

La matière cachée

4 octobre 2011. Marc Moniez. LAL/IN2P3/CNRS

Echelle de distances



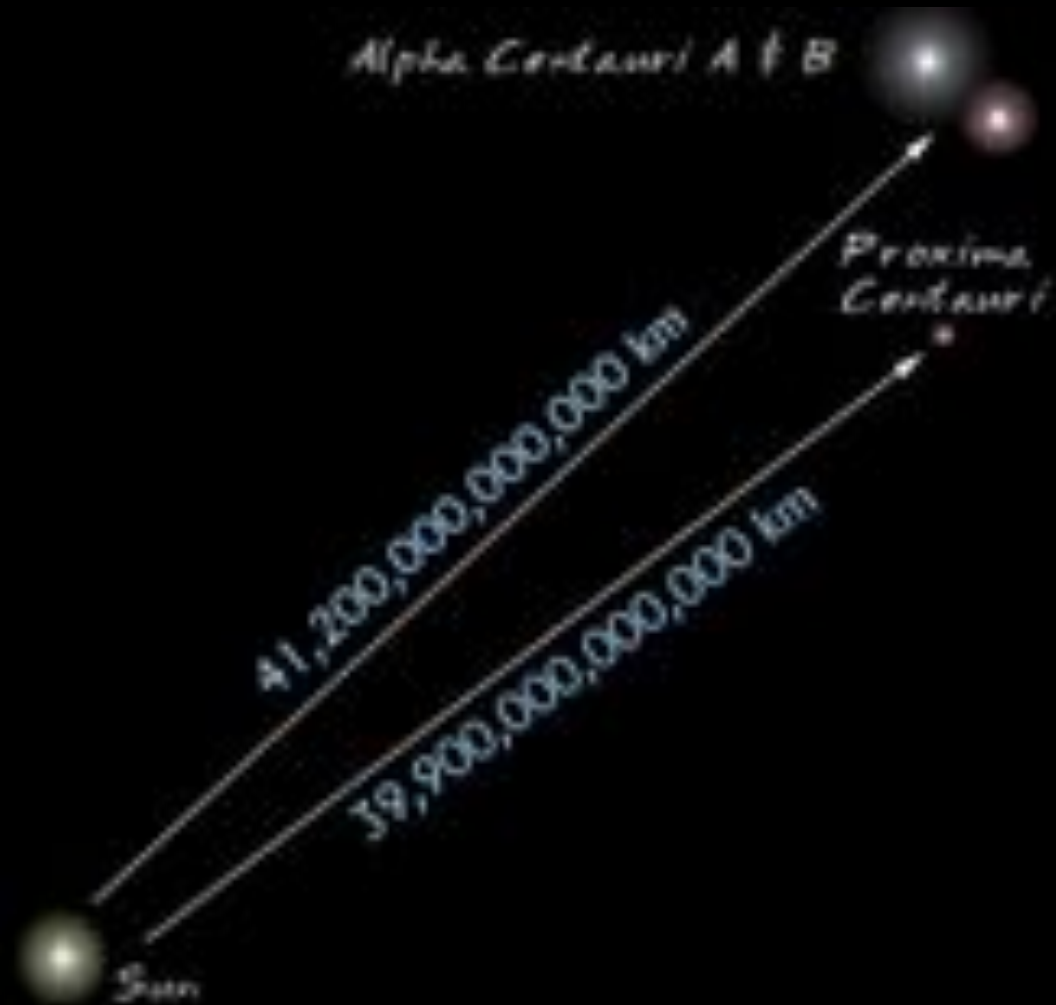
12,756 km

L'univers jusqu'à
10 milliards de km

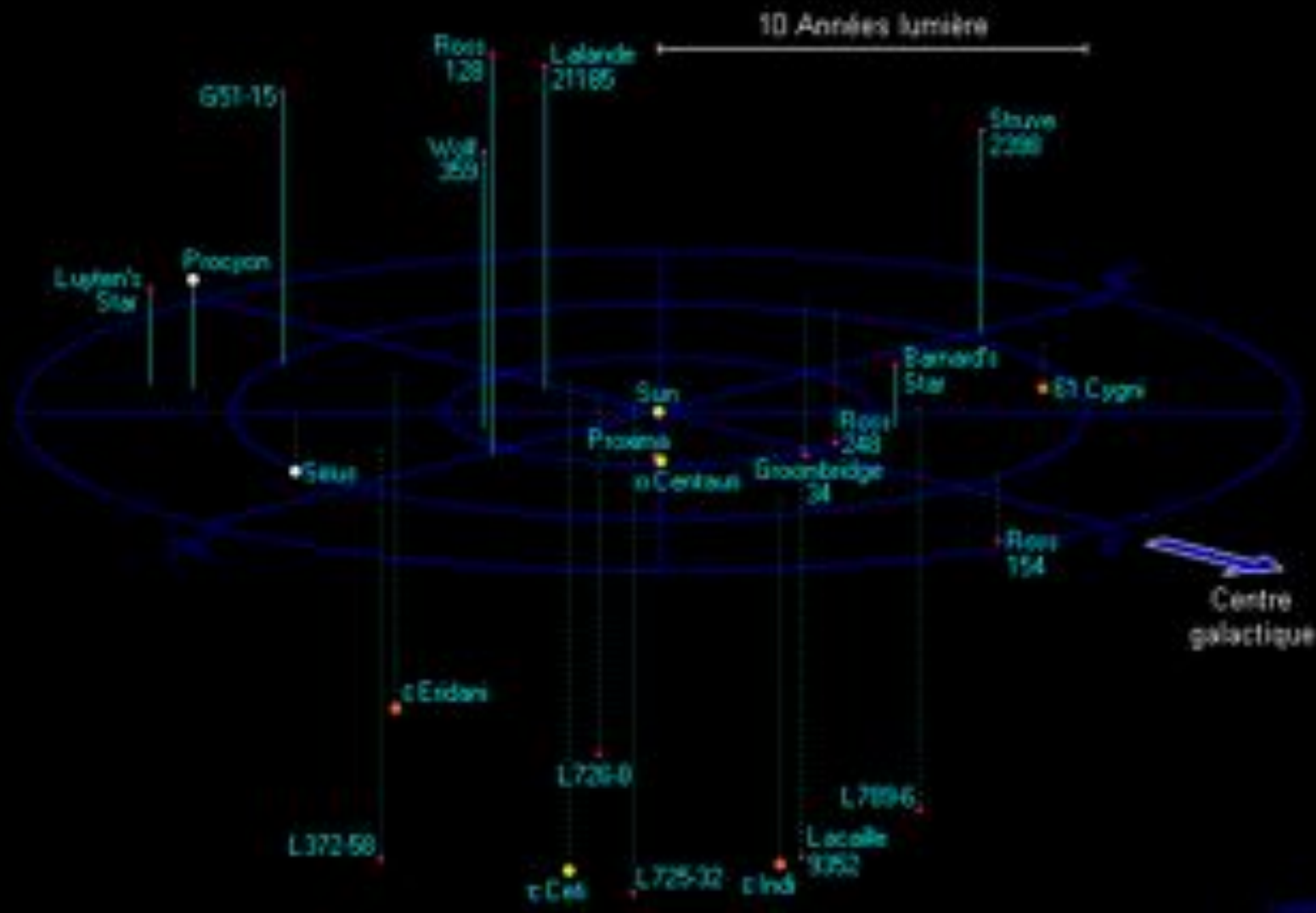
**Quelques
heures-lumière**



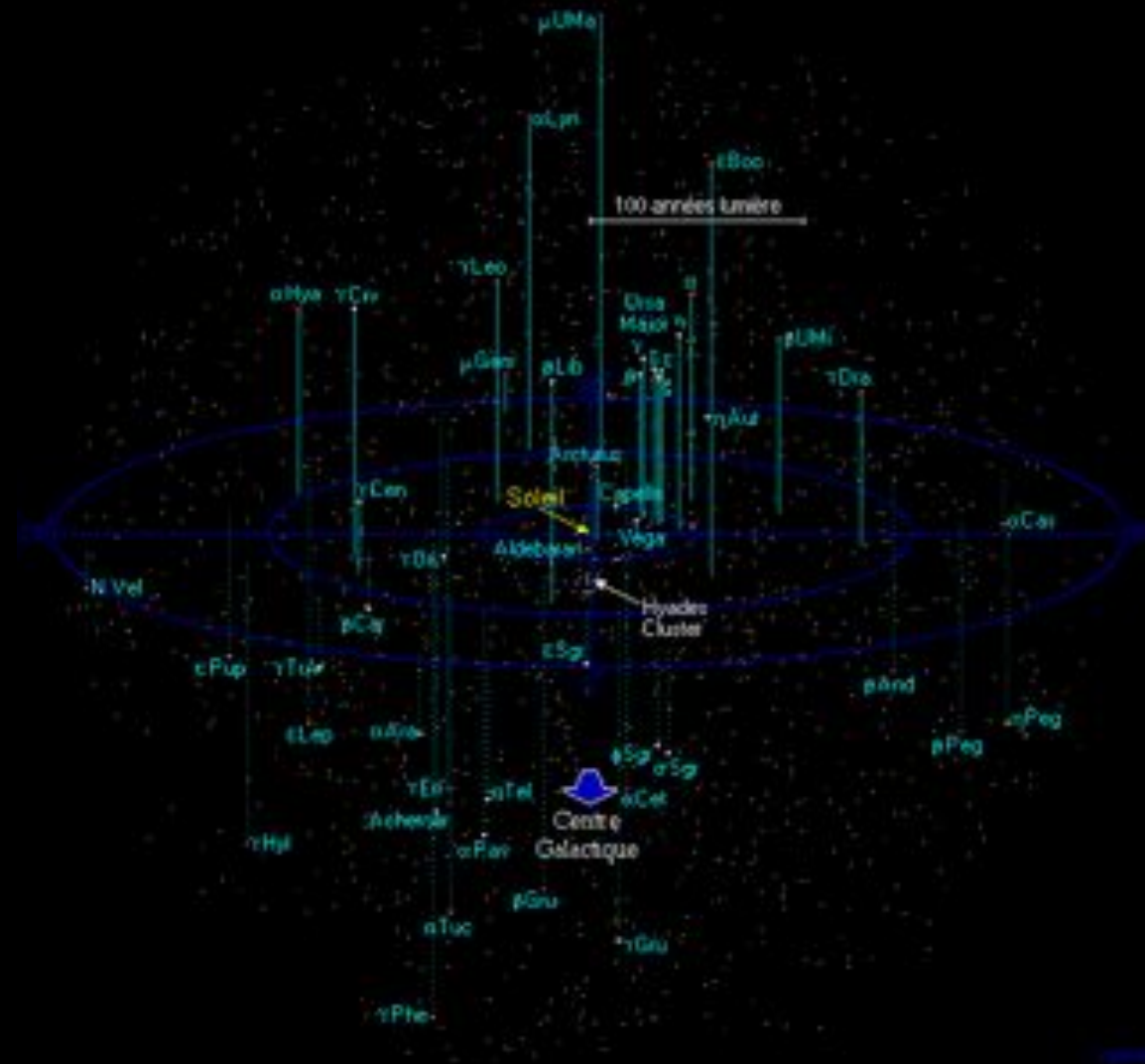
L'univers jusqu'à quelques Années lumière



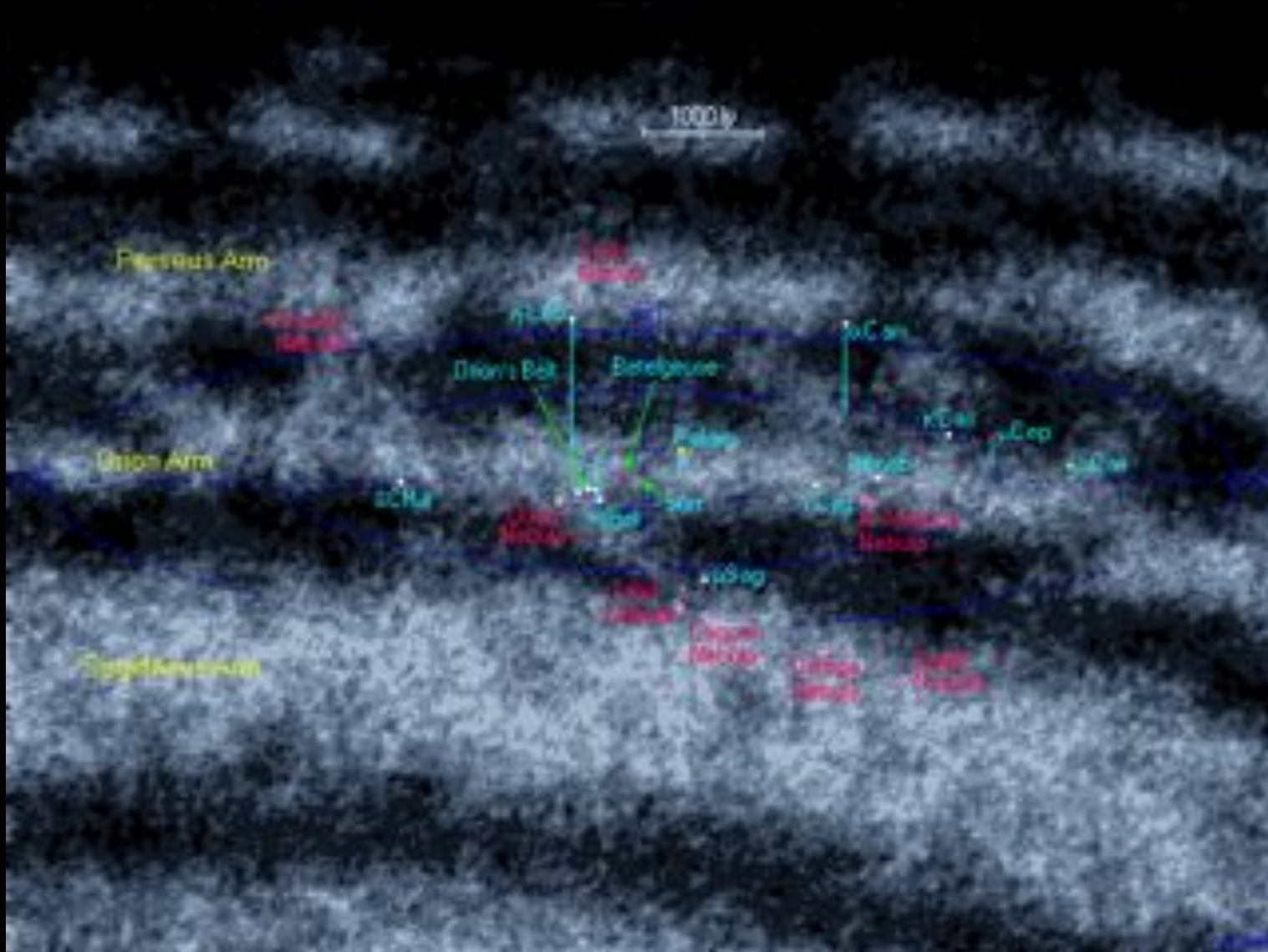
L'univers jusqu'à 10 Années lumière



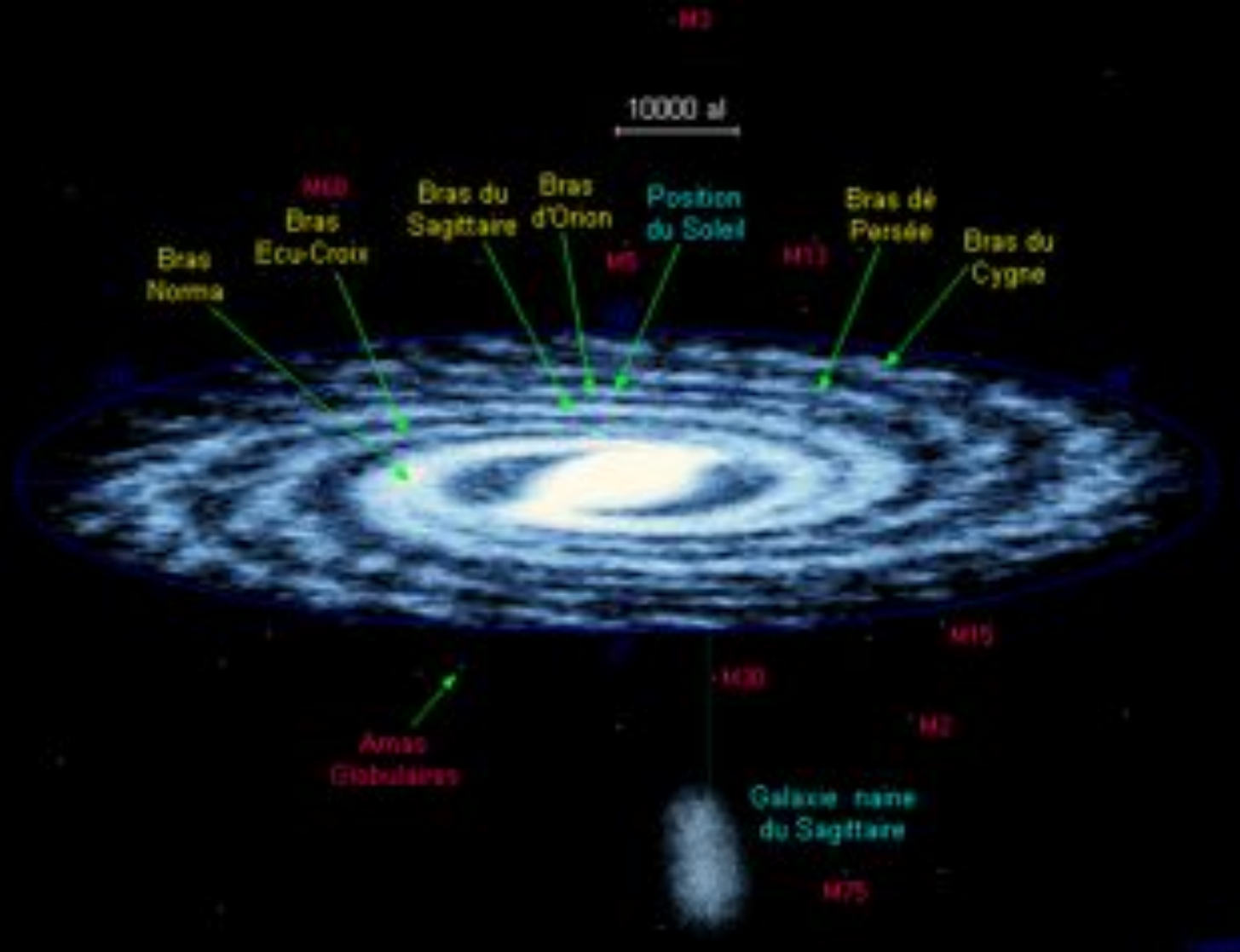
L'univers jusqu'à 250 Années lumière



L' Univers jusqu'à 5000 Années lumière



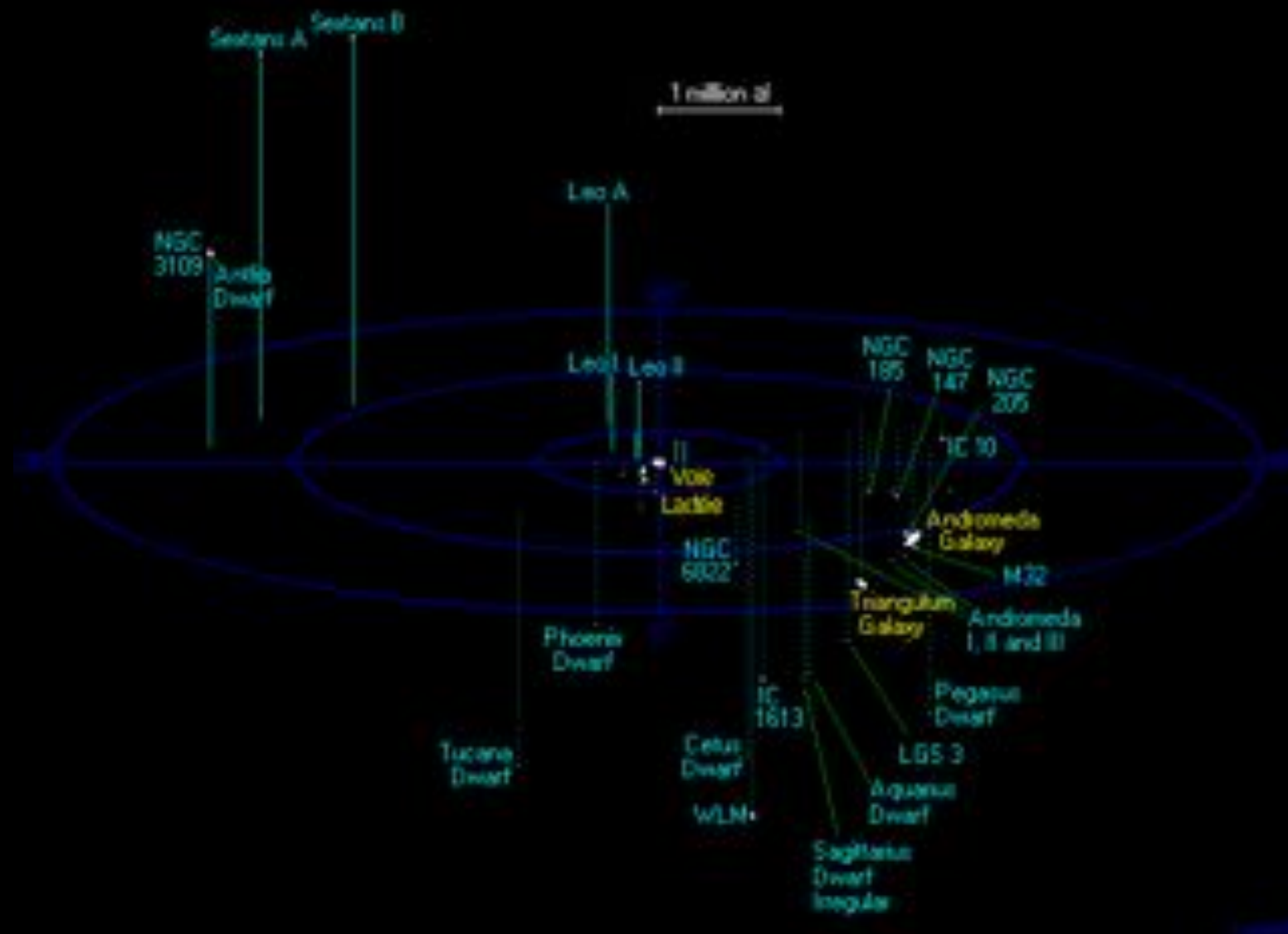
L'Univers jusqu'à 50000 Années lumière



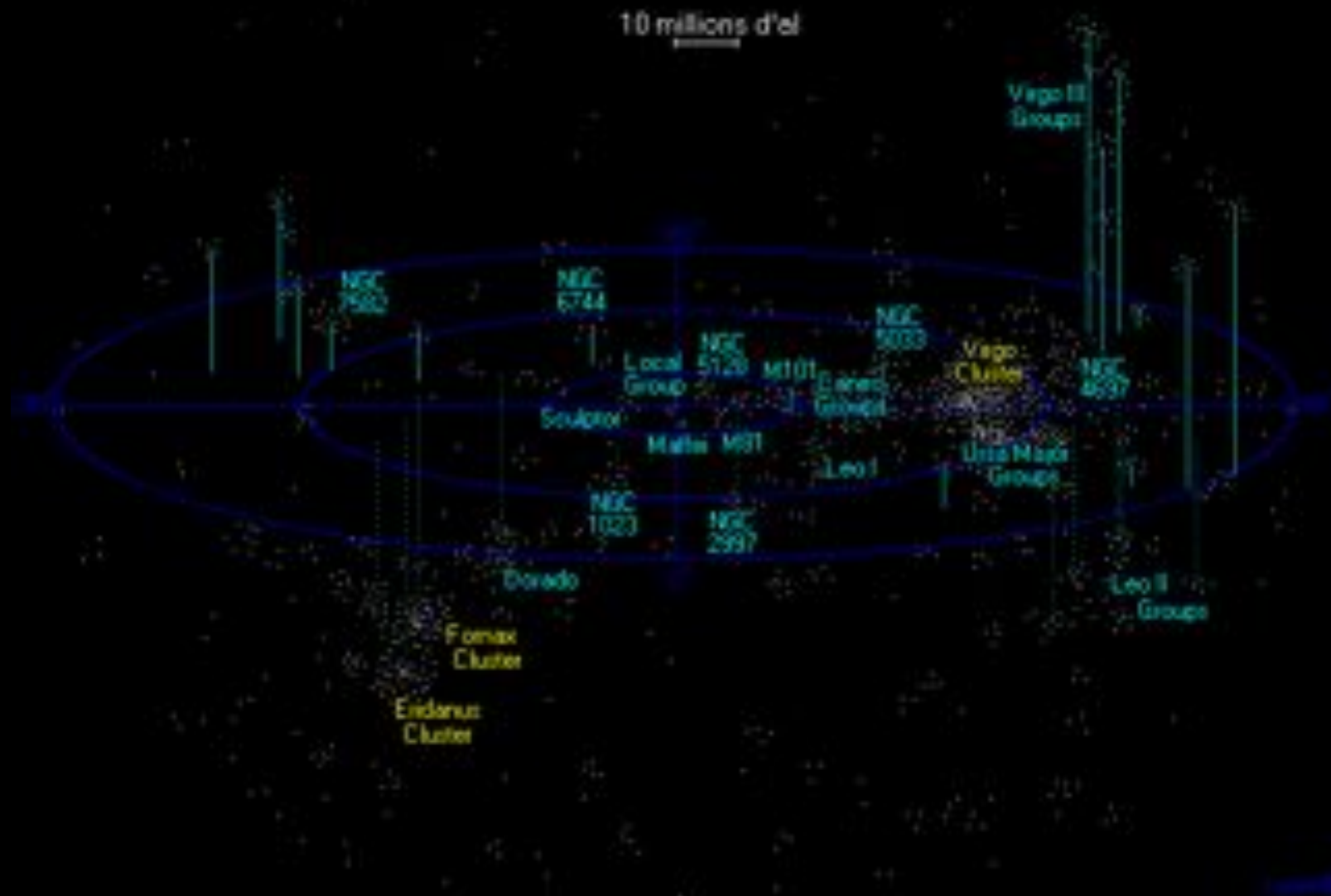
L'univers jusqu'à 500 000 Années Lumière



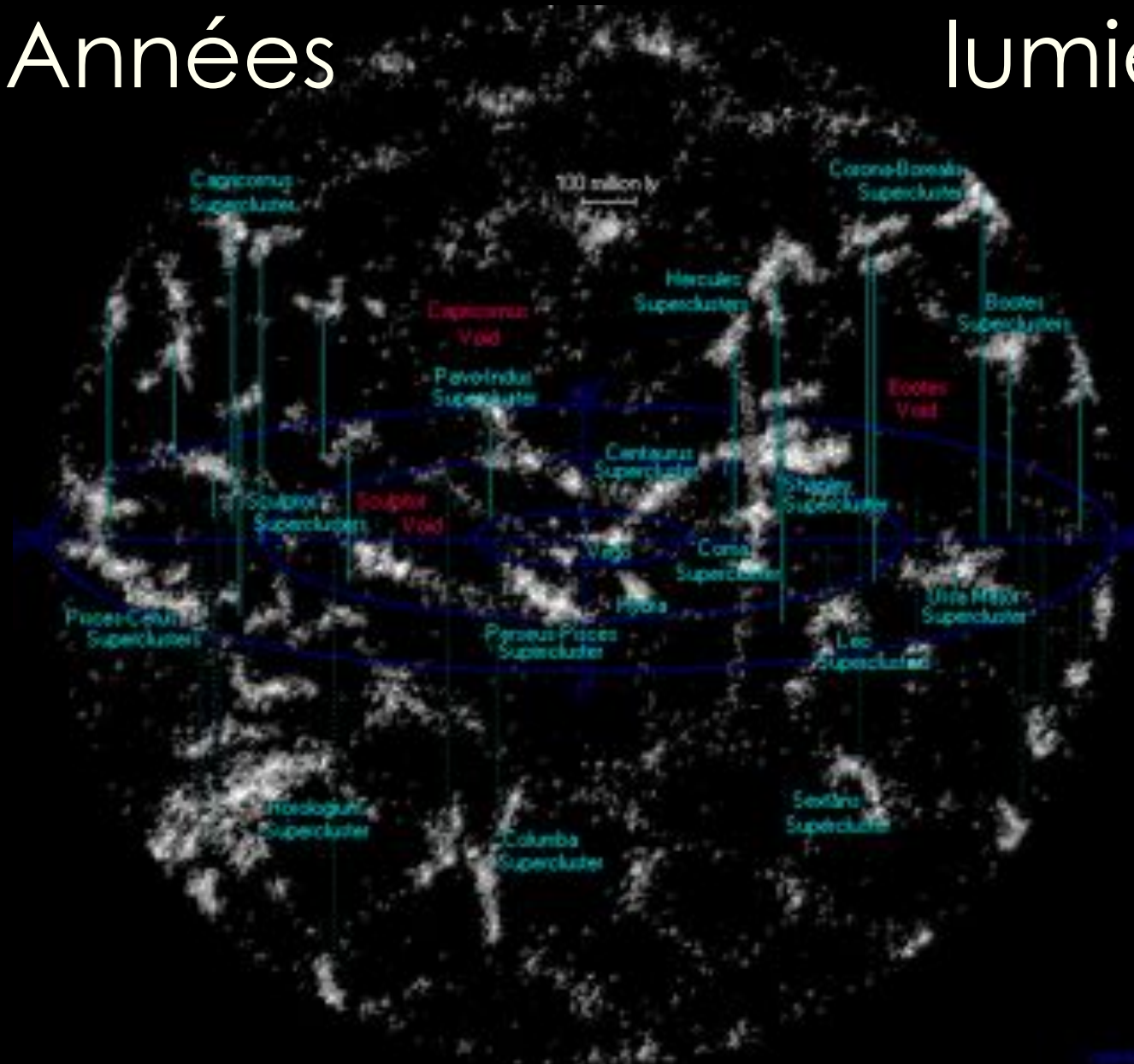
L'univers à moins de 5 millions d'Années lumière



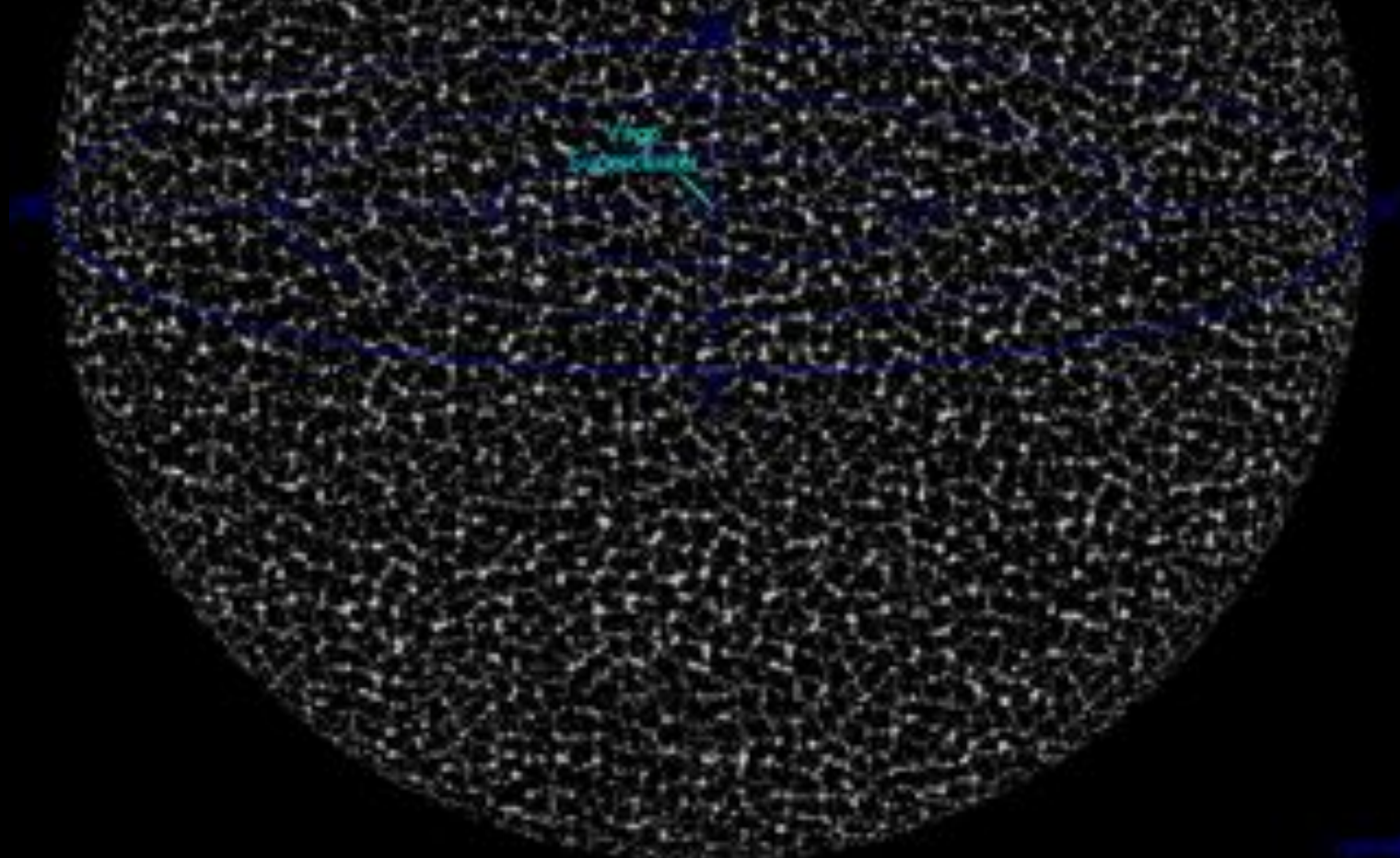
L'univers jusqu'à 100 millions d'Années lumière



L'univers jusqu'à 1 milliard d'Années lumière



L'univers jusqu'à 14 milliards
d'Années lumière



La plus lointaine galaxie détectée

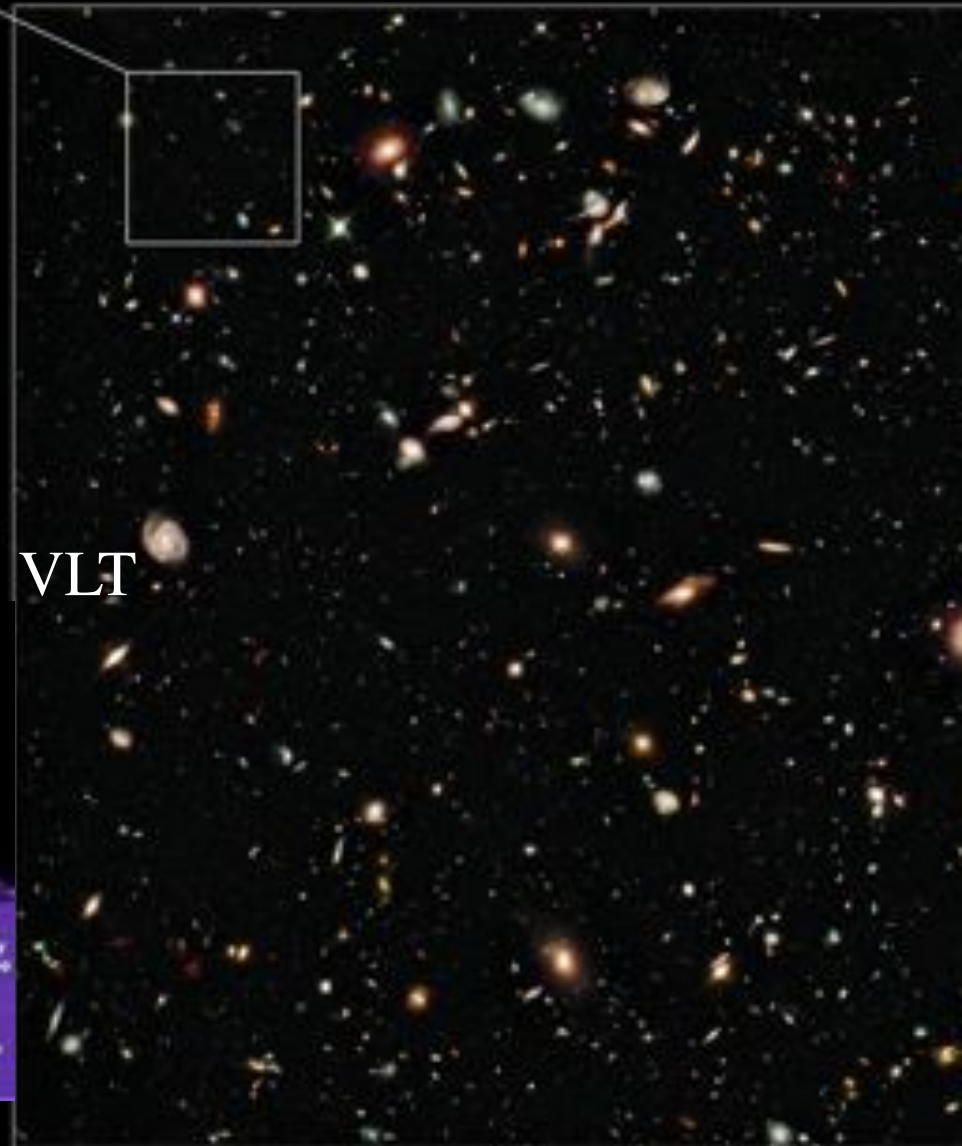
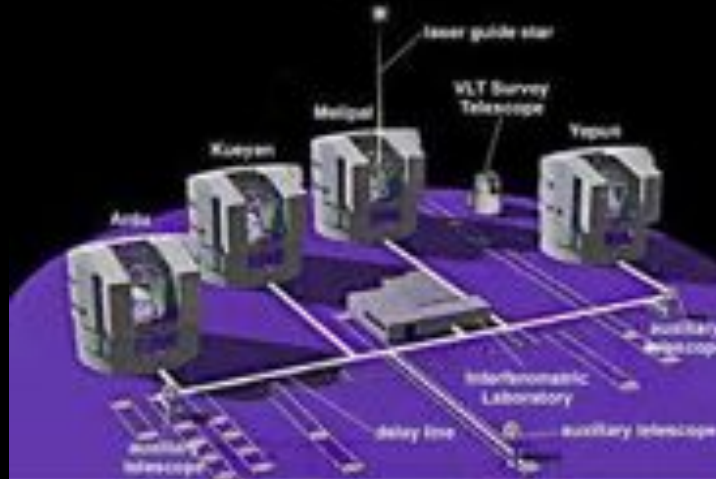
$z=8,6$

$D=10^{10}$ A.L

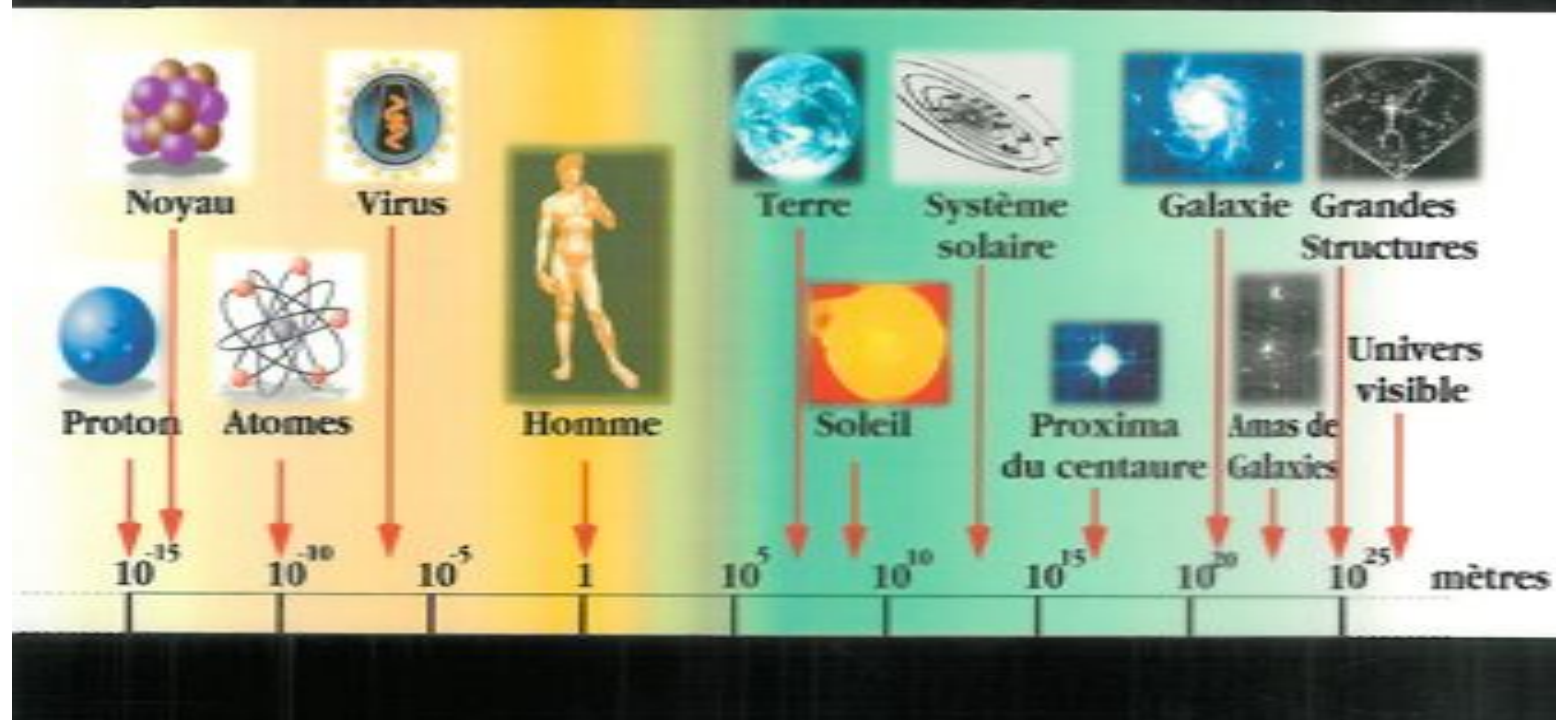
L'univers n'a
que 600 millions
d'années



Image: Hubble / Spectre: VLT

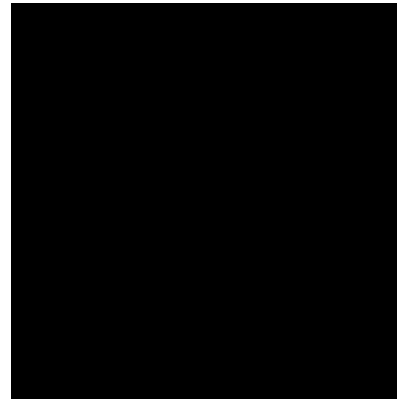


échelle de distances

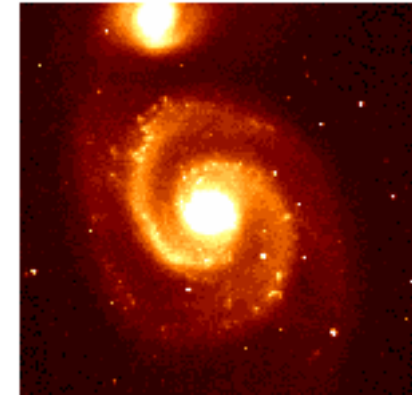


Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



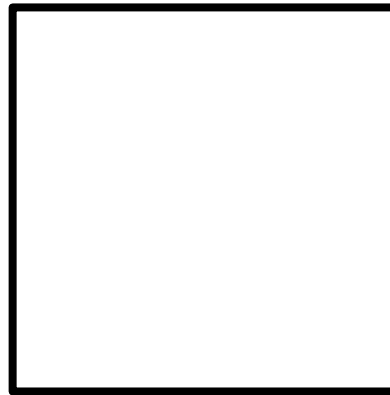
Matière sombre...



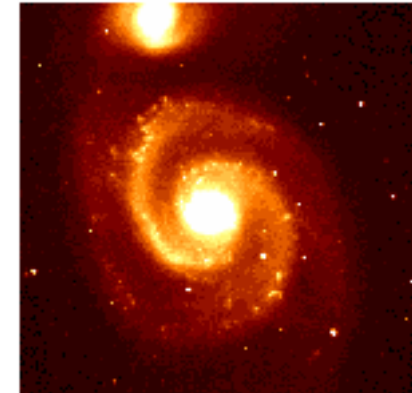
Matière
pas sombre...
Seulement 1% !

Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



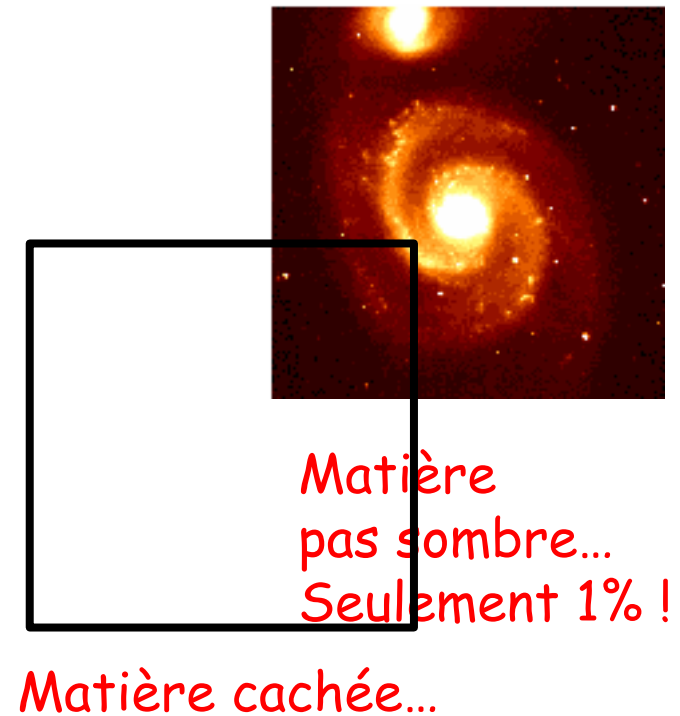
Matière cachée...



Matière
pas sombre...
Seulement 1% !

Matière cachée, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



Comment peser un tas d'oranges?

- 1^{ère} méthode : « au jugé »

⇒ **Nombre d'oranges**

X

masse moyenne d'un orange

- 2^{ème} méthode: à la balance

⇒ Mesure de la **force qui**
s'exerce entre le tas et la Terre



Variante: comment peser une Galaxie ?



- 1^{ère} méthode : « au jugé »

⇒ **Nombre d'étoiles (10^9 à 10^{12}) x**
masse moyenne d'une étoile

+ GAZ + POUSSIÈRES

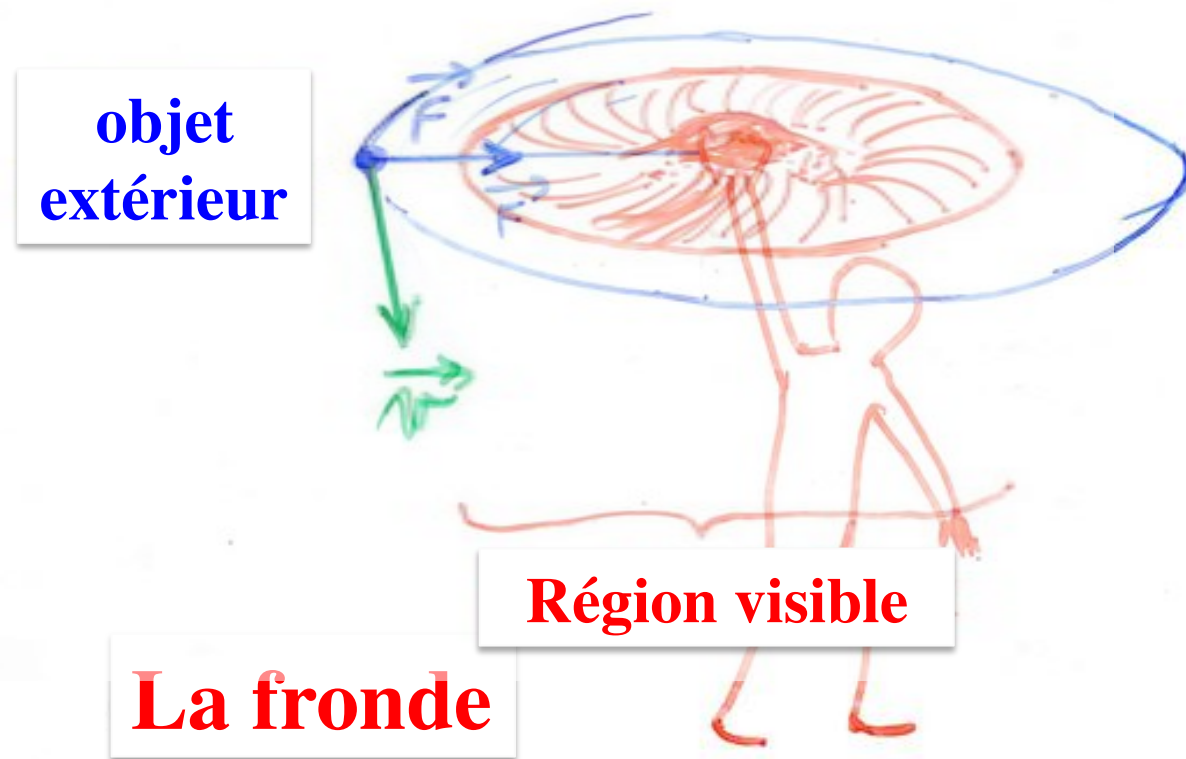
Etude de la
lumière émise

Etude de la lumière
émise ou absorbée

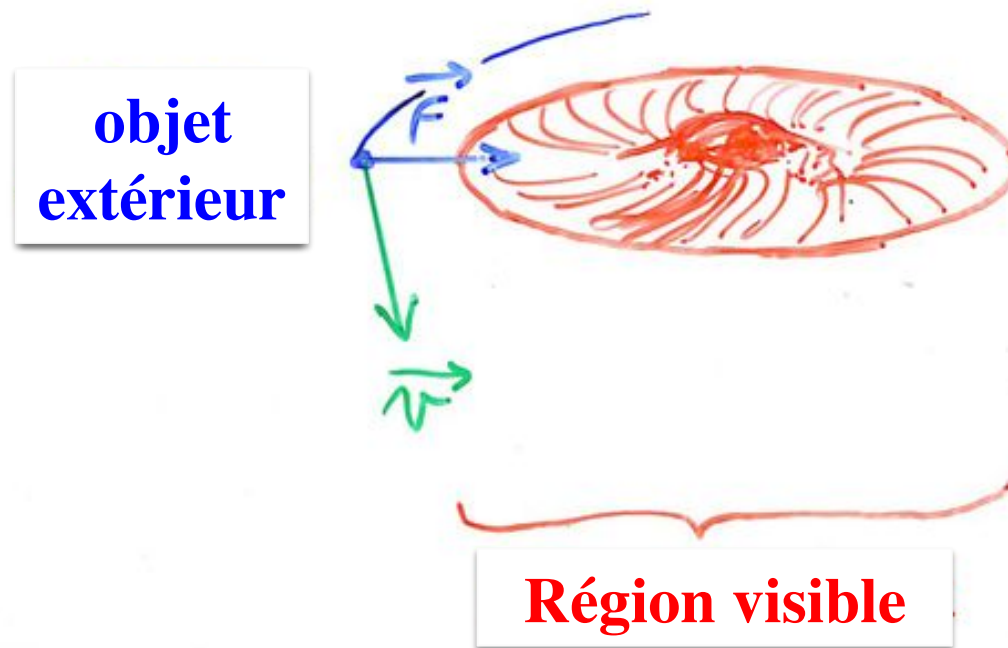
- 2^{ème} méthode: à la balance

⇒ Mesure des **forces de gravitation qui**
s'exercent entre la galaxie et des objets
extérieurs

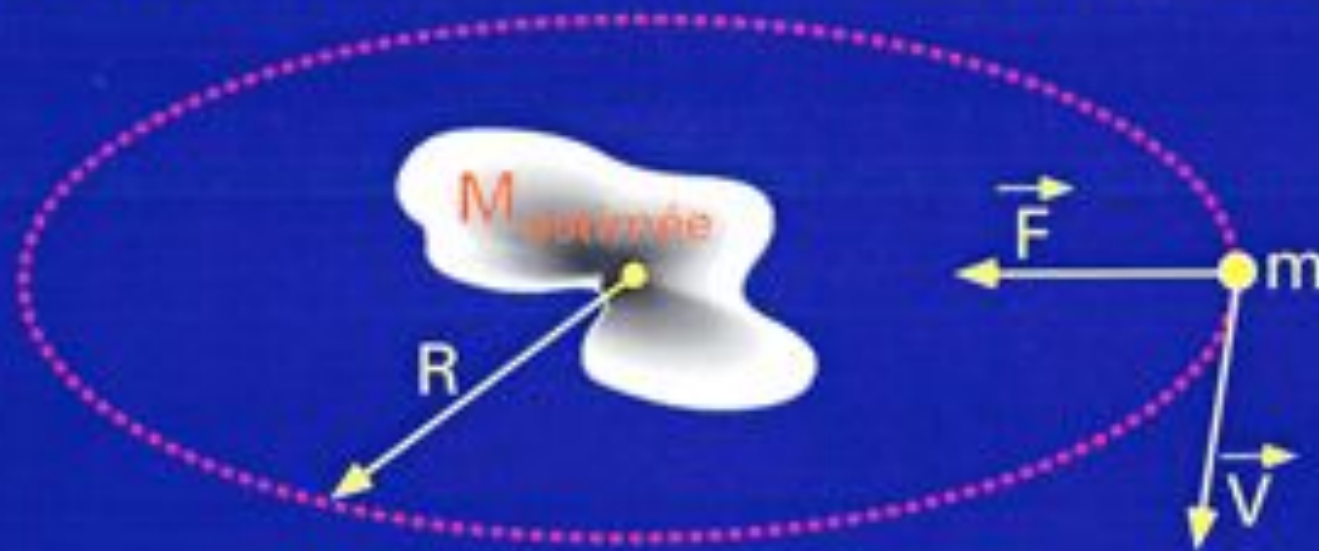
Comment estimer ces forces de gravitation?



Comment estimer ces forces de gravitation?

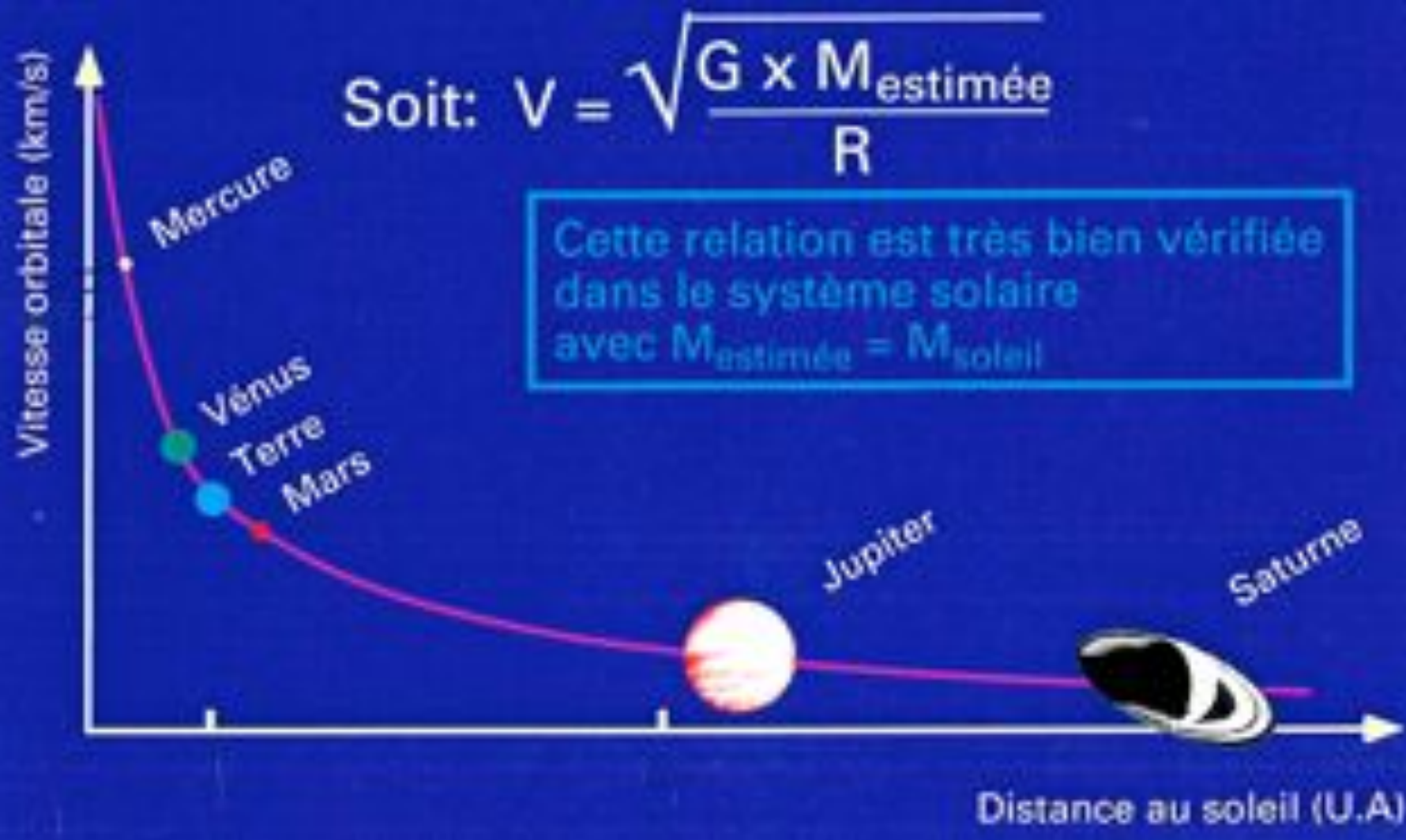


MESURE DYNAMIQUE D'UNE MASSE

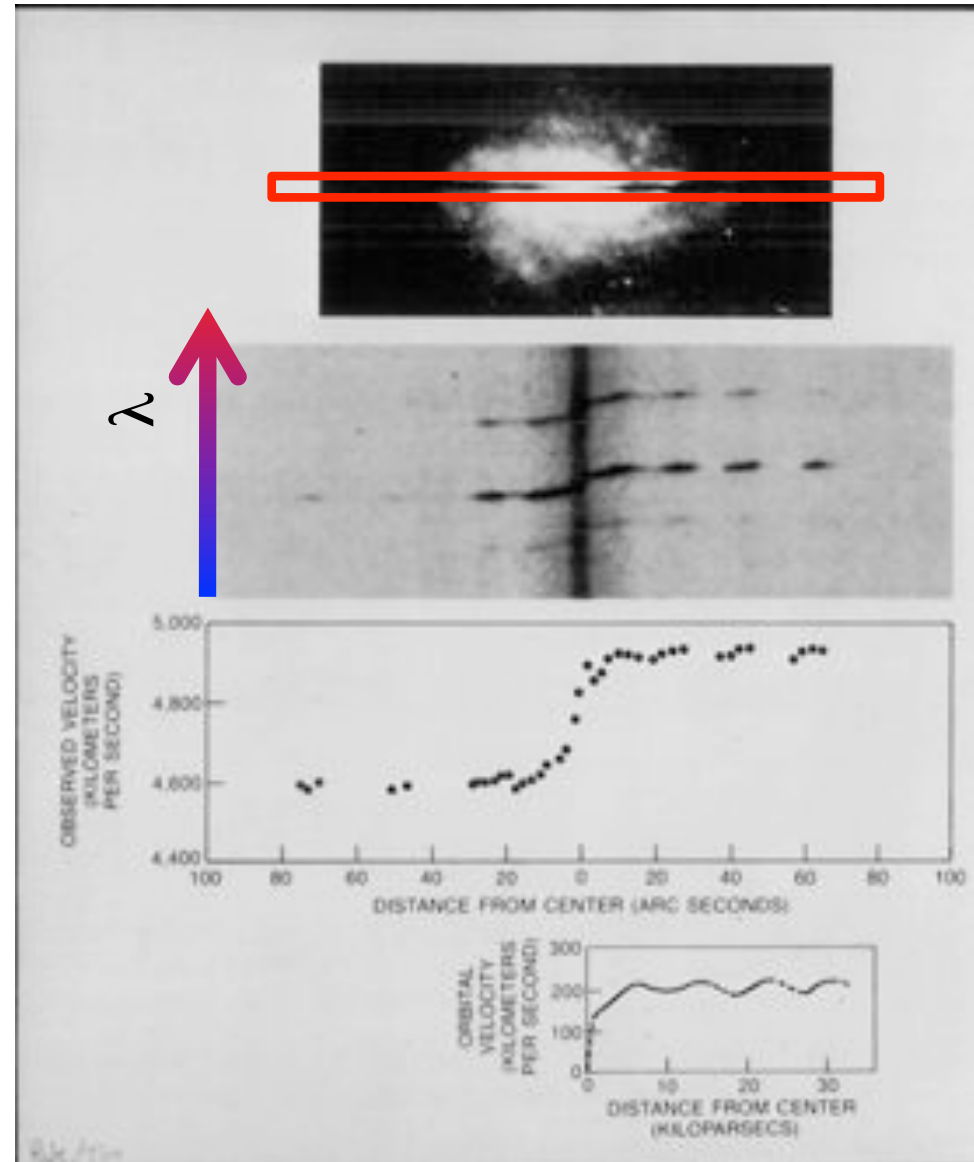
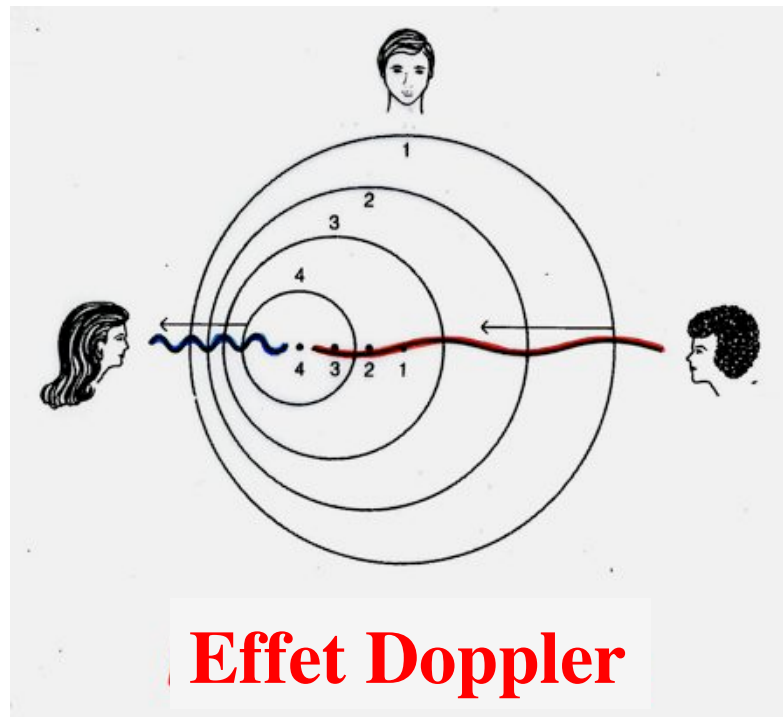


Pour que m soit en rotation uniforme autour de l'objet $M_{\text{estimée}}$ il faut:

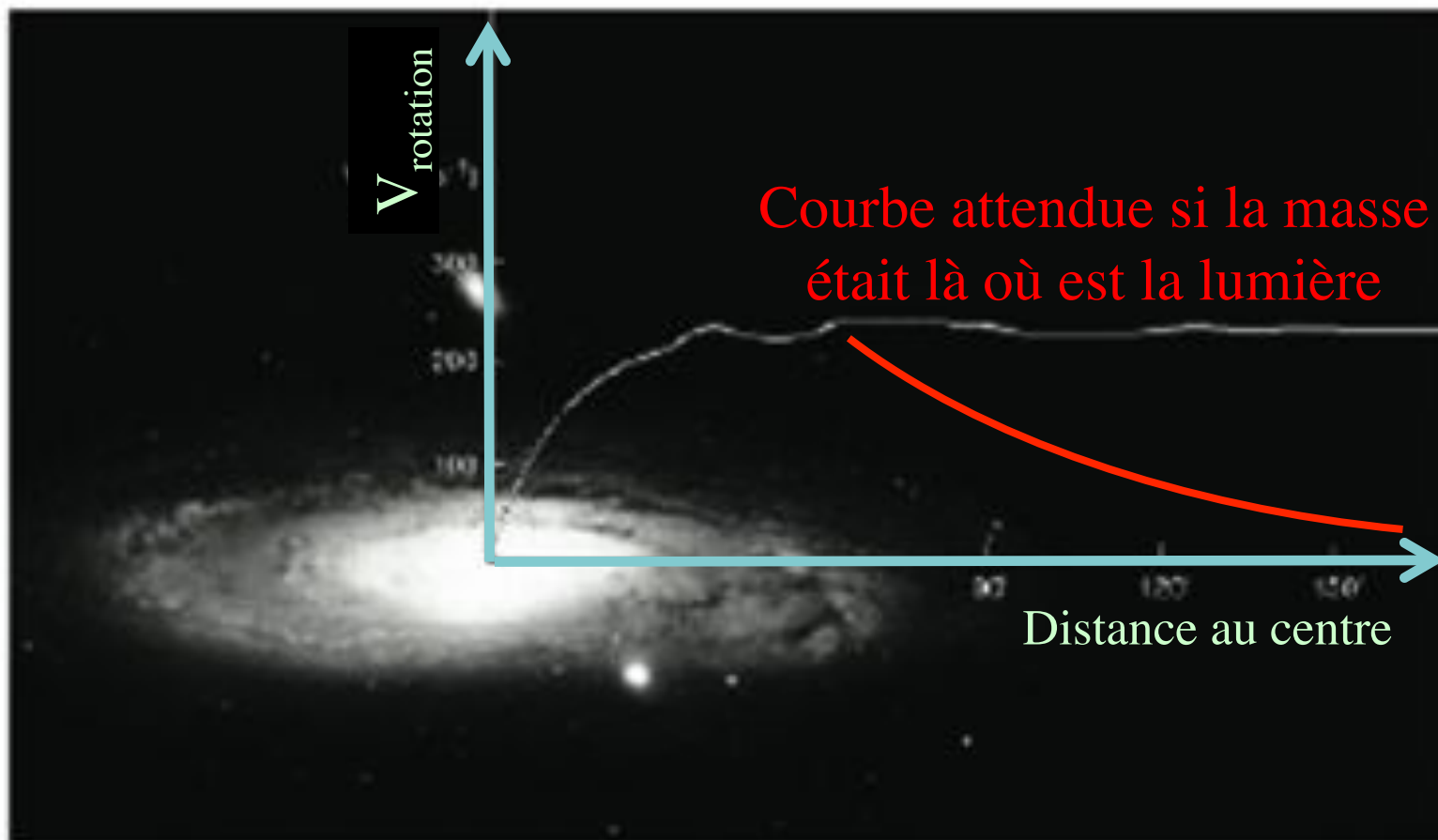
$$F_{\text{Gravitation}} = G \times \frac{M_{\text{estimée}} \times m}{R^2} = F_{\text{Centripète}} = m \times \frac{v^2}{R}$$



Mesure de la vitesse orbitale des étoiles ou du gaz externes



Courbe de rotation de la galaxie d'Andromède



**L'estimation visuelle (10kg) et la
balance (100kg) sont en désaccord**

Qu'y a-t-il dans le cageot ?



Qu'y a-t-il dans le cageot ?

Jargon d'astronome

- Fonction de masse initiale?
- Des trous noirs à la place des étoiles?
- Quelque chose qu'on ne voit pas entre les étoiles?

Traduction en langage de tout le monde

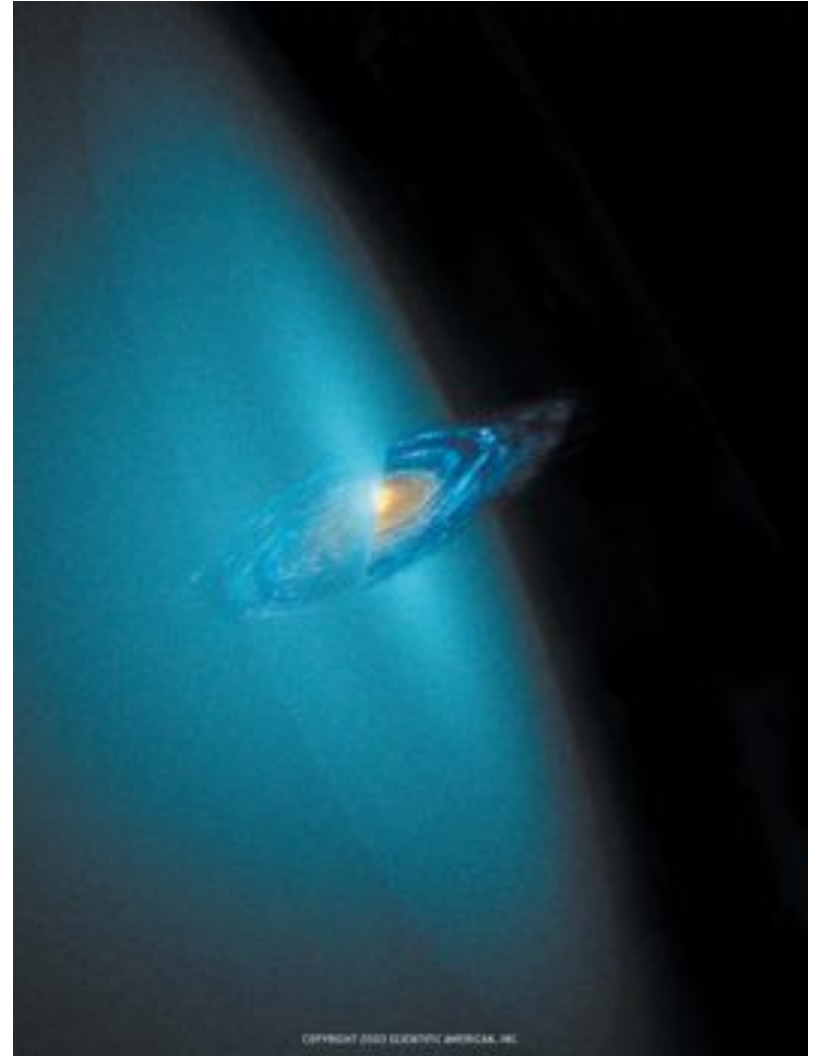
- Erreur de comptage?
- Des boulets de canon peints en orange?
- Quelque chose qu'on ne voit pas entre les oranges?

Matière cachée galactique

Elle pourrait s'étendre sur un rayon 5 fois supérieur au rayon observable de la galaxie.

Mais de quoi est-elle constituée :

- gaz ?
- étoiles sombres ?
- particules exotiques ?



Une autre indication de l'existence de matière cachée:

Déflexion de la lumière émise par des galaxies lointaines



Le contenu de l'Univers

- *Ordres de grandeur* : En moyenne, l'univers est bien plus vide que le plus poussé des vides de laboratoire
=> sa densité moyenne (matière cachée comprise) équivaut à celle de **6 atomes/m³** (10^{-29} g/cm³)
- *Contenu visible* : étoiles, gaz, poussières
 - Surtout H, He
 - Tout le reste représente une fraction négligeable

Auguste Comte affirmait en 1835 que l'on ne pourrait jamais connaître la composition des étoiles.

2 ans après sa mort, en 1859, l'analyse spectrale est inventée, suite aux travaux de **Fraunhofer**, qui a identifié les raies caractéristiques des éléments dans le soleil avec un spectroscope dès 1814.

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

Métaux

Semi-conducteurs

Non-métaux

Gaz nobles

Lanthanides et actinides

Li : Solide à 25°C, sous 1 bar

He : Gaz à 25°C, sous 1 bar

Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar

Tc : Obtenus par synthèse

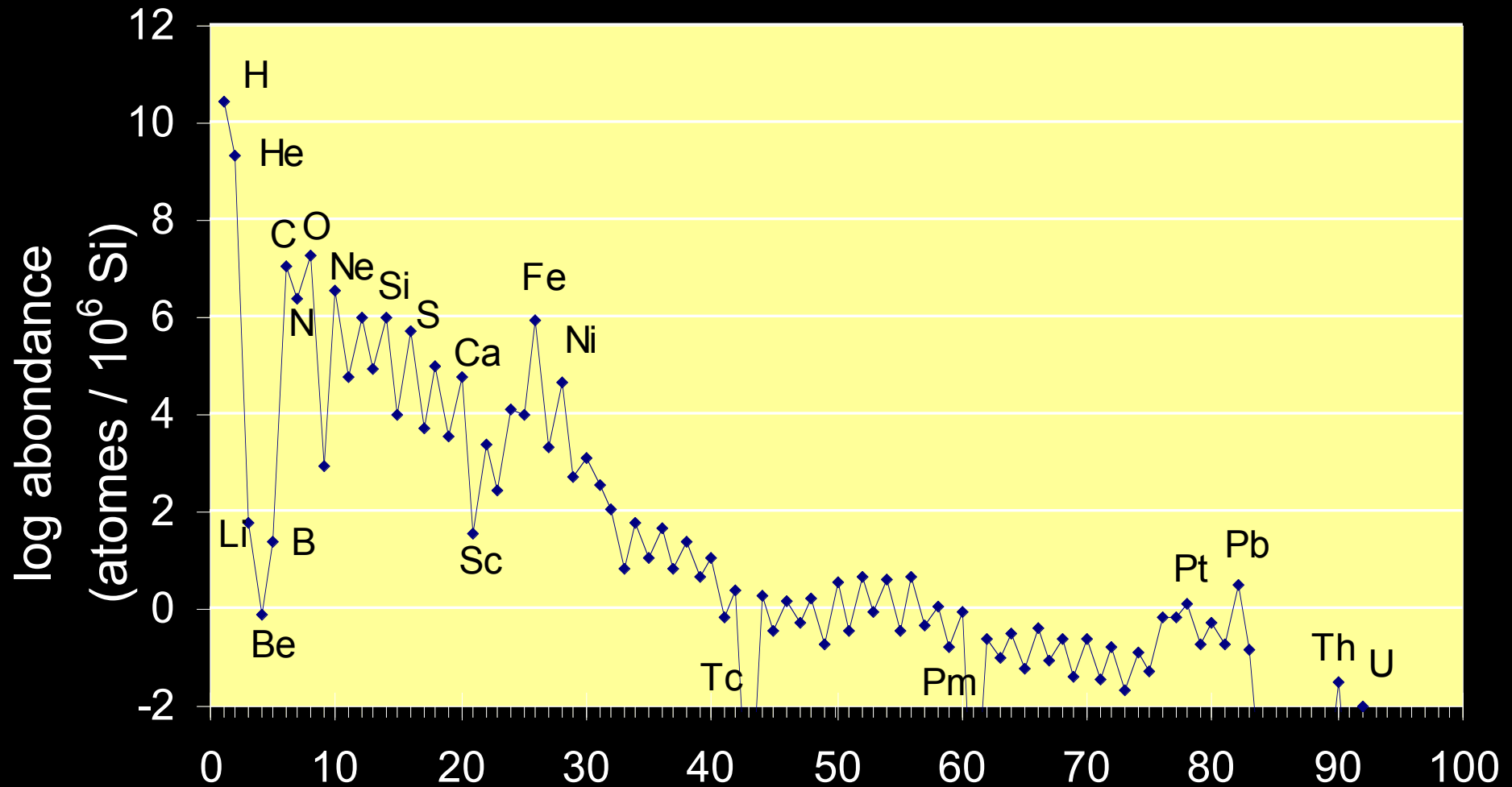
																		Te : Obtenu par synthèse										VIII	
																												He	
																												Ne	
																												Ar	
																												Kr	
																												Xe	
																												Rn	
</																													

Série des Lanthanides

Série des Actinides

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102

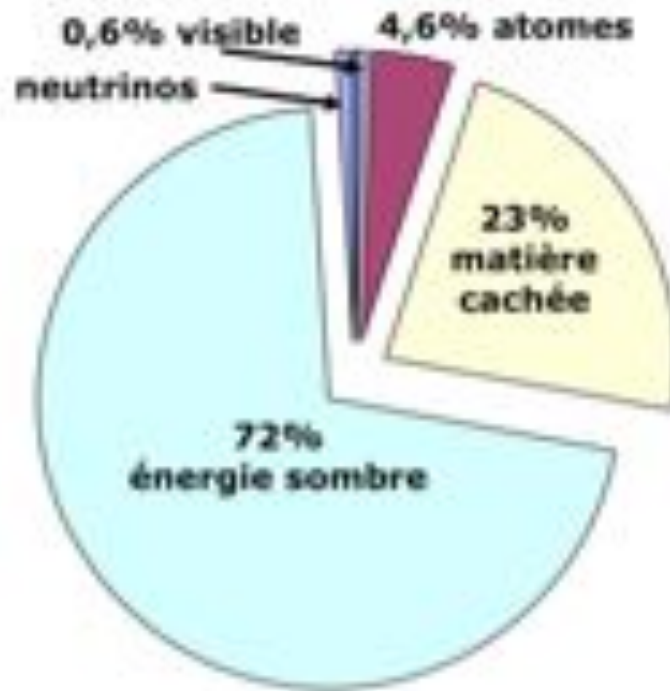
L'abondance cosmique des éléments



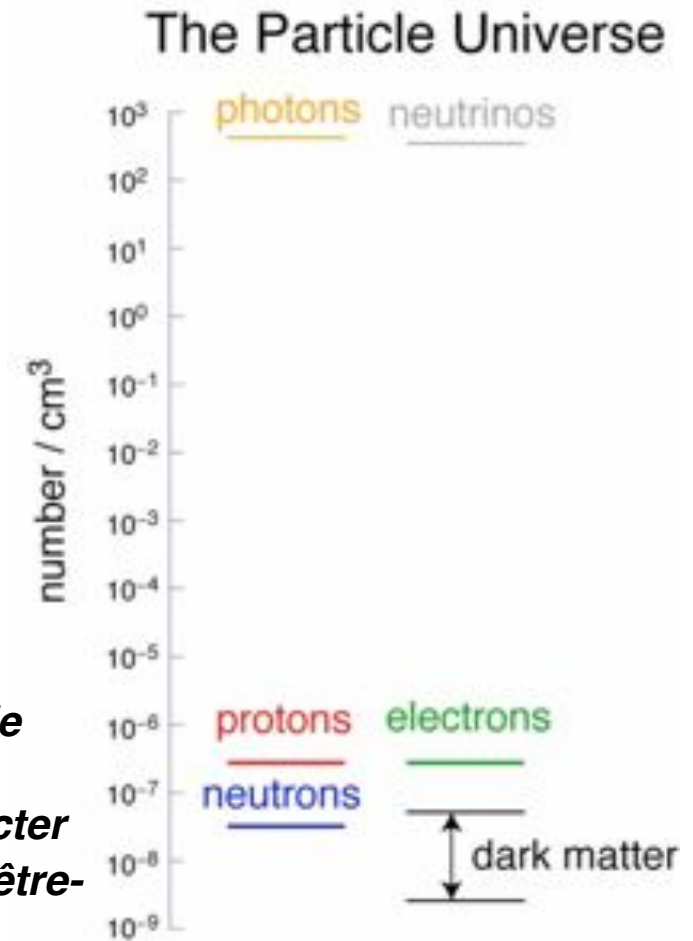
Les abondances des éléments légers sont calculables avec le modèle du Big-Bang

- H, He, Li, Be sont primordiaux car produits lors du Big-Bang : **nucléosynthèse primordiale**
- Après la formation de ces éléments légers, l'univers était trop grand pour que les autres éléments se forment. Ils ont donc été et sont toujours synthétisés dans les étoiles et les supernovae : **nucléosynthèse stellaire**
- Les mesures indiquent qu'il y a environ 8 fois plus de matière ordinaire (atomes) que ce qui est visible

Mais les atomes ne représentent que 4,6% du contenu de l'Univers



- ✓ *L'univers renferme aussi de l'énergie sous forme de lumière*
- ✓ *Il contient aussi des neutrinos très difficiles à détecter*
- ✓ *Et surtout une forme de matière inconnue et -peut-être- une énergie qui remplit le vide, « l'énergie noire »*



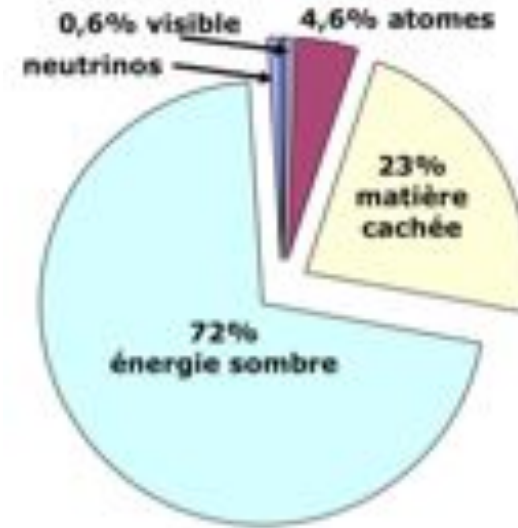
Où se cachent les atomes invisibles?

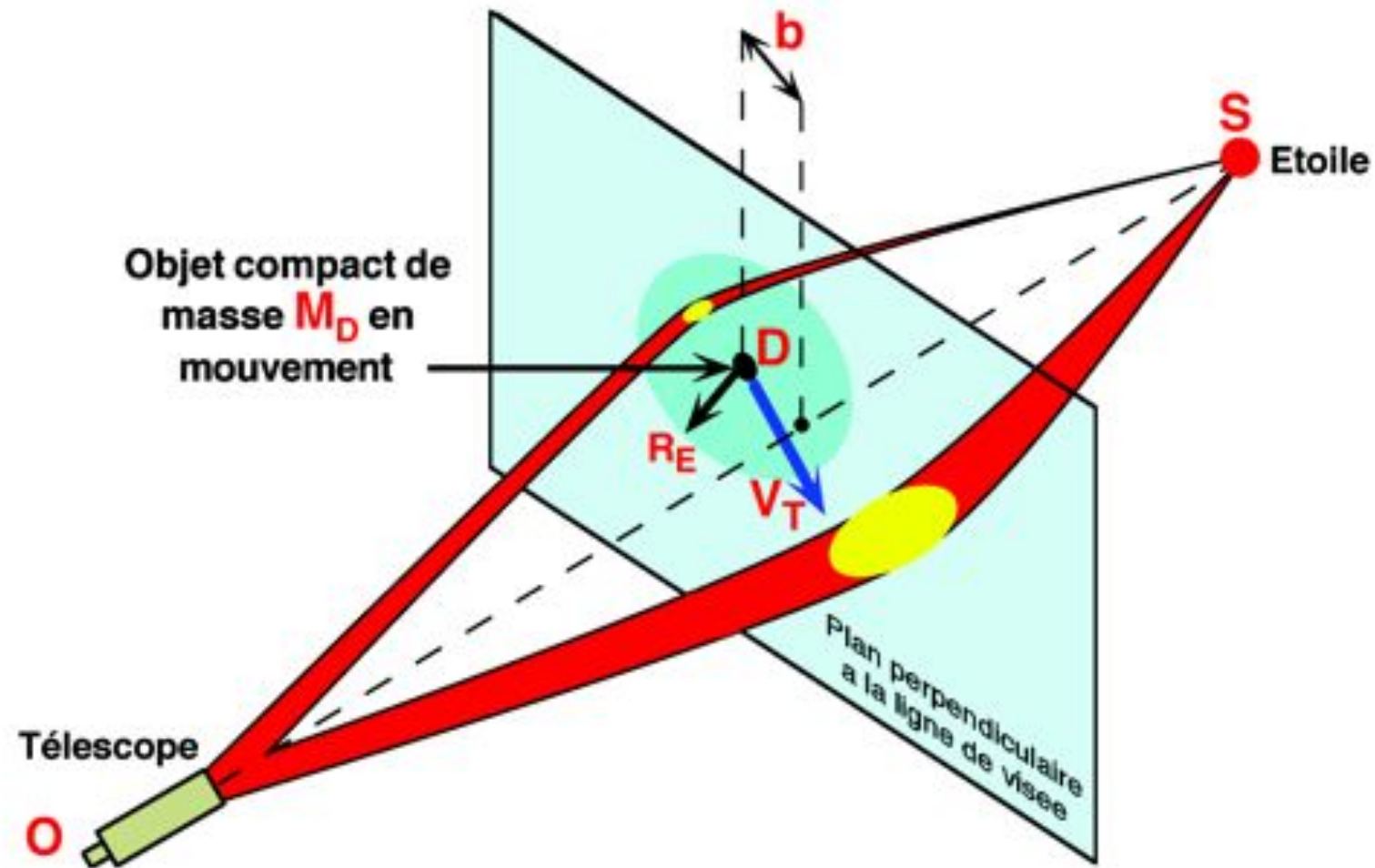
1- De 0,6% à 4,6%

- Objets compacts?

- Étoiles « manquées » de 10^{-7} à 10^{-1} Masse solaire

==> Recherche les effets de microlentilles gravitationnelles





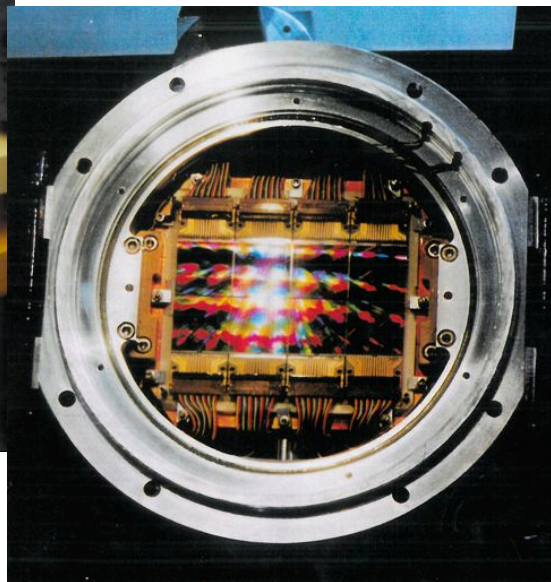
L'EFFET DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE

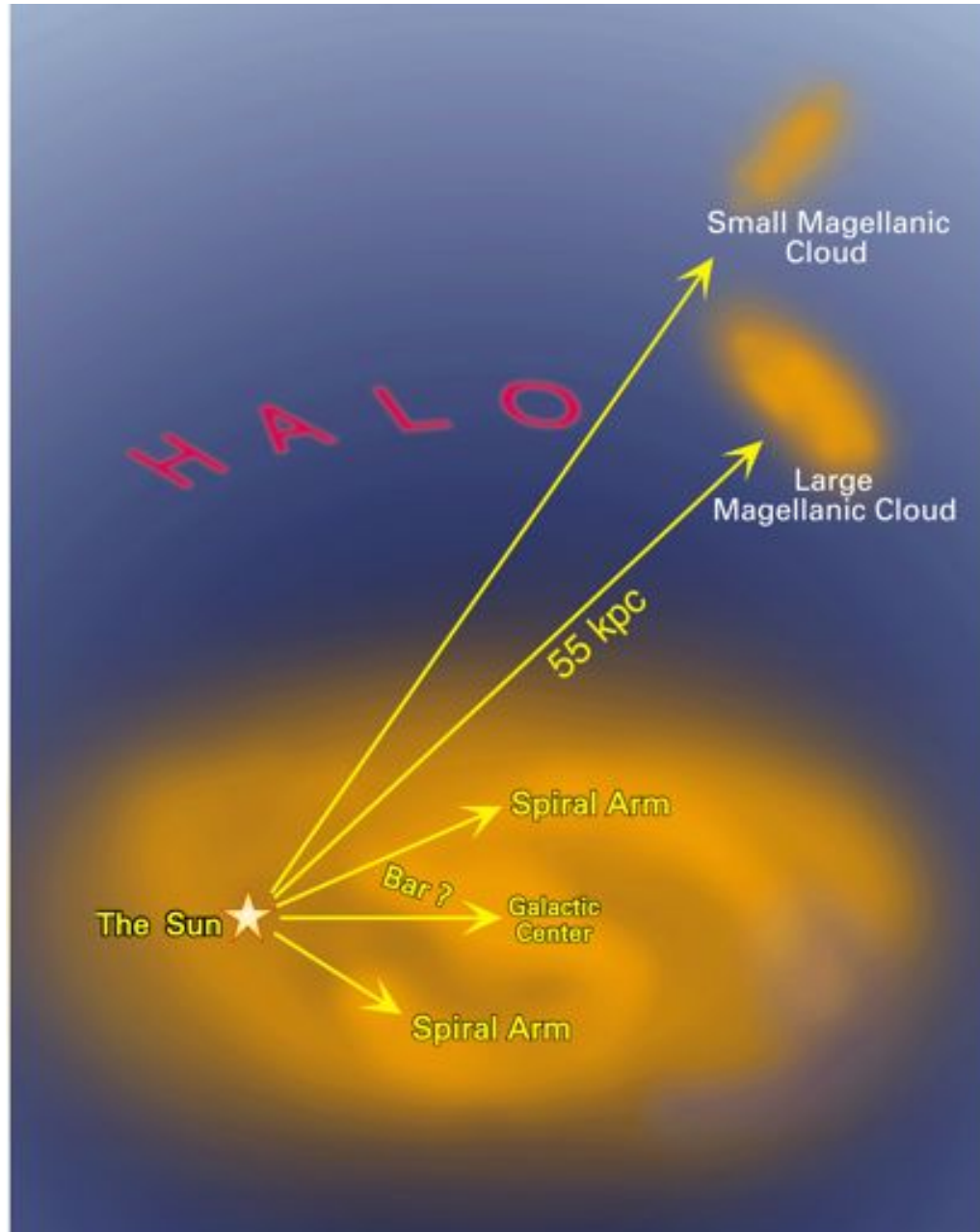
Expérience de Recherche d'Objets Sombres

- Télescope de 1m au Chili
- caméras grand champ **R** et **B** de 32Mpix chacune
- 7 ans de fonctionnement
- $\sim 10^8$ étoiles mesurées 300 à 500 fois (événements rares)
- **EROS1: 1990-1995**
EROS2: 1996-2002
- Analyse achevée récemment



Mesurer les luminosités

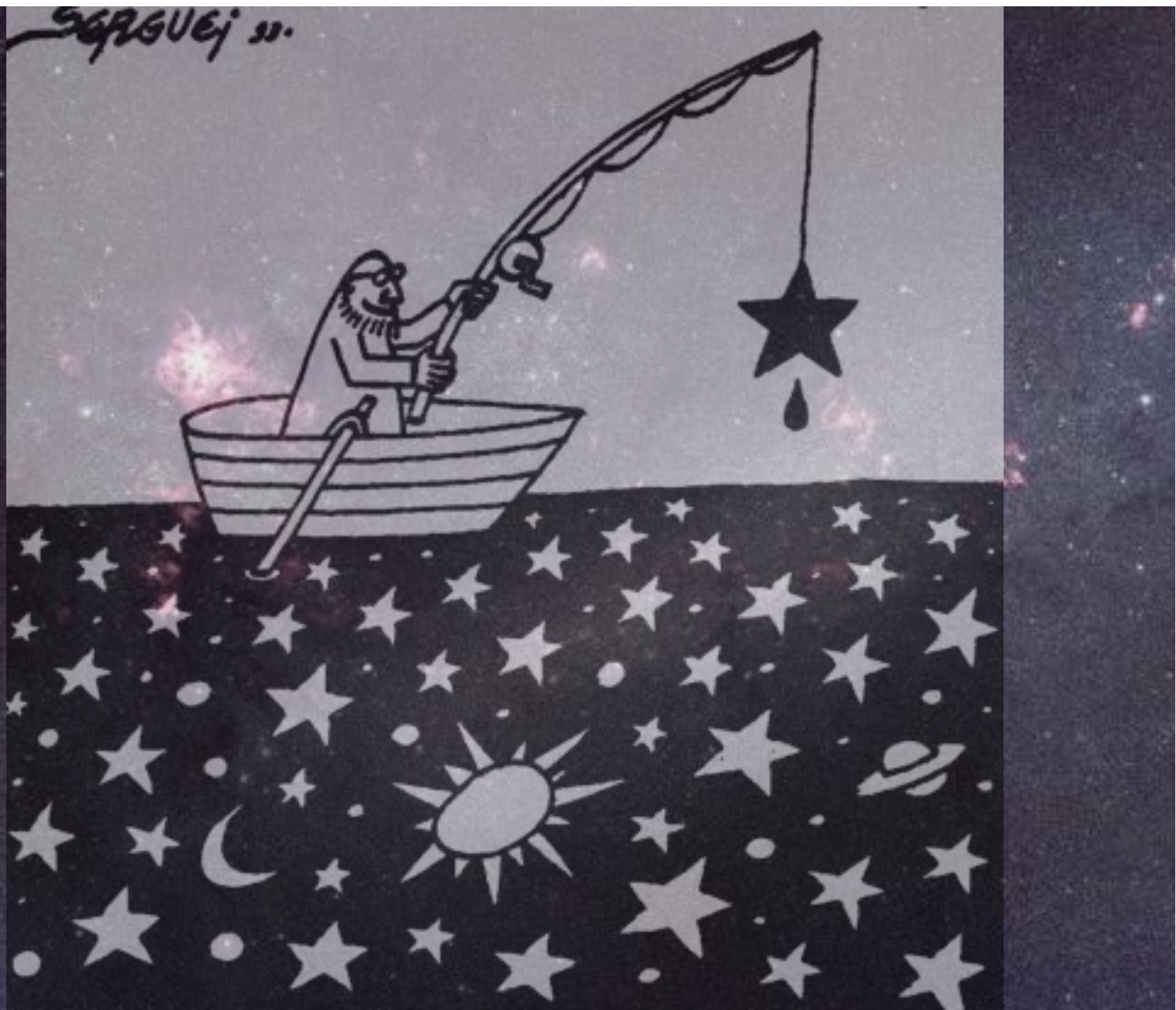




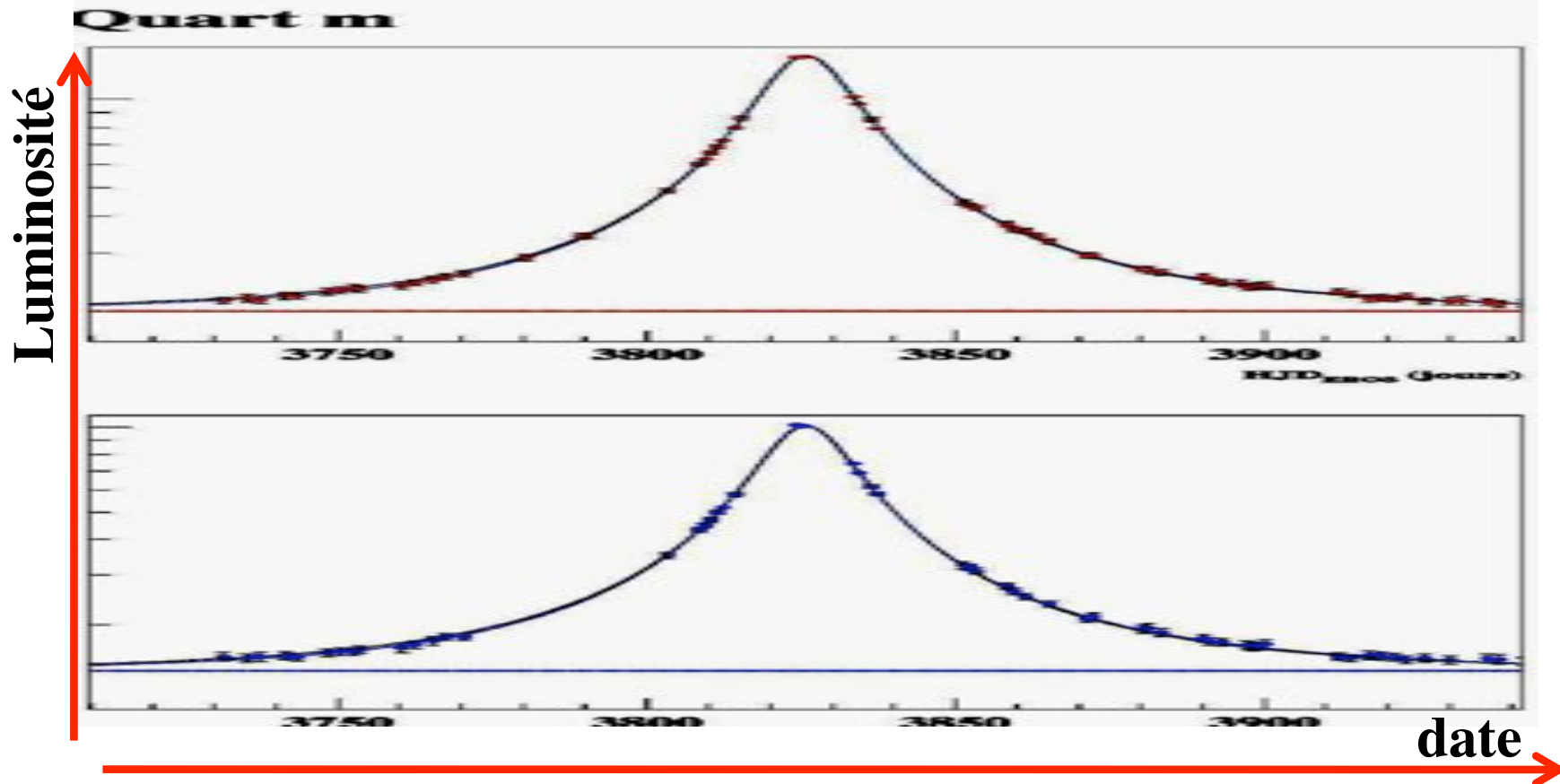
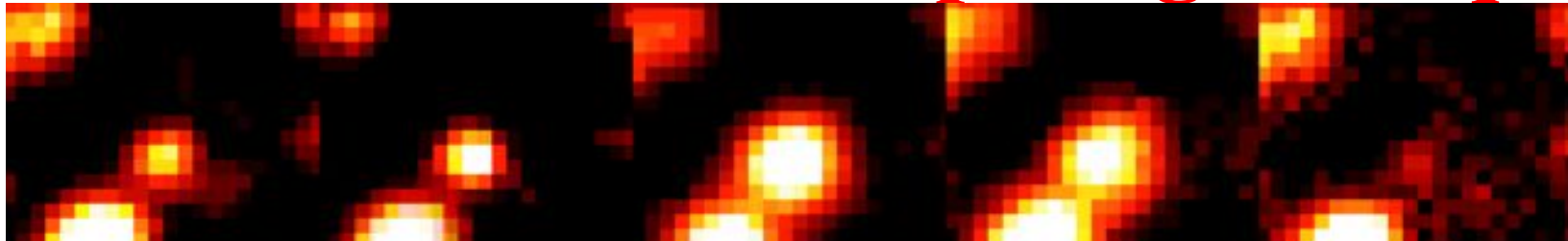
Les cibles

- Nuages de Magellan
=> sonder le **halo**
- Centre galactique
=> étude **disque/bulbe**
- Bras spiraux
=> étude **disque, barre, disque épais**

СЕРГЕЙ 33.



Un événement vers le plan galactique

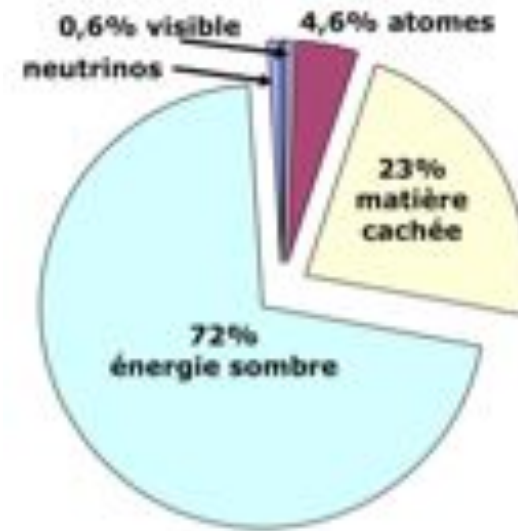


Les résultats

- Beaucoup d'événements ont été détectés
- Mais très peu sont dus à de la matière cachée
=> sévères limites sur la contribution des
objets compacts au halo de matière cachée

Où se cachent les atomes invisibles?

1- De 0,6% à 4,6%



- **Objets compacts? NON**

- Étoiles « manquées » de 10^{-7} à 10^{-1} Masse solaire

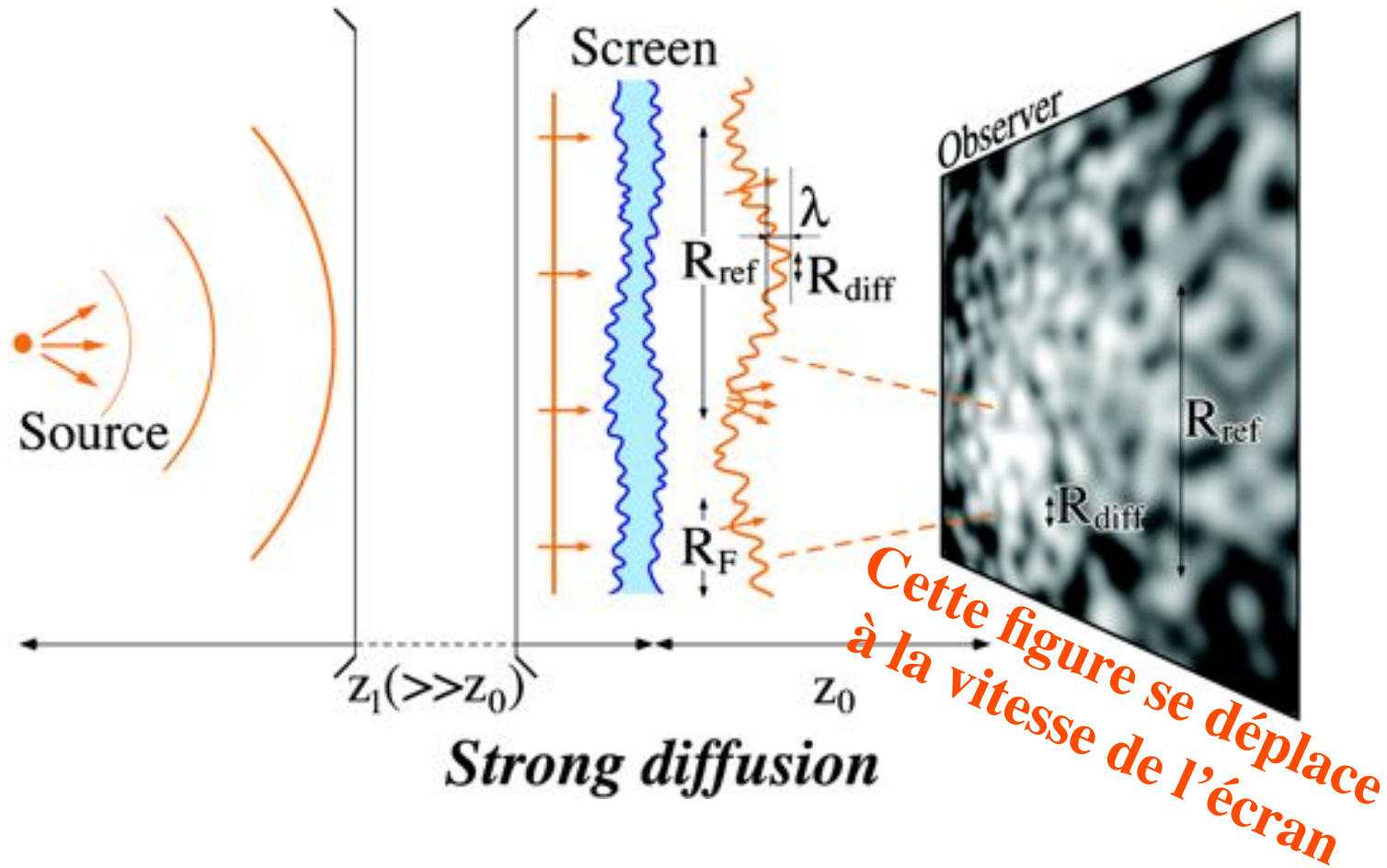
- ==> EROS: Expérience de recherche d'Objets Sombres.**
Recherche les effets de microlentilles gravitationnelles

- **Gaz?**

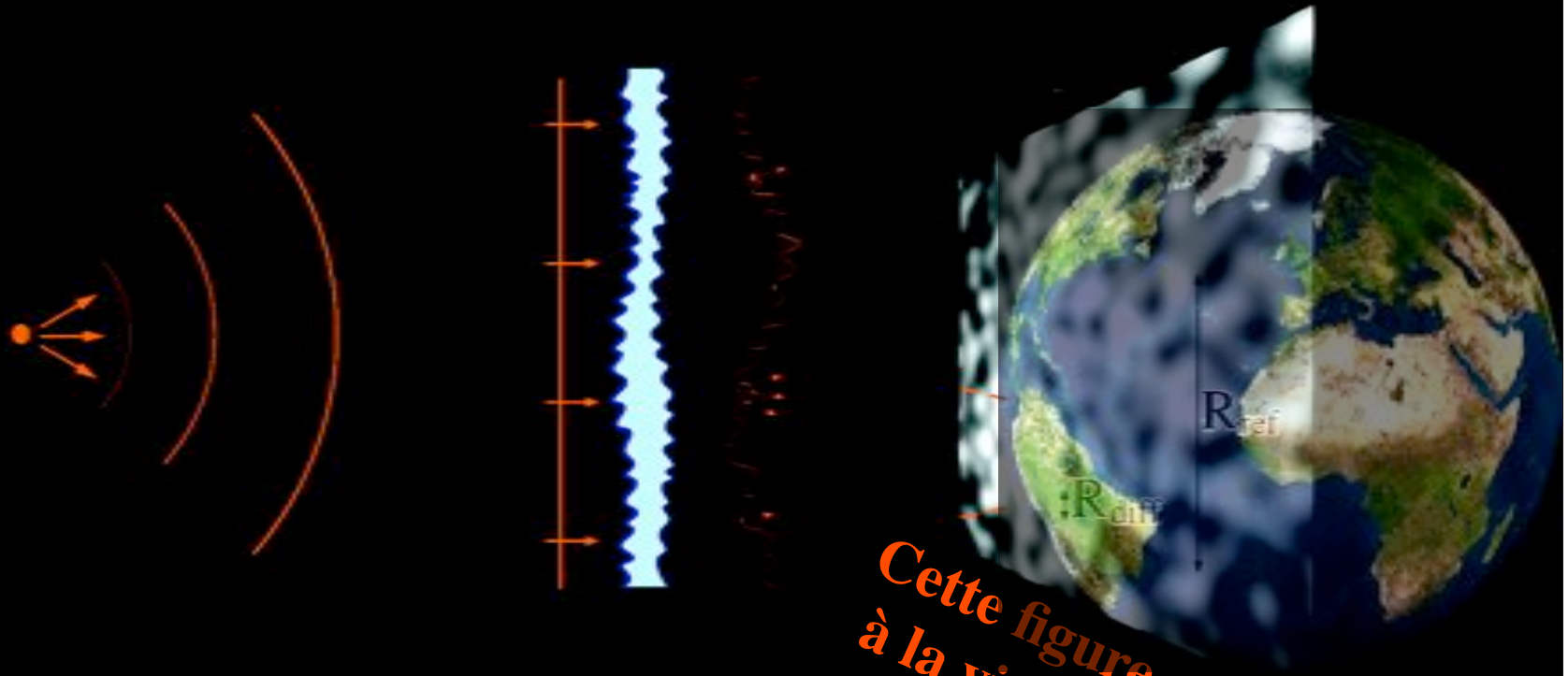
- Nuages de H_2 de structure fractale de $\sim 10^{-3}$ Masse solaire

- ==> OSER: Optical Scintillation by Extraterrestrial Refractor.**
Recherche d'effets de scintillation interstellaire

Scintillation due à un écran fortement diffusant



Scintillation due à un écran fortement diffusant

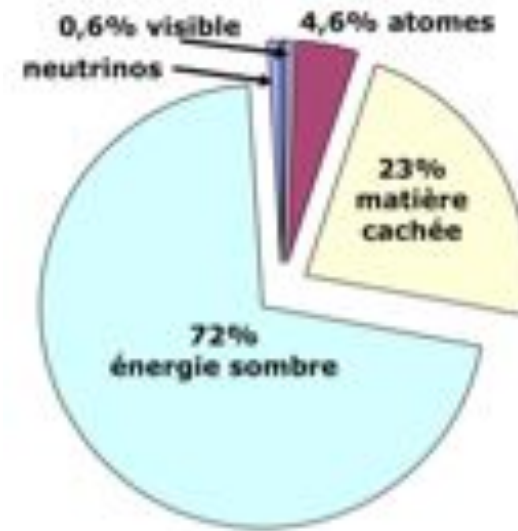


*Cette figure se déplace
à la vitesse de l'écran*



Qu'est-ce que la matière non ordinaire?

2- De 4,6% à 28%



- Le **neutrino** ? Non, beaucoup trop léger.
- De nouvelles particules, les **WIMPs** prédites par certaines théories ?

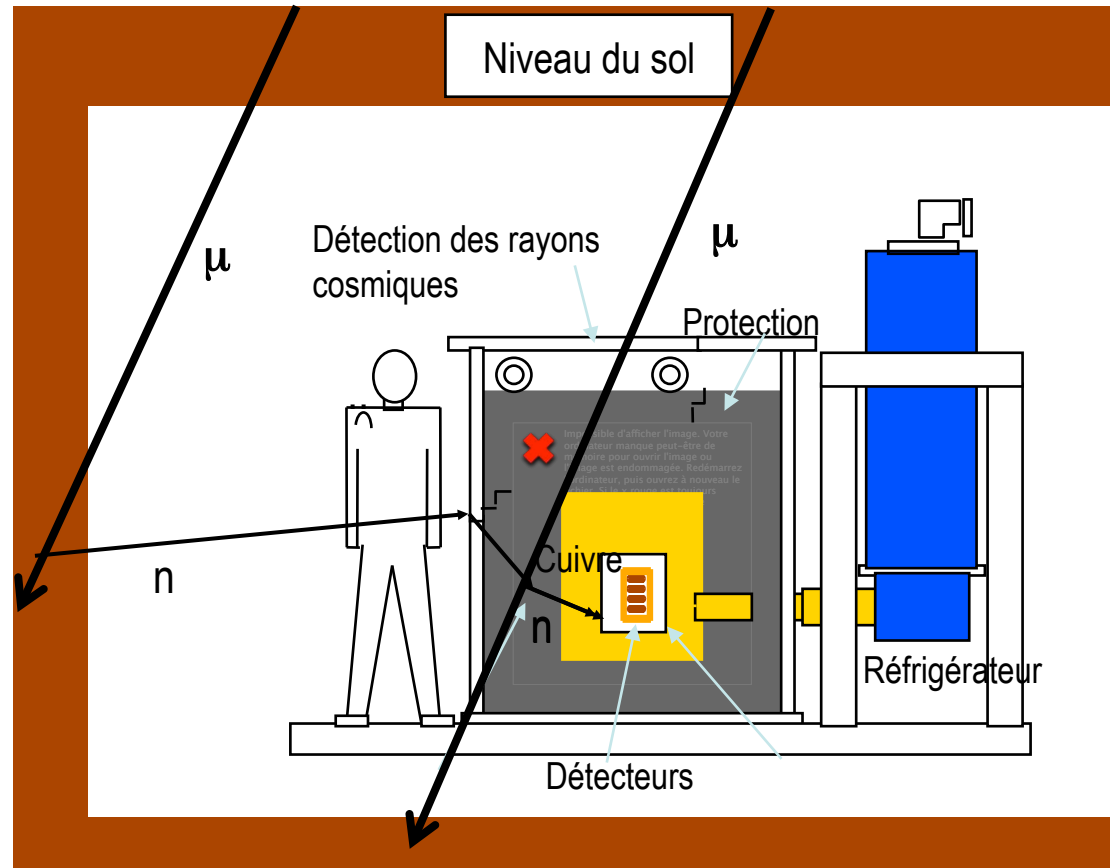
WIMP = Weakly Interacting Massive Particle

Détecter les WIMPs (1)

Détecter les WIMPs est très difficile, en raison de leur faible interaction avec la matière : moins d'un choc par mois et par kilogramme.

Limites à la détection :

- rayonnement cosmique,
- radioactivité induite par les rayons cosmiques et radioactivité naturelle.

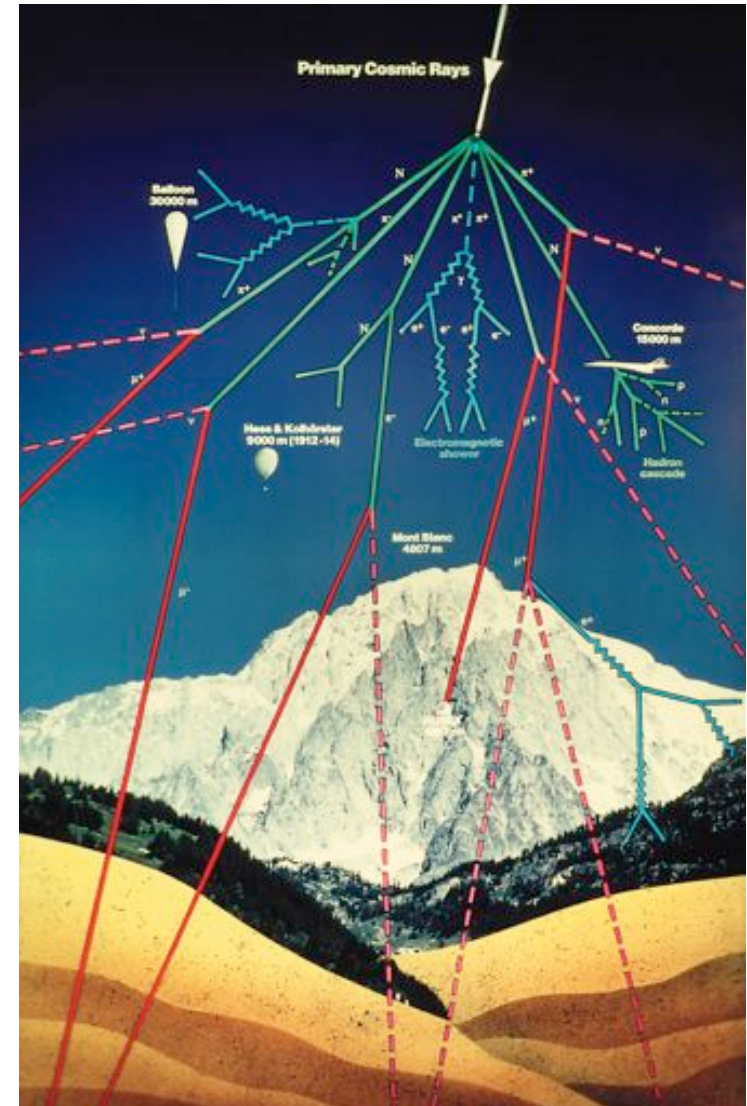


L'expérience américaine CDMS a souffert du rayonnement cosmique. Elle utilise maintenant un site souterrain.

Détecter les WIMPs (2)

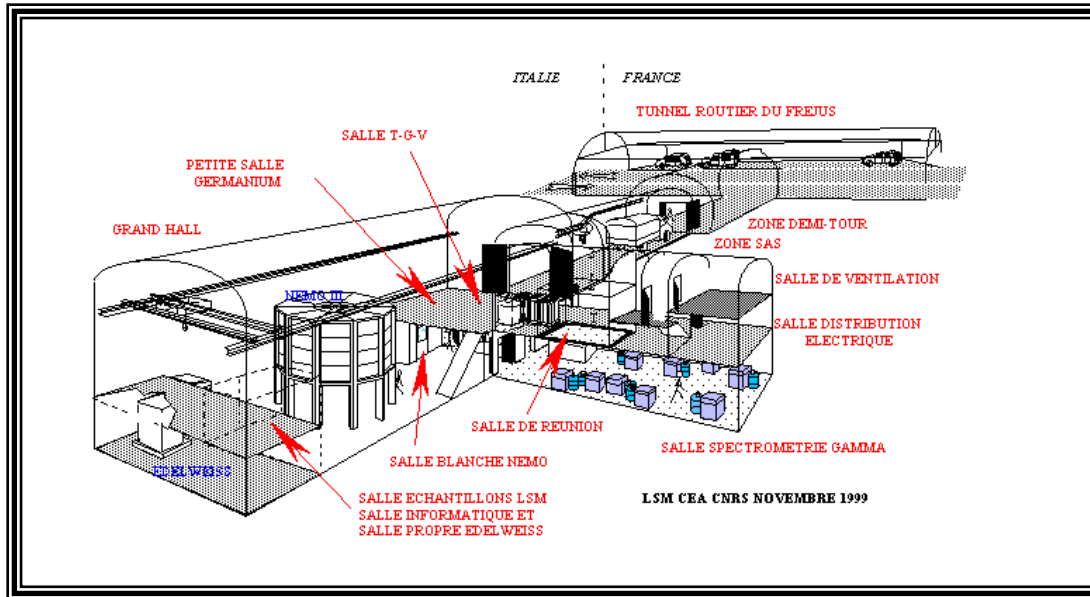
Pour améliorer la sensibilité des expériences, il faut :

- se cacher sous une montagne pour se **protéger des rayons cosmiques** (100 par seconde traversent notre corps),
- se protéger de la radioactivité naturelle des roches,
- purifier les matériaux des détecteurs.



Edelweiss et CDMS

L'expérience française
EDELWEISS est
abritée sous plus de
1600 m de roche, dans
les Alpes.



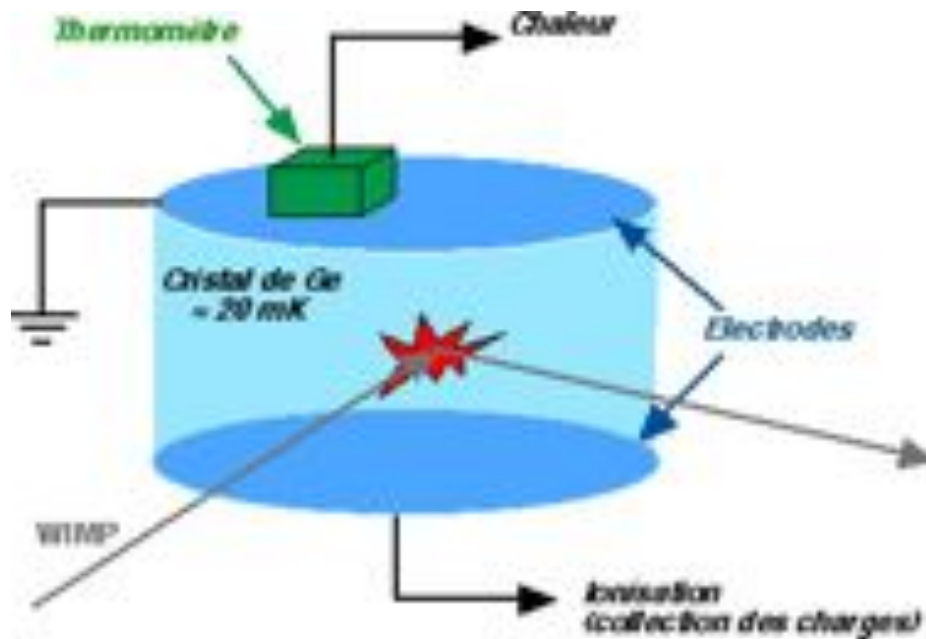
Le laboratoire souterrain de
Modane. Moins d'un millionième des
rayons cosmique parviennent à
l'atteindre.

Son concurrent américain
CDMS est abrité dans la
mine de fer de Soudan
(États-Unis).



Le détecteur d'EDELWEISS (1)

Dans le détecteur d'EDELWEISS, le choc d'un WIMP :

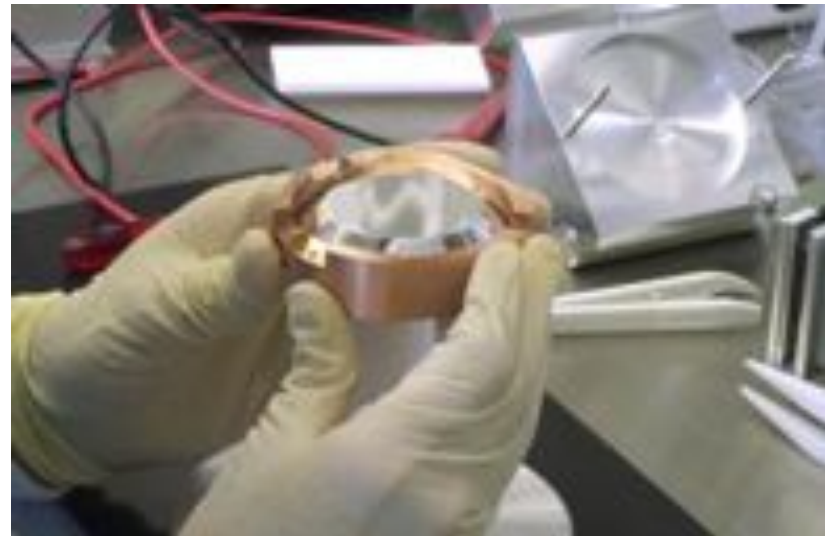


Détecteur d'EDELWEISS

- élève un tout petit peu la **température** (1 millionième de degré !),
- engendre un **signal électrique** (quelques centaines d'électrons)
3 fois plus petit que dans le cas de la radioactivité (pour une même énergie transmise au matériau du détecteur)

Le détecteur d'EDELWEISS (2)

Dans le détecteur : des matériaux extrêmement purs,
une température d'un centième de degré absolu.

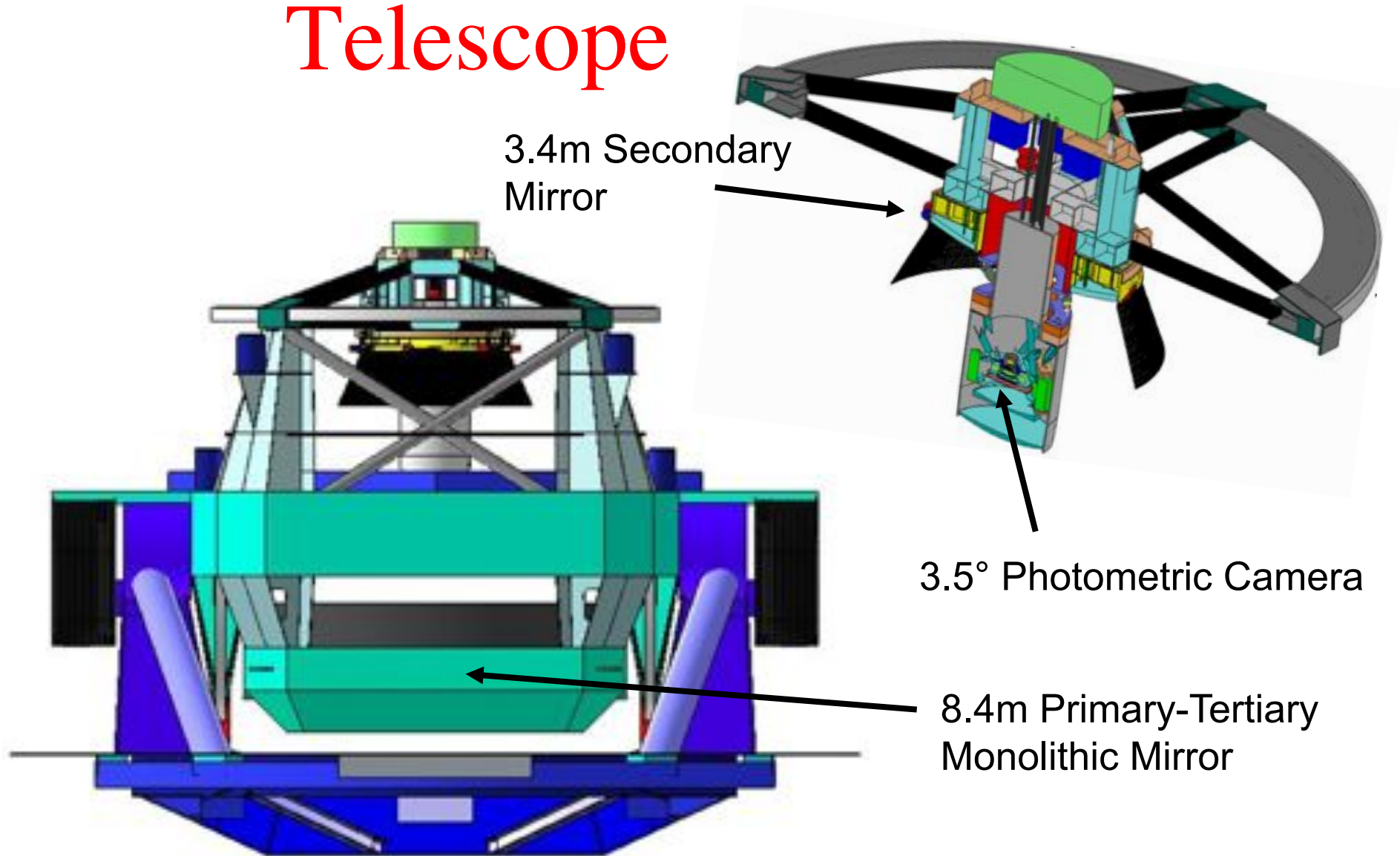
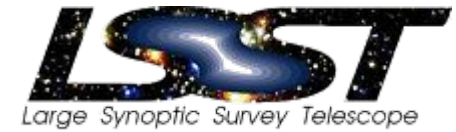


Détecteur en germanium
de l'expérience EDELWEISS

Il y a encore beaucoup à faire

- Où est la matière cachée?
- De quoi est-elle faite?
- Mais aussi
 - Qu'est-ce que l'énergie du vide?
 - Pourquoi la matière l'a-t-elle emporté sur l'antimatière?
- ...

Large Synoptic Survey Telescope



3.4m Secondary Mirror

3.5° Photometric Camera

8.4m Primary-Tertiary Monolithic Mirror