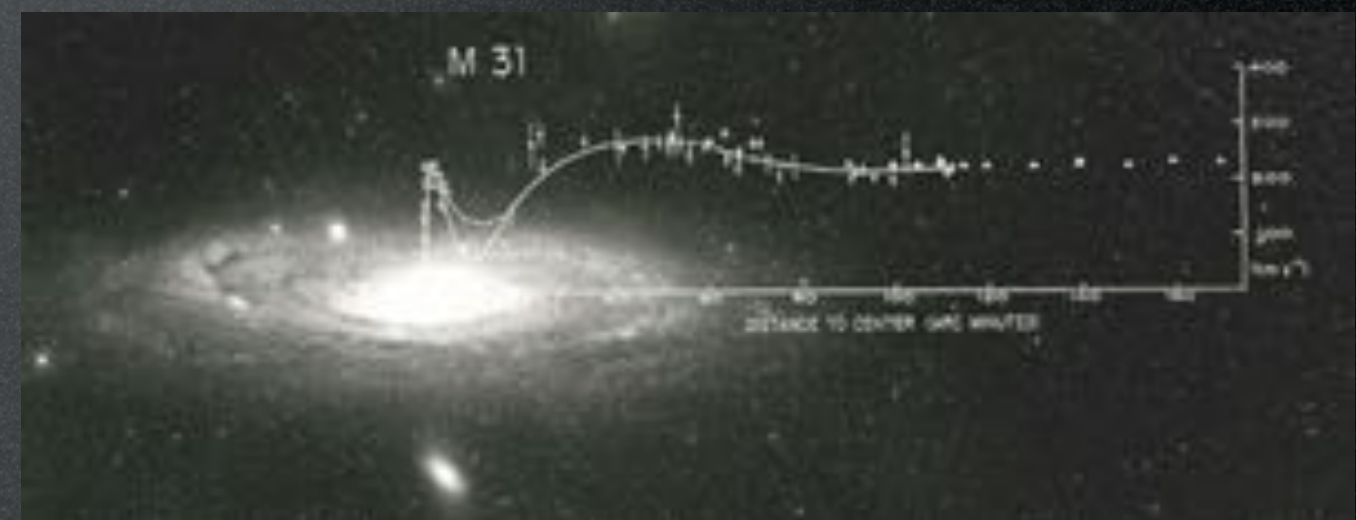


# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques



Begelman et al., MNRAS 249 (1991)



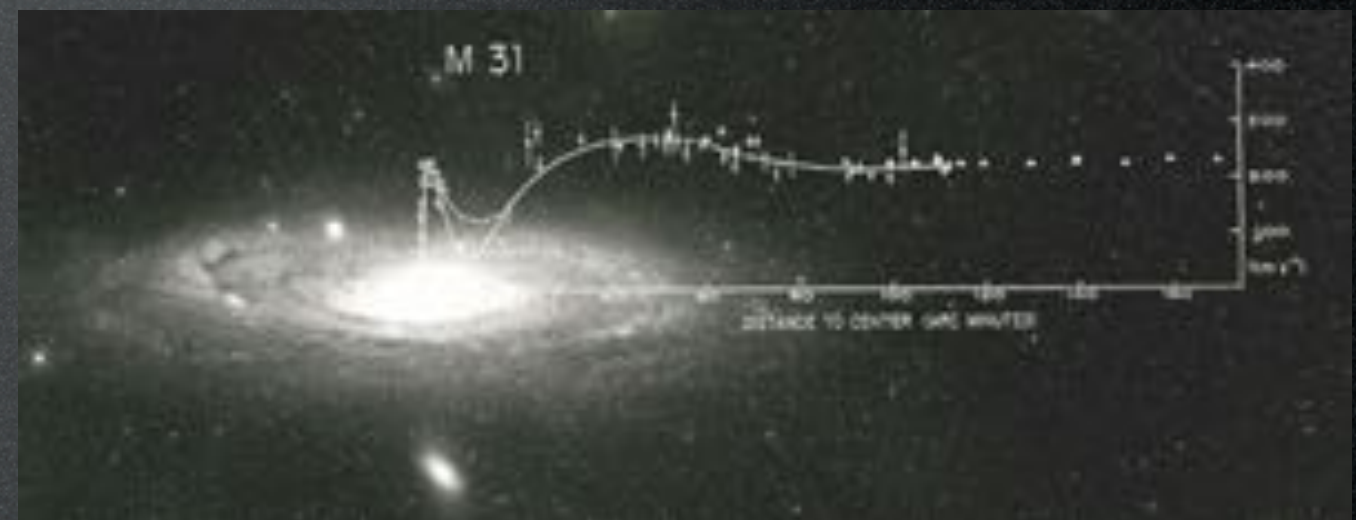
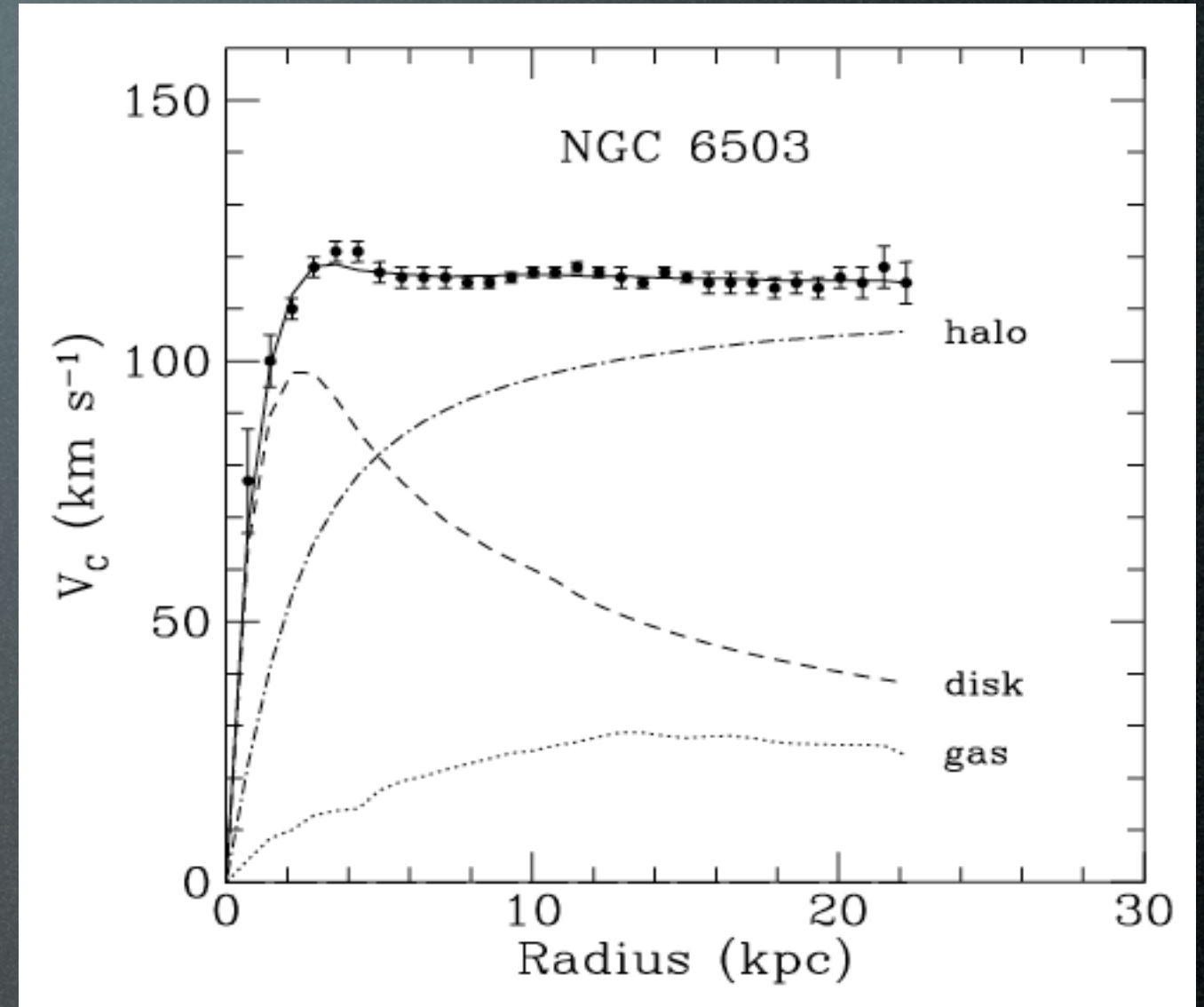


# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

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

'centrifuge'                      'centripète'



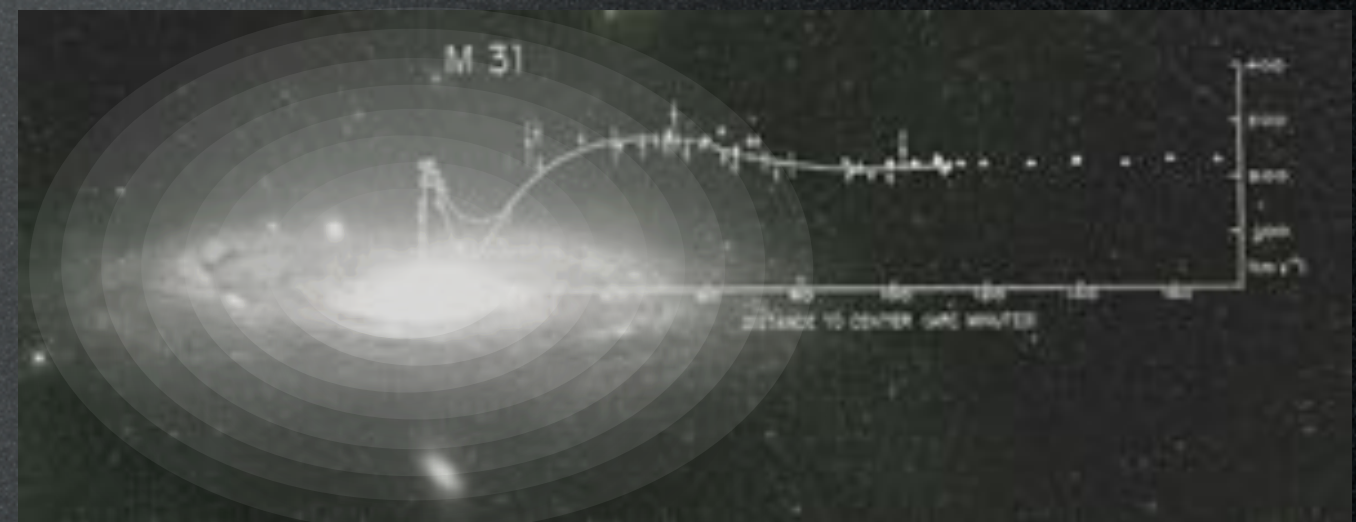
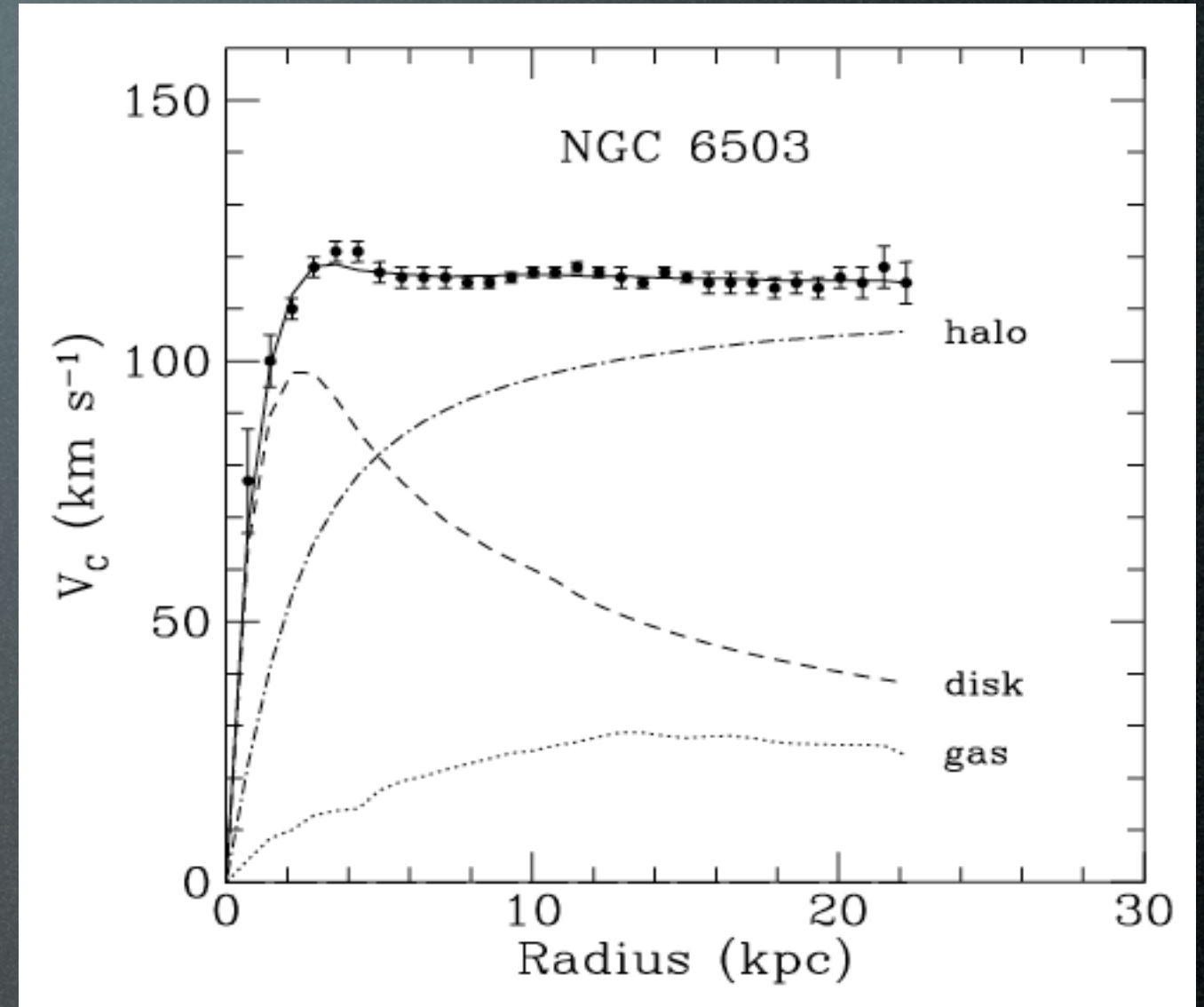


# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

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

'centrifuge'                      'centripète'





# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

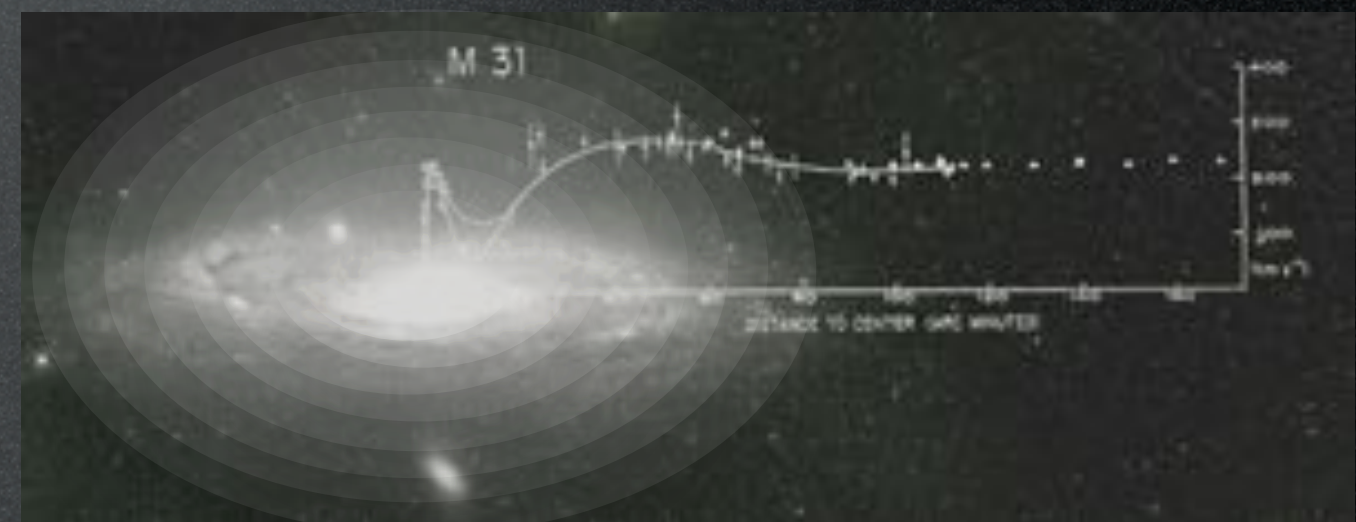
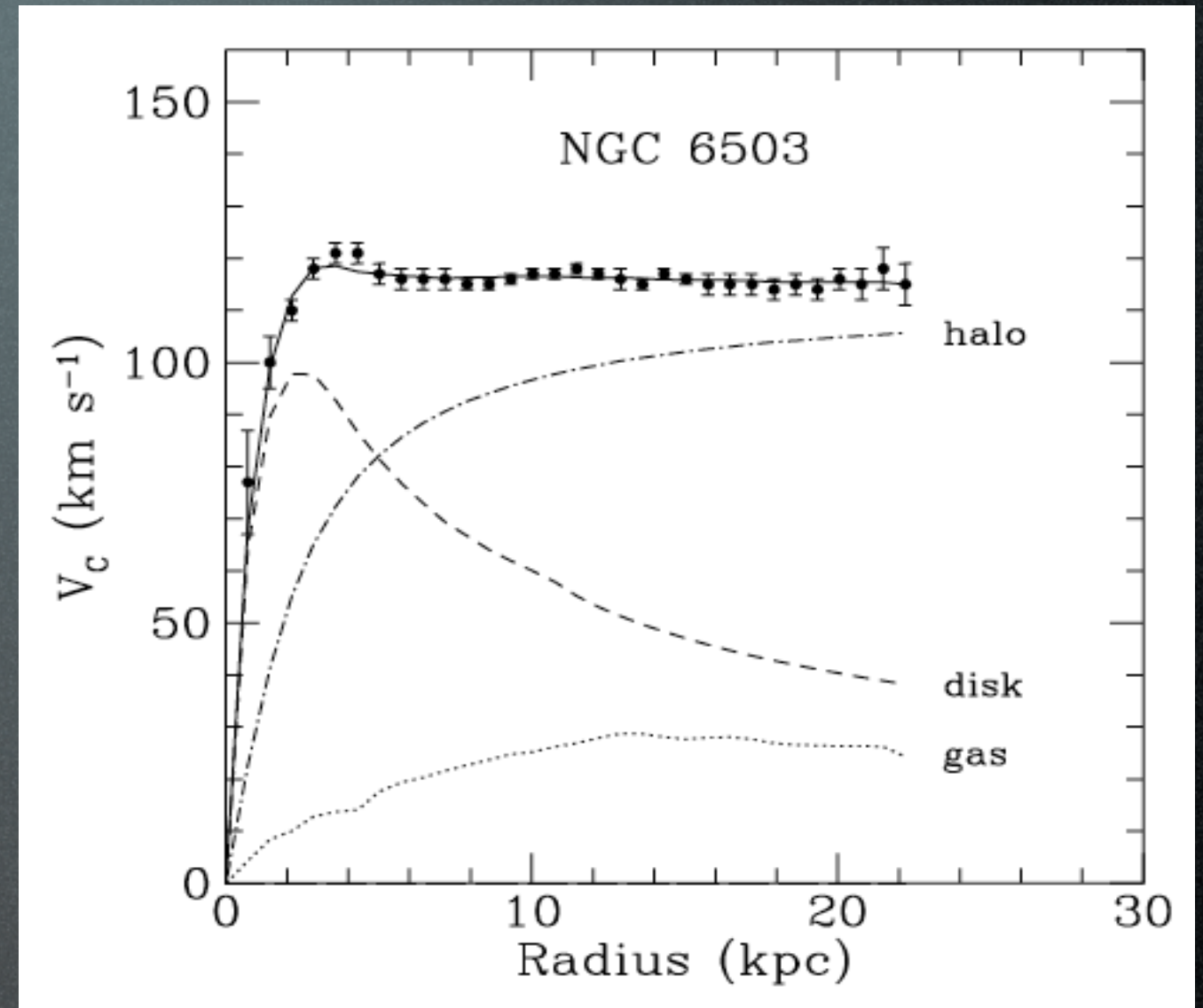
$$m \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{G_N m M(r)}{r^2}$$

'centrifuge'                      'centripète'

1933



Fritz Zwicky  
(1898-1974)





# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

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

'centrifuge'                      'centripète'

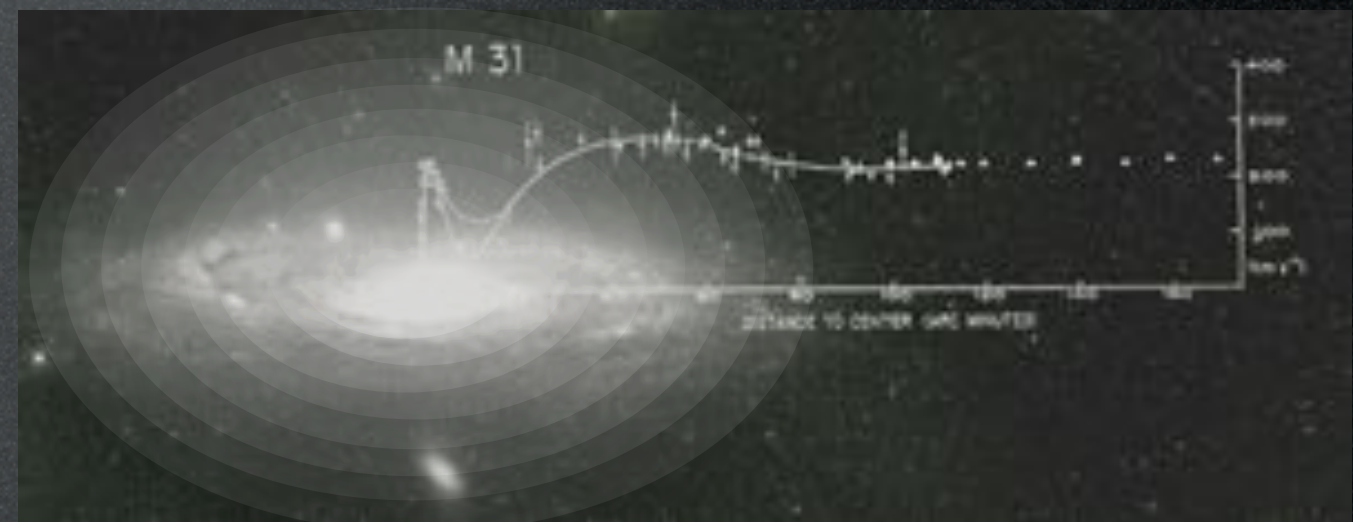
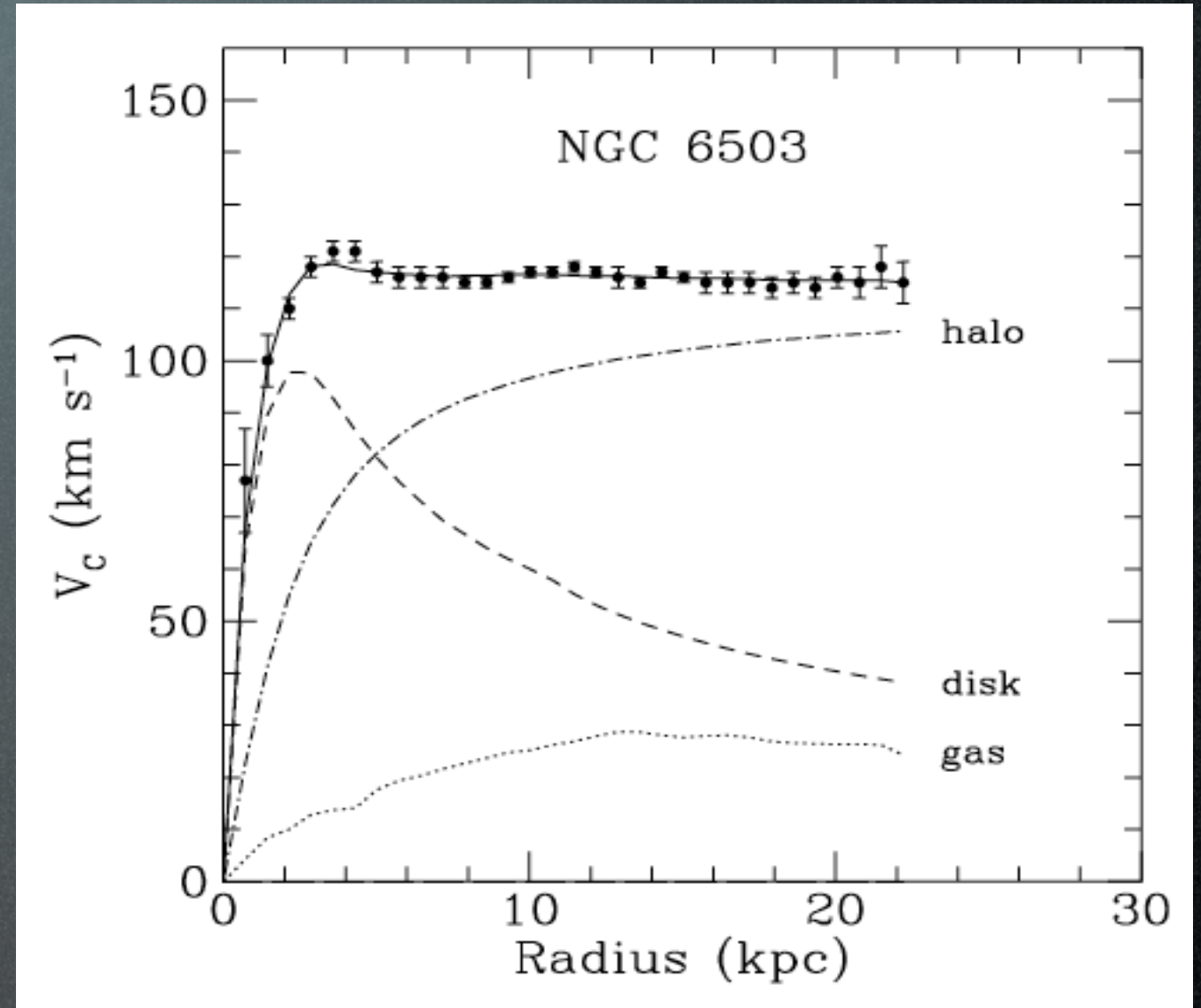
1933

~ 1970



Fritz Zwicky  
(1898-1974)

Vera Rubin  
(1928-2016)





# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

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

'centrifuge'                      'centripète'

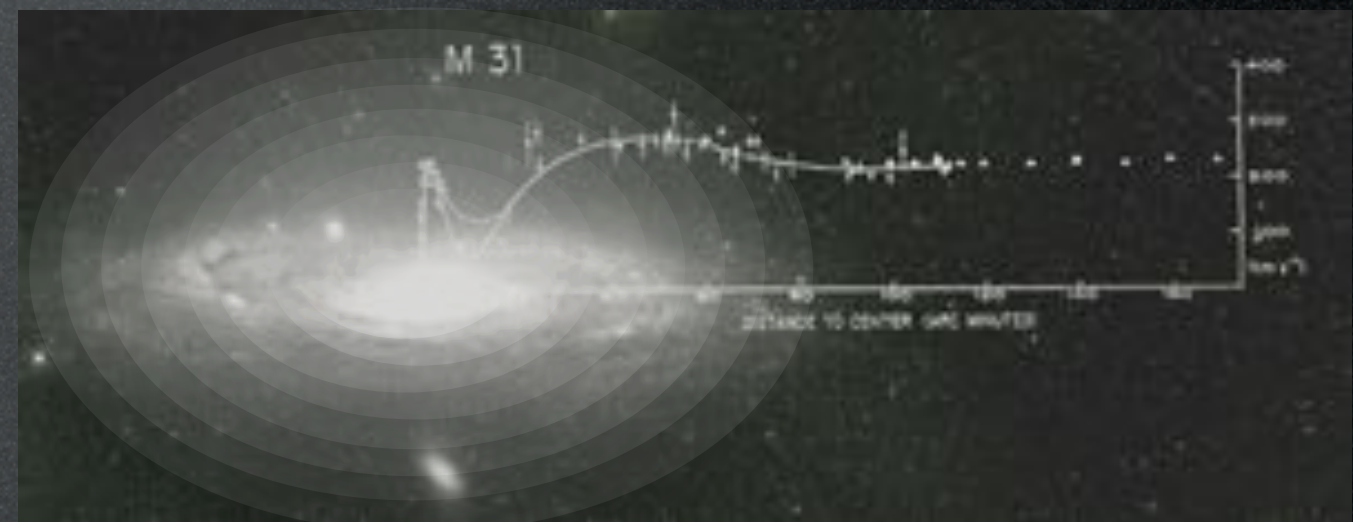
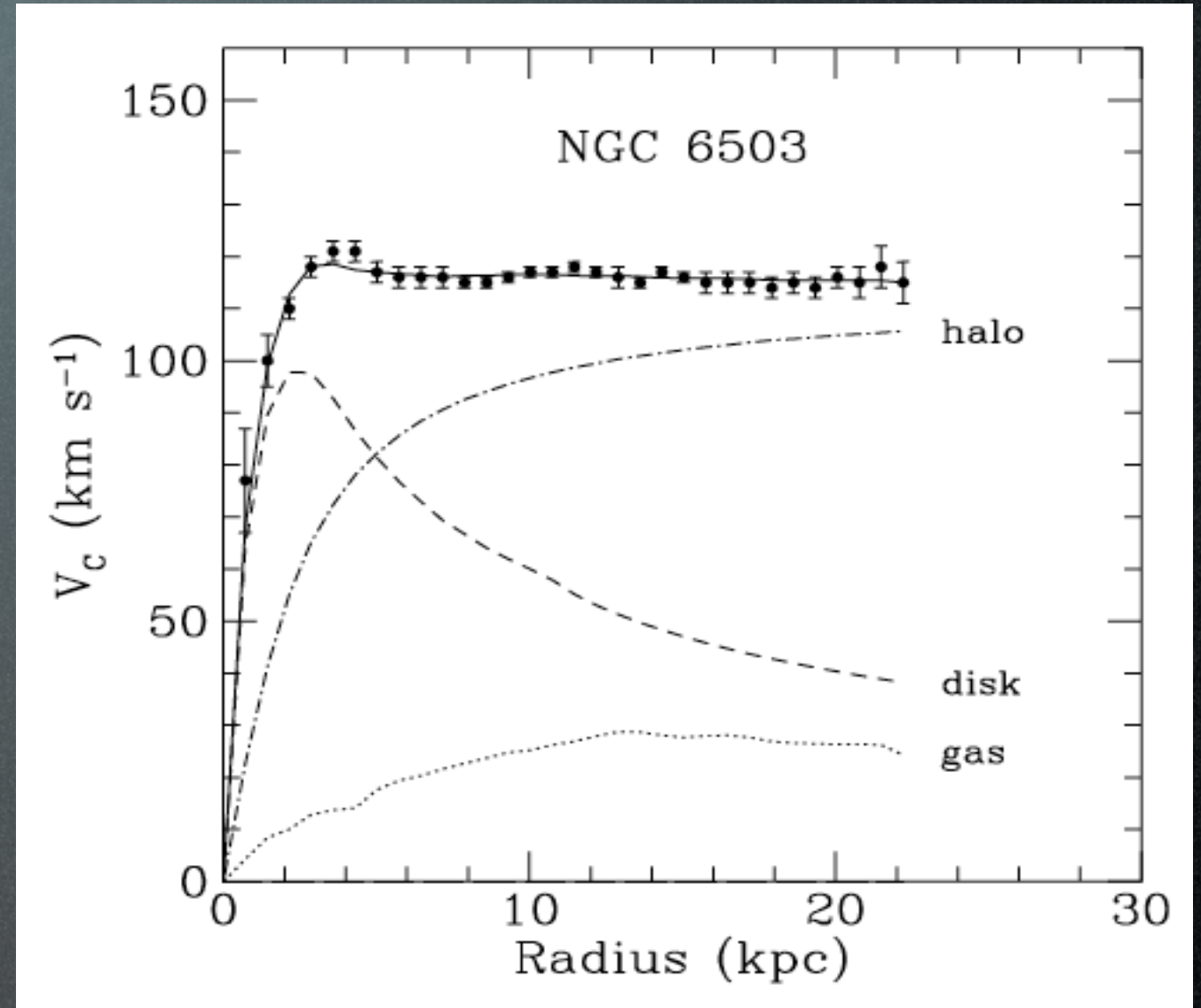
1933

~ 1970



Fritz Zwicky  
(1898-1974)

Vera Rubin  
(1928-2016)





# Preuves d'existence

## 1) courbes de rotation galactiques

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

'centrifuge'                      'centripète'

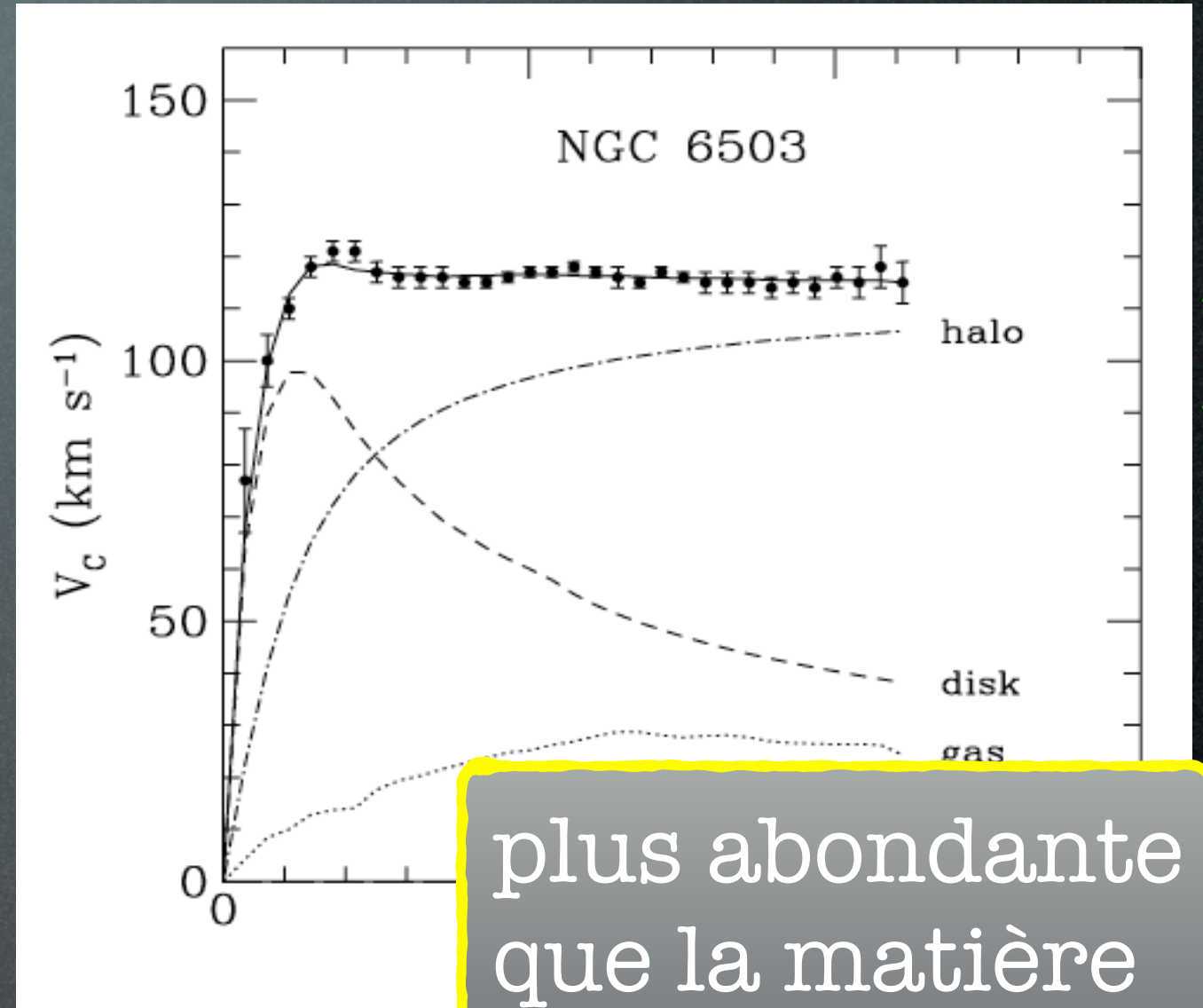
1933

~ 1970

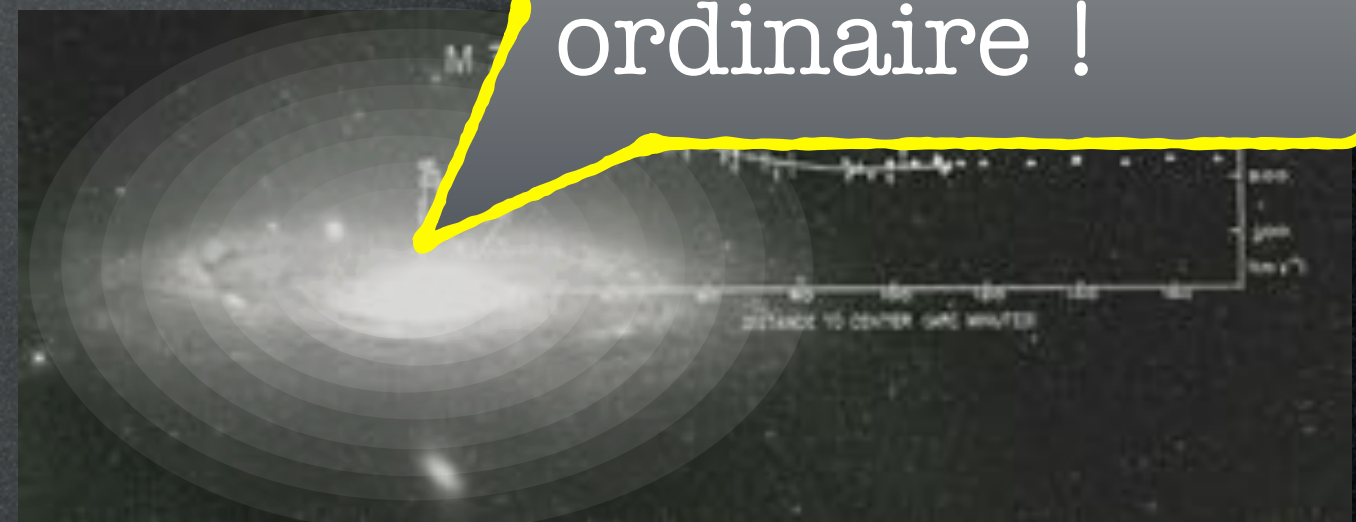


Fritz Zwicky  
(1898-1974)

Vera Rubin  
(1928-2016)



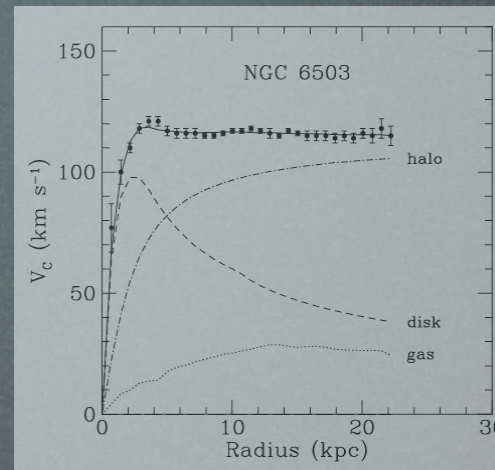
plus abondante  
que la matière  
ordinaire !





# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle



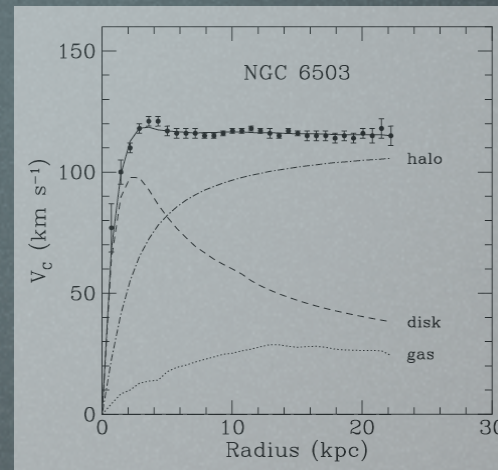
“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247

[further developments]

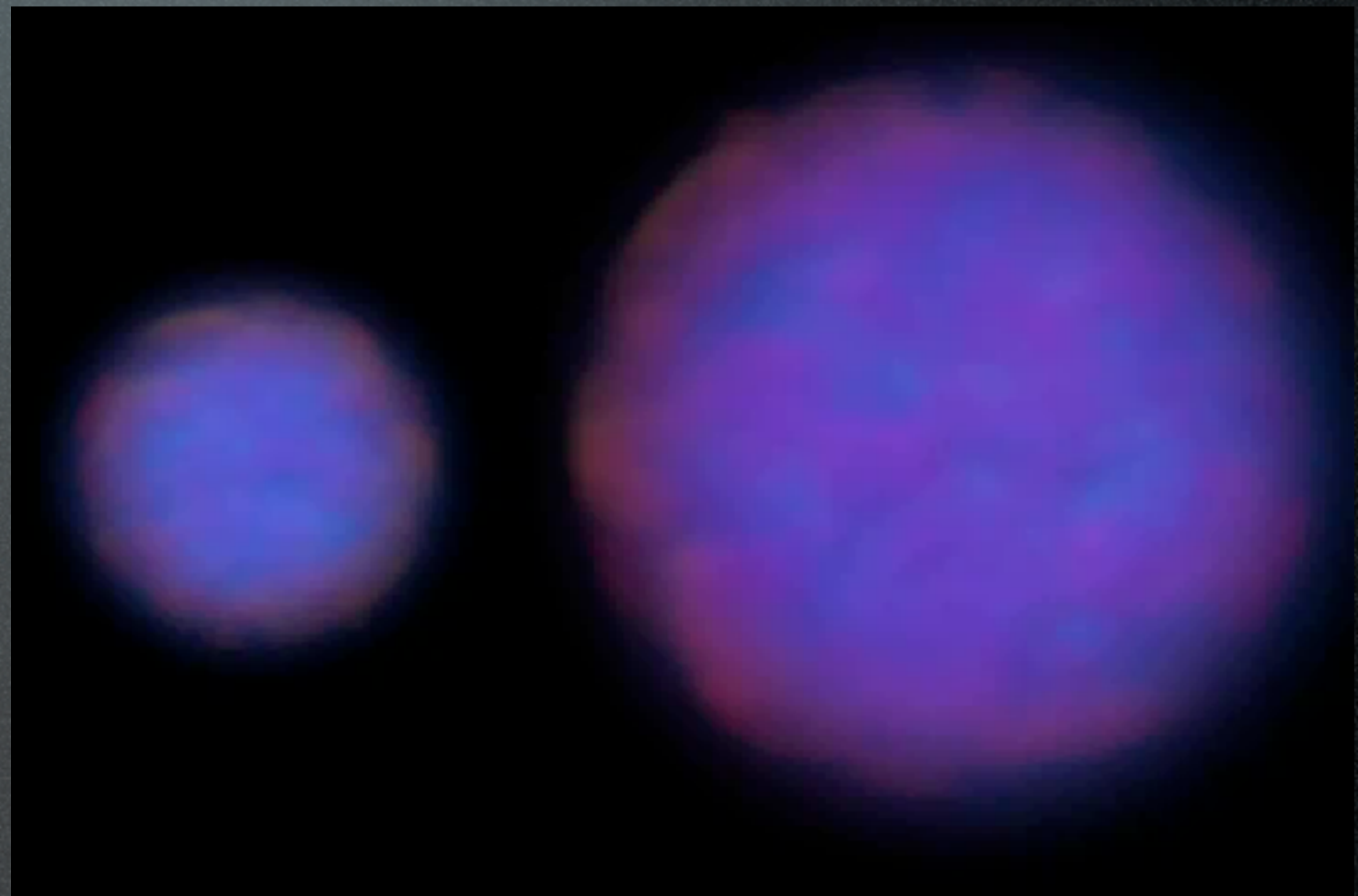


# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



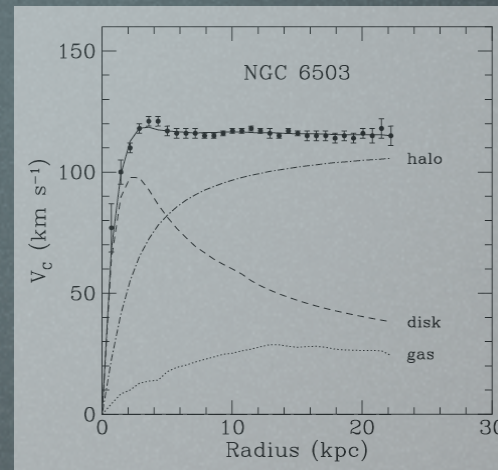
2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle





# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

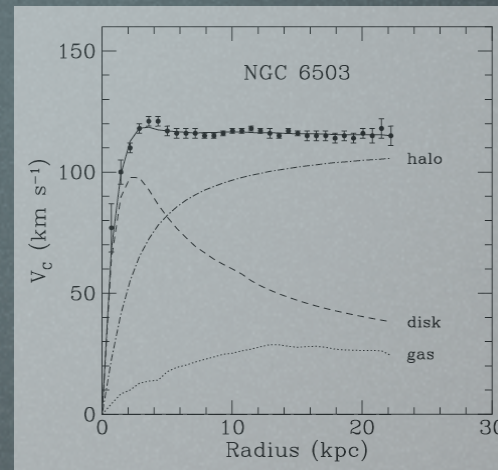


“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247

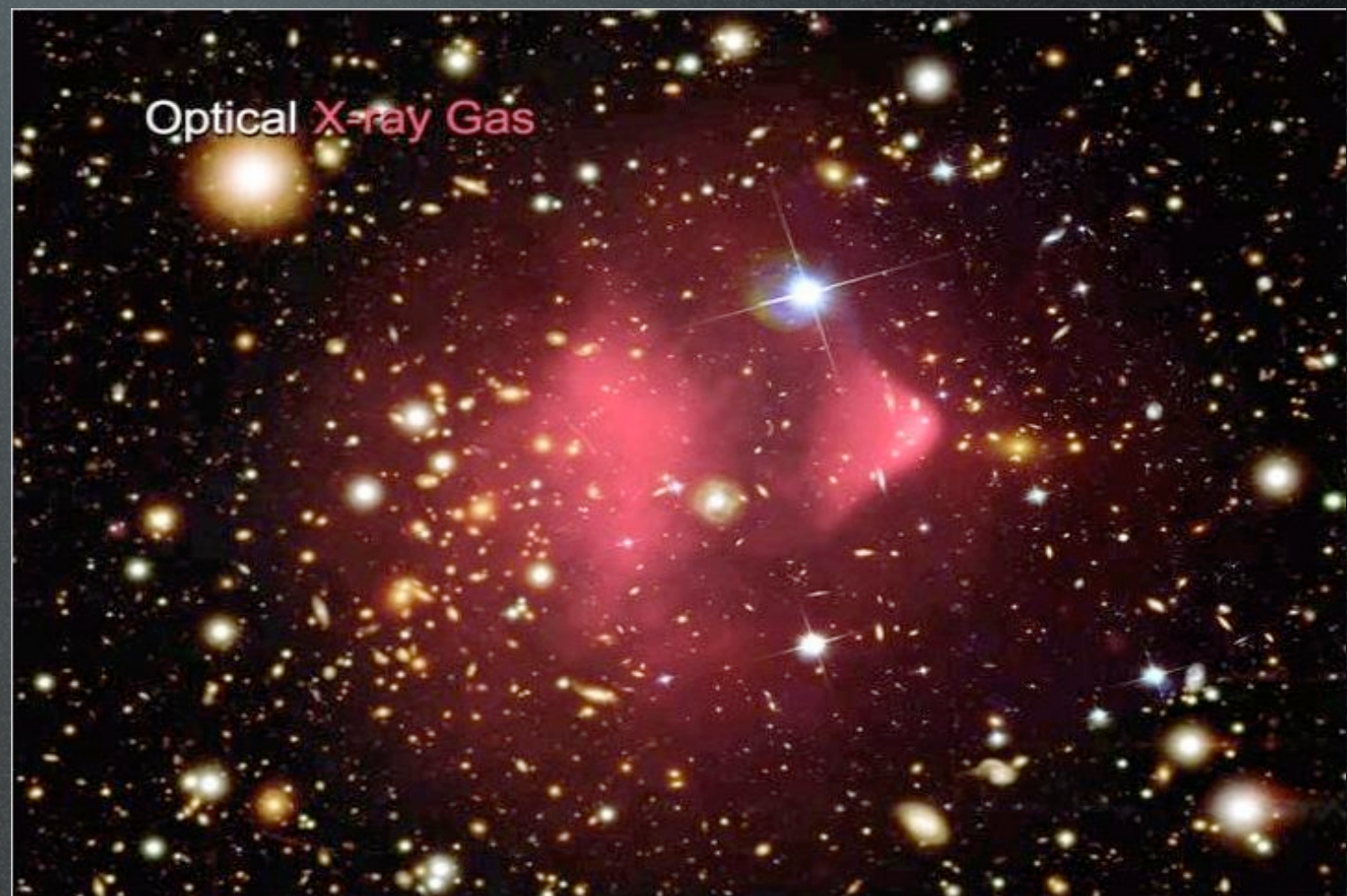


# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

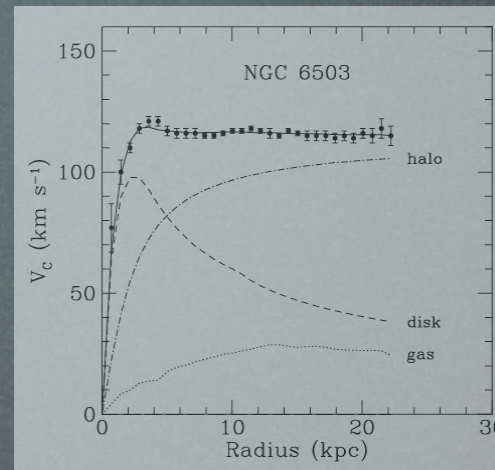


“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247



# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

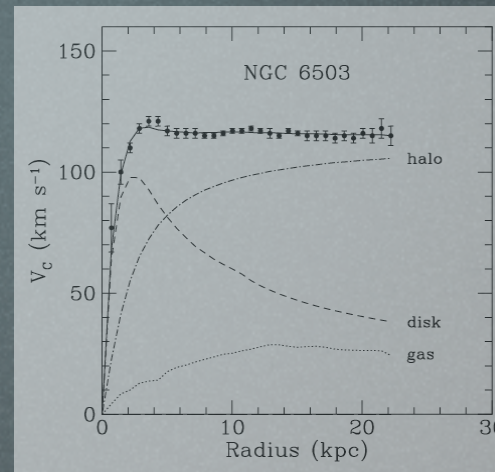


“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247

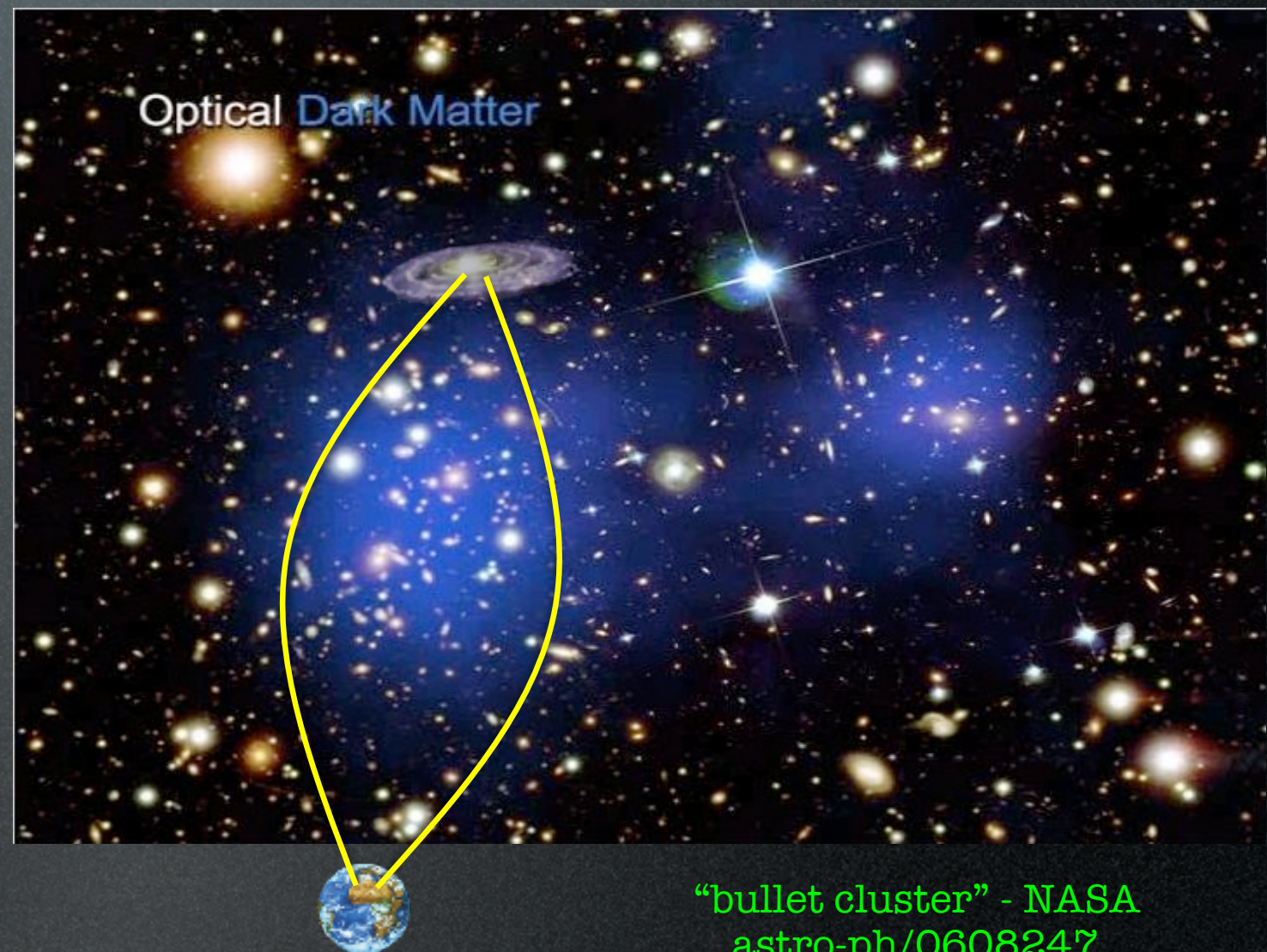


# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

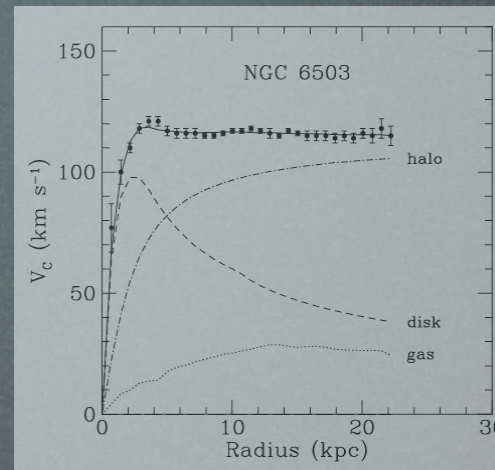


"bullet cluster" - NASA  
astro-ph/0608247



# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

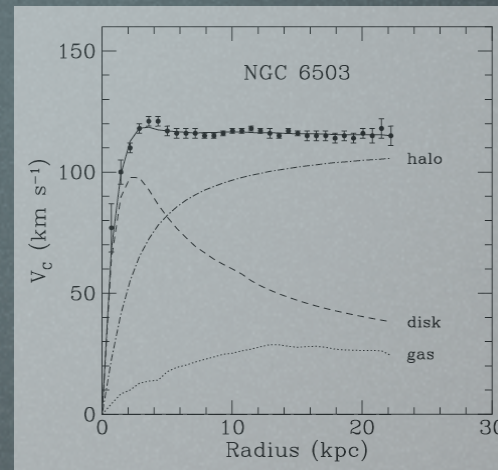


“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247



# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

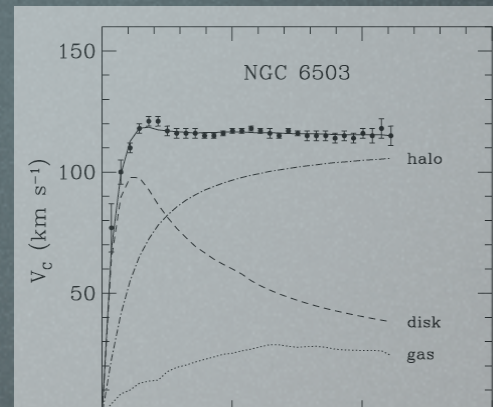


“bullet cluster” - NASA  
astro-ph/0608247



# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies  
- lentille gravitationnelle

n'émet pas de lumière,  
elle est 'neutre'

aucune ou très peu  
d'interaction

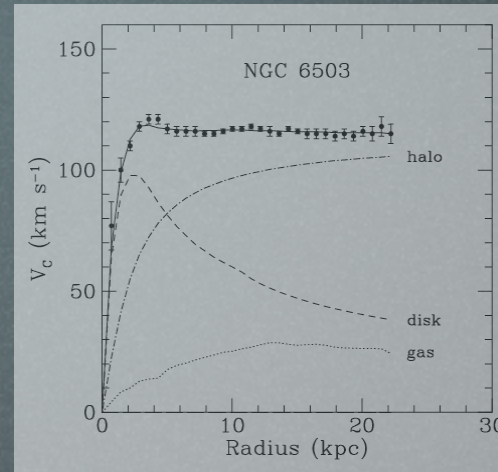


"bullet cluster" - NASA  
astro-ph/0608247



# Preuves d'existence

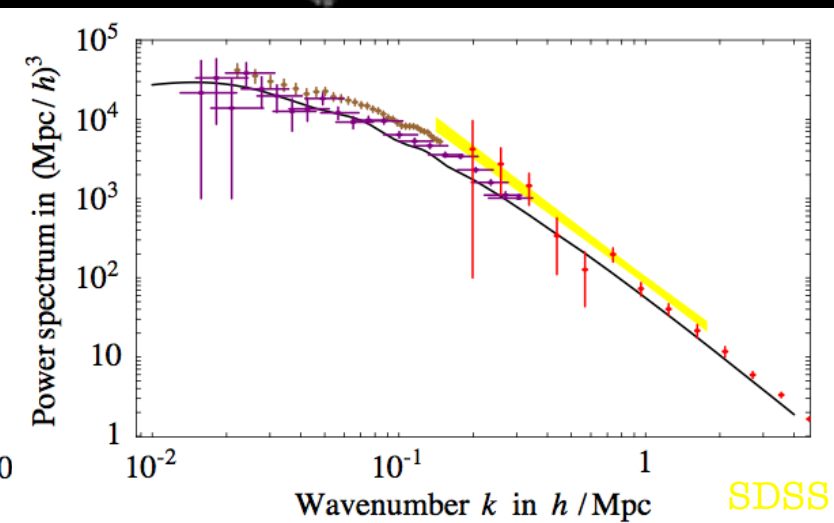
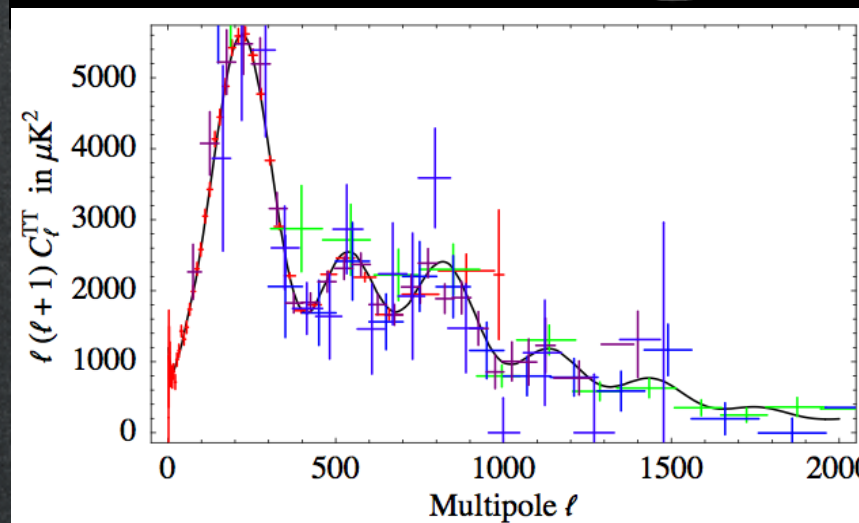
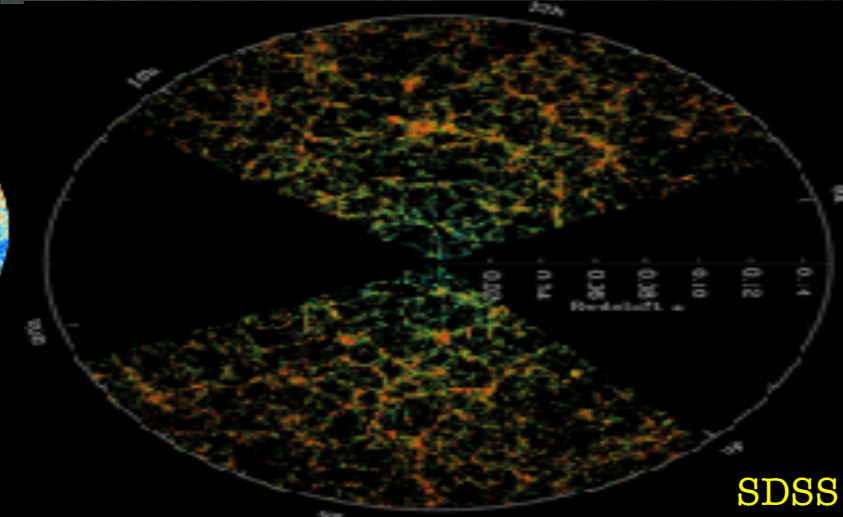
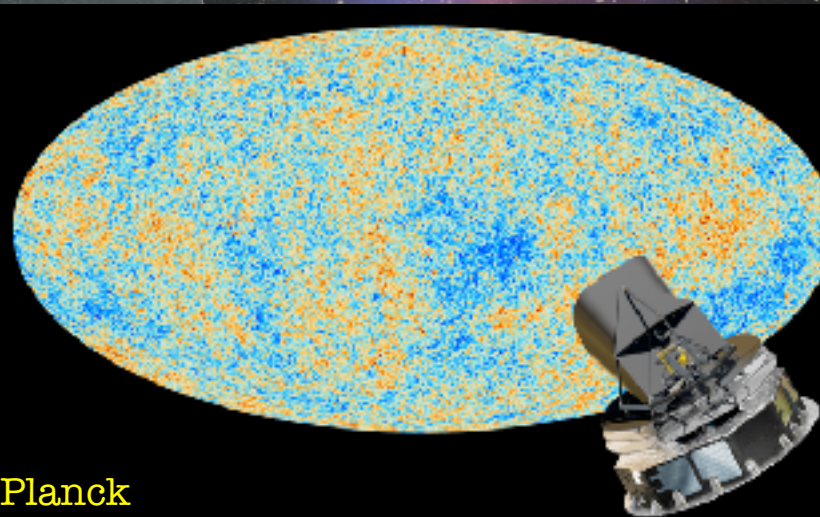
1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies



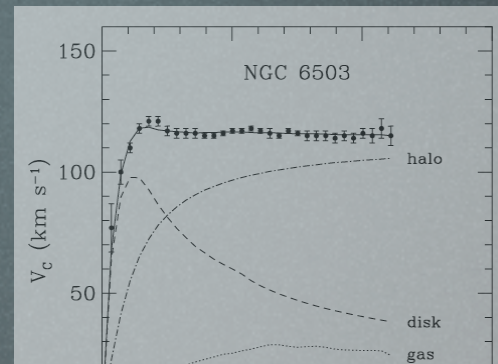
3) 'cosmologie de précision'





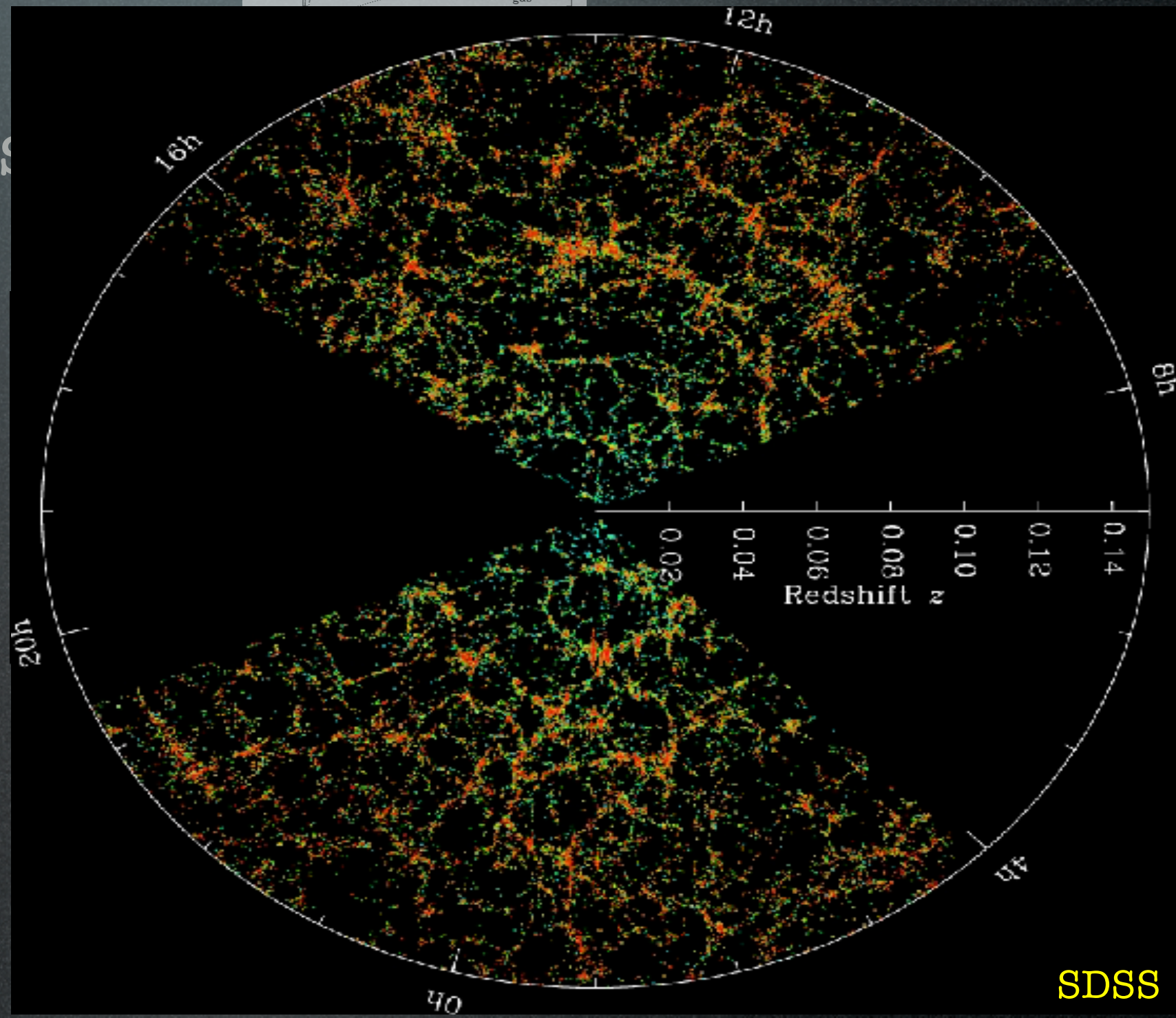
# Preuves d'existence

1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies

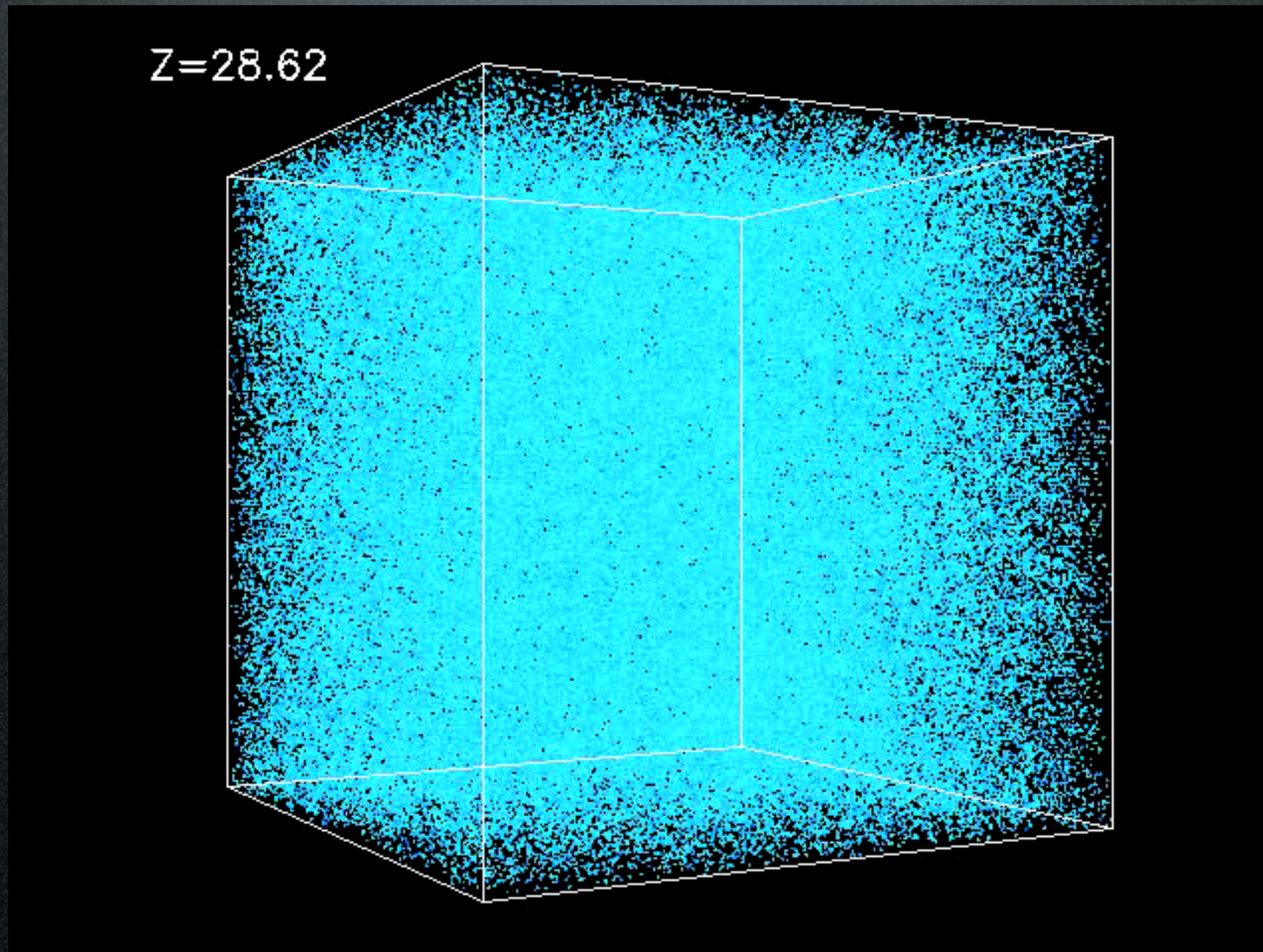
3) 'cosmologie de précision'





# Preuves d'existence

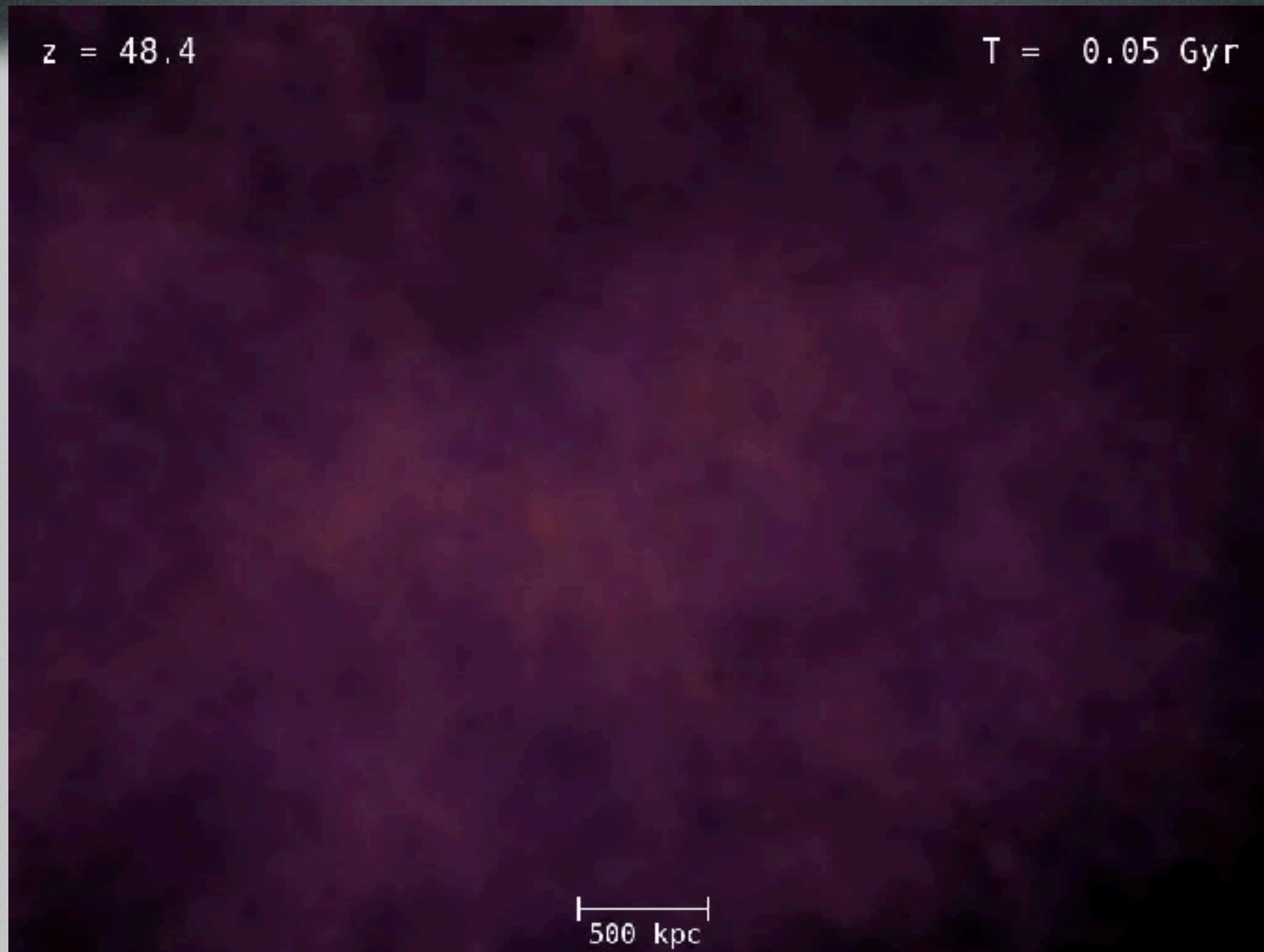
$2 \cdot 10^6$  CDM particules, 43 Mpc cubic box





# Preuves d'existence

Projet Aquarius de la collaboration VIRGO:  
1.5  $10^9$  CDM particules, un seul halo galactique

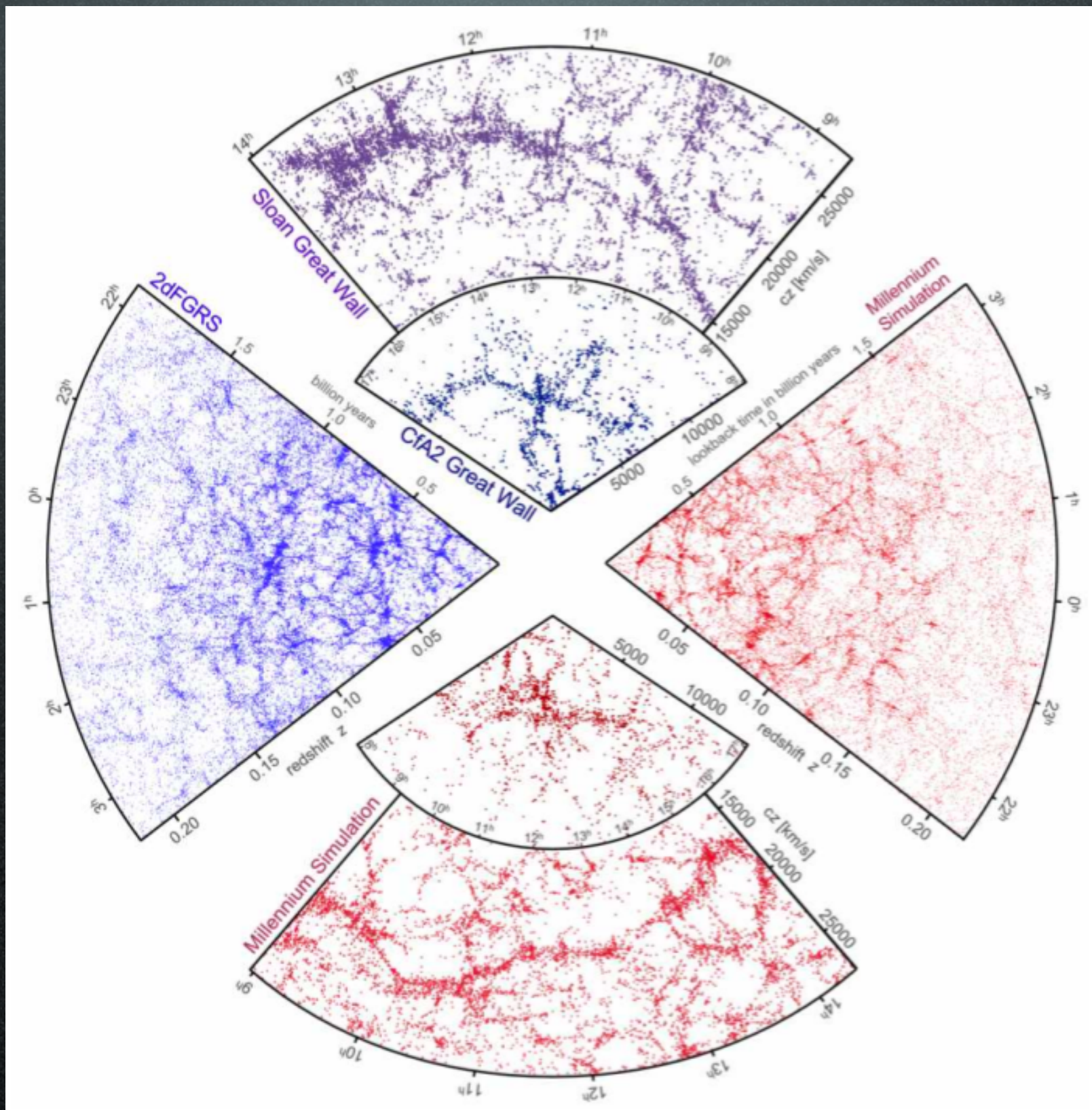




# Preuves d'existence

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

SDSS:  $10^6$  galaxies,  
2 billions  
d'années lumière



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

Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)

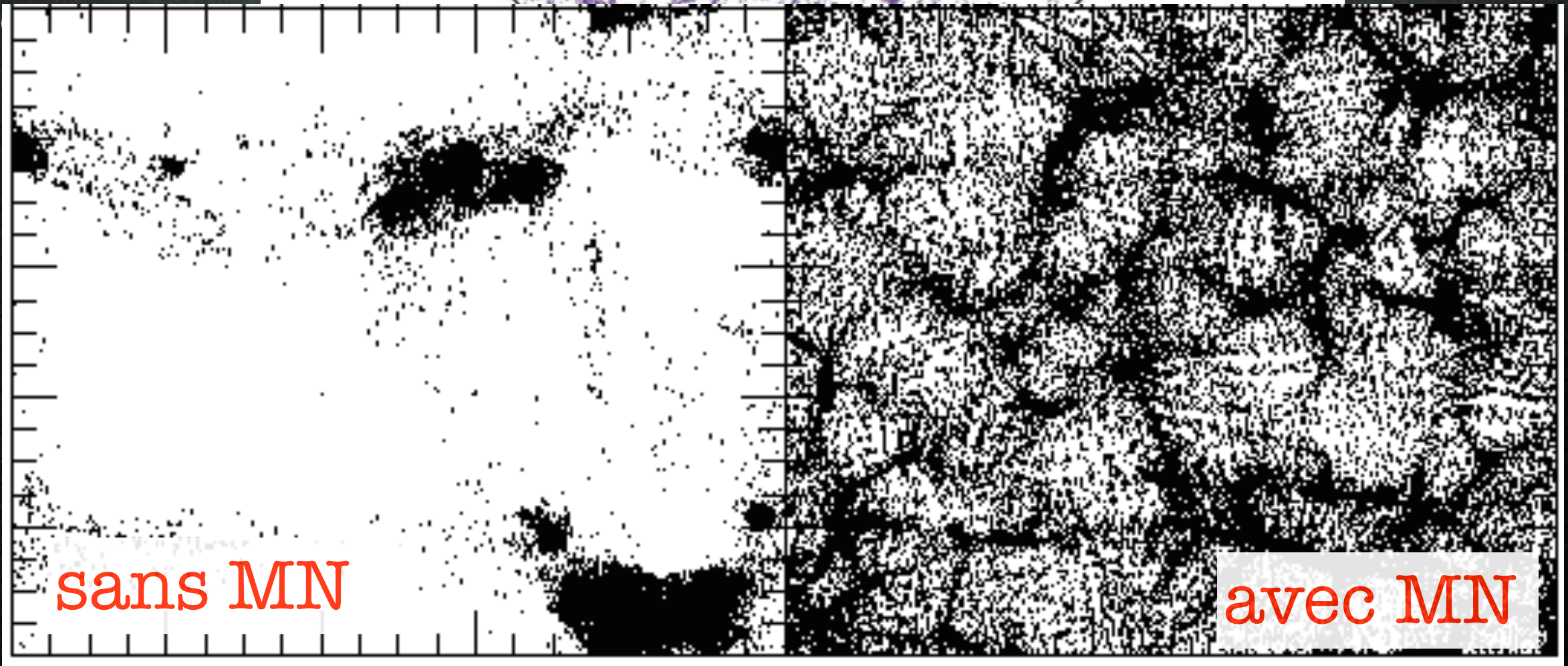
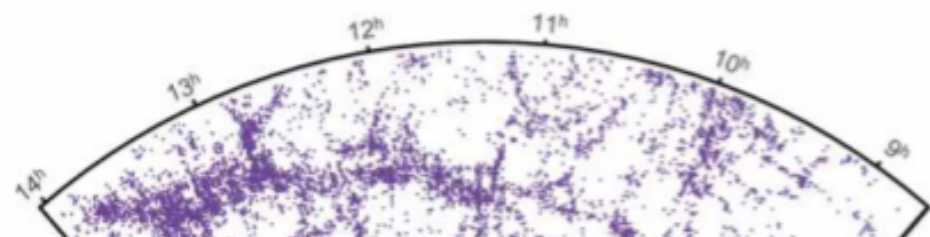


# Preuves d'existence

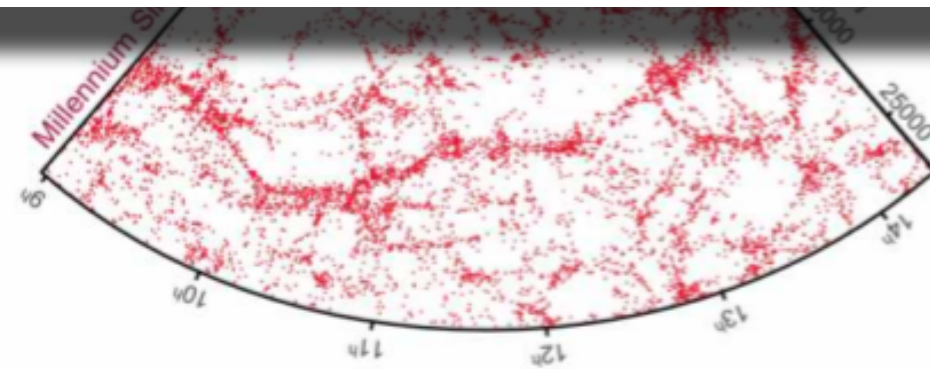
2dF:  $2.2 \cdot 10^5$  galaxies

SDSS:  $10^6$  galaxies,  
2 billions

d'ann



A. Nusser, 0109016, MNRAS 331 (2002)



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

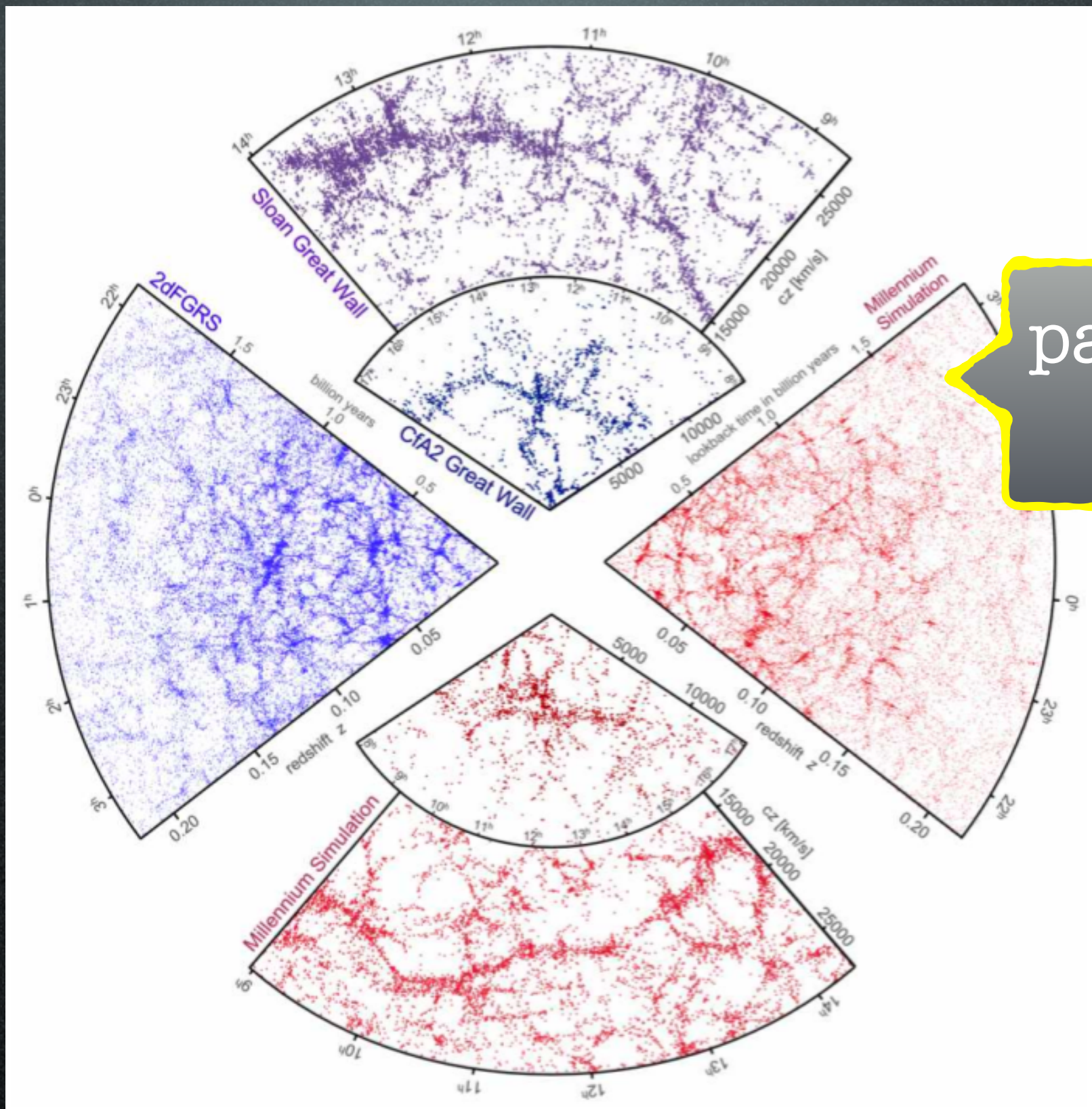
Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)



# Preuves d'existence

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

SDSS:  $10^6$  galaxies,  
2 billions  
d'années lumière



particules

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

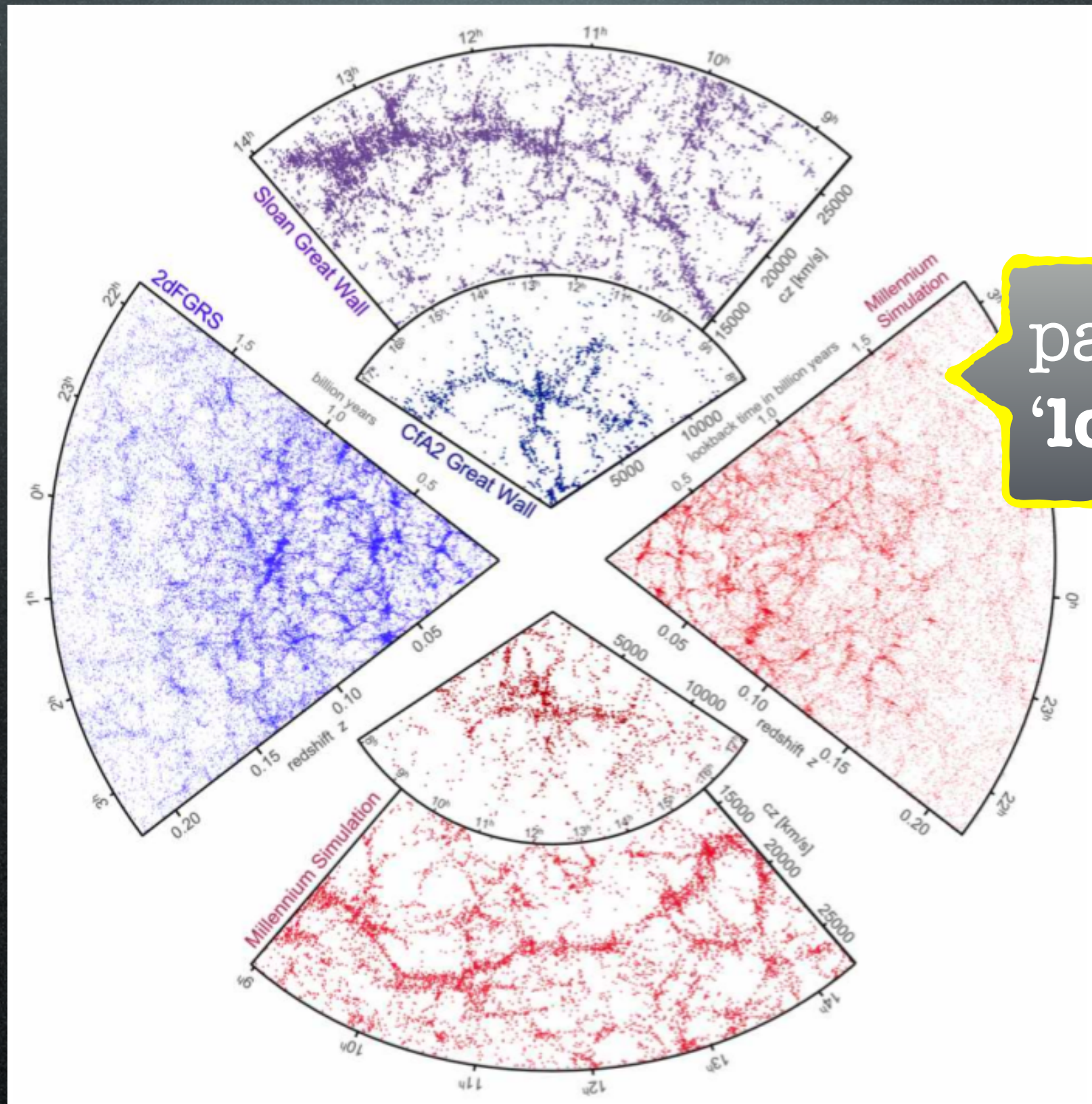
Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)



# Preuves d'existence

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

SDSS:  $10^6$  galaxies,  
2 billions  
d'années lumière



particules  
**'lourdes'**

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

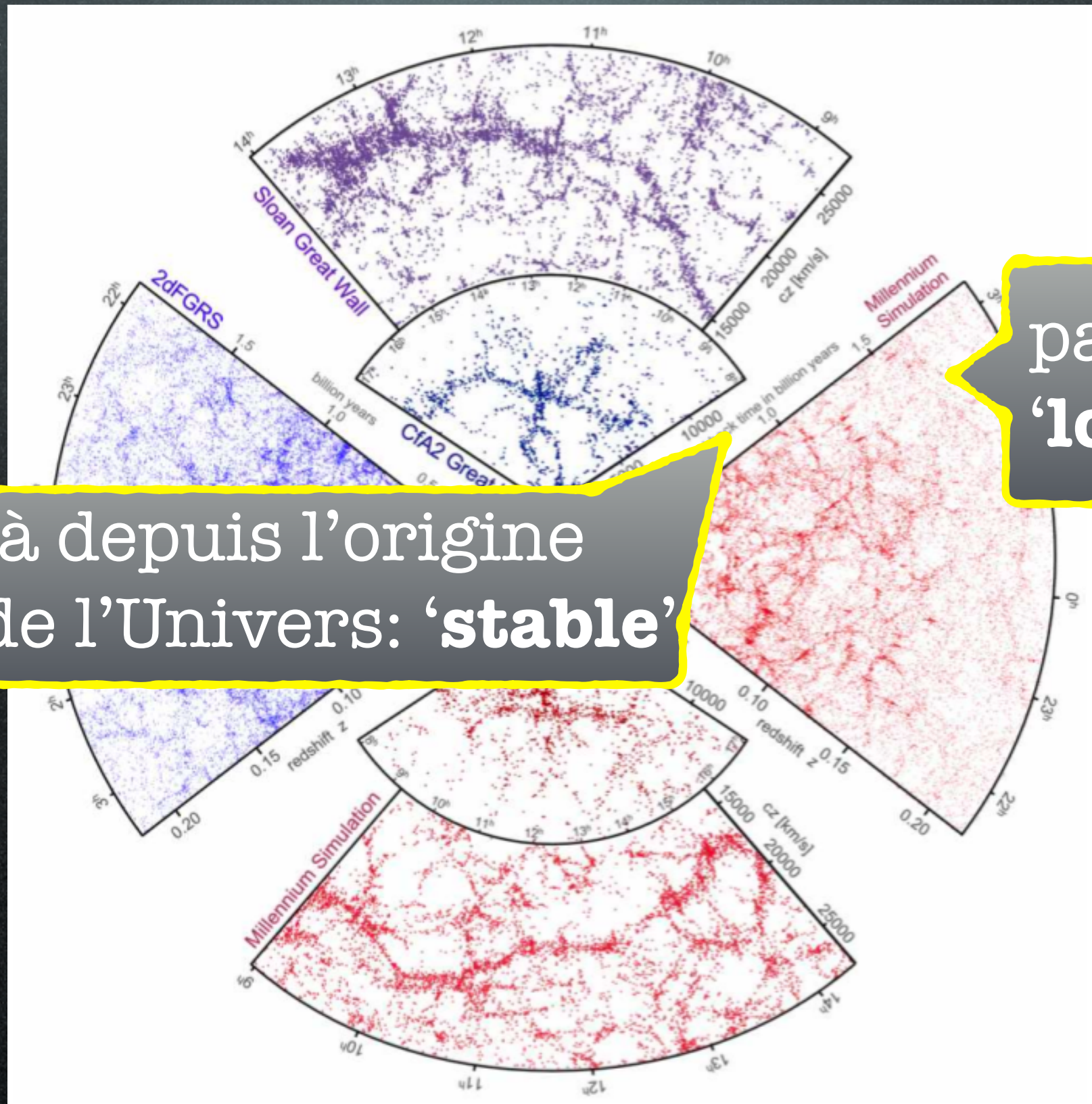
Springel, Frenk, White, Nature 440 (2006)



# Preuves d'existence

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

SDSS:  $10^6$  galaxies,  
2 billions  
d'années lumière



là depuis l'origine  
de l'Univers: **'stable'**

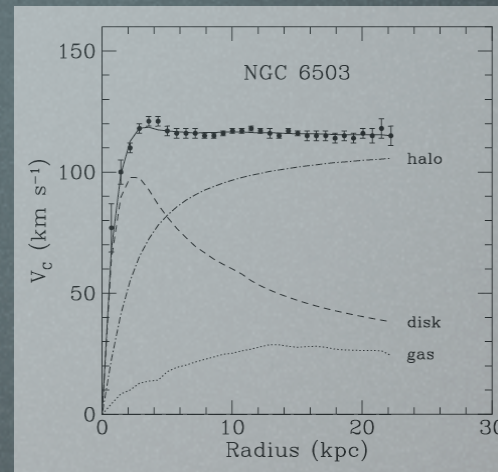
particules  
**'lourdes'**

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

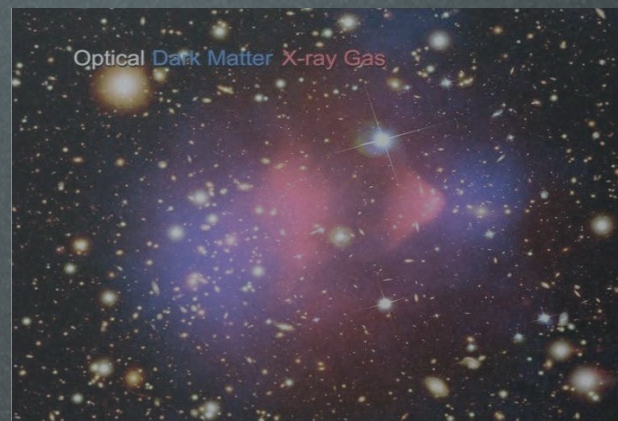


# Preuves d'existence

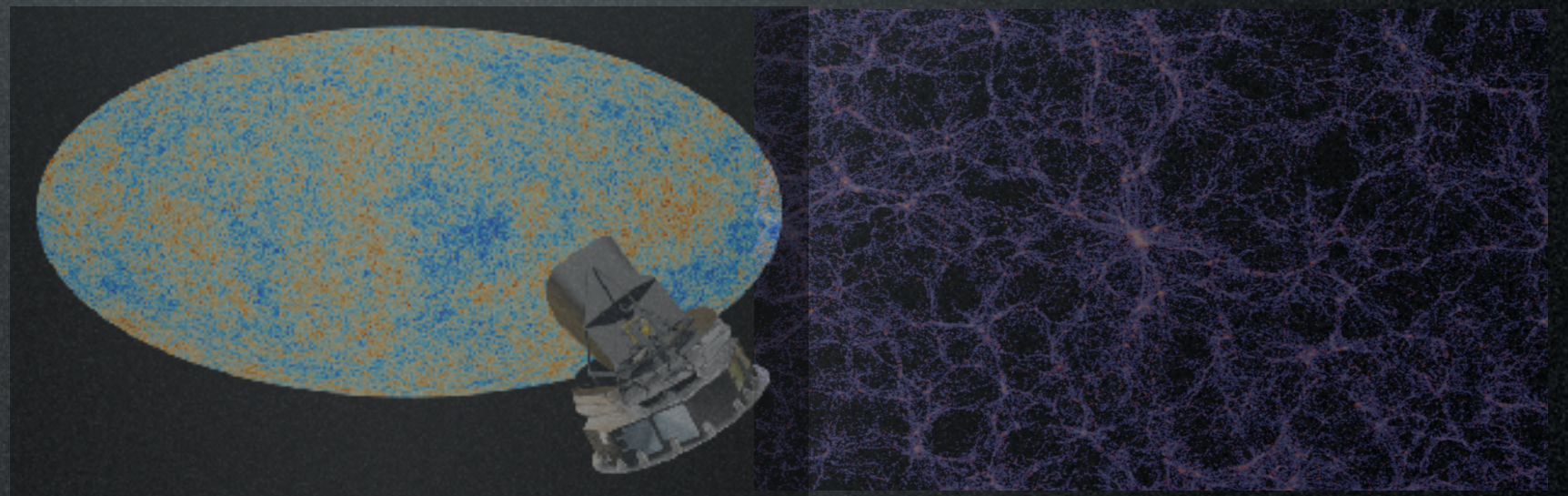
1) courbes de rotation galactiques



2) clusters of galaxies



3) 'cosmologie de précision'





# Propriétés et nature

n'émet pas de lumière,  
elle est '**neutre**'

particules  
'**lourdes**'

là depuis l'origine  
de l'Univers: '**stable**'

plus abondante  
que la matière  
ordinaire

aucune ou très peu  
d'interaction



# Propriétés et nature

particules  
**'lourdes'**

**'neutre'**

**'stable'**

presque sans  
interactions



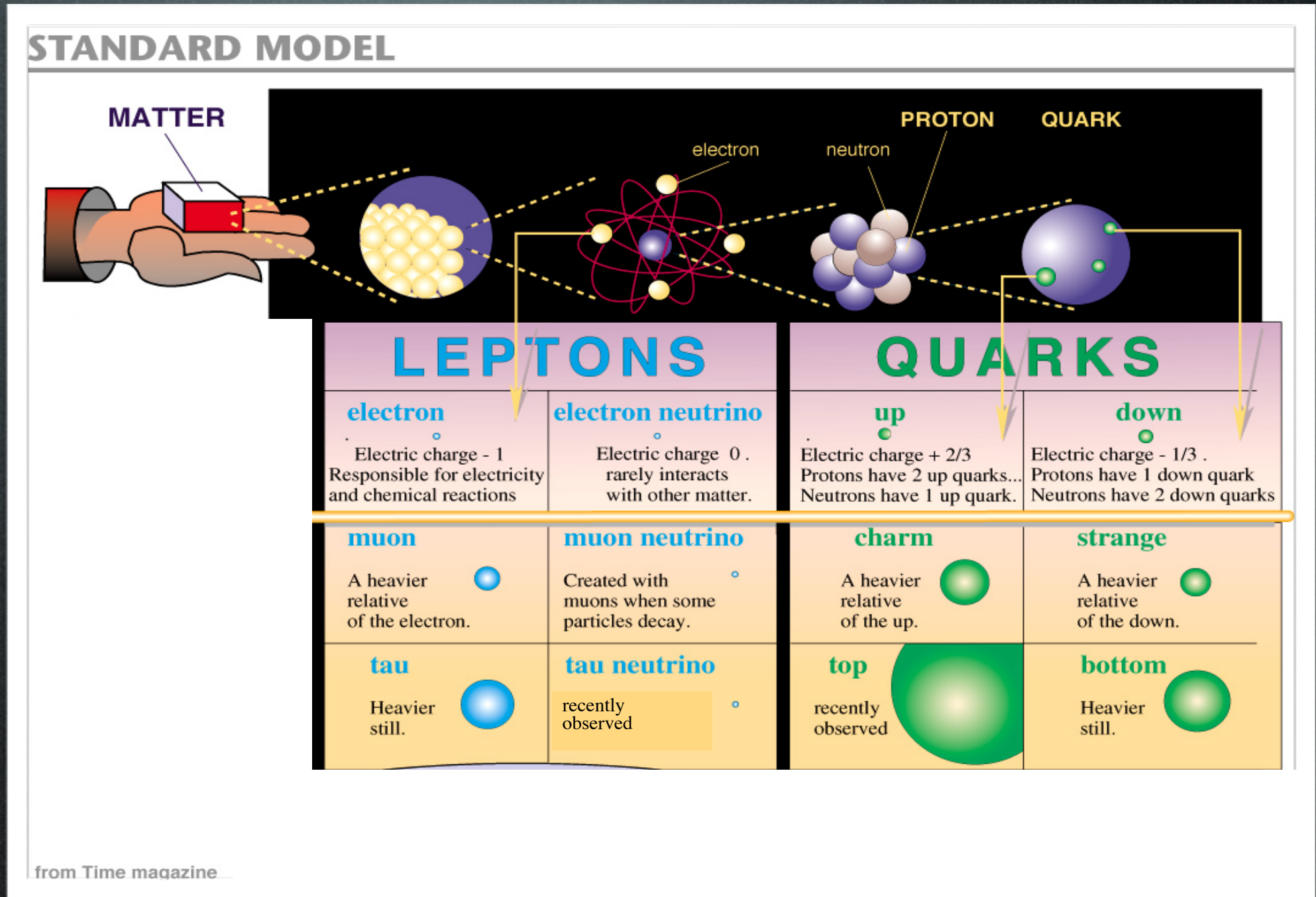
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





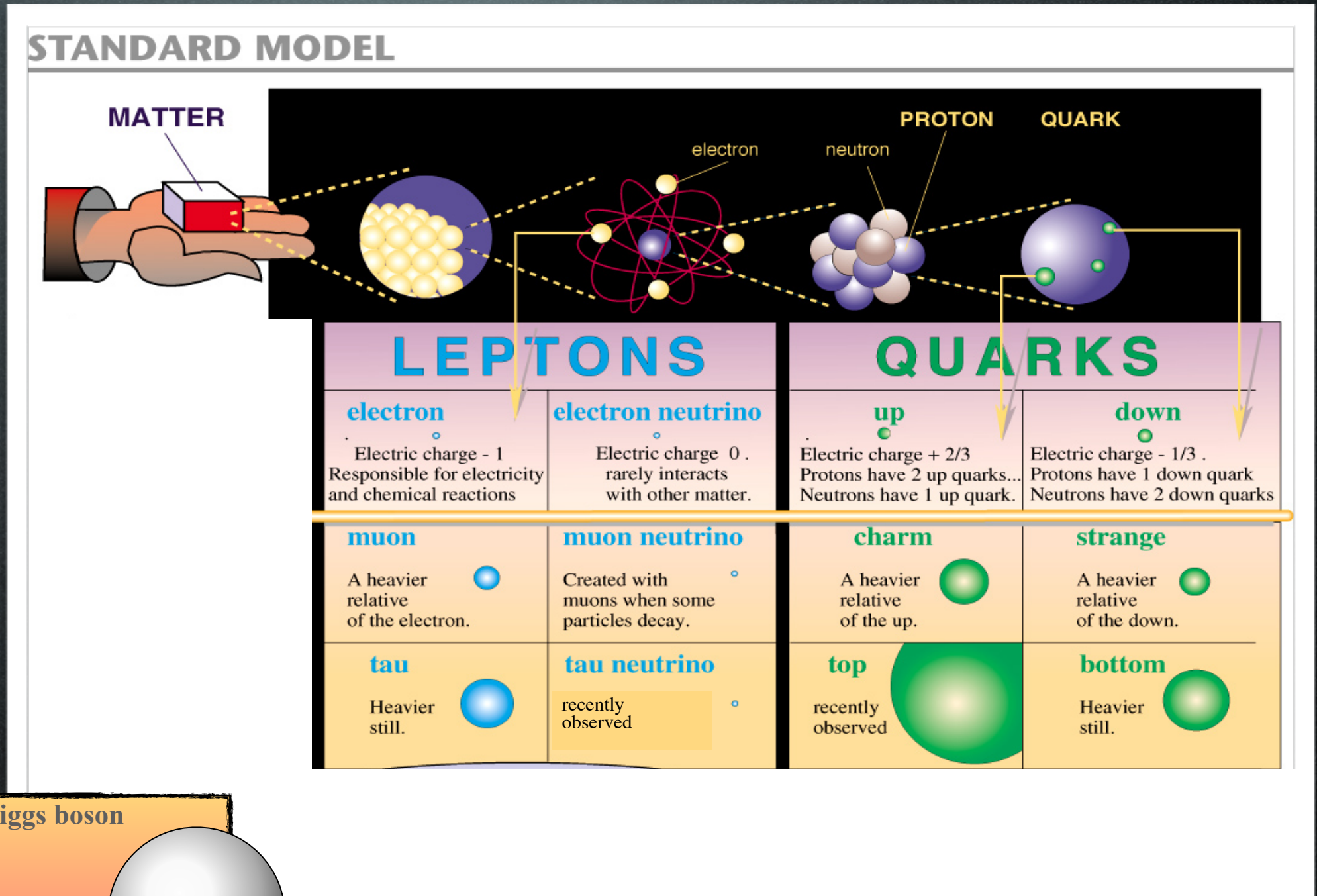
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





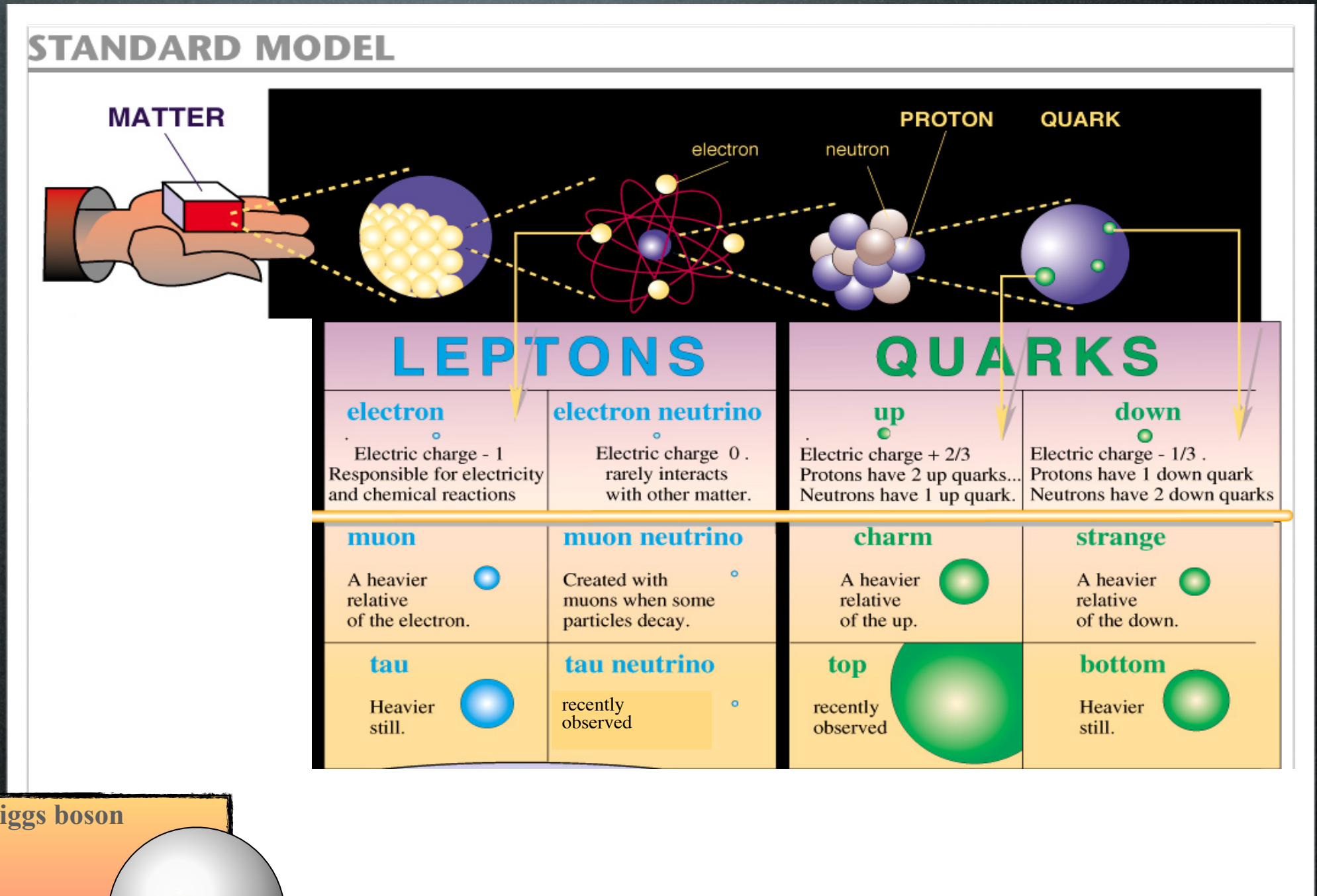
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





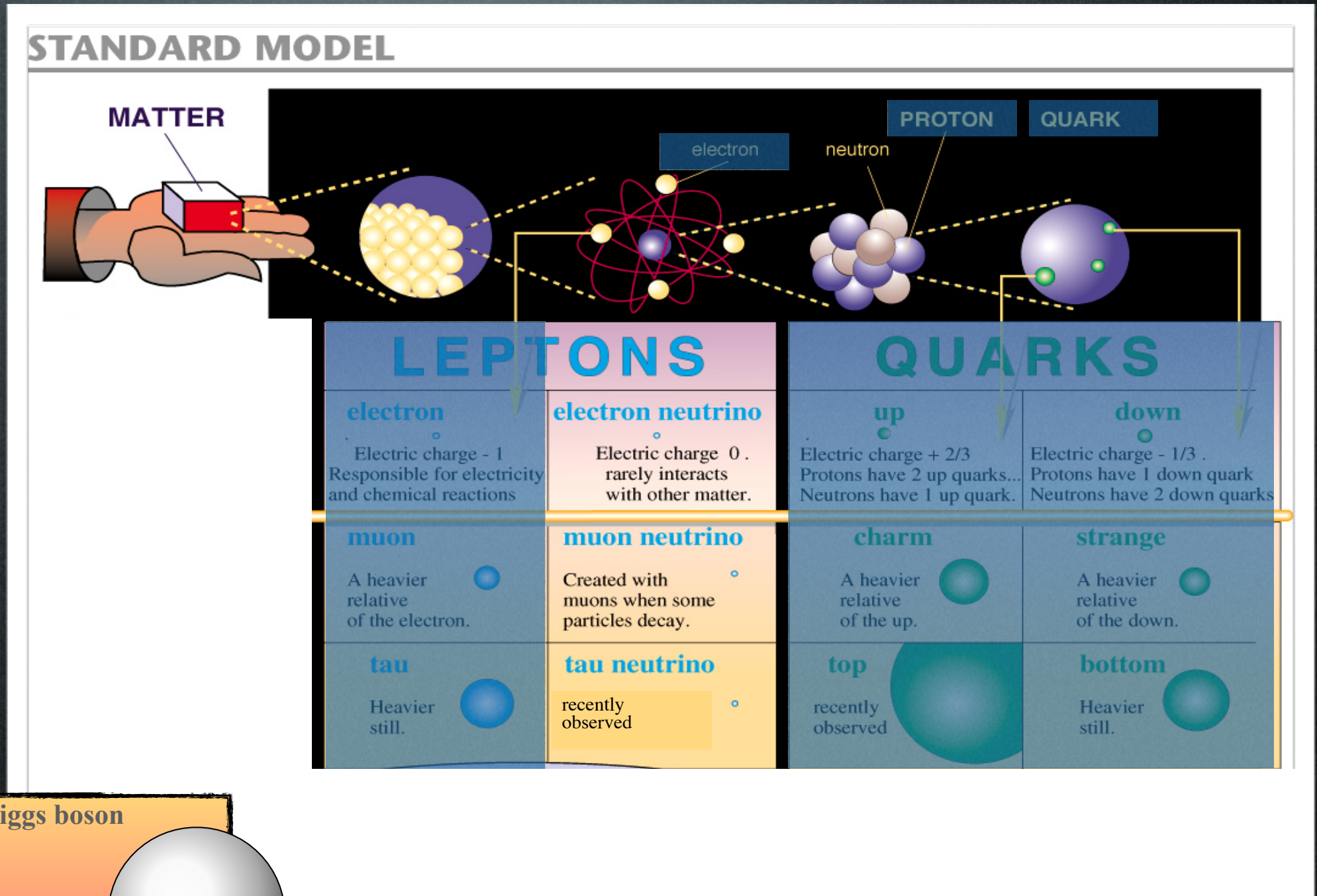
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





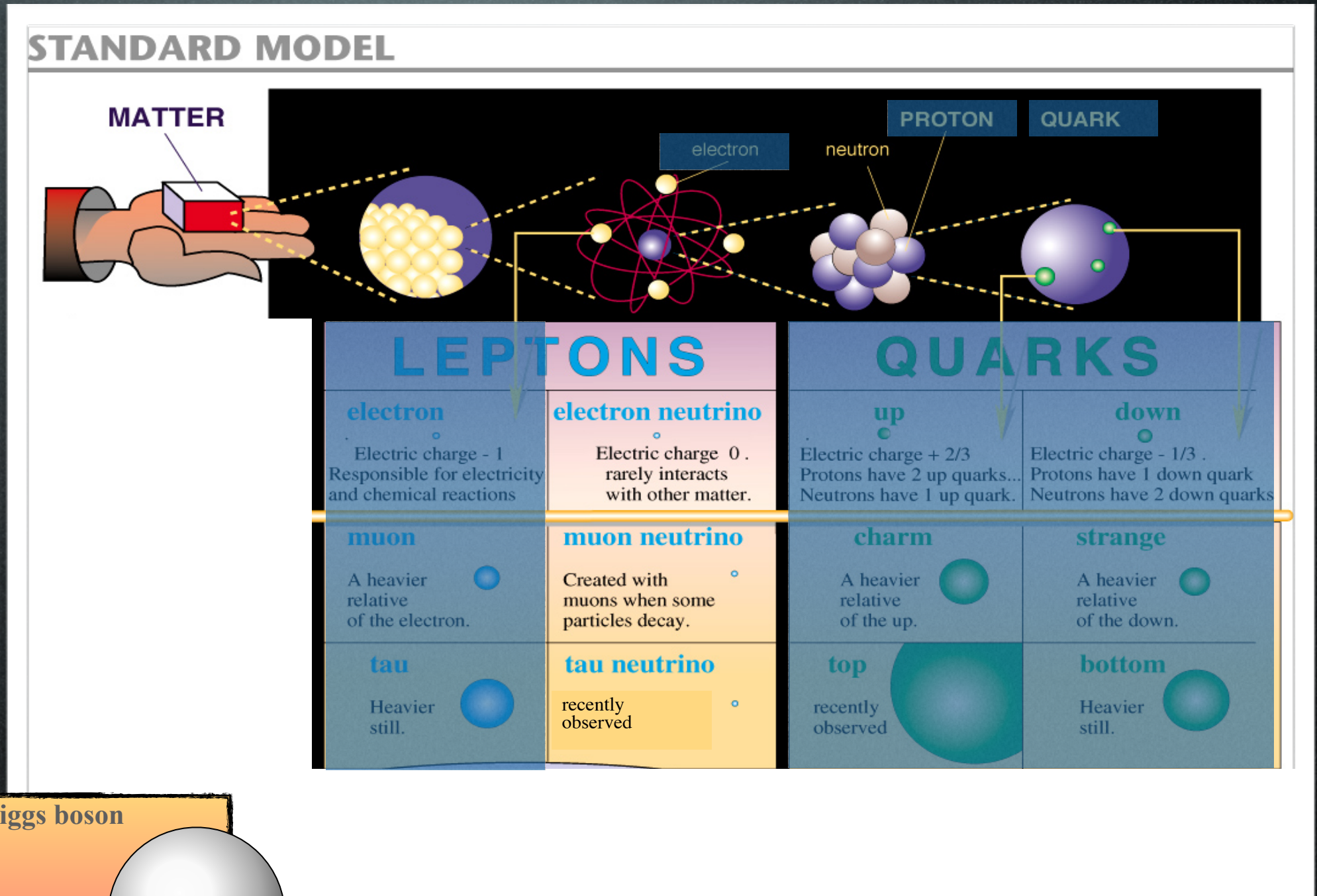
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





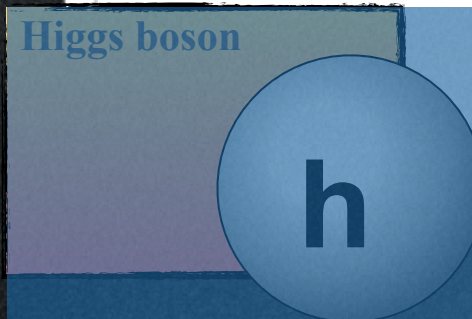
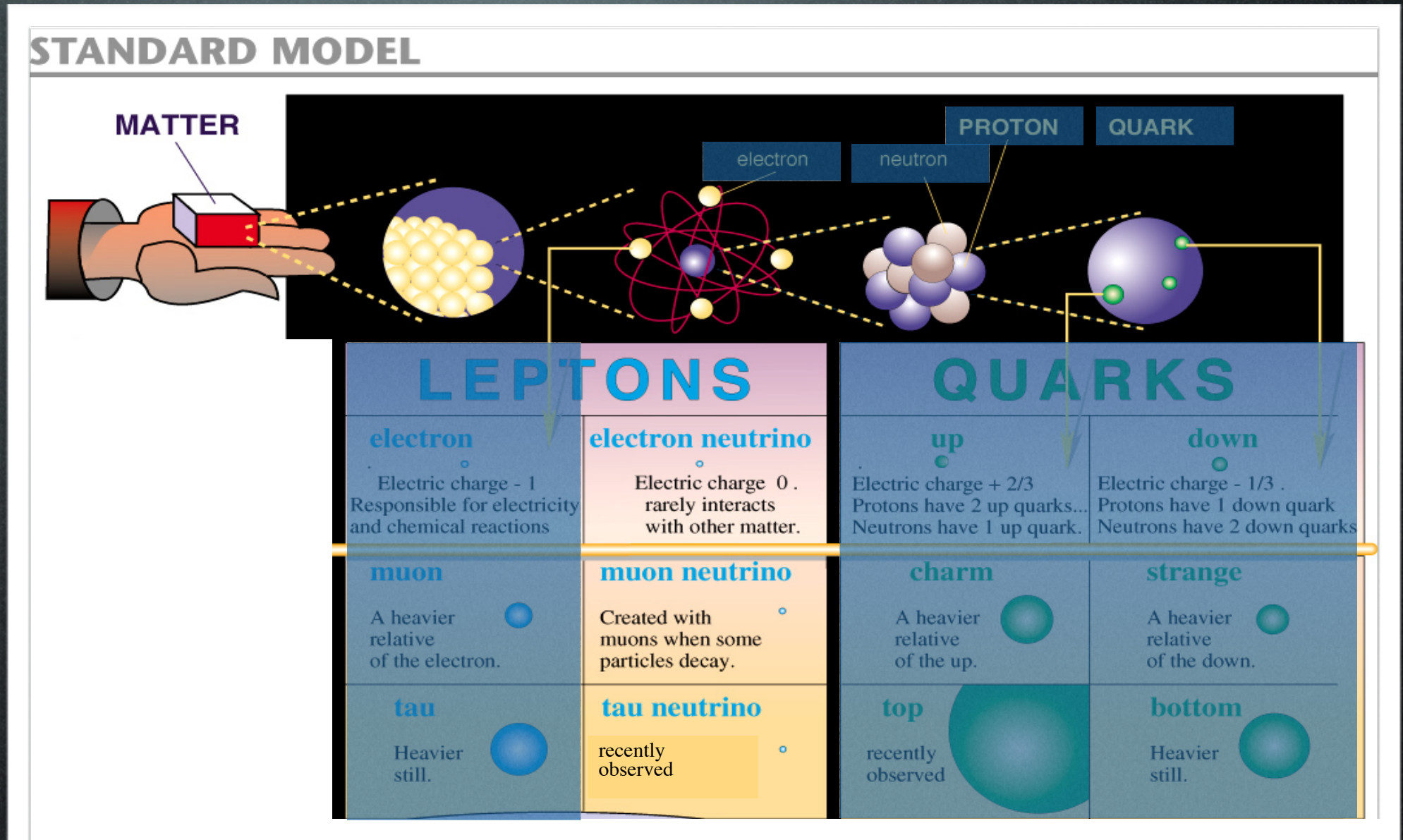
# Propriétés et nature

particules  
'lourdes'

'neutre'

'stable'

presque sans  
interactions





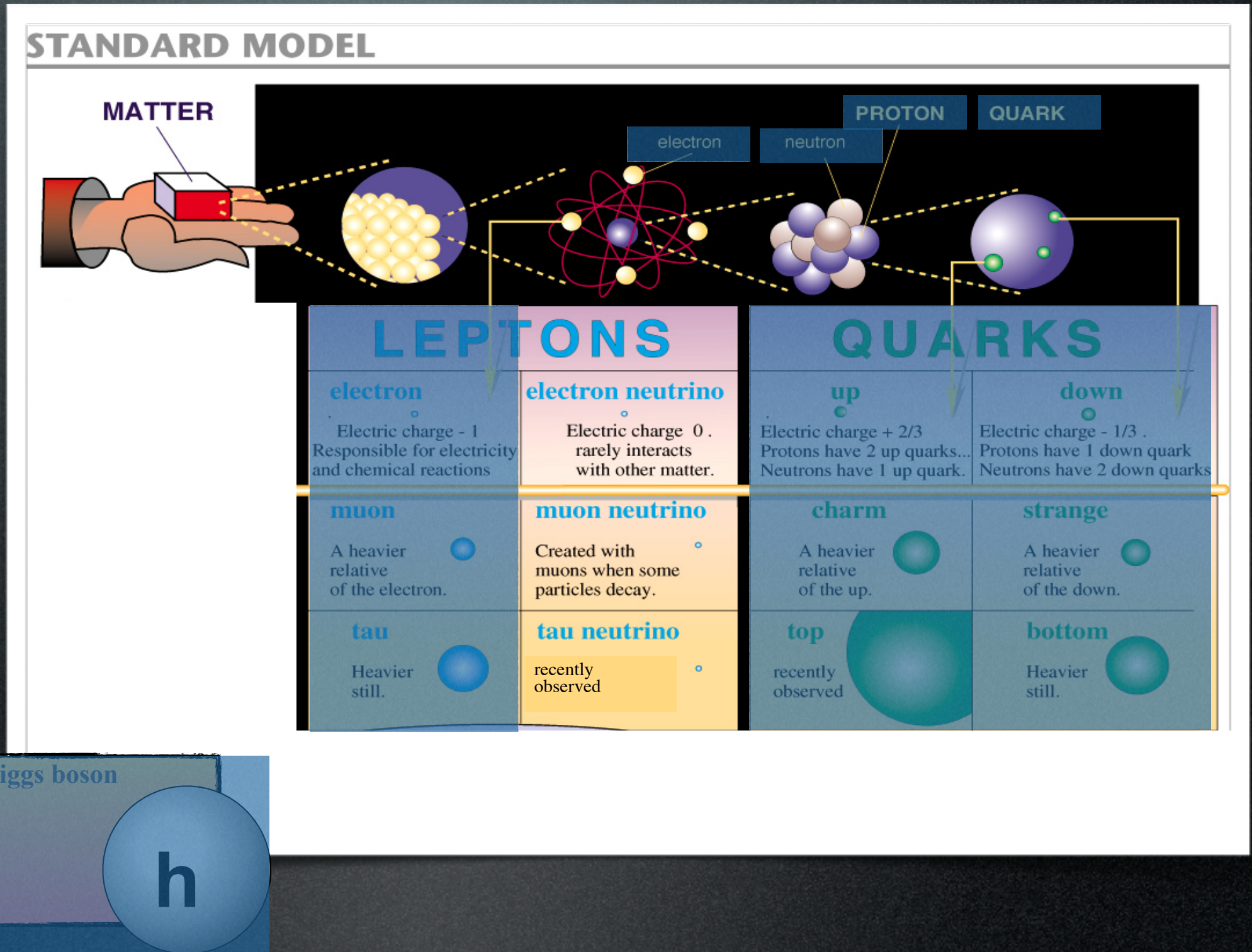
# Propriétés et nature

particules  
'**lourdes**'

'**neutre**'

'**stable**'

presque sans  
interactions





# MIN chaude (neutrinos)

Z=32.33



pas de HDM

$$\sum m_\nu = 0$$



un peu de HDM

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

$\Lambda$ CDM - Gadget2 - 768 Mpc<sup>3</sup>



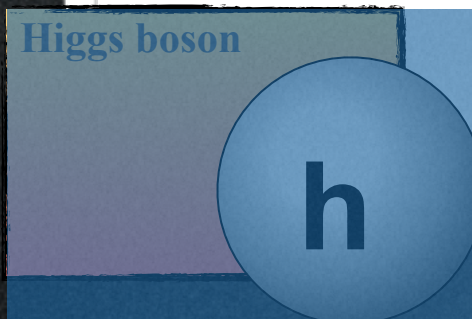
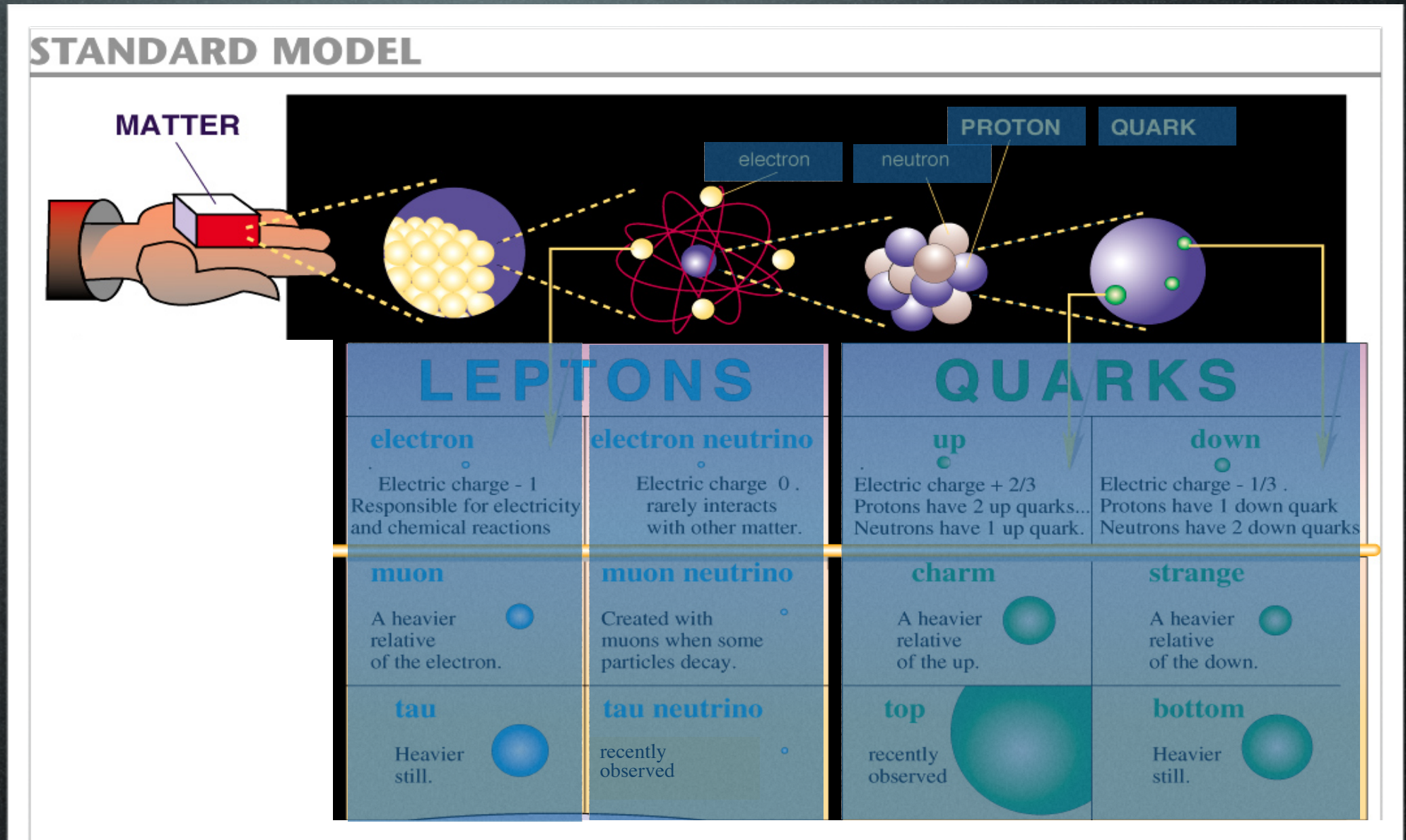
# Propriétés et nature

particules  
'**lourdes**'

'**neutre**'

'**stable**'

presque sans  
interactions





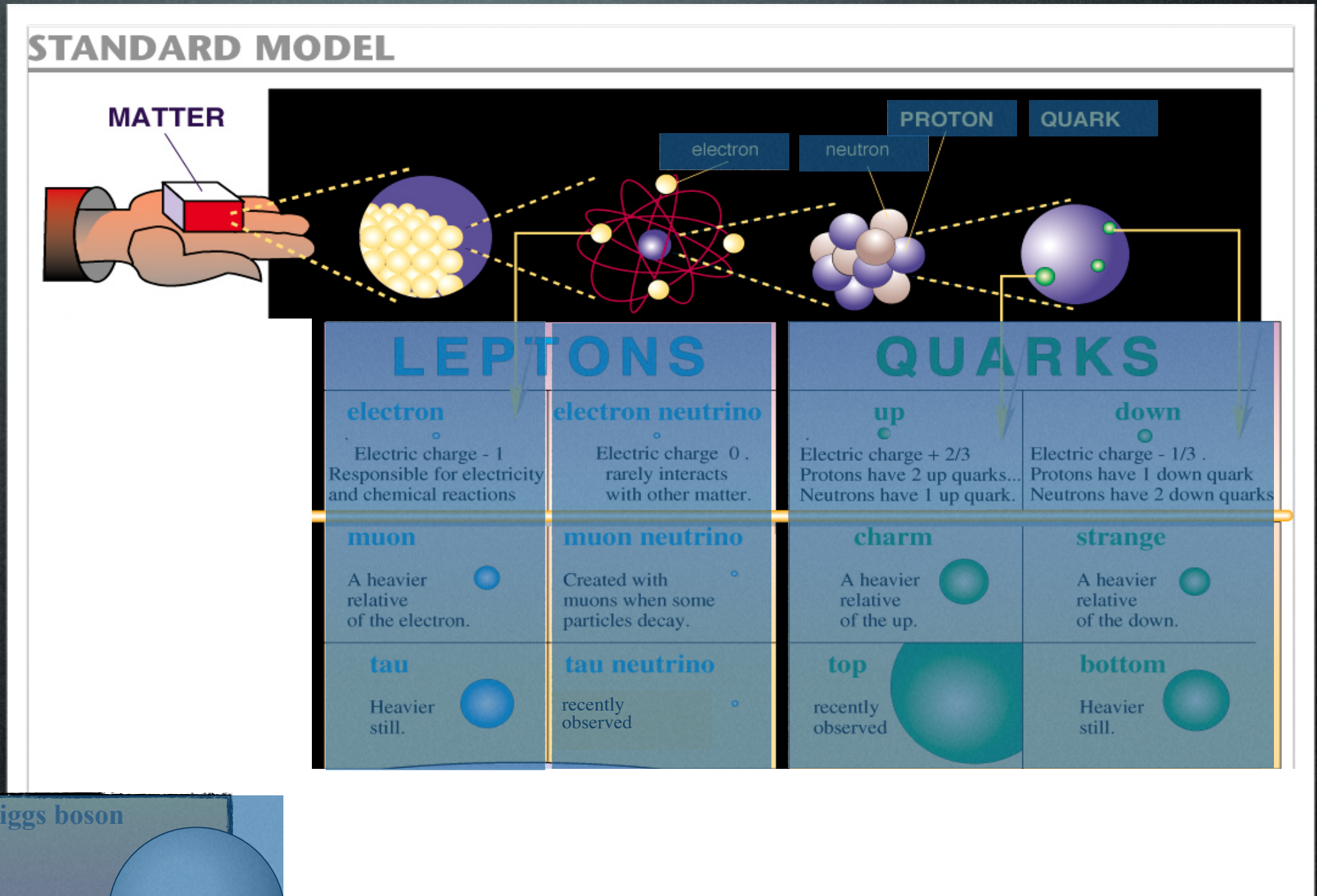
# Propriétés et nature

particules  
**‘lourdes’**

**‘neutre’**

**‘stable’**

presque sans  
interactions



une **nouvelle** particule,  
encore **inconnue**







La MN **ne** peut **pas** être:

un *truc bizarre* astrophysique:



# La MN **ne** peut **pas** être:

un *truc bizarre* astrophysique:

- gaz
- Trous Noirs
- naines brunes...



# La MN **ne** peut **pas** être:

un *truc bizarre* astrophysique:

- ~~gaz~~

- Trous Noirs

- naines brunes...



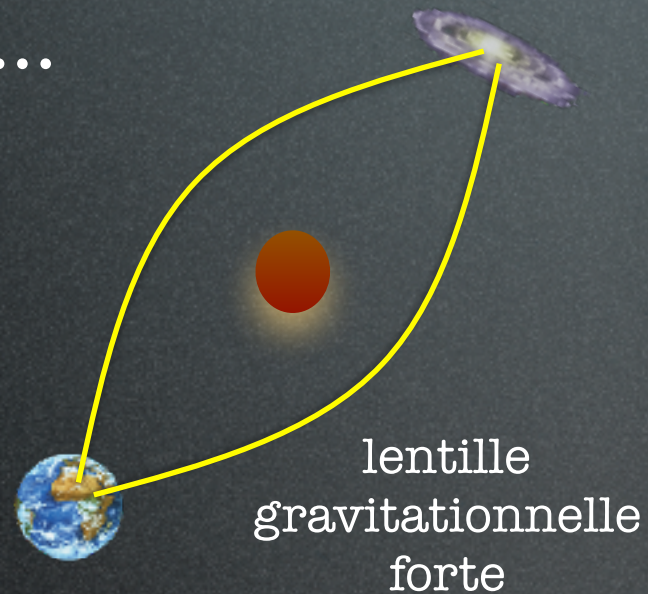
# La MN **ne** peut **pas** être:

un *truc bizarre* astrophysique:

- ~~gaz~~

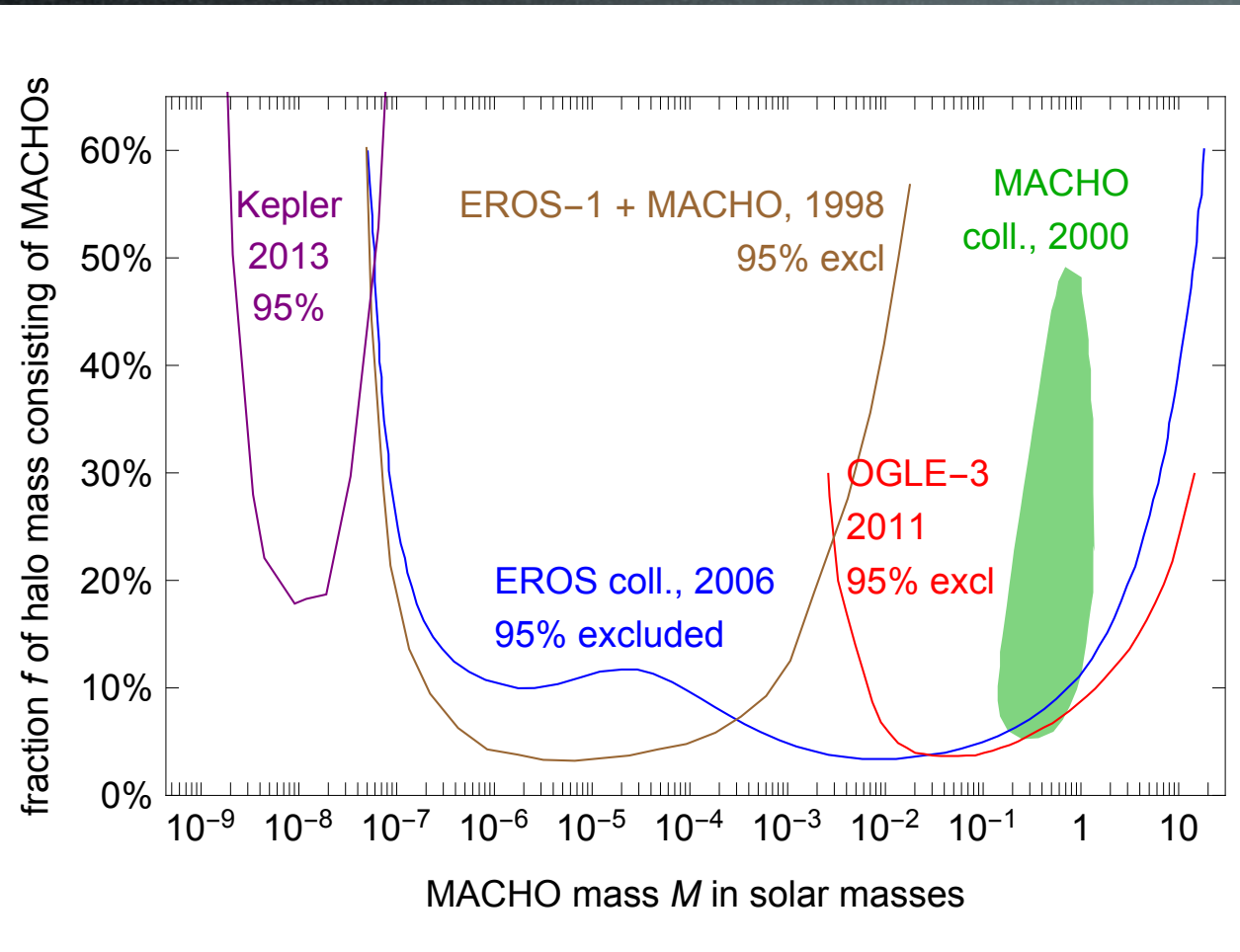
- ~~Trous Noirs~~

- ~~naines brunes...~~





# MACHOs





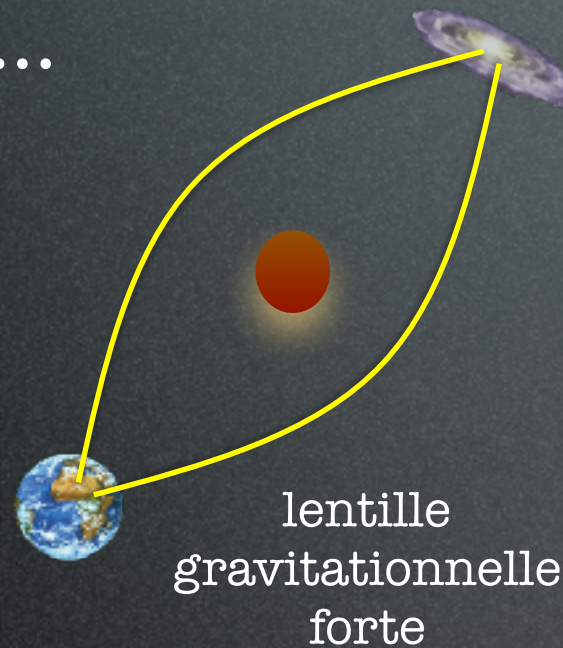
# La MN ne peut pas être:

un *truc bizarre* astrophysique:

~~- gaz~~

~~- Trous Noirs~~

~~- naines brunes...~~



un baryon du MS:

- BBN (nucleosynthèse primordiale) prédit l'abundance de He à partir des baryons: trop de baryons = trop de He
- CMB (fond diffus cosmologique) confirme: 4% de baryons maximum



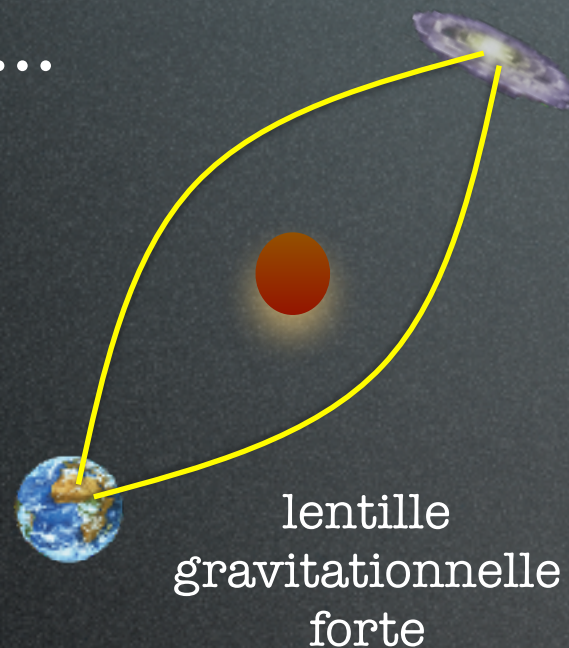
# La MN ne peut pas être:

un *truc bizarre* astrophysique:

~~- gaz~~

~~- Trous Noirs~~

~~- naines brunes...~~



~~un baryon du MS:~~

- BBN (nucleosynthèse primordiale) prédit l'abundance de He à partir des baryons: trop de baryons = trop de He
- CMB (fond diffus cosmologique) confirme: 4% de baryons maximum



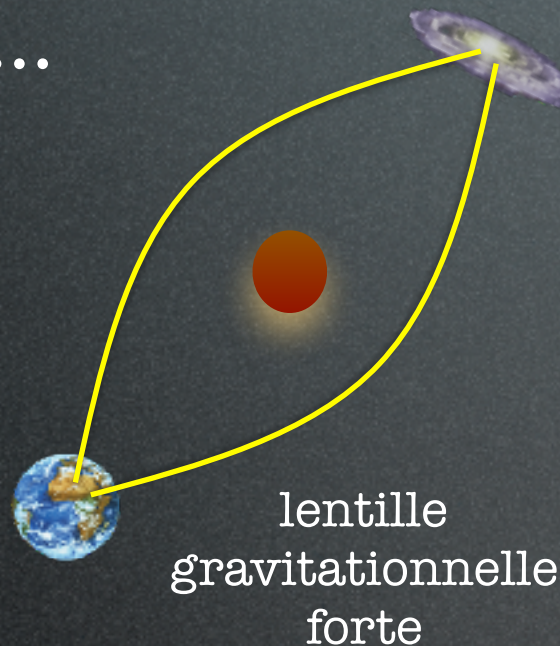
# La MN **ne** peut **pas** être:

un *truc bizarre* astrophysique:

~~-  $g \ll Z$~~

~~- Trous Noirs~~

~~- naines brunes...~~



~~un baryon du MS:~~

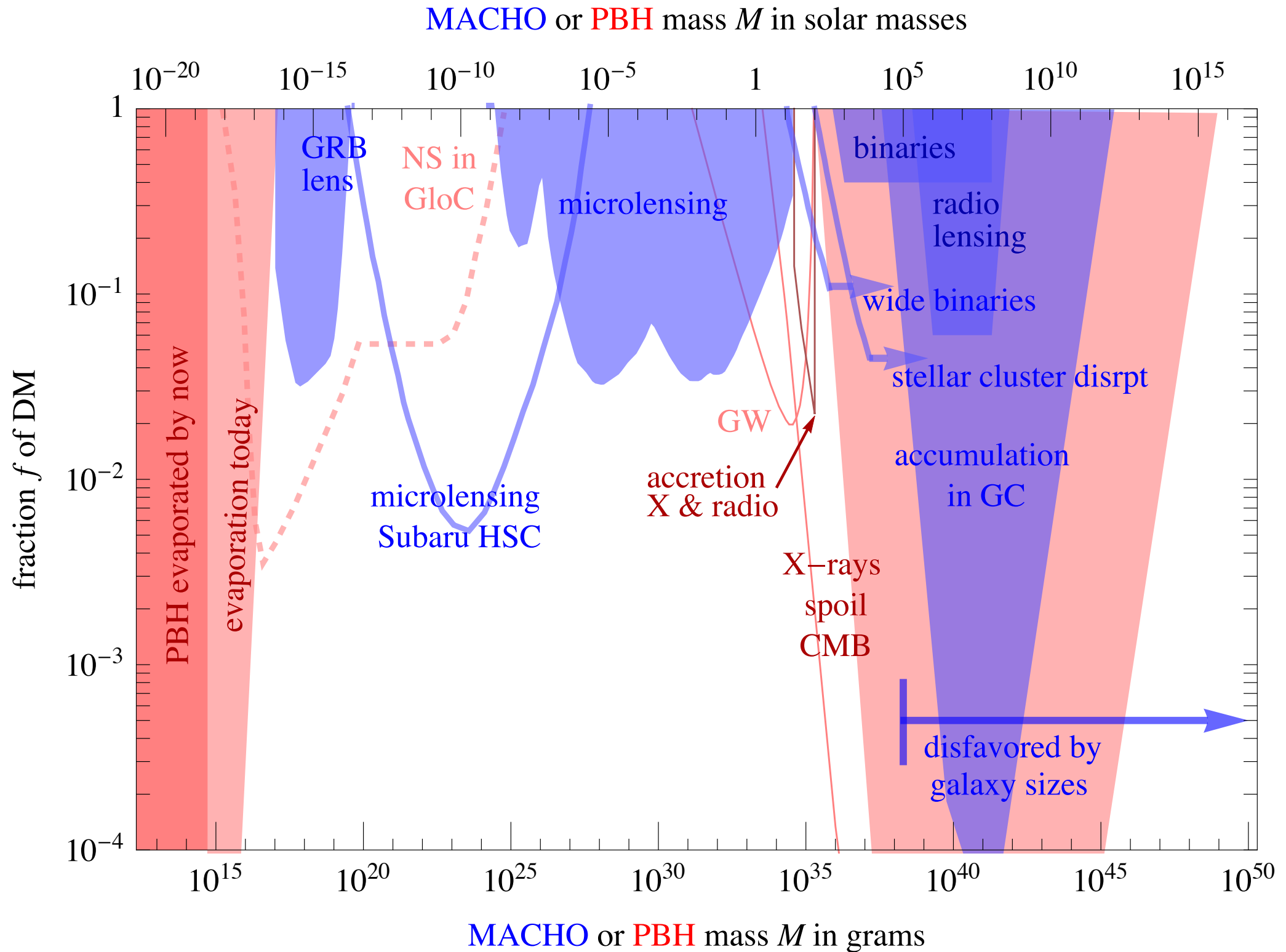
- BBN (nucleosynthèse primordiale) prédit l'abundance de He à partir des baryons: trop de baryons = trop de He
- CMB (fond diffus cosmologique) confirme: 4% de baryons maximum

**Escamotage:** Trous Noirs Primordiaux !

- créés avant la nucleosynthèse
- masse trop petite/grande pour faire lentille
- LIGO/VIRGO seraient-ils en train de les voir ?



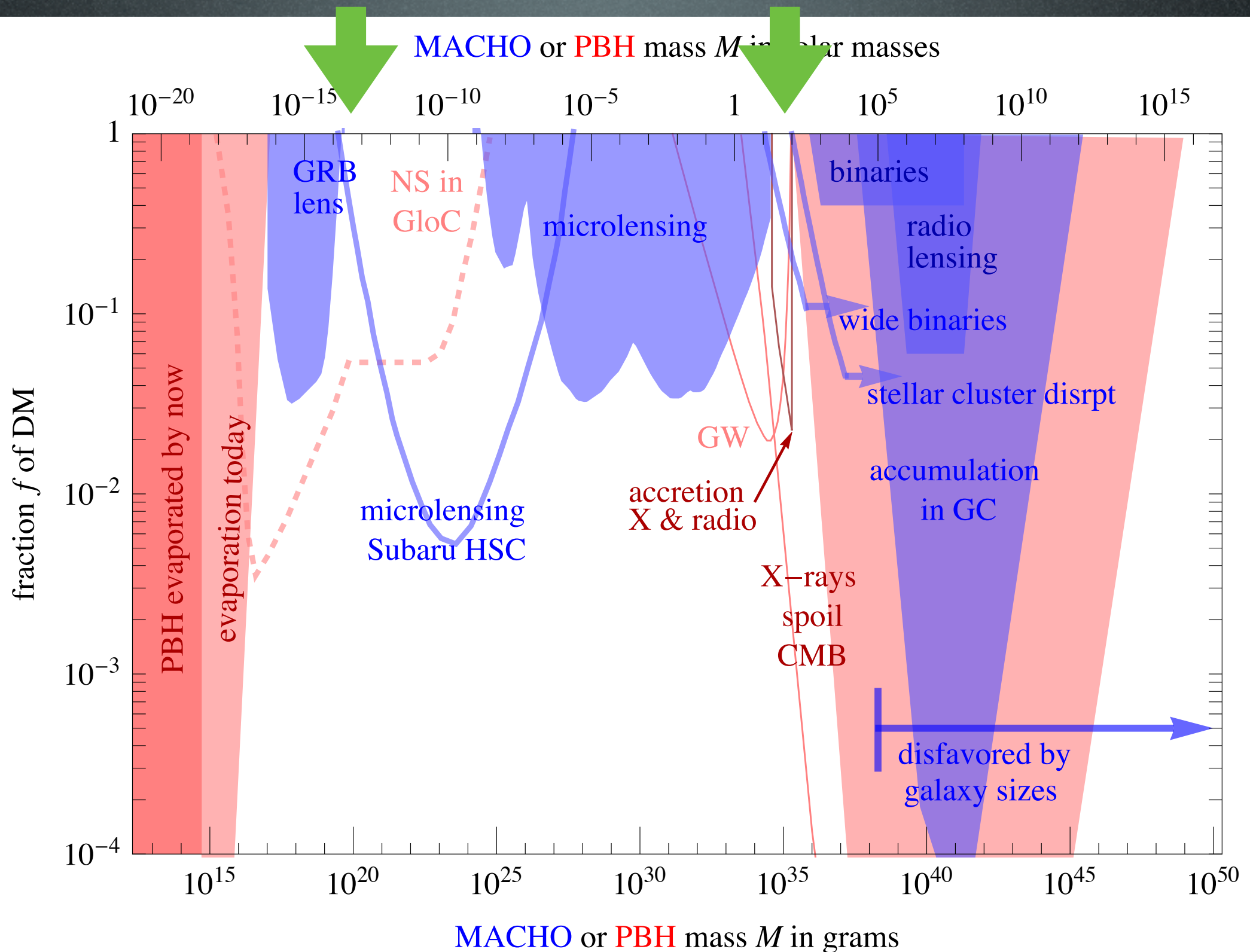
# La MN en PBHs





# La MN en PBHs

## fenêtres ouvertes?

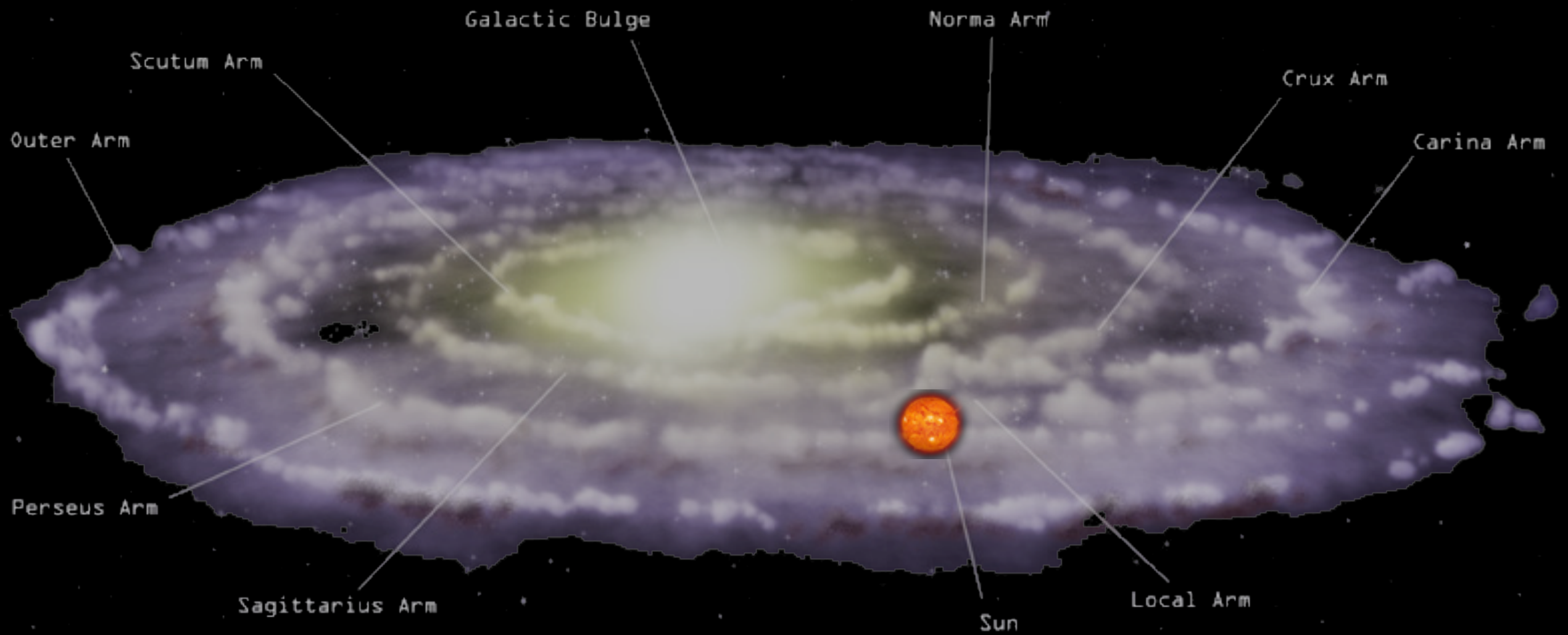








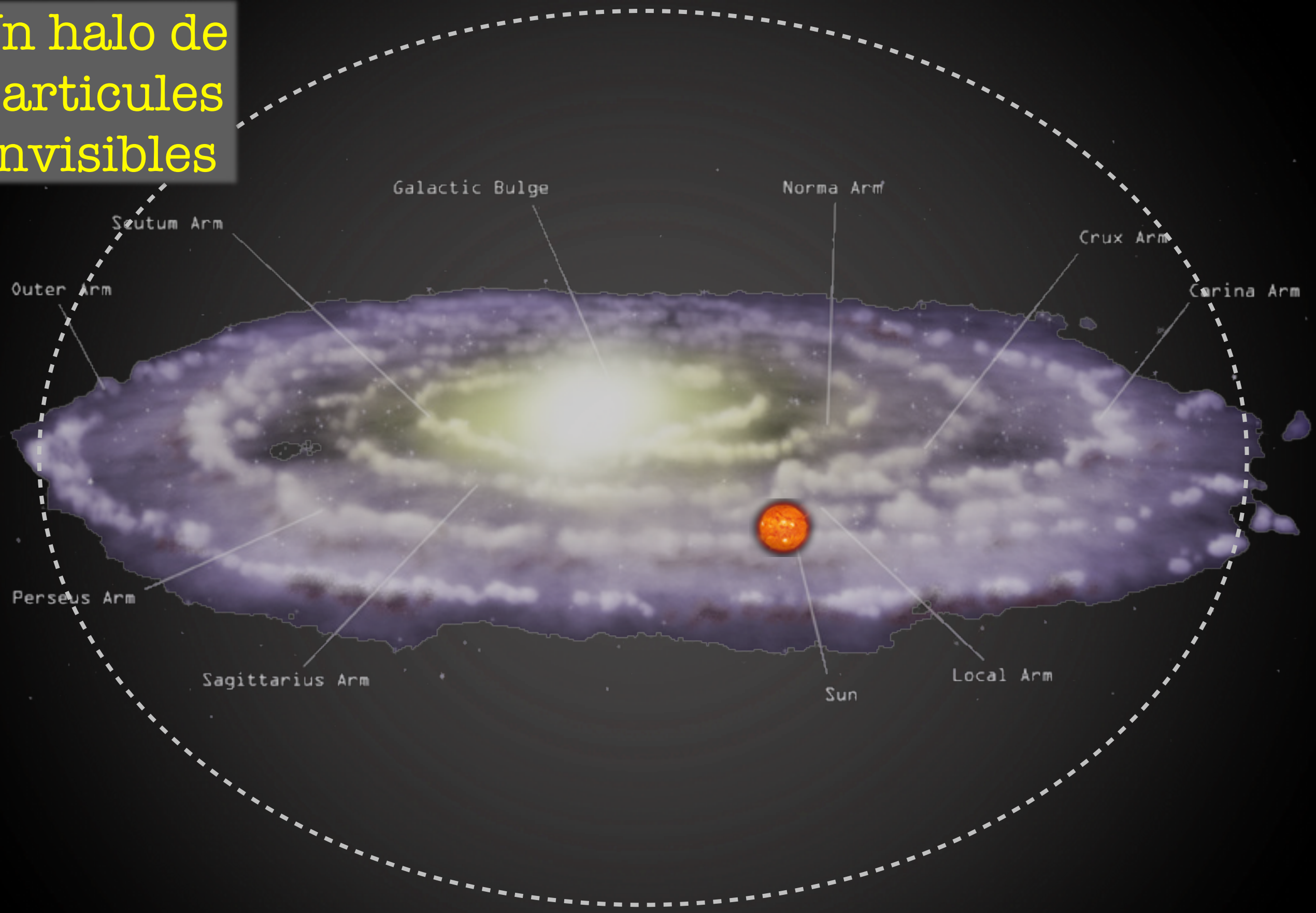
# Et dans la Voie Lactée ?





# Et dans la Voie Lactée ?

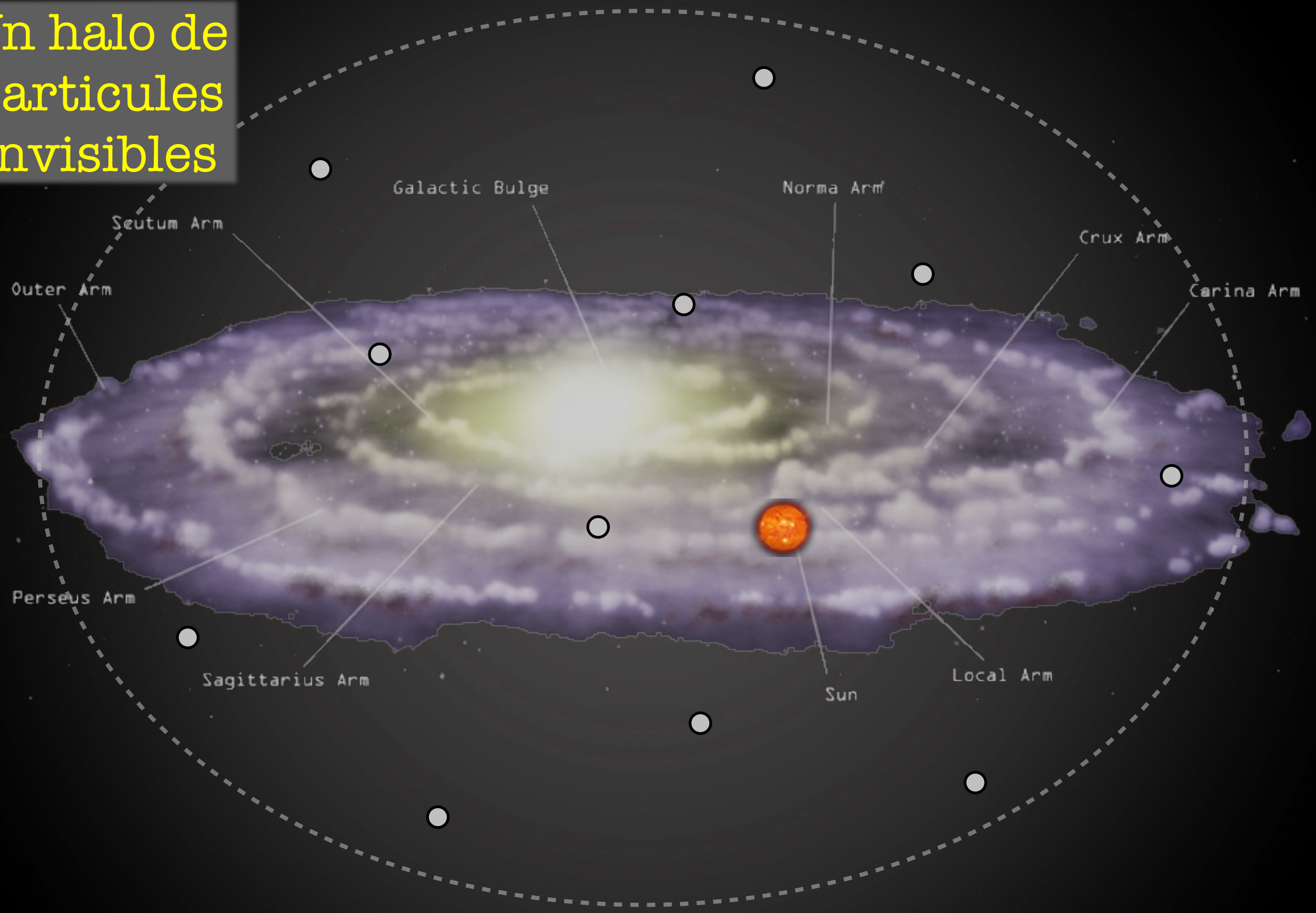
Un halo de  
particules  
invisibles





# Et dans la Voie Lactée ?

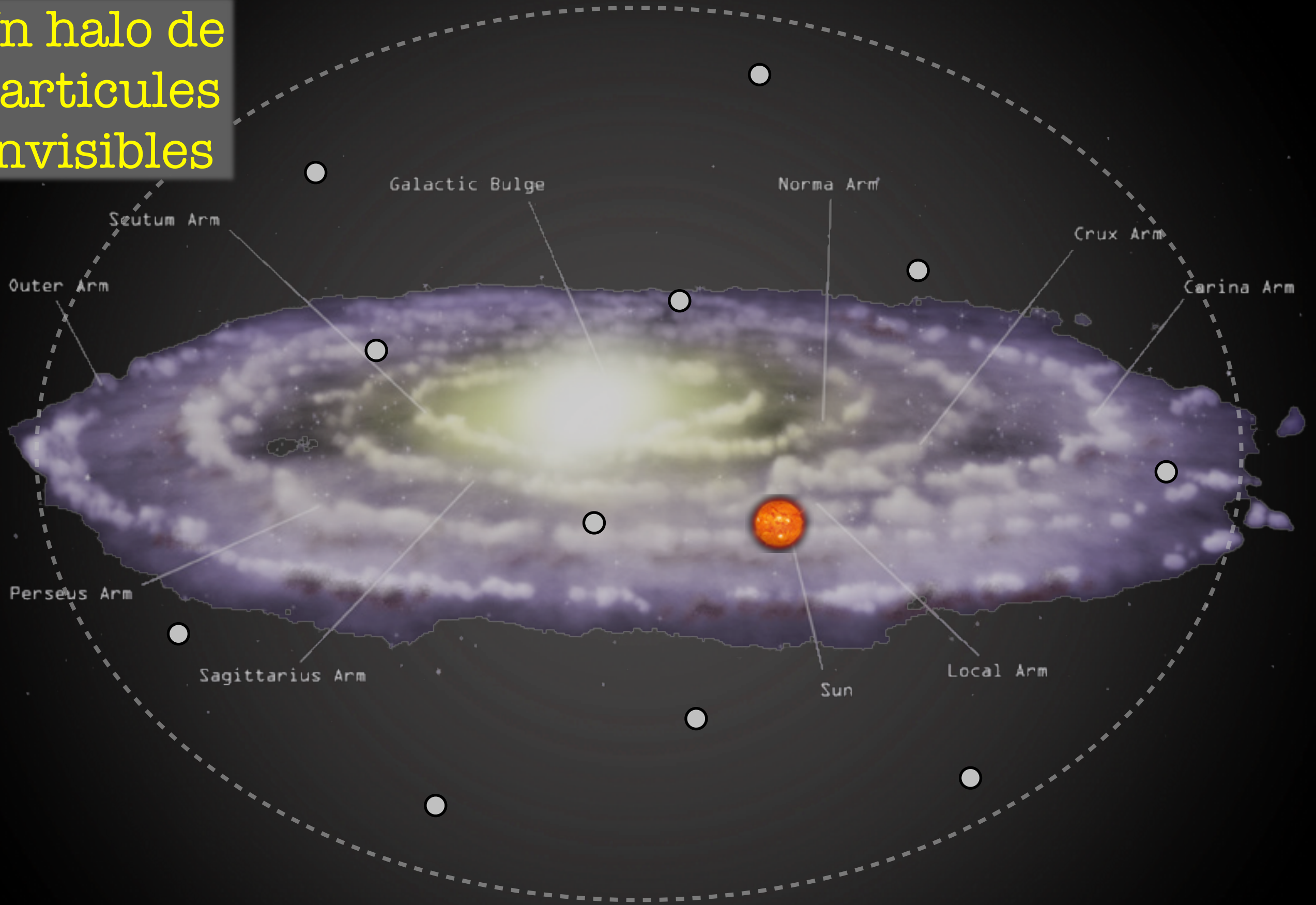
Un halo de  
particules  
invisibles





# Et dans la Voie Lactée ?

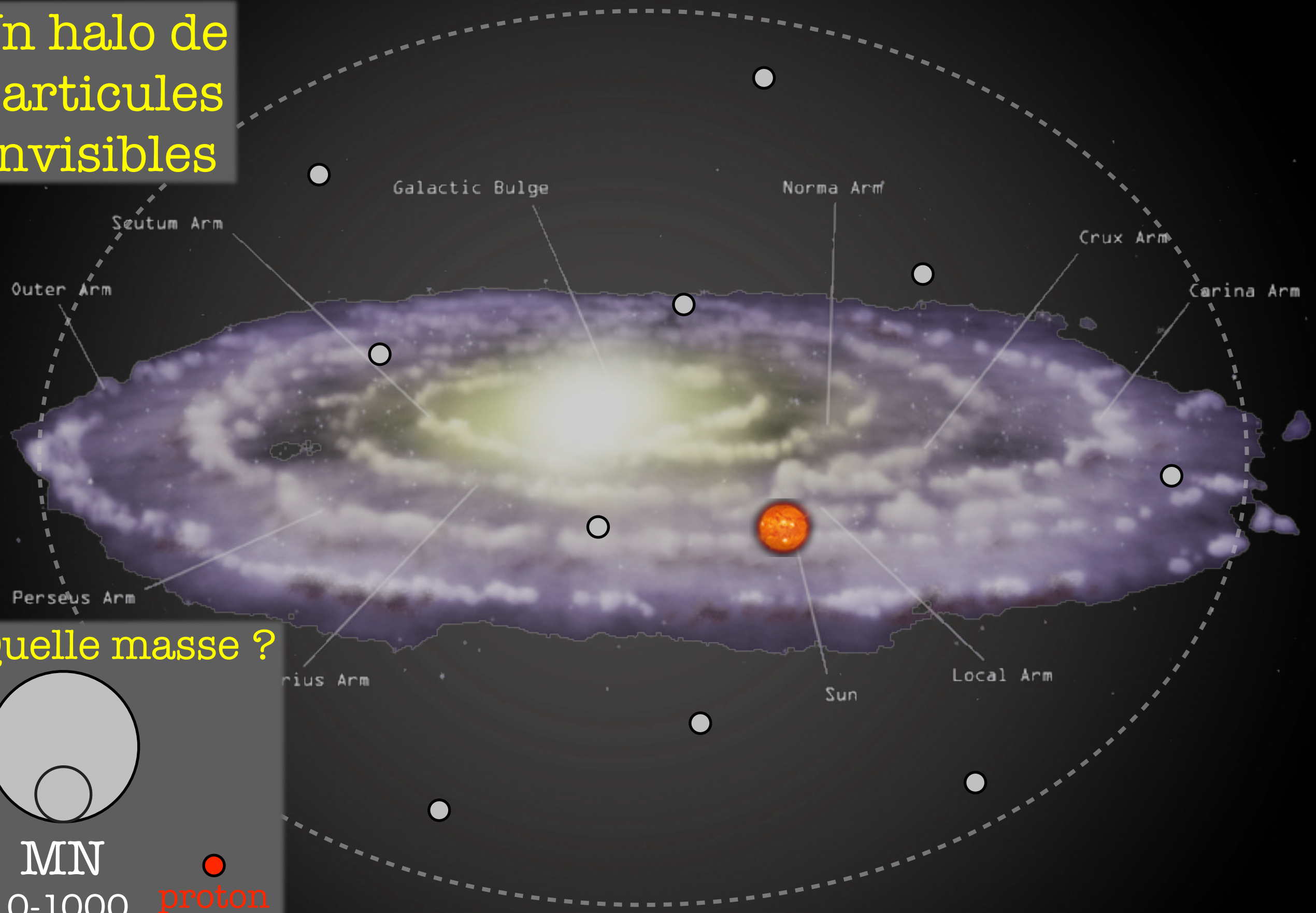
Un halo de  
particules  
invisibles



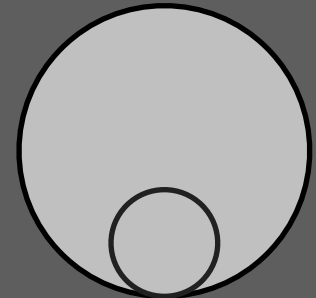


# Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de  
particules  
invisibles



Quelle masse ?



MN

10-1000  
GeV

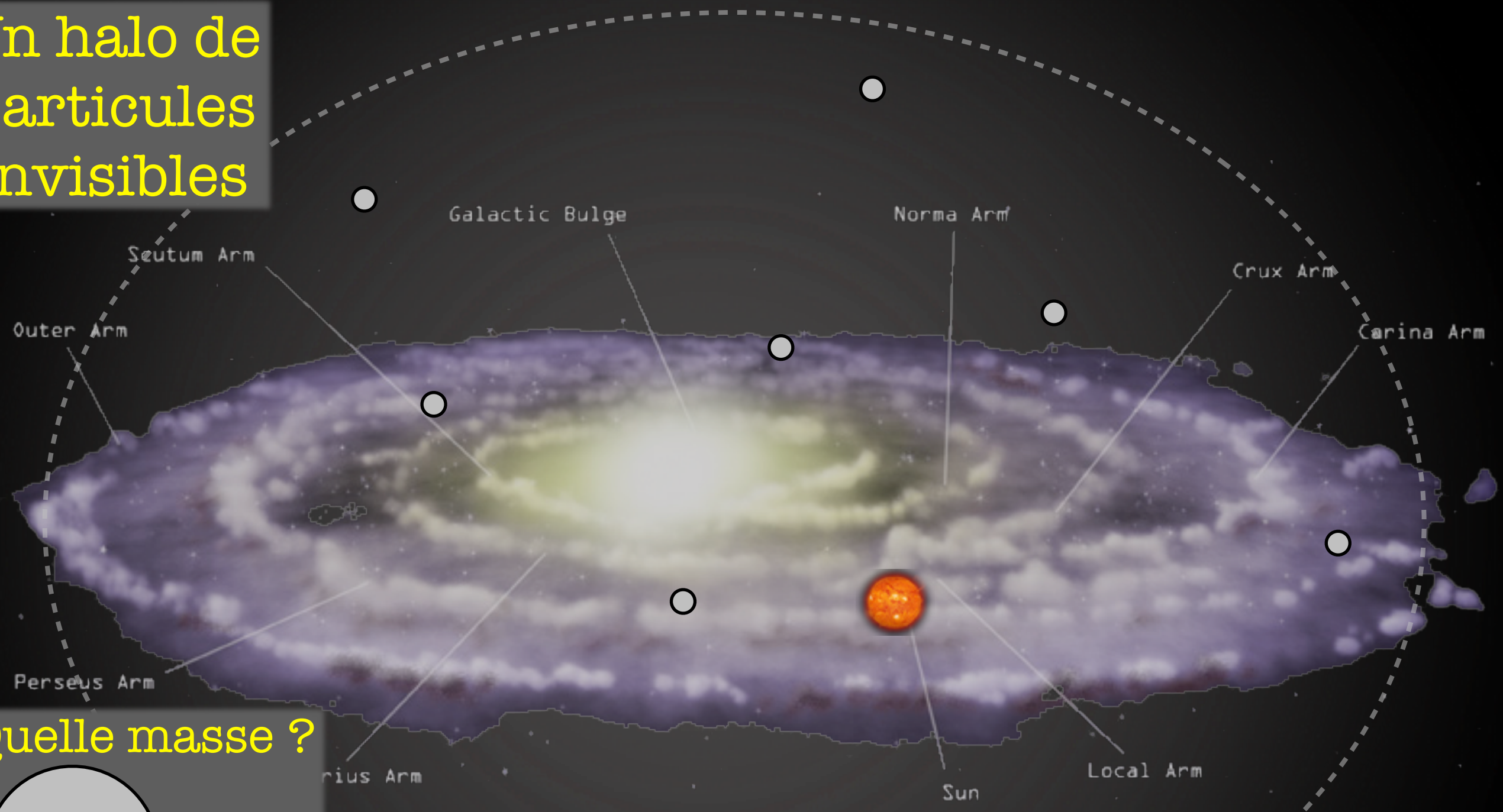


proton  
1 GeV

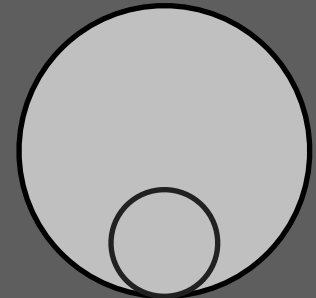


# Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de  
particules  
invisibles



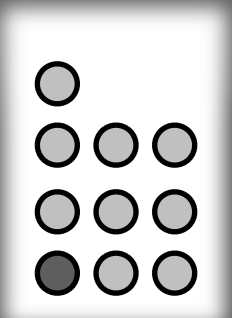
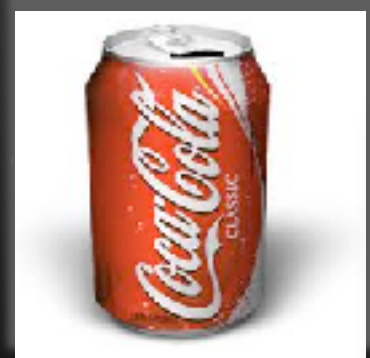
Quelle masse ?



MN  
10-1000  
GeV

●  
proton  
1 GeV

Quelle densité ?



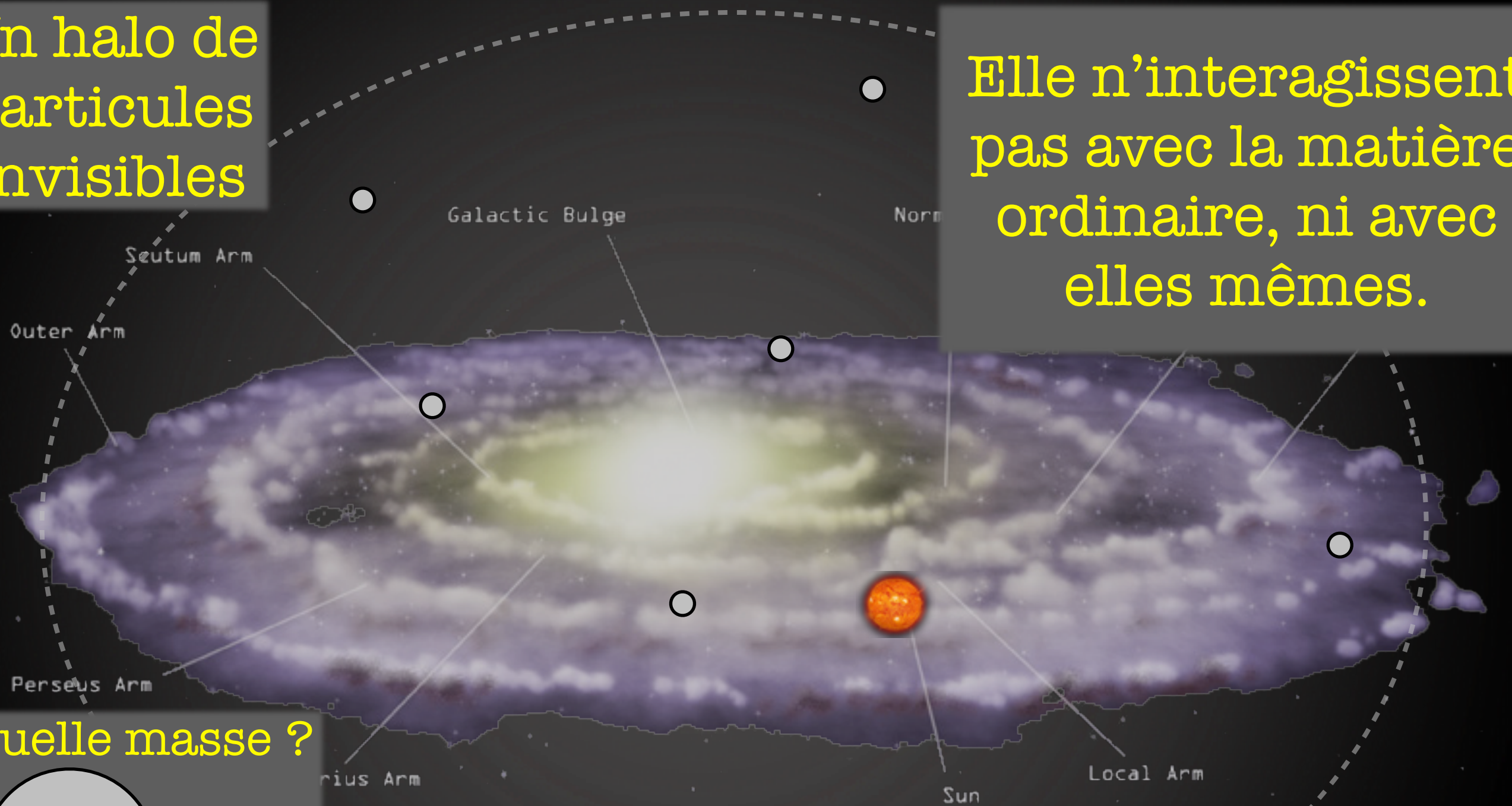
10 GeV  
100 GeV



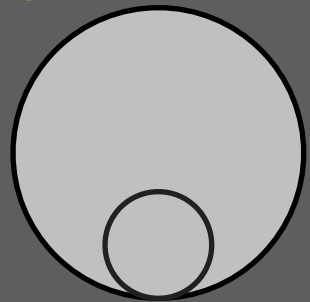
# Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de particules invisibles

Elle n'interagissent pas avec la matière ordinaire, ni avec elles mêmes.

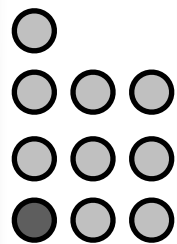


Quelle masse ?



MN  
10-1000 GeV  
proton  
1 GeV

Quelle densité ?



10 GeV

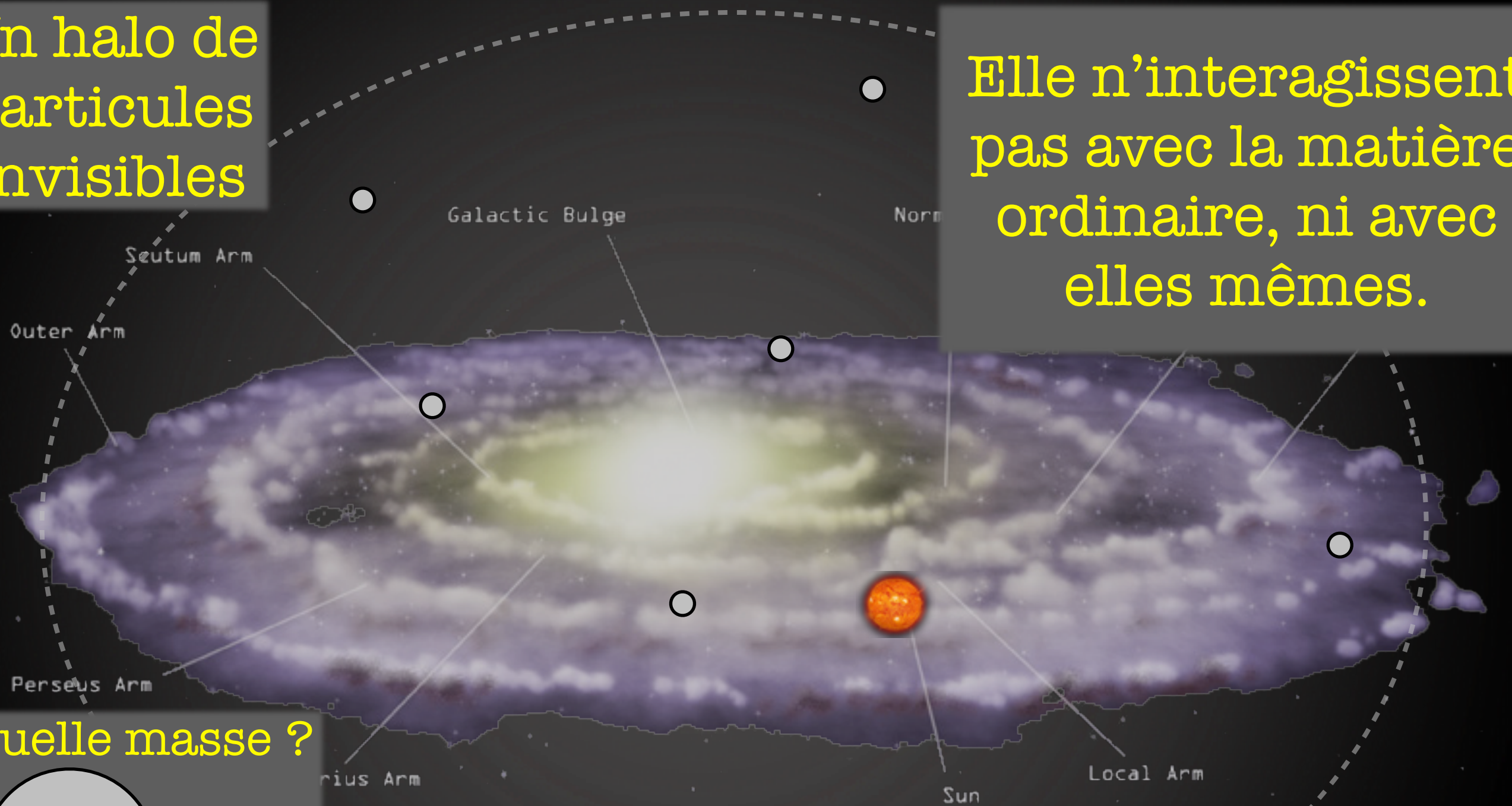
100 GeV



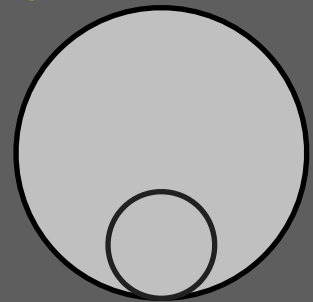
# Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de particules invisibles

Elle n'interagissent pas avec la matière ordinaire, ni avec elles mêmes.

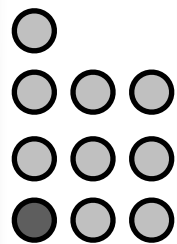


Quelle masse ?



MN  
10-1000 GeV  
proton  
1 GeV

Quelle densité ?



10 GeV  
100 GeV

Ou si, peut-être elles interagissent un peu...



Comment  
**détecter**  
la Matière Noire ?











*Physique souterraine*



‘déttection directe’





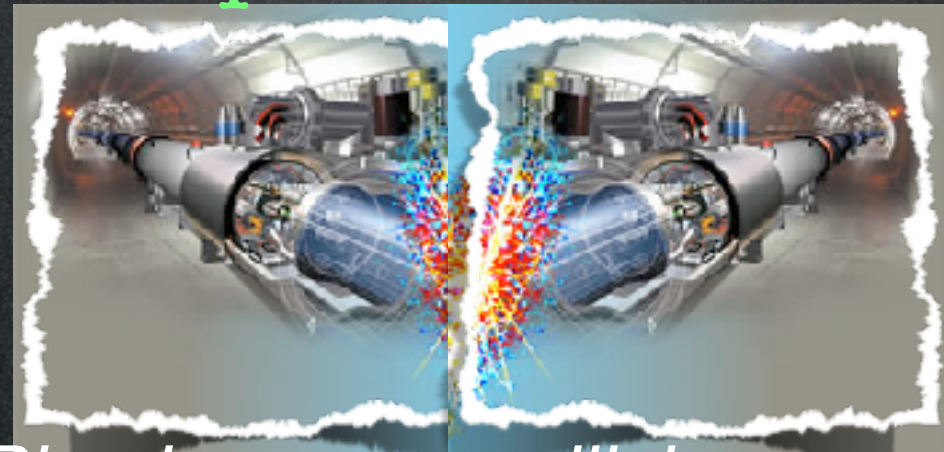
*Physique souterraine*



‘déttection directe’



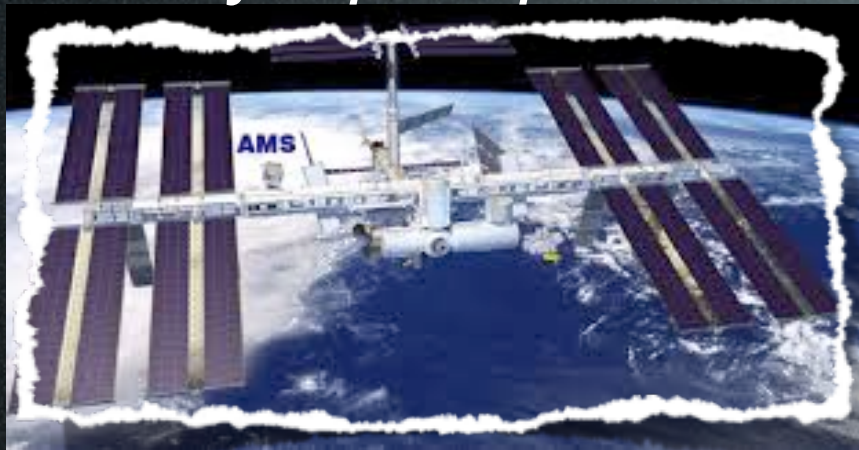
‘production’



*Physique aux collisionneurs*



*Physique spatiale*



‘déttection indirecte’

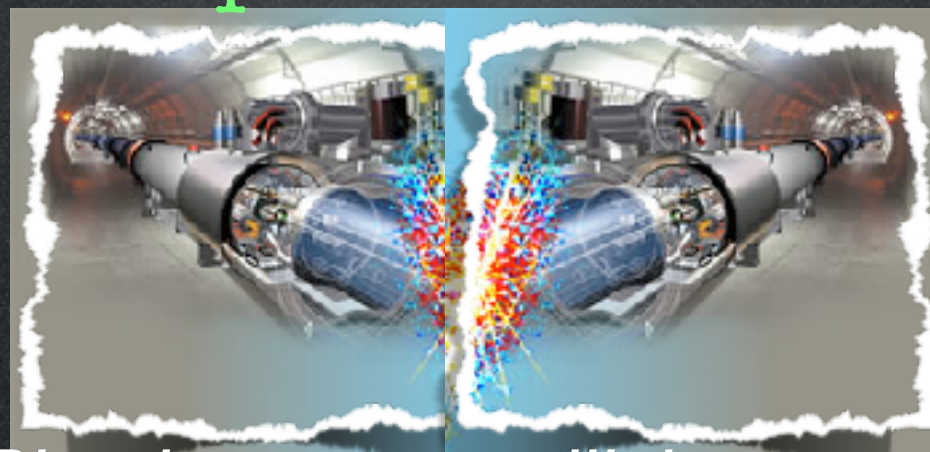
*Physique souterraine*



‘déttection directe’



‘production’



*Physique aux collisionneurs*



# Détection directe



Gran Sasso (Italie)



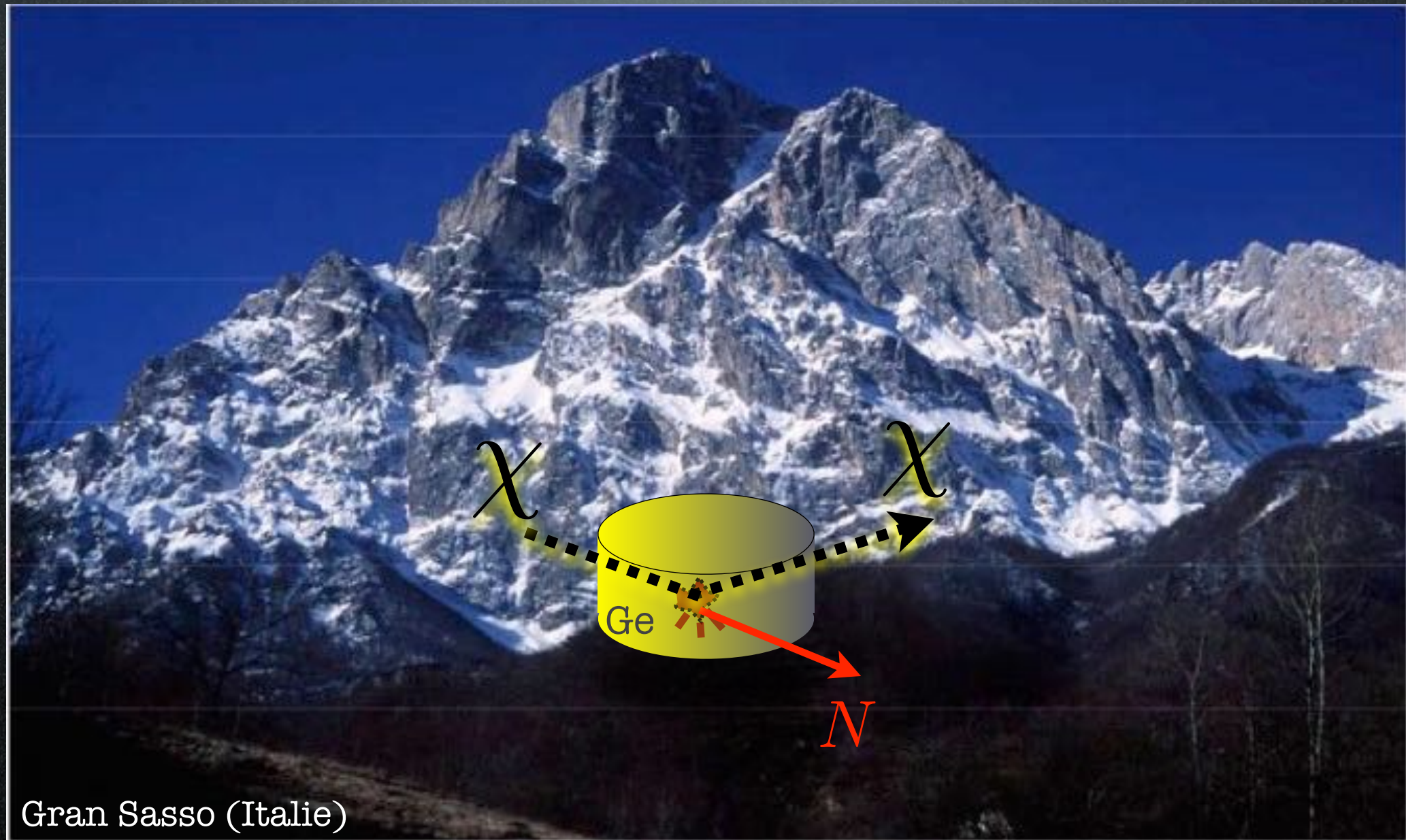
# Détection directe



Gran Sasso (Italie)



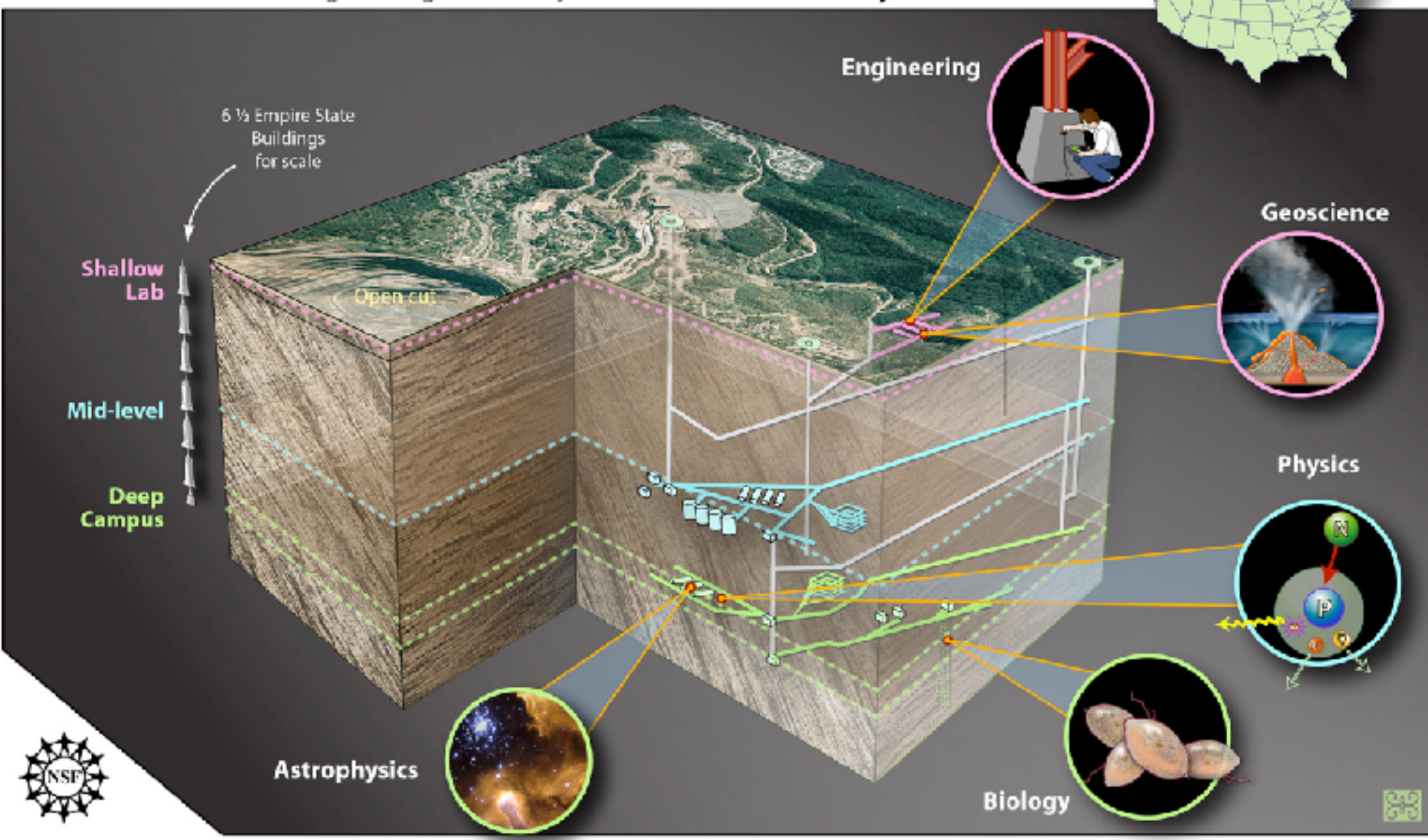
# Détection directe





# Détection directe

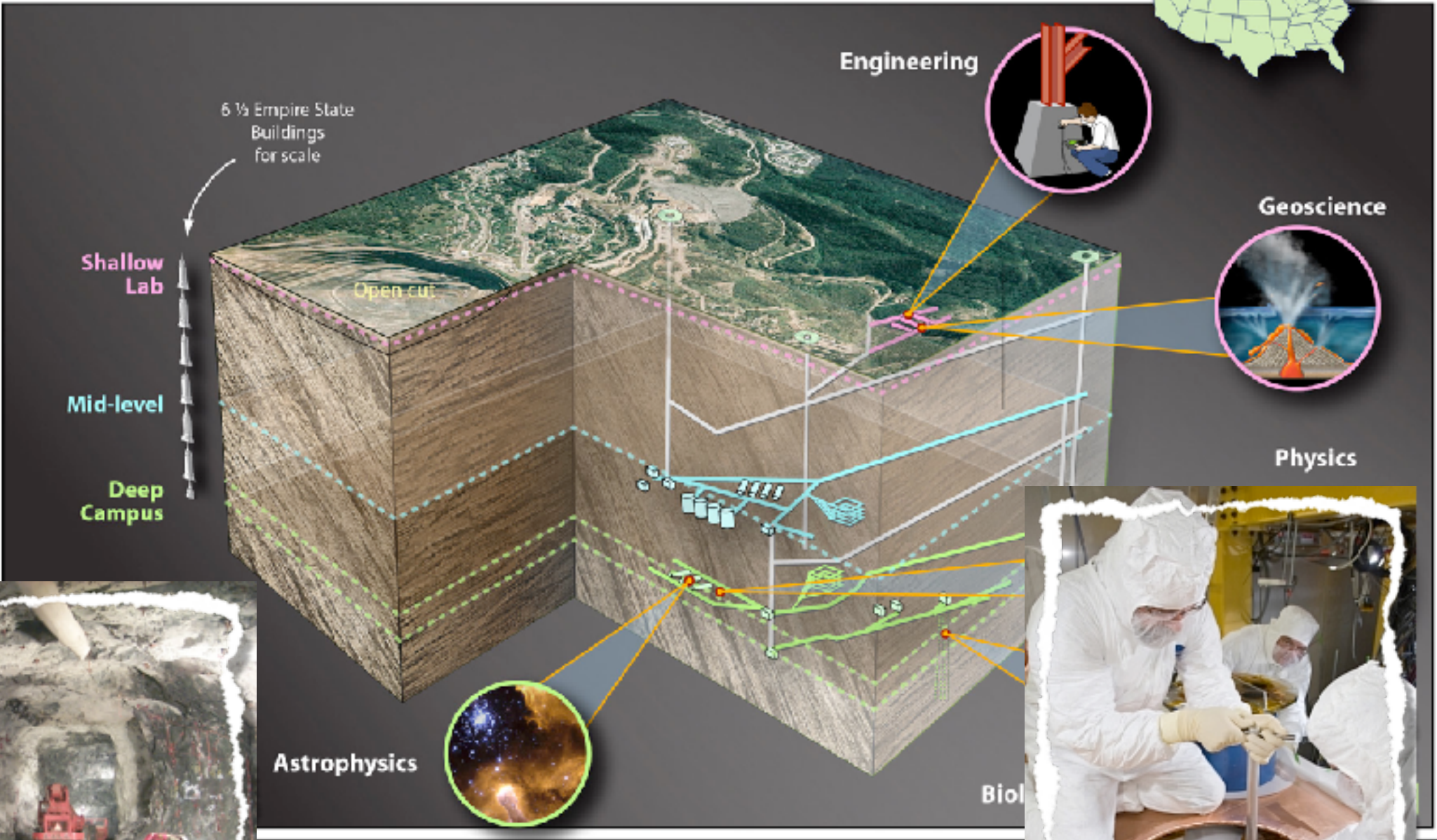
## DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD





# Détection directe

## DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD





# Détection directe

Stratégie n.1: faire taire l'Univers



# Détection directe

Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

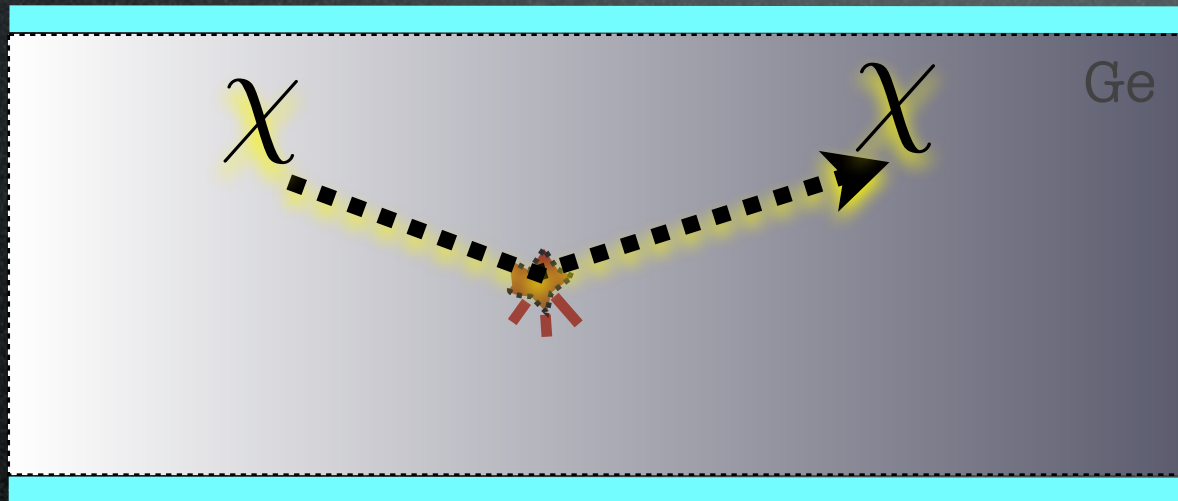


# Détection directe

Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:





# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:

*ionisation*





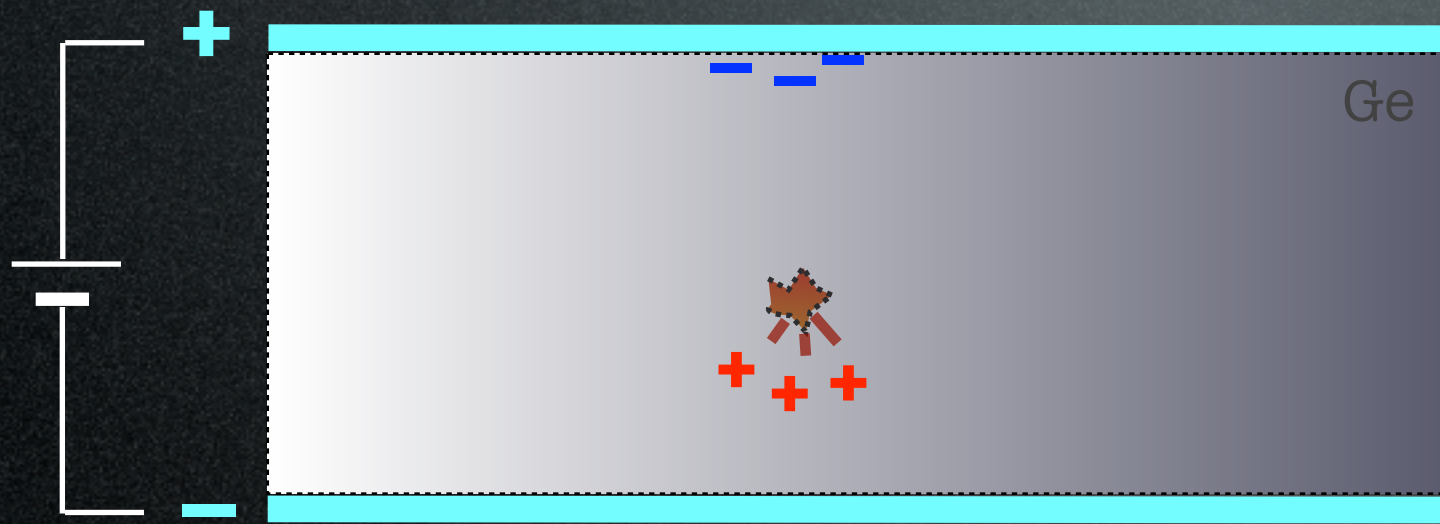
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:

*ionisation*



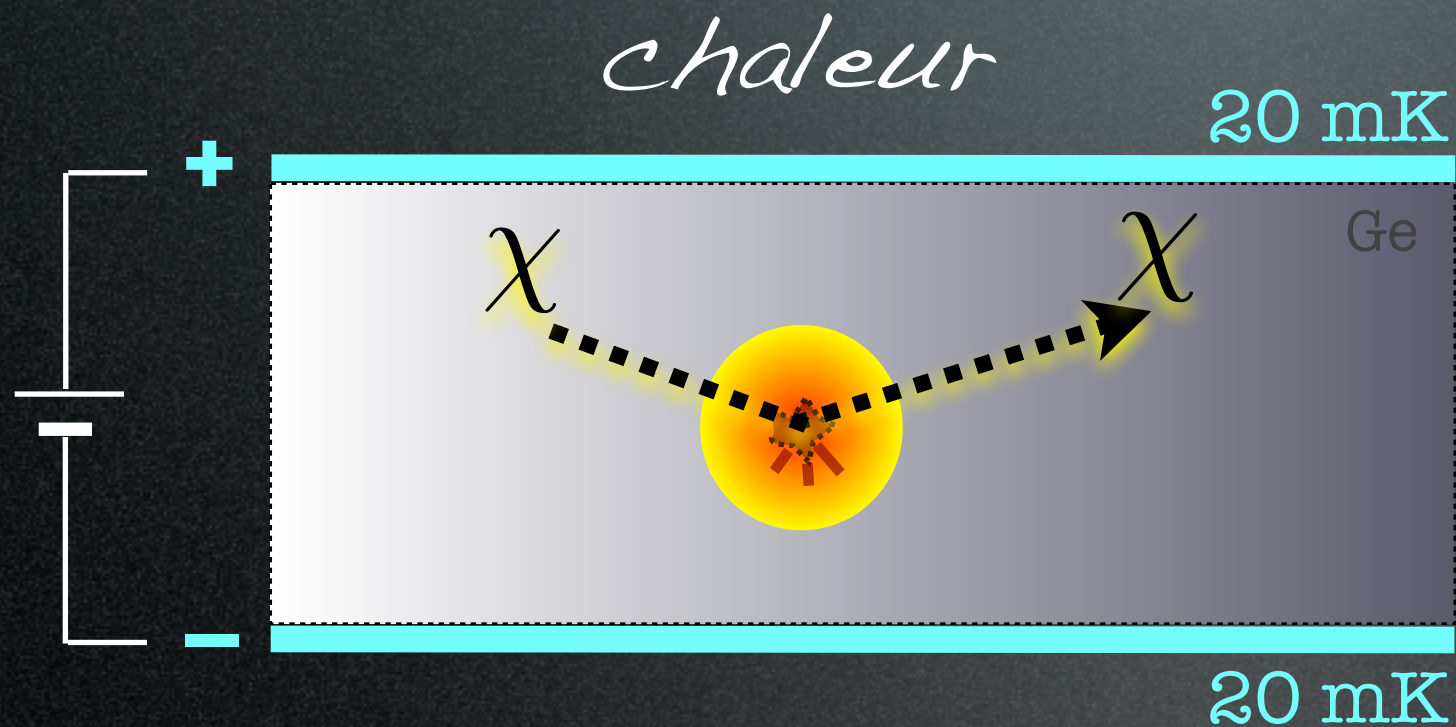


# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:



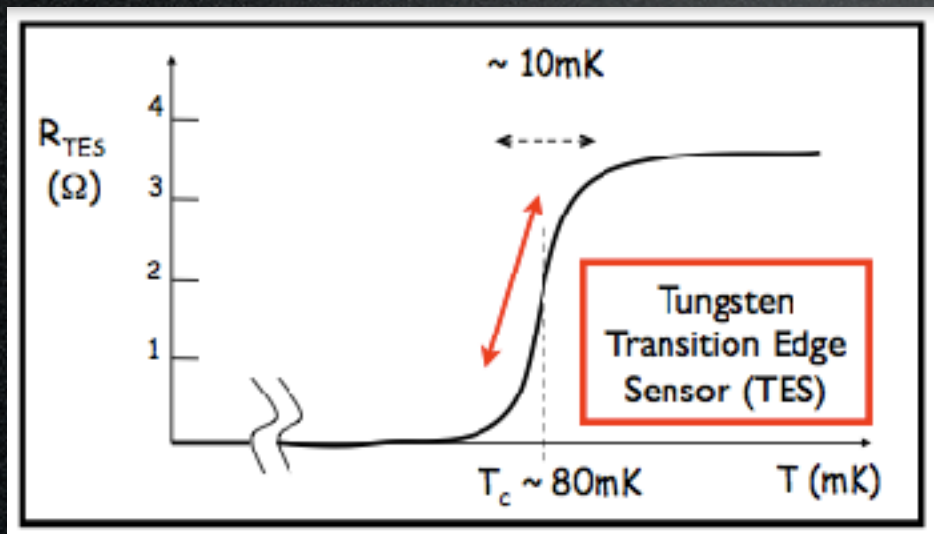
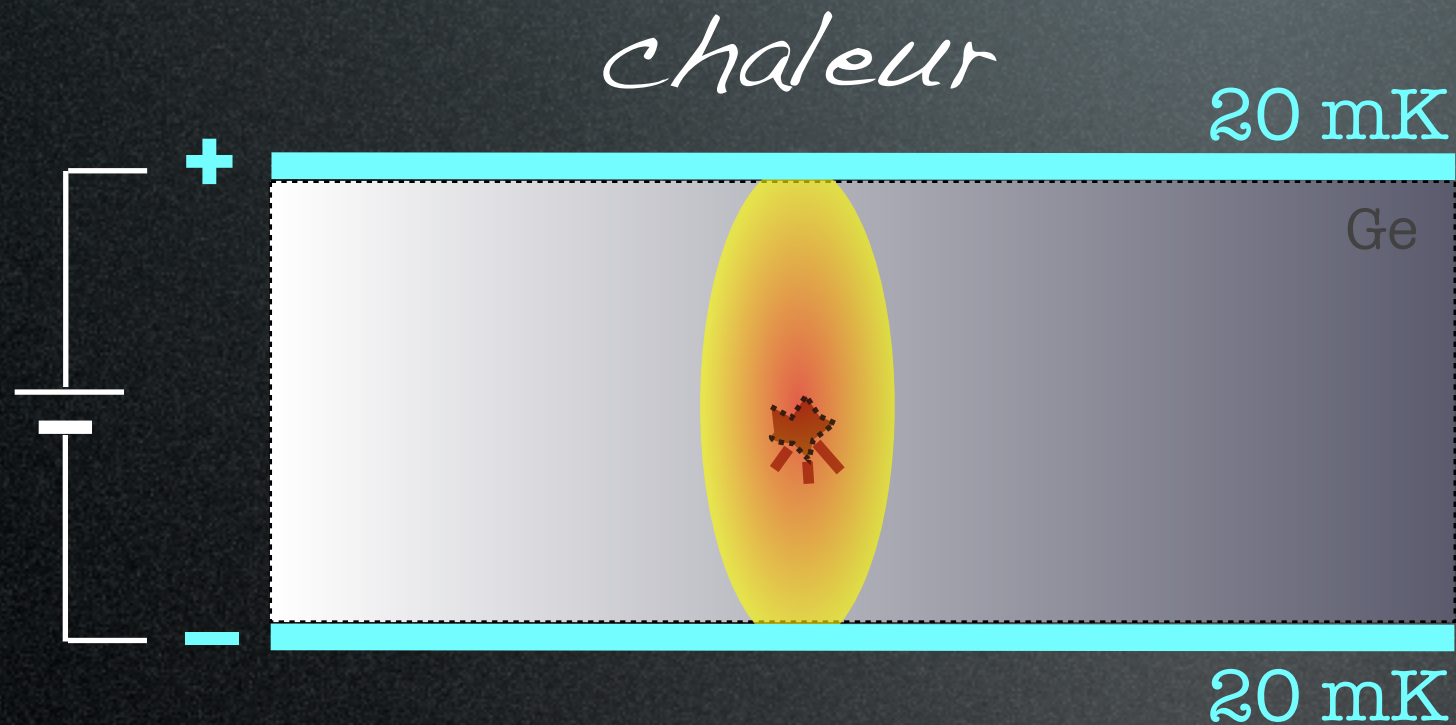


# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:





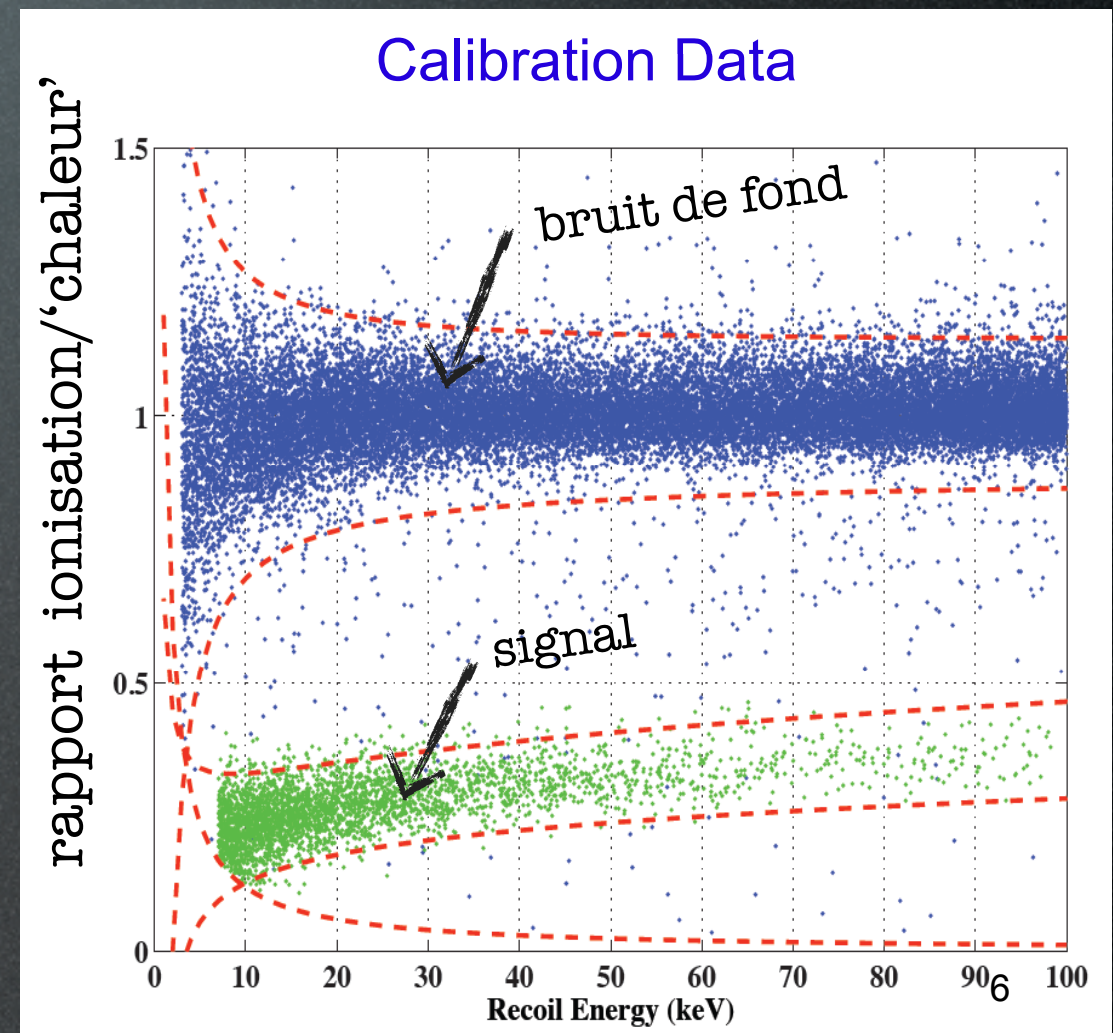
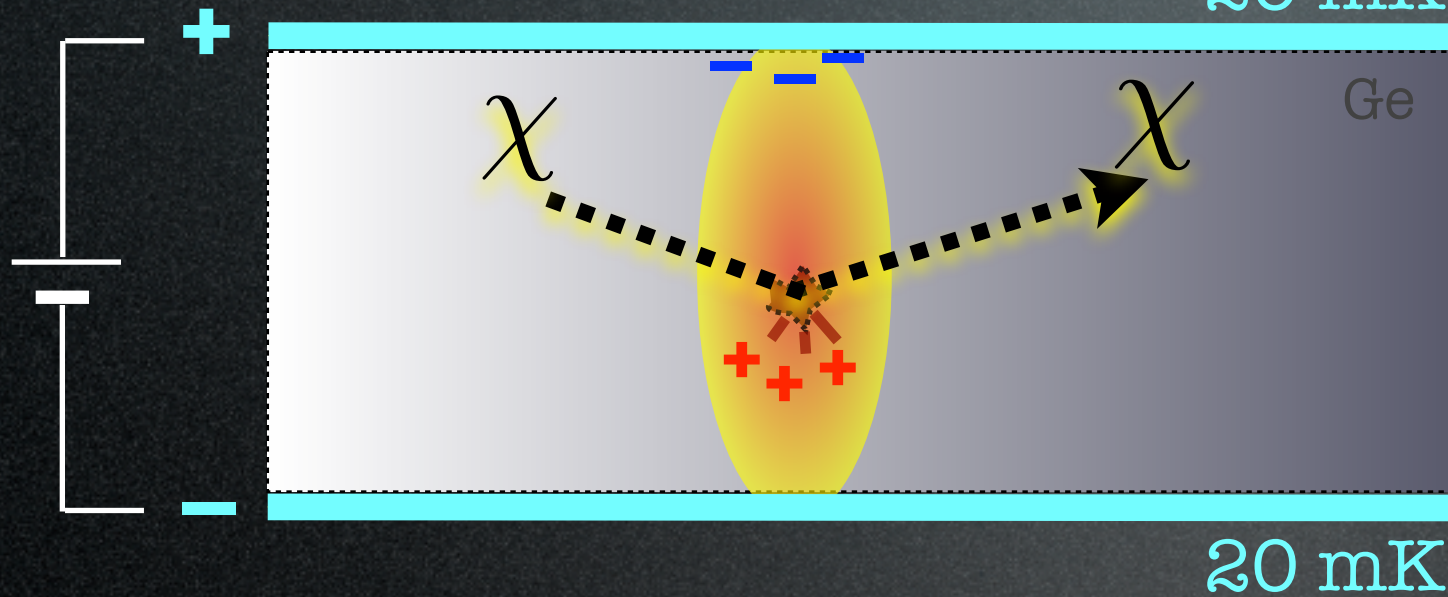
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit, pour chaque événement

E.g. **Edelweiss**:

*ionisation & chaleur* 20 mK



CDMS coll.



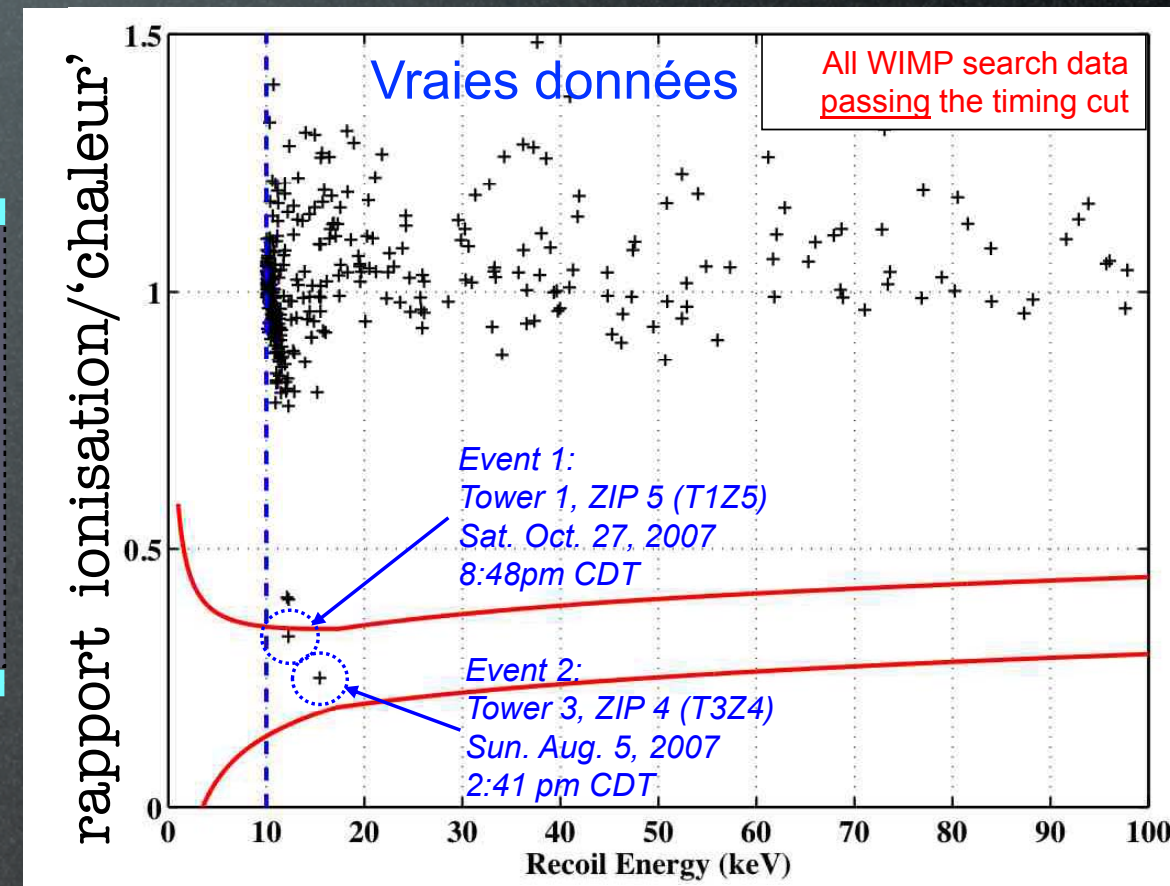
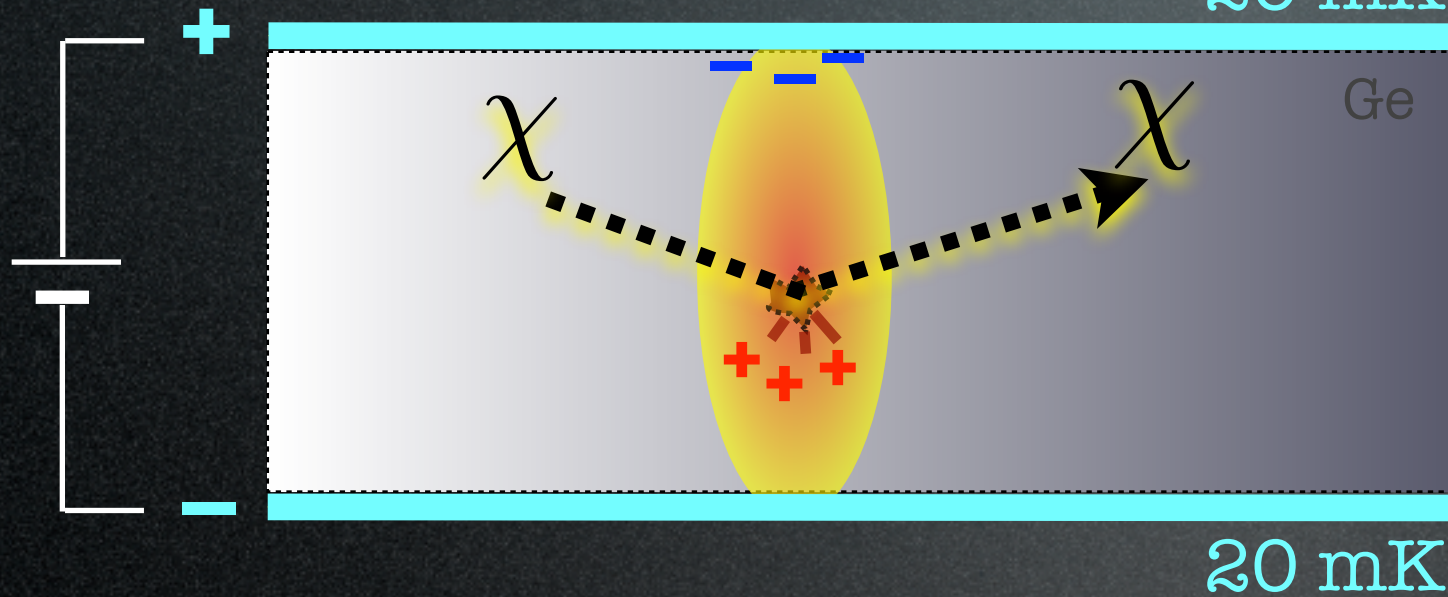
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit, pour chaque événement

E.g. **Edelweiss**:

*ionisation & chaleur*



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592



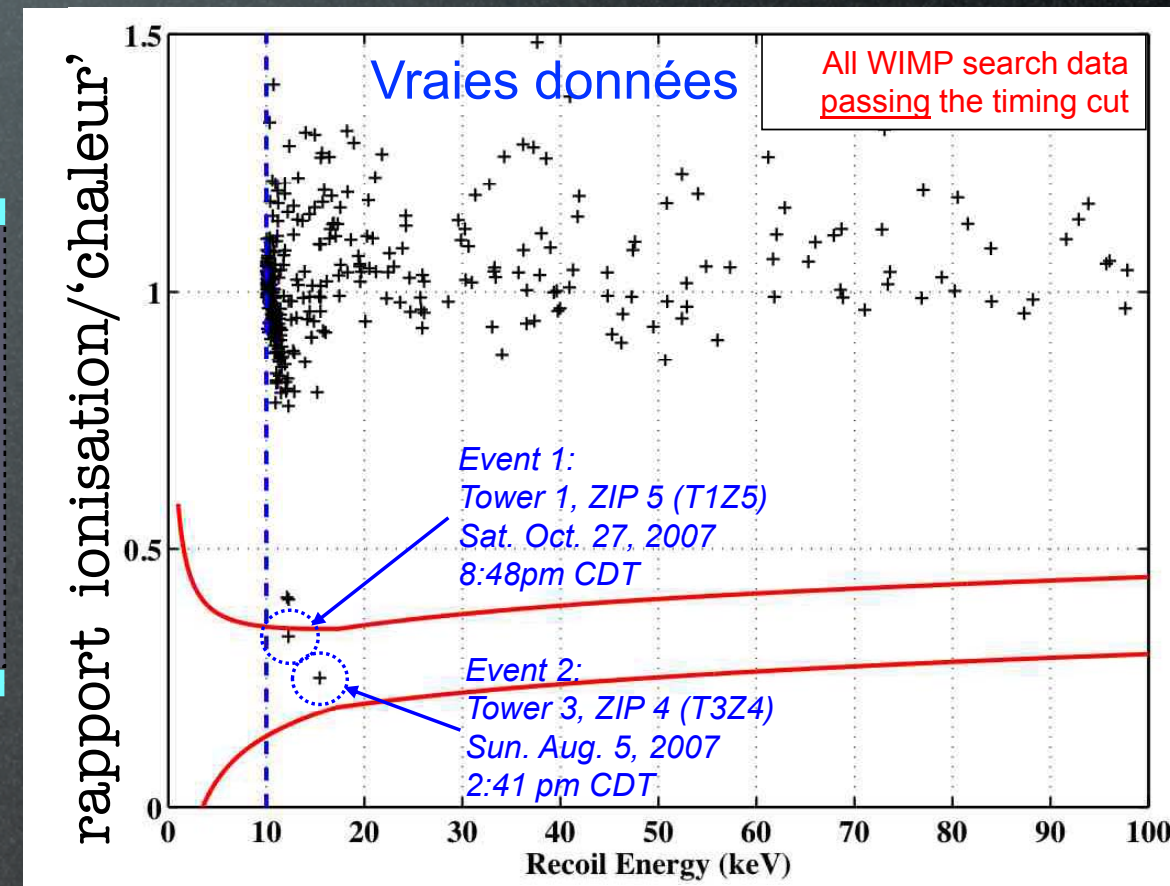
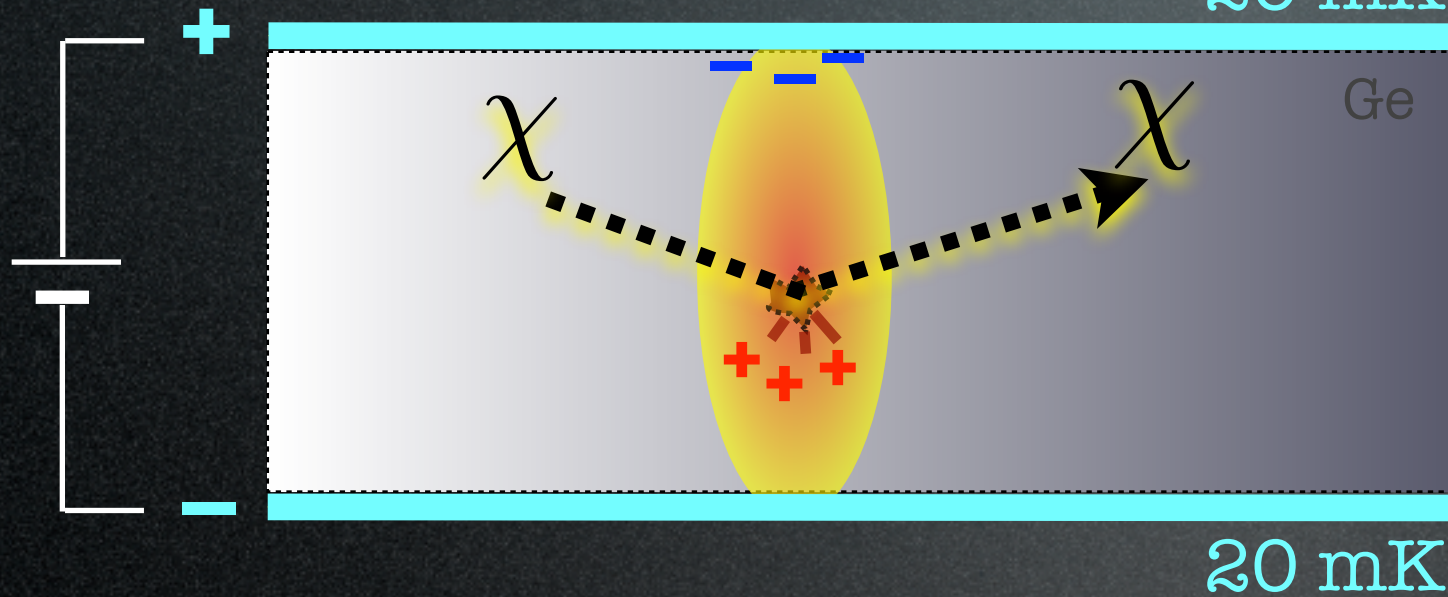
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit, pour chaque événement

E.g. **Edelweiss**:

*ionisation & chaleur*



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 évènement/kg/an!



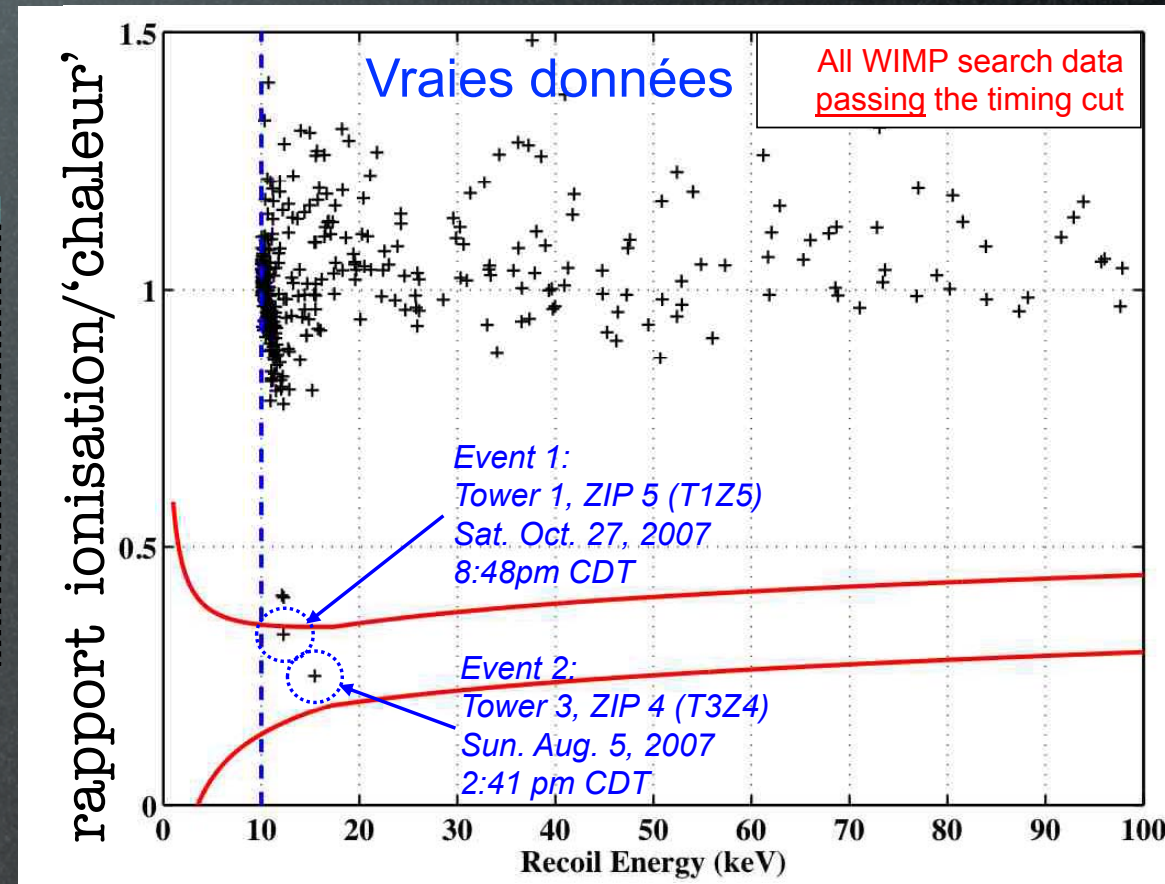
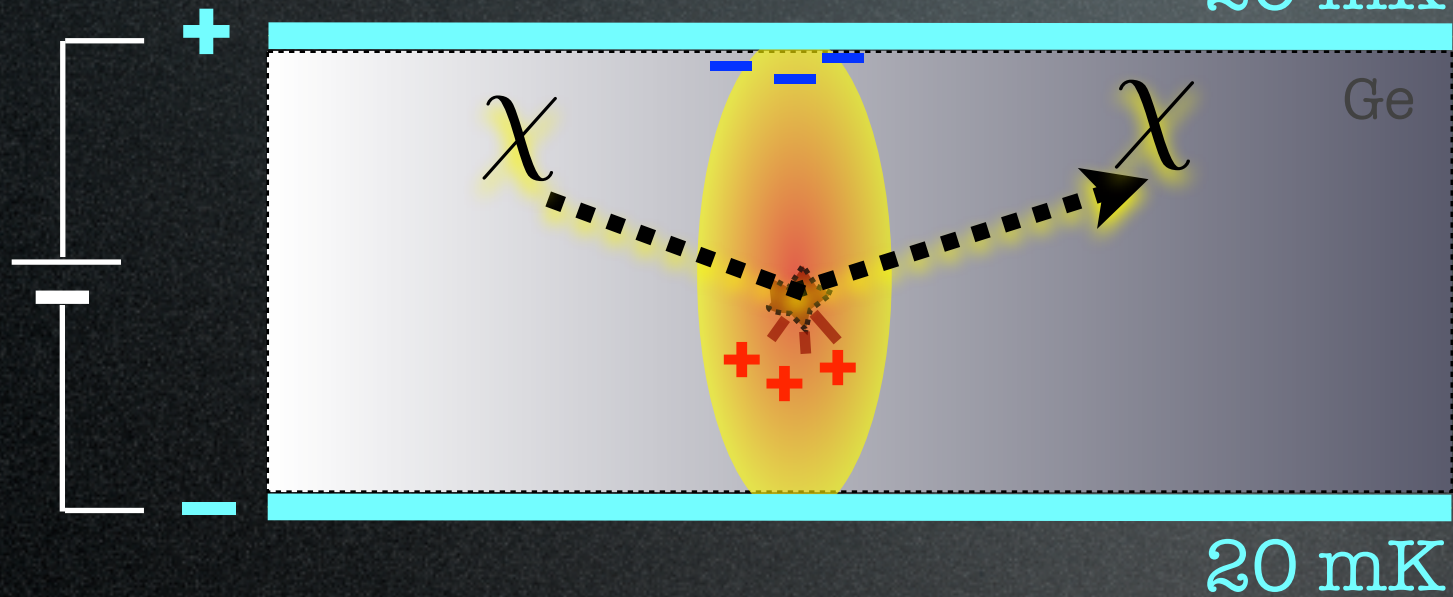
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. **Edelweiss**:

*ionisation & chaleur*



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 événement/kg/an!

Dans le corps humain:  $10^{10}$  evt/kg/an



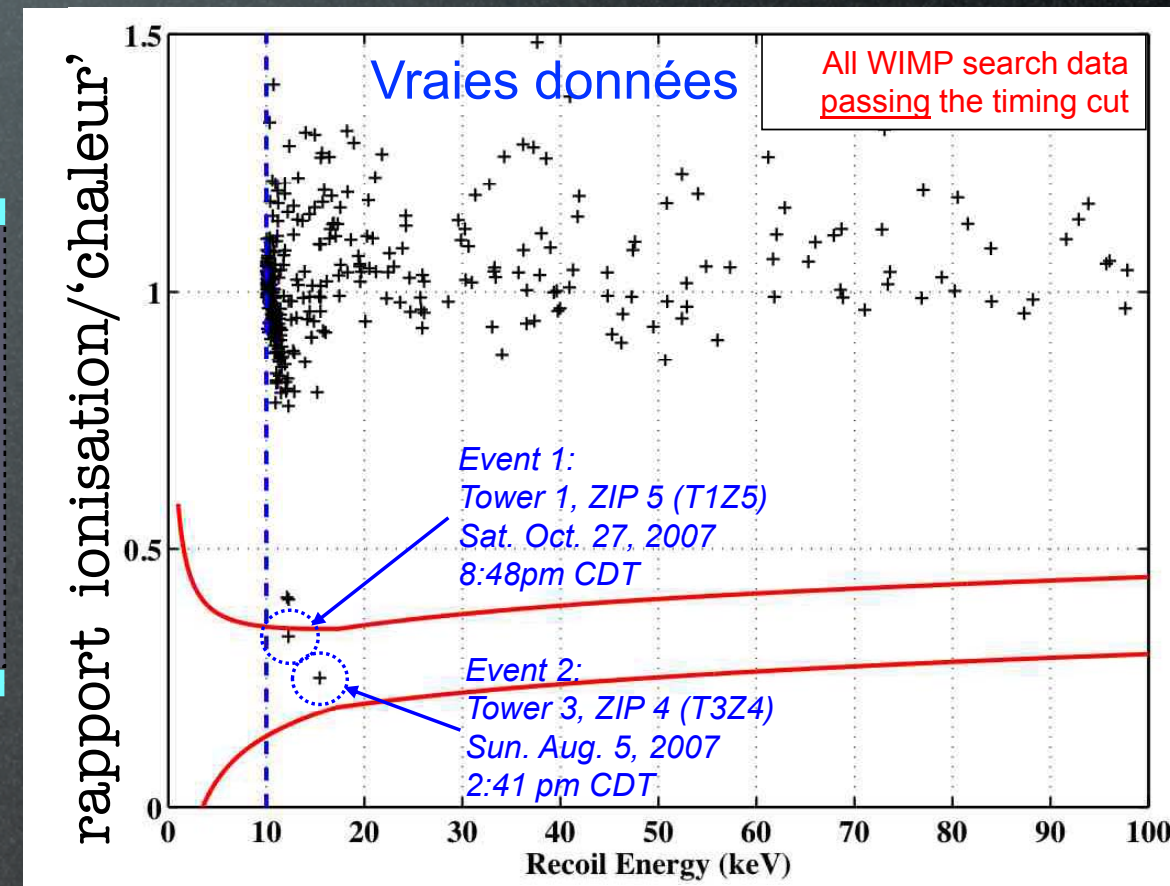
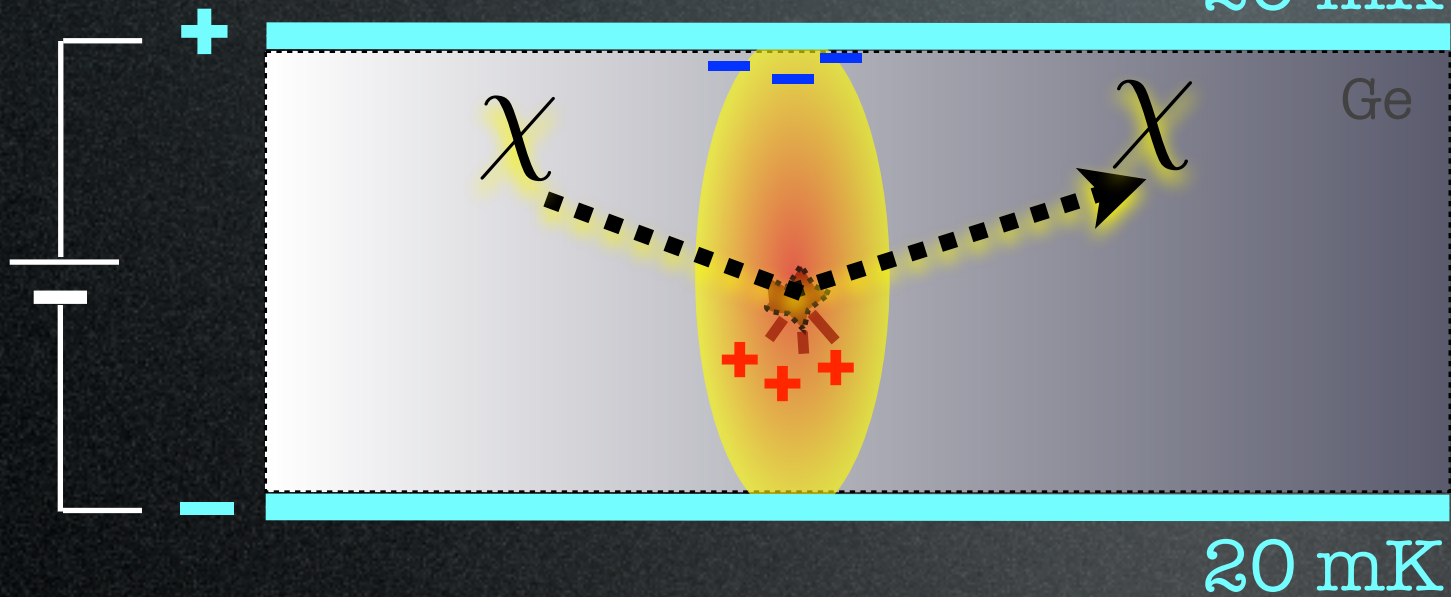
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. **Edelweiss**:

*ionisation & chaleur*



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 événement/kg/an!

Dans le corps humain:  $10^{10}$  evt/kg/an

Dans un kilo de bananes:  $10^{12}$  evt/kg/an



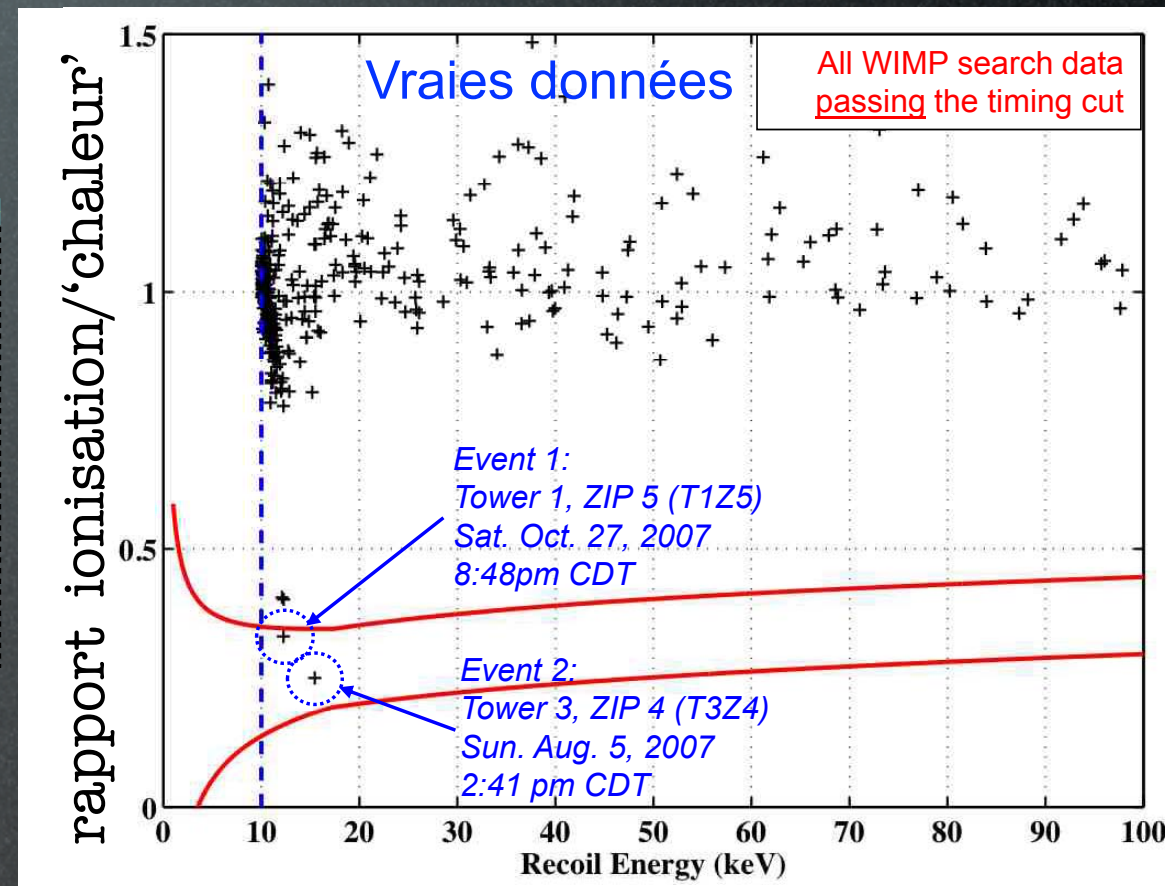
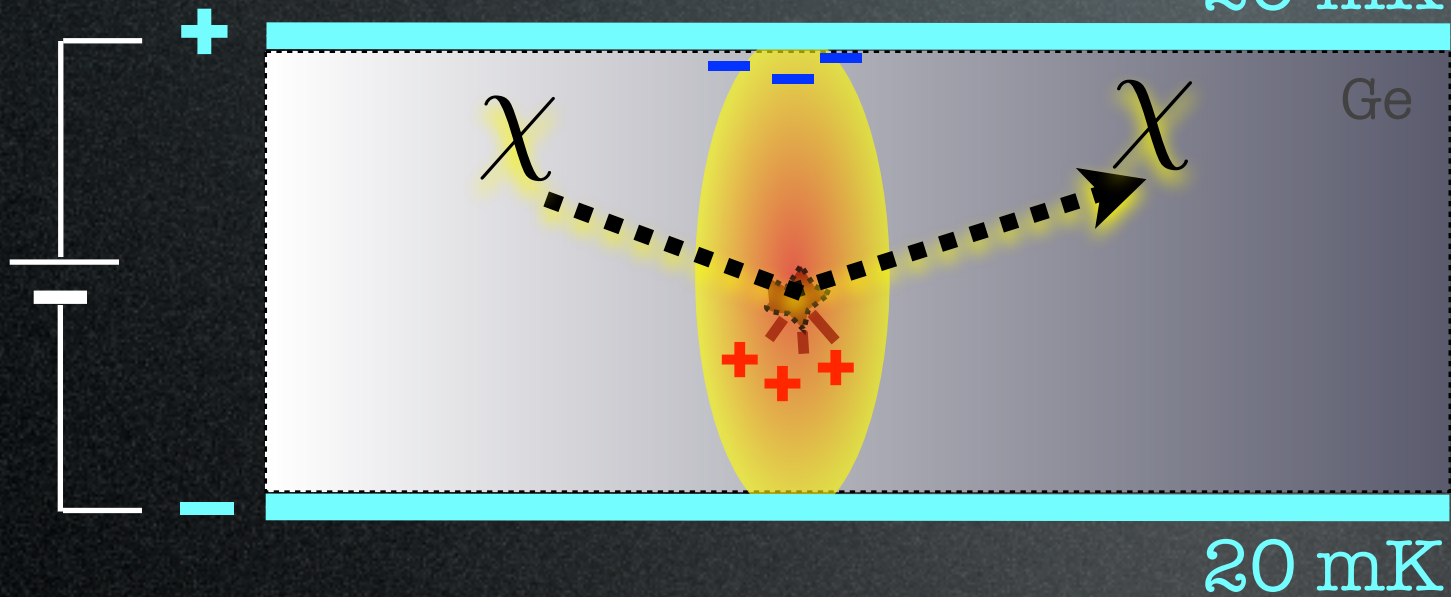
# Détection directe

## Stratégie n.1: faire taire l'Univers

mesurer deux quantités pour distinguer le Signal du Bruit,  
pour chaque événement

E.g. Edelweiss:

ionisation & chaleur



CDMS coll., Science 327 (2010), 0912.3592

NB: 1 événement/kg/an!

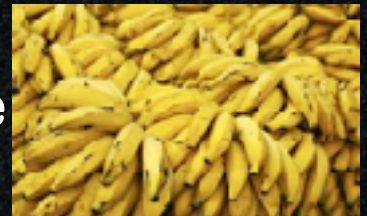
Dans le corps humain:  $10^{10}$  evt/kg/an

Dans un kilo de bananes:  $10^{12}$  evt/kg/an

Edelweiss



10 milliards de tonnes



contre



# Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

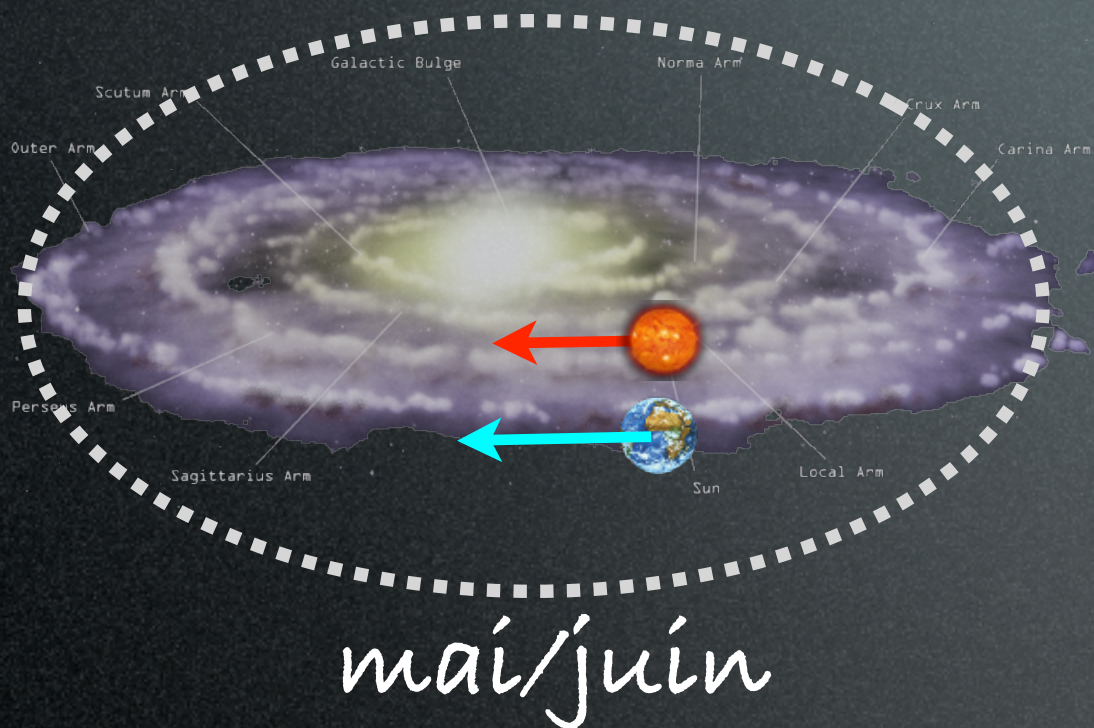
collecter tous les évènements,  
et détecter une modulation annuelle



# Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

collecter tous les évènements,  
et détecter une modulation annuelle

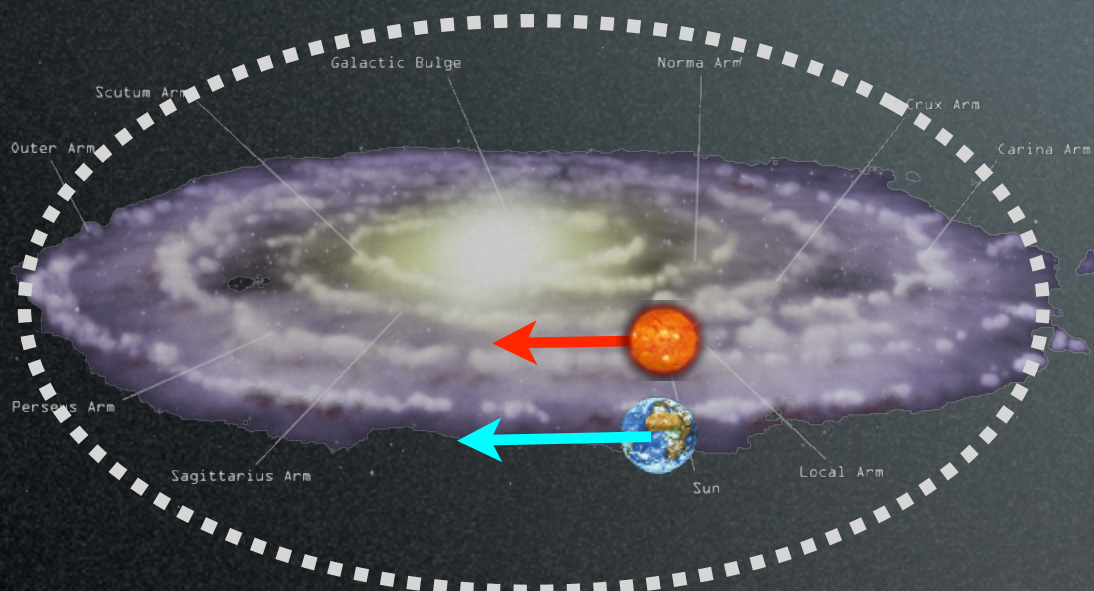




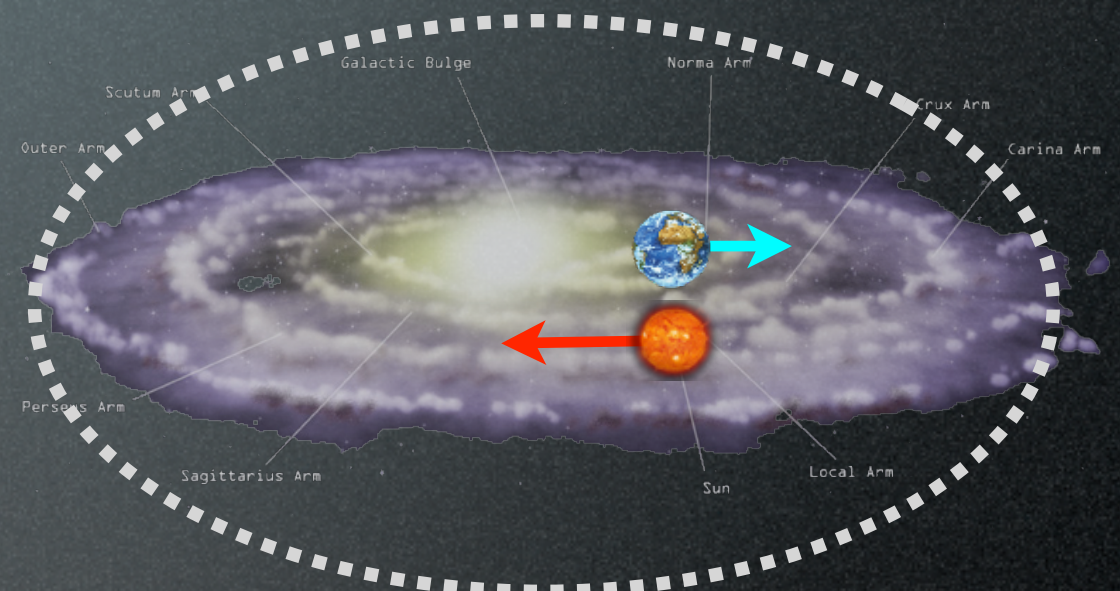
# Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

collecter tous les évènements,  
et détecter une modulation annuelle



mai/juin



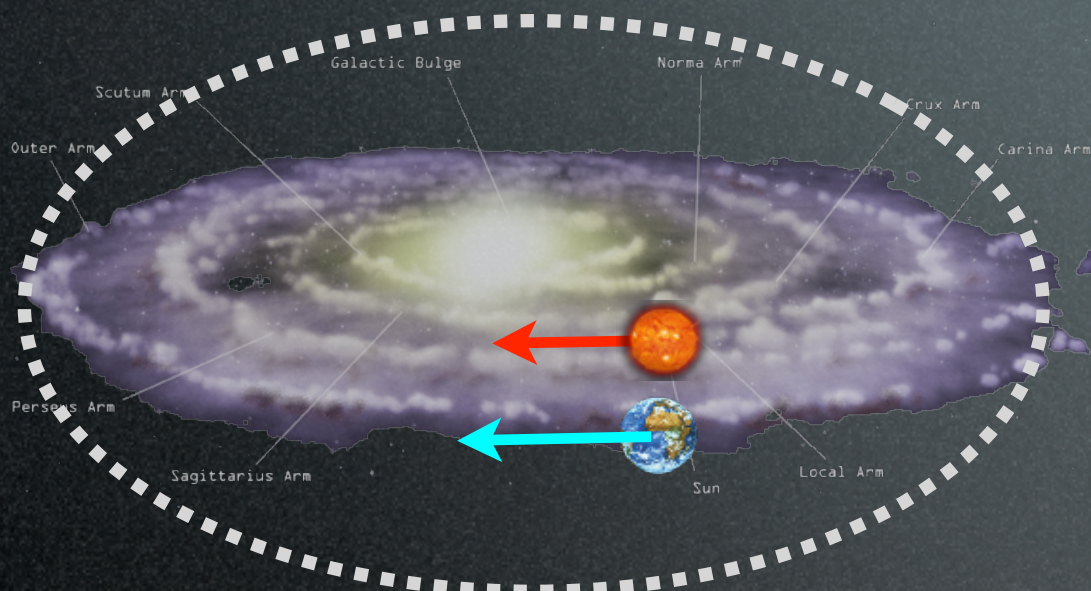
novembre/décembre



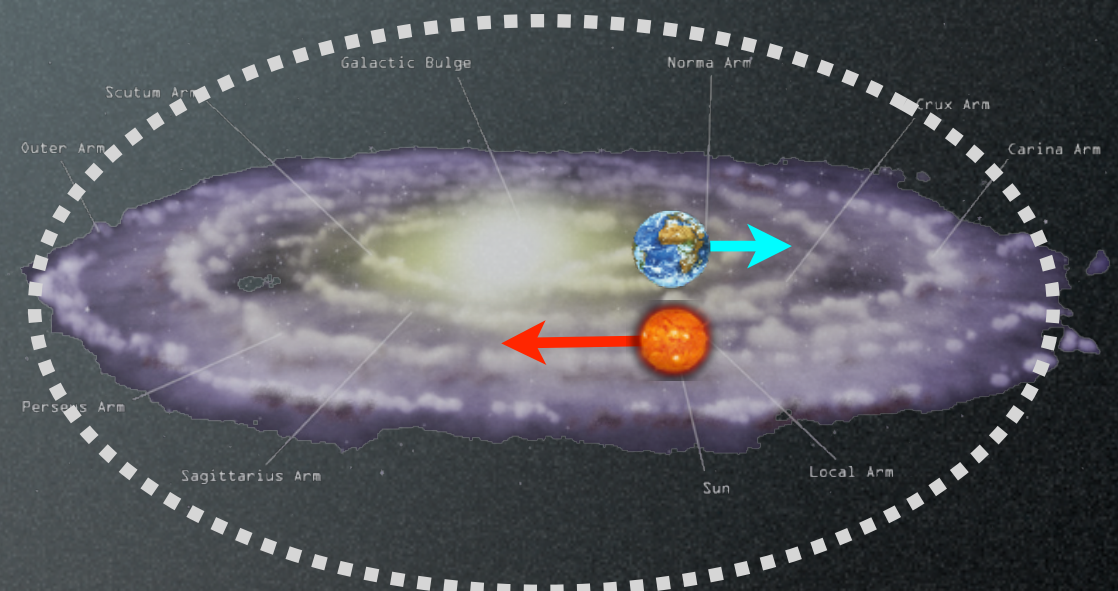
# Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

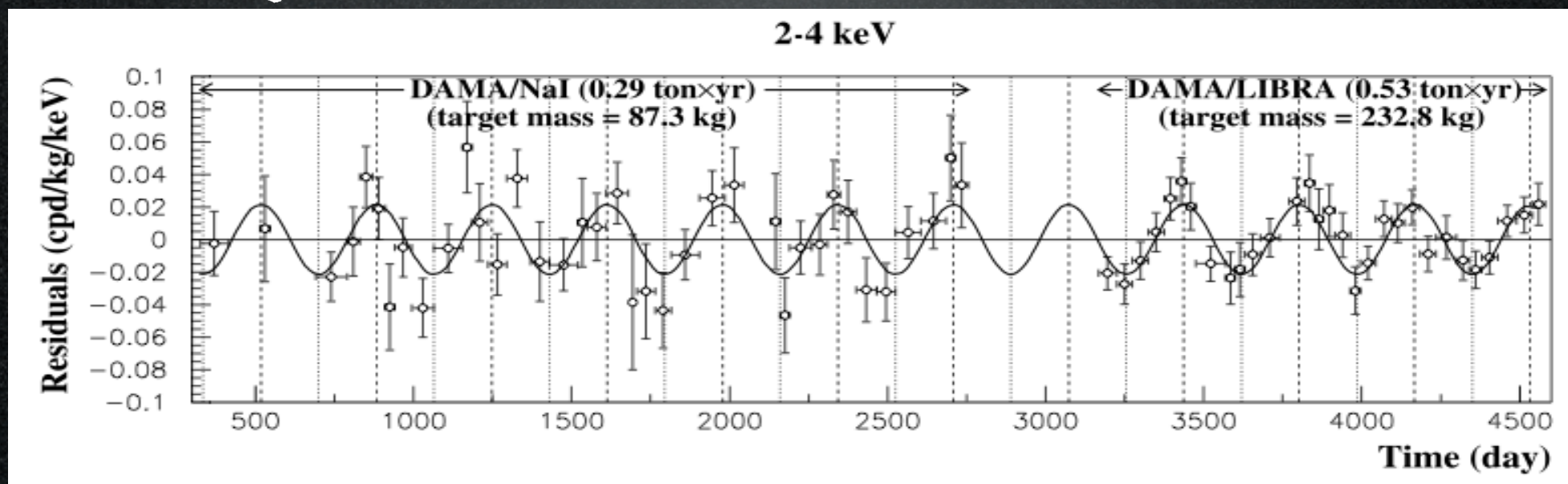
collecter tous les événements,  
et détecter une modulation annuelle



mai/juin



novembre/décembre





# Détection directe: état de l'art

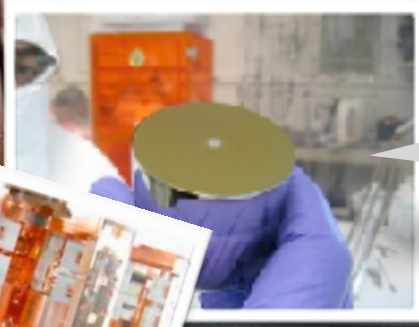


# Détection directe: état de l'art

**DAMA/Libra**  
(1998-2011)



**CoGeNT**  
(2010-2011)



**CRESST**  
(2011)

Oui!  
Matière Noire!

**Excès** d'évènements et/ou **modulation** annuelle.

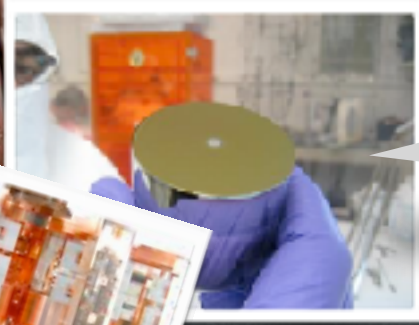


# Détection directe: état de l'art

**DAMA/Libra**  
(1998-2011)



**CoGeNT**  
(2010-2011)



**CRESST**  
(2011)

Oui!  
Matière Noire!  
**Excès** d'évènements et/ou **modulation** annuelle.

Pas du tout.

**Silence cosmique,**  
rien à signaler.

**XENON100**  
(2009-2011)



**CDMS** (2009)



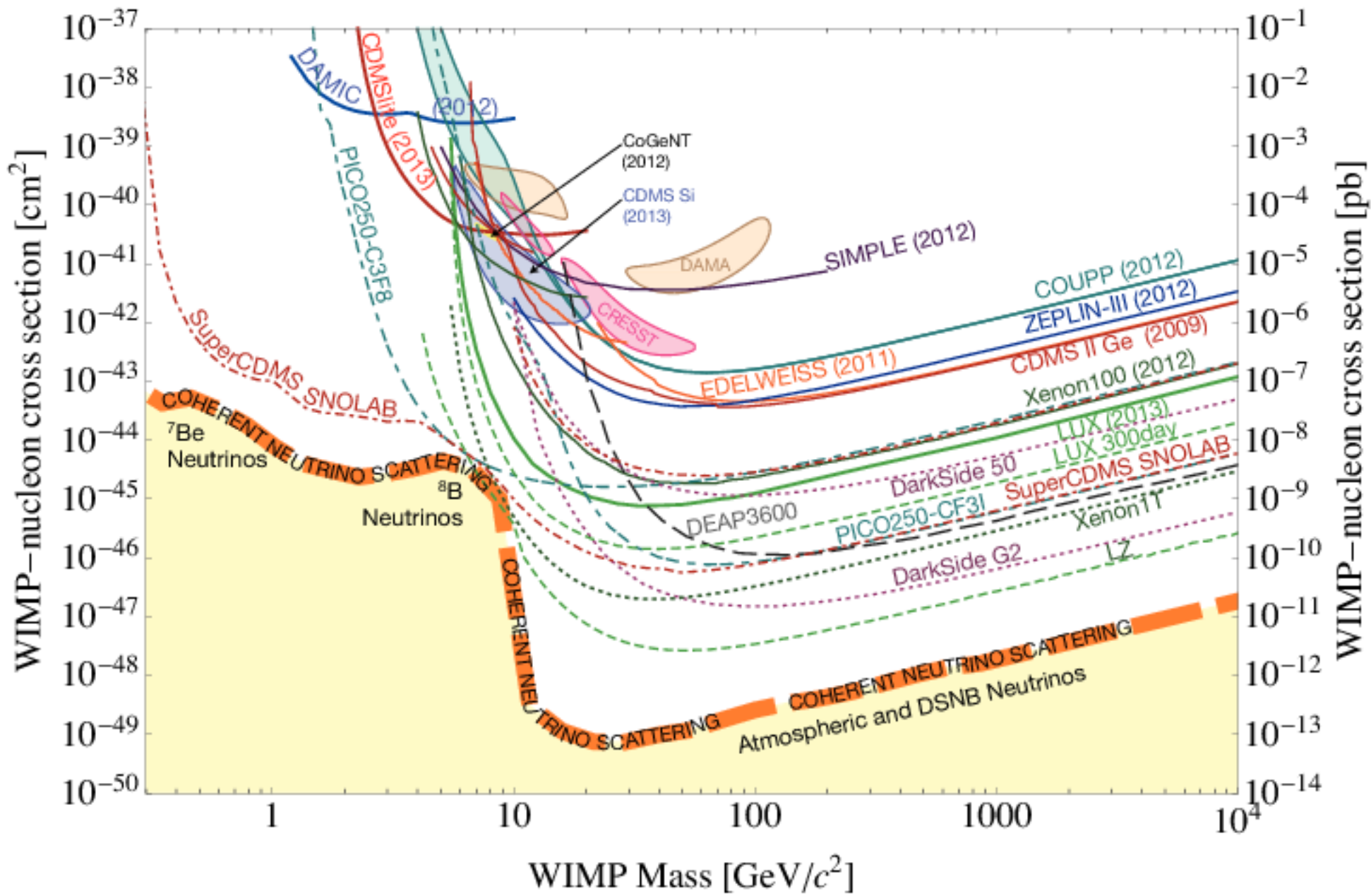
**LUX** (2013)





# Détection directe: état de l'art

DAMA/Libra  
(1998-2011)



elle.

MS (2009)



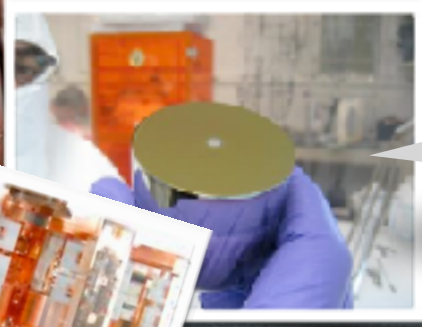


# Détection directe: état de l'art

**DAMA/Libra**  
(1998-2011)



**CoGeNT**  
(2010-2011)



**CRESST**  
(2011)

Oui!  
Matière Noire!  
**Excès** d'évènements et/ou **modulation** annuelle.

Pas du tout.

**Silence cosmique**,  
rien à signaler.

**XENON100**  
(2009-2011)



**CDMS** (2009)



**LUX** (2013)



Un théoricien lambda

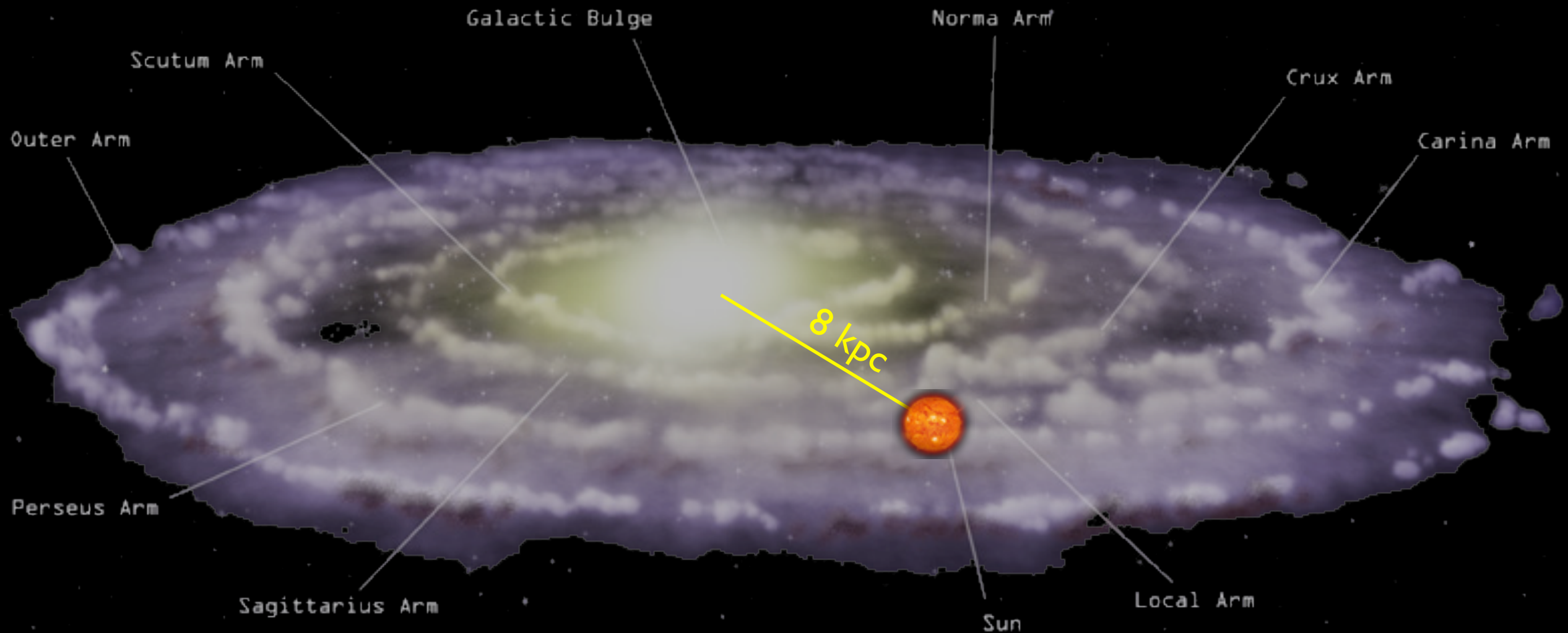


# Détection indirecte



# Détection indirecte

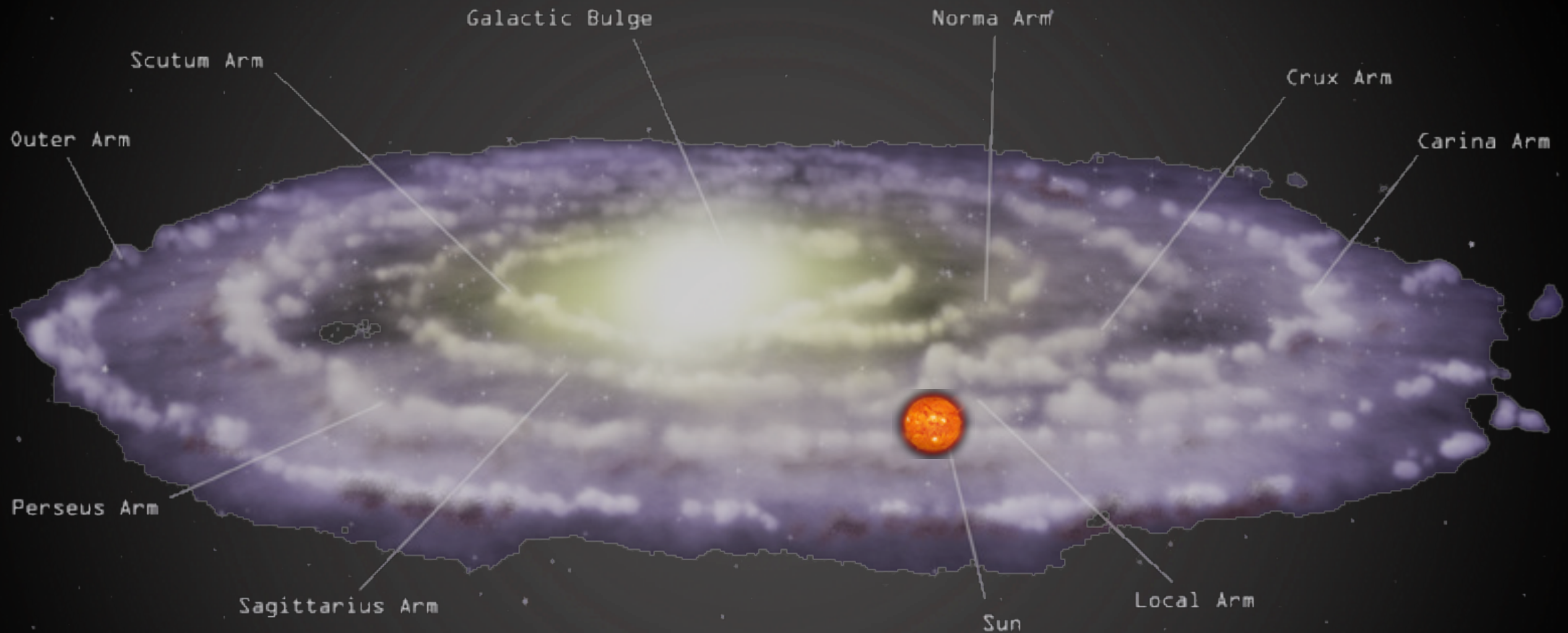
$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





# Détection indirecte

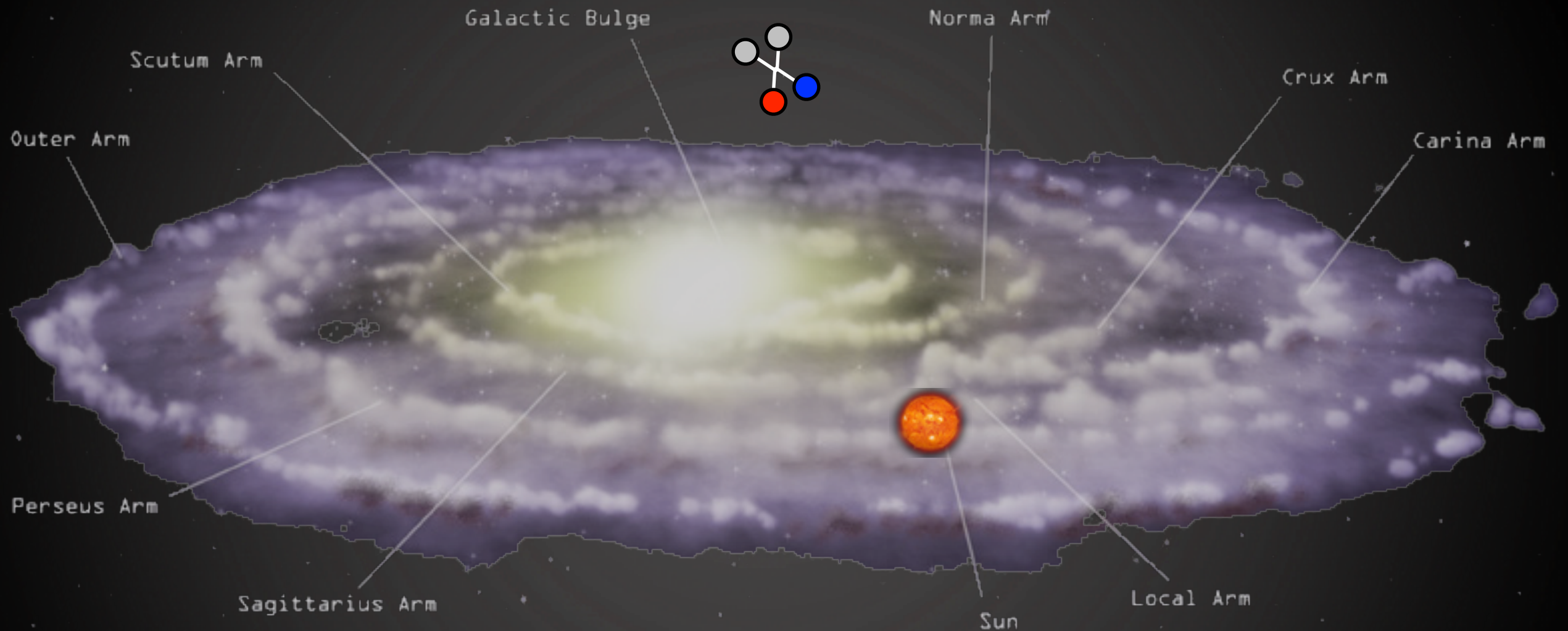
$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





# Détection indirecte

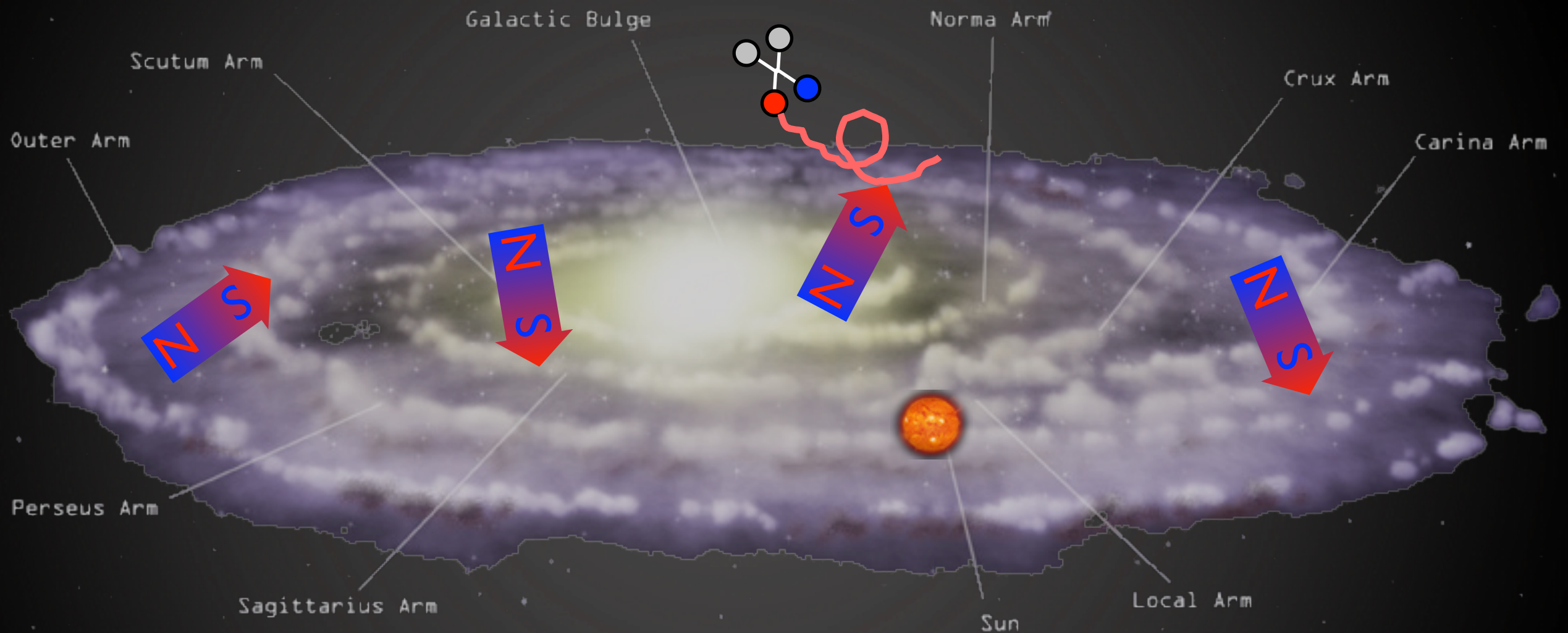
$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





# Détection indirecte

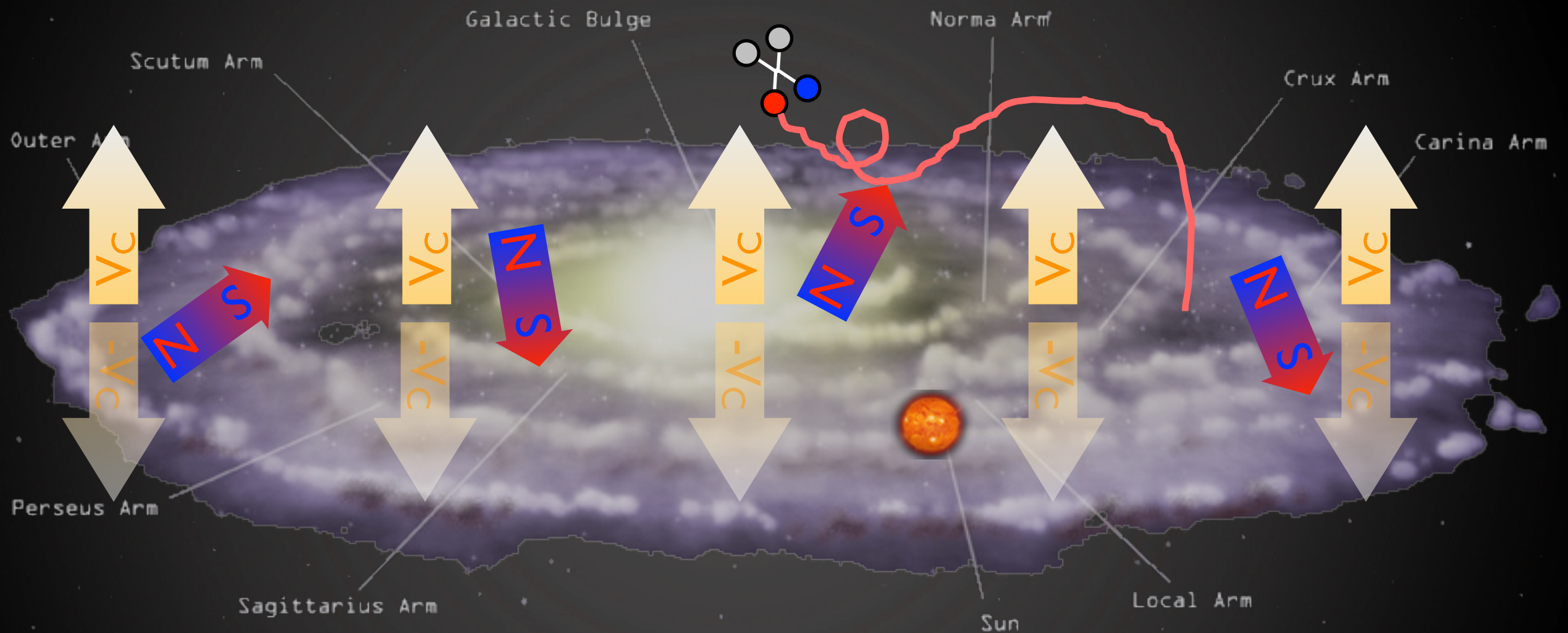
$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





# Détection indirecte

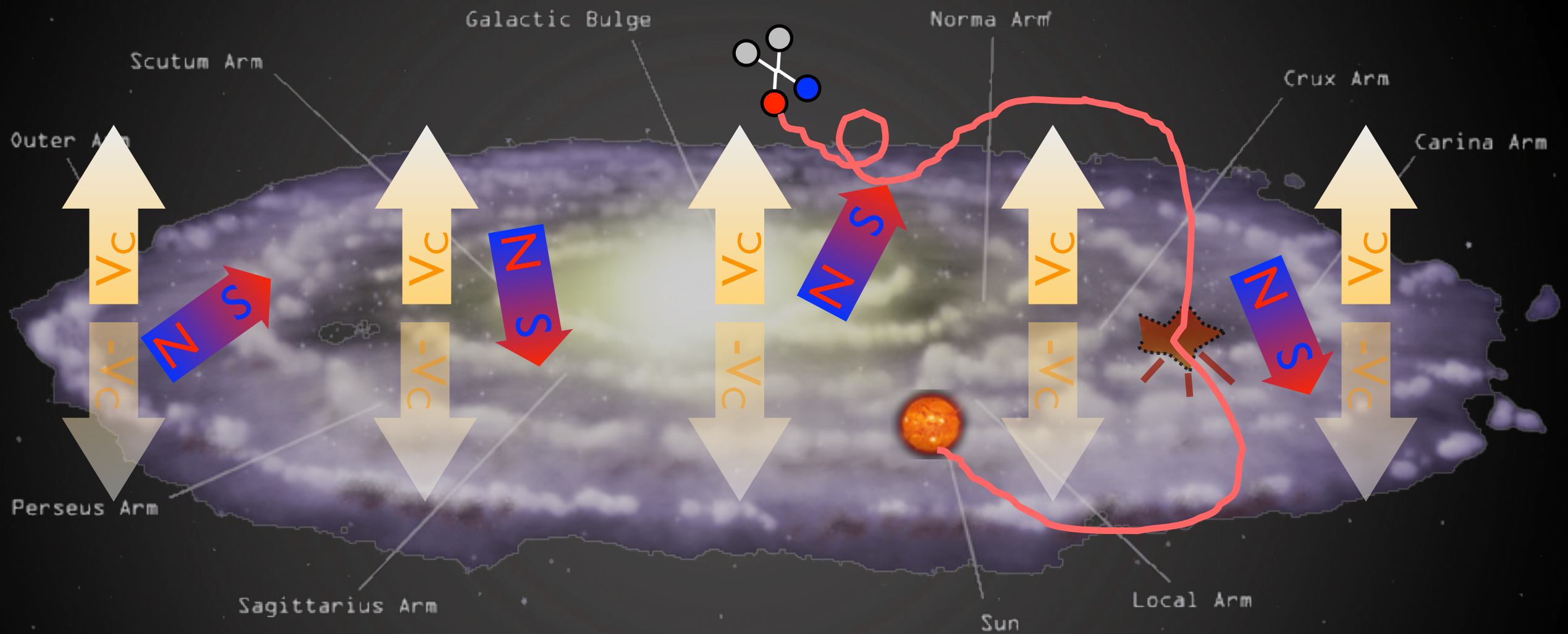
$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





# Détection indirecte

$\bar{p}$  et  $e^+$  des annihilations de MN dans le halo





Détection indirecte: état de l'art



# Détection indirecte: état de l'art



Oui! Matière noire!

Excès en **positrons**

**2008**



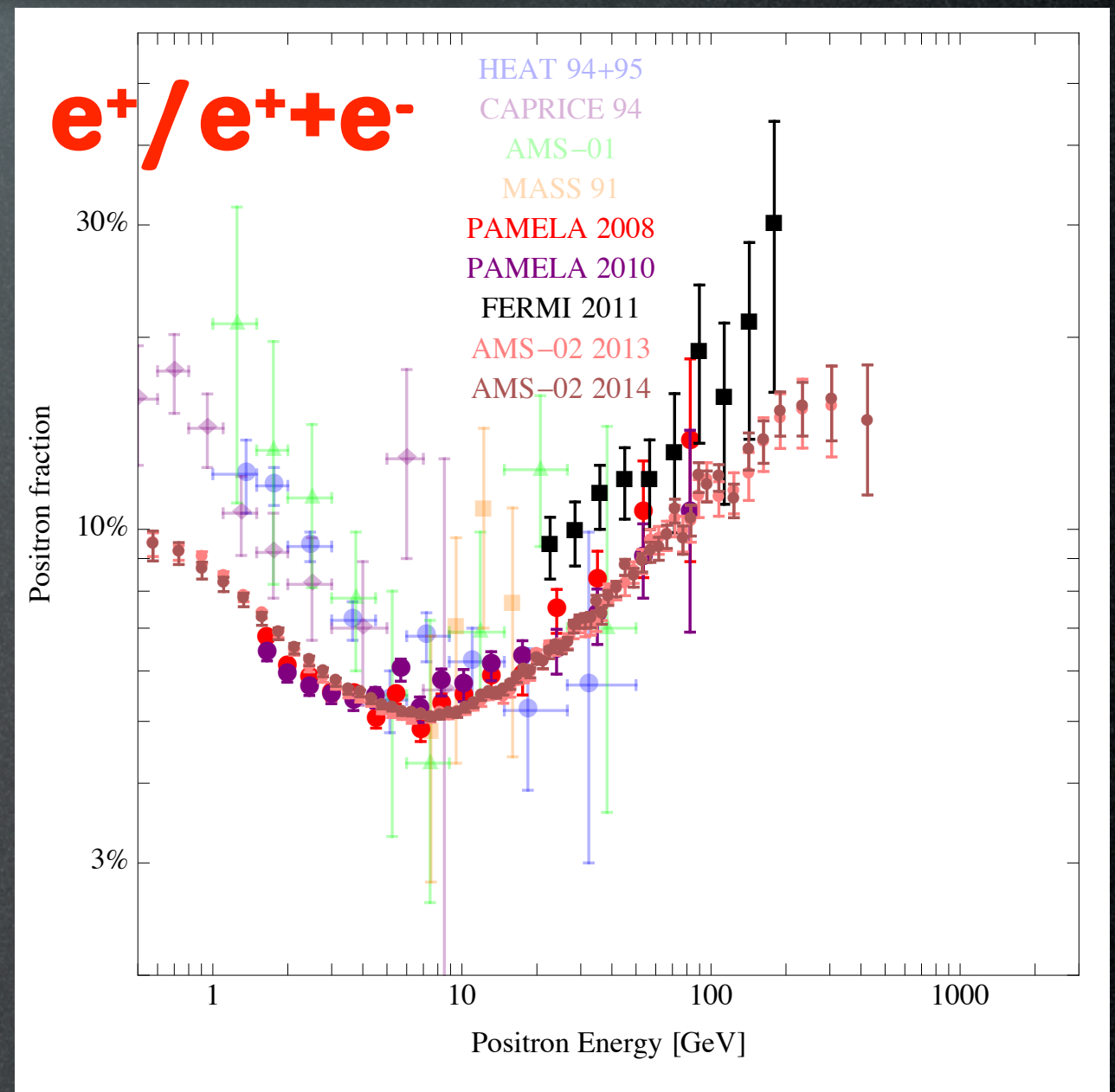
# Détection indirecte: état de l'art



Oui! Matière noire!

Excès en **positrons**

**2008**





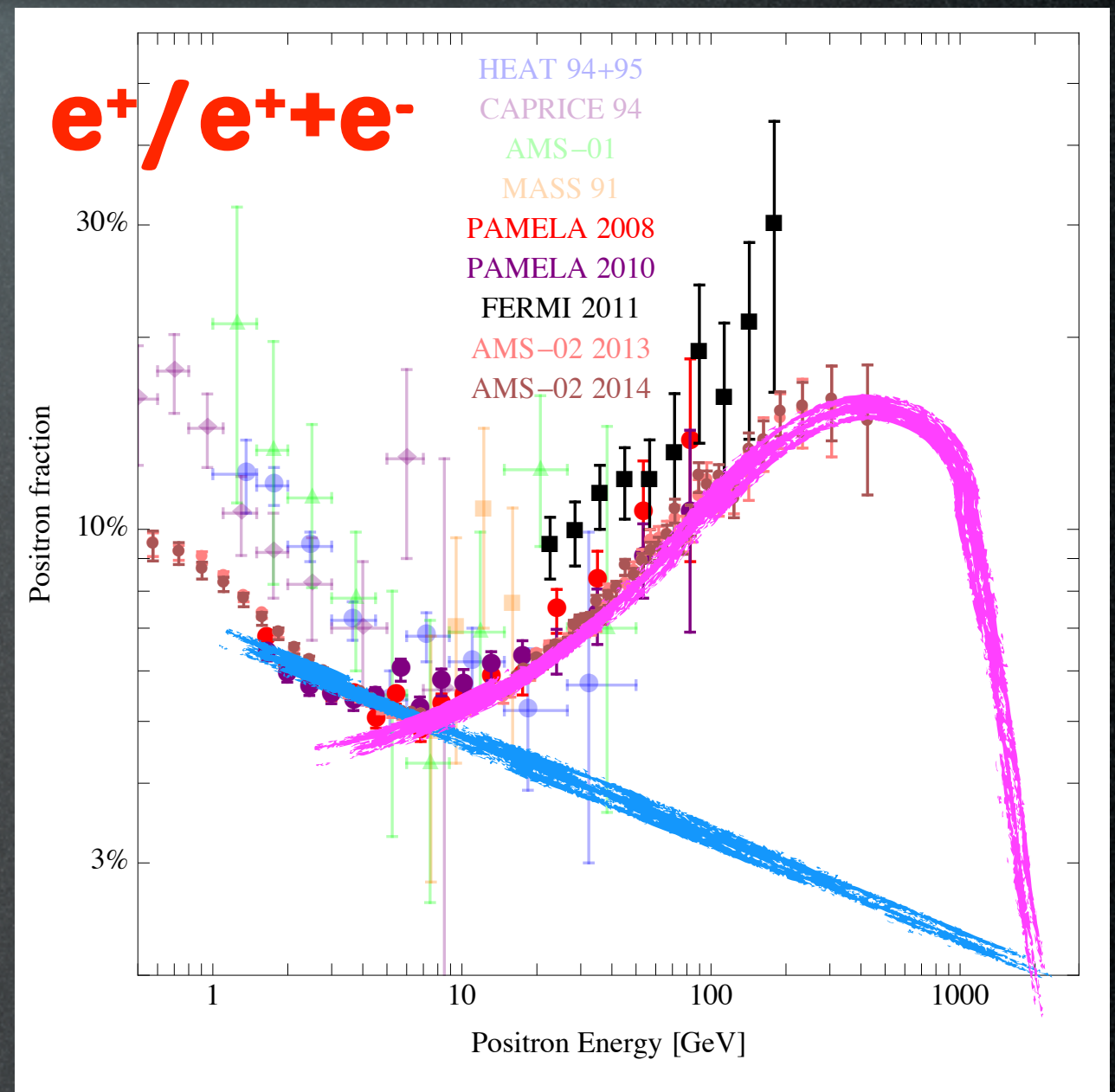
# Détection indirecte: état de l'art



Oui! Matière noire!

Excès en **positrons**

2008





# Détection indirecte: état de l'art



Oui! Matière noire!

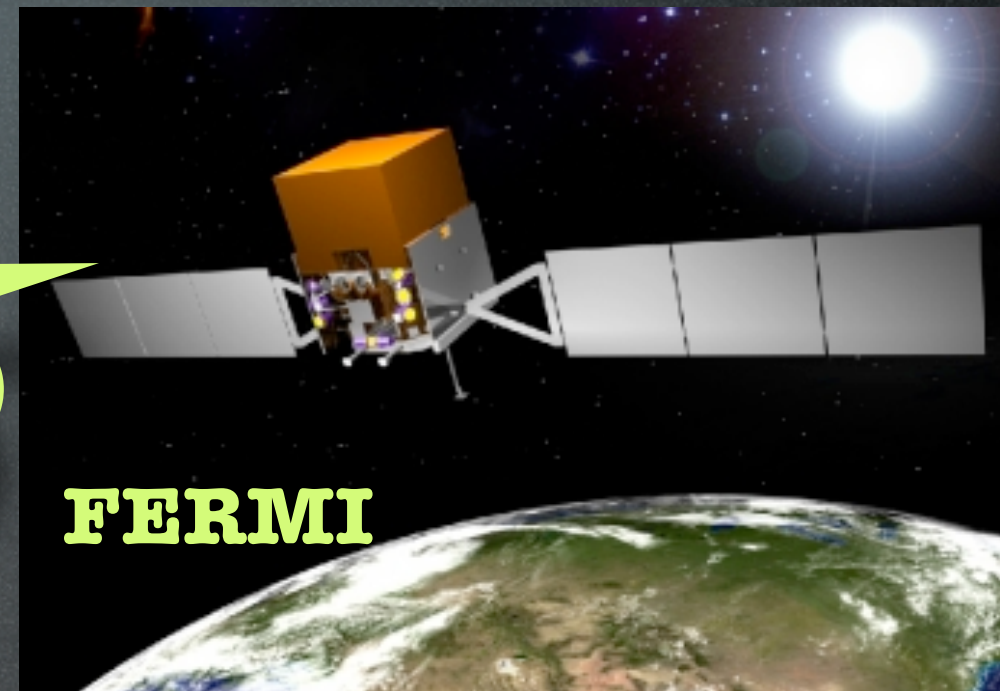
Excès en **positrons**

**2008**

Mmm, pas trop vite...

Oui, excès de **positrons**,  
mais aucun **rayon gamma**.

**2009-2013**





# Détection indirecte: état de l'art



Oui! Matière noire!

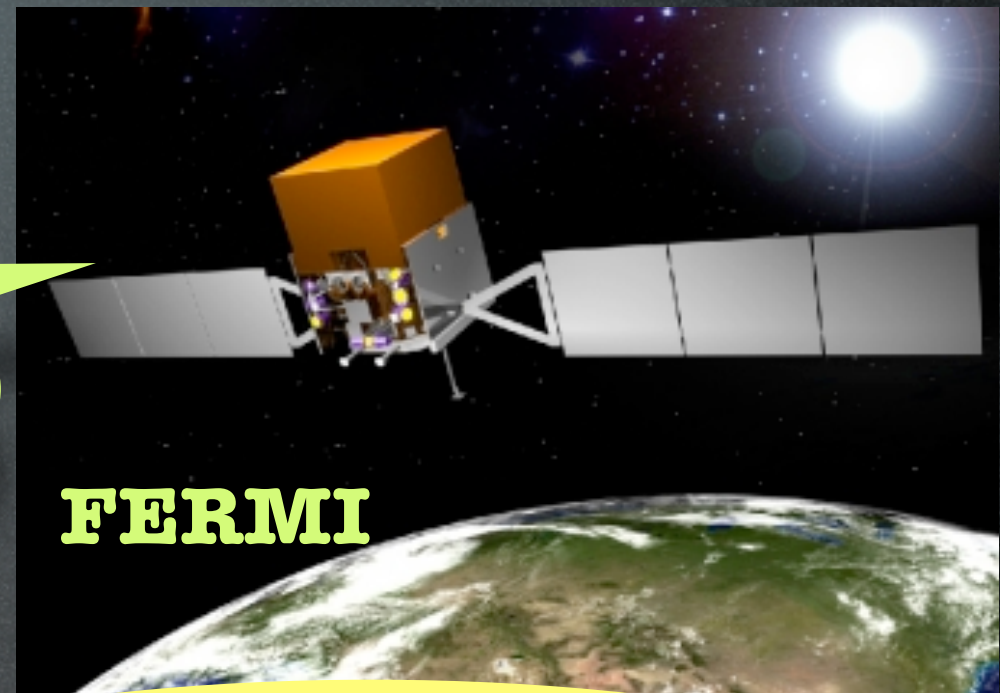
Excès en **positrons**

**2008**

Mmm, pas trop vite...

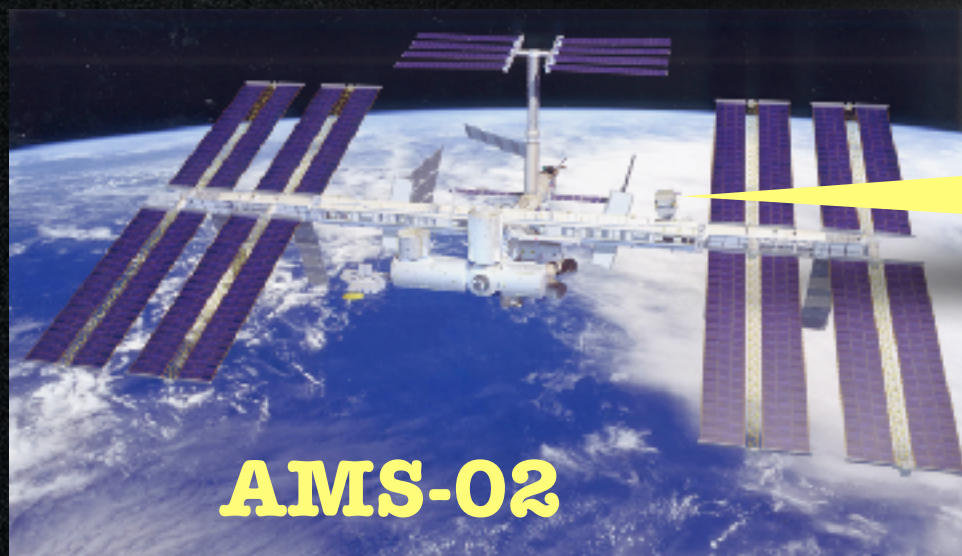
Oui, excès de **positrons**,  
mais aucun **rayon gamma**.

**2009-2013**



Voyons voir...

**2011-...**

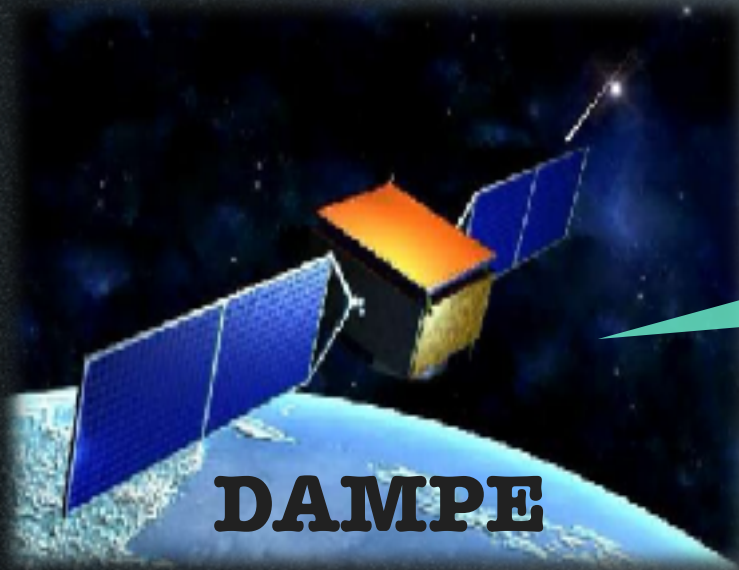




Détection indirecte: état de l'art



# Détection indirecte: état de l'art



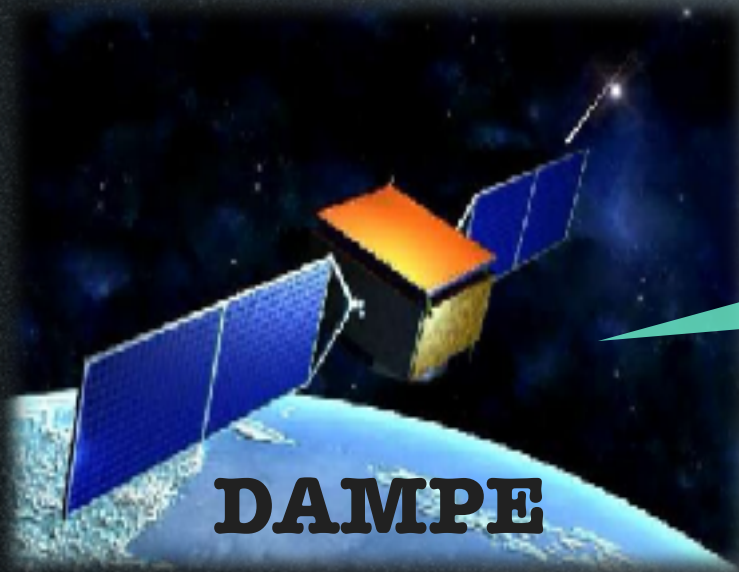
Oui! Matière noire!

Excès en **electrons + positrons**

**2017**



# Détection indirecte: état de l'art



**DAMPE**

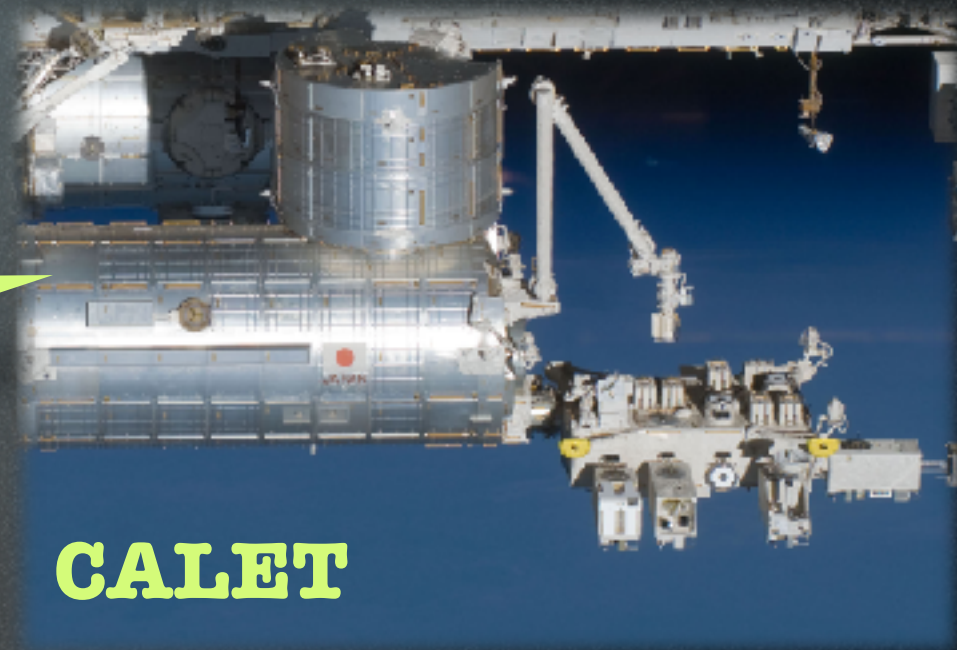
Oui! Matière noire!  
Excès en **electrons + positrons**

**2017**

Mmm, pas trop vite...

Pas d'excès, incertitudes trop grandes.

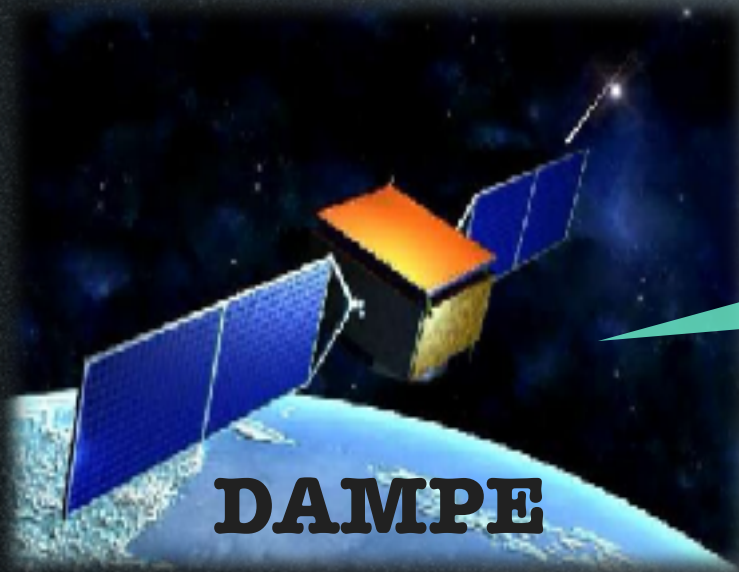
**2017**



**CALET**



# Détection indirecte: état de l'art



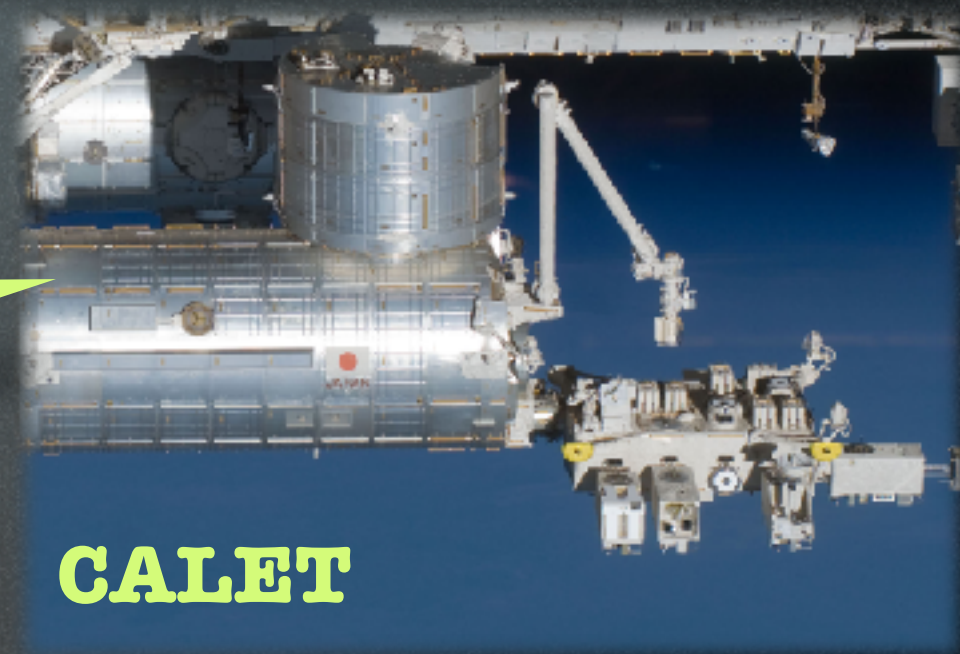
Oui! Matière noire!  
Excès en **electrons + positrons**

2017

Mmm, pas trop vite...

Pas d'excès, incertitudes trop grandes.

2017



Un théoricien lambda





# Production aux collisionneurs



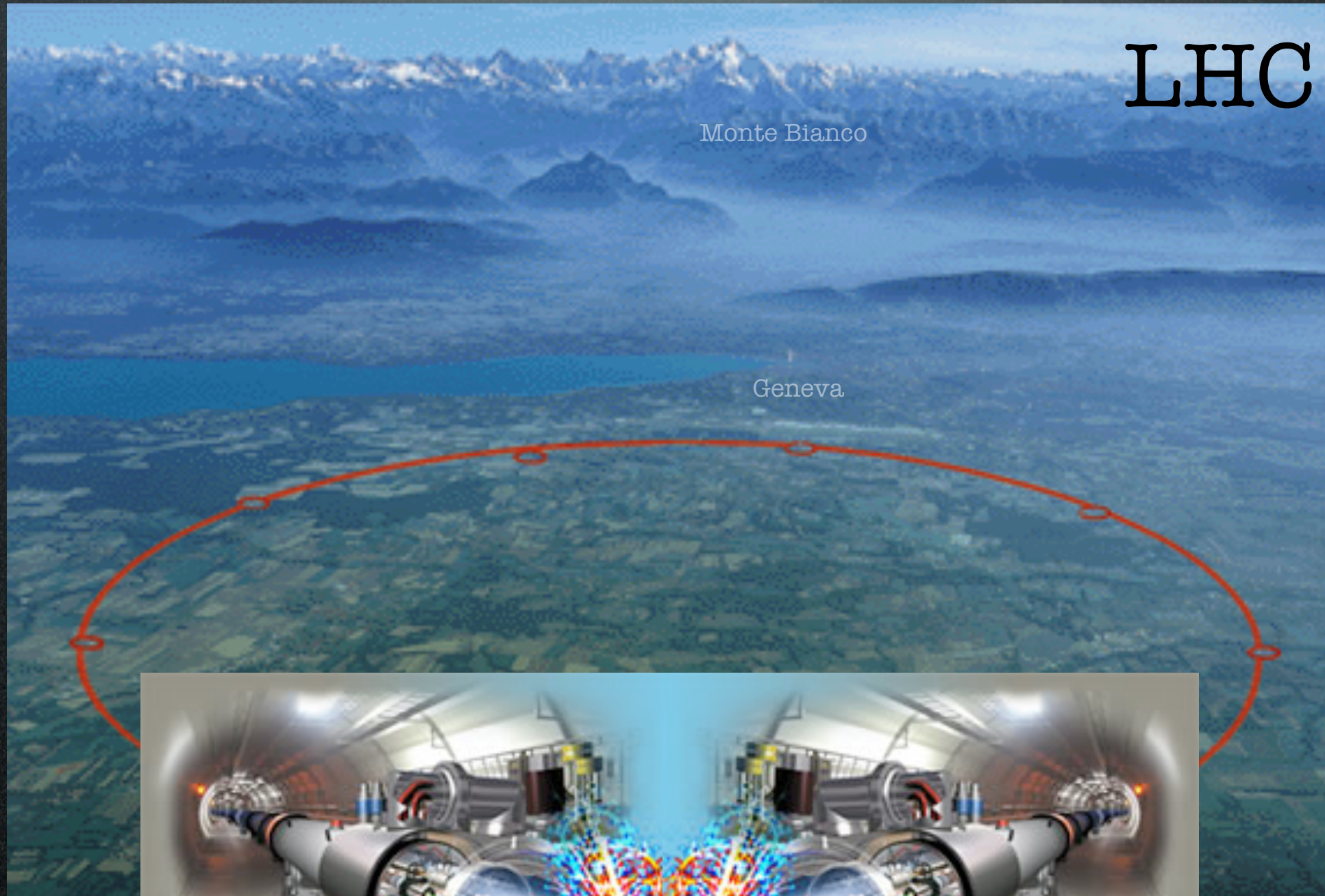
# Production aux collisionneurs



Special guest star:  
Fabio Cirelli

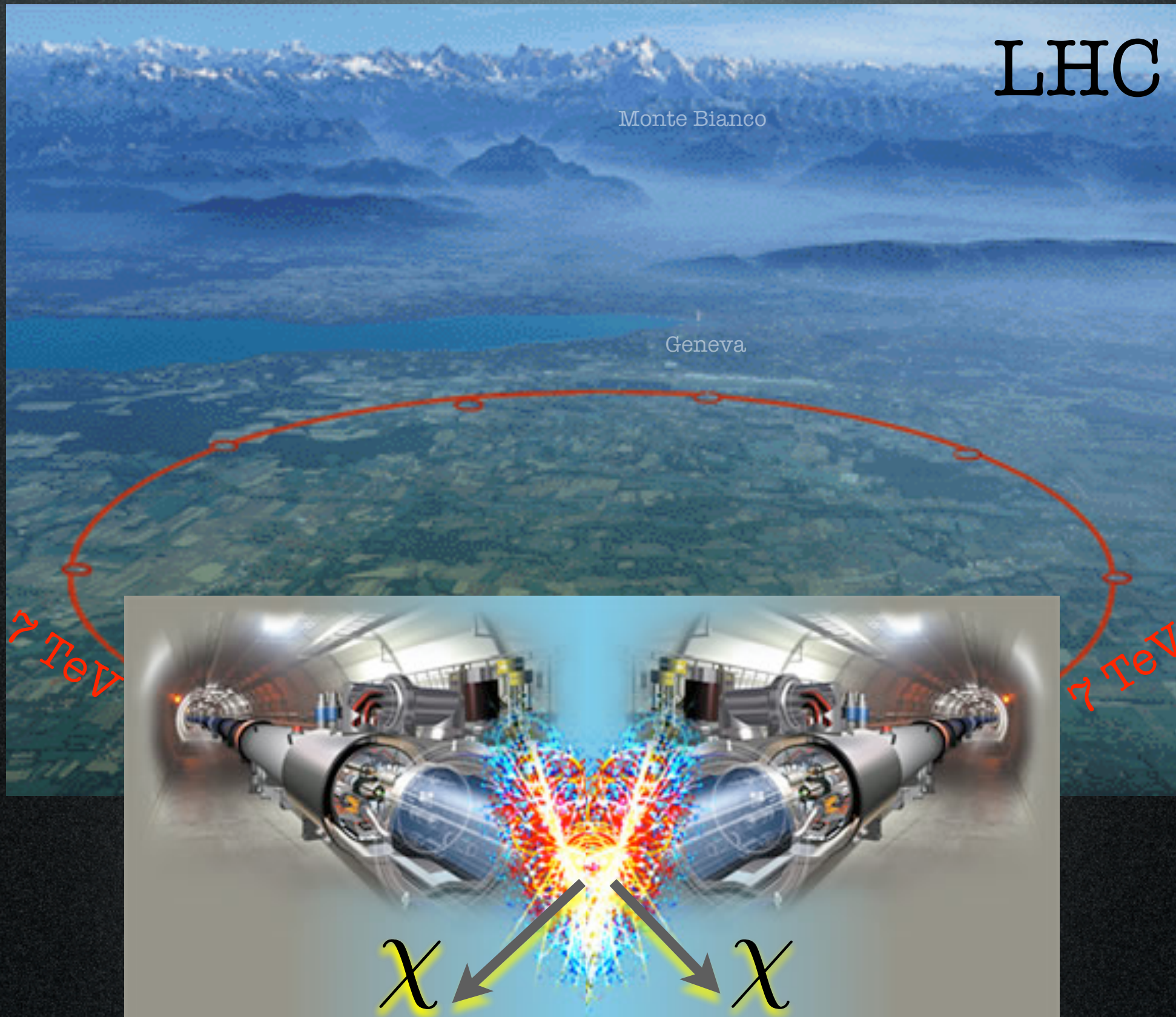


# Production aux collisionneurs



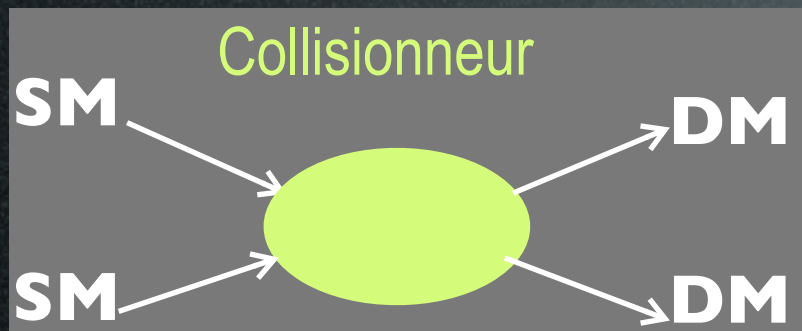


# Production aux collisionneurs

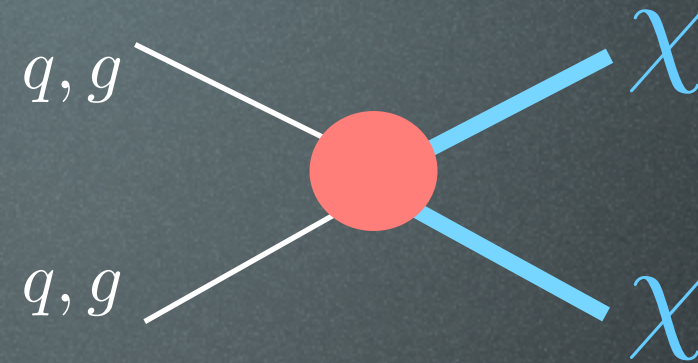




# Production aux collisionneurs

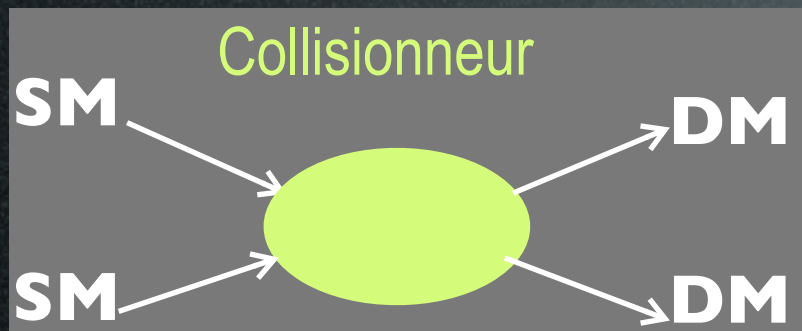


Au LHC:

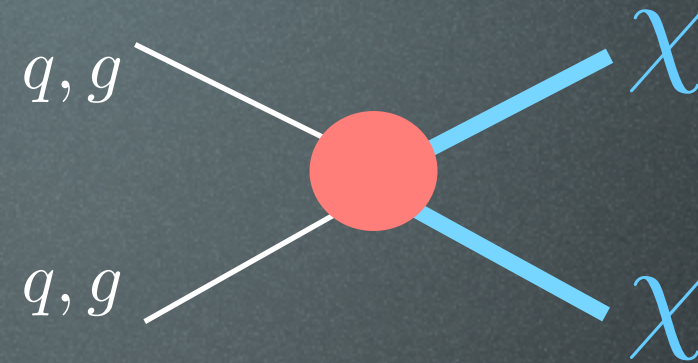




# Production aux collisionneurs



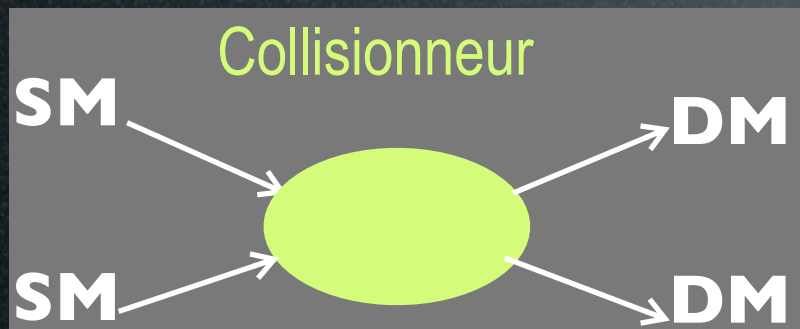
Au LHC:



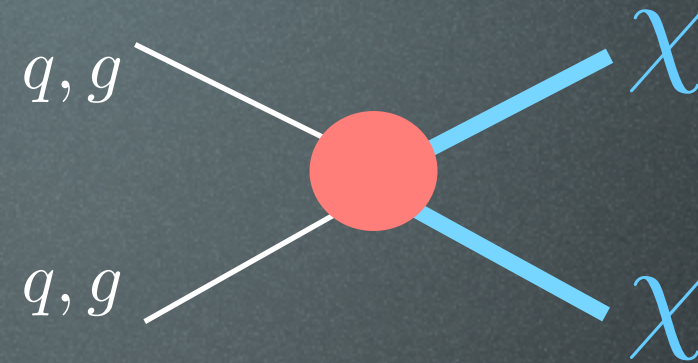
Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces



# Production aux collisionneurs



Au LHC:

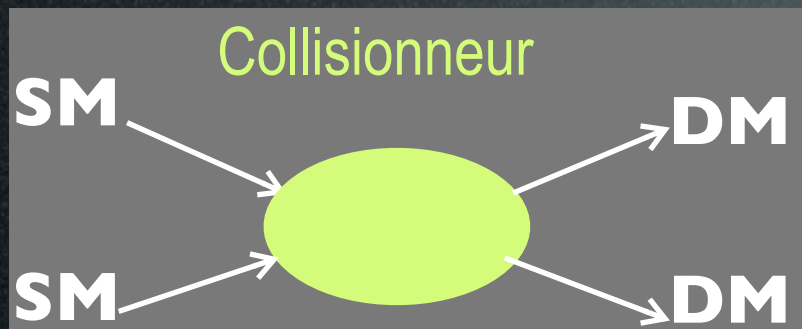


Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

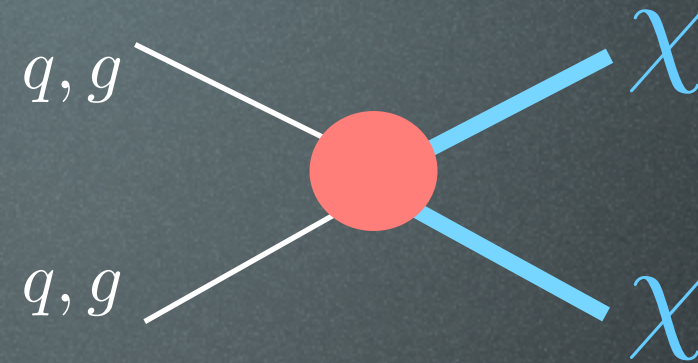
L'évidence est: **énergie manquante**



# Production aux collisionneurs



Au LHC:

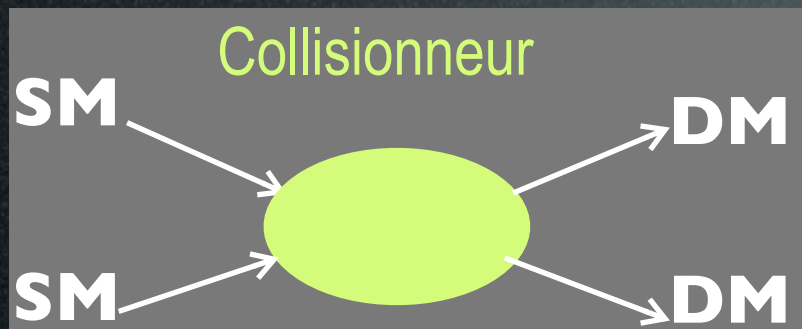


Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

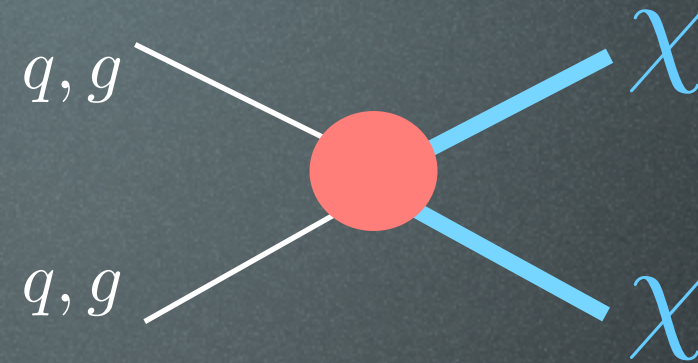
L'évidence est: énergie manquante  
transverse



# Production aux collisionneurs

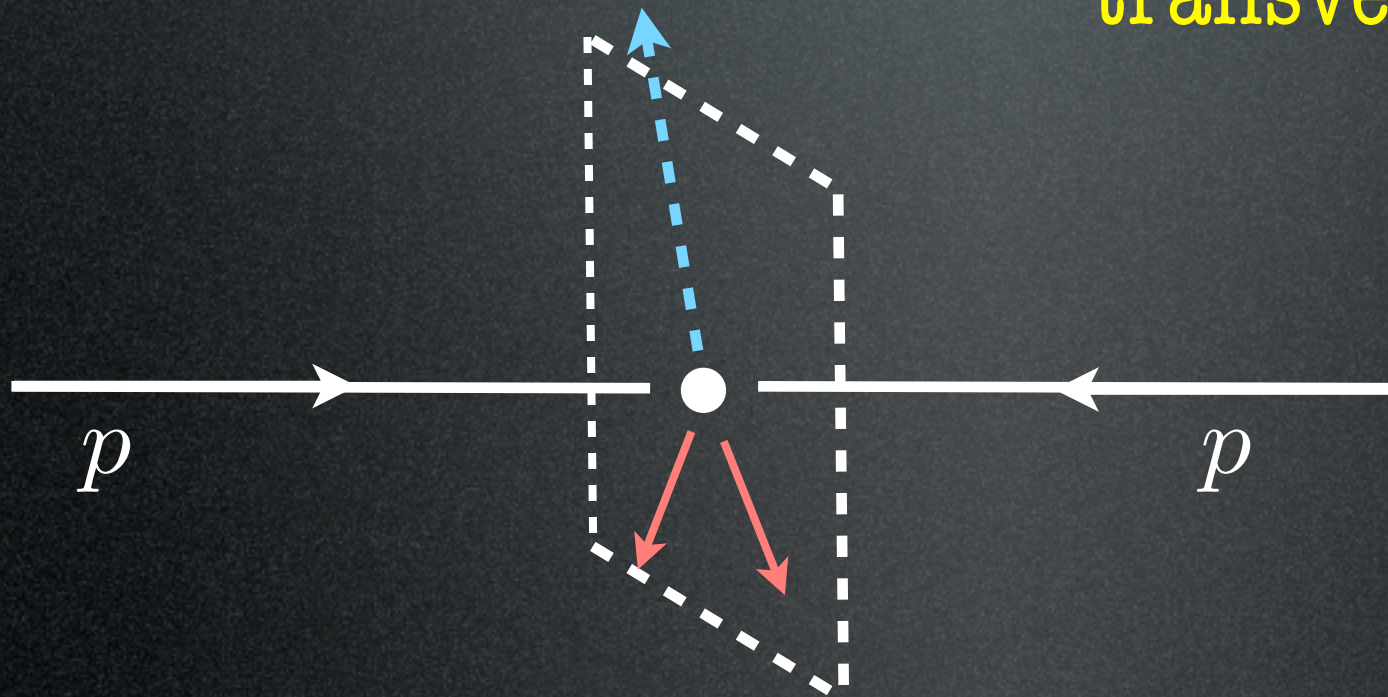


Au LHC:



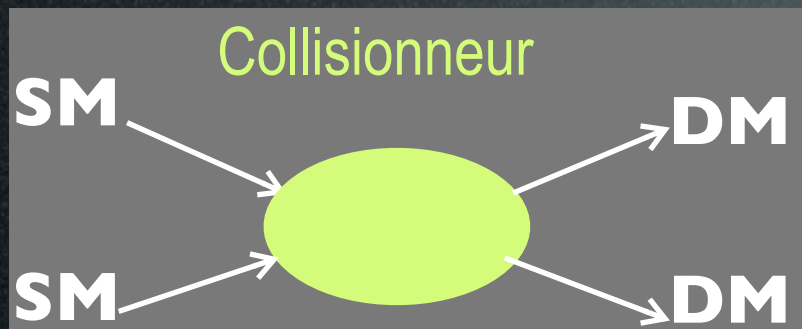
Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

L'évidence est: énergie manquante  
transverse

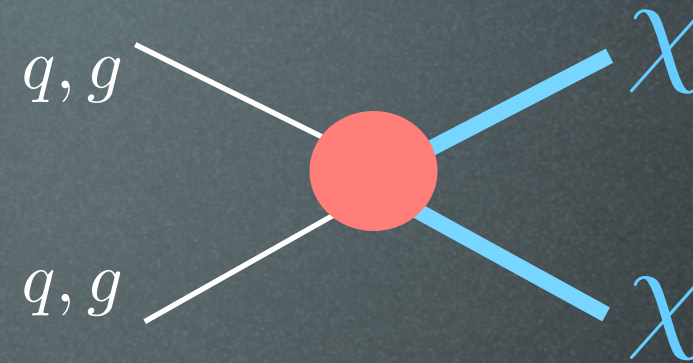




# Production aux collisionneurs



Au LHC:

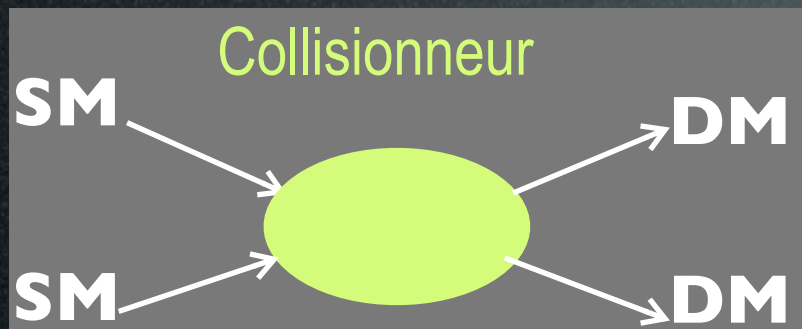


Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

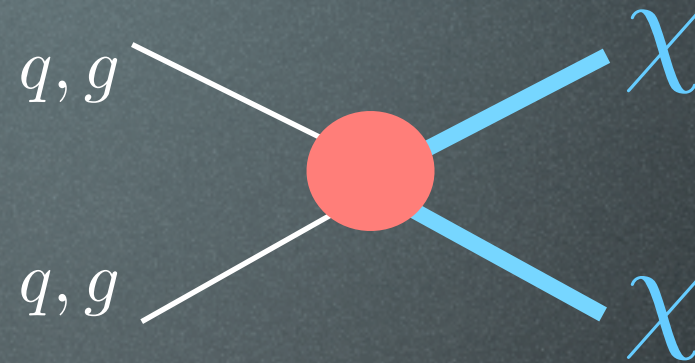
L'évidence est: énergie manquante  
transverse



# Production aux collisionneurs



Au LHC:



Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

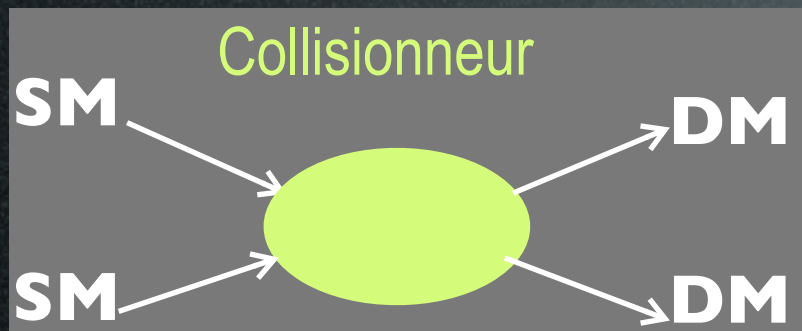
L'évidence est: énergie manquante  
transverse

**Status:**

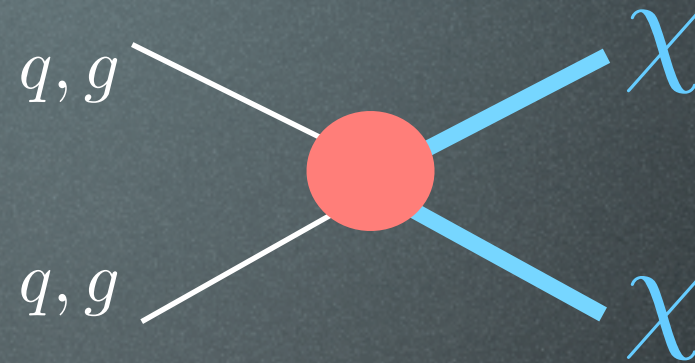
Pour le moment,  
pas d'énergie  
manquante.  
Du tout.



# Production aux collisionneurs



Au LHC:



Le 'problème' est: la matière noire ne laisse pas de traces

L'évidence est: énergie manquante  
transverse

**Status:**

Pour le moment,  
pas d'énergie  
manquante.  
Du tout.

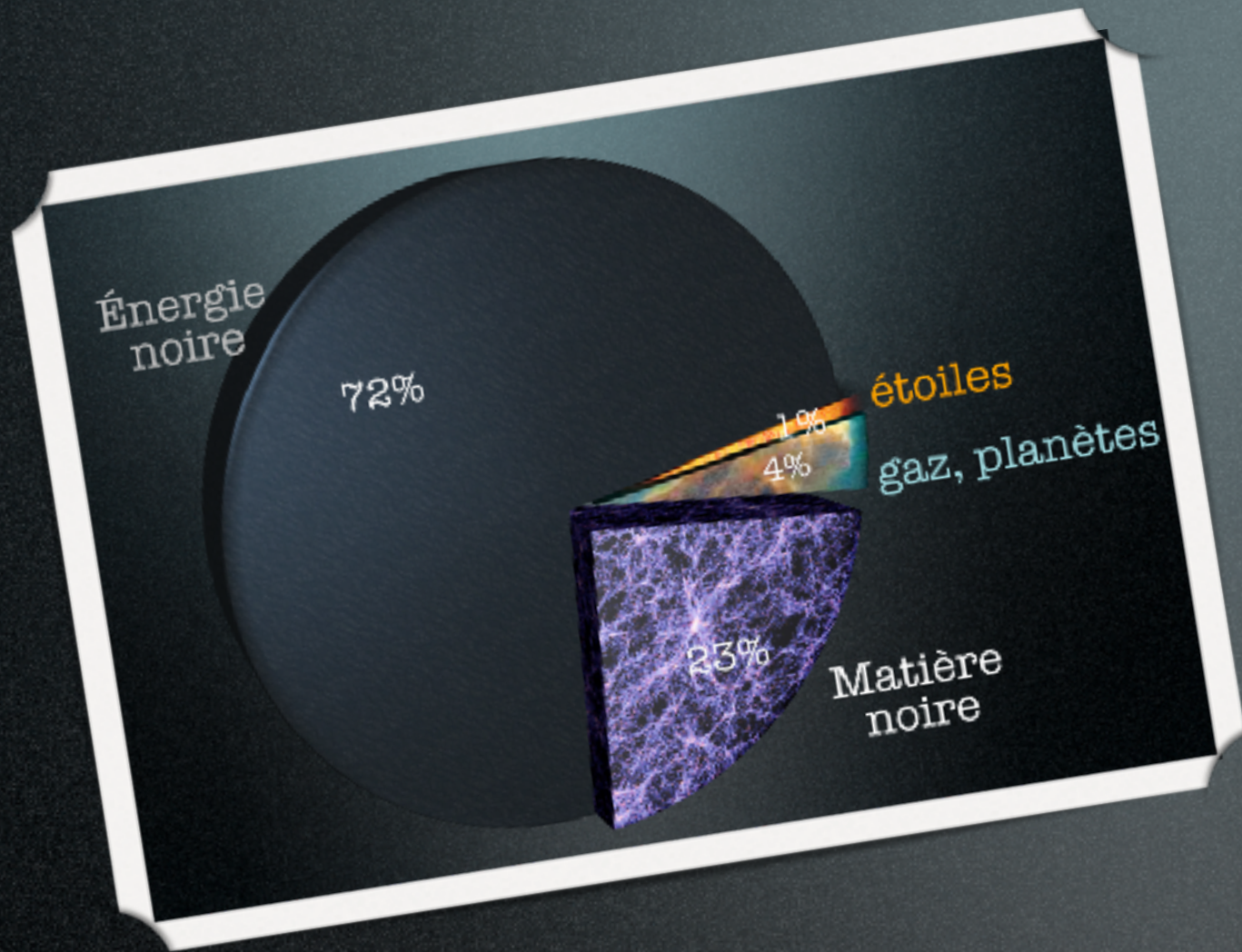




De quoi est fait notre Universe ?

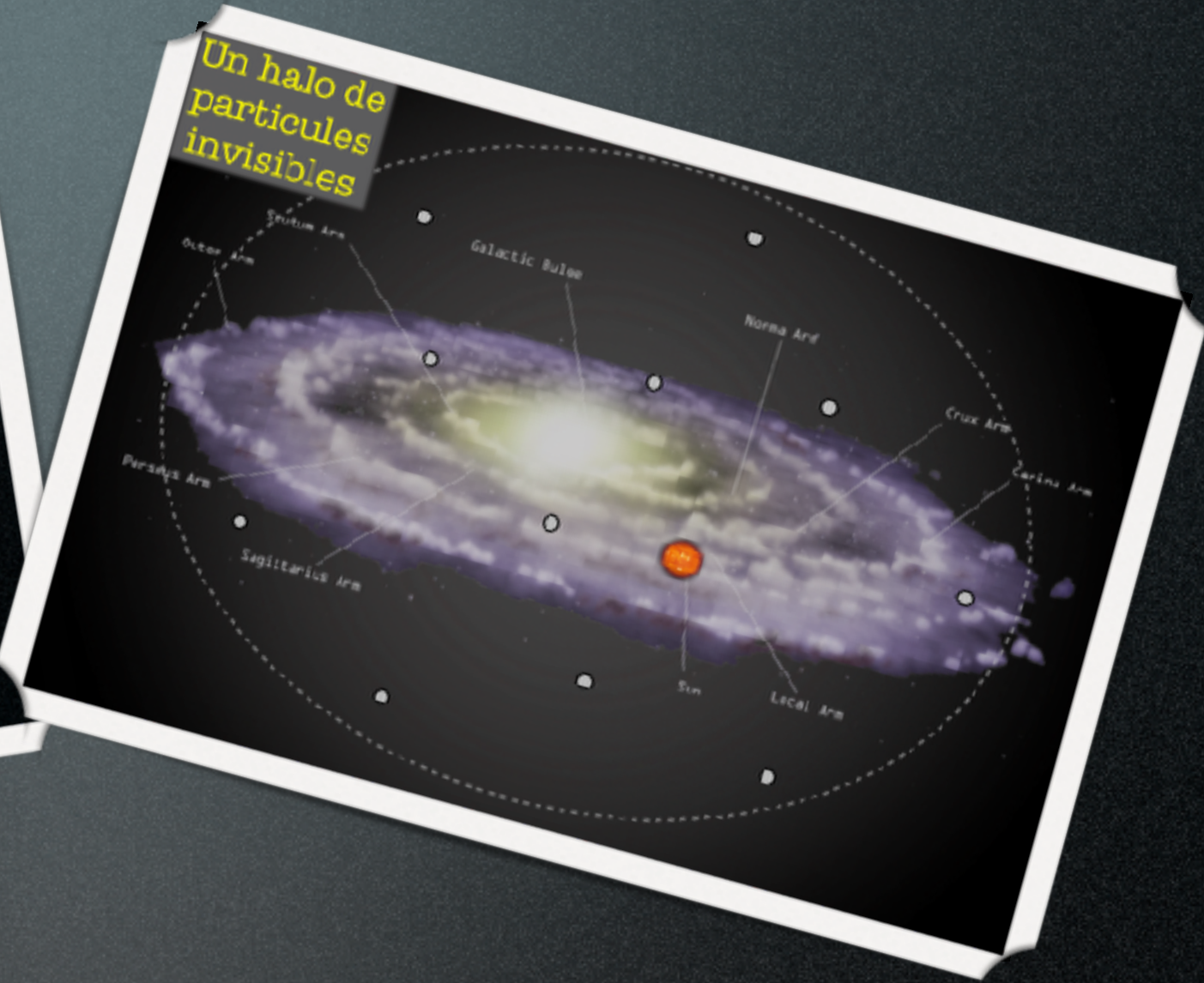
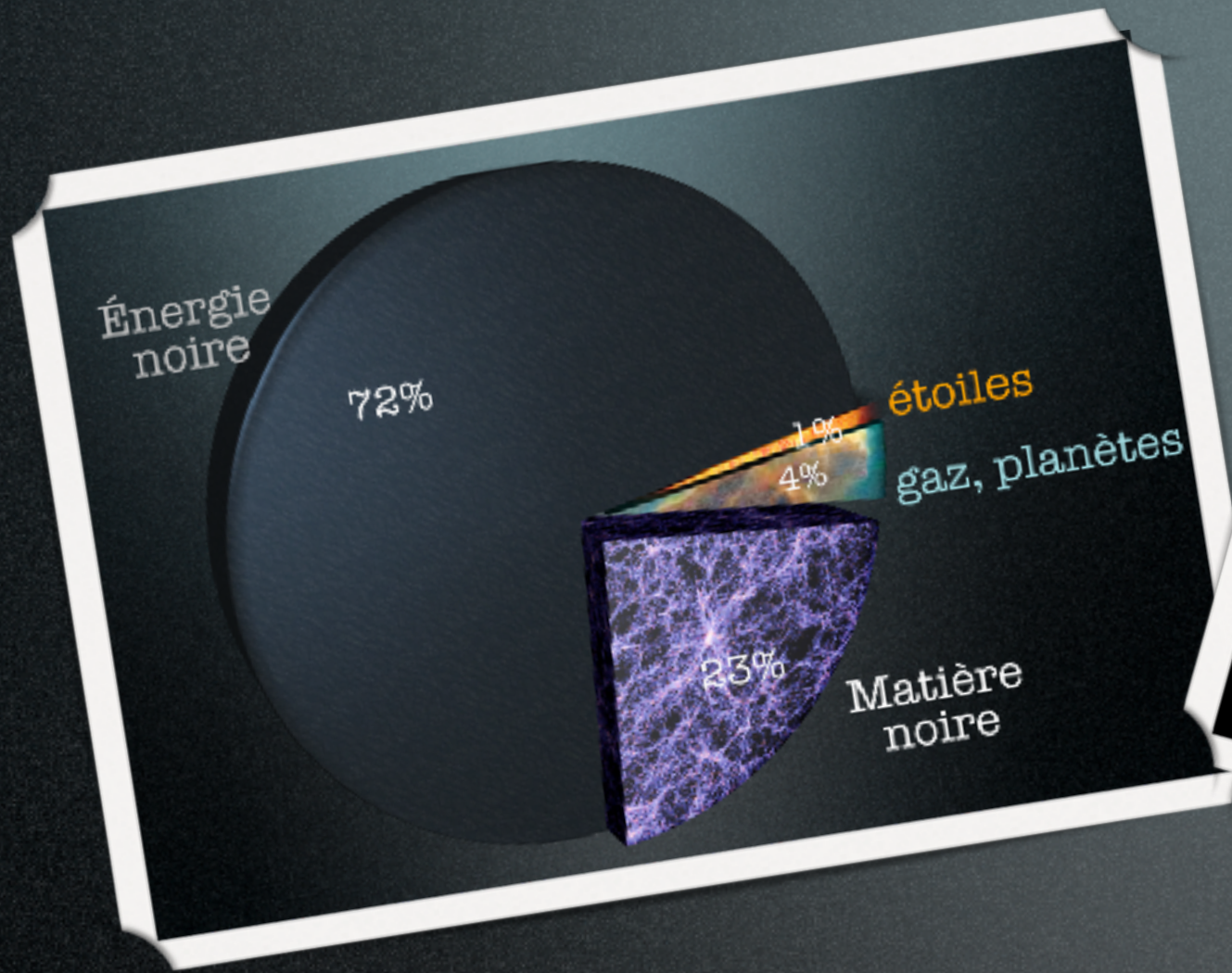


# De quoi est fait notre Universe ?



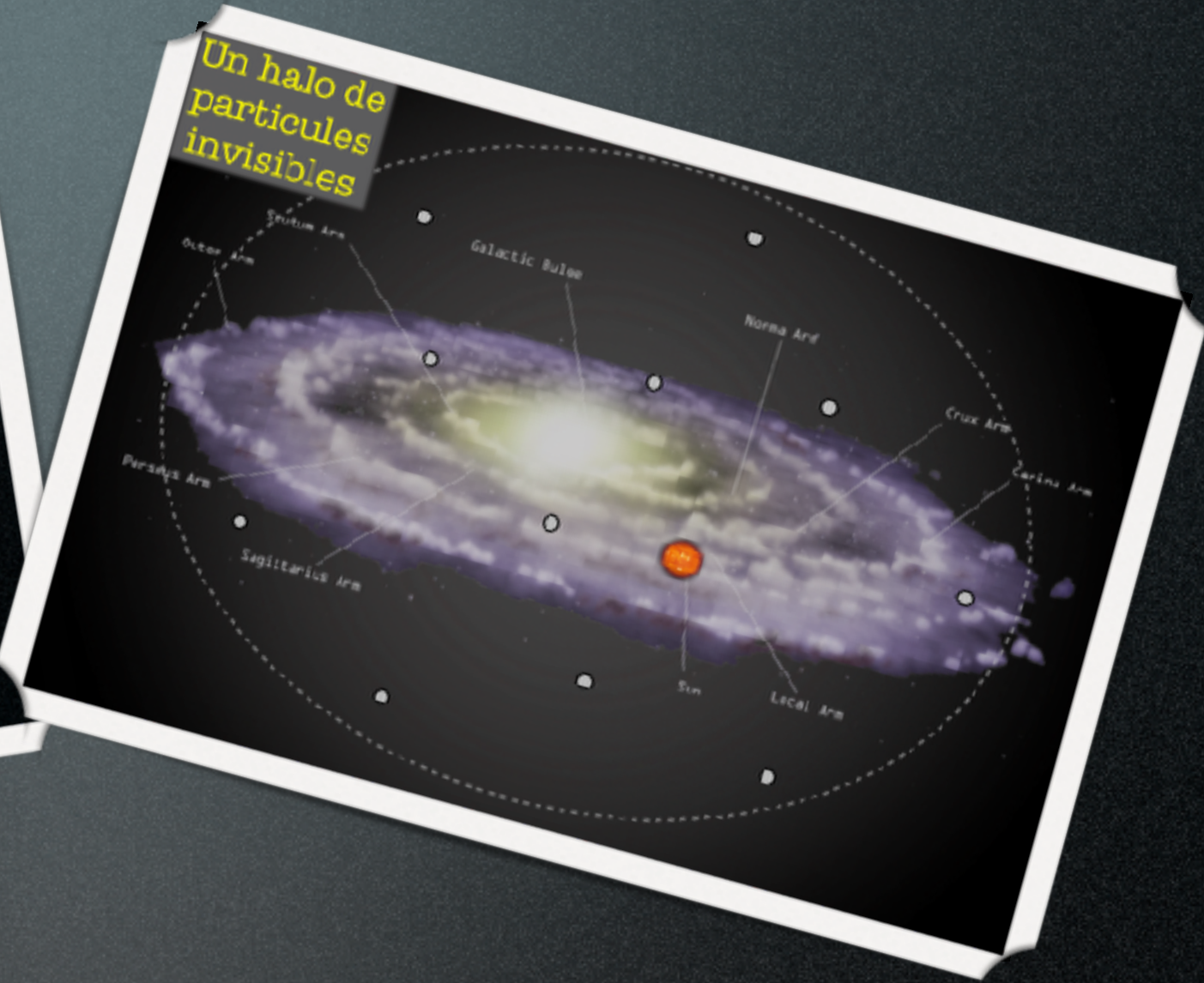
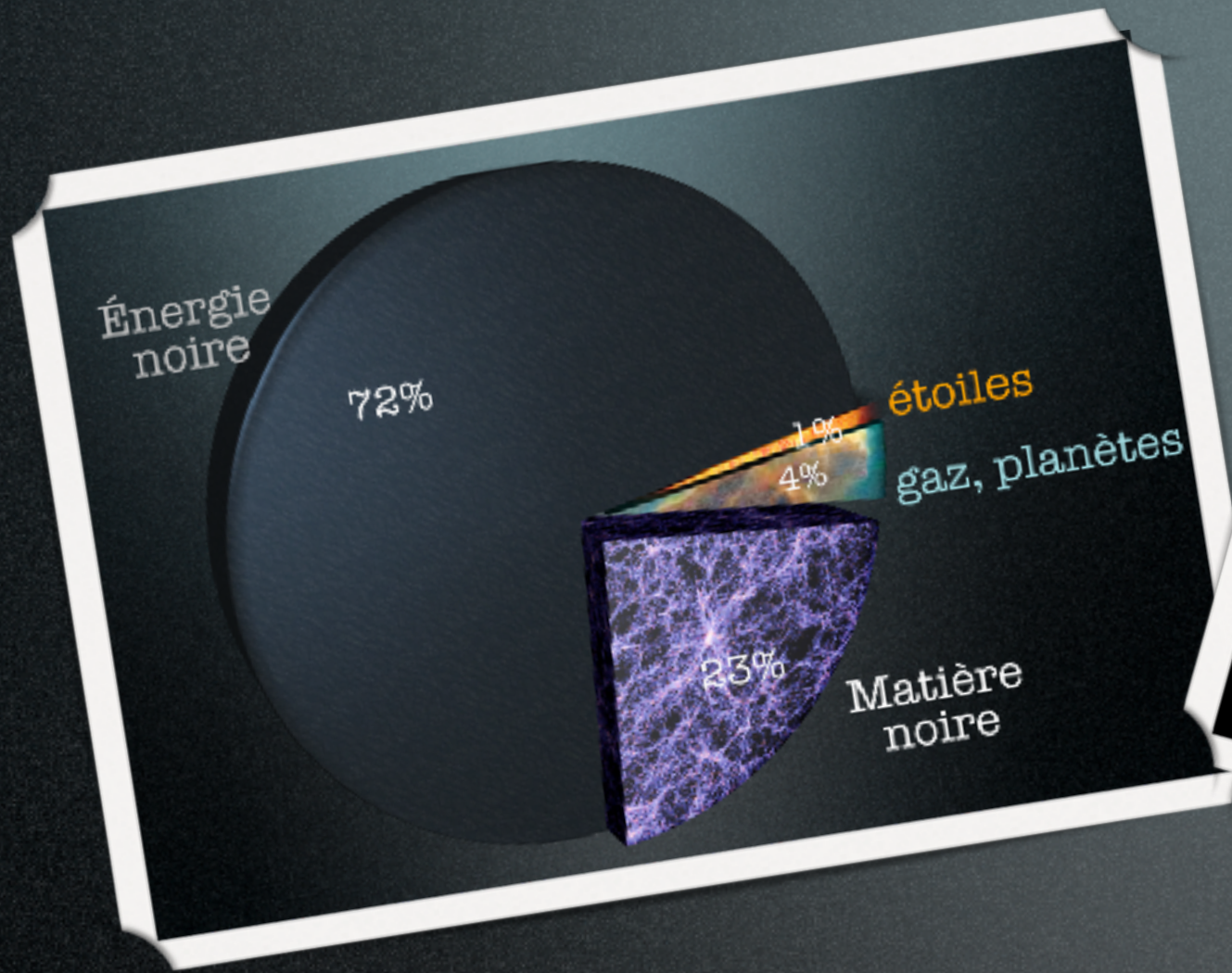


# De quoi est fait notre Universe ?

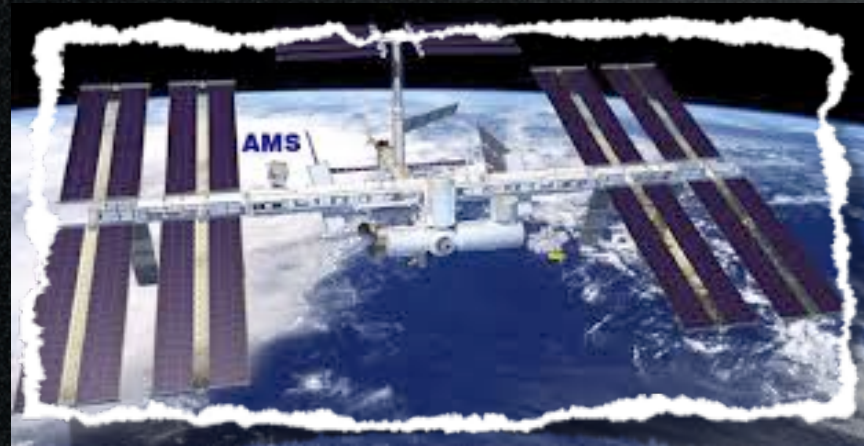




# De quoi est fait notre Universe ?

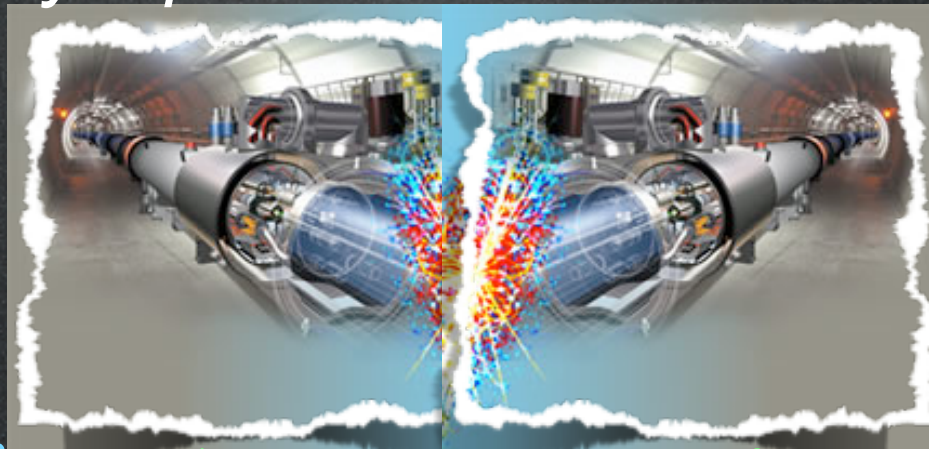


*Physique spatiale*



‘détection indirecte’

*Physique aux collisionneurs*



‘production’

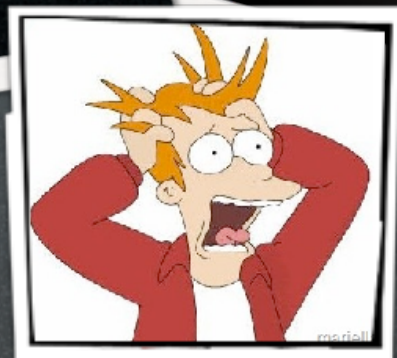
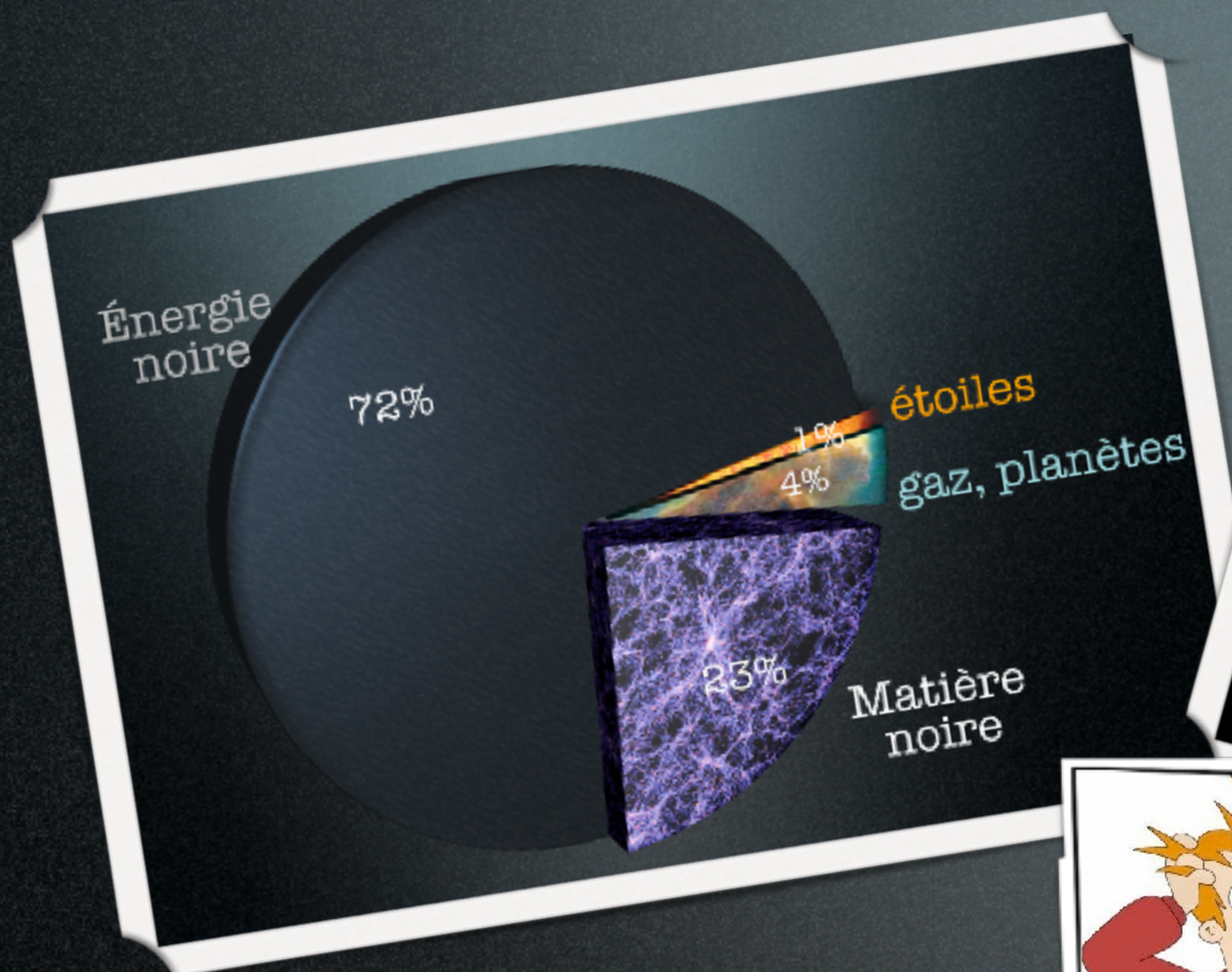
*Physique souterraine*



‘détection directe’



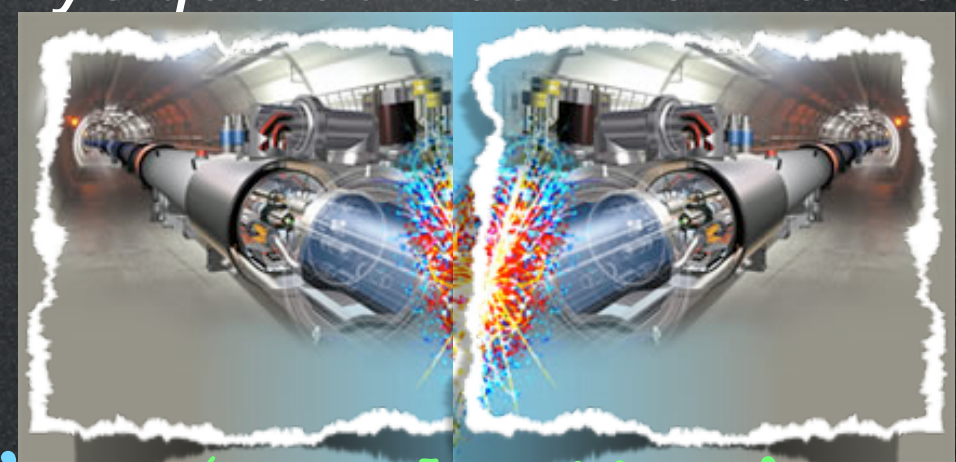
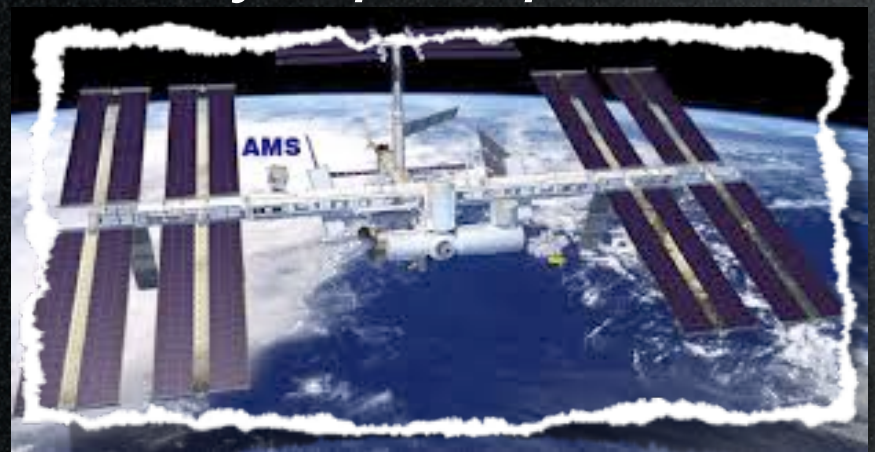
# De quoi est fait notre Universe ?



*Physique spatiale*

*Physique aux collisionneurs*

*Physique souterraine*



‘détection indirecte’

‘production’

‘détection directe’



**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:

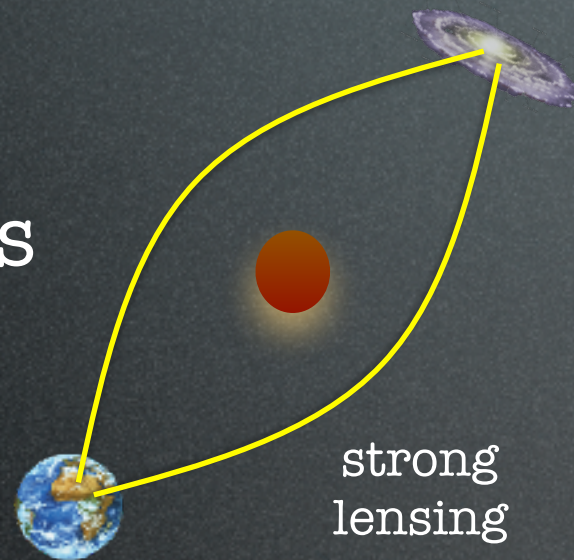
an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~neutrons~~

- ~~gas~~

- ~~Black Holes~~

- ~~brown dwarves~~

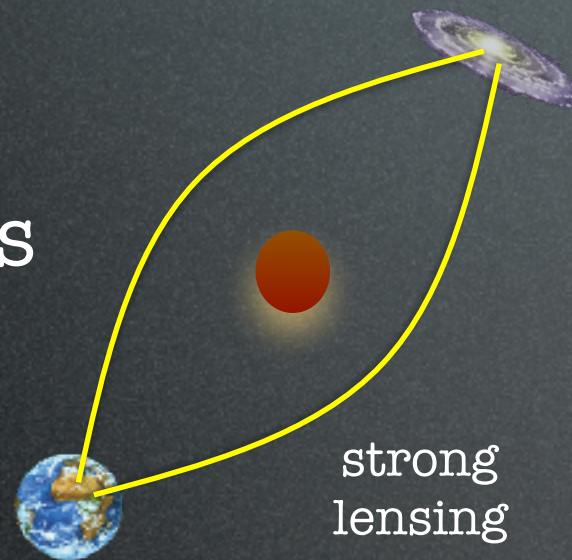




# DM can **NOT** be:

an astro *je ne sais pas quoi*:

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



a baryon of the SM:



# DM can **NOT** be:

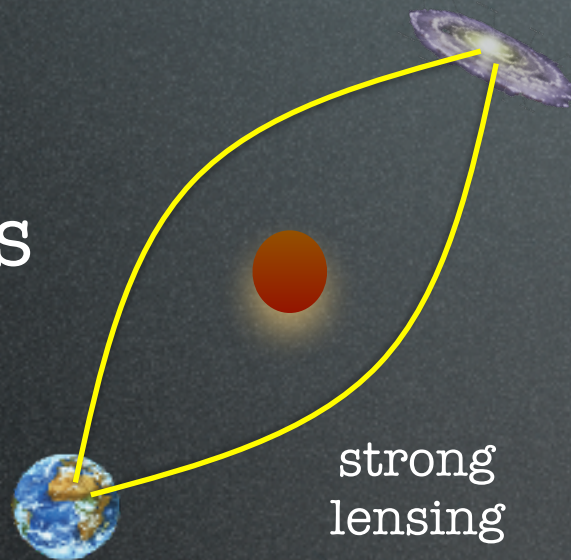
an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~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:

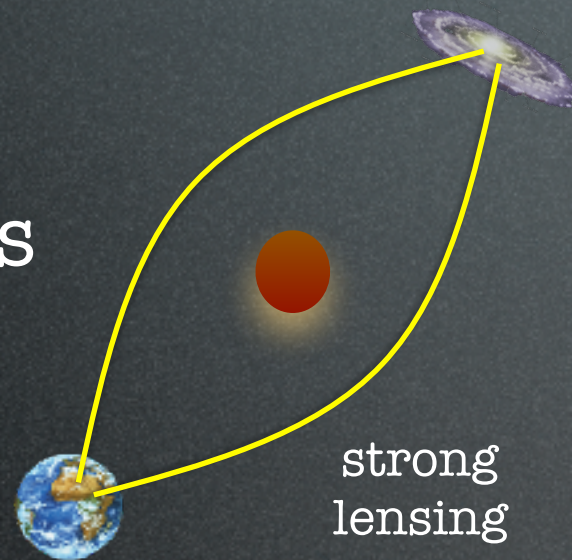
an astro *je ne sais pas quoi*:

- ~~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

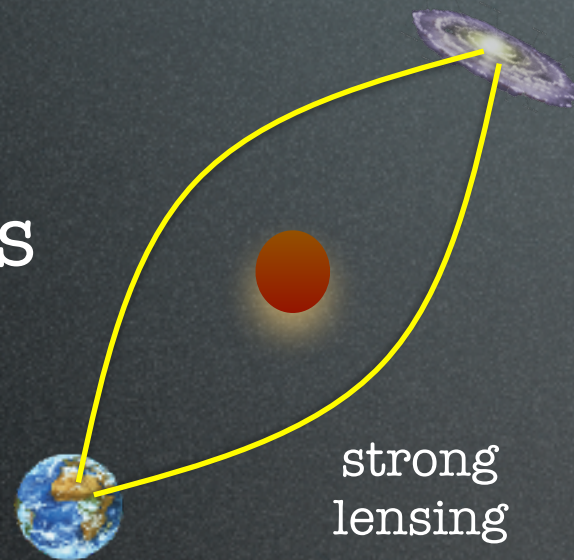
neutrinos:



# 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

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

$\Lambda$ CDM - Gadget2 - 768 Mpc<sup>3</sup>