

9 mars 2024
Société Astronomique de Montgeron

Nouvelles sur la recherche de la **Matière Noire**

Marco Cirelli
(CNRS LPTHE Jussieu)



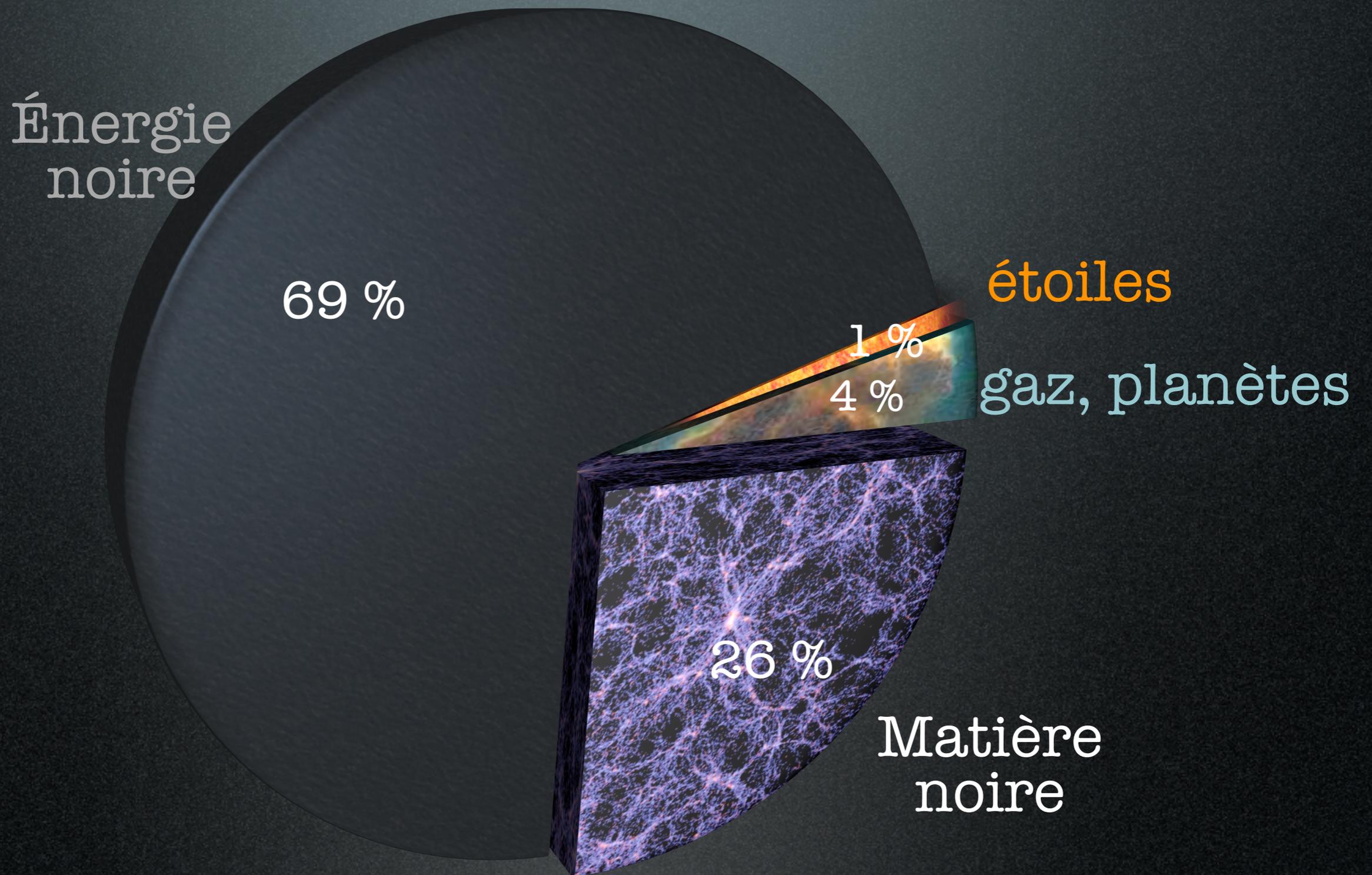
9 mars 2024
Société Astronomique de Montgeron

Nouvelles sur la recherche de la **Matière Noire**

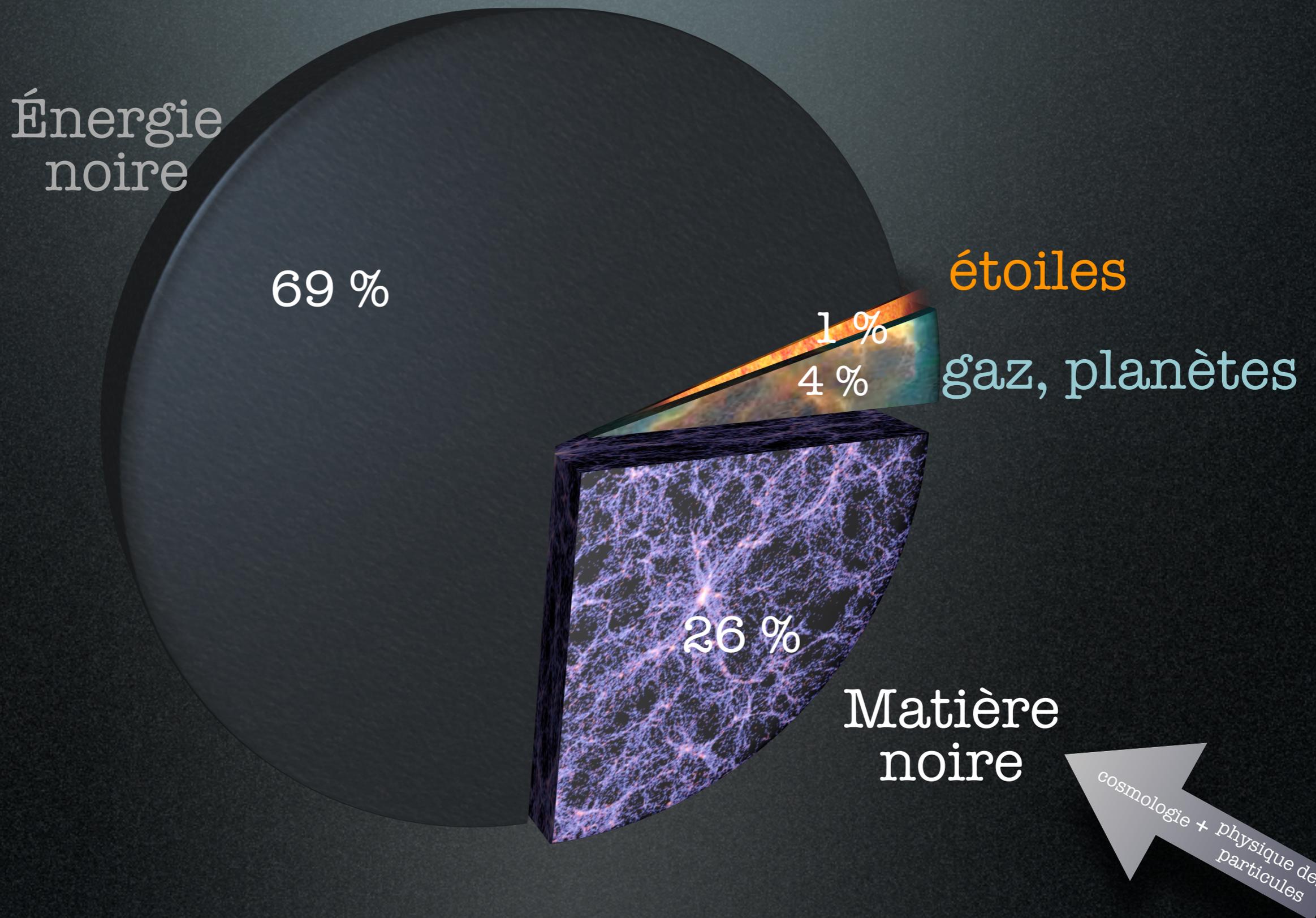
Marco Cirelli
(CNRS LPTHE Jussieu)



95% de notre Univers est inconnu, noir



95% de notre Univers est inconnu, noir



Comment prouver
l'**existence**
de la Matière Noire ?

Preuves d'existence

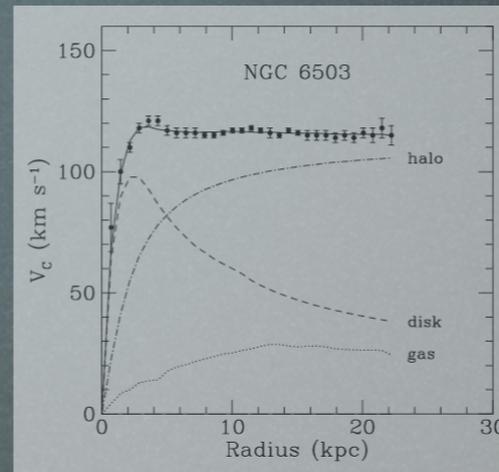
1) courbes de rotation
galactiques

2) amas de galaxies

3) 'cosmologie
de précision'

Preuves d'existence

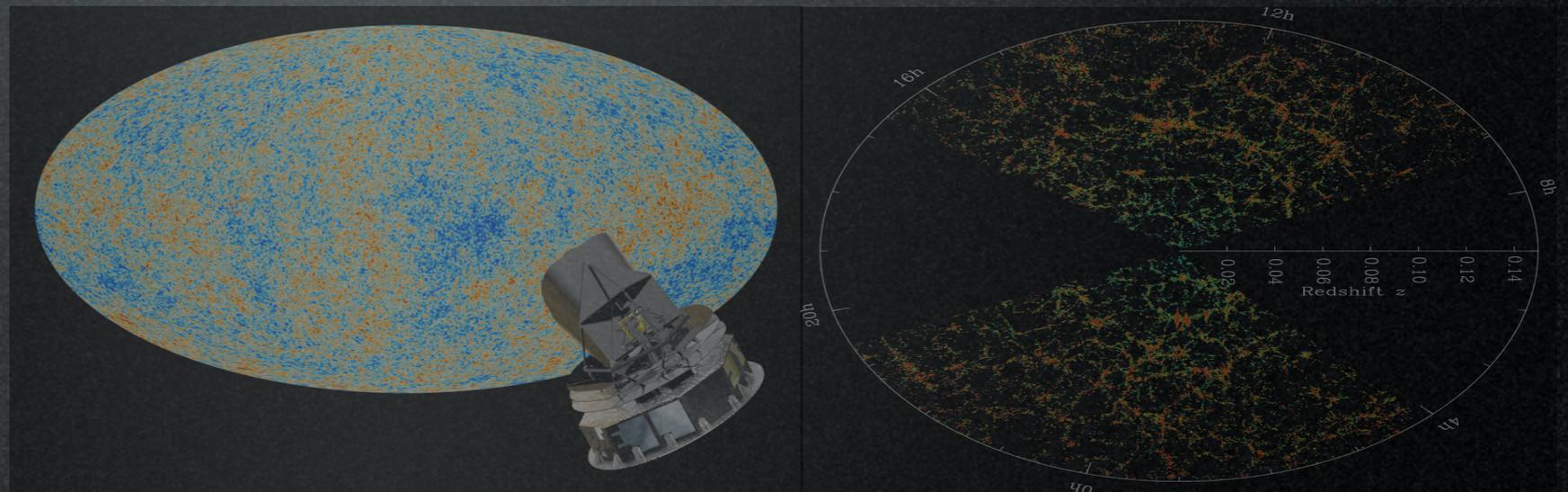
1) courbes de rotation galactiques



2) amas de galaxies



3) 'cosmologie de précision'



NB: tous effets de force de gravité

C'est **quoi**,
la Matière Noire ?

La MN **ne** peut **pas** être:

un *machin-truc* astrophysique

La MN **ne** peut **pas** être:

un *machin-truc* astrophysique

- neutrons
- gaz
- trous noirs
- ...

La MN **ne** peut **pas** être:

un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~
- gaz
- trous noirs
- ...

La MN **ne** peut **pas** être:

un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- trous noirs

- ...

La MN **ne** peut **pas** être:

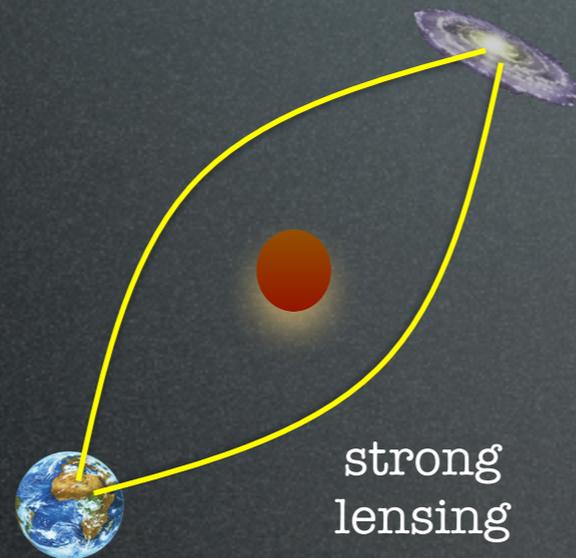
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



La MN **ne peut pas** être:

un *machin-truc* astrophysique

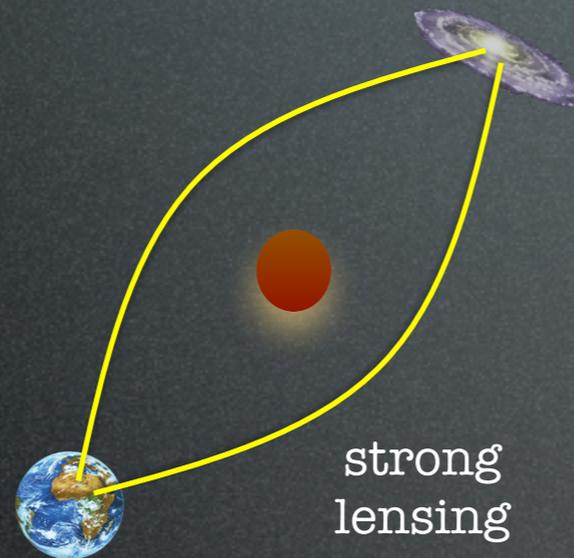
- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...

un corps fait de
neutrons et protons



La MN **ne** peut **pas** être:

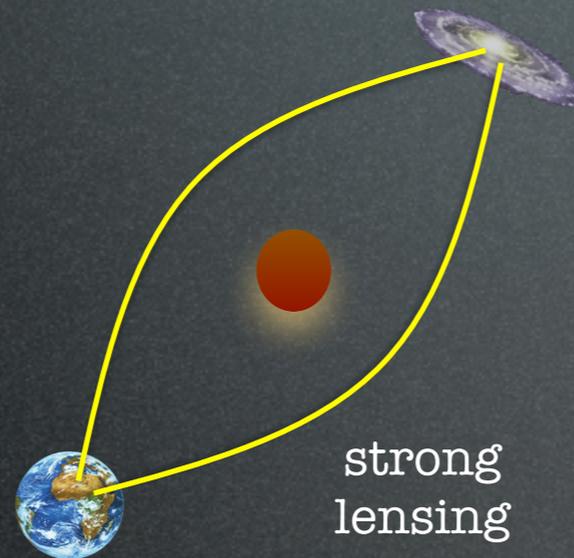
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



~~un corps fait de neutrons et protons~~

- la BBN (et la CMB) nous renseignent sur le nombre de neutrons et protons dans l'Univers primordial:
- trop de p,n => un Univers rempli d'Helium



après le Big Bang

La MN **ne** peut **pas** être:

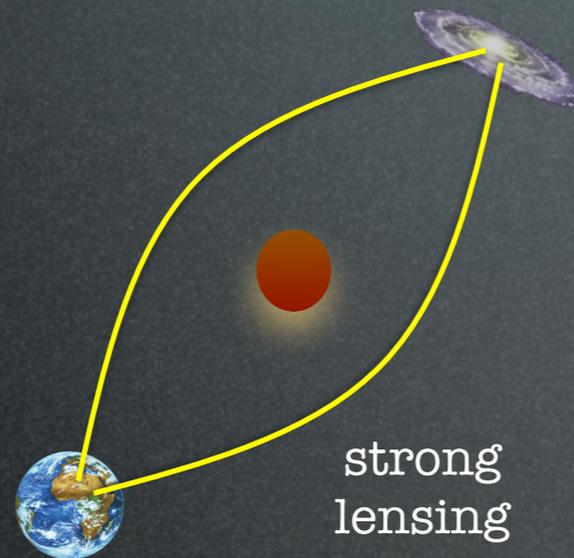
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



~~un corps fait de neutrons et protons~~

- la BBN (et la CMB) nous renseignent sur le nombre de neutrons et protons dans l'Univers primordial:
- trop de p,n => un Univers rempli d'Helium

neutrinos:

La MN **ne** peut **pas** être:

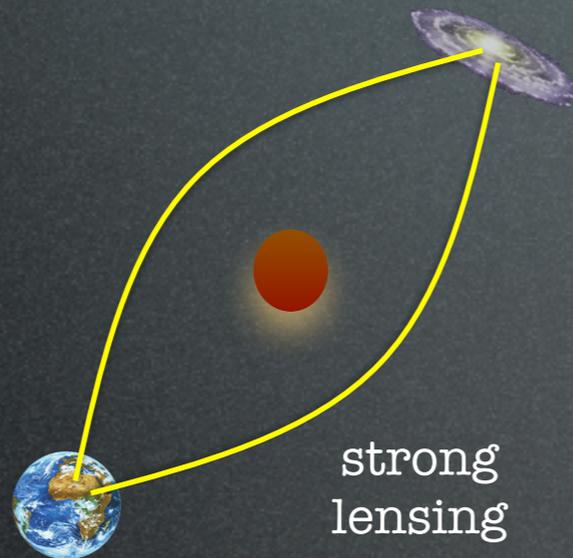
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



~~un corps fait de neutrons et protons~~

- la BBN (et la CMB) nous renseignent sur le nombre de neutrons et protons dans l'Univers primordial:
- trop de p,n => un Univers rempli d'Helium

~~neutrinos:~~

trop légers ! $m_\nu \lesssim 1 \text{ eV}$

n'ont pas assez de masse pour former les galaxies et les grandes structures

Que savons-nous
de ses
propriétés ?

Propriétés et nature

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

particules
'**lentes**'

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

plus abondante
que la matière
ordinaire

aucune ou très peu
d'interaction

Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions

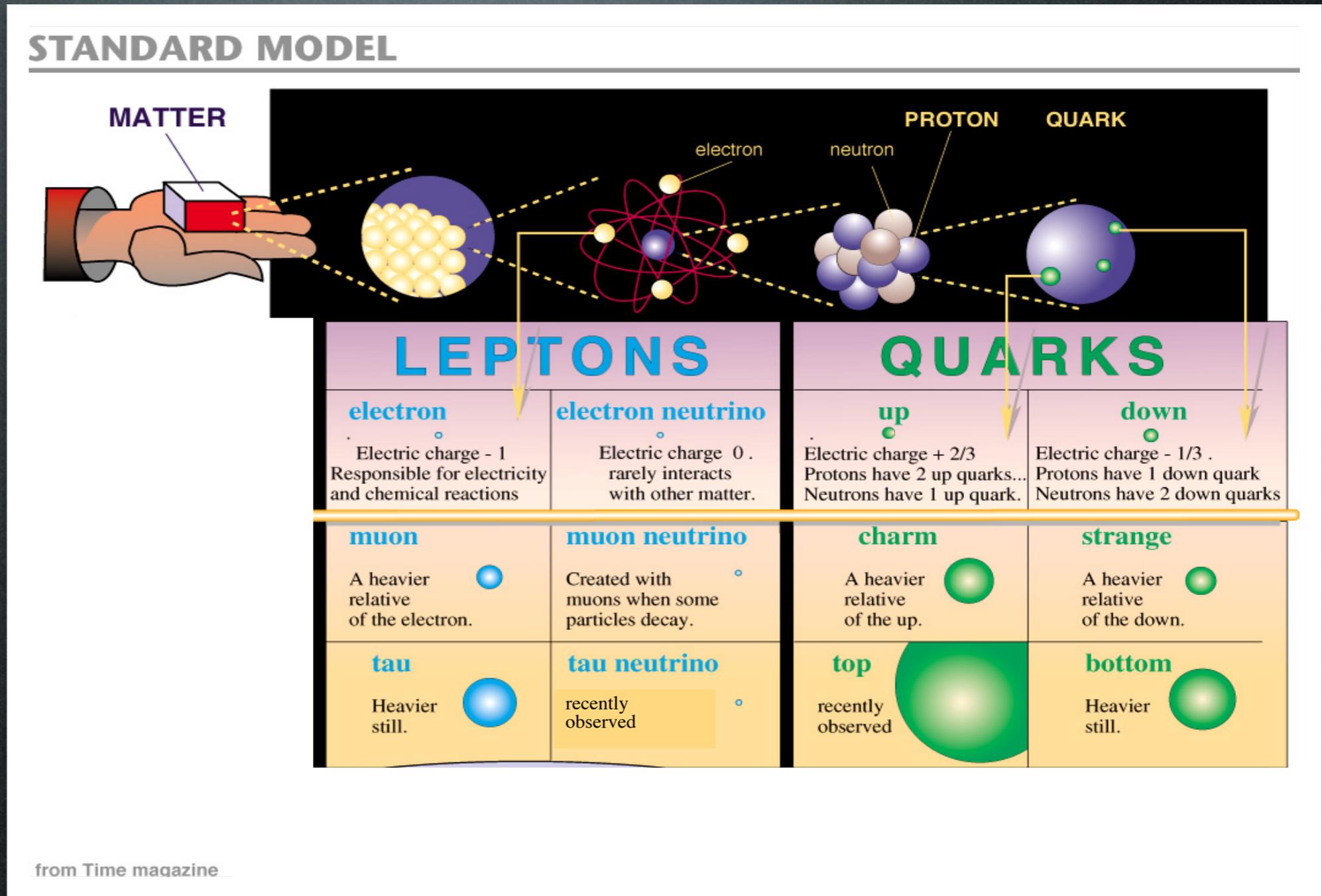
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



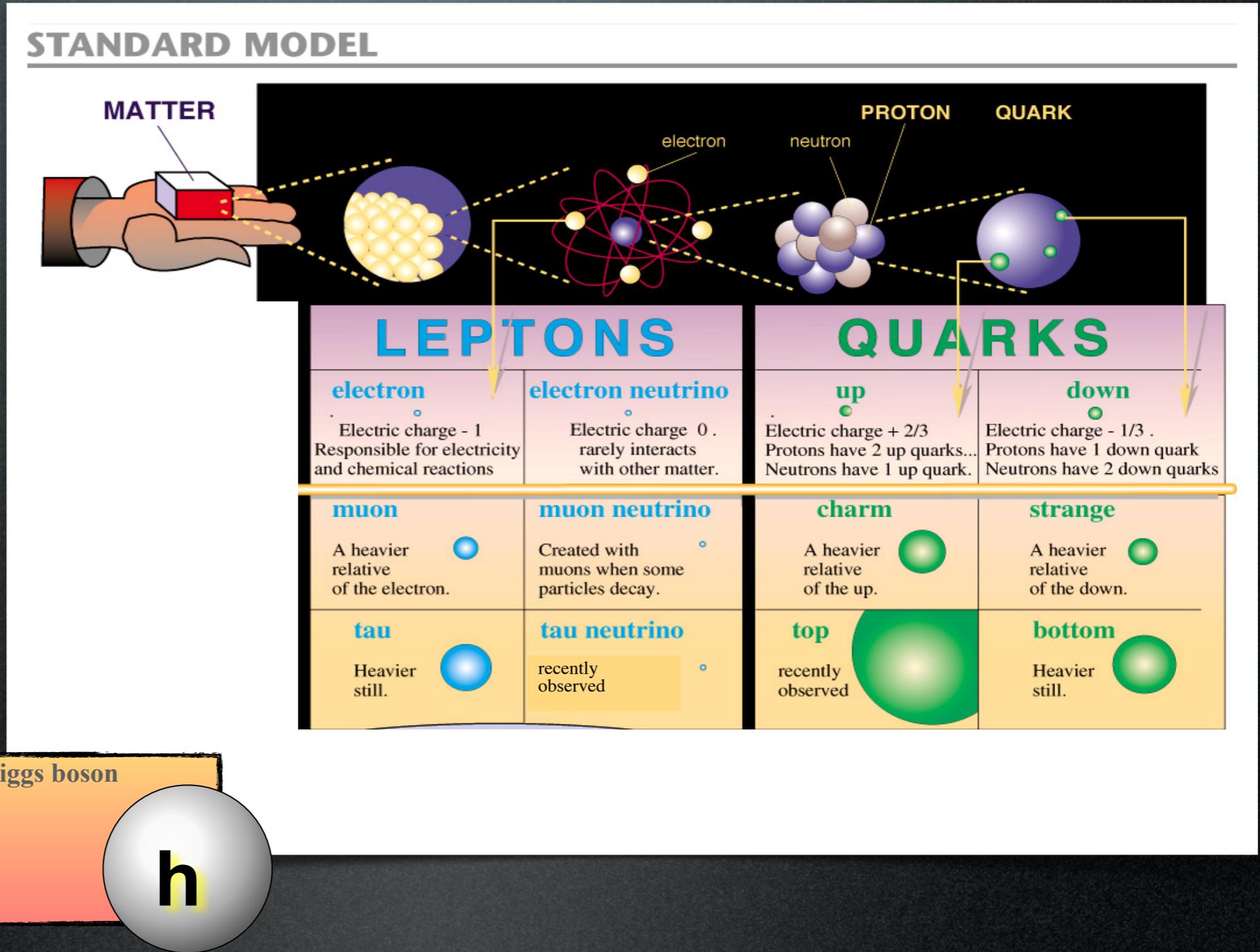
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



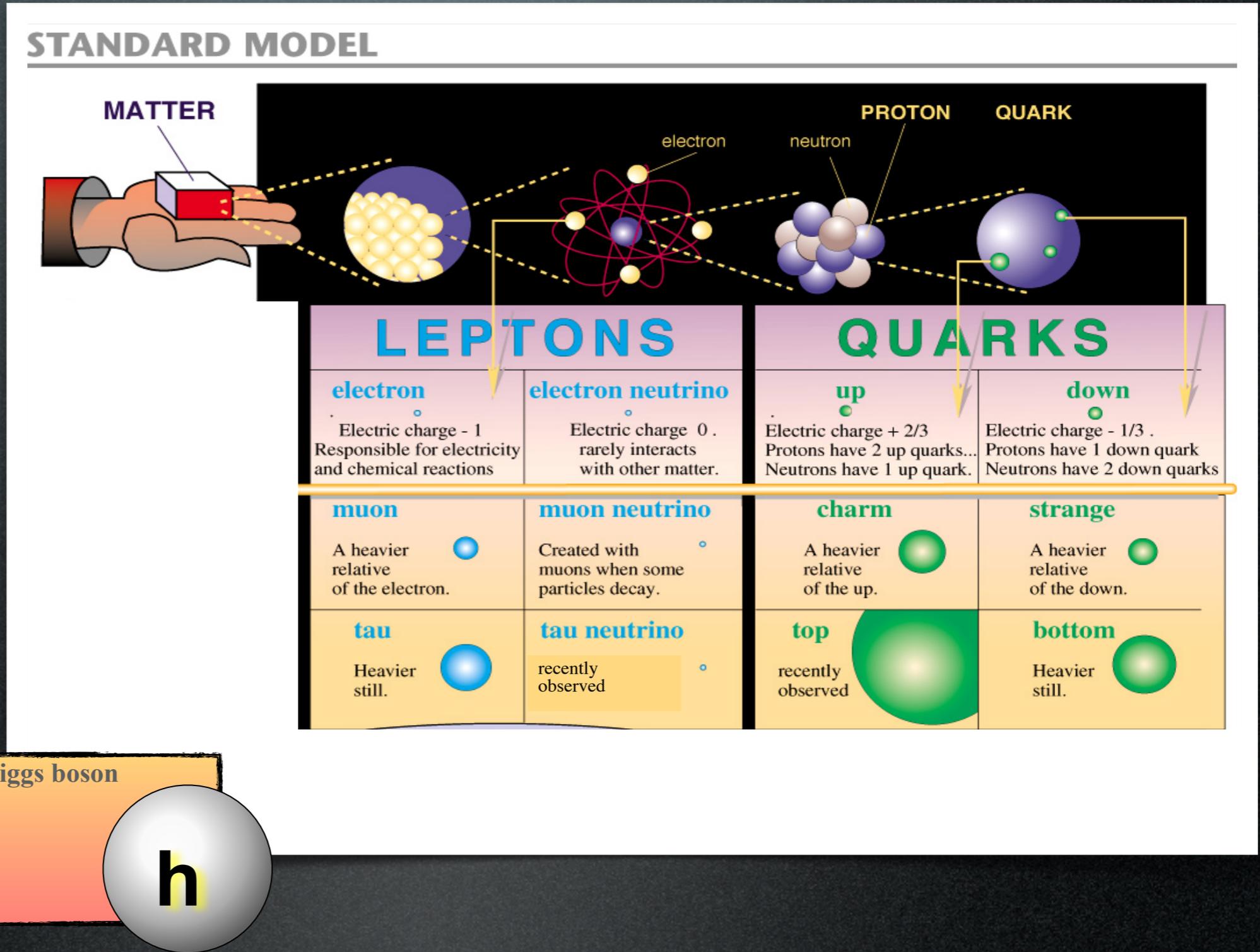
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



Propriétés et nature

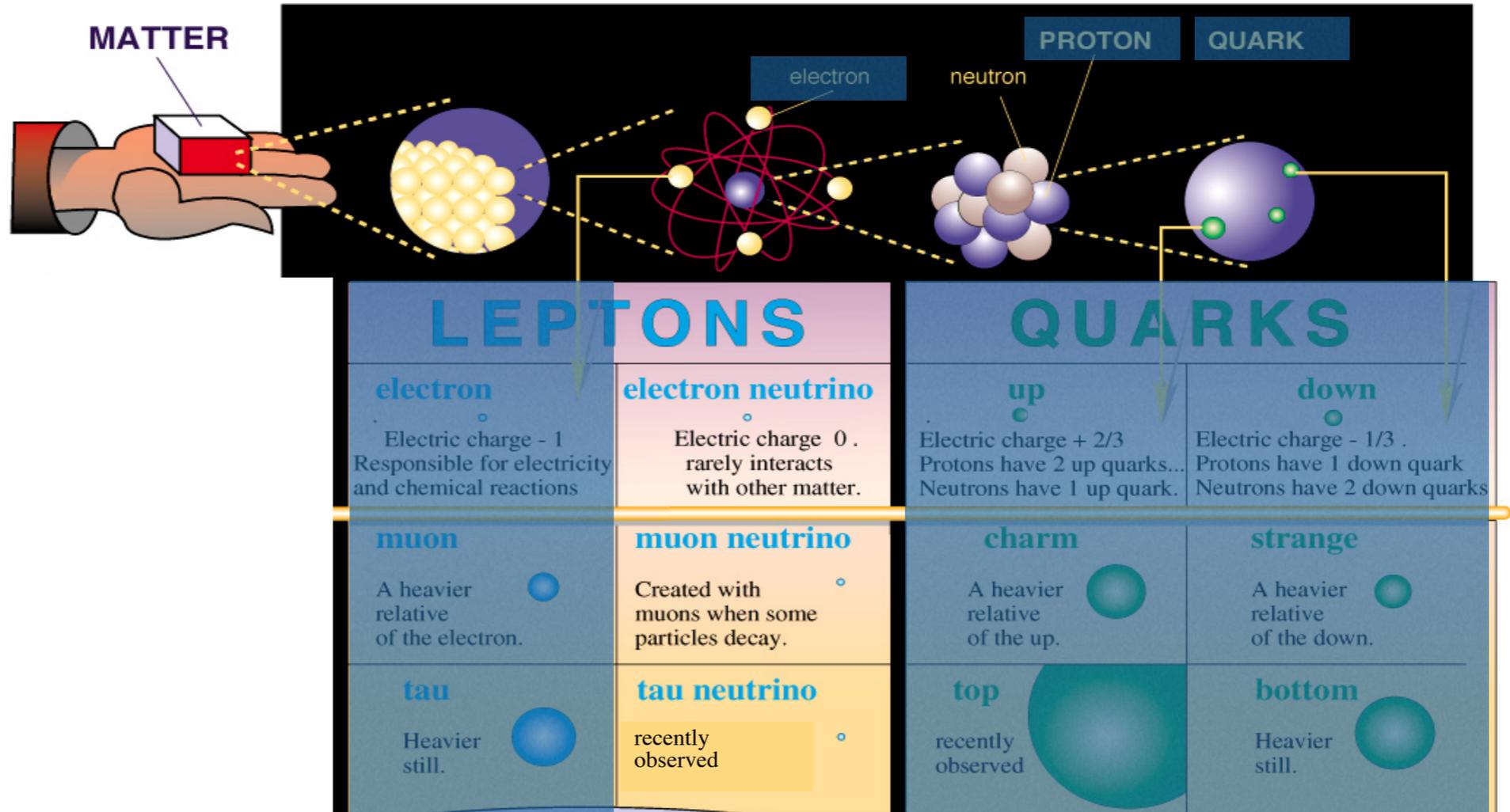
particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions

STANDARD MODEL



Higgs boson

h

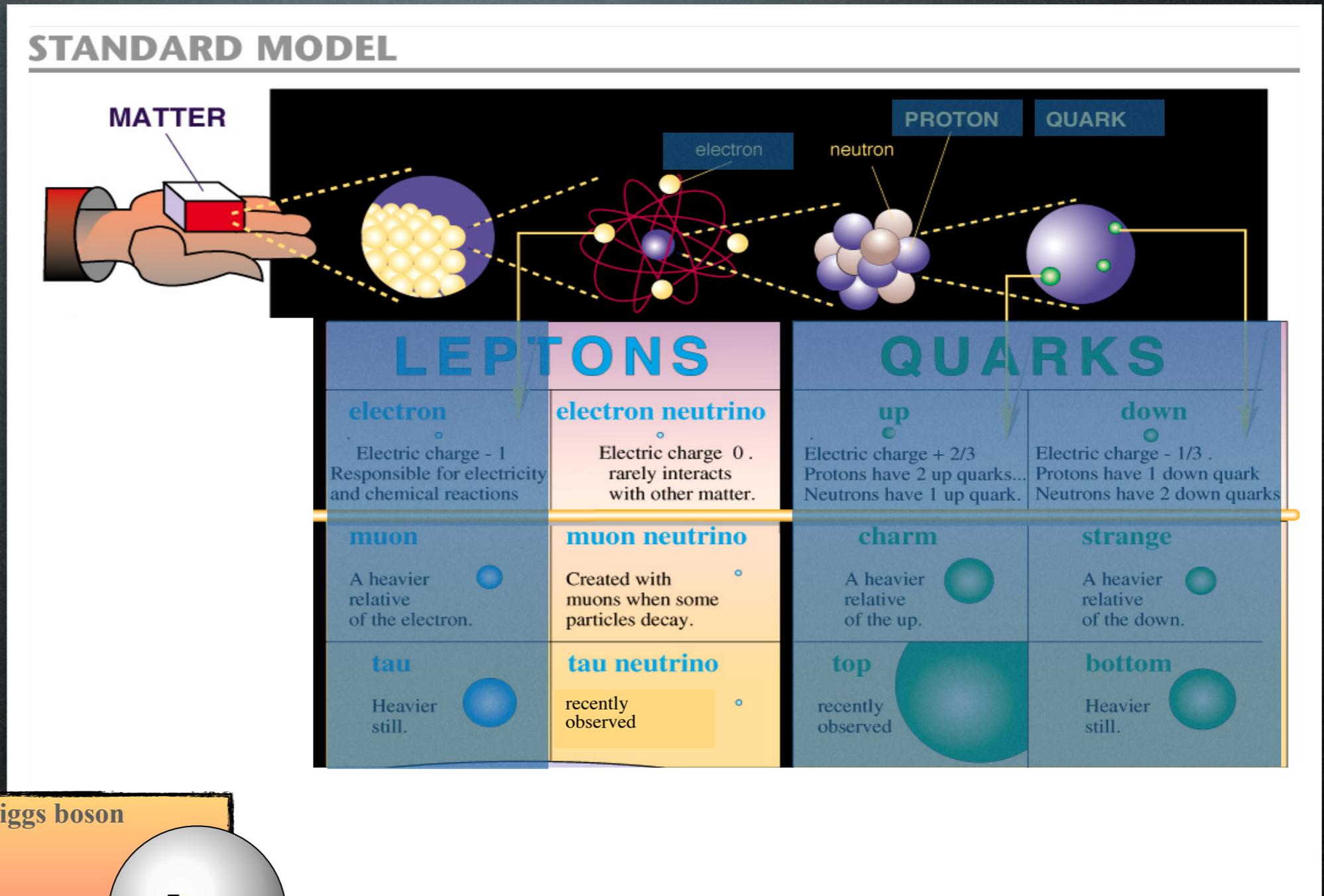
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



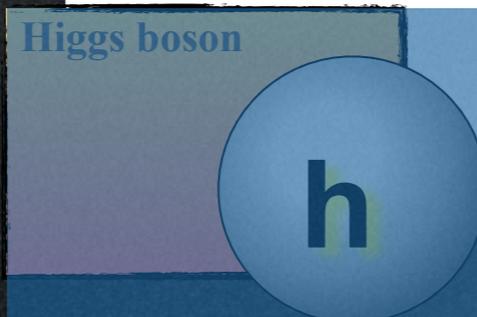
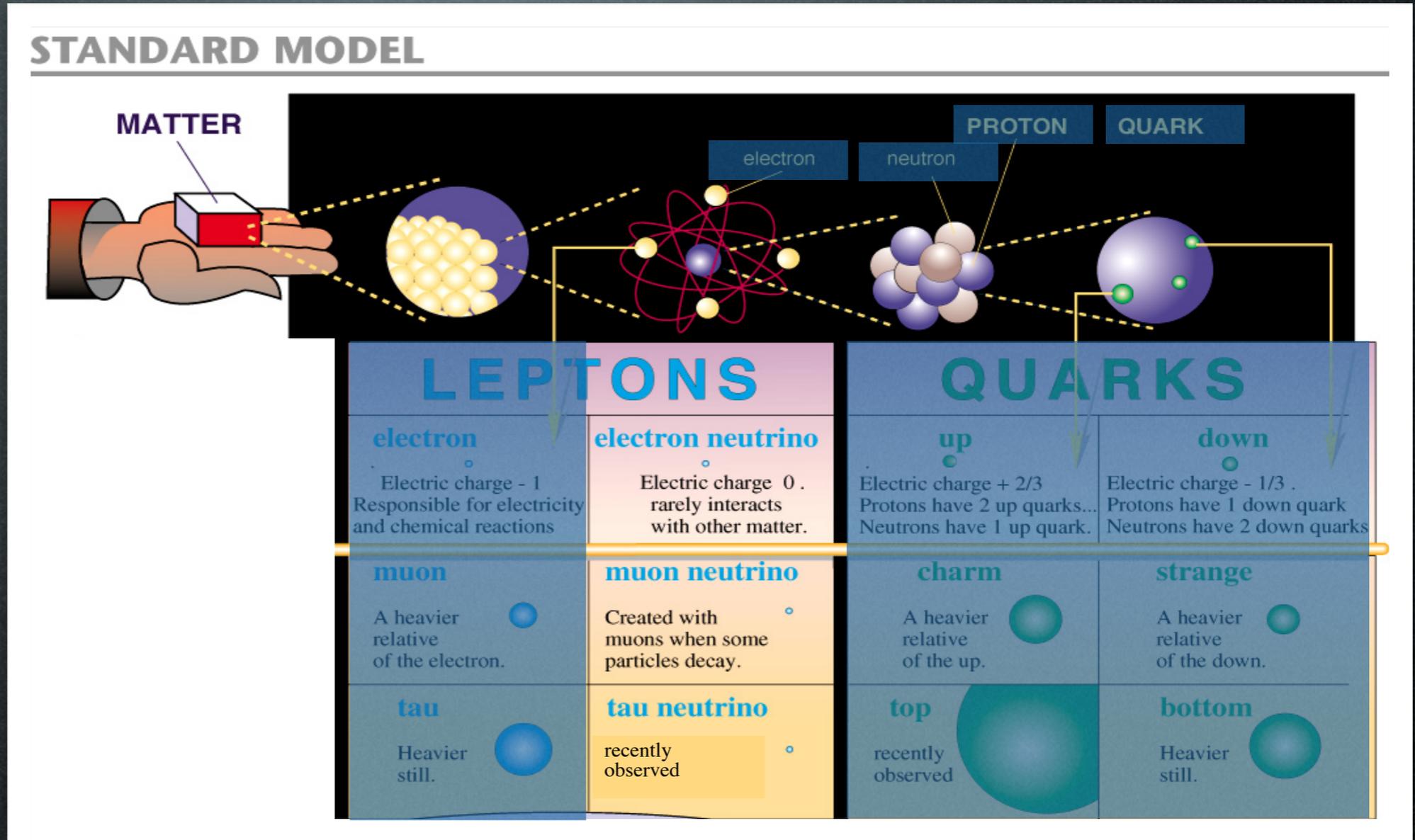
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



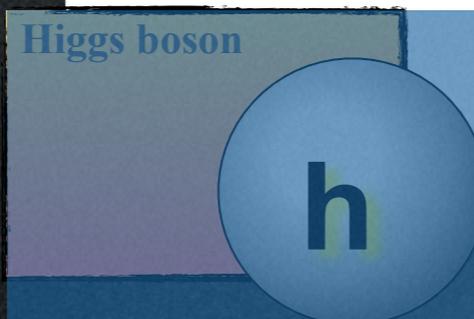
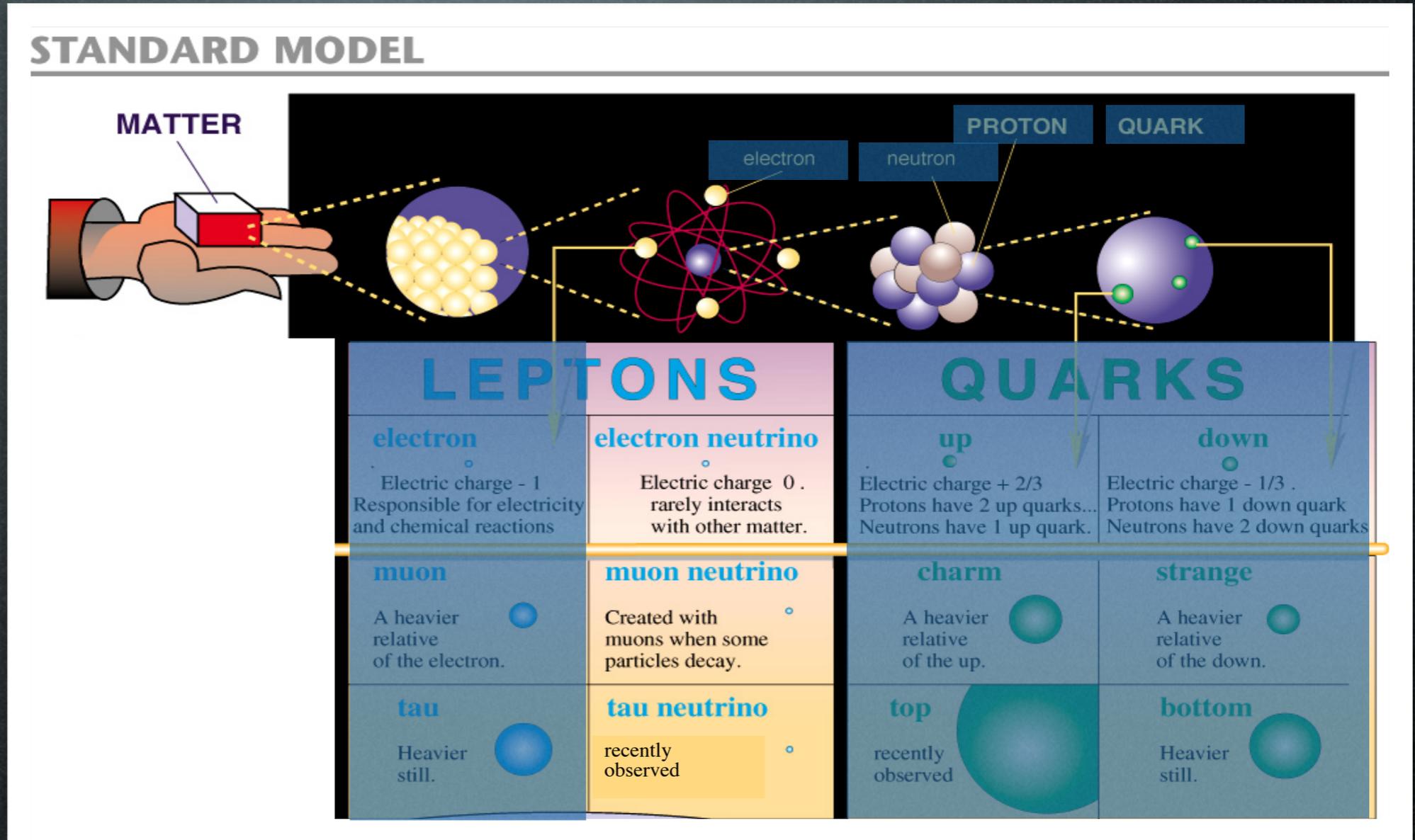
Propriétés et nature

particules
‘lentes’

‘neutre’

‘stable’

presque sans
interactions



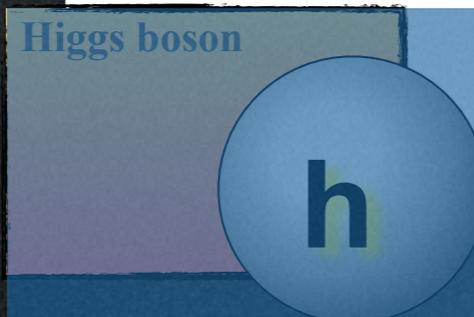
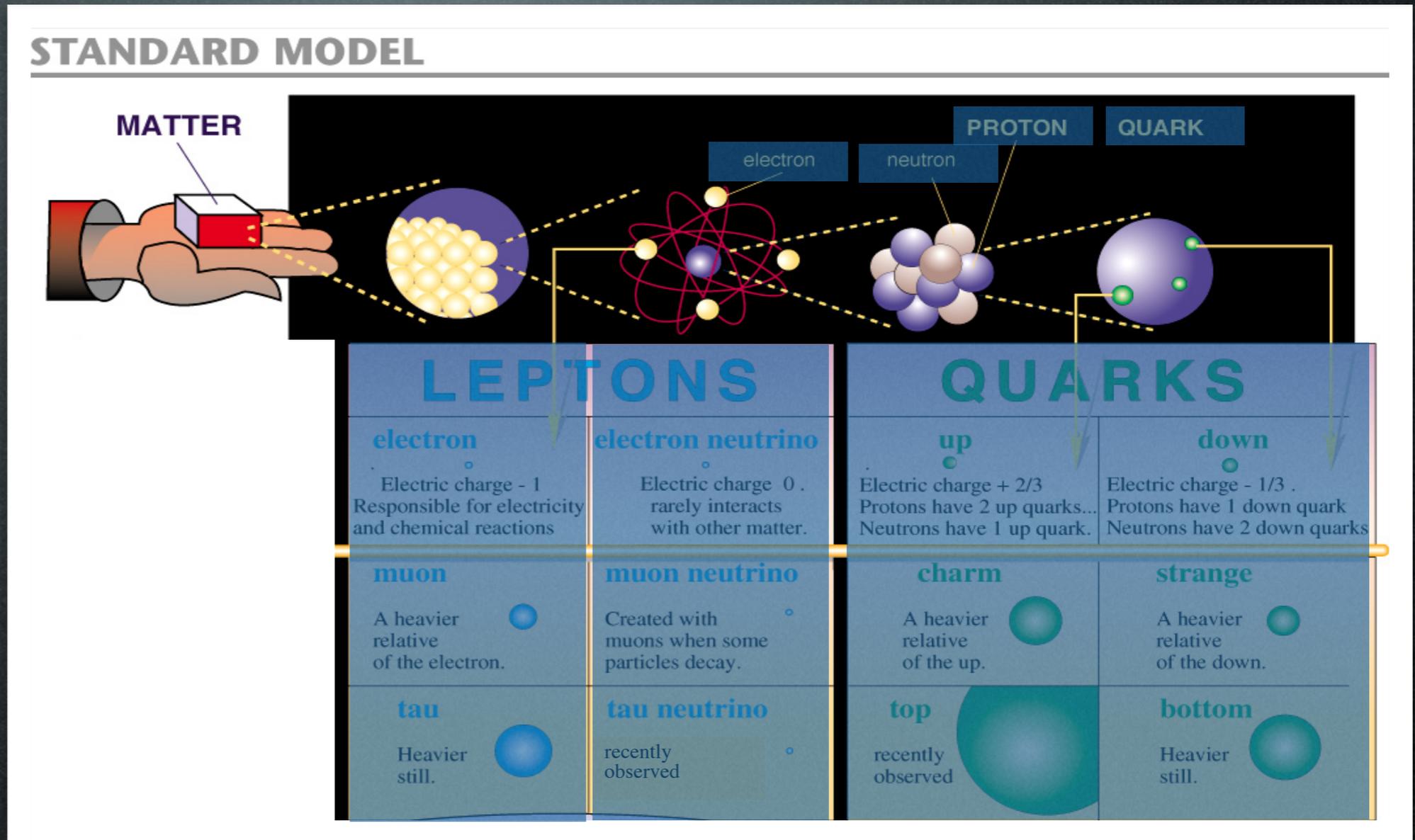
Propriétés et nature

particules
'lentes'

'neutre'

'stable'

presque sans
interactions



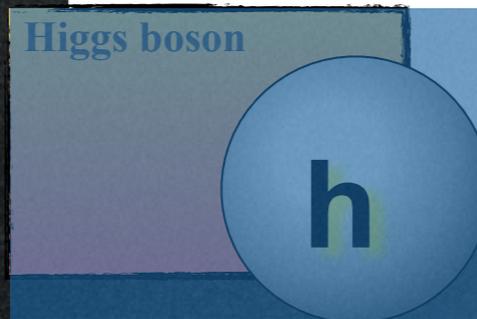
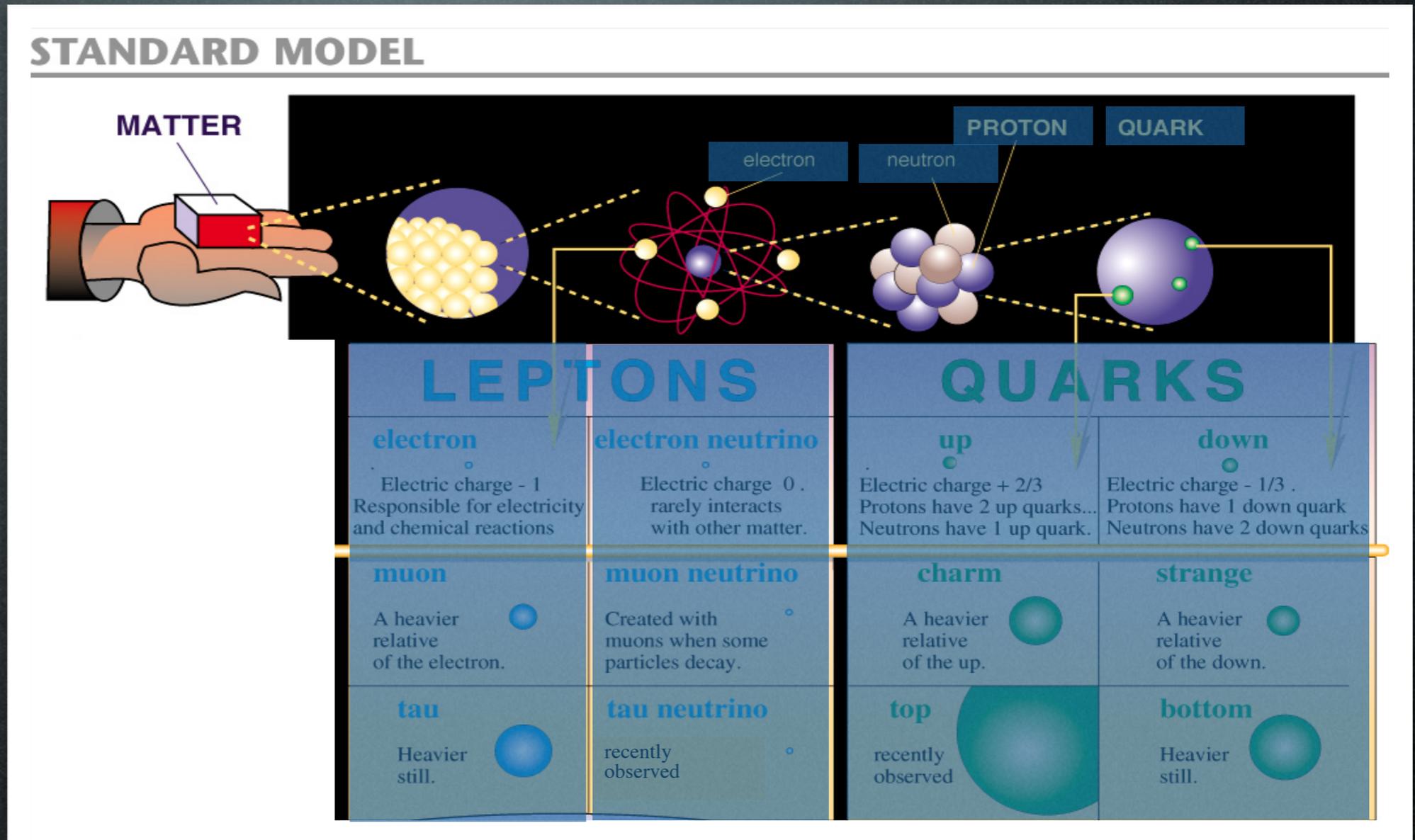
Propriétés et nature

particules
‘lentes’

‘neutre’

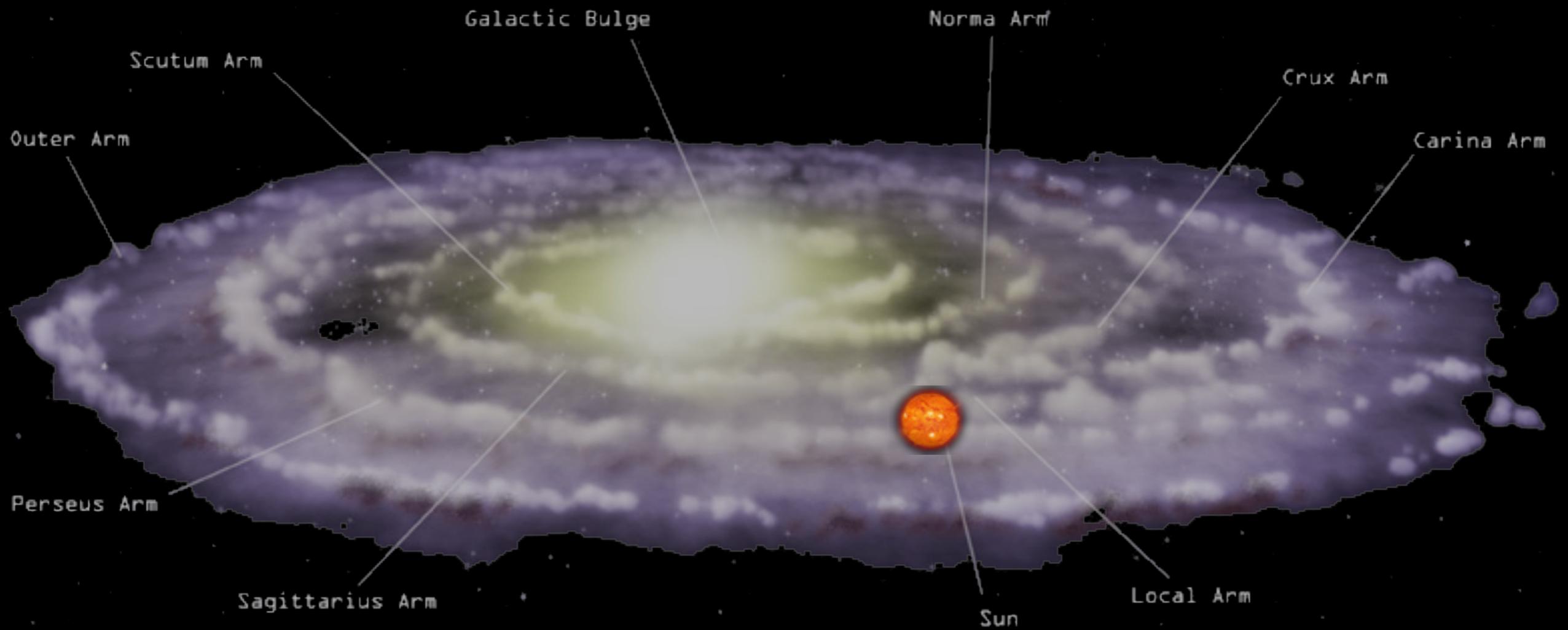
‘stable’

presque sans
interactions



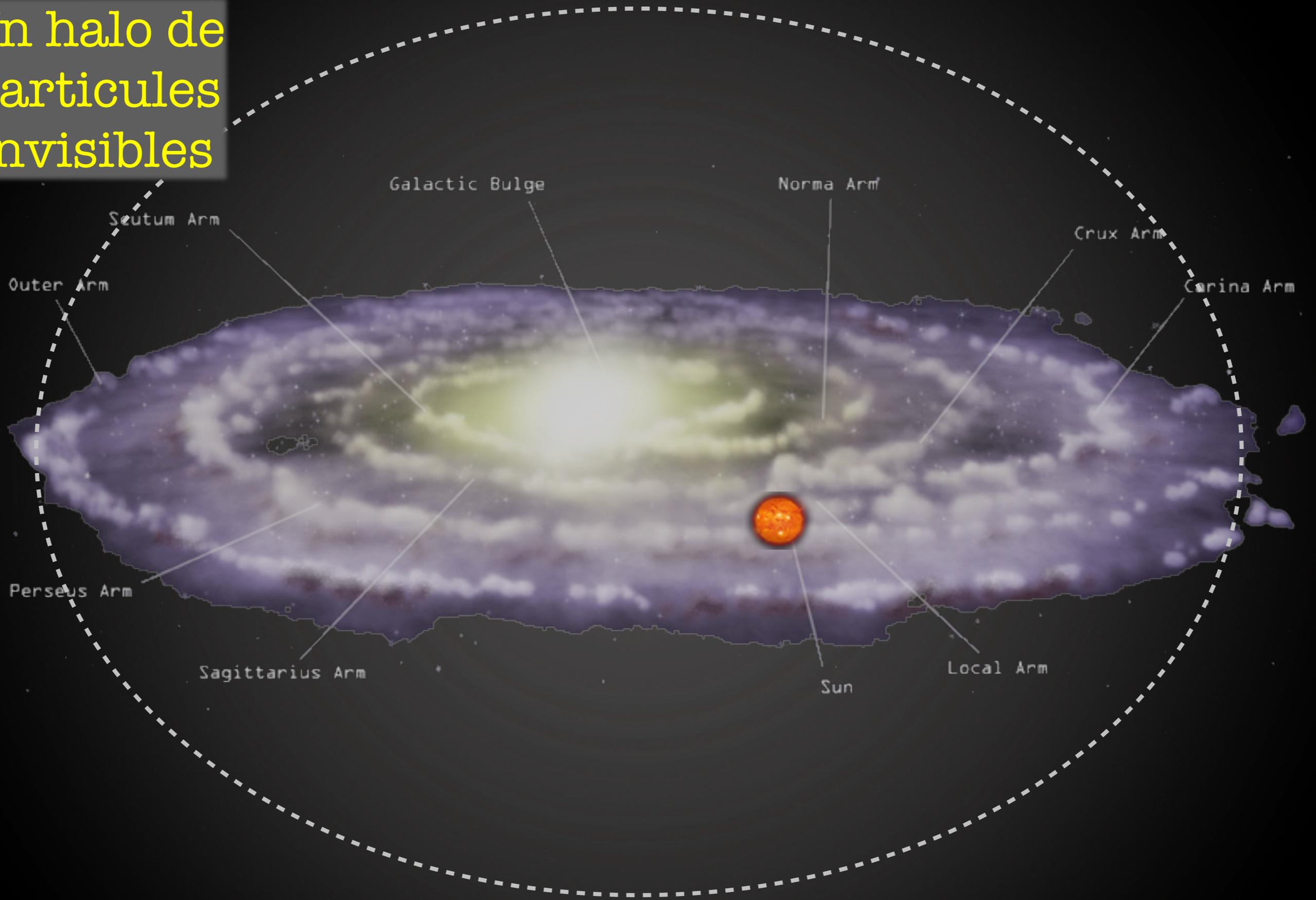
une **nouvelle** particule,
encore **inconnue**

Et dans la Voie Lactée ?



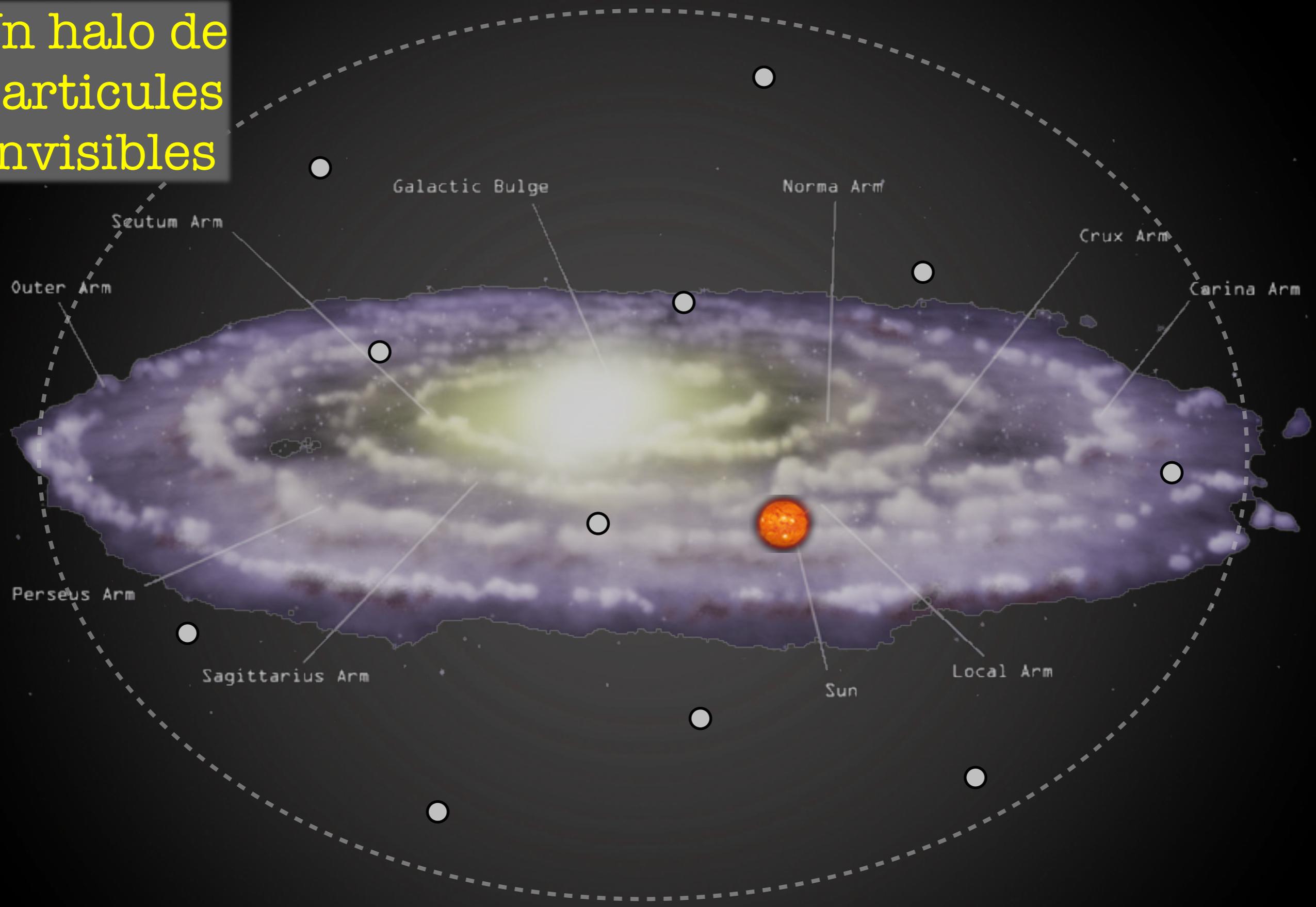
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
particules
invisibles



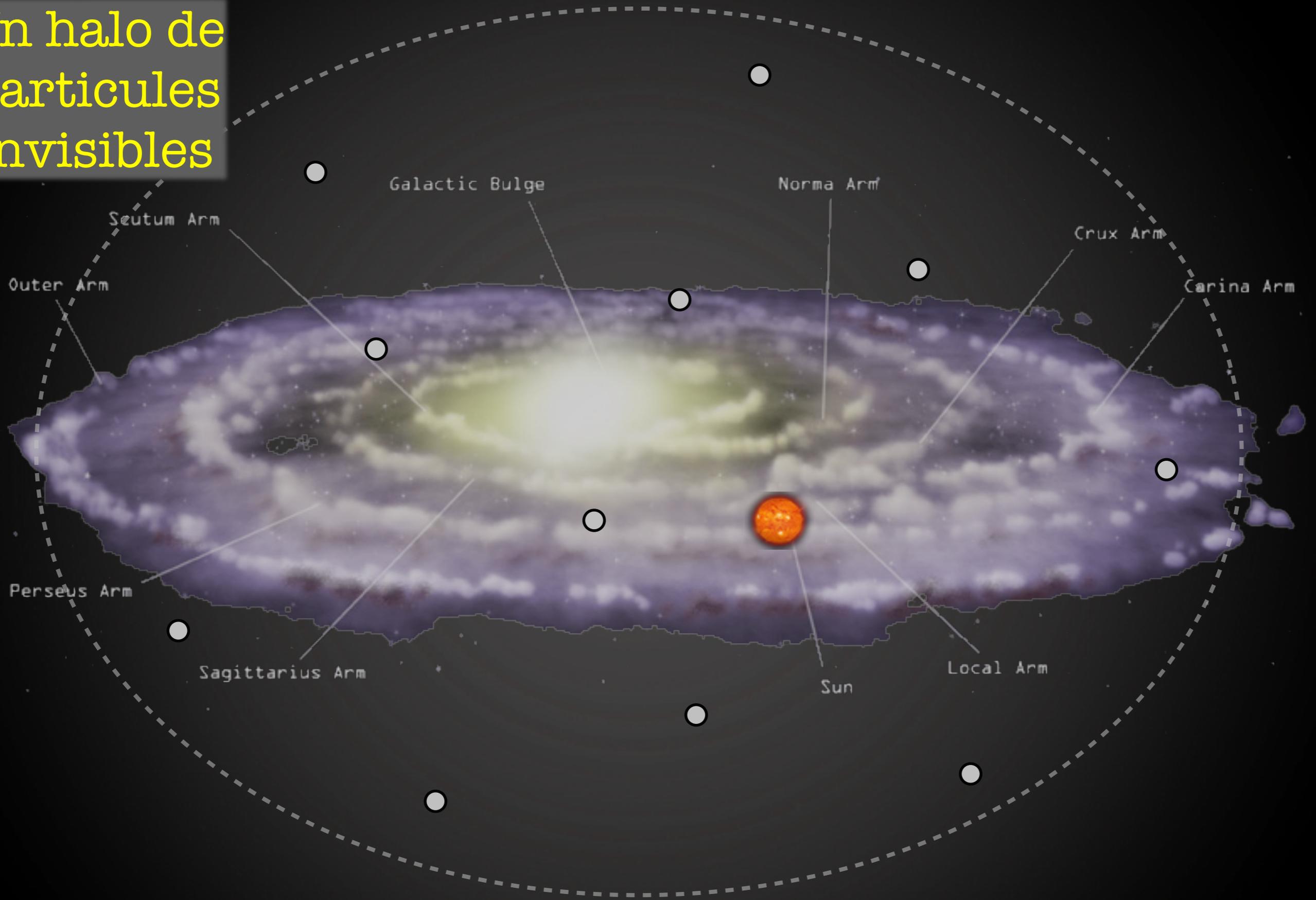
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
particules
invisibles



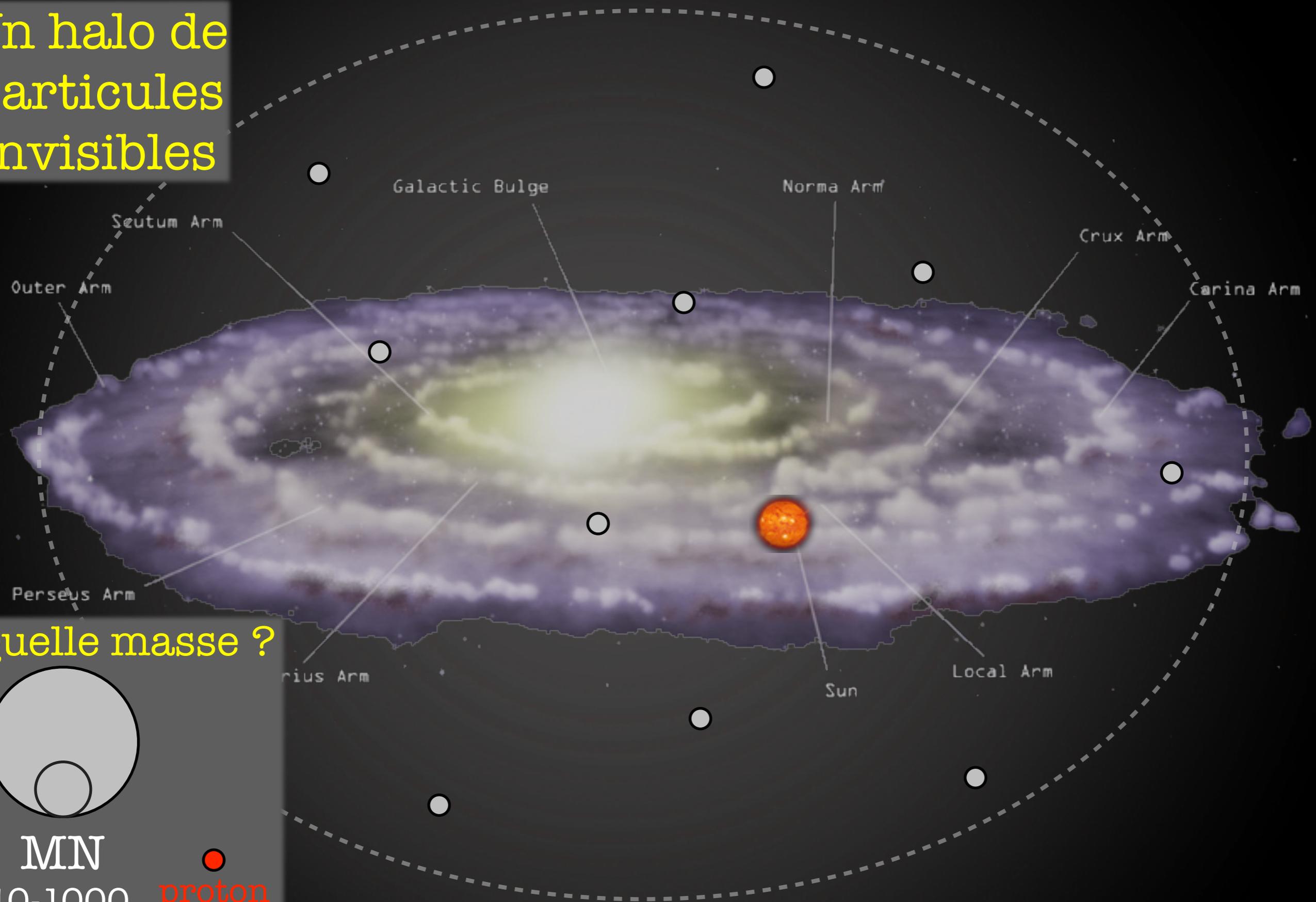
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
particules
invisibles

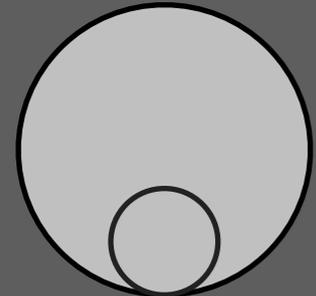


Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
particules
invisibles



Quelle masse ?



MN

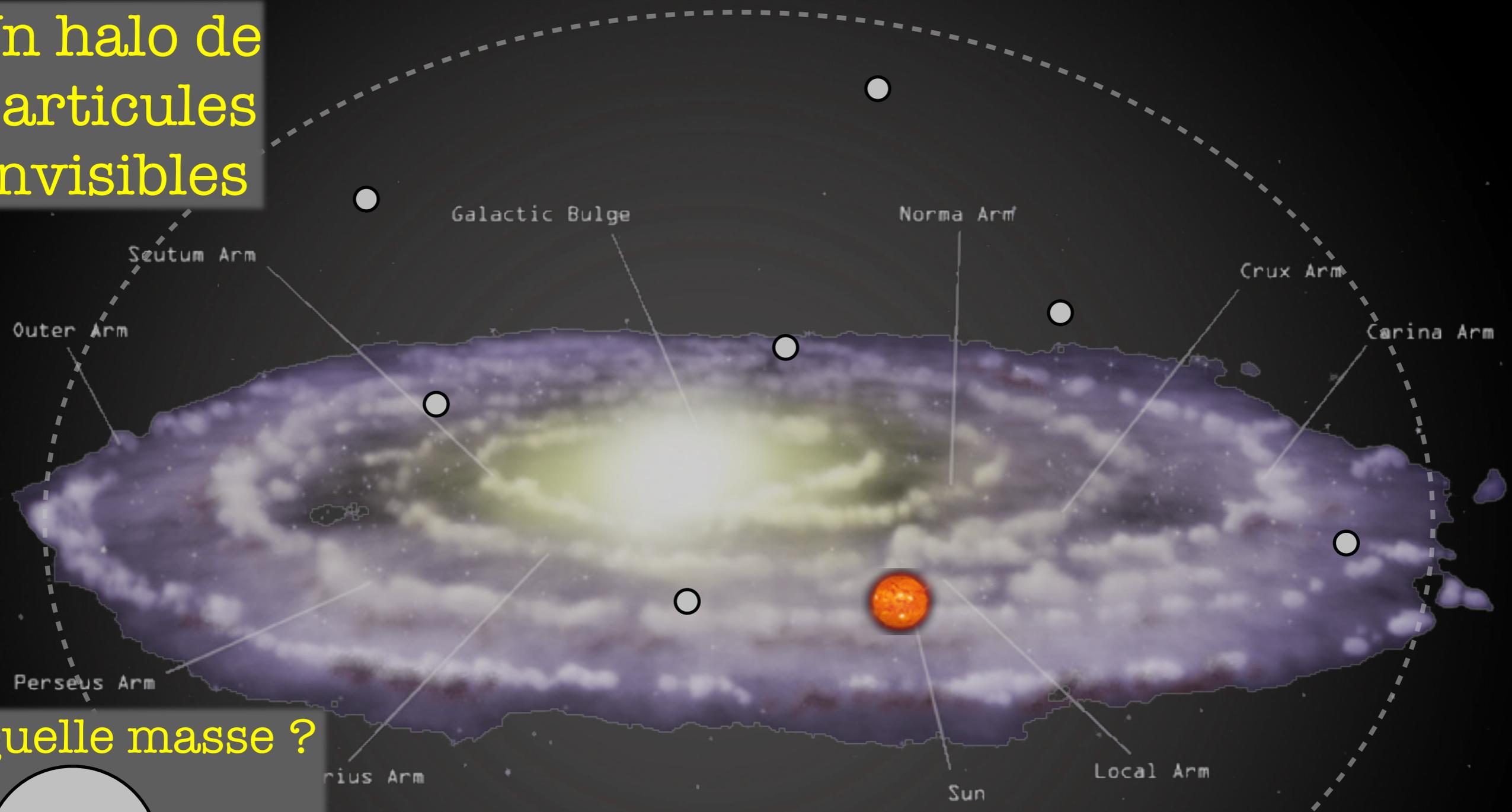
10-1000
GeV



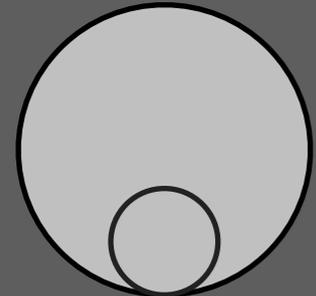
proton
1 GeV

Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
particules
invisibles



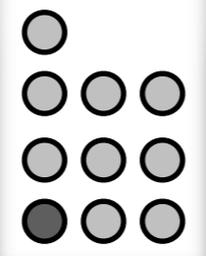
Quelle masse ?



MN
10-1000
GeV

● proton
1 GeV

Quelle densité ?

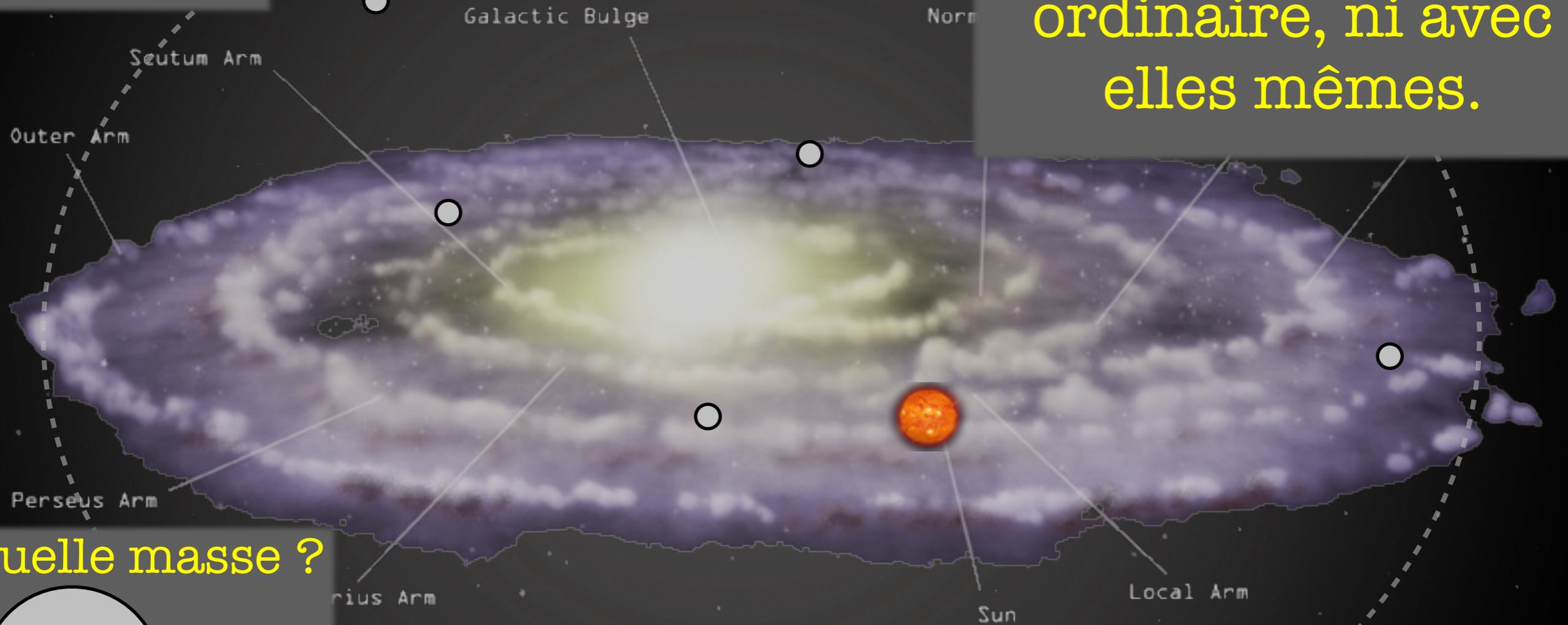


10 GeV
100 GeV

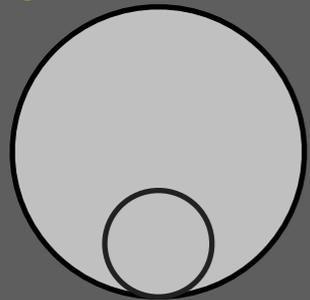
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de particules invisibles

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

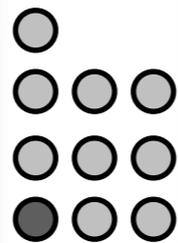


Quelle masse ?



MN
10-1000 GeV
proton
1 GeV

Quelle densité ?

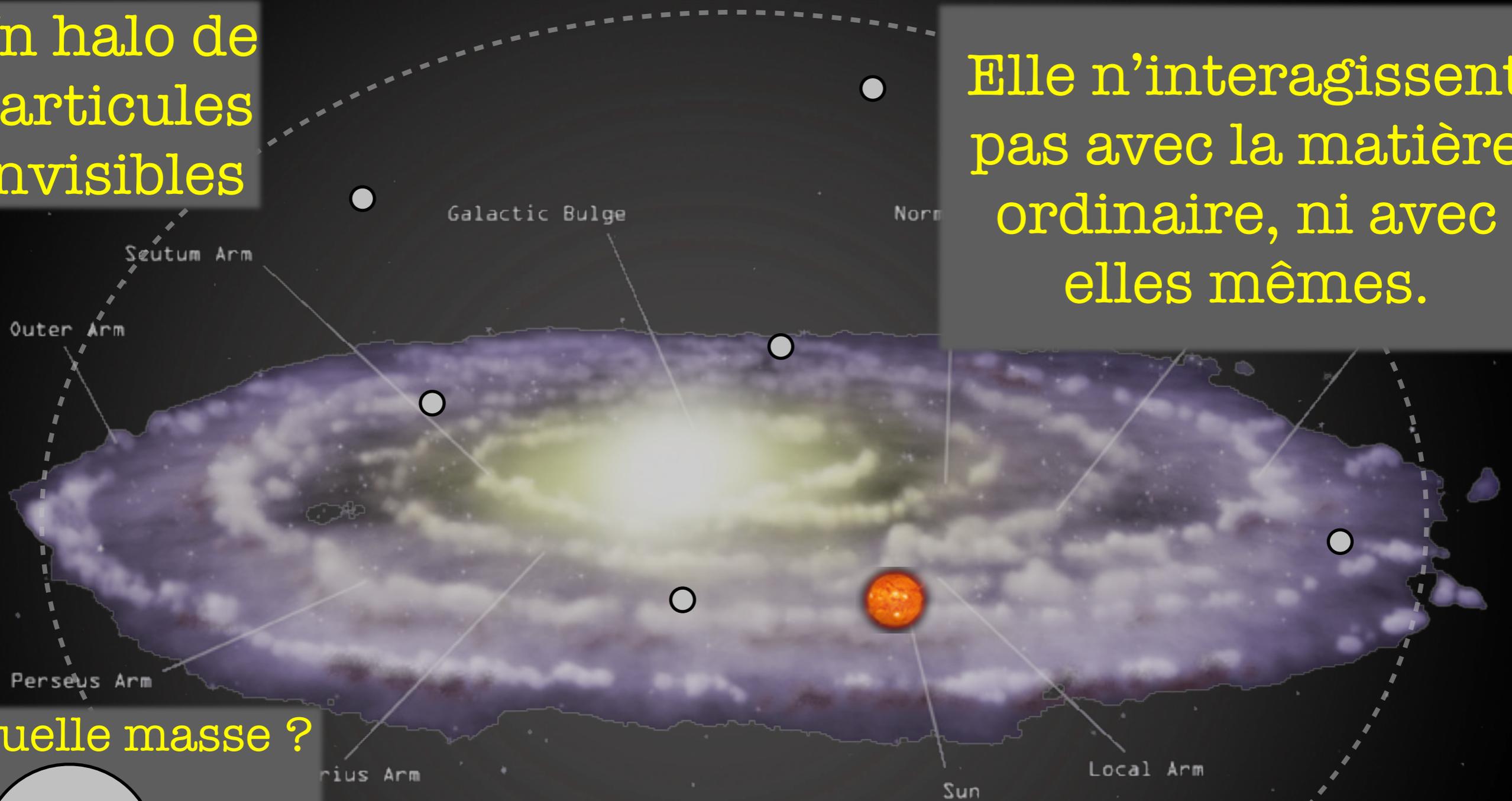


10 GeV
100 GeV

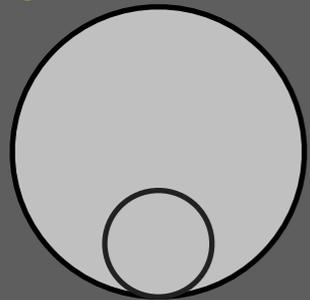
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de particules invisibles

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



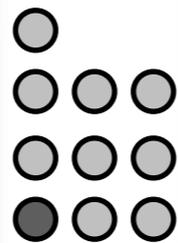
Quelle masse ?



MN
10-1000 GeV

proton
1 GeV

Quelle densité ?



10 GeV
100 GeV

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

Espoir #1:
DAMA et la
détection directe

Détection directe



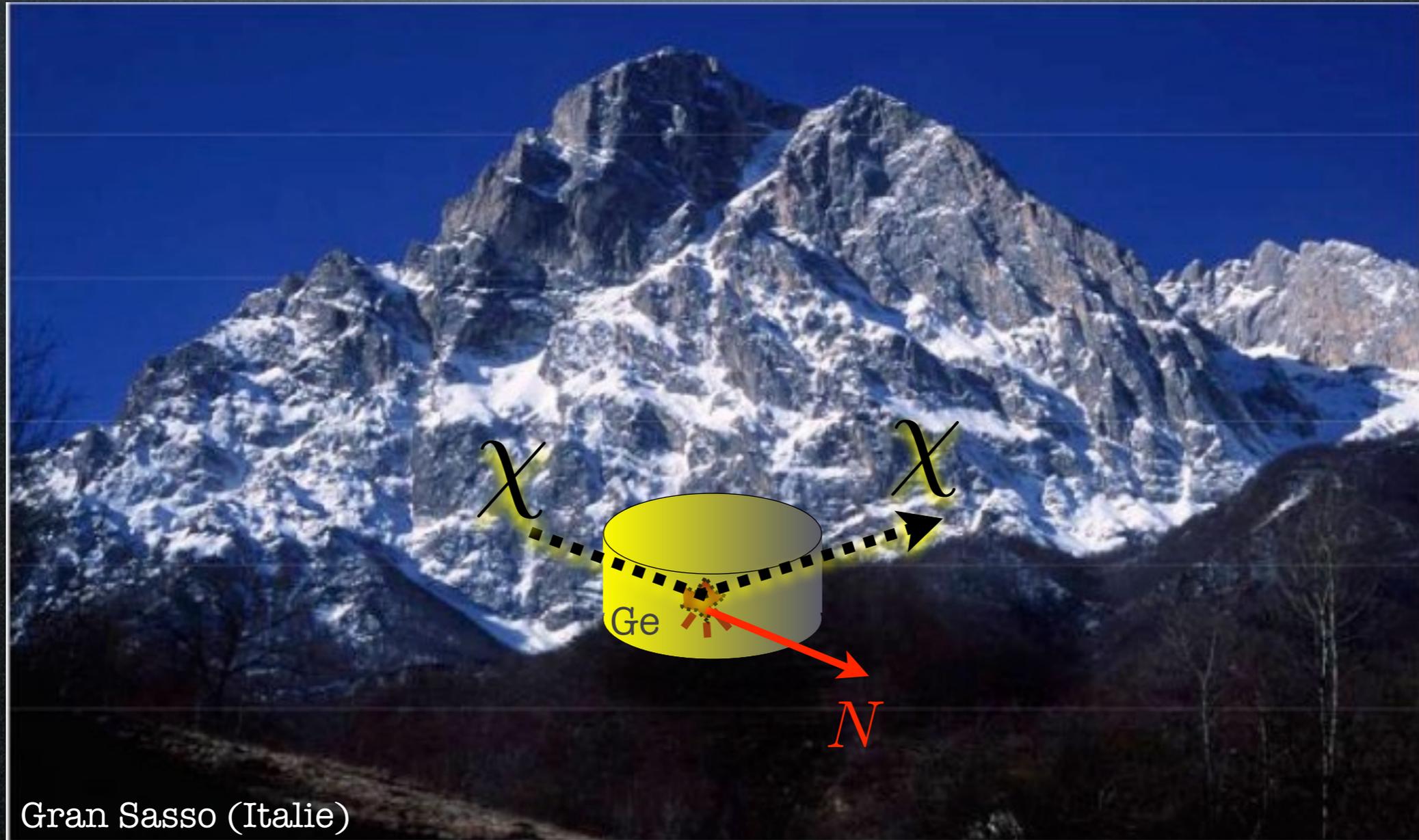
Gran Sasso (Italie)

Détection directe



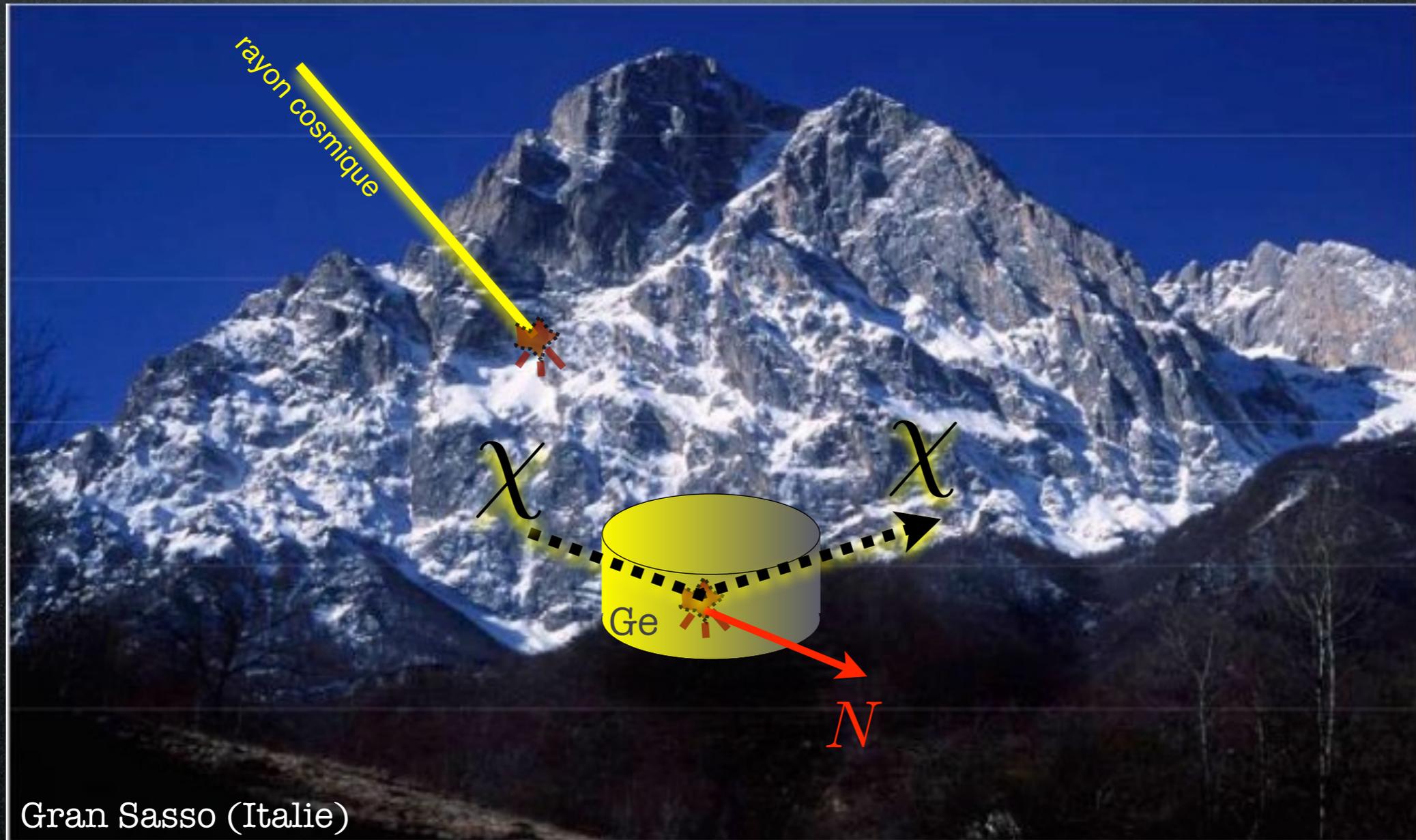
Gran Sasso (Italie)

Détection directe



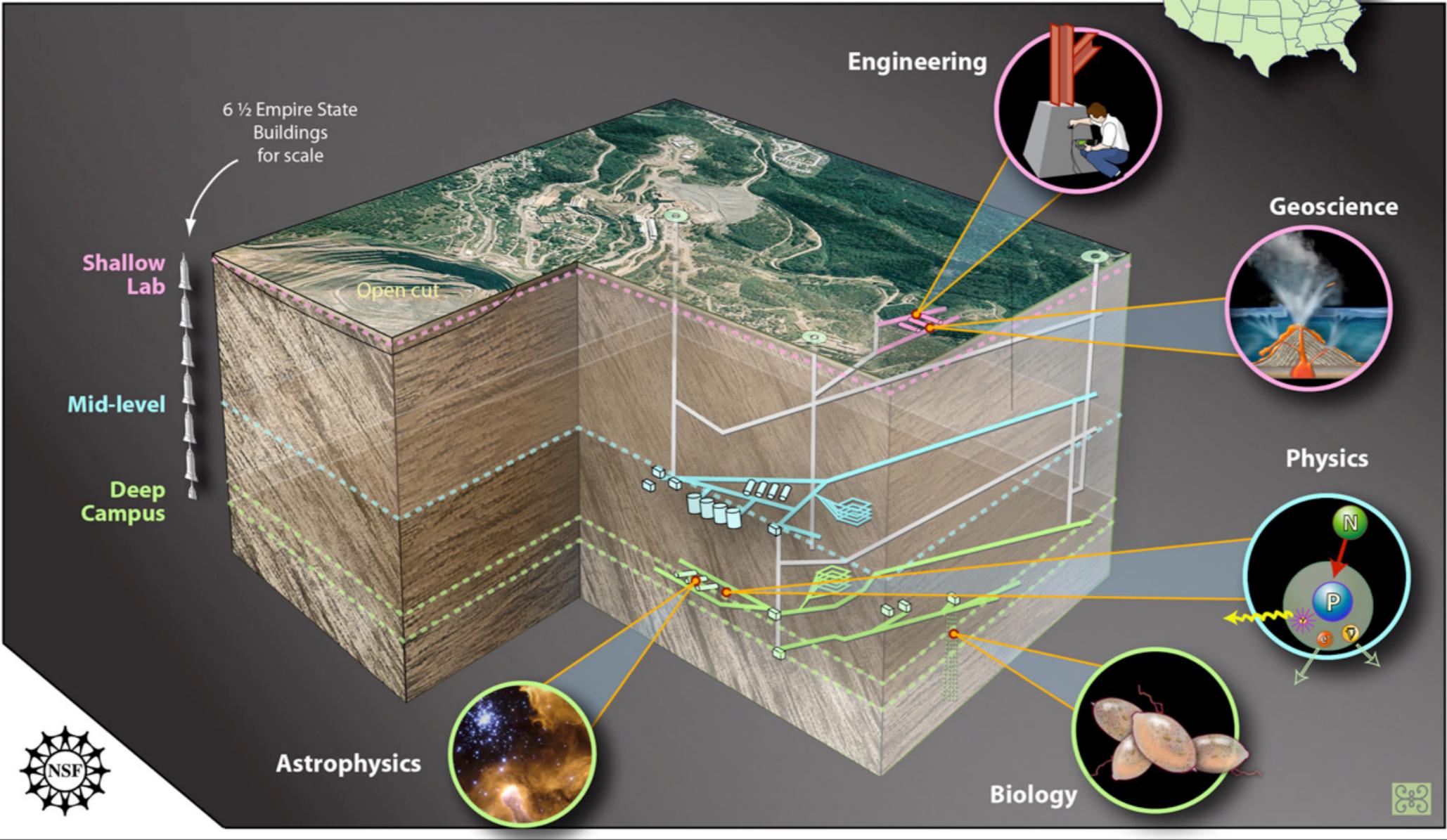
Gran Sasso (Italie)

Détection directe



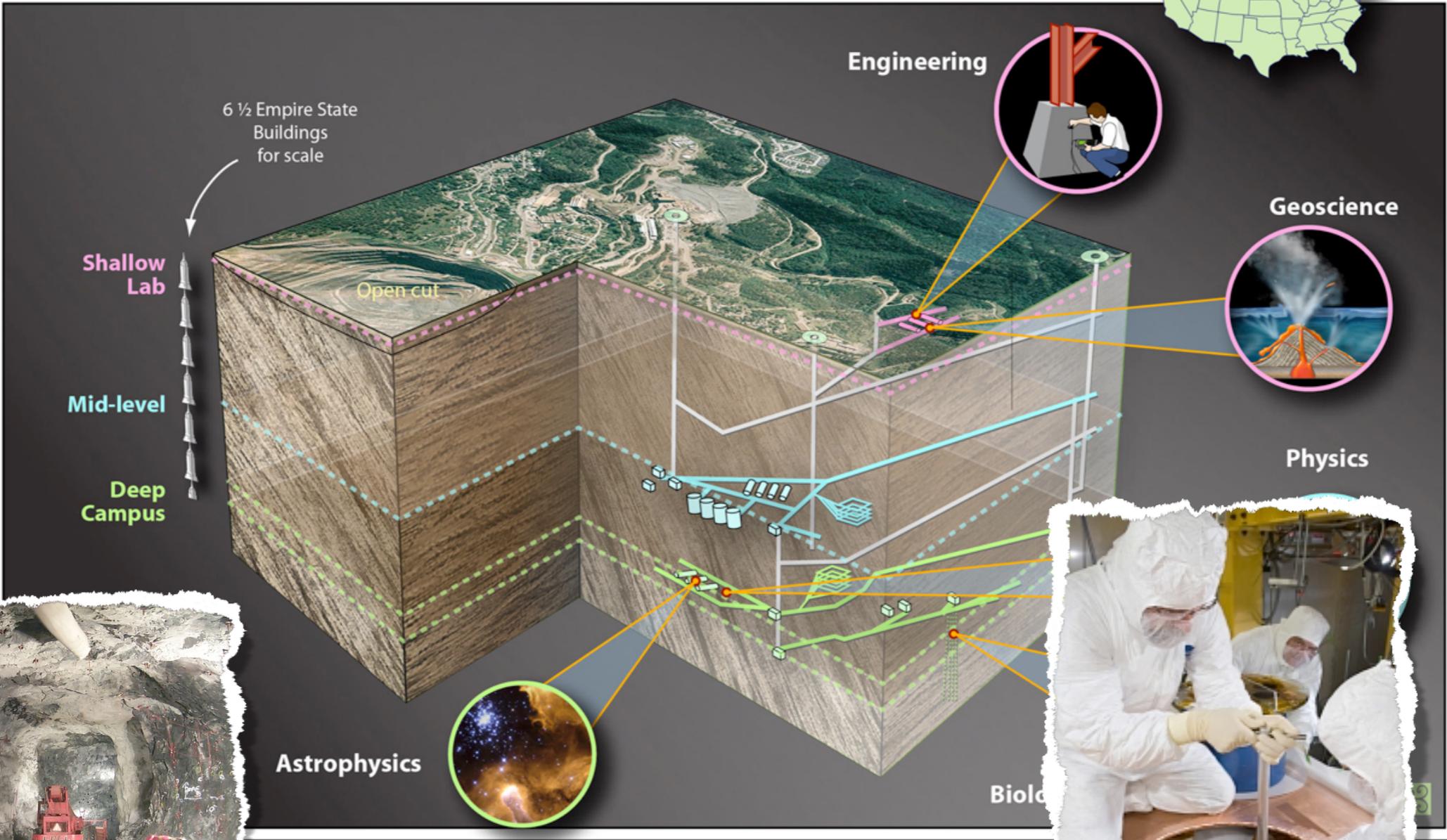
Détection directe

DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD



Détection directe

DUSEL Deep Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake, SD



Détection directe

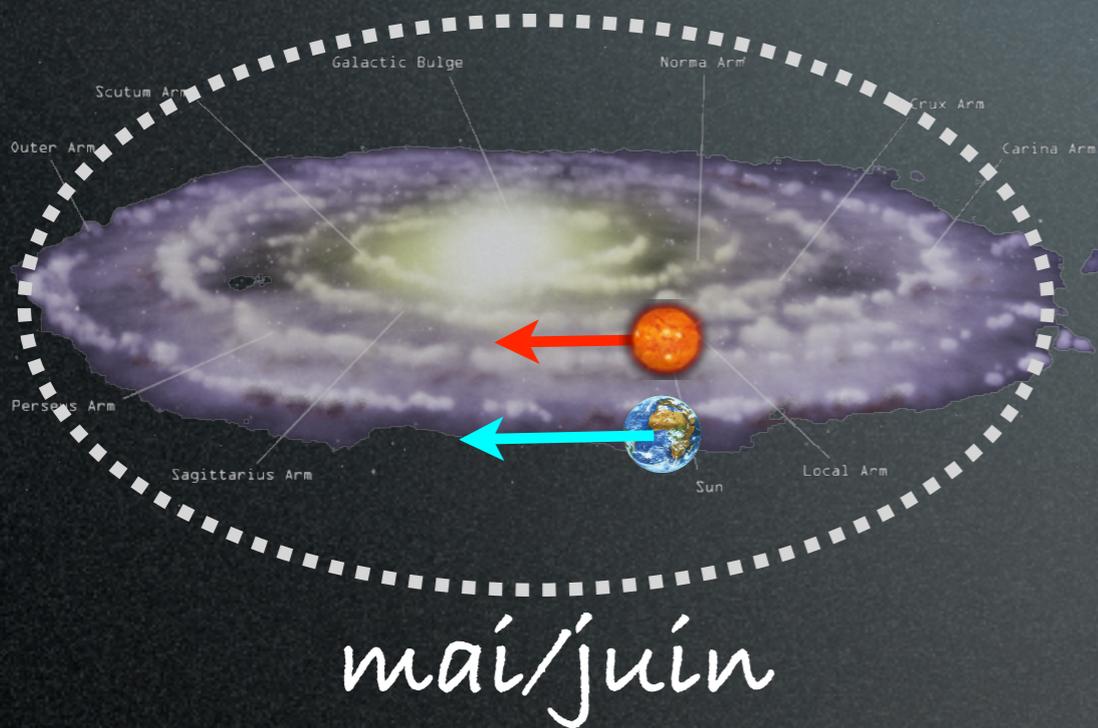
Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

collecter tous les évènements,
et détecter une modulation annuelle

Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

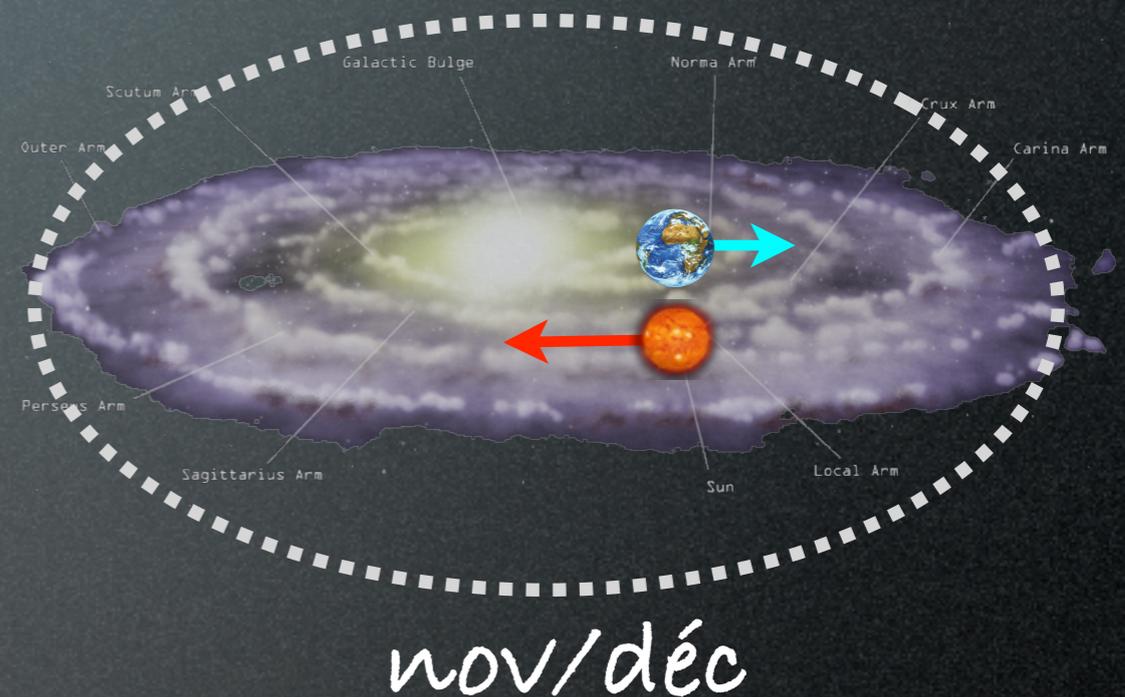
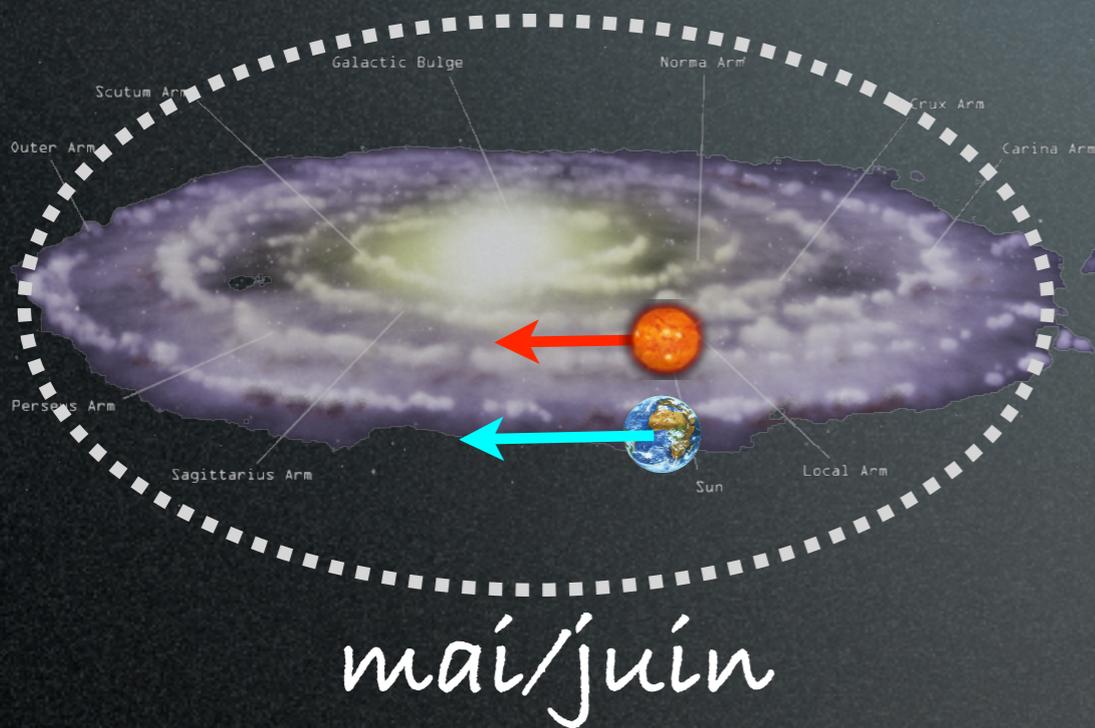
collecter tous les évènements,
et détecter une modulation annuelle



Détection directe

Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

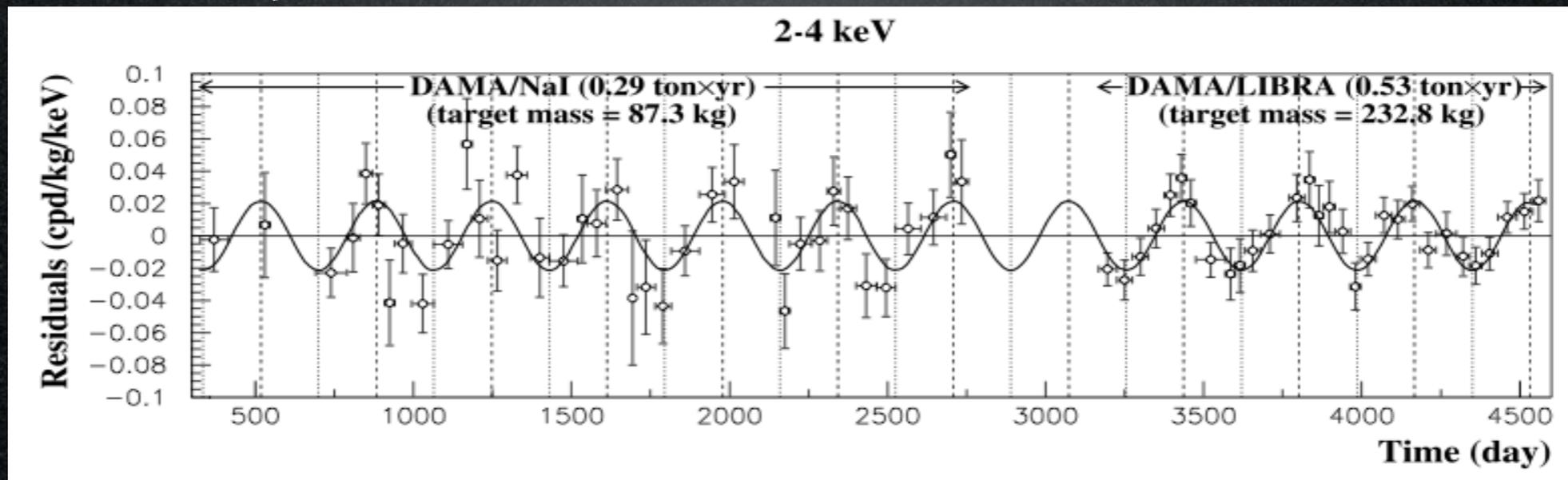
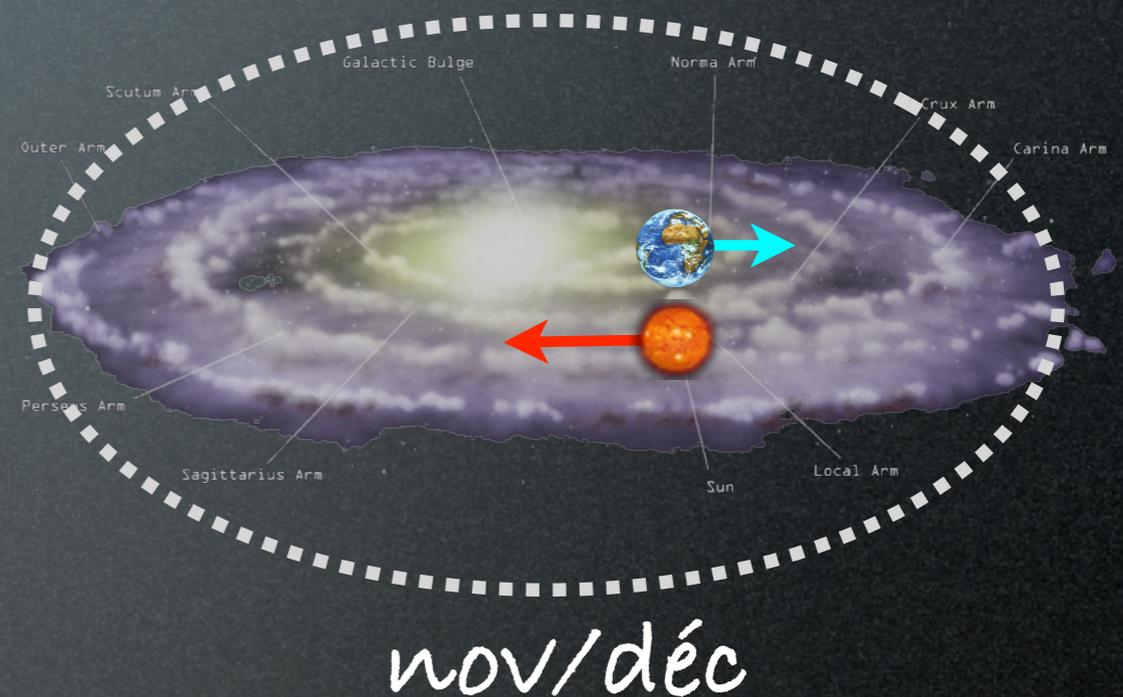
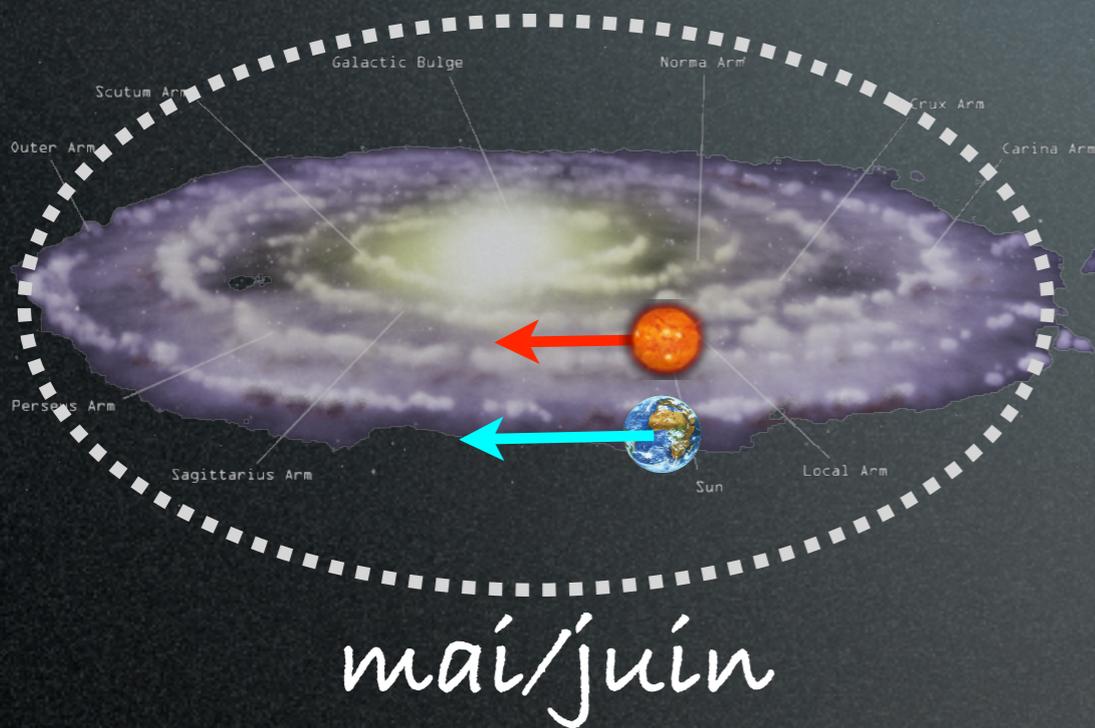
collecter tous les événements,
et détecter une modulation annuelle



Détection directe

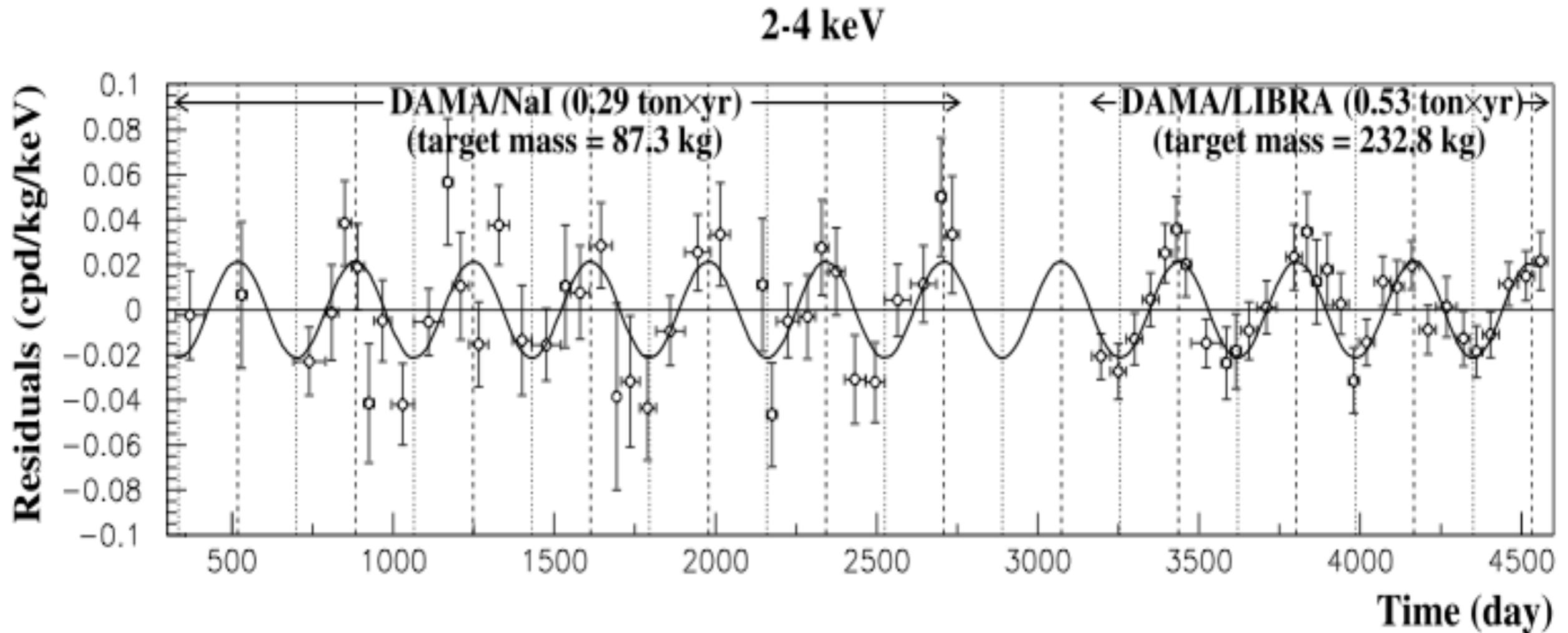
Stratégie n.2: surfer sur la vague noire

collecter tous les événements,
et détecter une modulation annuelle



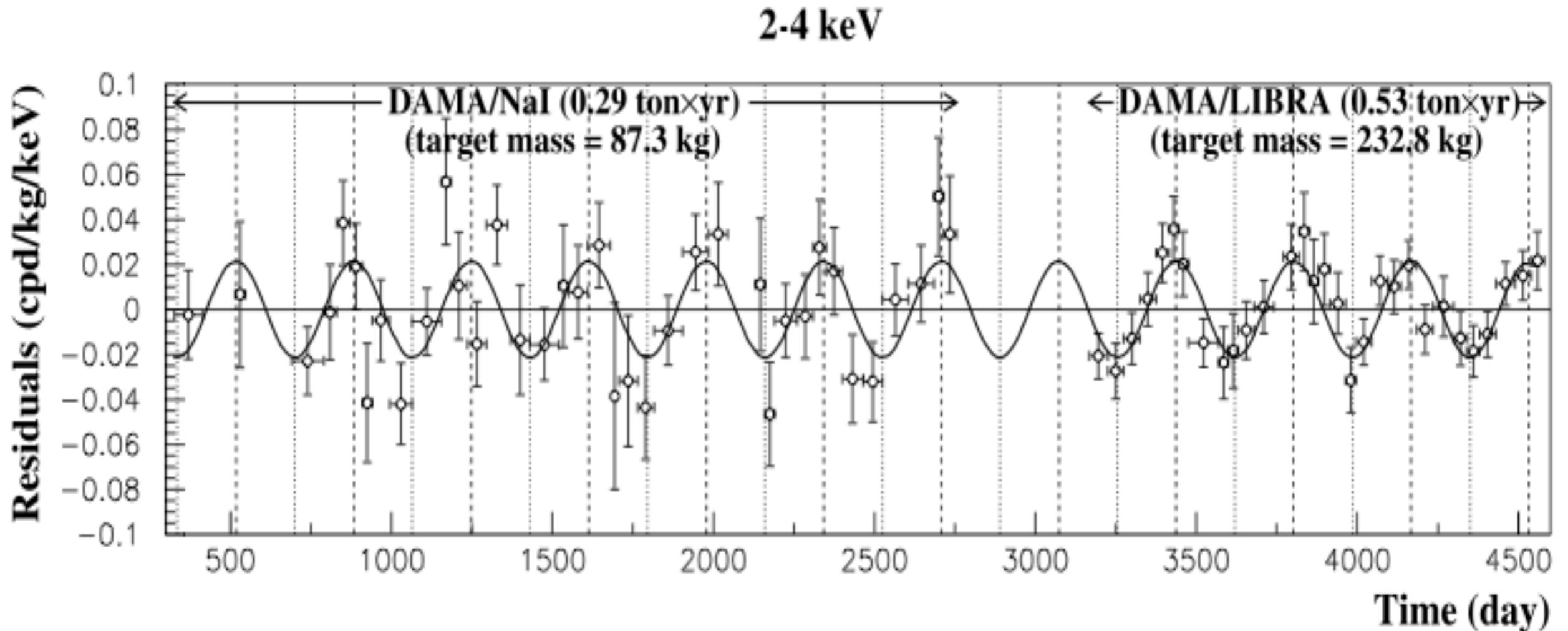
Détection directe

Une modulation annuelle !



Détection directe

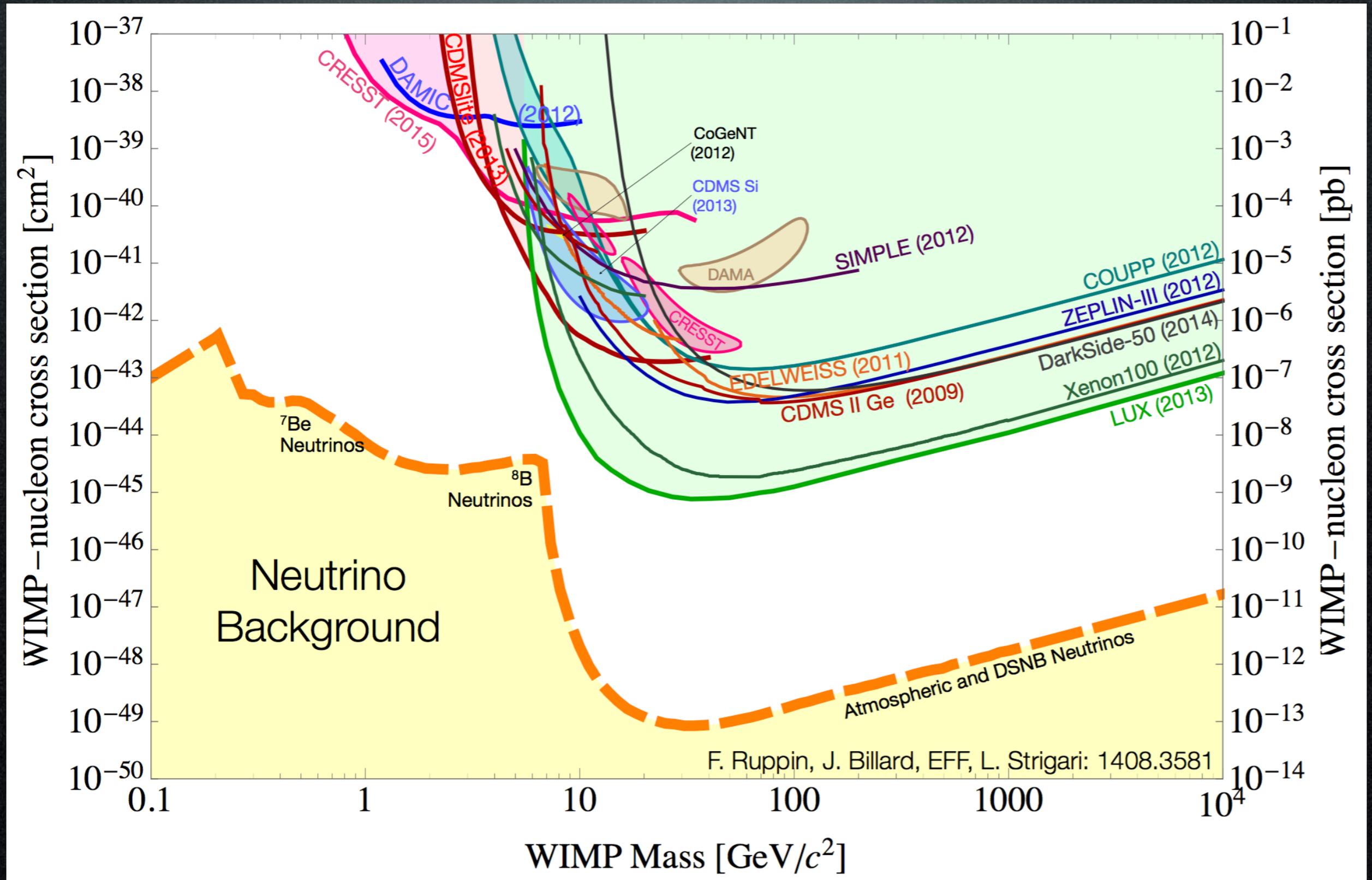
Une modulation annuelle !



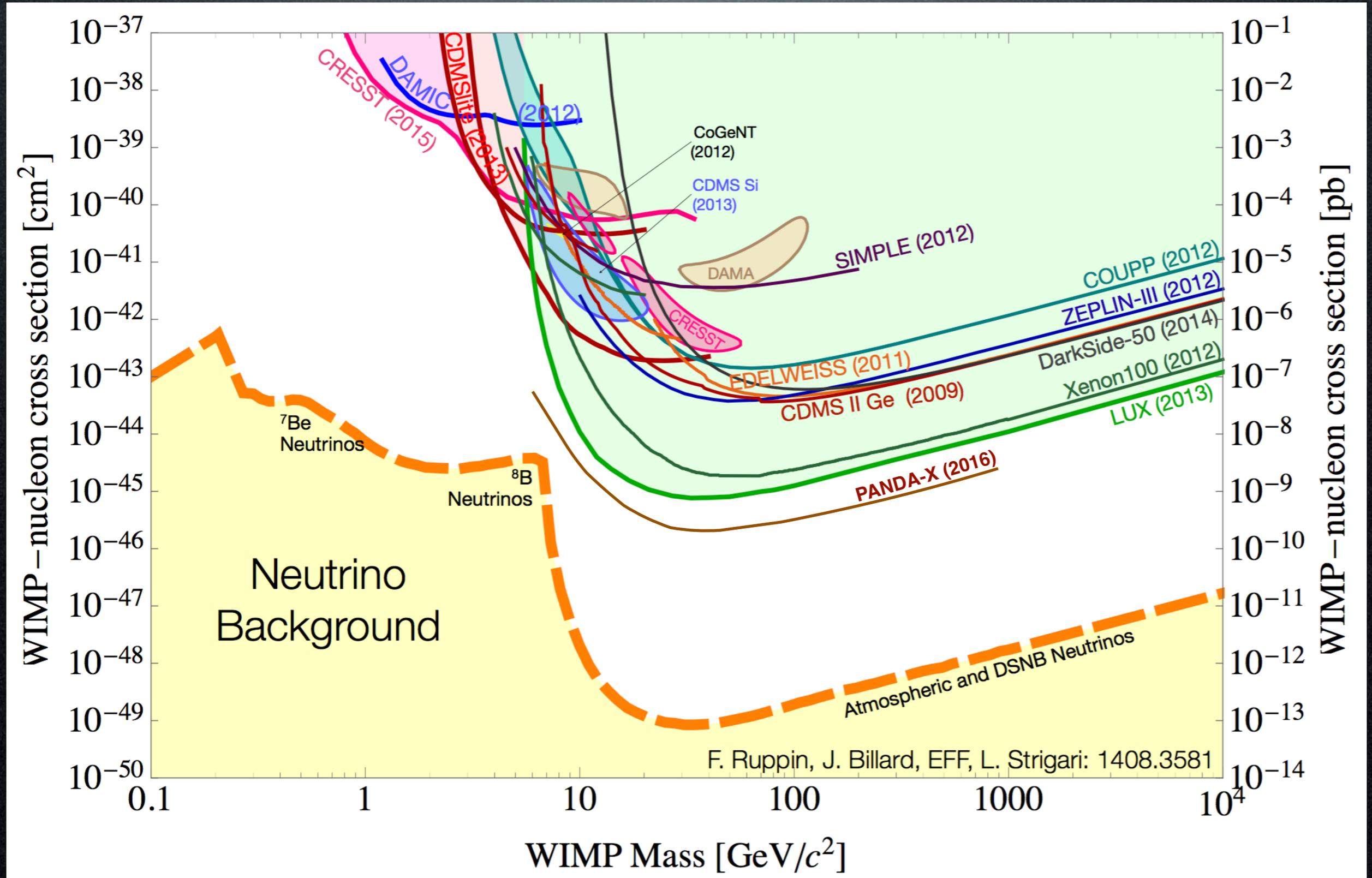
DAMA Coll., 0804.2741, 2008

Mais d'autres expériences **ne confirment pas** !...

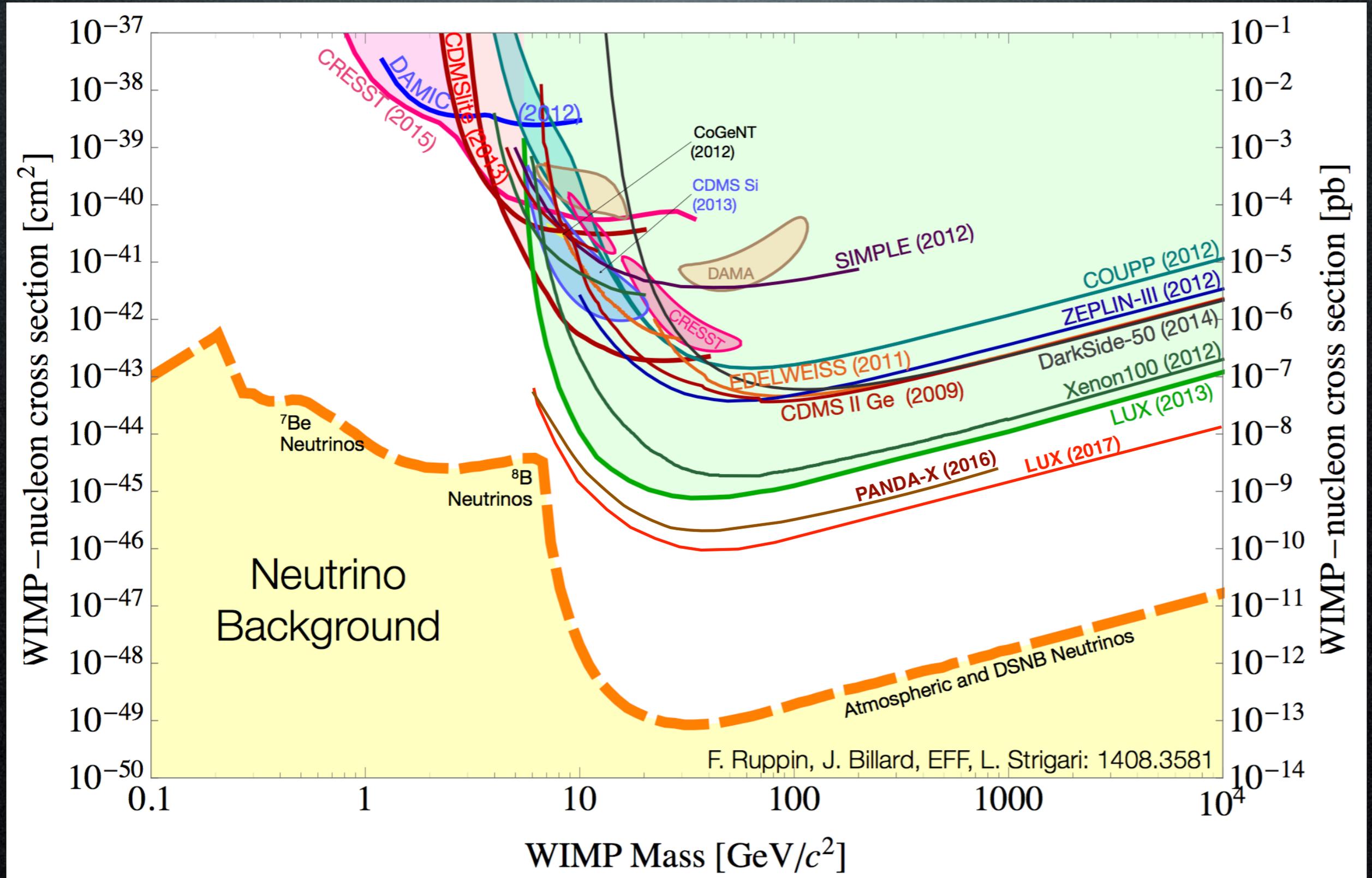
Détection directe: résultats



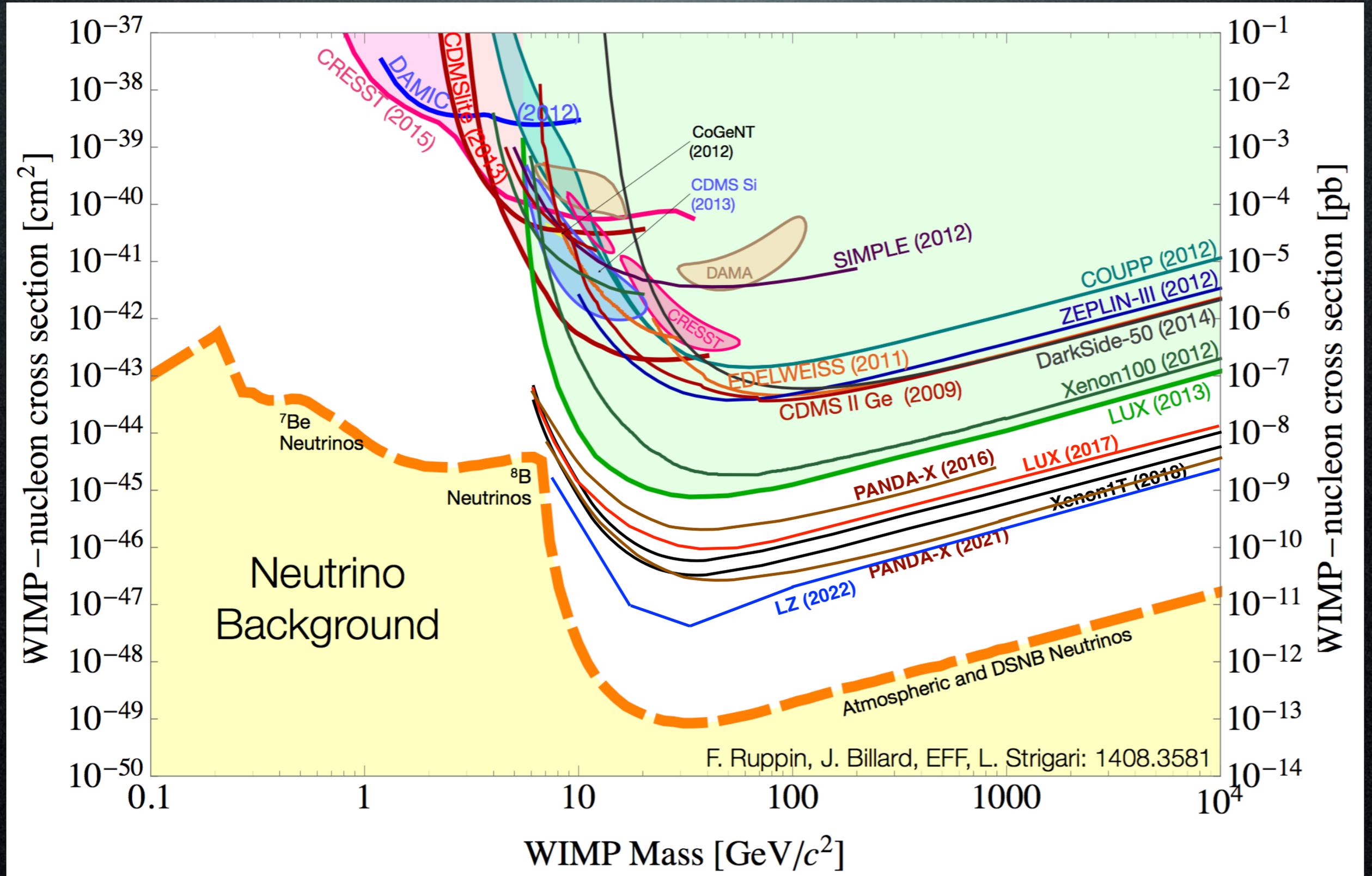
Détection directe: résultats



Détection directe: résultats



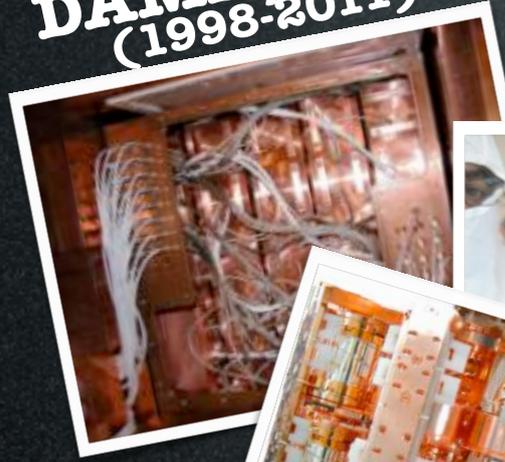
Détection directe: résultats



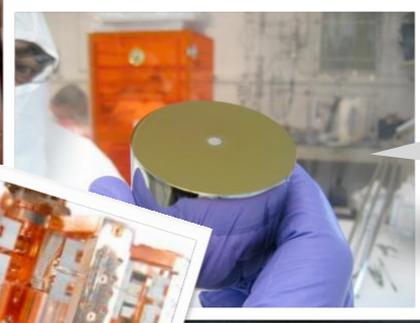
Détection directe: état de l'art

Détection directe: état de l'art

DAMA/Libra
(1998-2011)



CoGeNT
(2010-2011)



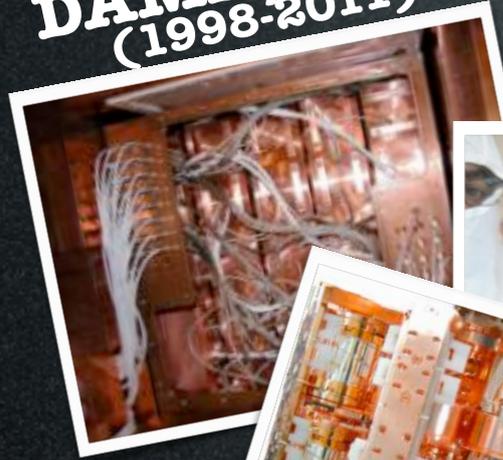
CRESST
(2011)

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.

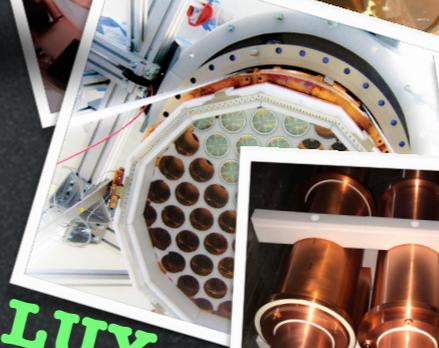
XENON100
(2009-2011)



CDMS (2009)



LUX
(2017)



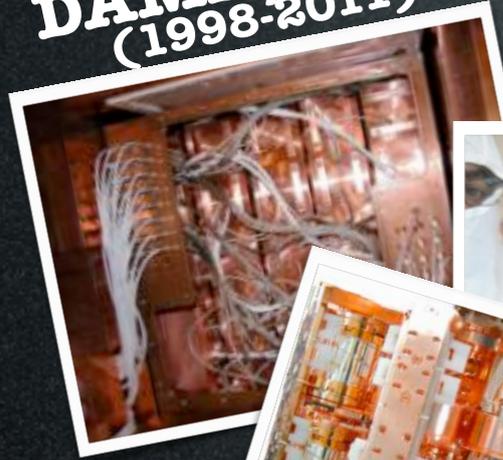
XENON 1ton
(2017)



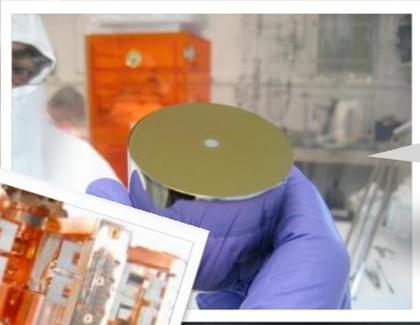
Anais
(2021)

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
(2017)



XENON
1ton
(2017)



Anais
(2021)



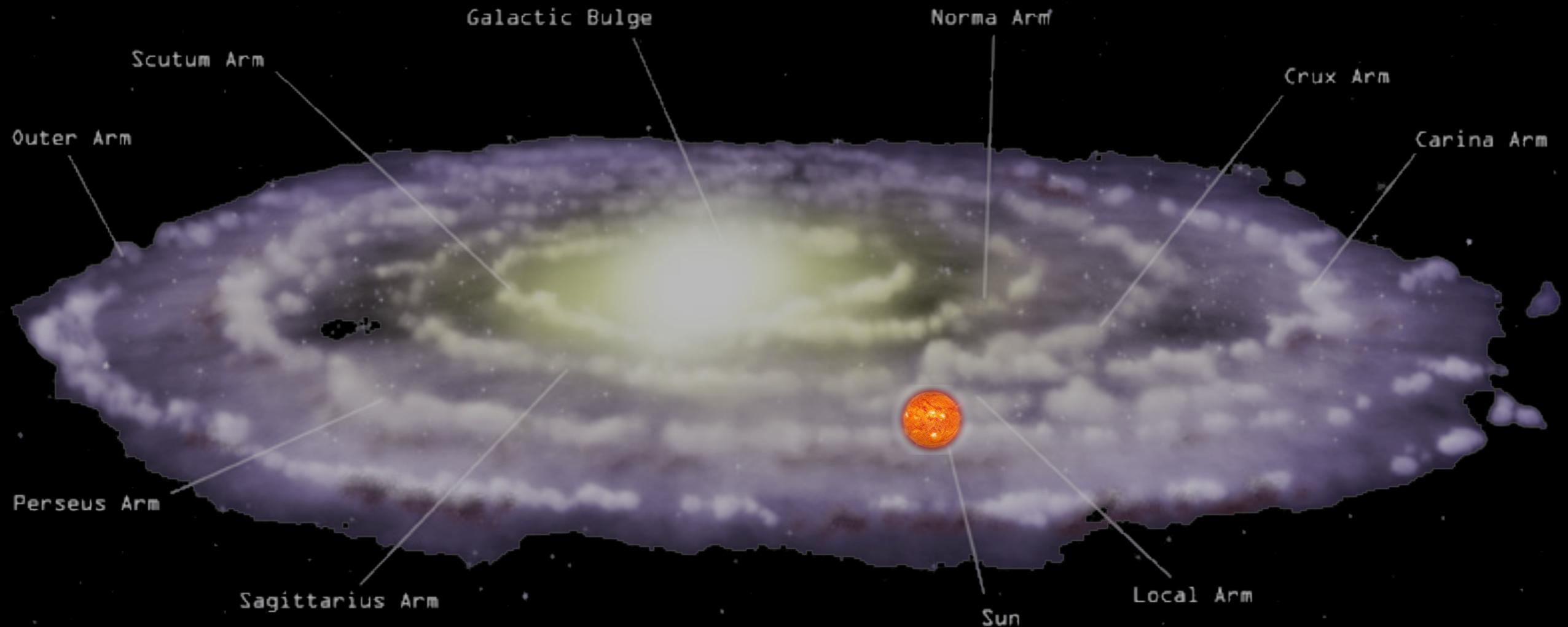
mariella

Un théoricien lambda

Espoir #2:
FERMI et la
détection indirecte

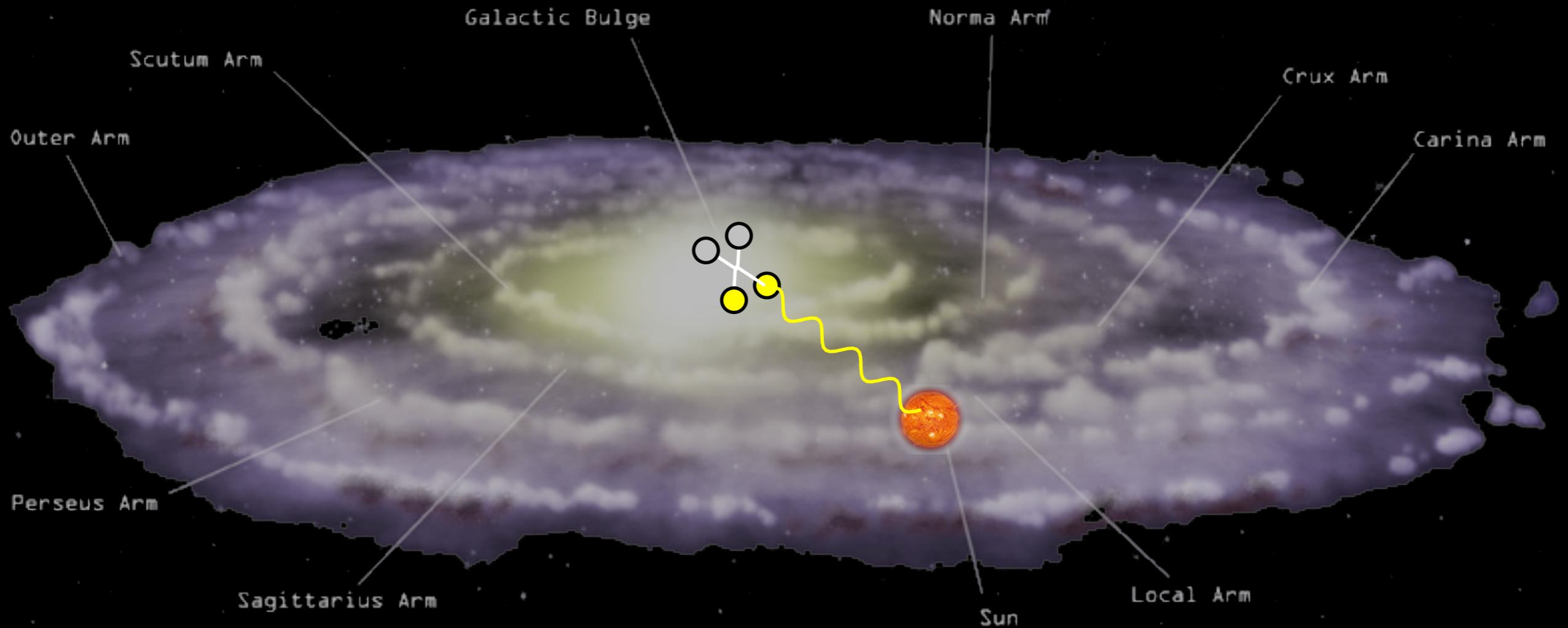
Détection indirecte

Rayons gamma de l'annihilation de MN dans l'halo



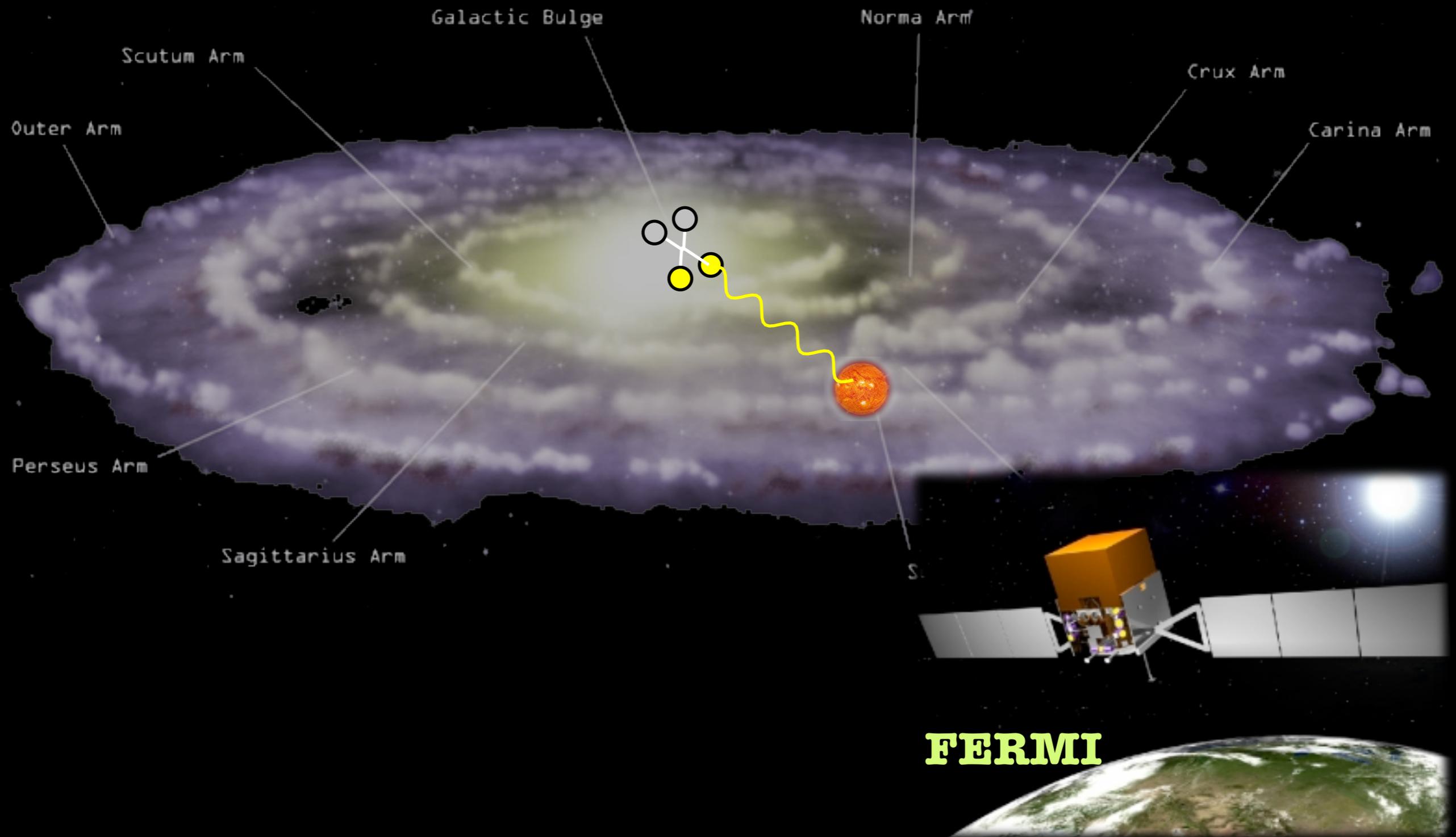
Détection indirecte

Rayons gamma de l'annihilation de MN dans l'halo



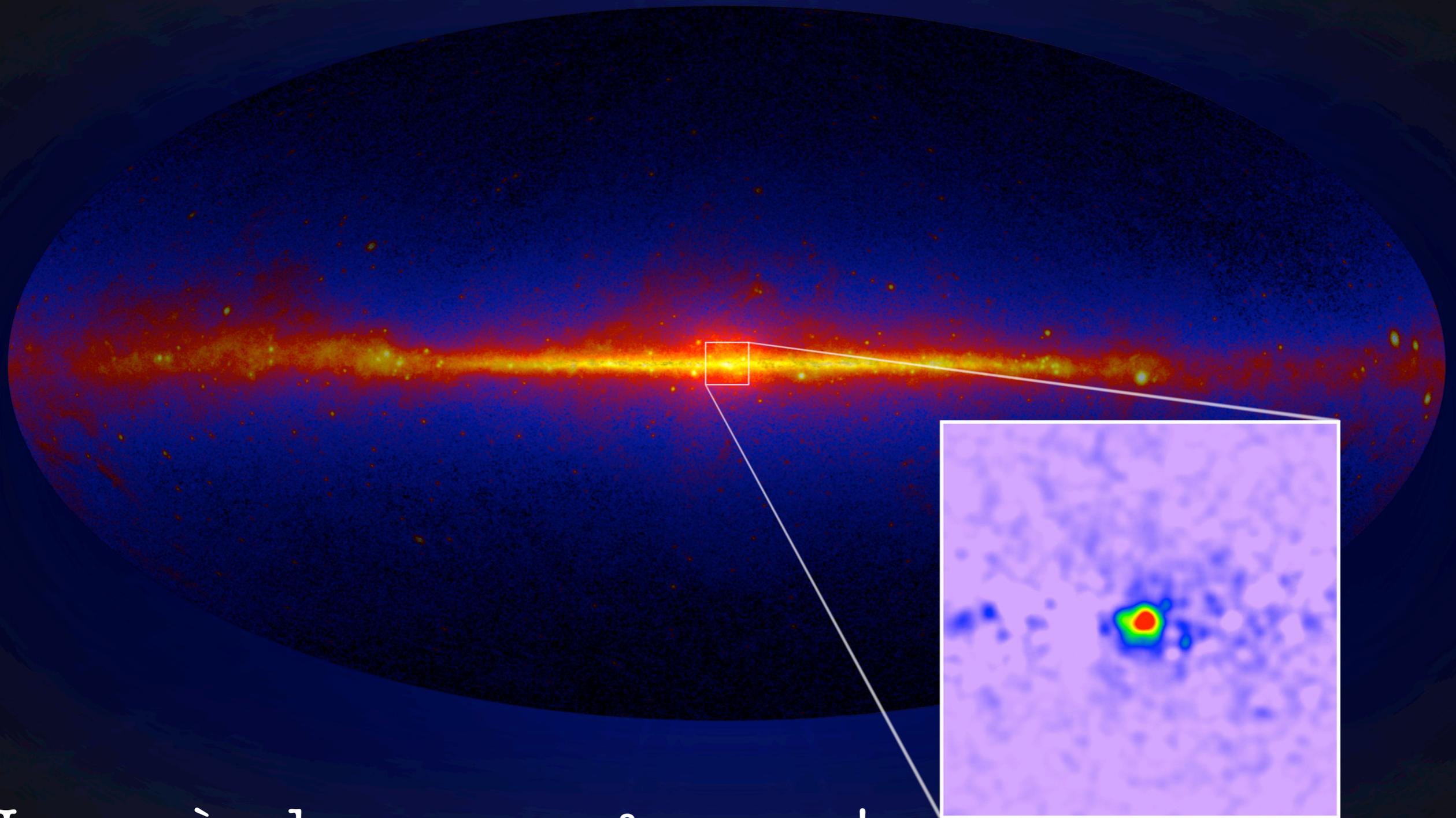
Détection indirecte

Rayons gamma de l'annihilation de MN dans l'halo



Détection indirecte

Rayons gamma de l'annihilation de MN dans l'halo

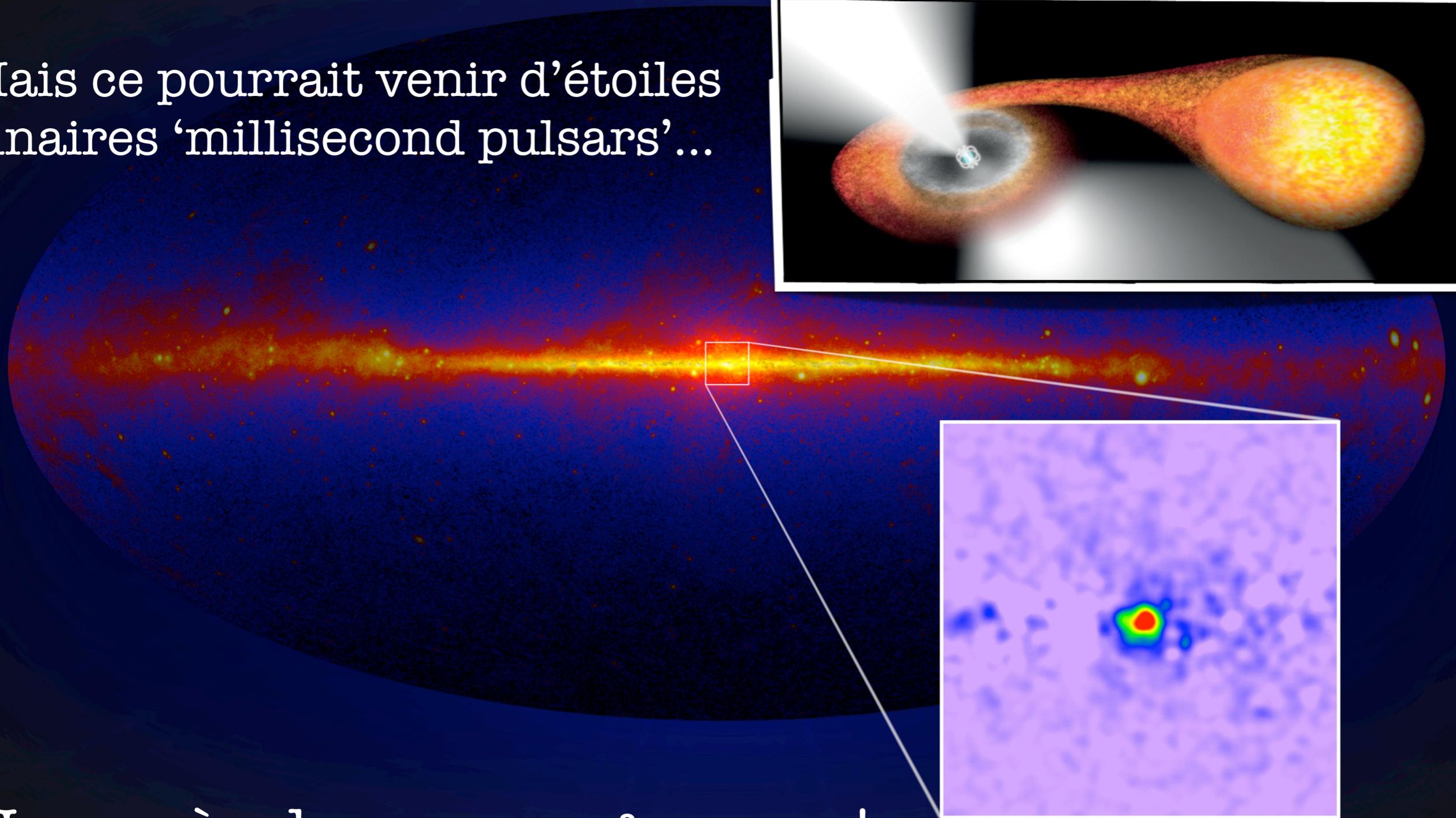
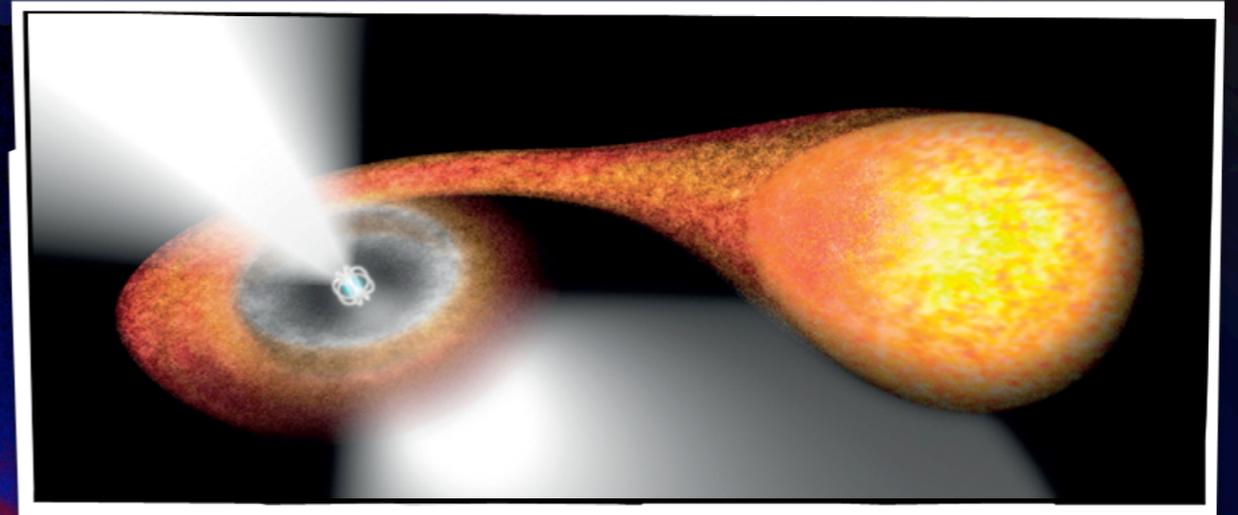


Un excès de rayons gamma !

Détection indirecte

Rayons gamma de l'annihilation de MN dans l'halo

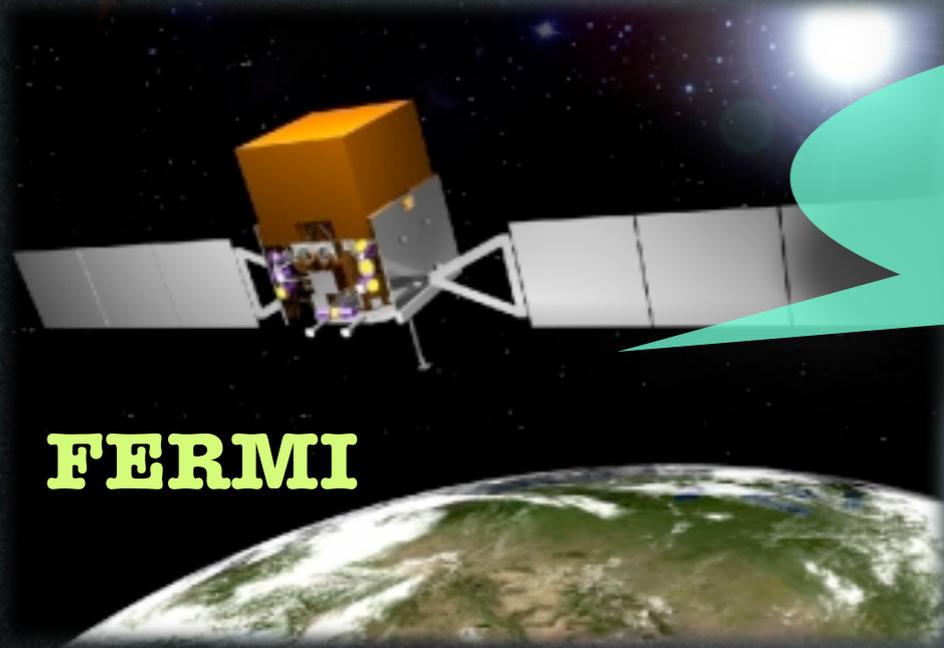
Mais ce pourrait venir d'étoiles binaires 'millisecond pulsars'...



Un excès de rayons gamma !

Détection indirecte: état de l'art

Détection indirecte: état de l'art



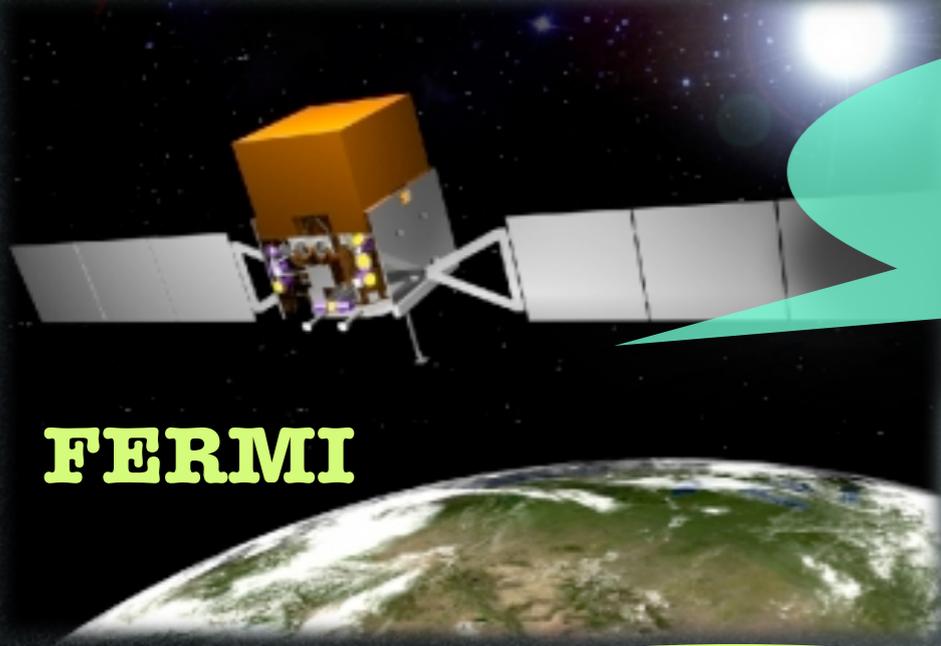
FERMI

Oui! Matière noire!

Excès en **rayons gamma**

2009-2016

Détection indirecte: état de l'art



FERMI

Oui! Matière noire!

Excès en **rayons gamma**

2009-2016

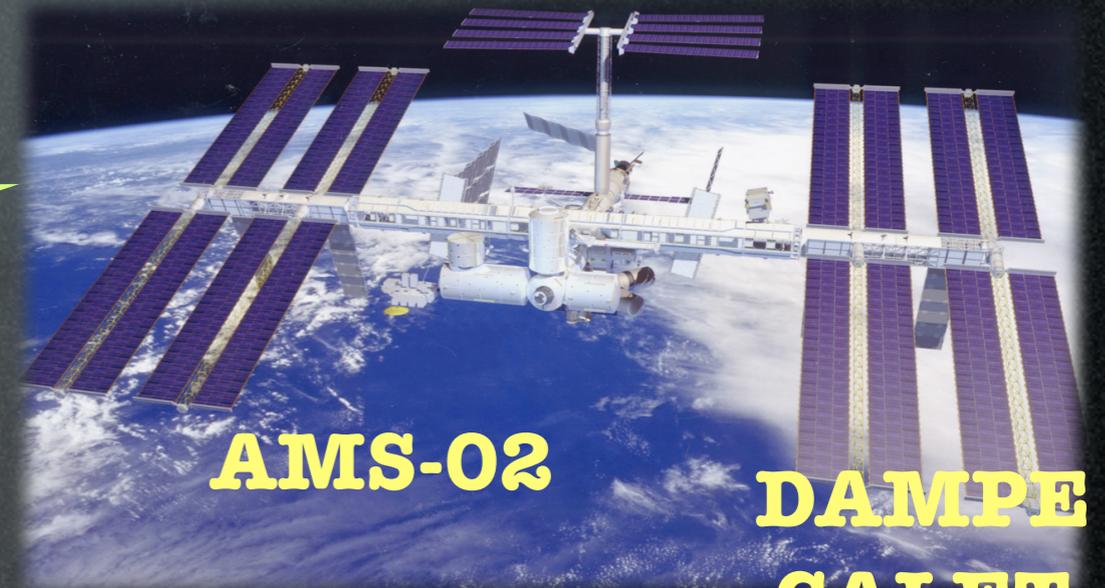
Mmm, pas trop vite...

Oui, excès de **rayons gamma**.

Mais quelle est la source ?

Peut on confirmer ?

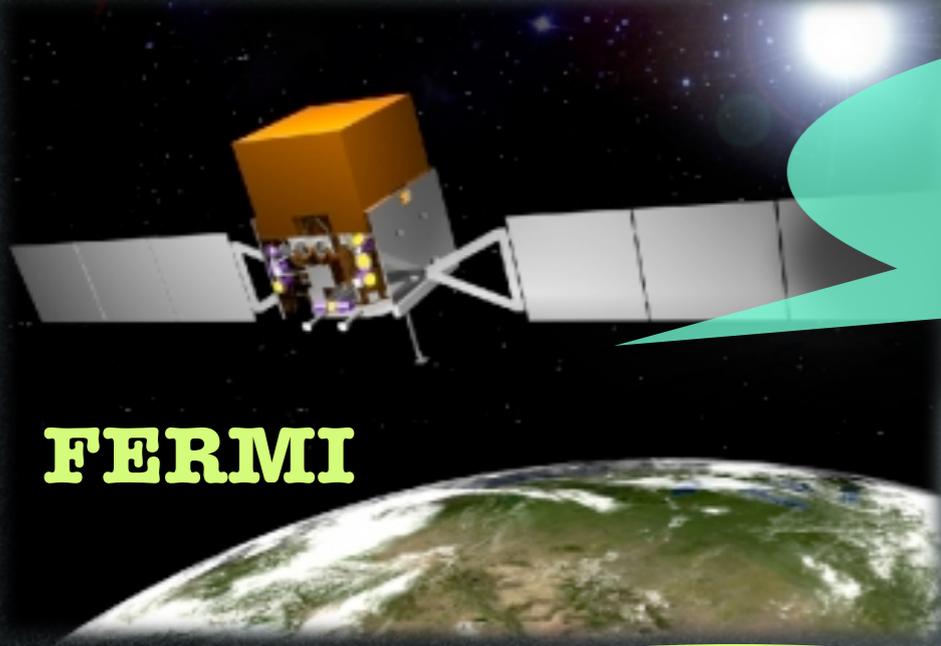
2009-...



AMS-02

DAMPE
CALET
HERD

Détection indirecte: état de l'art



FERMI

Oui! Matière noire!

Excès en **rayons gamma**

2009-2016

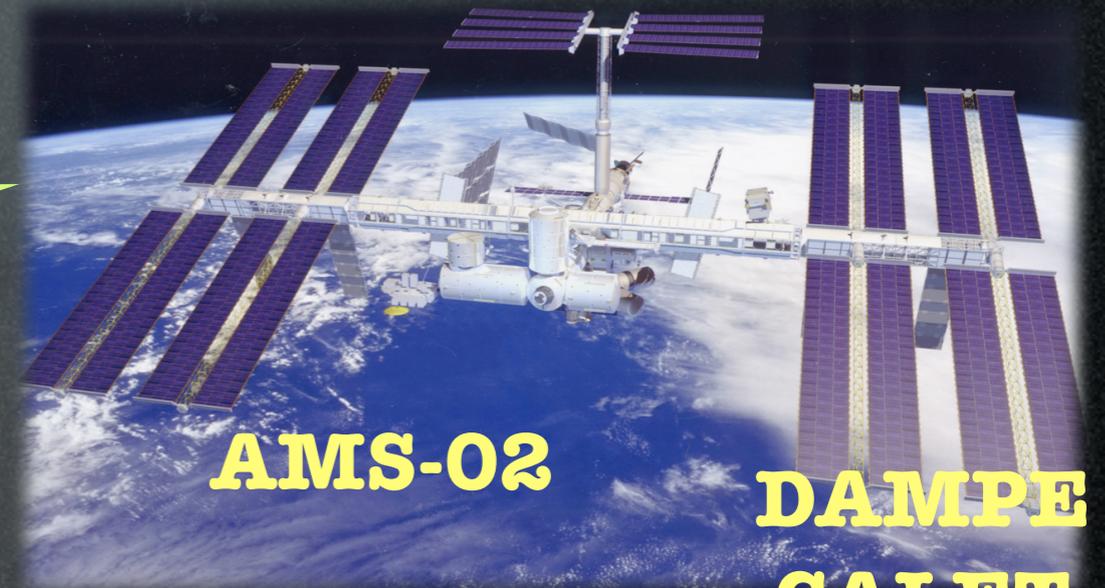
Mmm, pas trop vite...

Oui, excès de **rayons gamma**.

Mais quelle est la source ?

Peut on confirmer ?

2009-...



AMS-02

**DAMPE
CALET
HERD**



Un théoricien lambda

Espoir #3:

Voyager I et

les trous noirs primordiaux

La MN **ne** peut **pas** être:

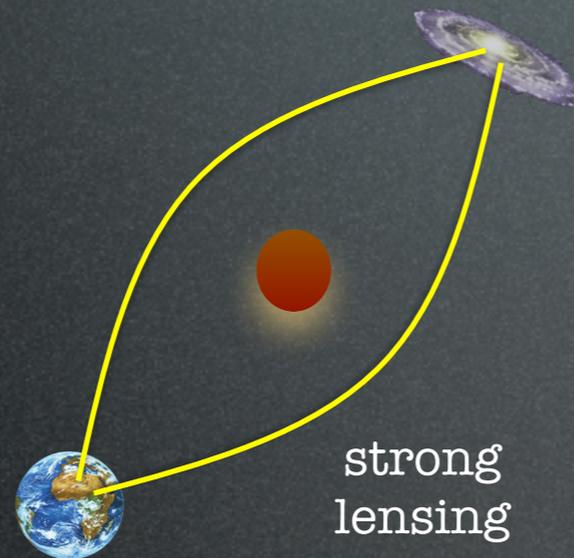
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



~~un corps fait de neutrons et protons~~

- la BBN (et la CMB) nous renseignent sur le nombre de neutrons et protons dans l'Univers primordial:
- trop de p,n => un Univers rempli d'Helium



après le Big Bang

La MN **ne** peut **pas** être:

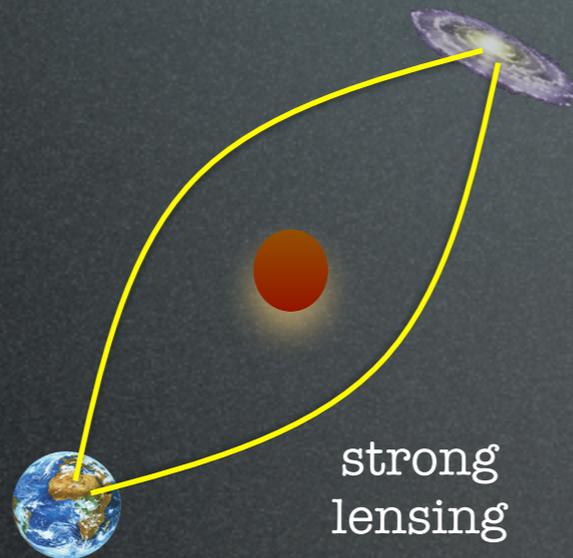
un *machin-truc* astrophysique

- ~~neutrons~~

- ~~gaz~~

- ~~trous noirs~~

- ...



~~un corps fait de
neutrons et protons~~

- la BBN (et la CMB) nous renseignent sur le nombre de neutrons et protons dans l'Univers primordial:
- trop de p,n => un Univers rempli d'Helium

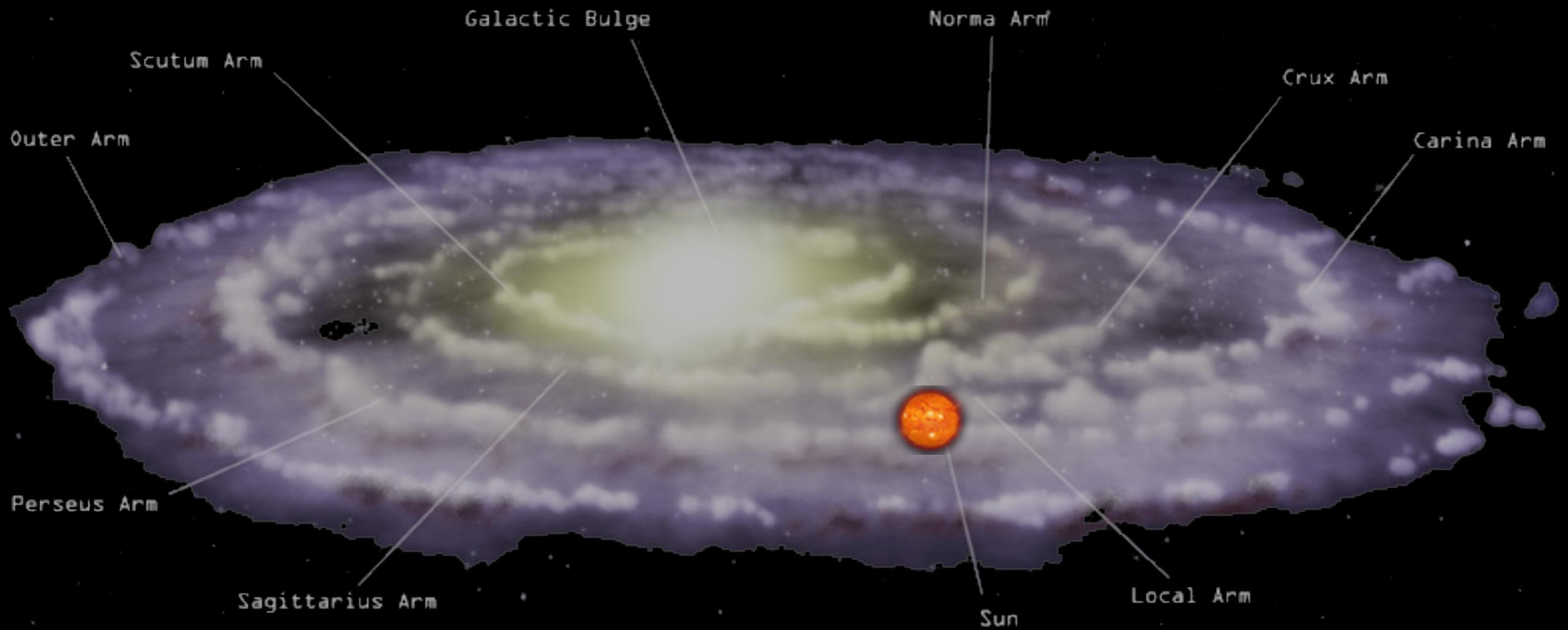


après le
Big Bang

Exception !

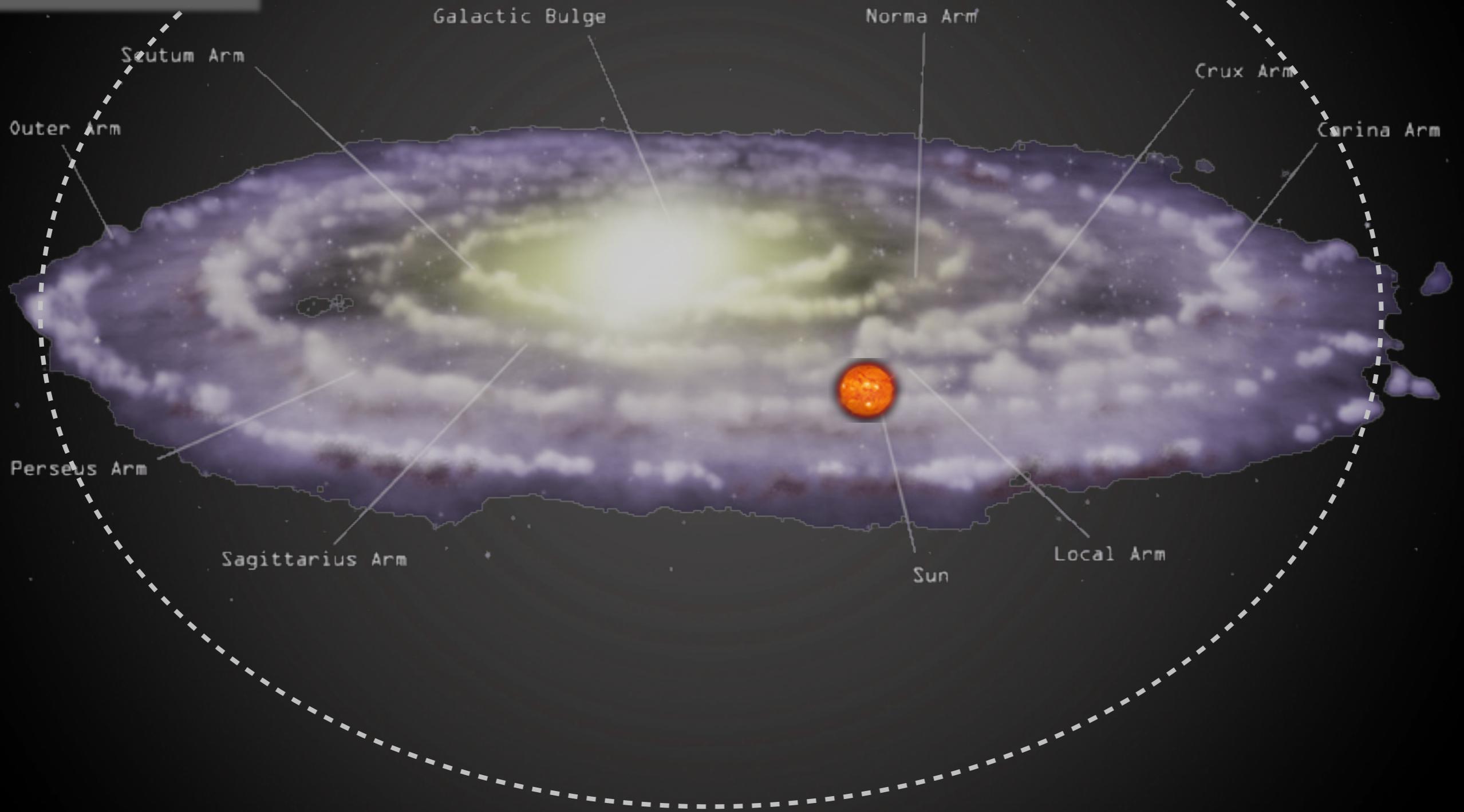
Des trous noirs **petits** et créés très tôt (**'primordiaux'**)
Peuvent constituer la Matière Noire !

Et dans la Voie Lactée ?



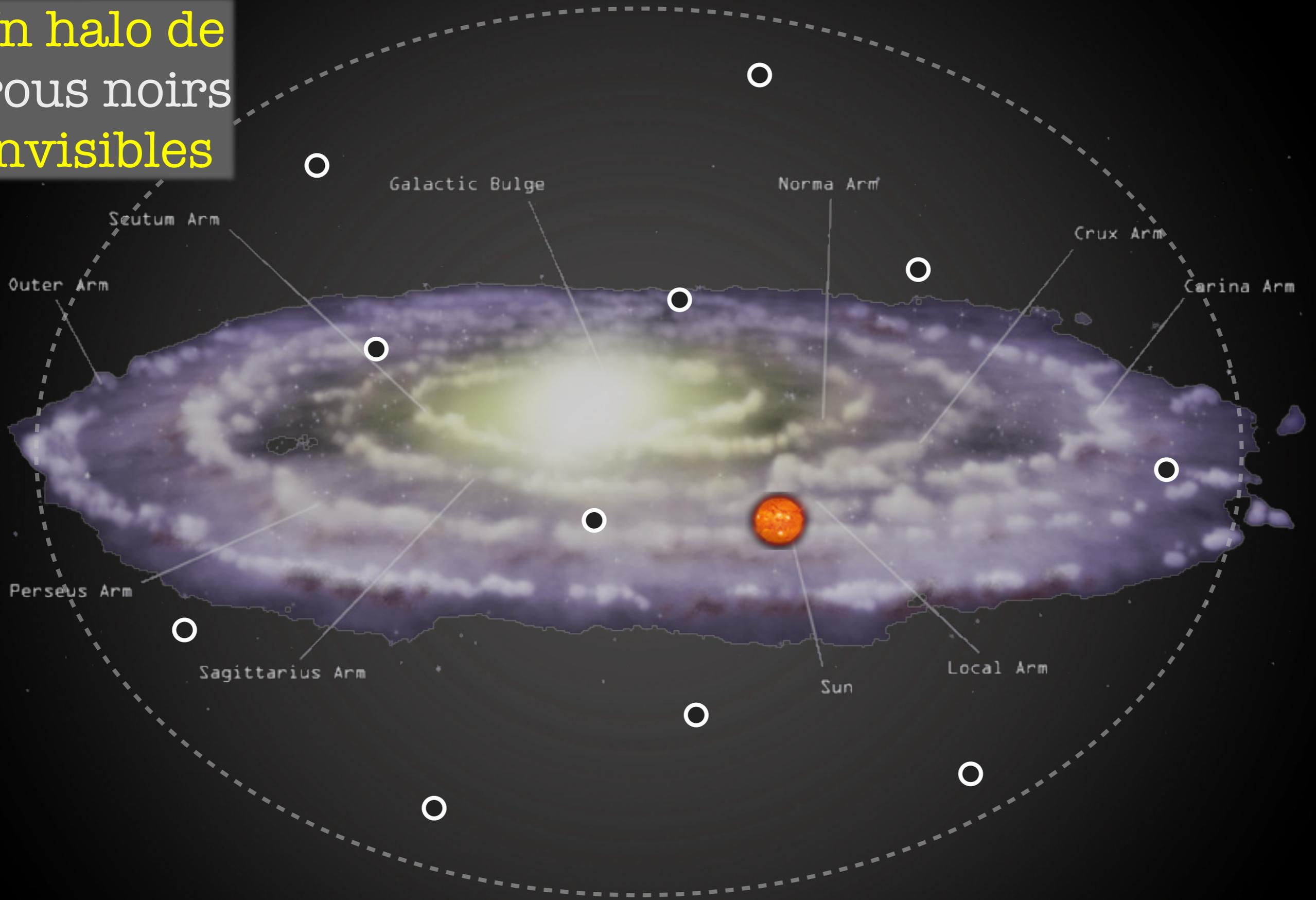
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
trous noirs
invisibles



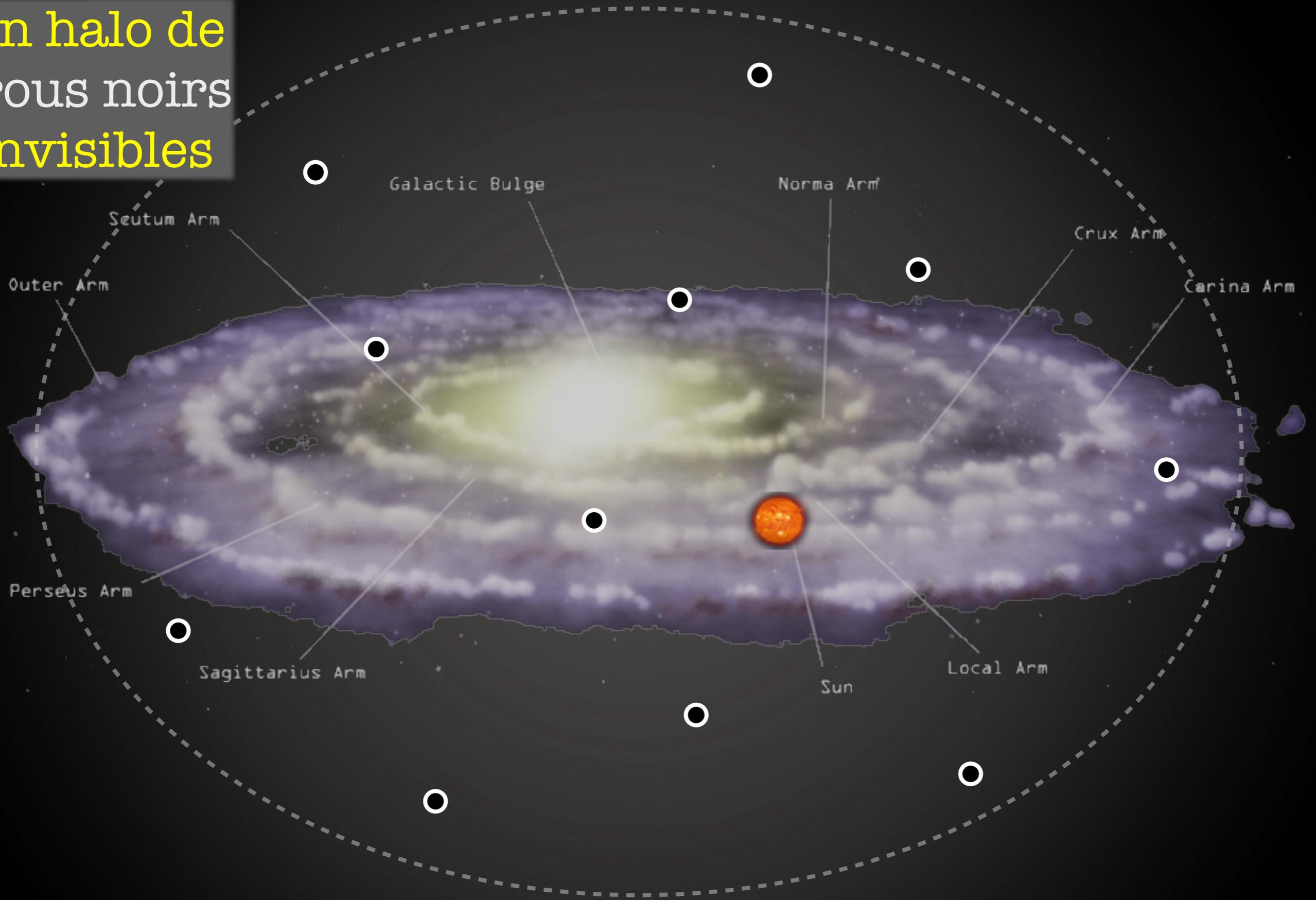
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
trous noirs
invisibles



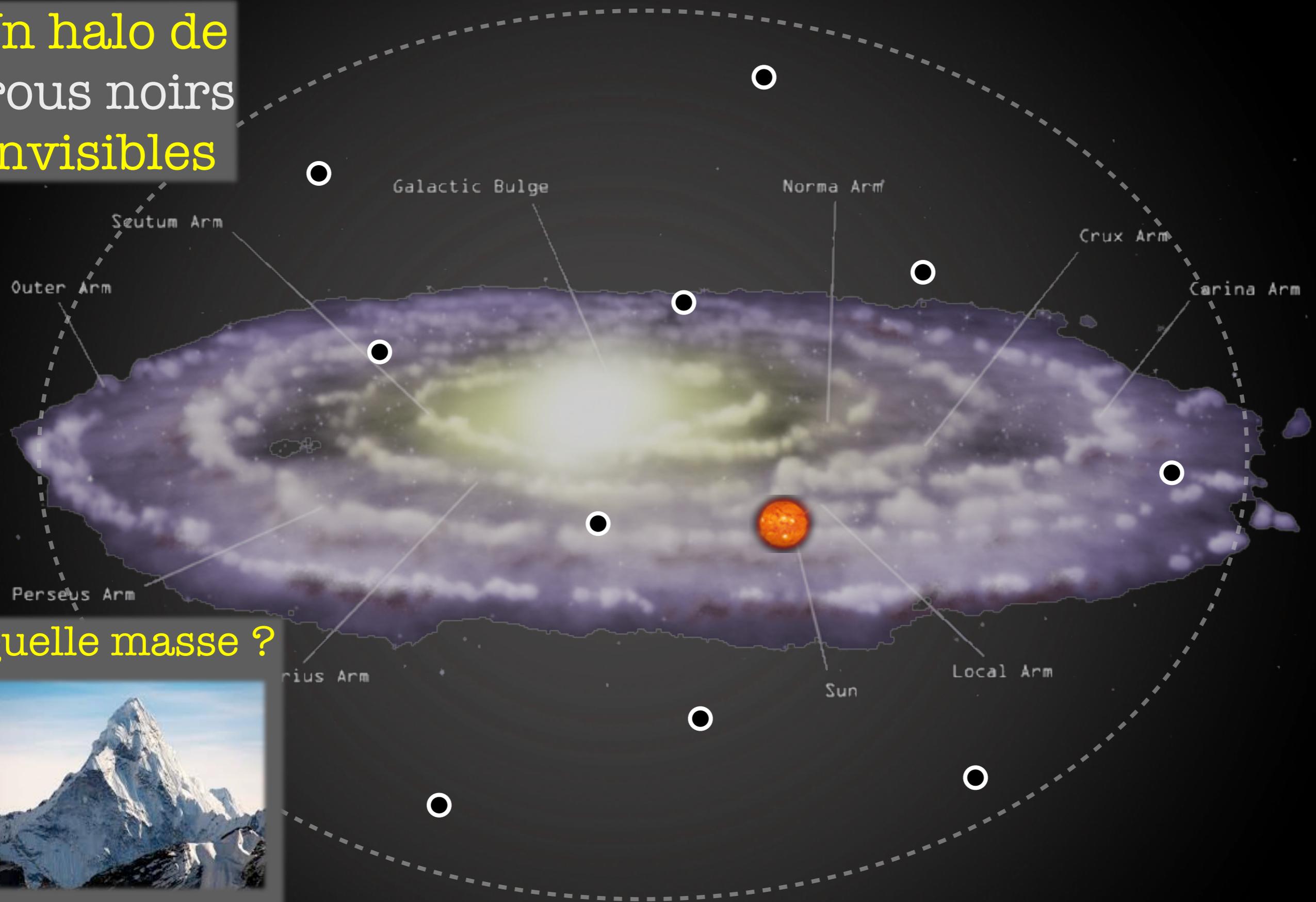
Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
trous noirs
invisibles



Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
trous noirs
invisibles



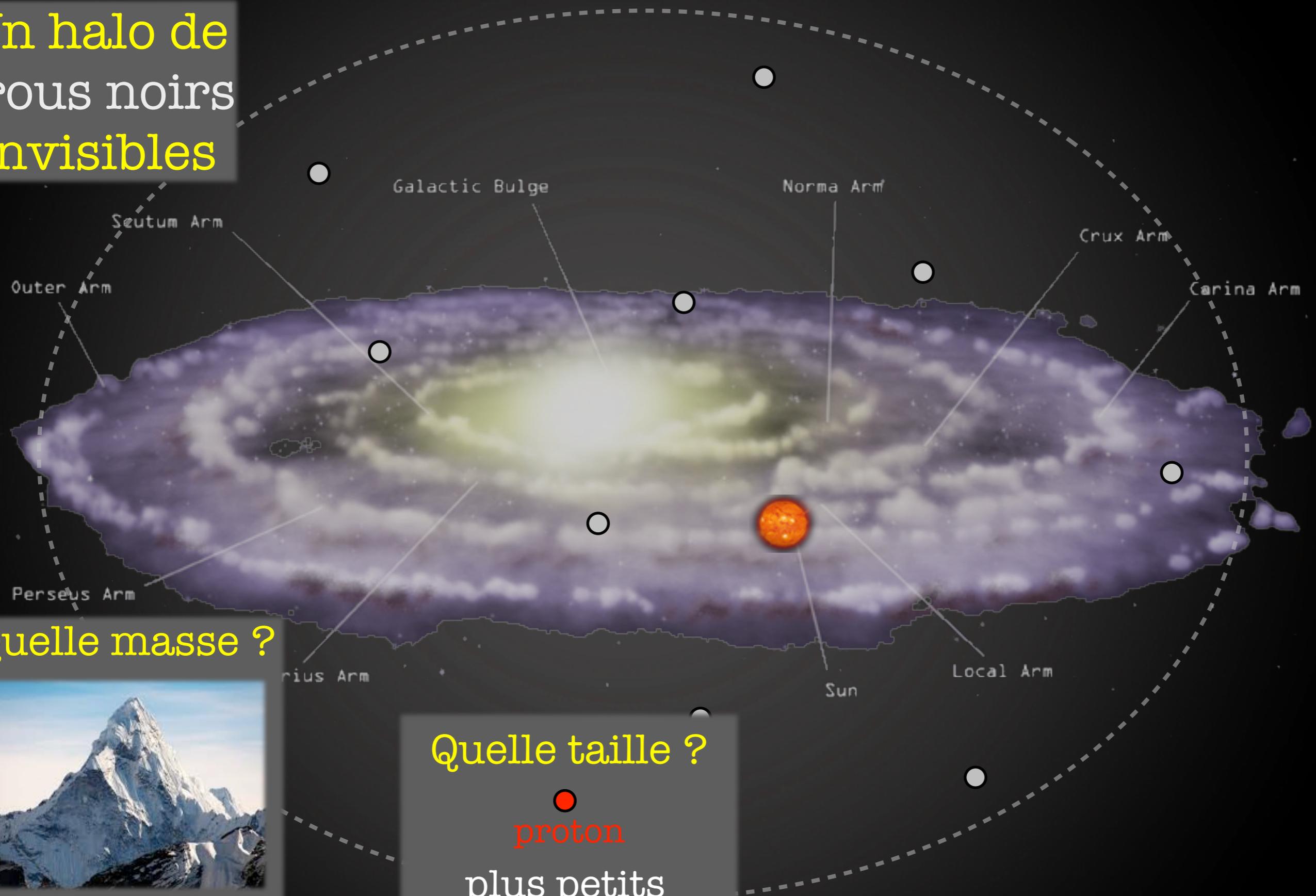
Quelle masse ?



Everest

Et dans la Voie Lactée ?

Un halo de
trous noirs
invisibles



Quelle masse ?



Everest

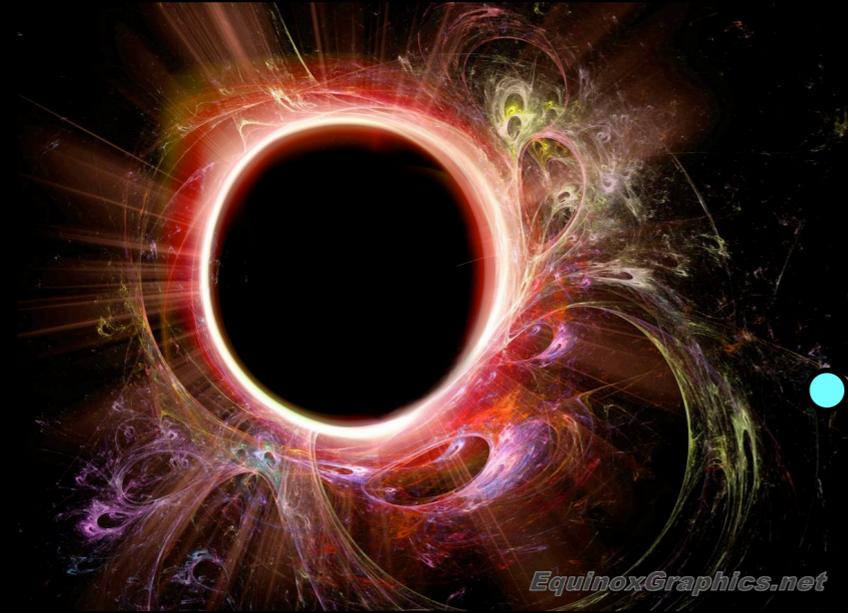
Quelle taille ?

●
proton

plus petits
qu'un proton

Comment les détecter ?

Comment les détecter ?

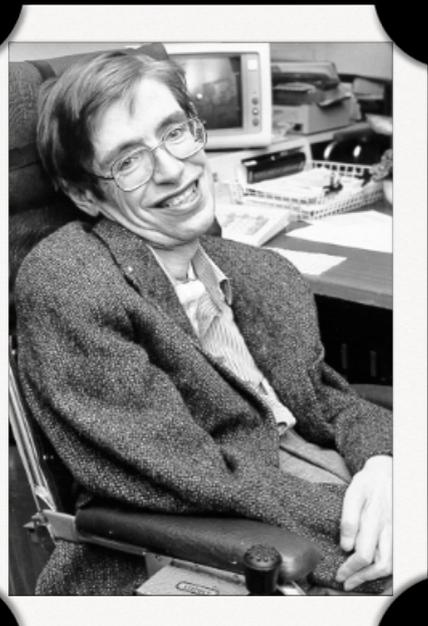


Les trous noirs
émettent des particules
(e.g. électrons)

Comment les détecter ?



Les trous noirs
émettent des particules
(e.g. électrons)



*Radiation de
Hawking*

Comment les détecter ?



Les trous noirs
émettent des particules
(e.g. électrons)

Les particules
voyagent dans
la galaxie

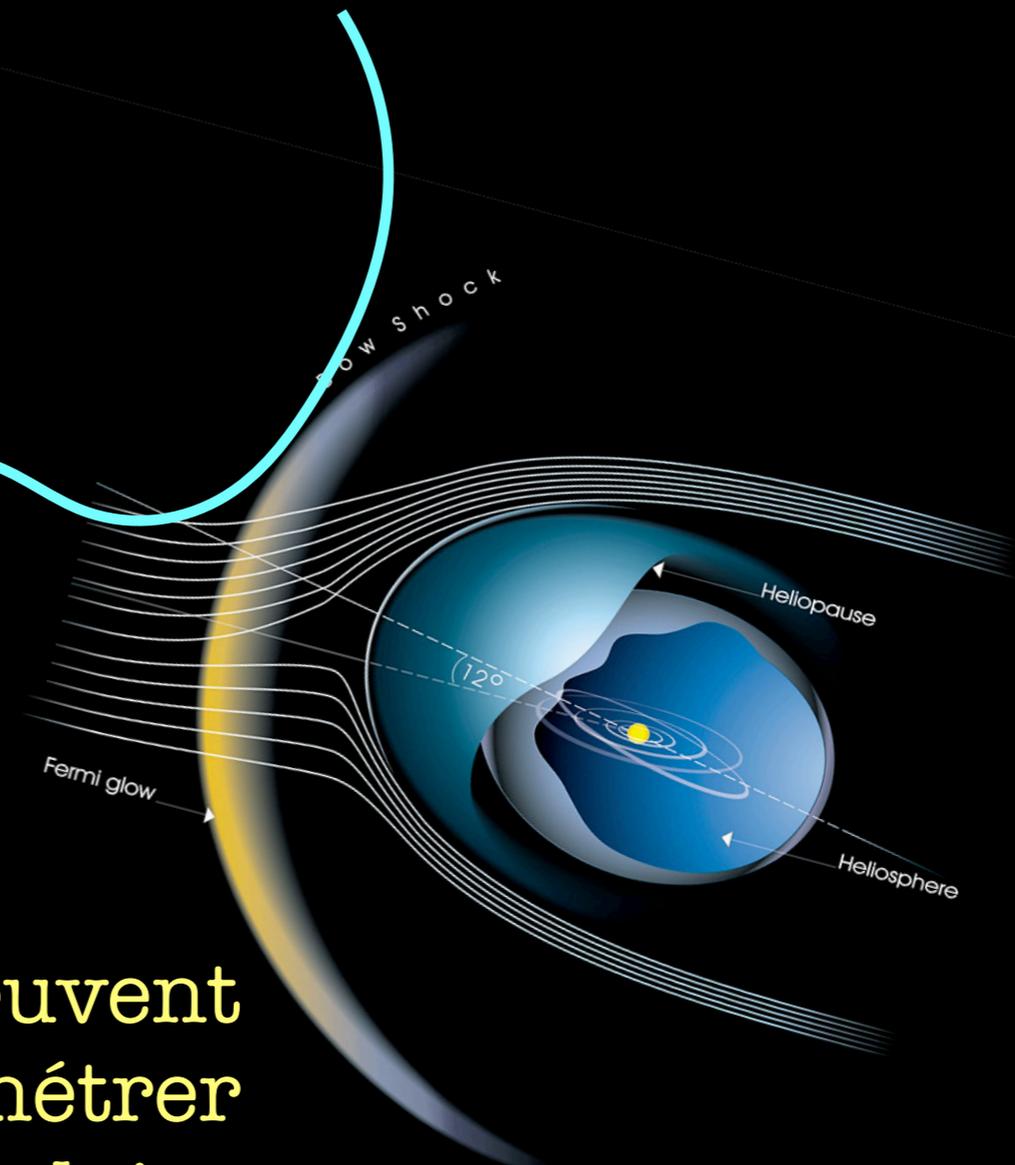
Comment les détecter ?



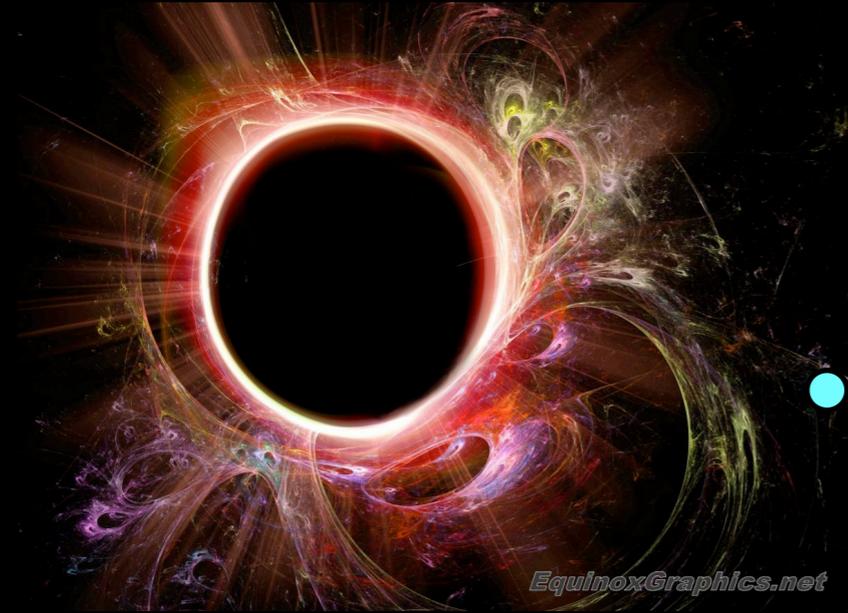
Les trous noirs émettent des particules (e.g. électrons)

Les particules voyagent dans la galaxie

Mais ne peuvent pas pénétrer le bouclier solaire



Comment les détecter ?

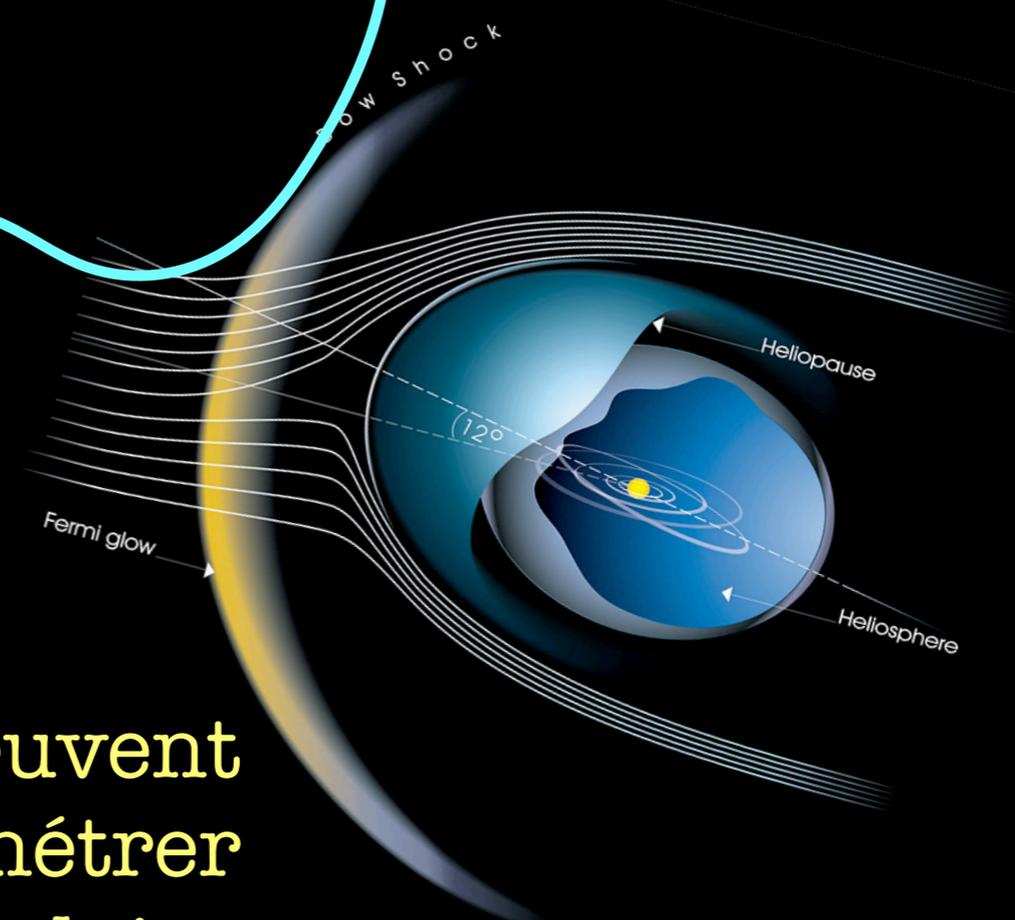
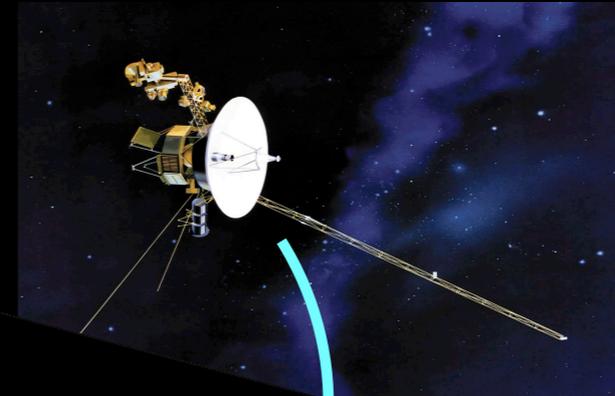


Les trous noirs émettent des particules (e.g. électrons)

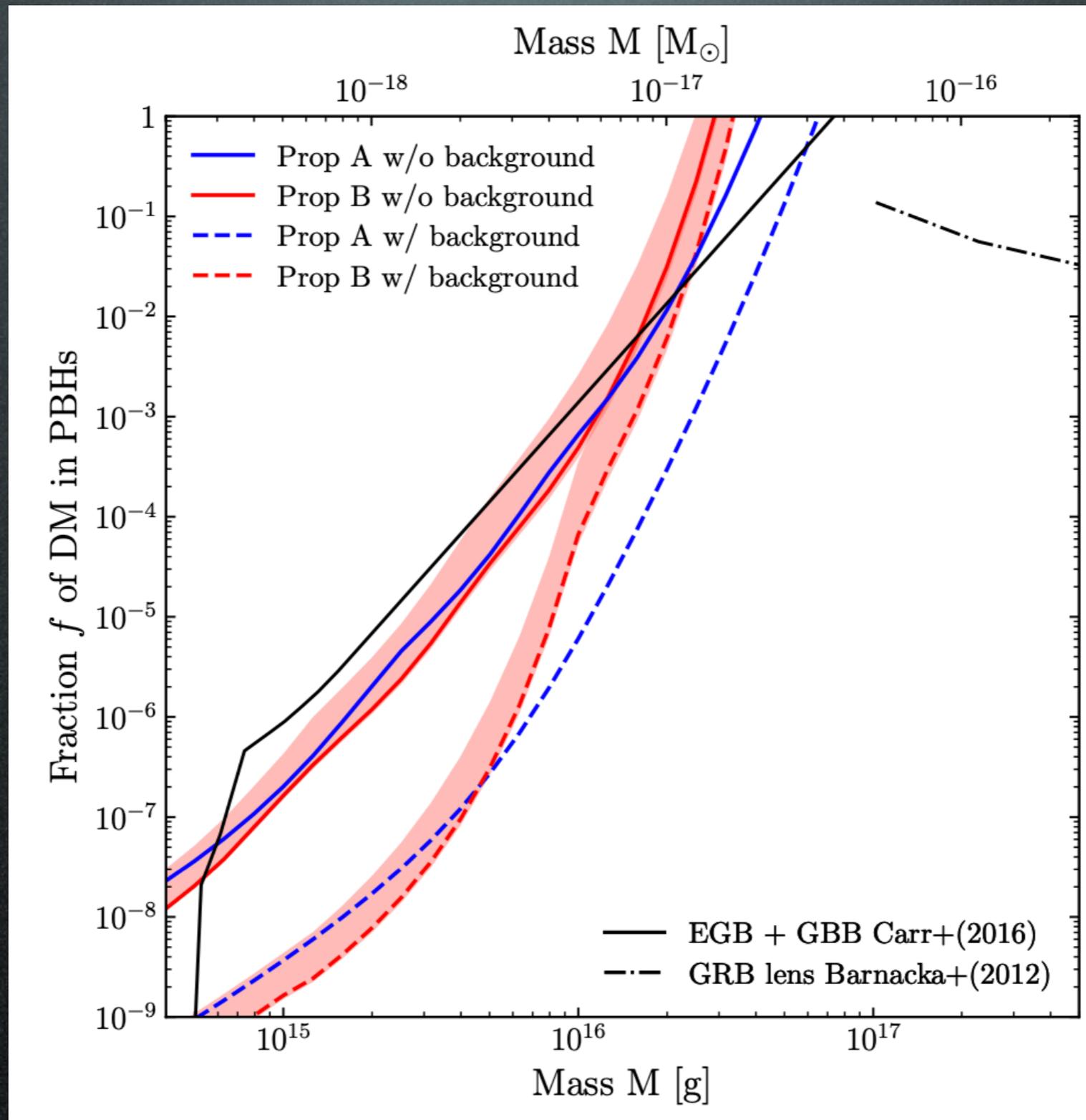
Les particules voyagent dans la galaxie

Mais ne peuvent pas pénétrer le bouclier solaire

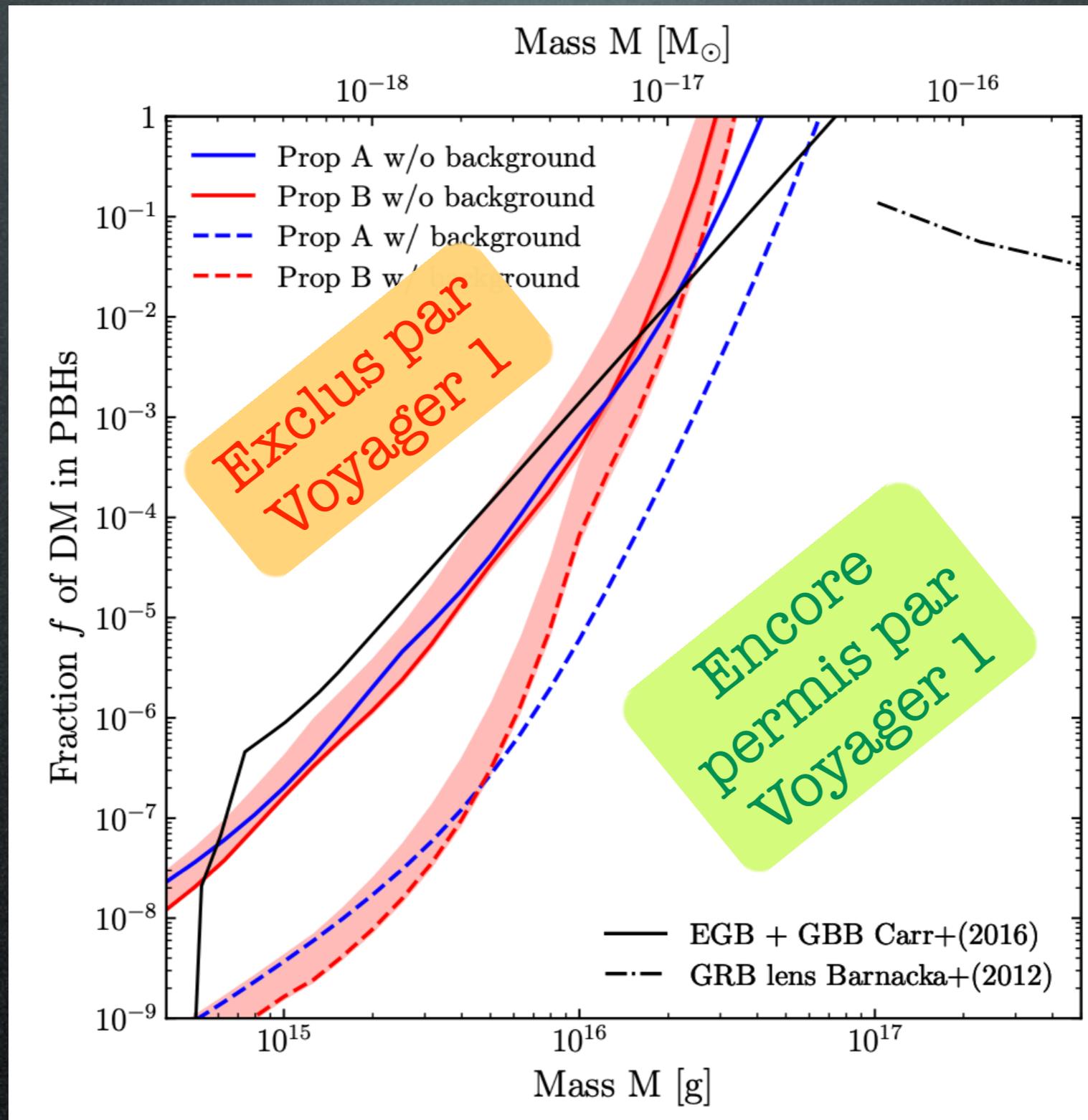
Heureusement !
Voyager I



Trous noir primordiaux: résultats

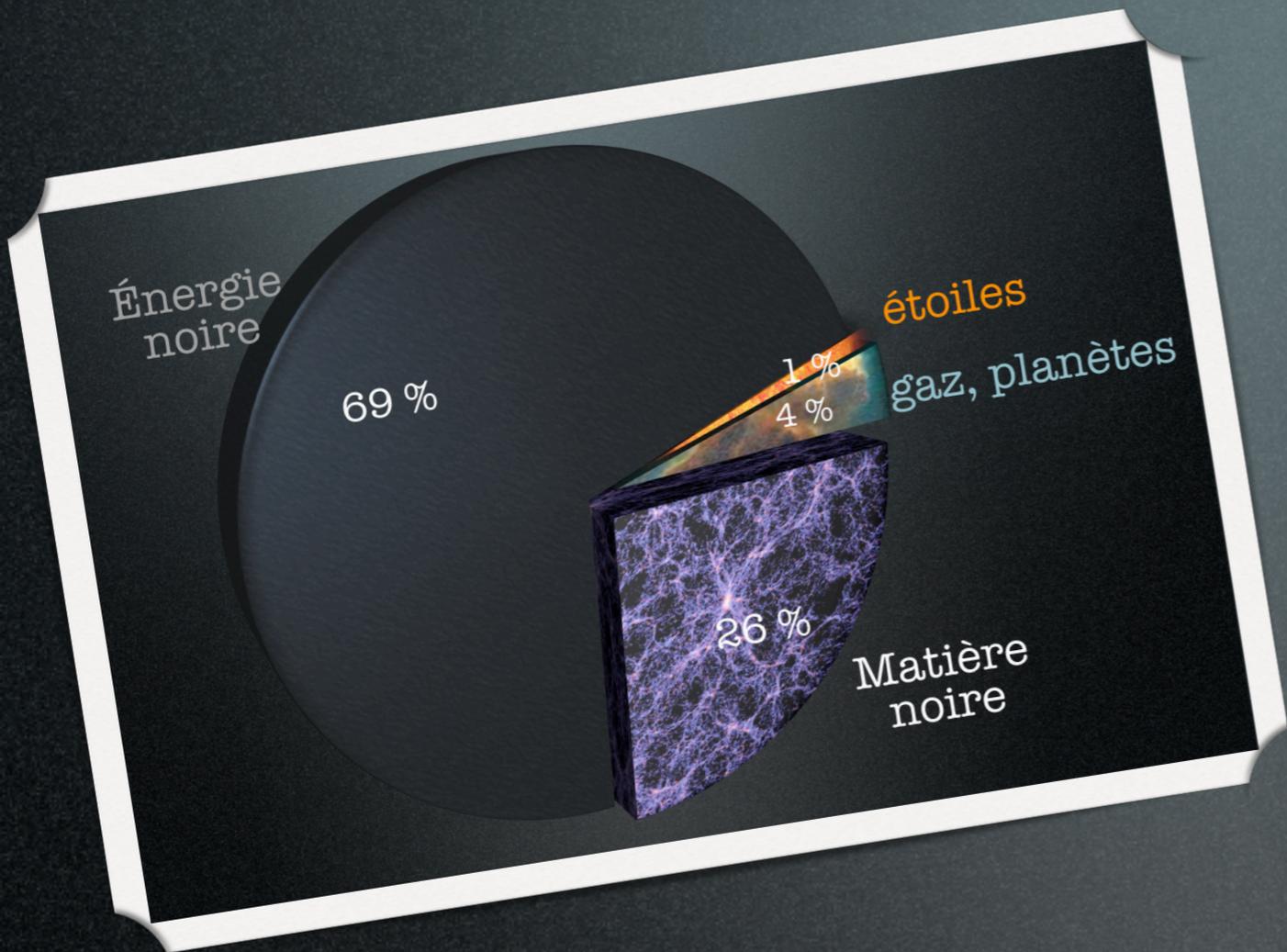


Trous noir primordiaux: résultats



De quoi est fait notre Univers ?

De quoi est fait notre Univers ?



De quoi est fait notre Univers ?

Énergie
noire

69 %

étoiles

1 %

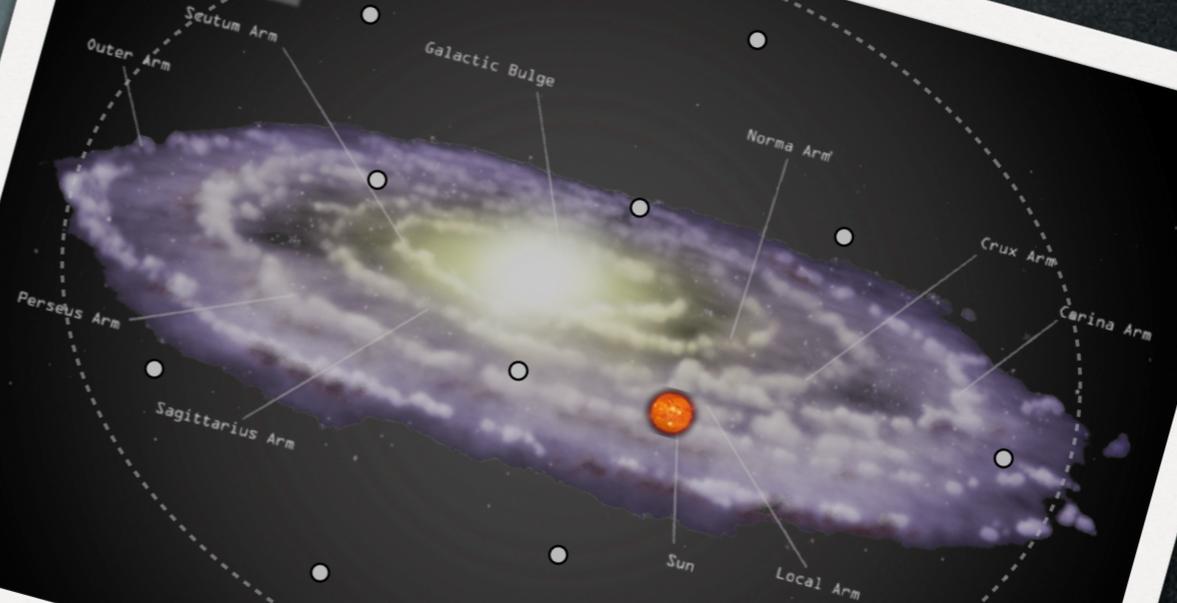
4 %

gaz, planètes

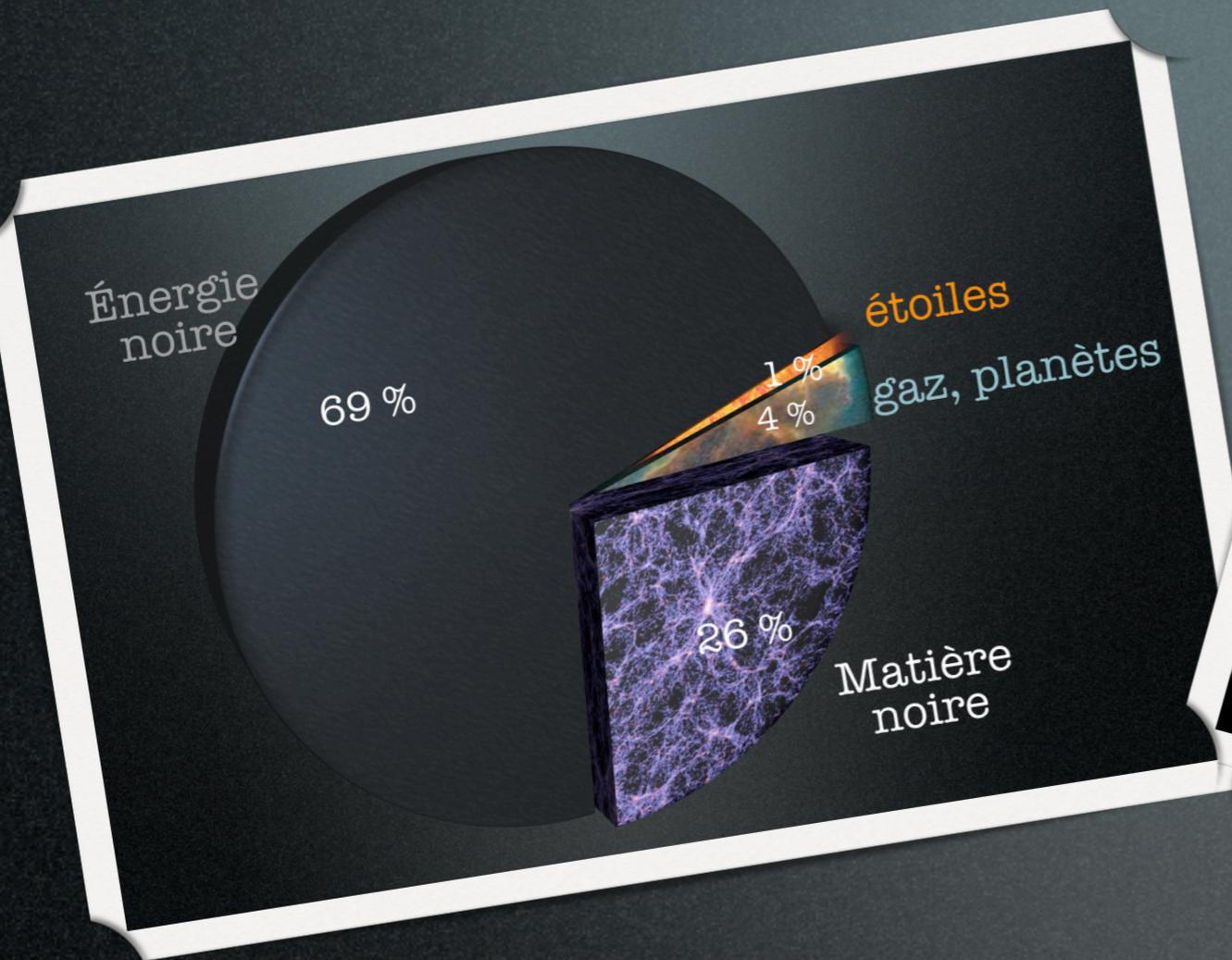
26 %

Matière
noire

Un halo de
particules
invisibles



De quoi est fait notre Univers ?



Activement recherchée !

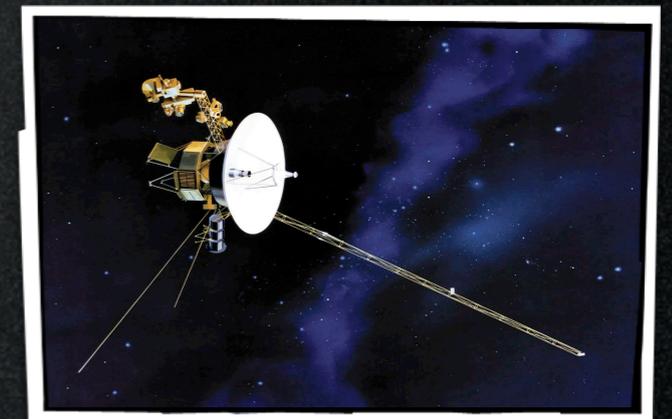
DAMA



Fermi



Voyager I

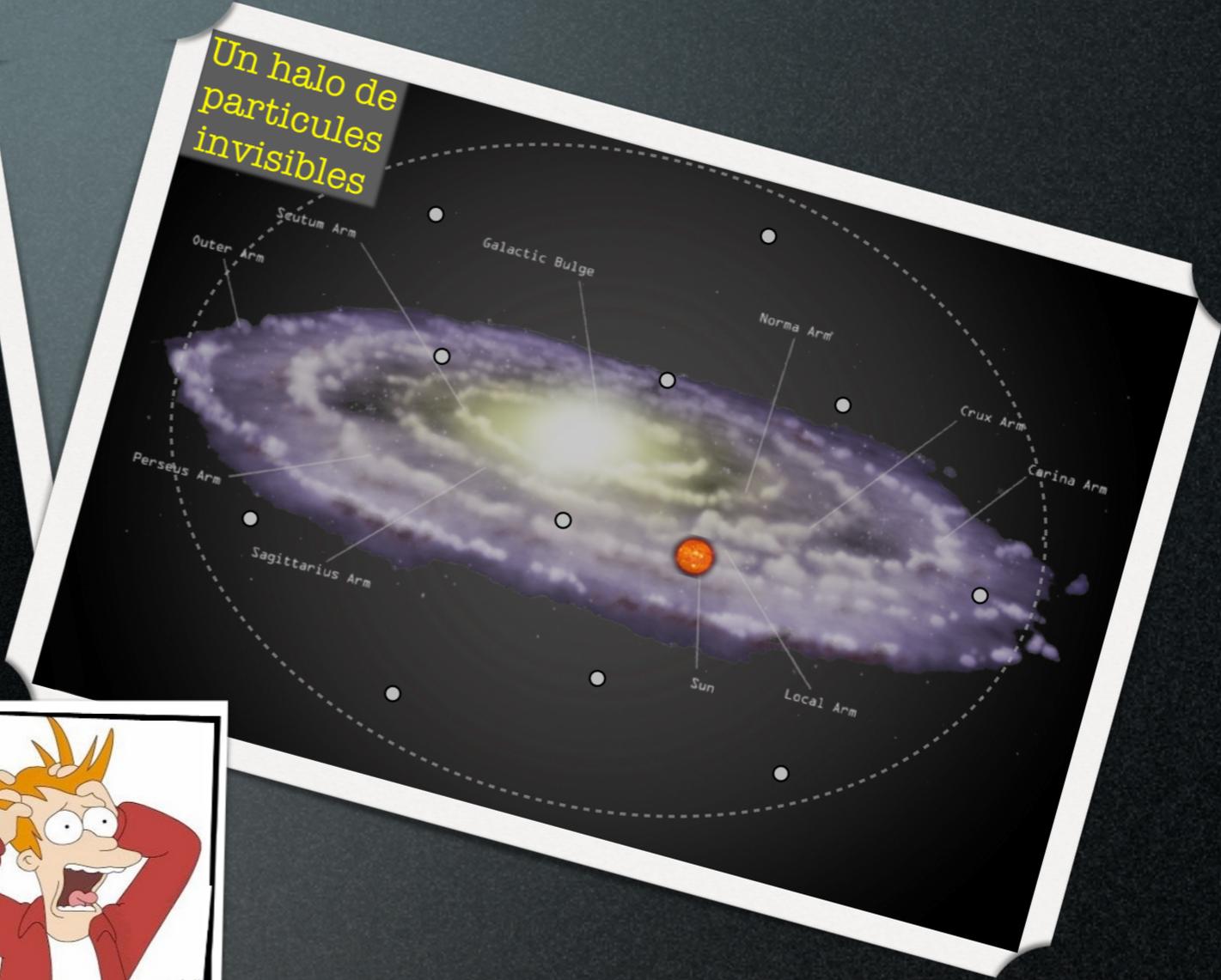
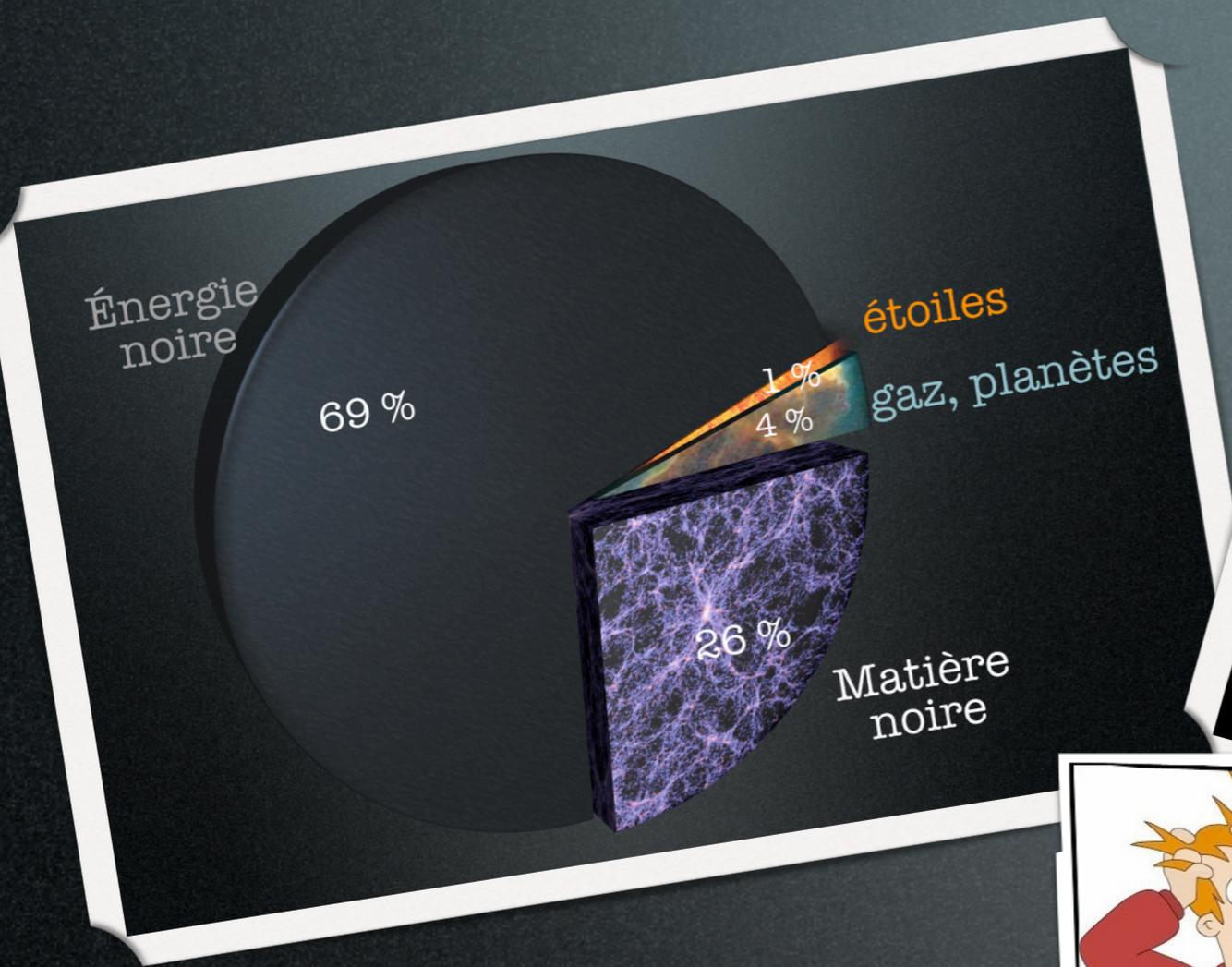


‘détection directe’

‘détection indirecte’

trous noirs

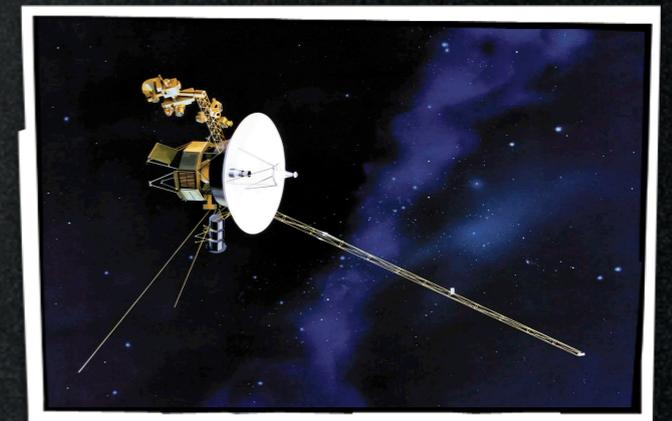
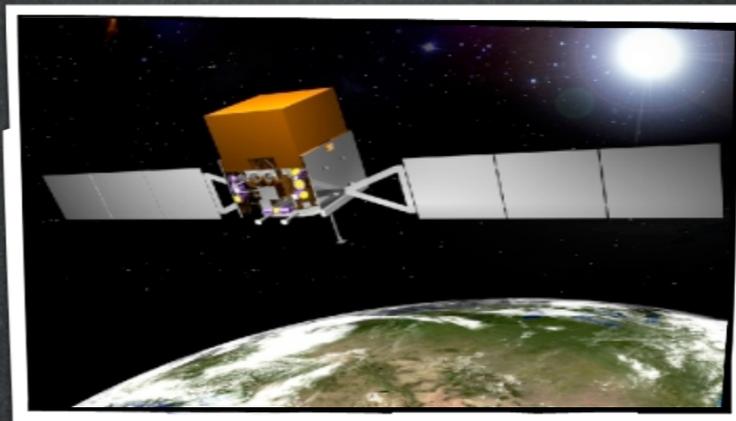
De quoi est fait notre Univers ?



DAMA

Fermi

Voyager I



‘détection directe’

‘détection indirecte’

trous noirs