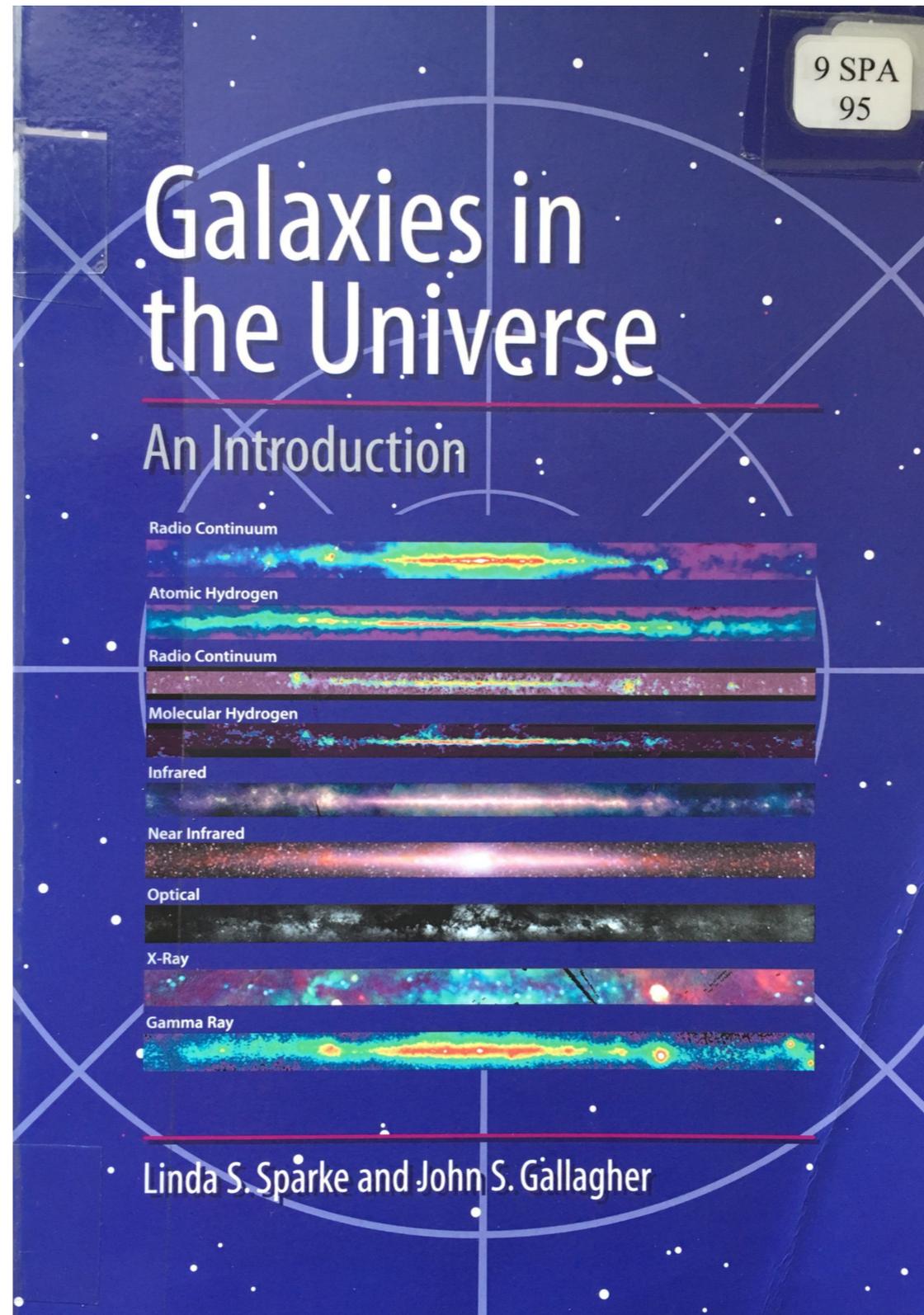


Introduction aux galaxies

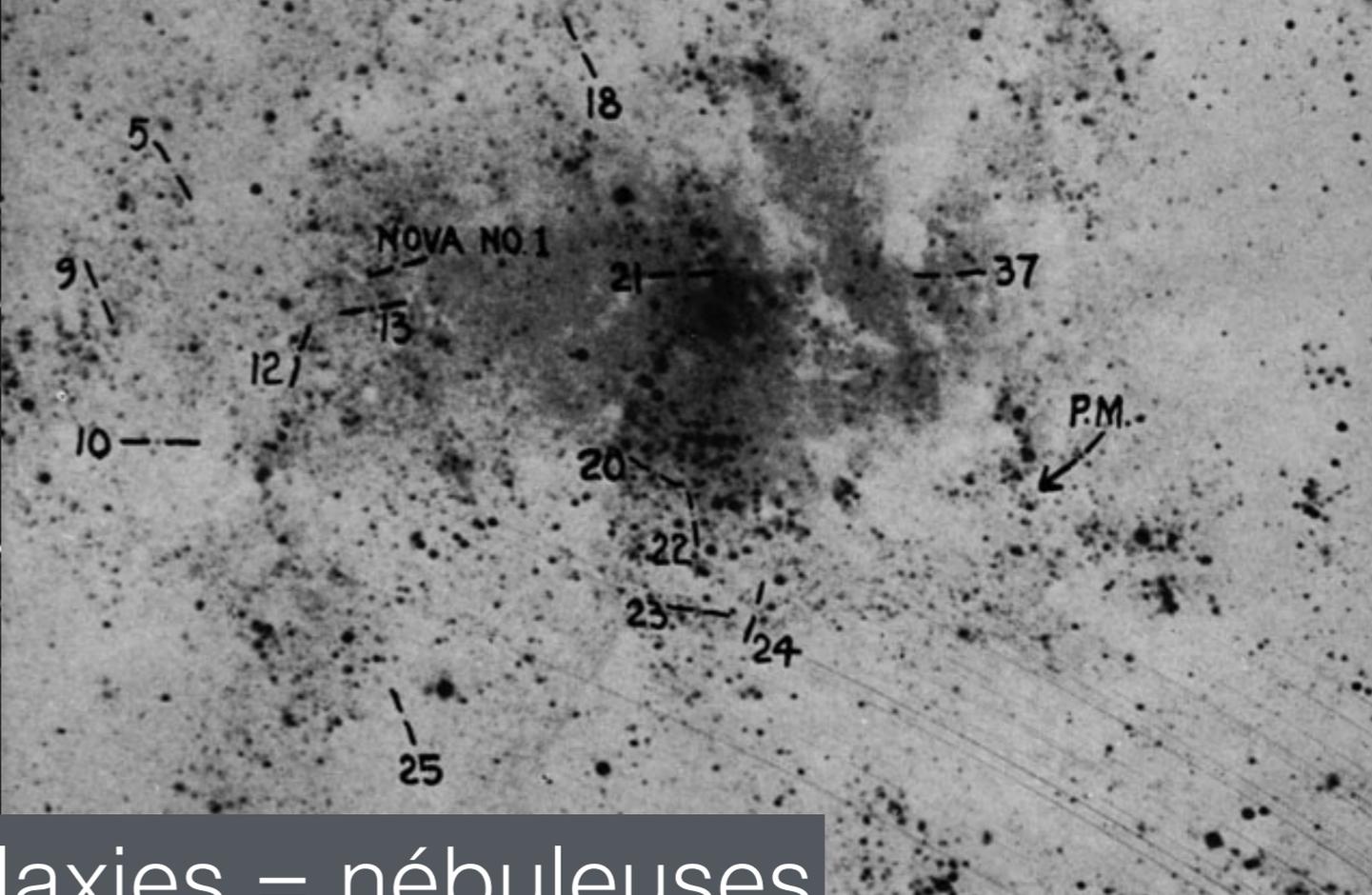


C. Bot, formation pour les documentalistes et ++
3 avril 2017

- Ce cours est basé en grande partie sur le livre disponible à la bibliothèque:



- et sur un cours d'Ariane Lancon. Merci à elle.



Historiquement: galaxies = nébuleuses



galaxie: ensemble d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière noire liées par la gravité

typiquement $\sim 10^6 - 10^{12}$ étoiles



M88

nébuleuse d'Orion

M108

Pour pouvoir faire la différence
entre ces classes d'objet,
il faut connaître la distance des étoiles

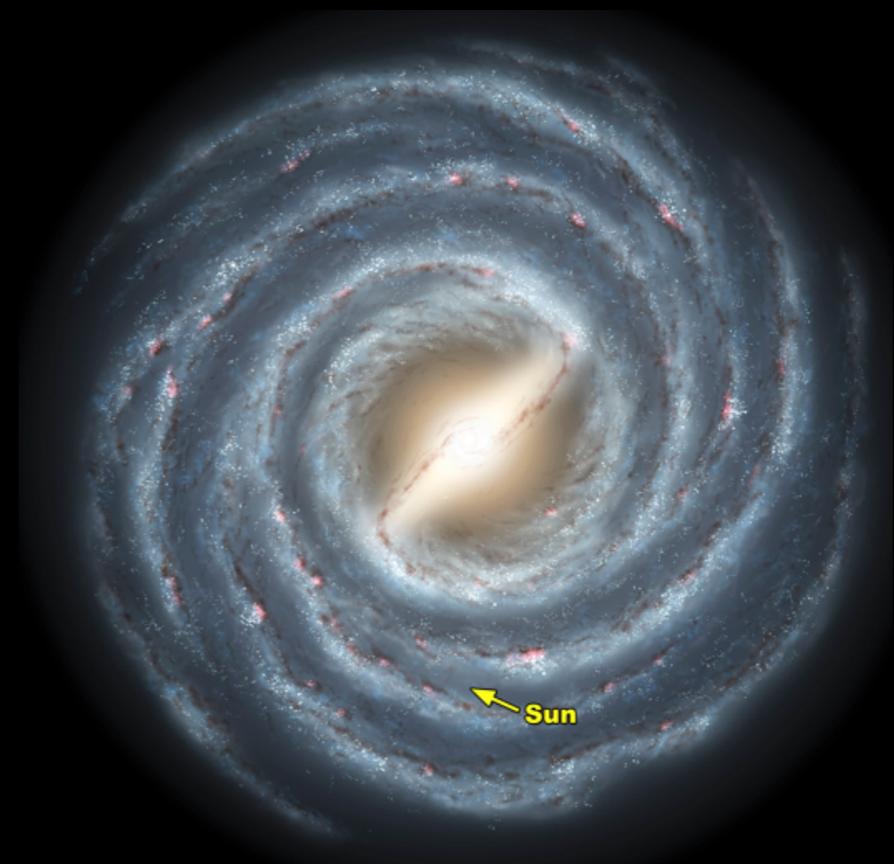
NGC7023

M106

Notre galaxie: la Voie Lactée

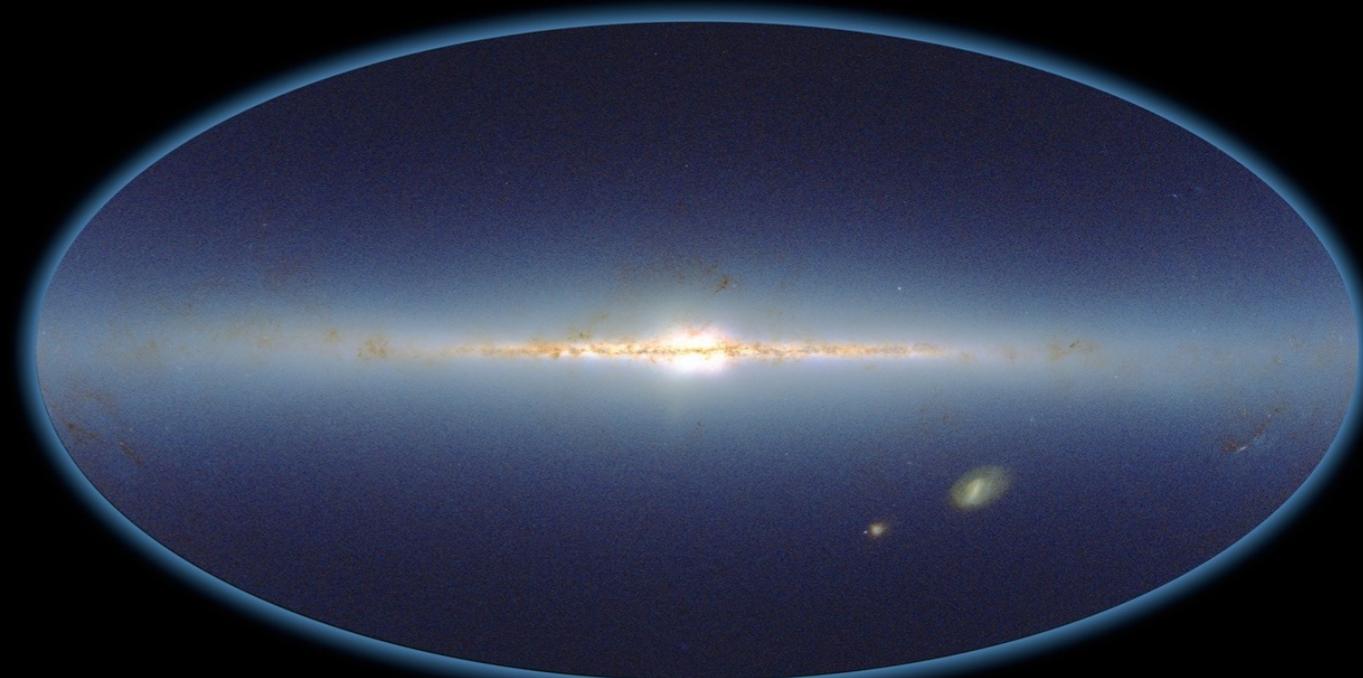


Wally Pacholka / AstroPics.com



Nous sommes dedans. Là encore, pour connaître sa structure il faut évaluer les distances des étoiles autour de nous

2MASS Covers the Sky



The Two Micron All Sky Survey
Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & Univ. of Massachusetts

Partie 1: Galaxies et échelle de distances



Année-lumière

- Unité de distance

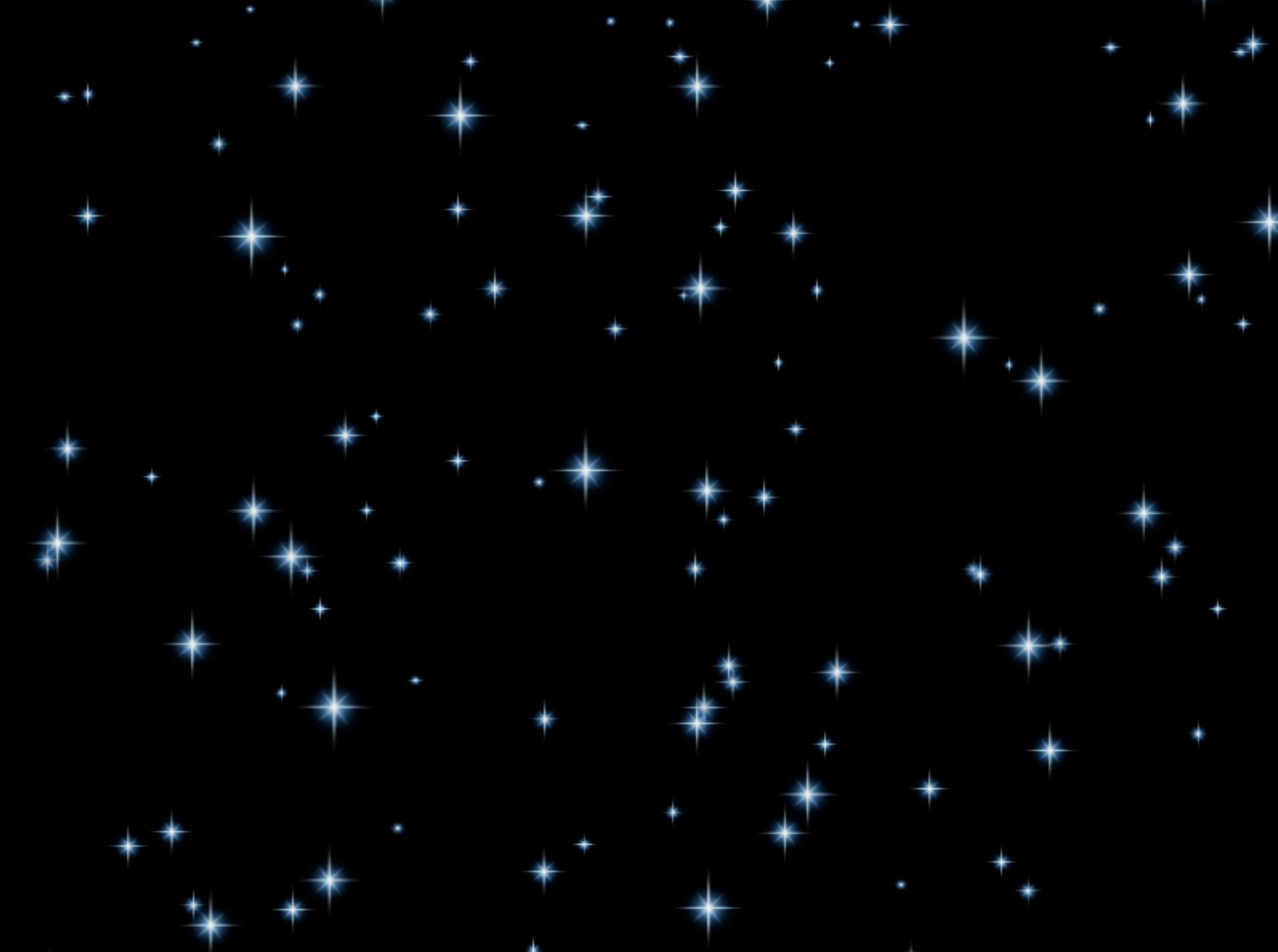
1 année-lumière = distance parcourue
par la lumière en 1 an

- 300 000 km en 1 seconde
- $(3 \cdot 10^5) \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 365 = 9\,460 \cdot 10^9$ km en 1 an

soit environ **10 000 milliards de km = 10^{13} km = 1 AL**



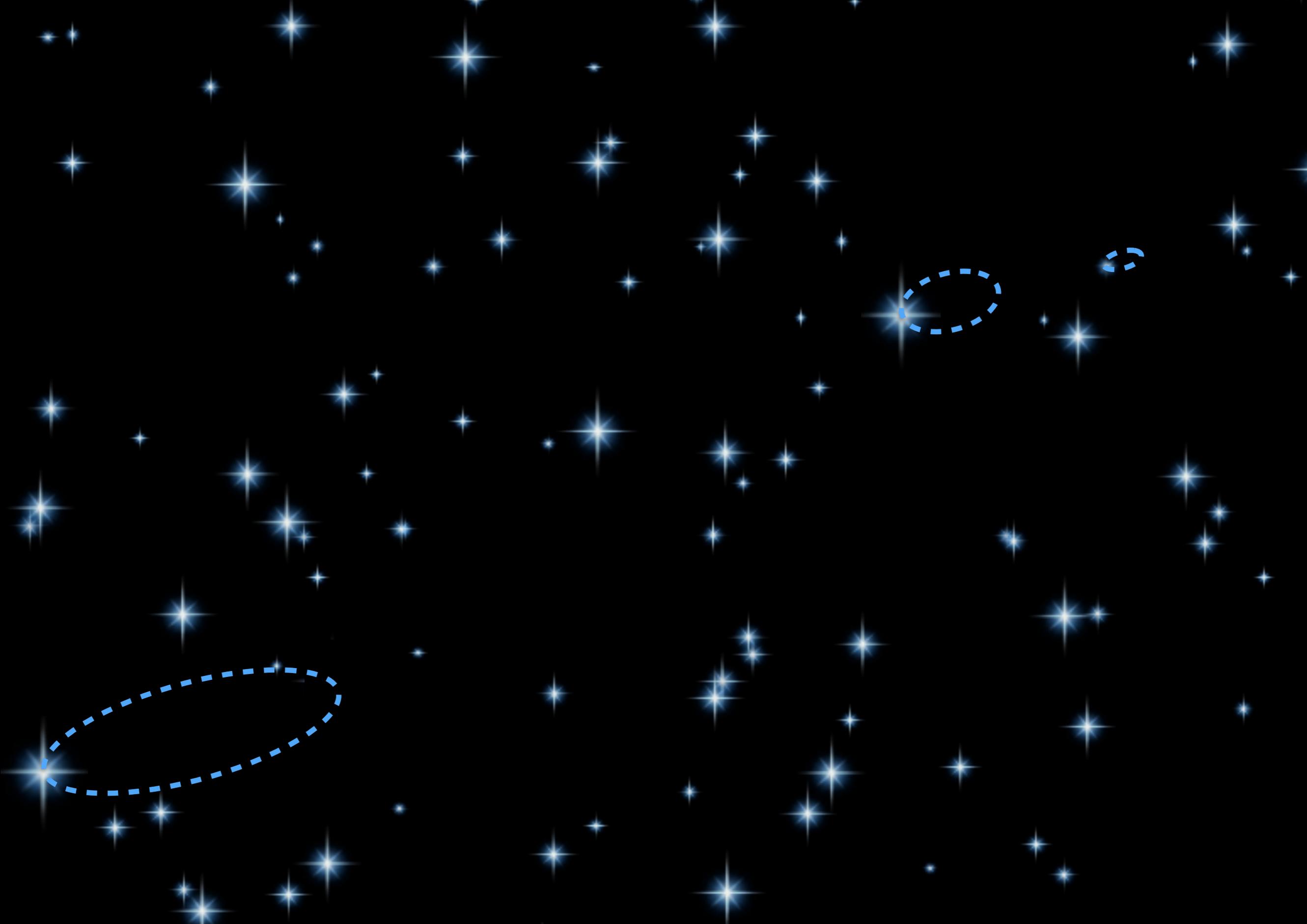




6 mois plus tard

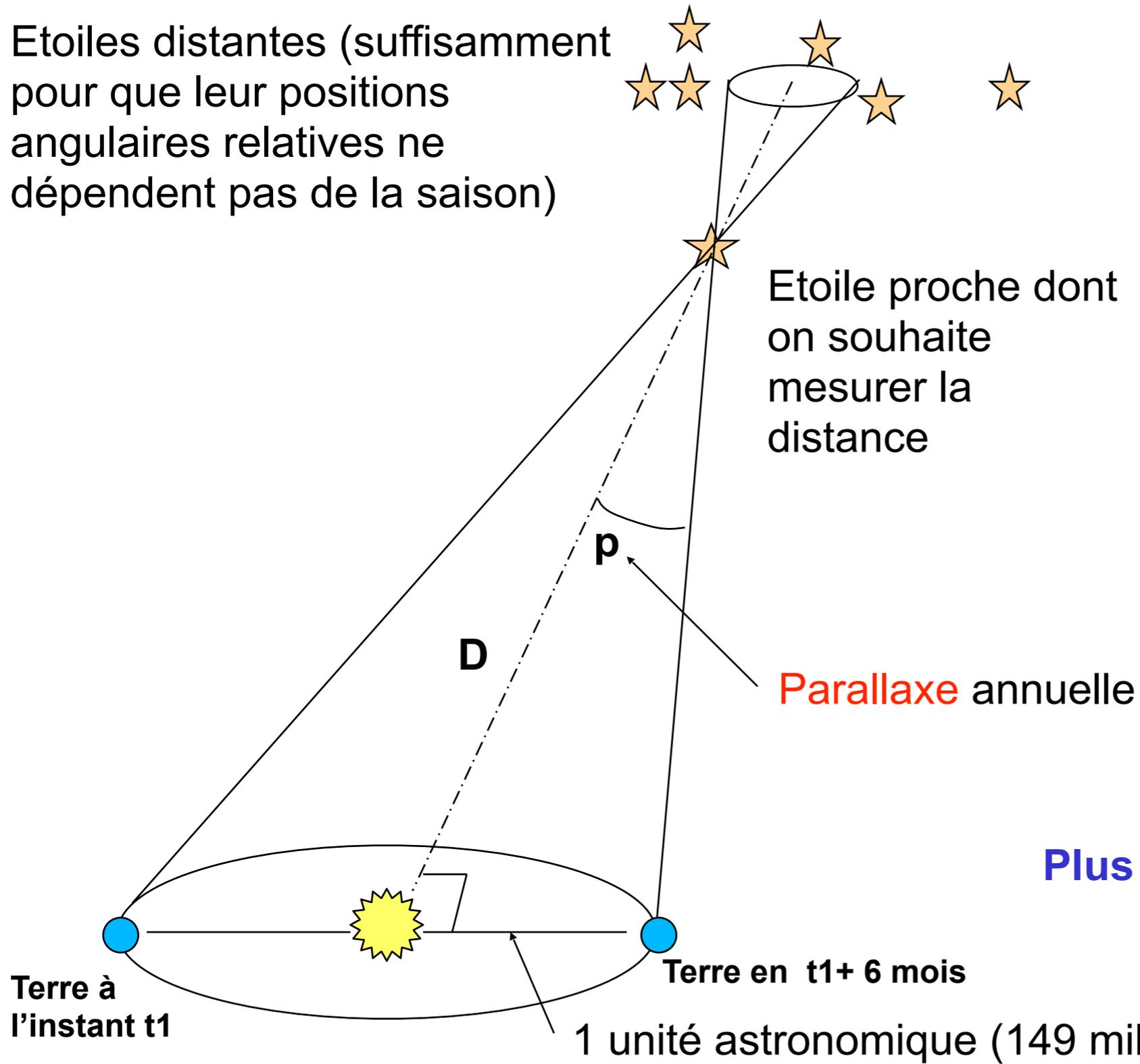


mouvements apparents tout au long de l'année

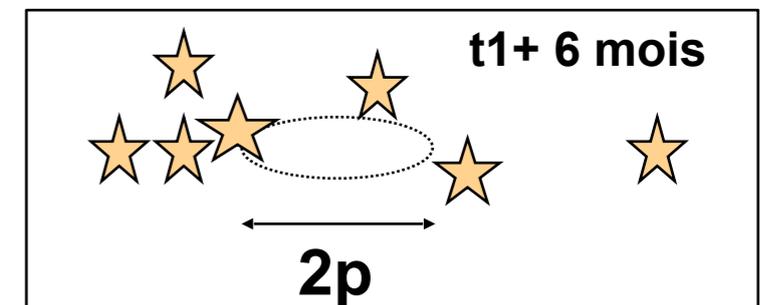
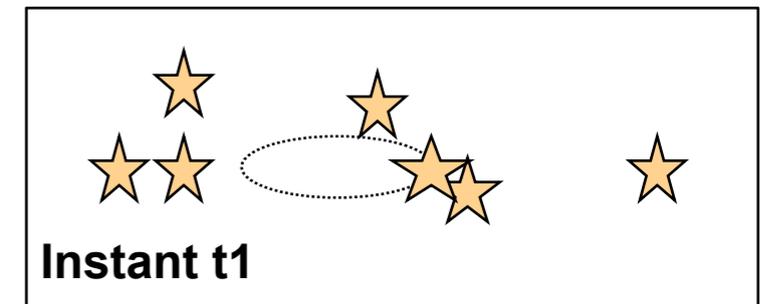


Parallaxe annuelle et distance

Etoiles distantes (suffisamment pour que leur positions angulaires relatives ne dépendent pas de la saison)



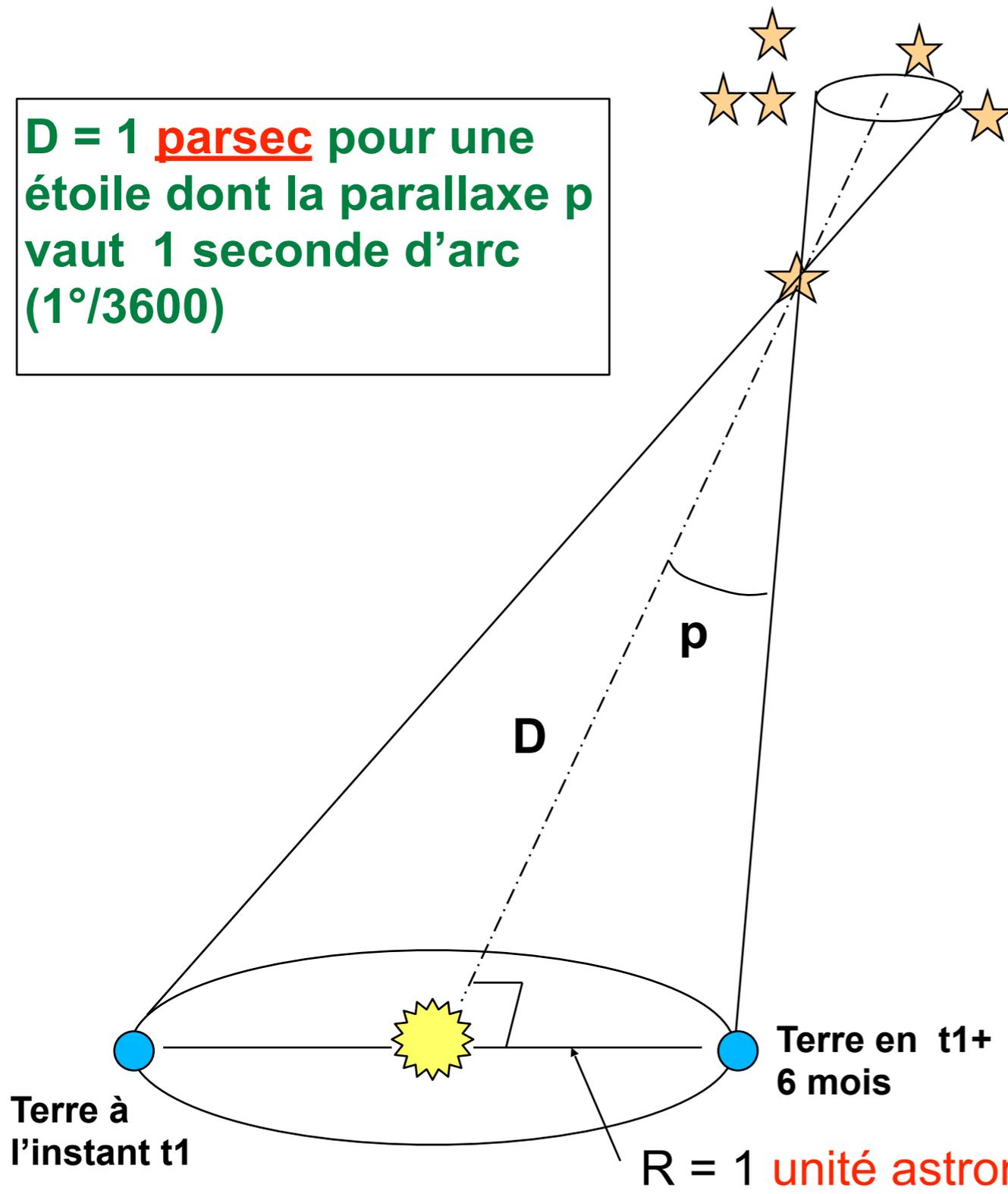
Clichés du ciel



Plus D est grand, plus p est petit.

Définition du parsec

D = 1 parsec pour une étoile dont la parallaxe p vaut 1 seconde d'arc ($1^\circ/3600$)



★

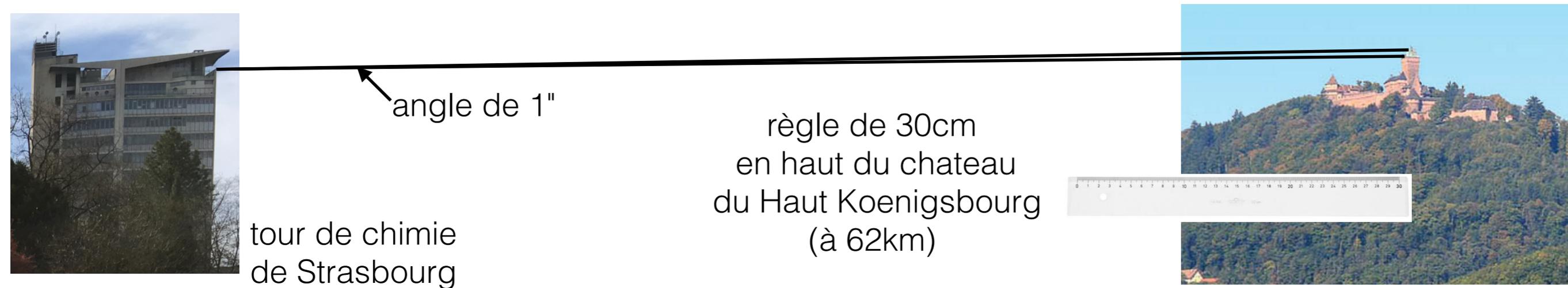
$$1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA} = 3,26 \text{ AL}$$
$$\approx 3.10^{16} \text{ m}$$

La relation $D = R / p$ nous dit :

- * Quand $p=1''$, on a $D = 1 \text{ pc}$
- * Quand $p= x''$, on a $D = 1/x \text{ pc}$

En d'autres termes : **$D=1/p$** donne directement la distance en parsecs quand p est exprimé en secondes d'arc.

Concrètement, ca représente quoi?



Les étoiles les plus proches ont des parallaxes $< 1''$

Précision de Gaia: règle posée sur le sol de la Lune

“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



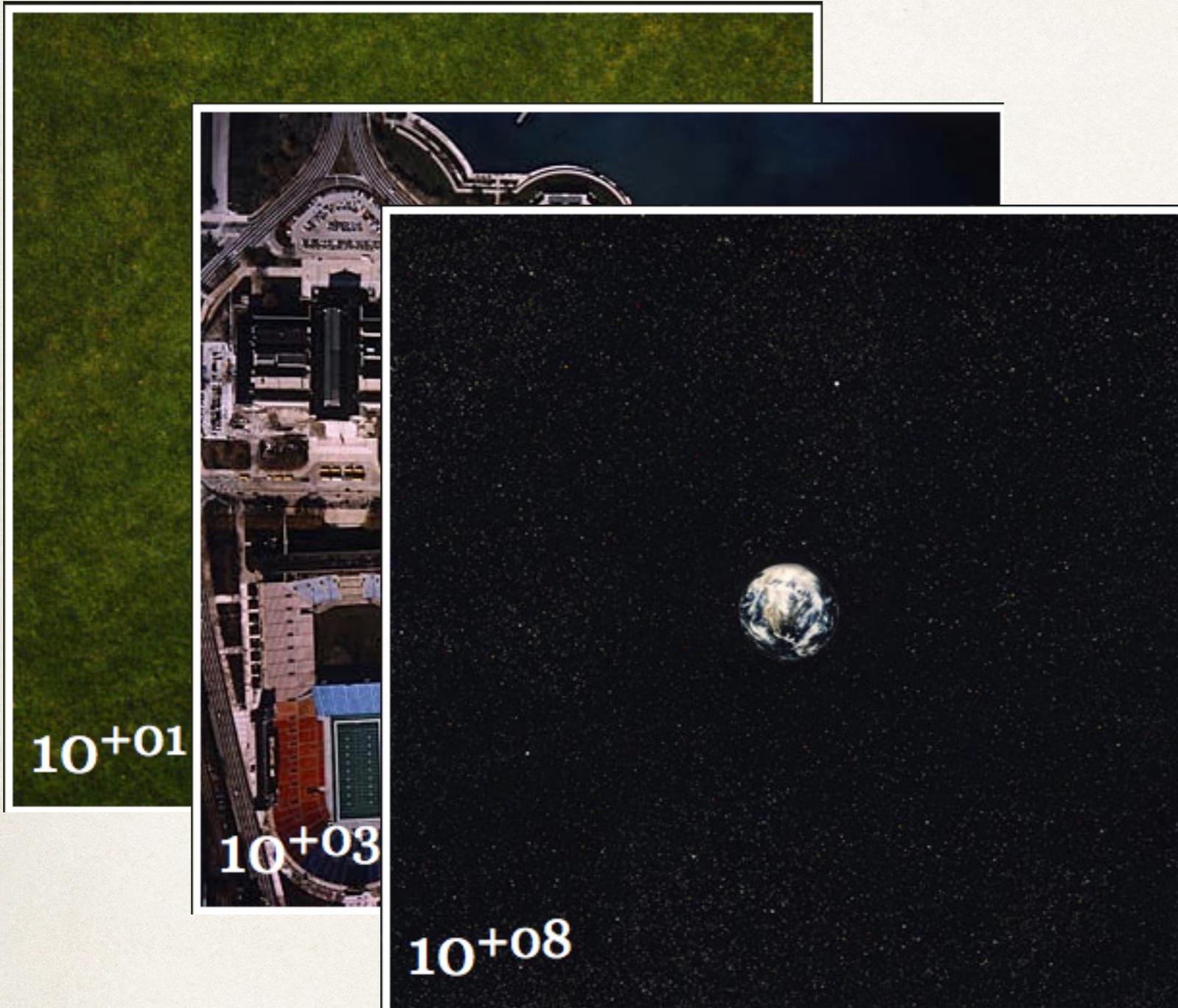
10 mètres

“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



1 kilomètre

“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



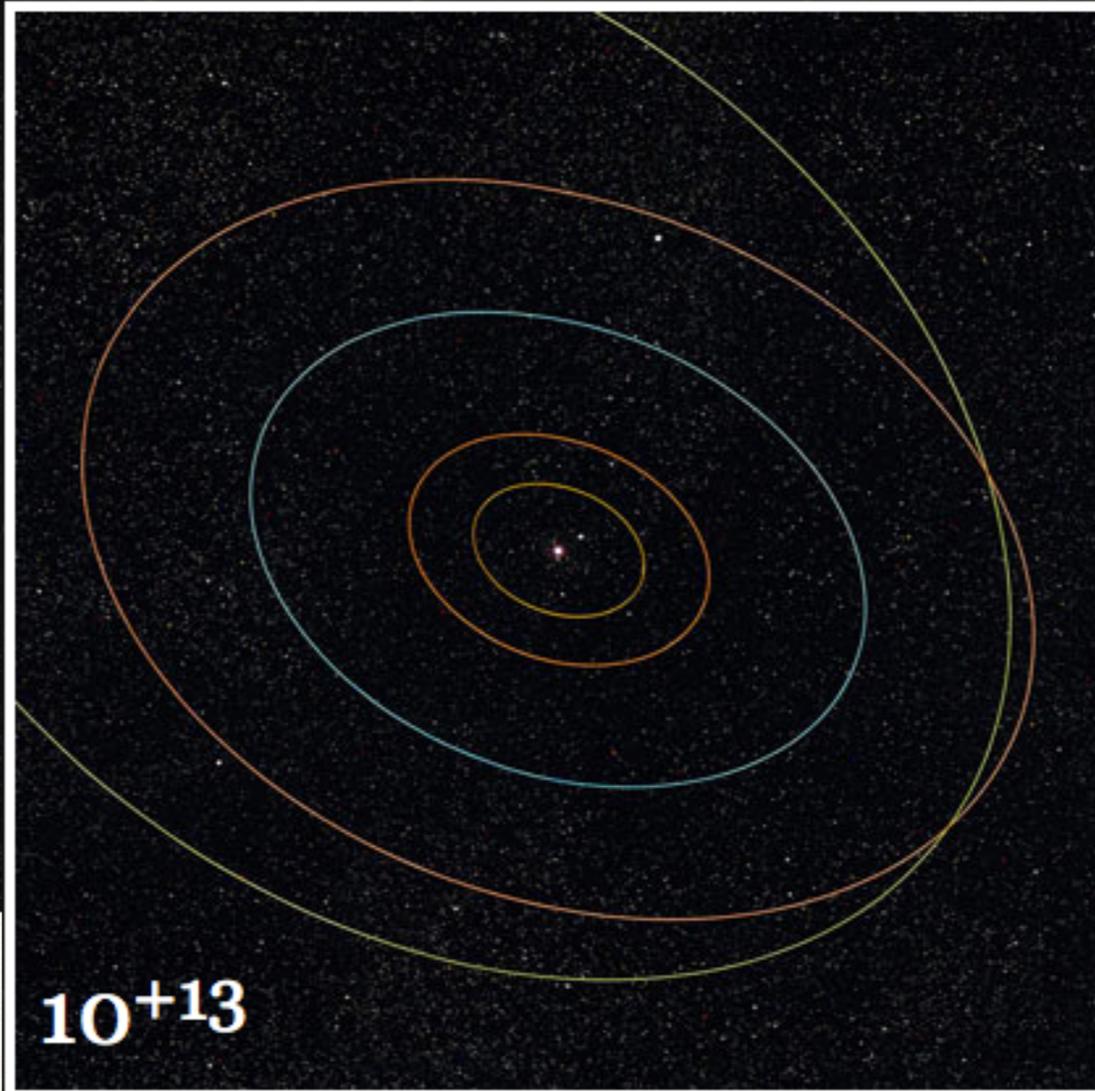
10^{+01}



10^{+03}



10^{+08}



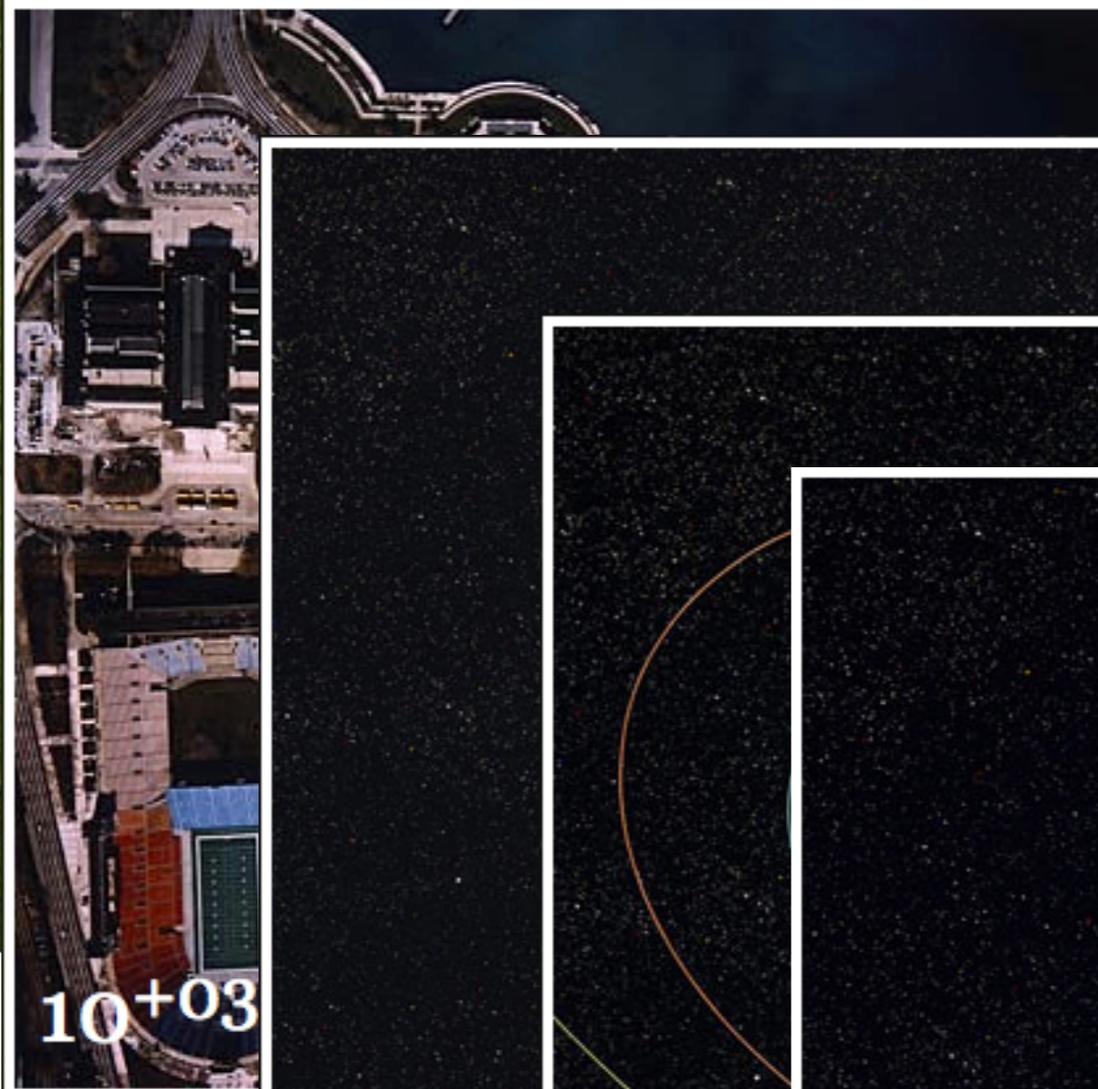
10^{+13}

taille du système solaire:
20 milliards de km

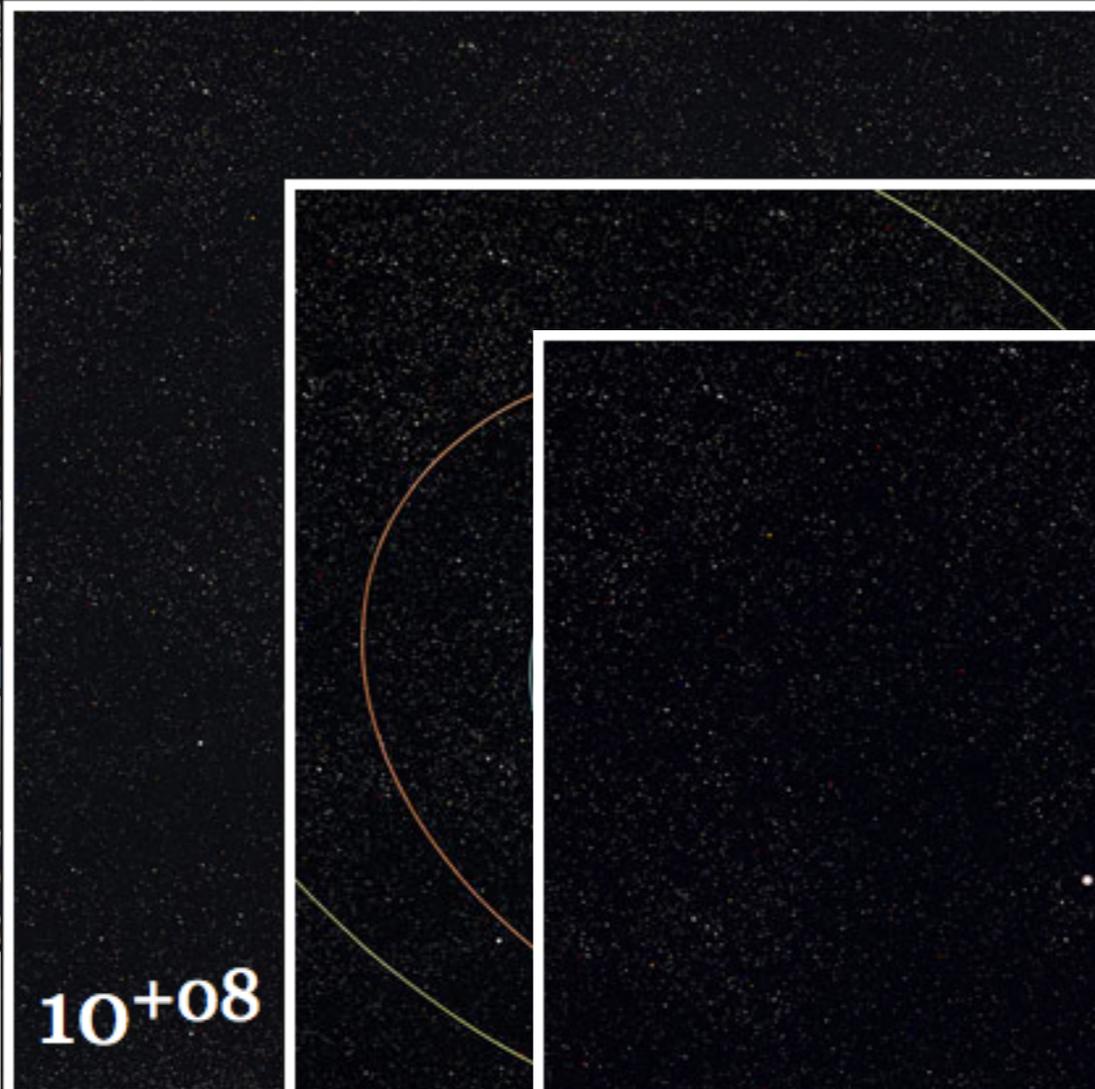
“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



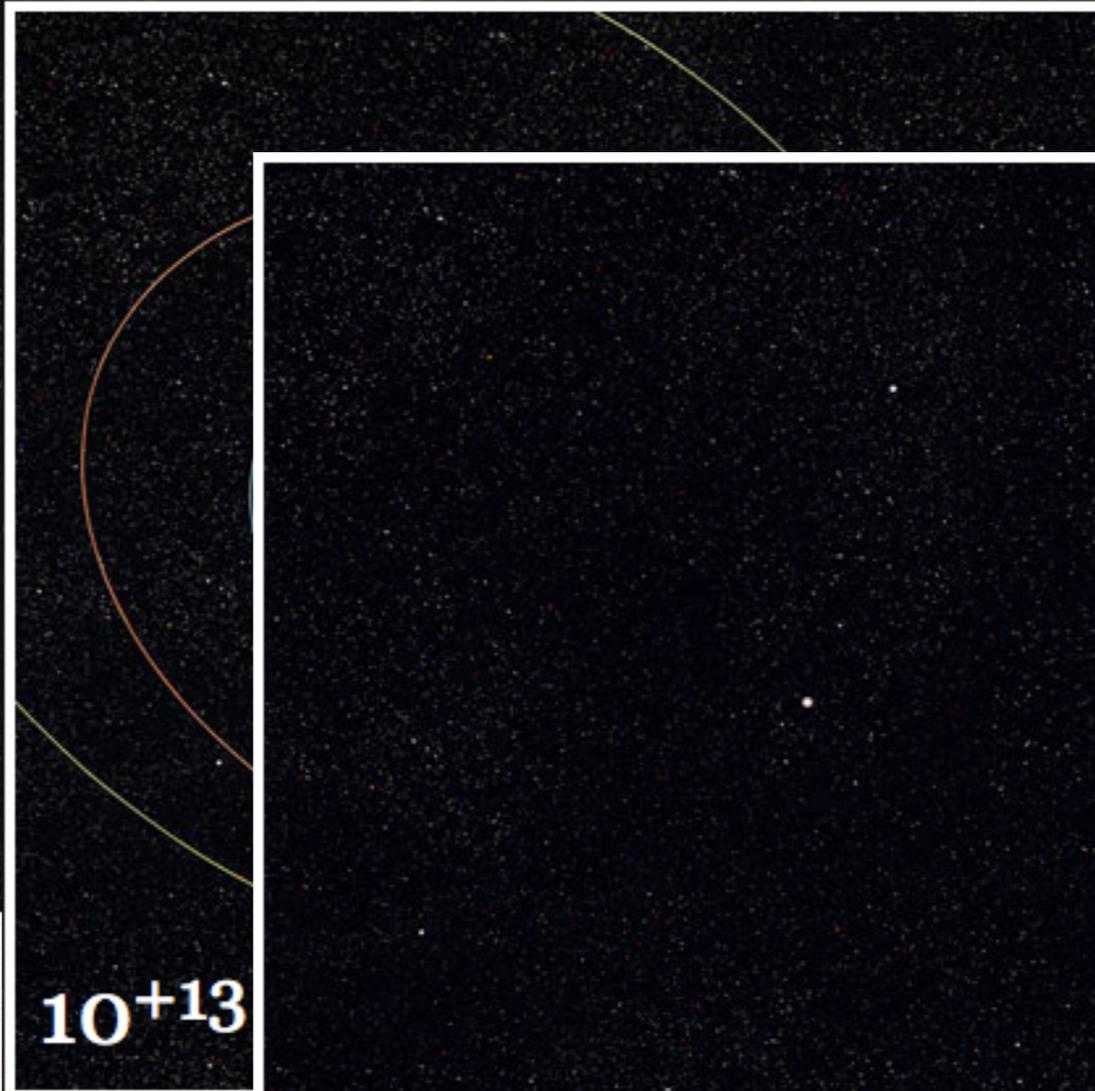
10^{+01}



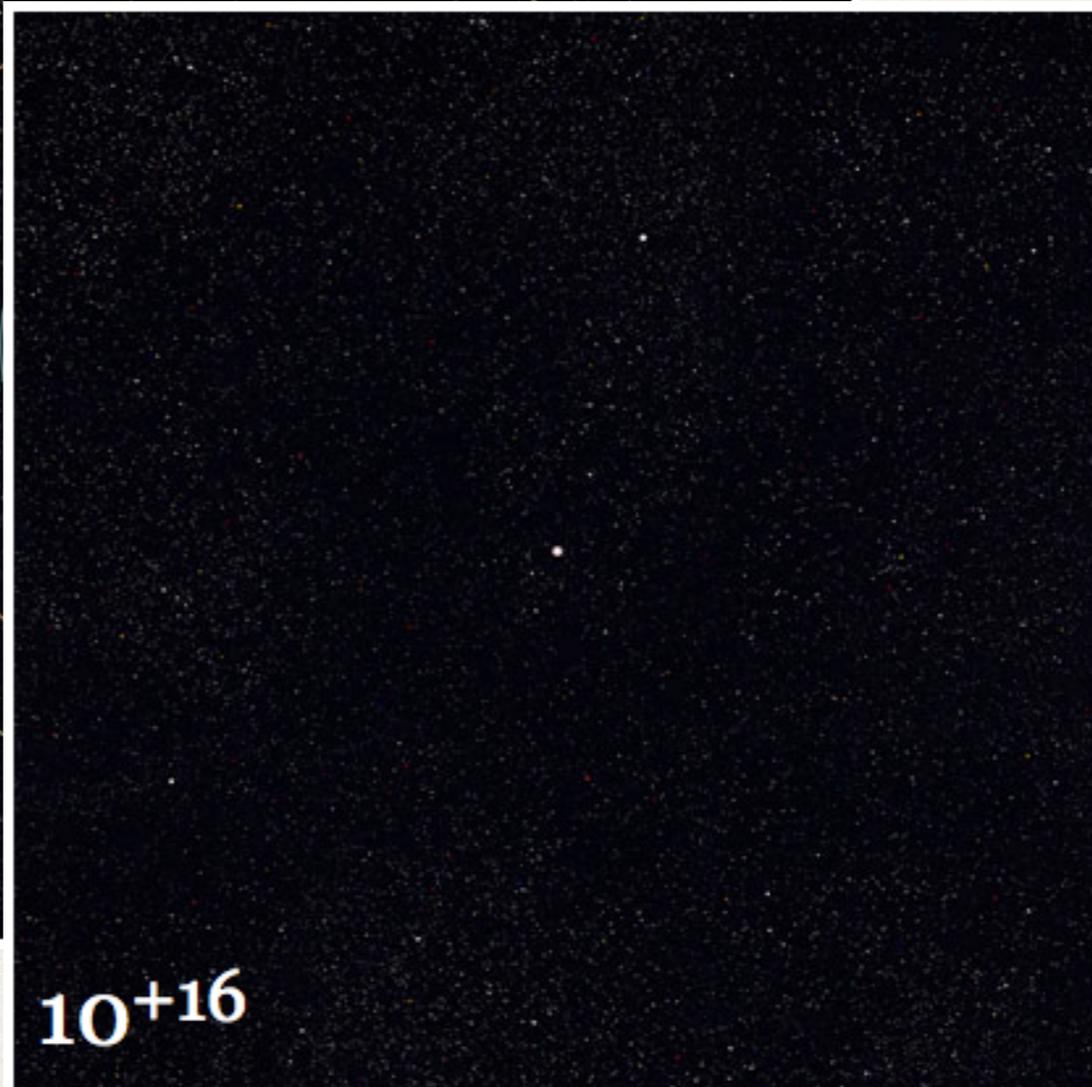
10^{+03}



10^{+08}



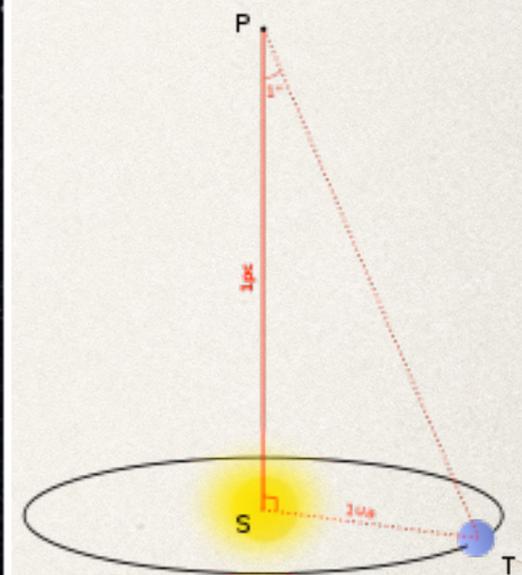
10^{+13}



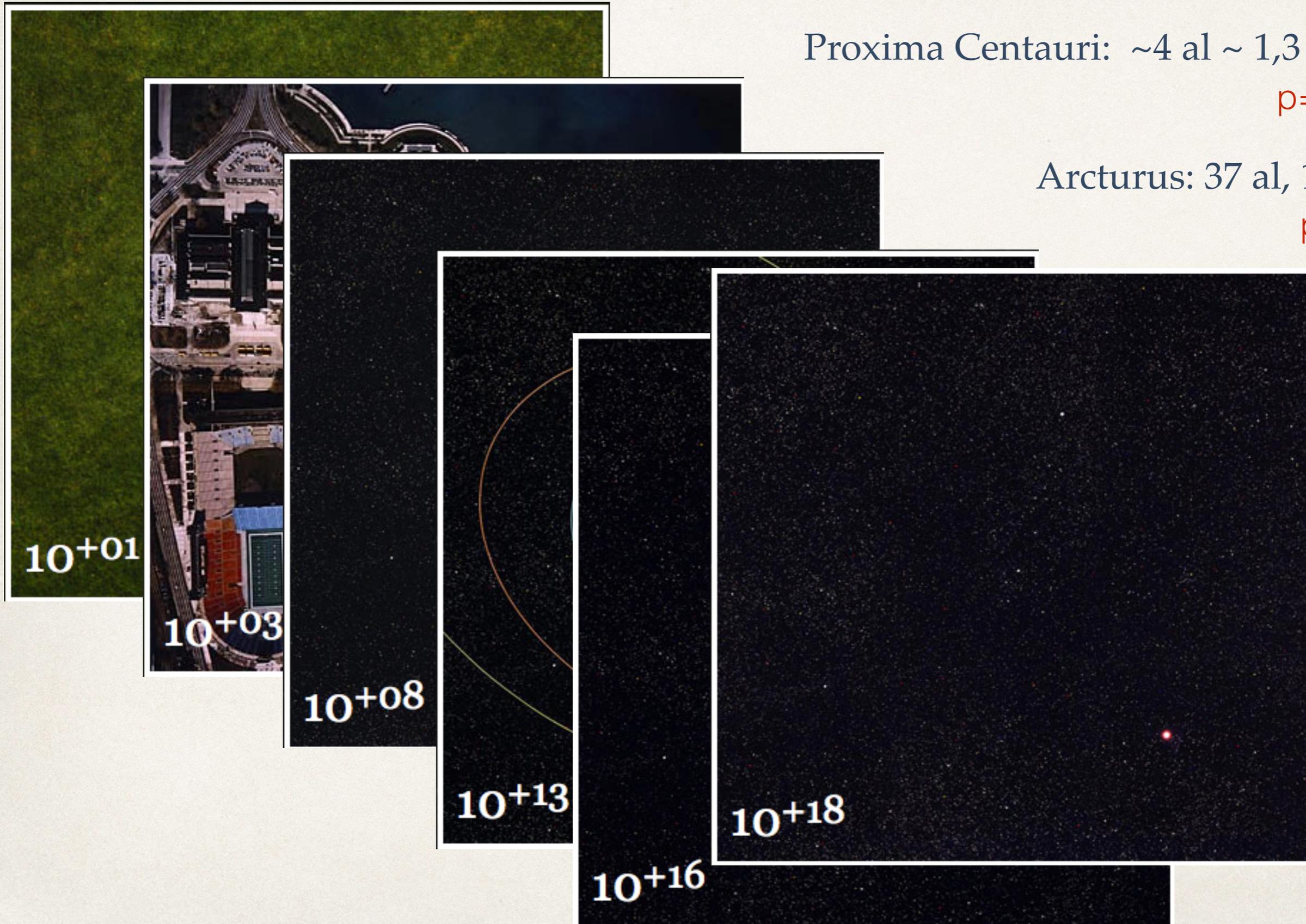
10^{+16}

1 année lumière
~ 10 mille milliards de km

1 parsec
~ 3,3 al
~ $3 \cdot 10^{16}$ m



“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)



Proxima Centauri: ~4 al ~ 1,3 pc

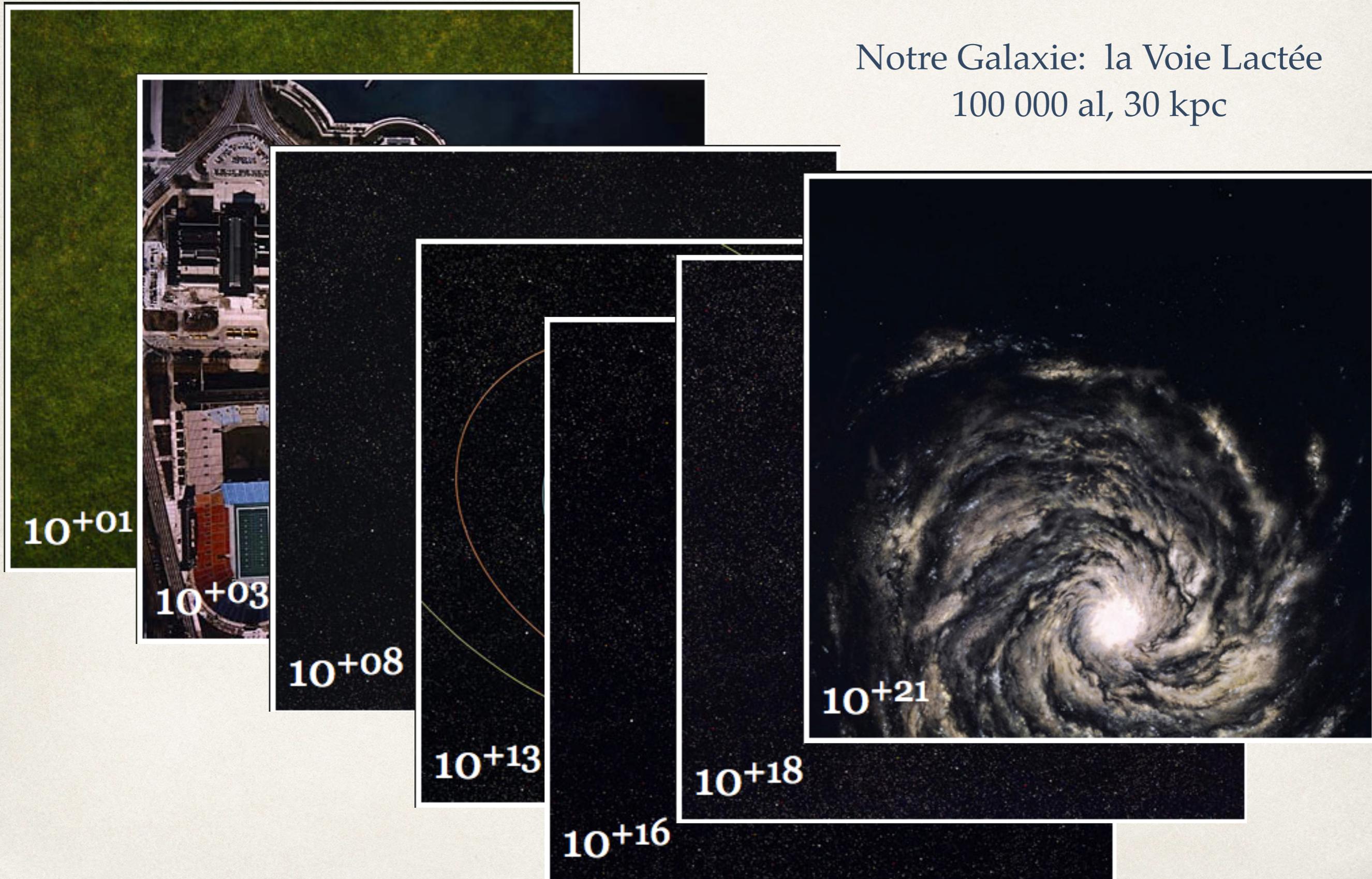
$p=0.8''$

Arcturus: 37 al, 11pc

$p=0.1''$

“the power of tens” (Charles & Ray Eames, 1977)

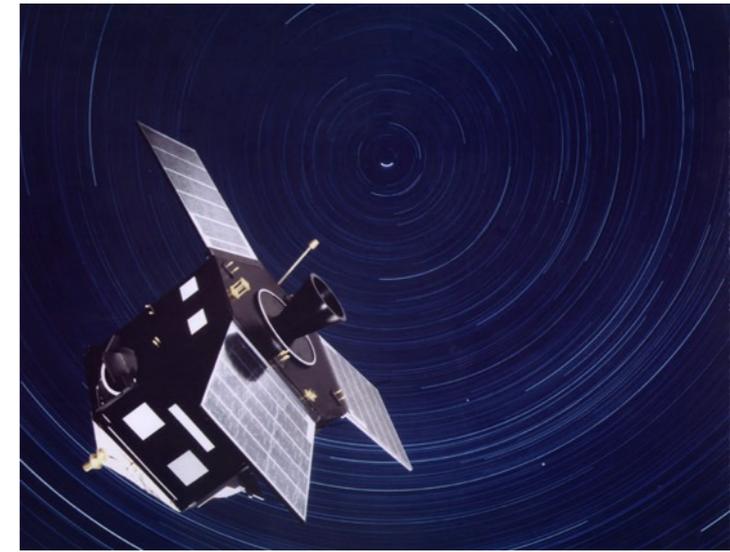
Notre Galaxie: la Voie Lactée
100 000 al, 30 kpc



Missions de mesures de parallaxes

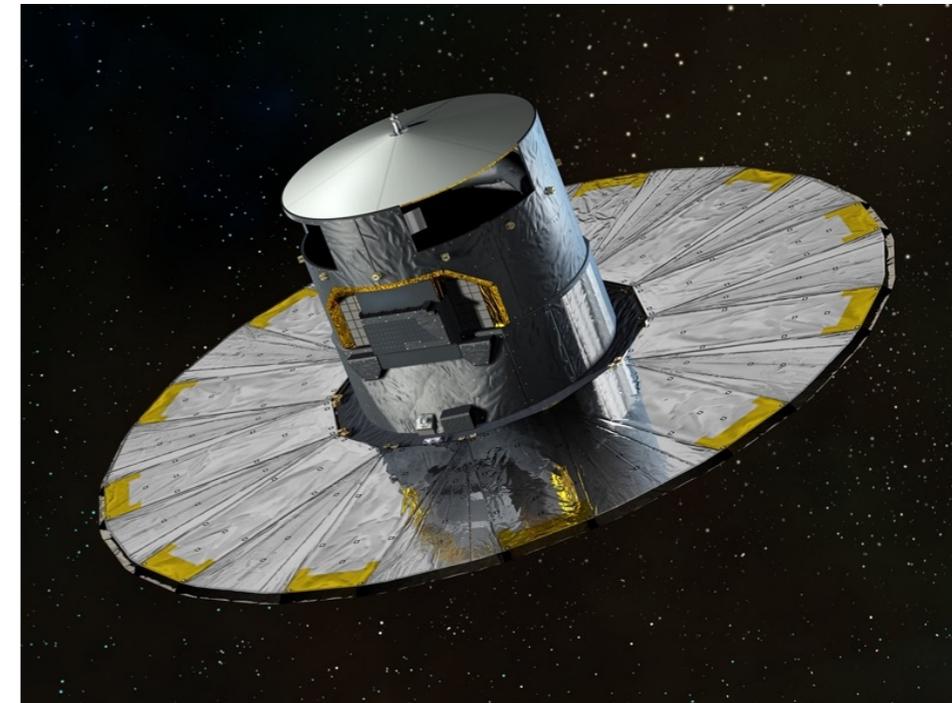
- **Hipparcos**

- mesure des mouvements apparents des 120 000 étoiles les plus brillantes à la précision de 1 mas (milli-arcsec)
- 3 catalogues: Hipparcos, Tycho -1 et -2
- mouvement propres de 2.5 millions d'étoiles
- lancé en 1989, fin en 1993

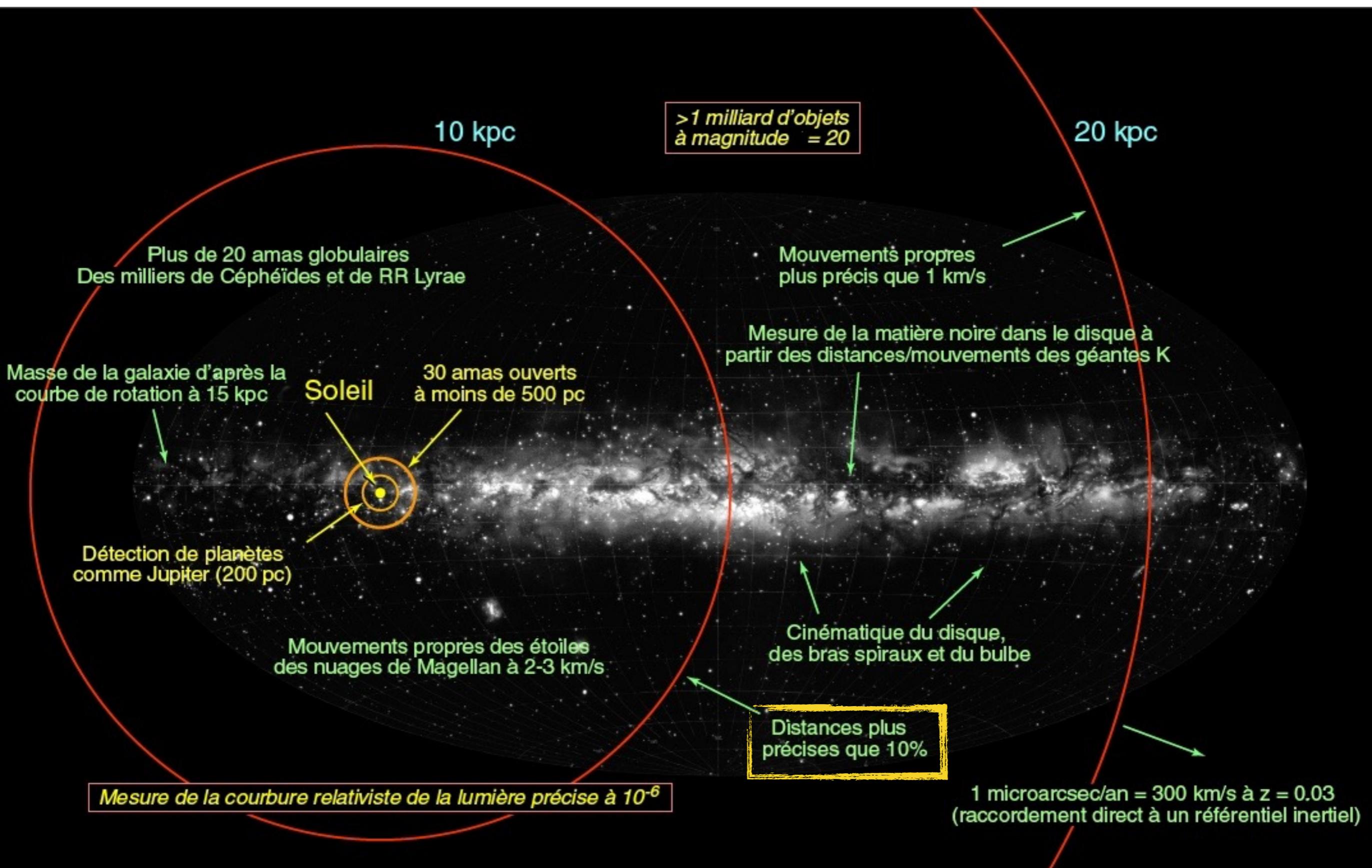


- **GAIA**

- 50 fois plus précis
- lancée en décembre 2013, fin en 2019?
- Première diffusion des données septembre 2016
 - positions d'1 milliard d'étoiles
 - mouvements propres de 2 millions d'étoiles



- Rôle important du CDS dans ces missions pour la diffusion des données



10 kpc

>1 milliard d'objets
à magnitude = 20

20 kpc

Plus de 20 amas globulaires
Des milliers de Céphéïdes et de RR Lyrae

Mouvements propres
plus précis que 1 km/s

Masse de la galaxie d'après la
courbe de rotation à 15 kpc

Soleil

30 amas ouverts
à moins de 500 pc

Mesure de la matière noire dans le disque à
partir des distances/mouvements des géantes K

Détection de planètes
comme Jupiter (200 pc)

Mouvements propres des étoiles
des nuages de Magellan à 2-3 km/s

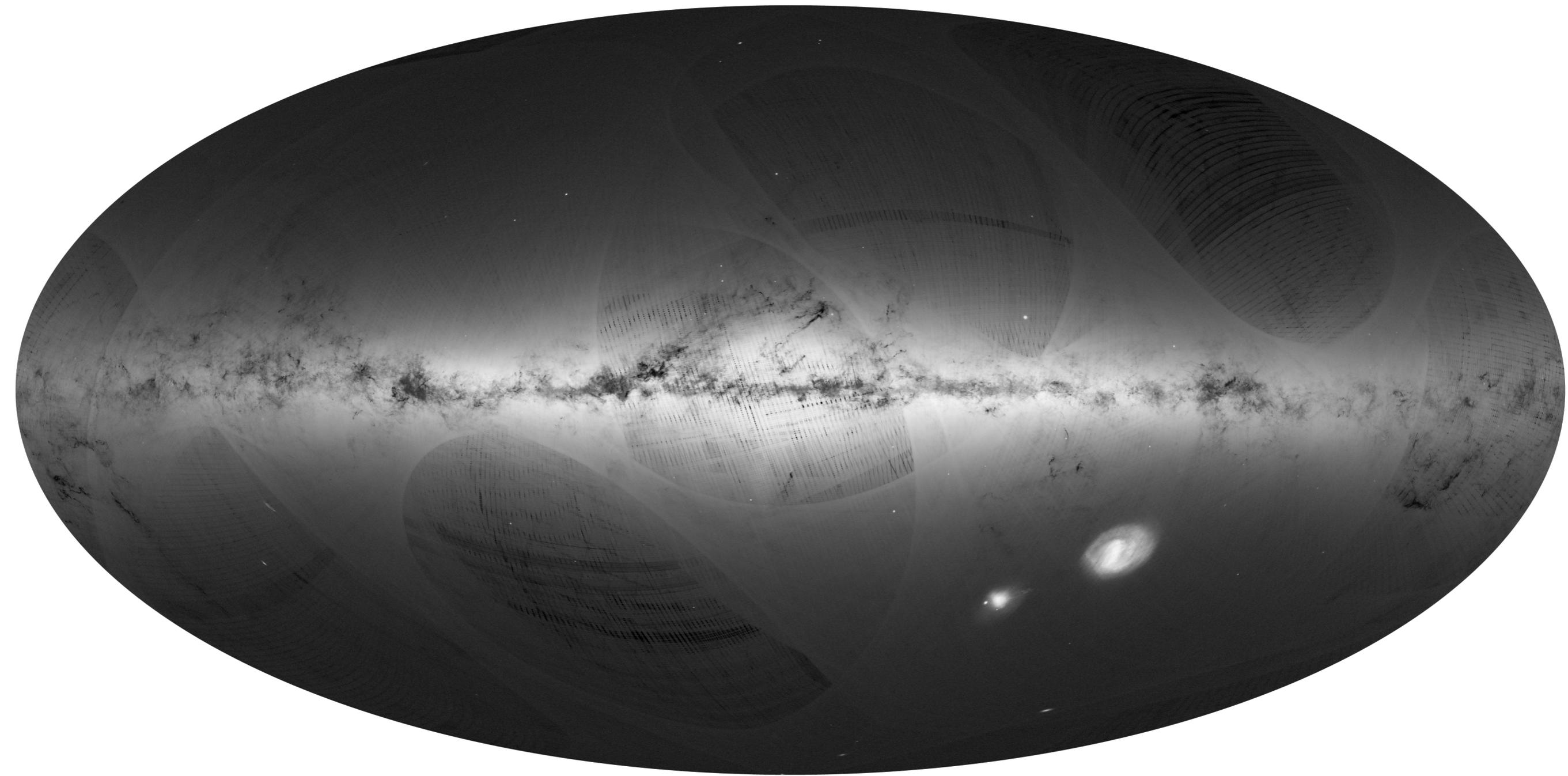
Cinématique du disque,
des bras spiraux et du bulbe

Distances plus
précises que 10%

Mesure de la courbure relativiste de la lumière précise à 10^{-6}

1 microarcsec/an = 300 km/s à $z = 0.03$
(raccordement direct à un référentiel inertiel)

positions précises de plus d'un milliard d'étoiles
mouvements de plus de 2 millions d'étoiles



Credit: ESA/Gaia/DPAC. Acknowledgement: A. Moitinho & M. Barros (CENTRA – University of Lisbon), F. Mignard (Observatoire de la Côte d'Azur), on behalf of DPAC

et quand on ne peut plus utiliser les parallaxes?

- **luminosité** d'une étoile: énergie émise par seconde, quantité intrinsèque
- **brillance**: quantité d'énergie qui arrive par seconde par unité de surface d'un détecteur (ex: sur un cm²)

$$B = \frac{L}{4\pi d^2}$$

la brillance dépend de la distance de l'étoile



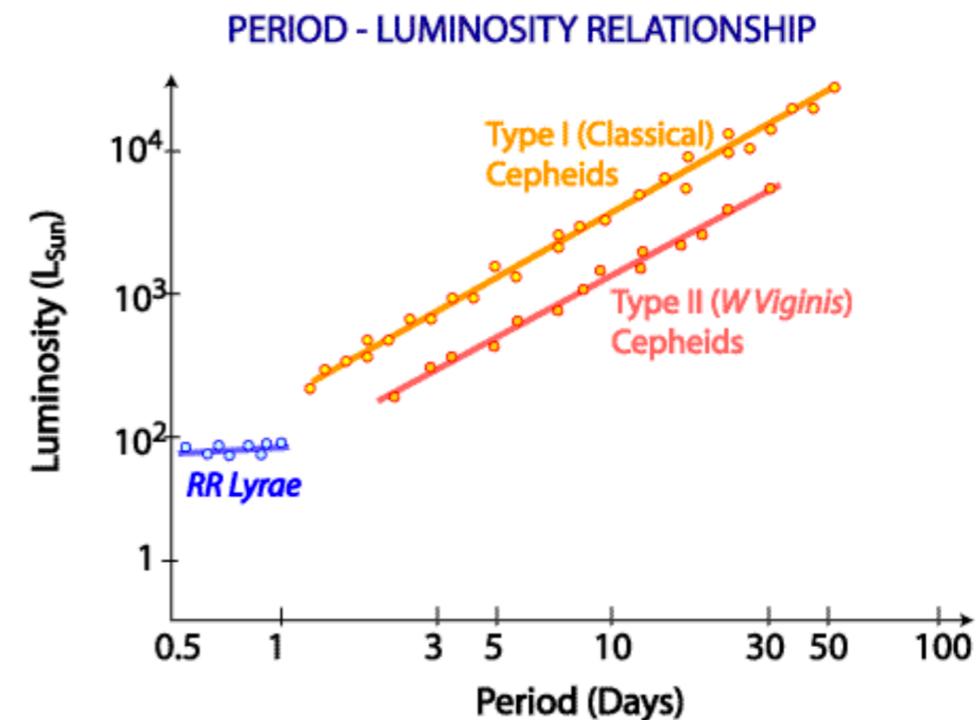
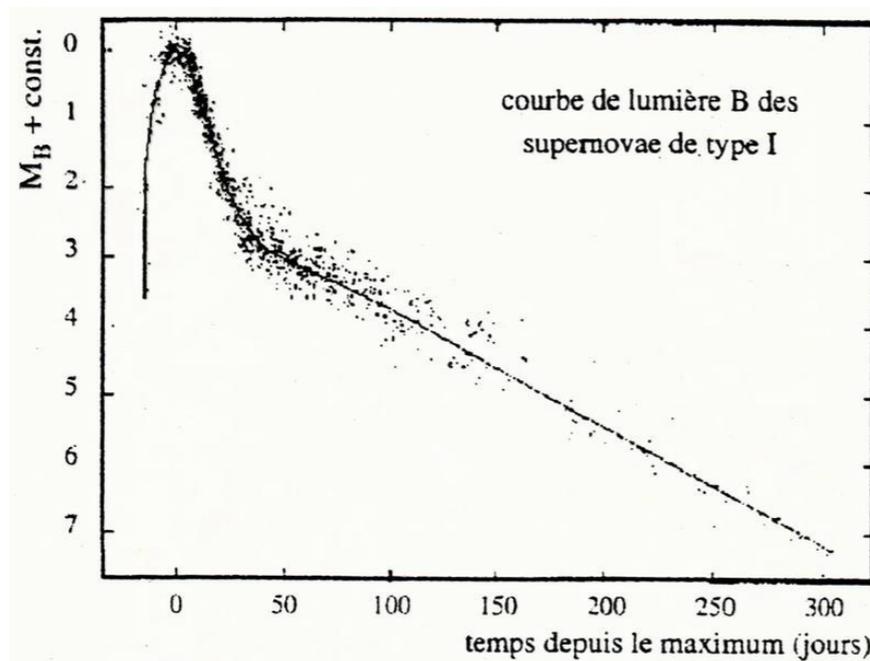
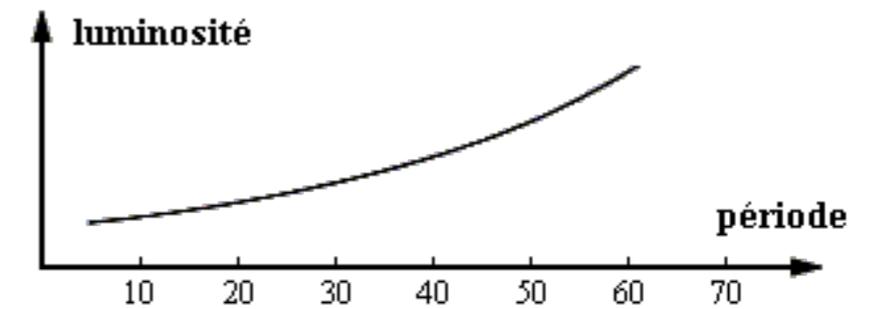
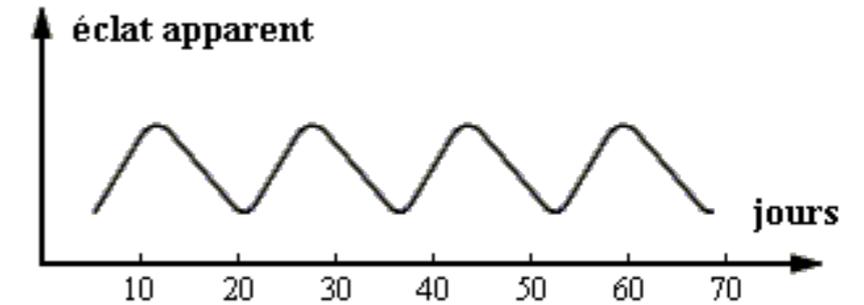
d

L

Si on connaît la **luminosité** d'une étoile et que l'on observe sa **brillance**, alors on connaît sa **distance**

Si on connaît la **luminosité** d'une étoile et que l'on observe sa **brillance**, alors on connaît sa **distance**

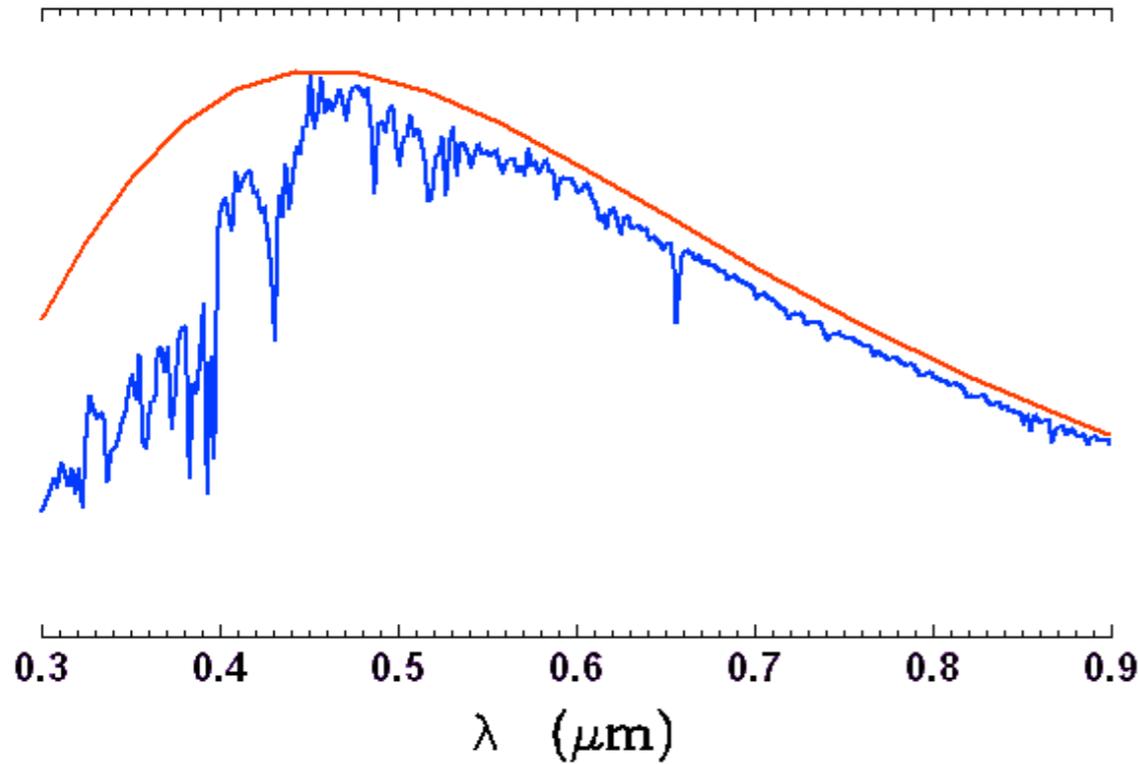
- Quand connaît-on la luminosité?
 - pour certaines étoiles variables (Céphéides, RR Lyrae, ...), il existe une **relation** entre leur **période** et leur **luminosité**
 - Certaines **novae** ou **supernovae** ont des **luminosités caractéristiques**



- Notre connaissances des étoiles montre qu'il existe un **lien entre leur couleur et leur luminosité**

Emission des étoiles

Spectre stellaire

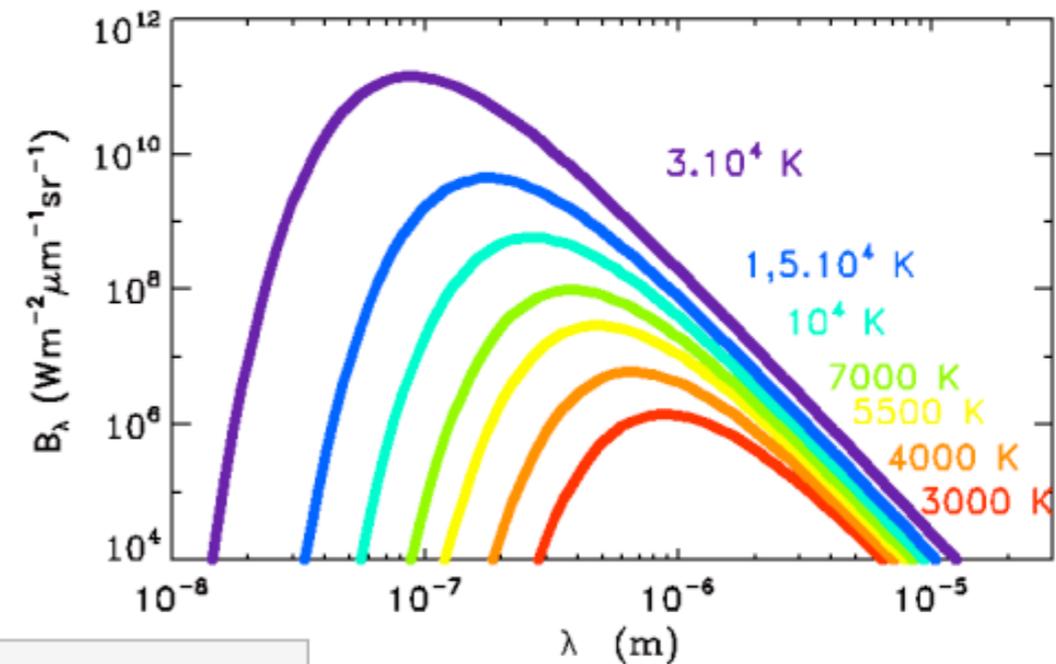


Spectre stellaire (type G2) à basse résolution. Il se superpose approximativement à un spectre de corps noir de température 5700 K, sauf dans le domaine UV.

Crédit : [Astrophysique sur Mesure](#)

corps noirs

+ absorption/emission de l'atmosphère stellaire



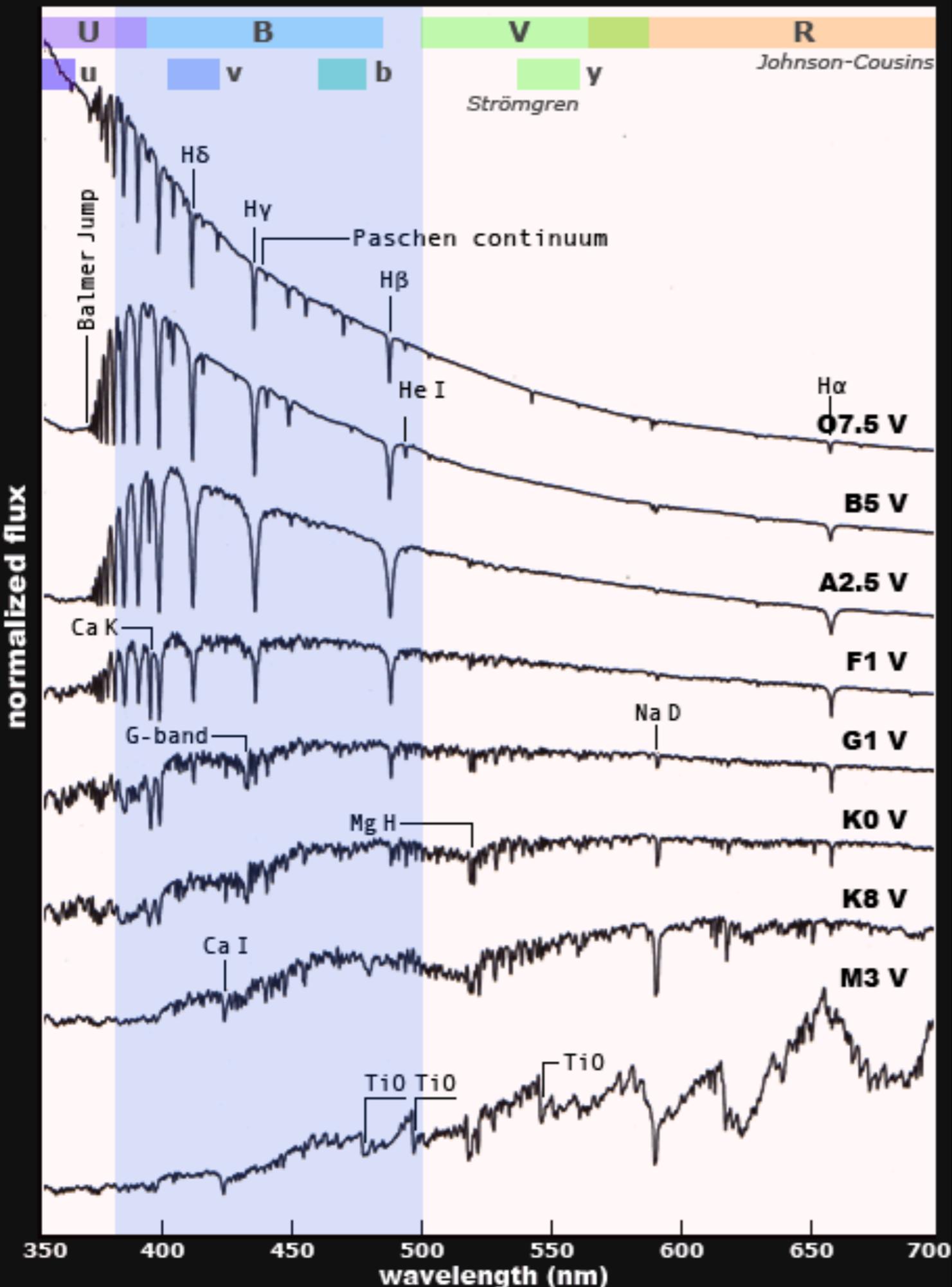
Crédit : [Astrophysique sur Mesure](#)

Classe	température ¹	couleur	raies d'absorption
O	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
B	10 000 - 25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène
A	7 500 - 10 000 K	blanche	hydrogène
F	6 000 - 7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	5 000 - 6 000 K	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 500 - 5 000 K	jaune-orange	métaux et monoxyde de titane
M	< 3 500 K	rouge	métaux et monoxyde de titane

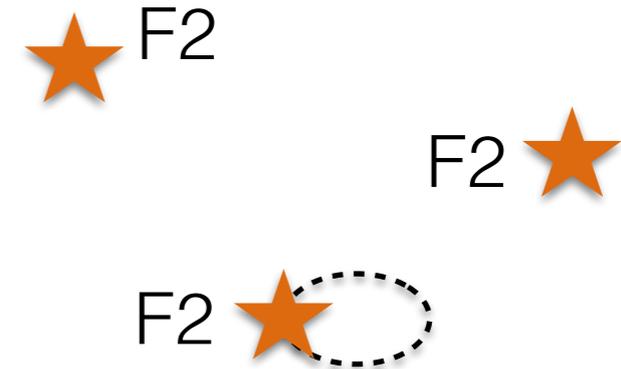
source: wikipedia

c.f. cours sur les étoiles et l'évolution stellaire

a sequence of stellar flux profiles



La largeur et la profondeur des raies d'un spectre stellaire dépendent du type spectral de l'étoile et donc de sa luminosité



On prend une étoile (par exemple de type F2) pour laquelle on a mesuré la parallaxe et dont on connaît donc la distance.

Toutes les autres étoiles F2 auront la même luminosité

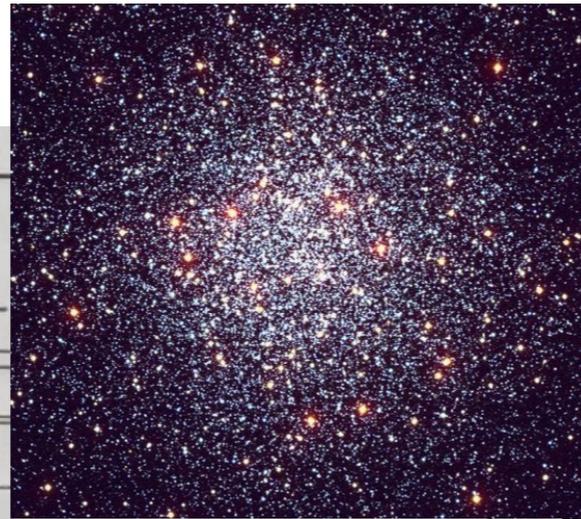
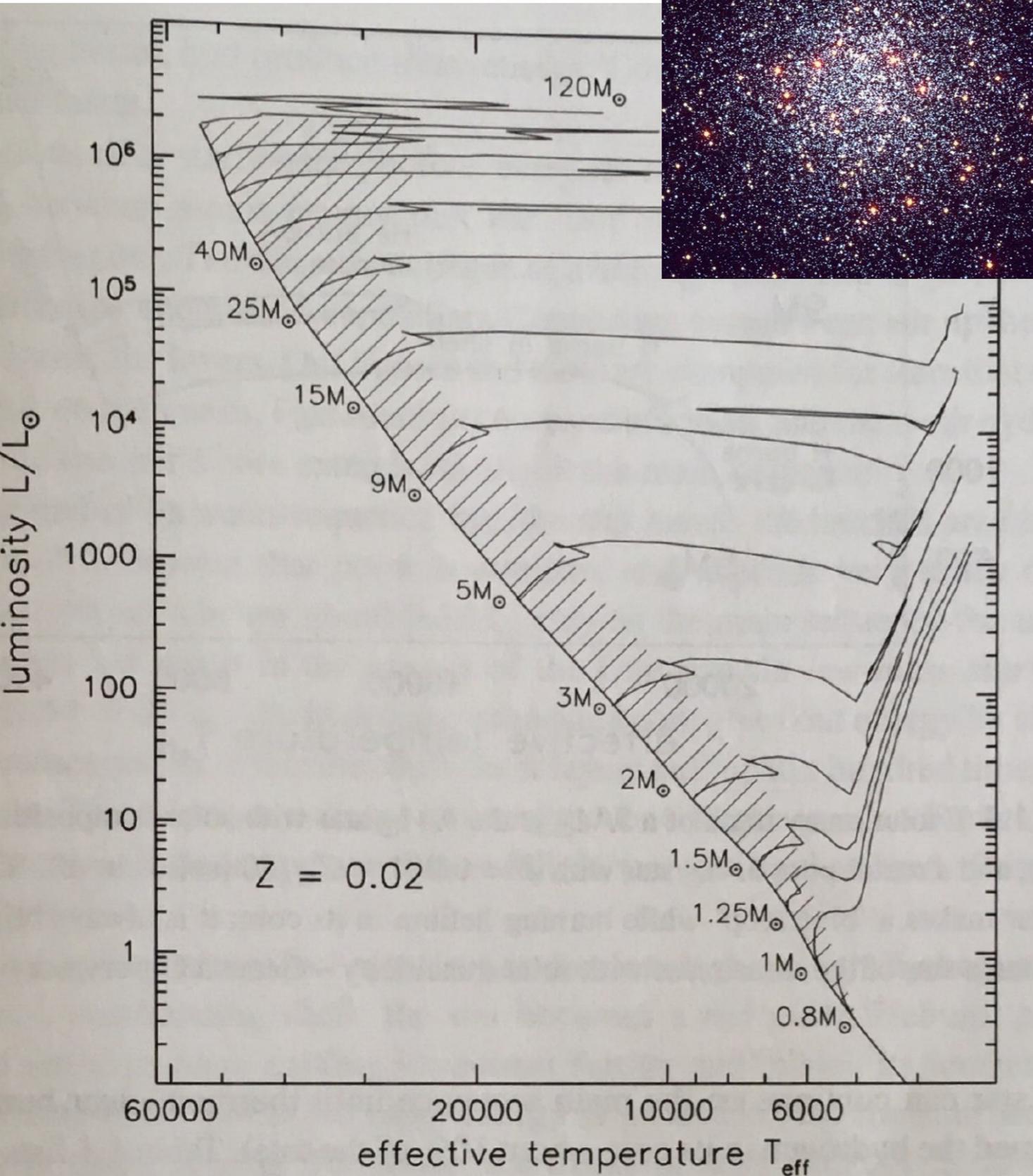
$$B = \frac{L}{4\pi d^2}$$

En mesurant la brillance de toute autre étoile de type F2 et en corrigeant de l'extinction, on connaît alors sa distance

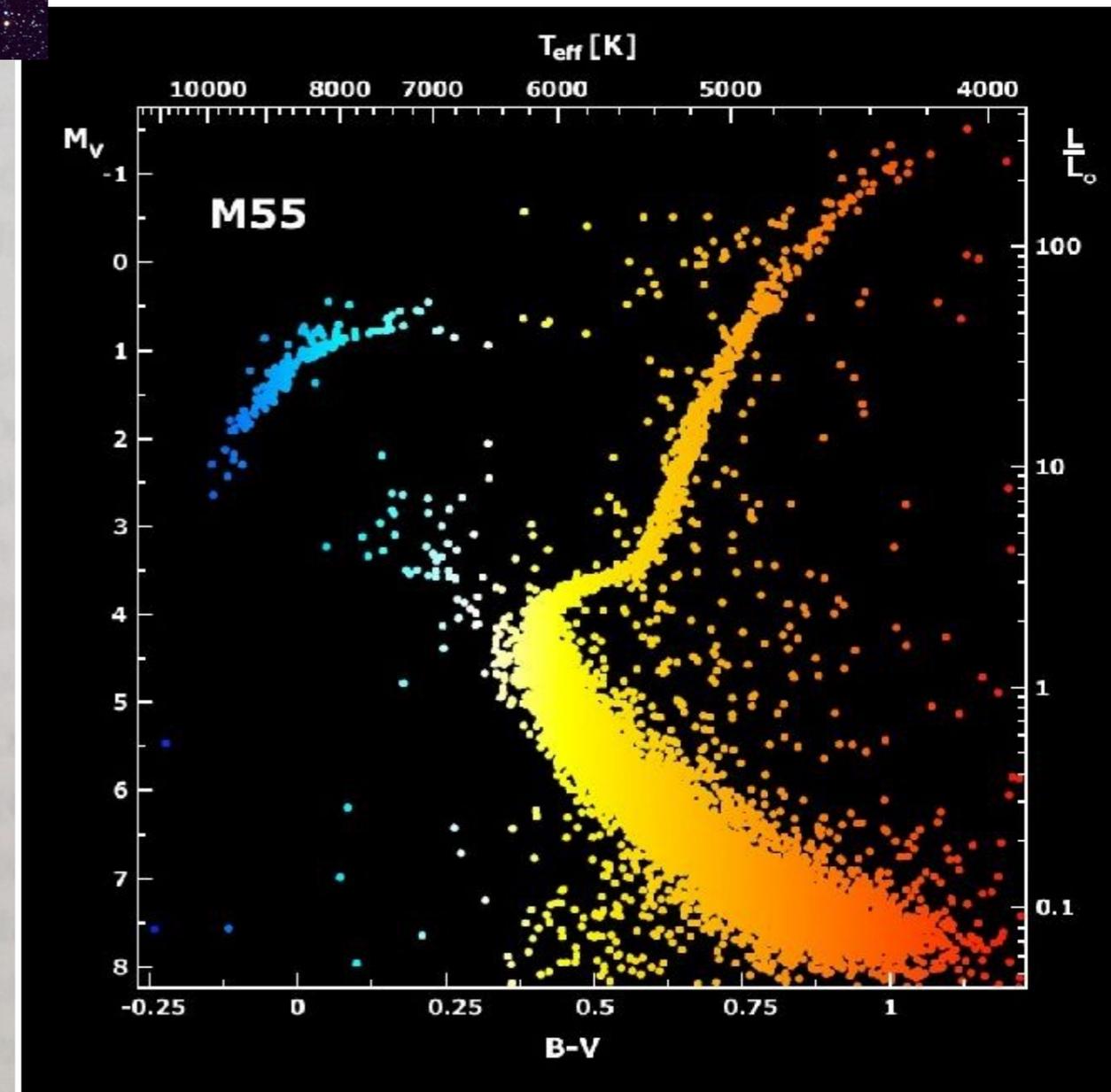
parallaxe
spectroscopique

parallaxe photométrique

On estime le type spectral à partir de la couleur des étoiles

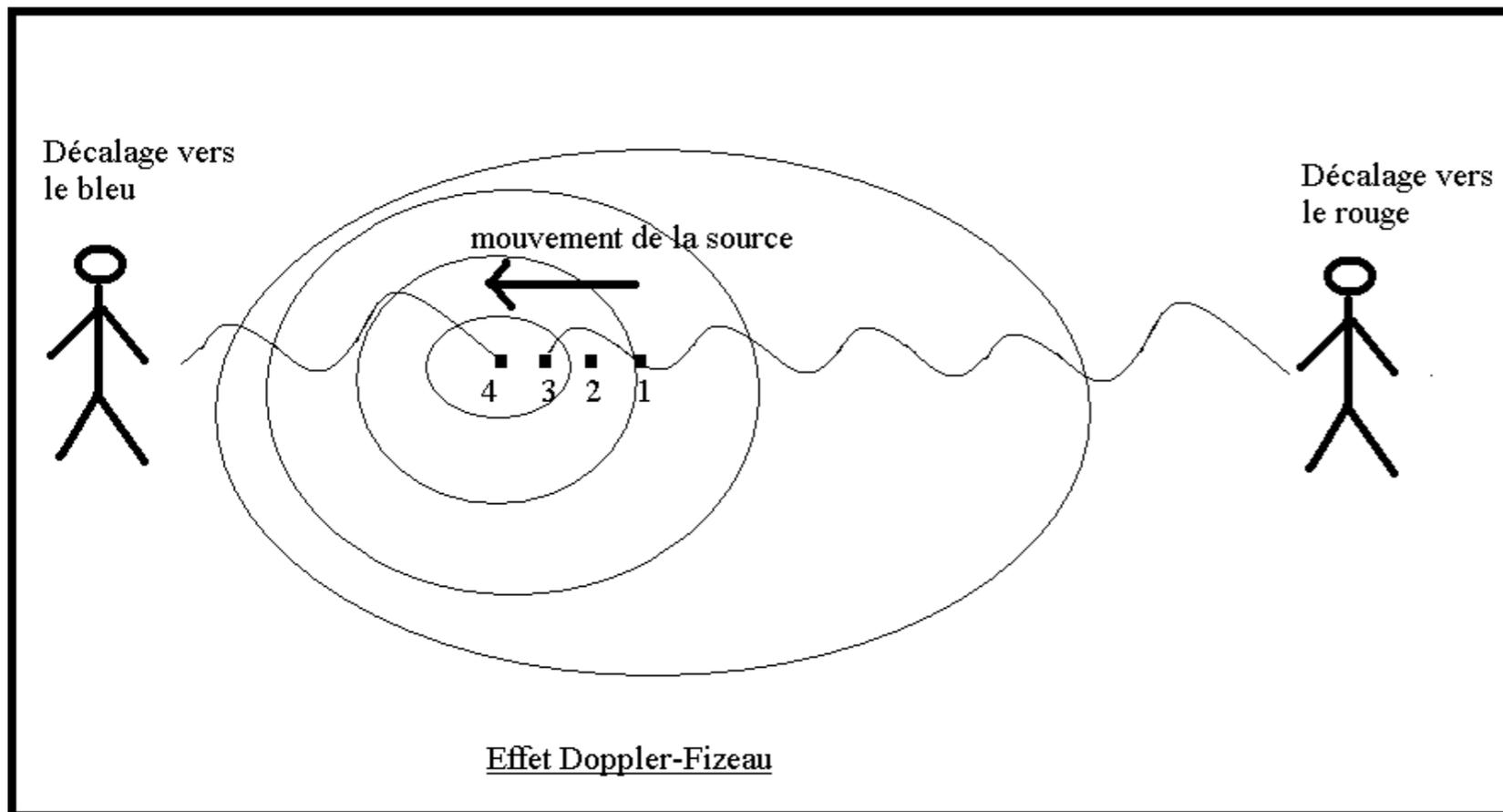
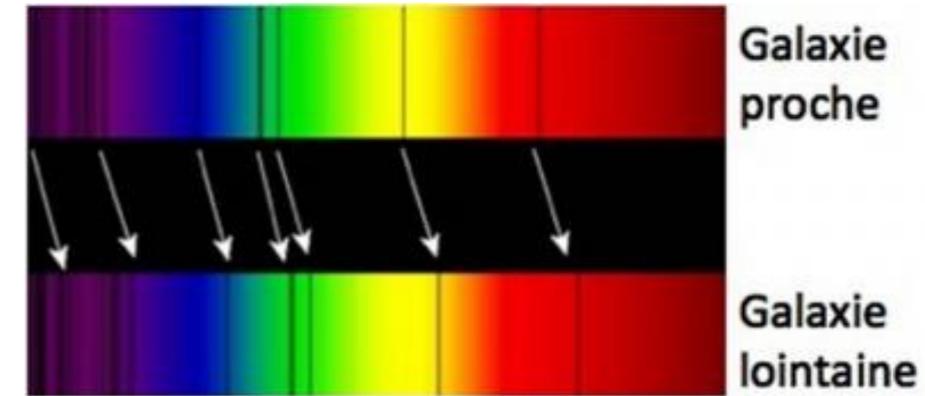


Si on a un ensemble d'étoiles que l'on pense être à la même distance (comme un amas), en utilisant des modèles d'évolution stellaire, on va pouvoir déterminer la distance (mais aussi âge, extinction, etc...)



Décalage vers le rouge

- Les vitesses radiales (vers vous ou en s'éloignant de vous) sont mesurées par **effet Doppler**
 - décalage des raies d'émission ou d'absorption dans le spectre des étoiles ou du gaz



$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{observée}}}{\lambda_{\text{émise}}} = 1 + \frac{V_r}{c}$$

Quand on regarde les galaxies, leurs spectres sont décalés vers le rouge.

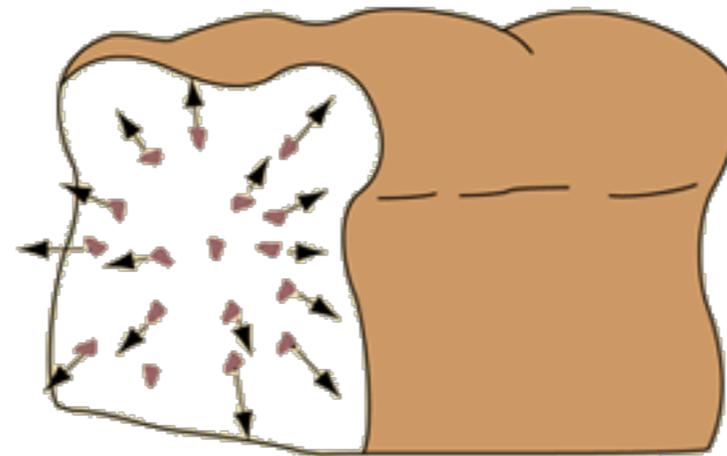
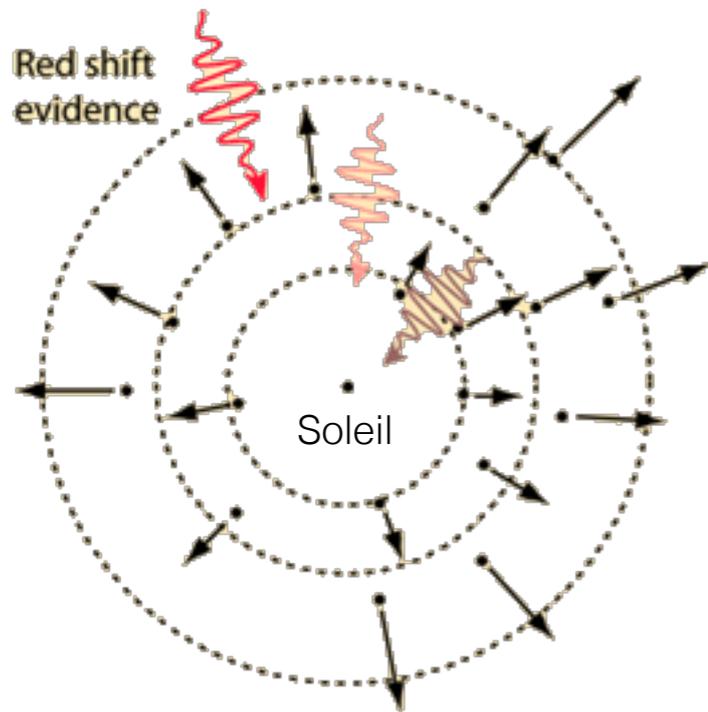
On mesure le **redshift**.
On observe l'**expansion de l'Univers**

Loi de Hubble

- Les galaxies s'éloignent de nous
- Observée par Edwin Hubble en 1929
- $v = H_0 d$

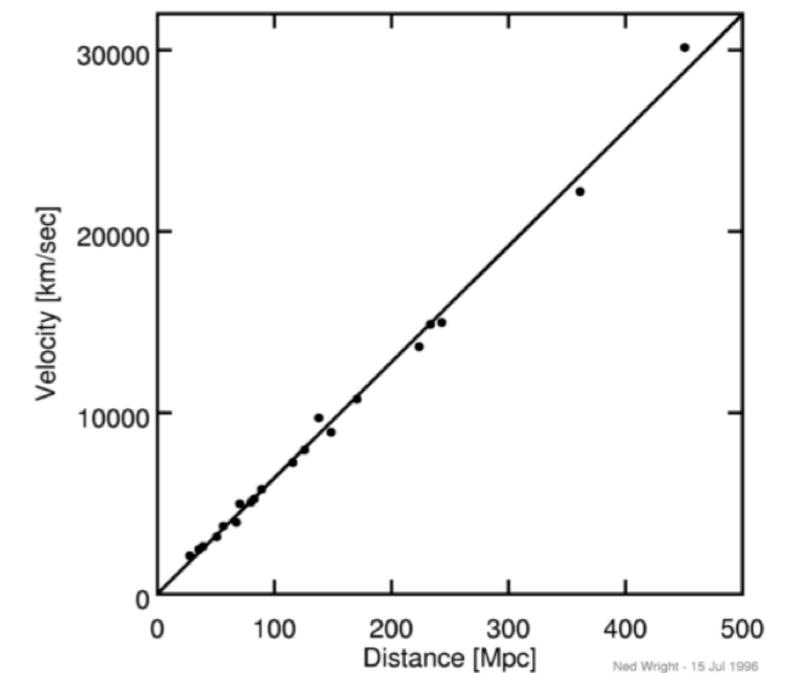
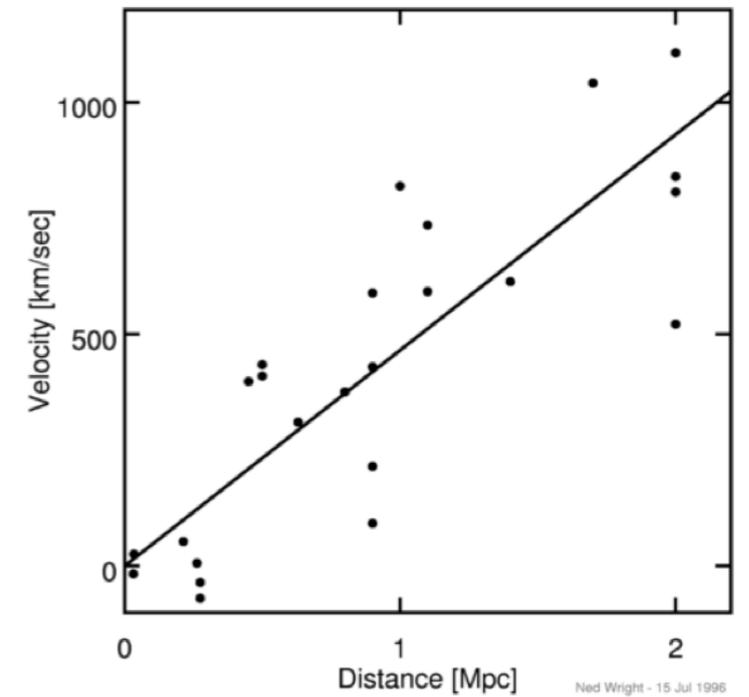


Univers en expansion

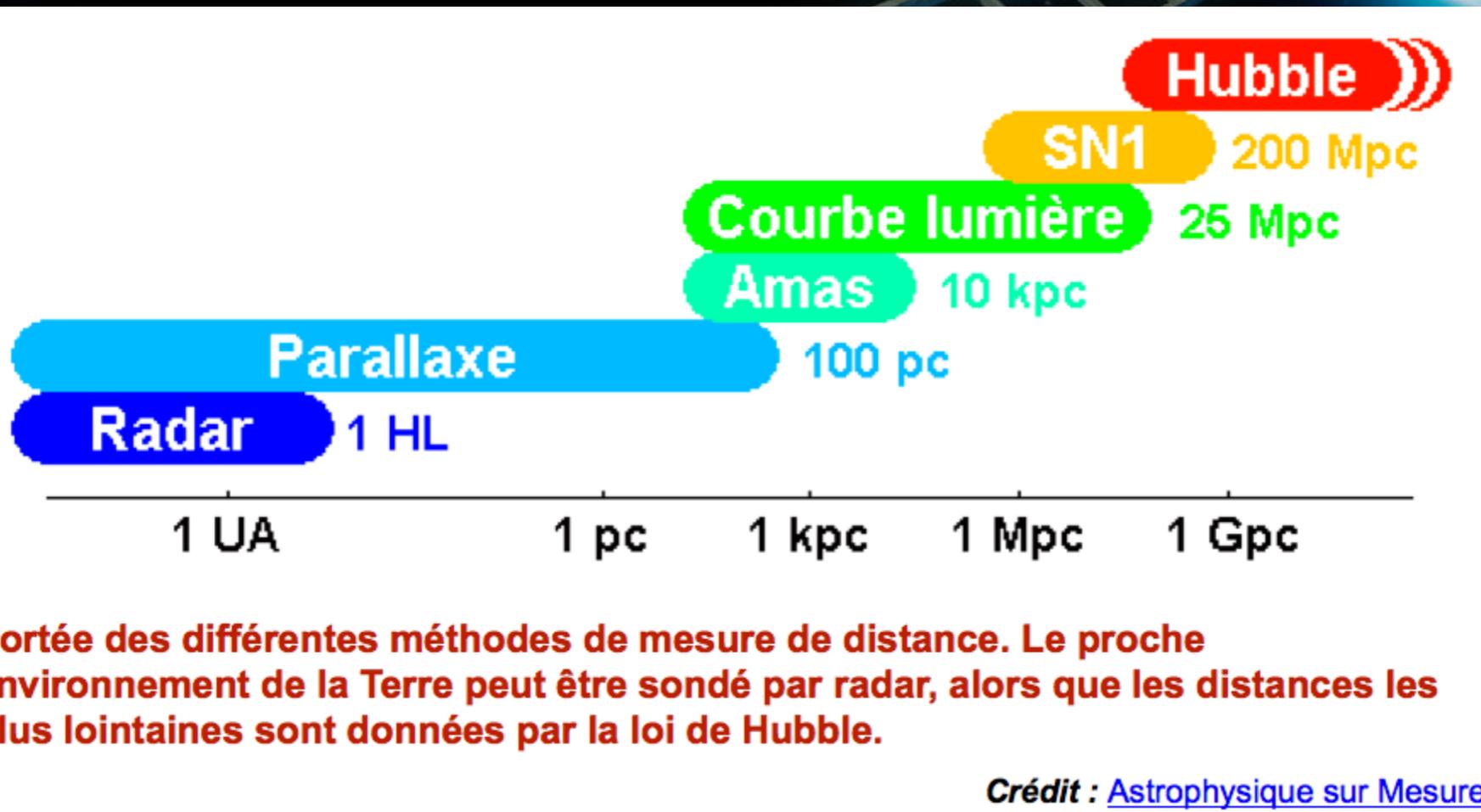


Chaque raisin dans ce pain en expansion voit les autres raisins s'éloigner de lui

$$H = 71 \text{ km/s/Mpc}$$



Echelle de distances



chaque méthode est calibrée à la précédente dans les zones de recouvrement

Partie 2: la Galaxie avec un grand G

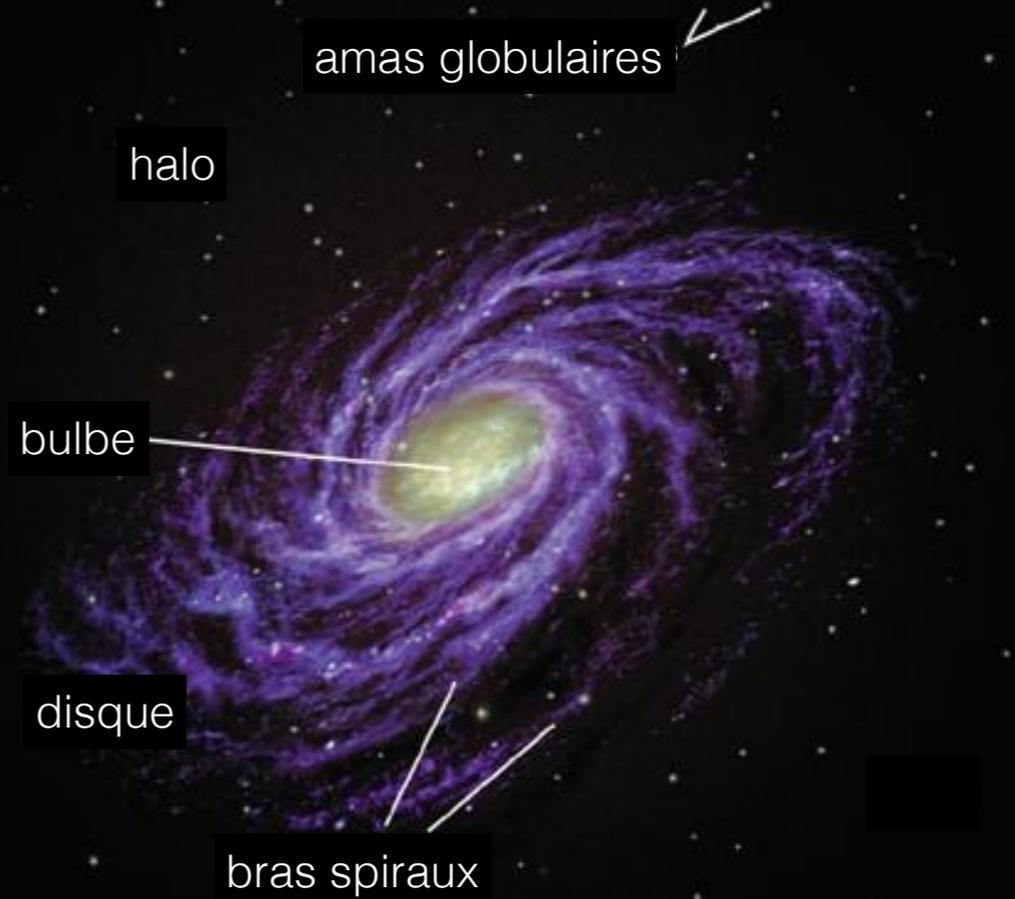


La Terre et la Voie Lactée vues depuis la station spatiale

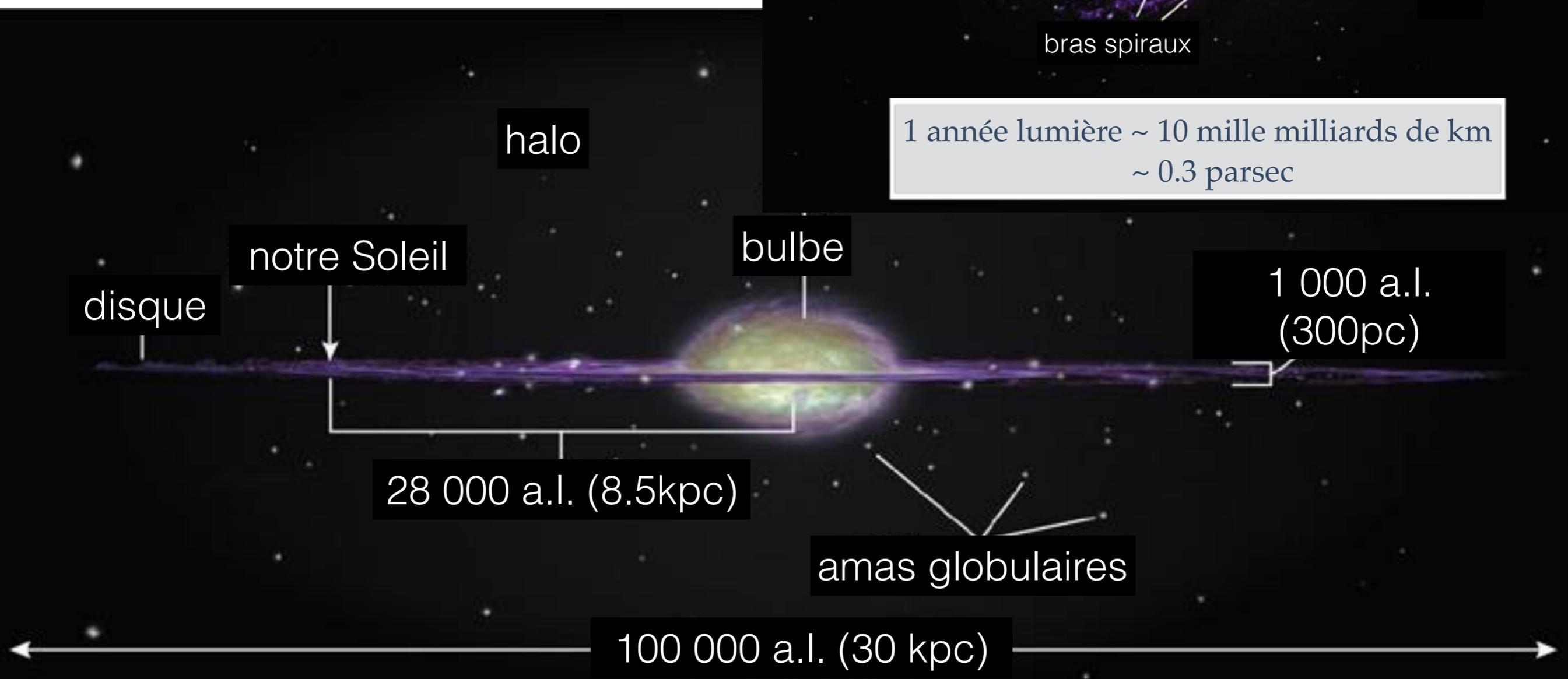
Notre galaxie contient quelque 200 à 400 milliards d'étoiles.

Sa masse stellaire est donc d'environ 10^{11} masses solaires.

Le soleil fait un tour en environ 226 millions d'années. (A une vitesse de 240km/s)



1 année lumière ~ 10 mille milliards de km
~ 0.3 parsec

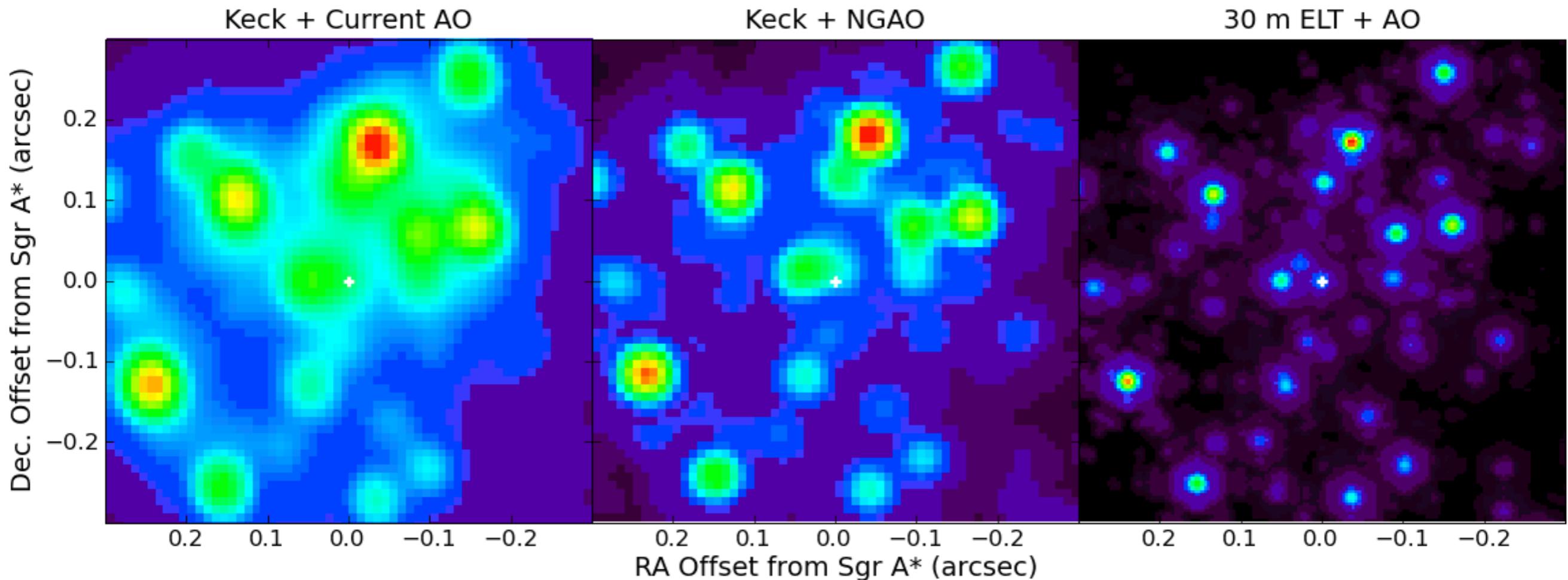
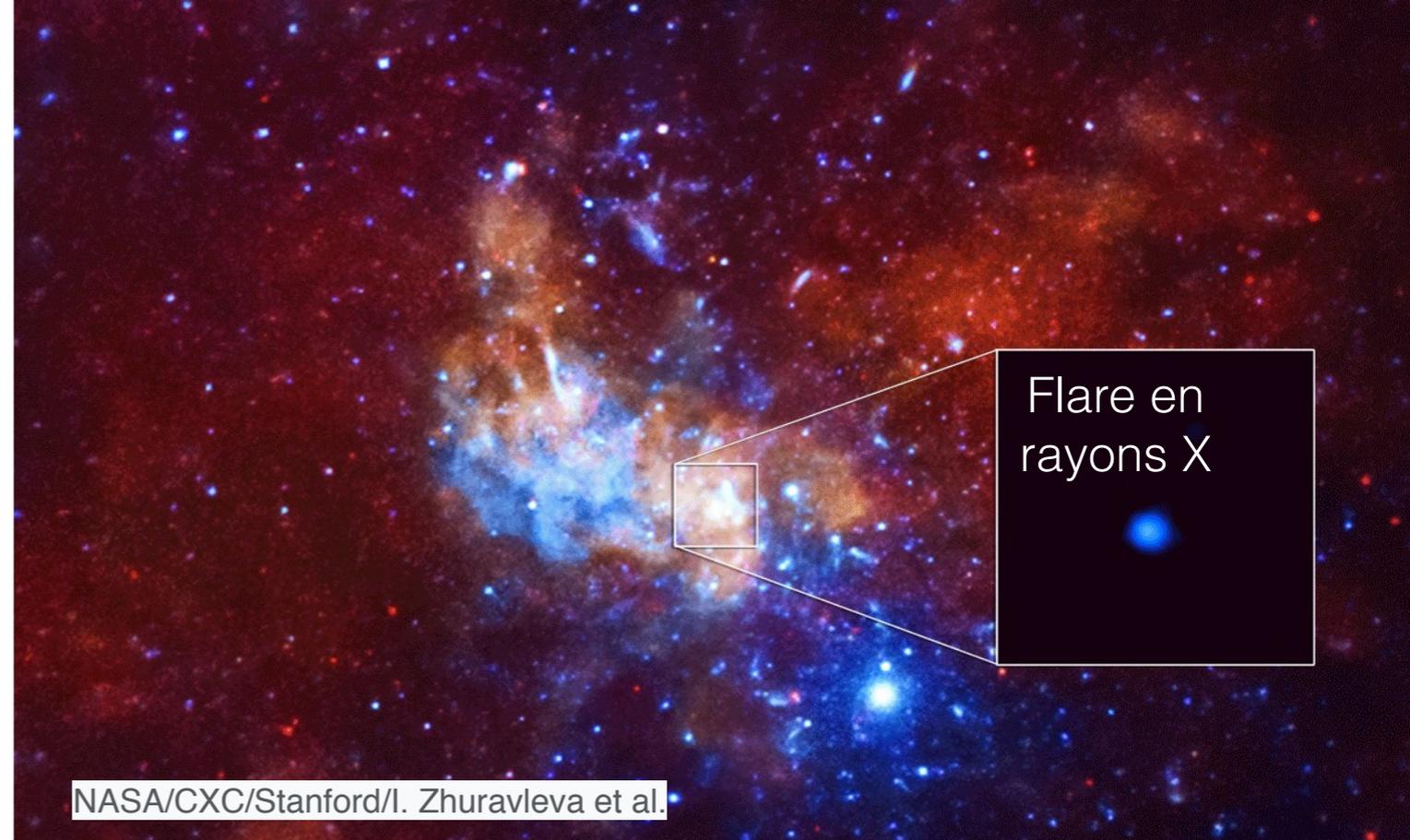


2MASS Covers the Sky



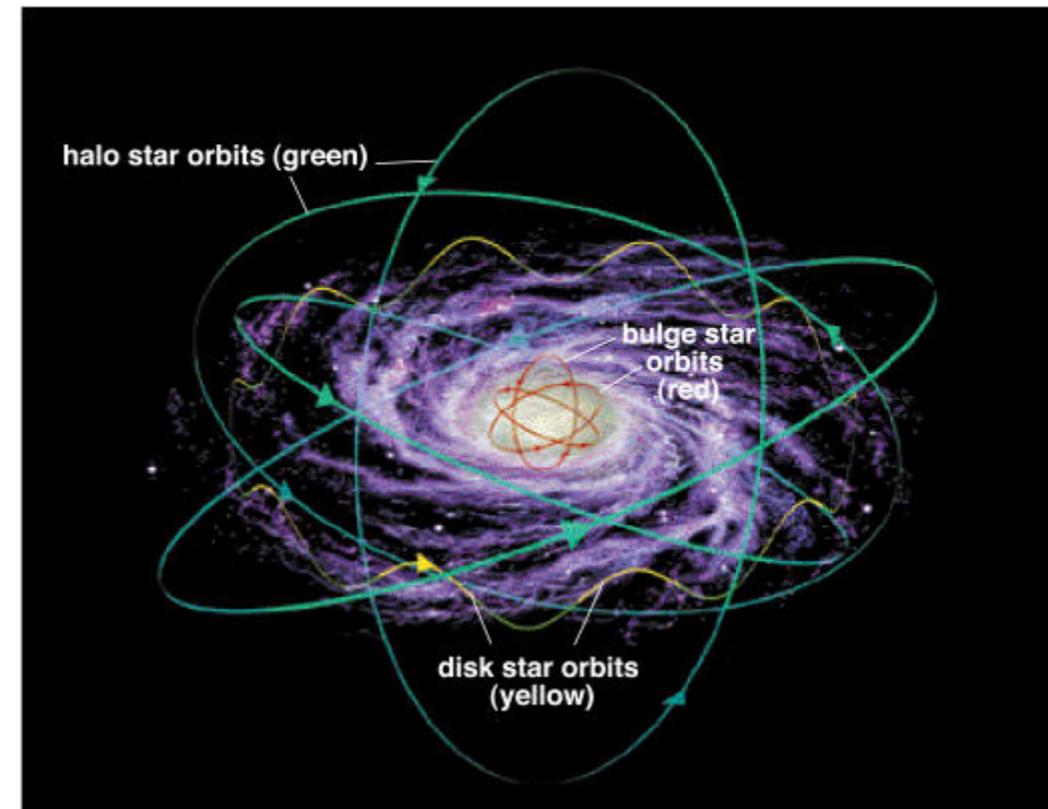
- Nous sommes dans le disque de la galaxie et pas au centre. Le disque stellaire est mince et grosso modo circulaire
- Le **disque mince** contient 95% des étoiles et toutes les étoiles jeunes et massives. Le reste des étoiles forment le **disque épais**. Les étoiles du disque épais ont été formées précédemment dans l'histoire de la galaxie. Les étoiles sont plus vieilles et plus pauvres en métaux
- Nuages sombres: concentrations de **poussières** et de **gaz** dense. Le gaz et la poussière sont dans une couche encore plus mince que le disque mince des étoiles.
- Au centre, on voit le **bulbe** qui s'étend en dessous et au dessus du disque

Au centre de la Galaxie, il y a un noyau dense d'étoiles contenant une source radio (Sagittarius A*) et un trou noir de $\sim 10^6 M_{\odot}$



rotation et matière noire

- Le disque de la Voie Lactée et le bulbe sont en **rotation**.
- Les étoiles du **disque** suivent des **orbites quasi-circulaires** autour du centre galactique ($v \sim 200$ km/s) avec des mouvements supplémentaires de qq dizaines de km/s
- Les étoiles du **bulbe** vont plus lentement ($v \sim 100$ km/s) et ont des **composantes aléatoires plus grandes**
- Les étoiles et les amas du **halo** n'ont pas de rotation organisée autour du centre galactique. Leurs orbites ont des **directions aléatoires** et sont souvent **excentriques** (les étoiles passent beaucoup de temps dans les parties extérieures de la galaxie)



$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- En mesurant les vitesses du gaz, des étoiles ou des amas, on trouve que la masse nécessaire pour les maintenir en orbite est bien plus grande que celle contenue dans le gaz et les étoiles.
- La plupart de la masse de la galaxie semble ainsi être >10 kpc du centre, là où il y a relativement peu d'étoiles
- Vrai pour presque toutes les galaxies
- **Matière noire.**
 - halo quasi-sphérique.
 - Nature actuellement inconnue. Autre possibilité étudiée: changement des lois de la gravitation (exp: MOND)

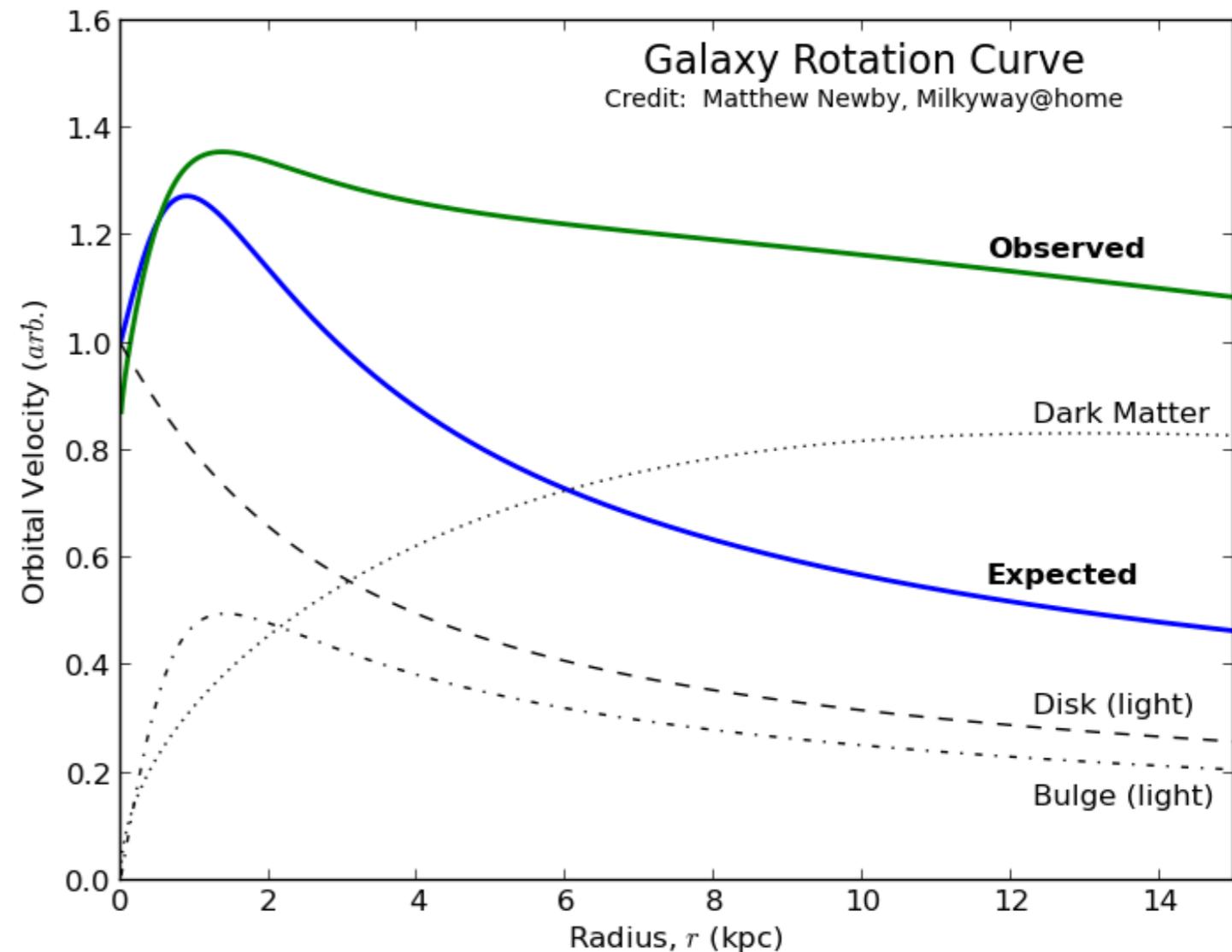
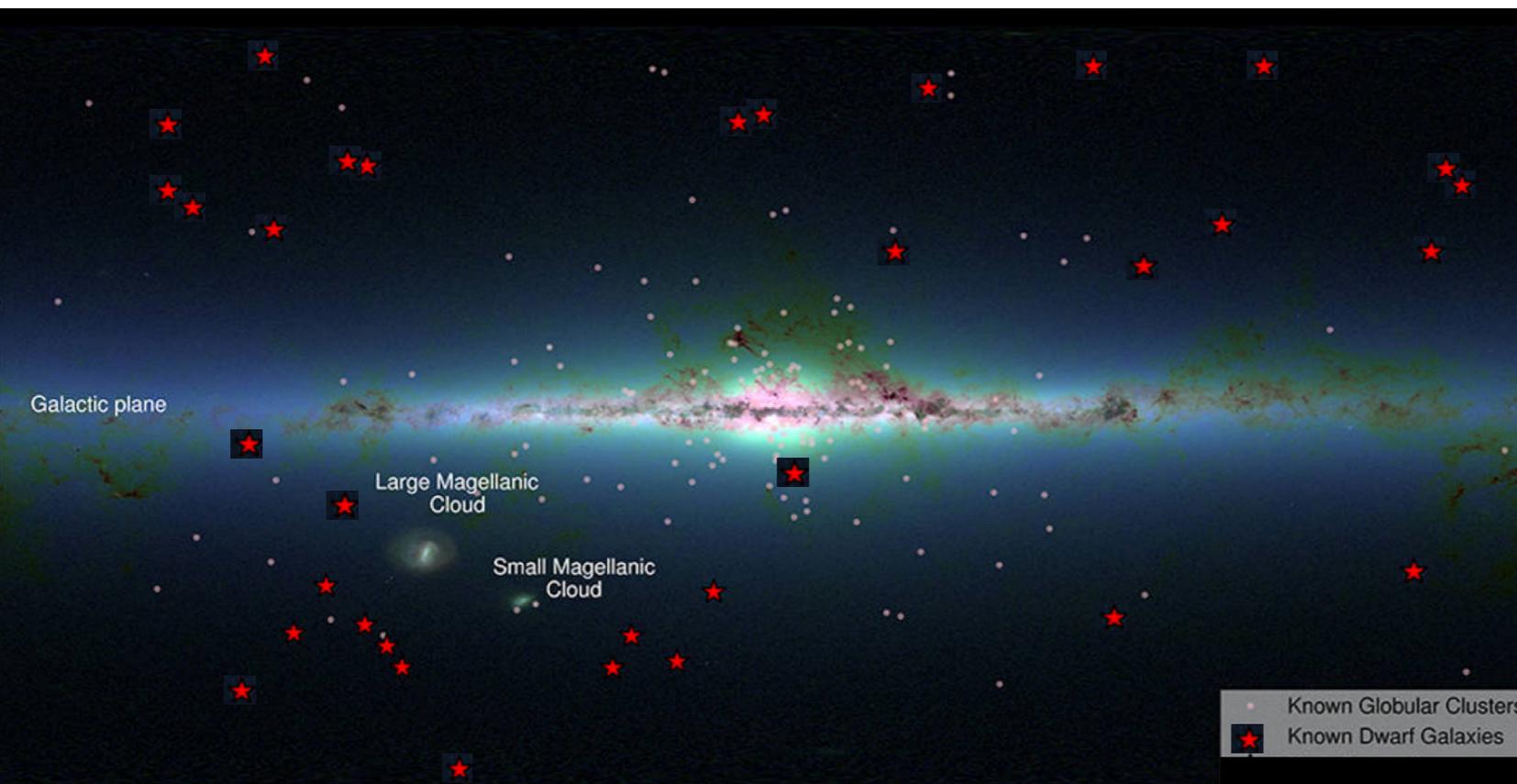




Image Credit & Copyright: Miloslav Druckmuller (Brno University of Technology)

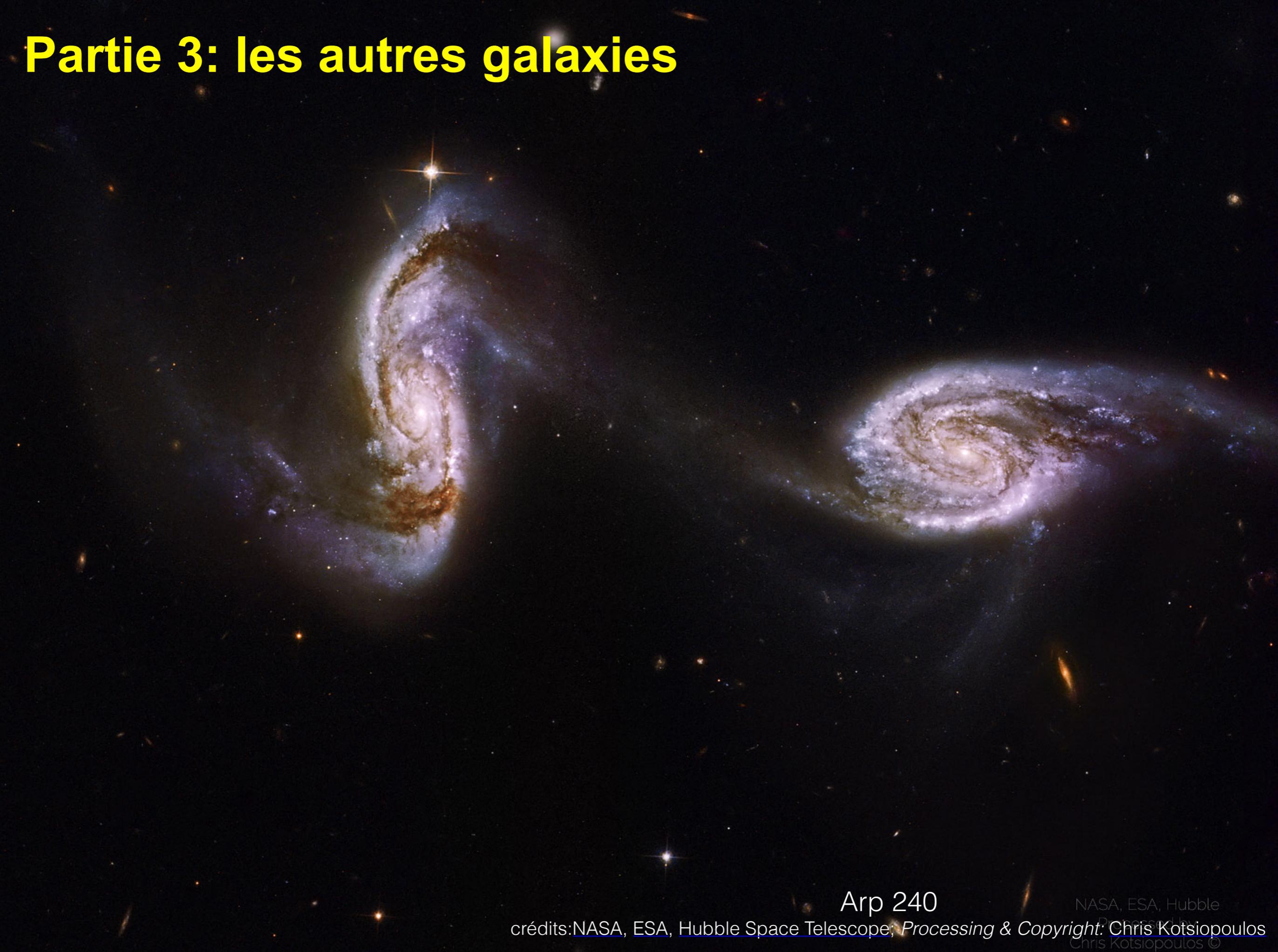
Notre galaxie et ses satellites

- galaxies naines
- très faibles, petites



Name	Diameter (kpc) ⇄	Distance (kpc) ⇄	Type ⇄	Discovered ↗
Large Magellanic Cloud	4	48.5	SBm	prehistoric
Small Magellanic Cloud	2	61	Irr	prehistoric
Sculptor Dwarf	0.8	90	dE3	1937
Fornax Dwarf	0.6	140	dE2	1938
Leo II	0.7	210	dE0	1950
Leo I	0.5	250	dE3	1950
Ursa Minor Dwarf	0.4	60	dE4	1954
Draco Dwarf	0.7	80	dE0	1954
Carina Dwarf Spheroidal	0.5	100	dE3	1977
Sextans Dwarf Spheroidal	0.5	90	dE3	1990
Sagittarius Dwarf	2	20	E	1994
Canis Major Dwarf	1.5	8	Irr	2003
Ursa Major I Dwarf	-	100	dG D	2005
Ursa Major II Dwarf	0.2	30	dG D	2006
Leo IV	0.3	160	dSph	2006
Leo T	0.34	420	dSph/dIrr	2006
Boötes I	0.3	60	dSph	2006
Coma Berenices	0.14	42	dSph	2006
Canes Venatici I	2	220	dSph	2006
Canes Venatici II	0.3	155	dSph	2006
Hercules	0.7	135	dSph	2006
Leo V	0.08	180	dSph	2007
Boötes II	0.1	42	dSph	2007
Segue 2	0.07	35	dSph	2007
Boötes III	1	46	dSph?	2009
Pisces II	0.12	180	dSph	2010
Grus	-	120	dSph	2015 [6]
Eridanus II	-	380	dSph	2015 [6] [7]
Tucana II	-	70	dSph	2015 [6] [7]
Horologium	-	100	dSph?	2015 [6] [7] [a]
Pictoris	-	115	dSph?	2015 [6] [7] [a]
Phoenix II	-	100	dSph?	2015 [6] [7] [a]
Eridanus III	-	90	dSph?	2015 [6] [7] [a]
Reticulum II	-	30	dSph	2015 [6][7]
Kim 2/Indus I	-	100	dSph?	2015 [8] [6] [7] [a]

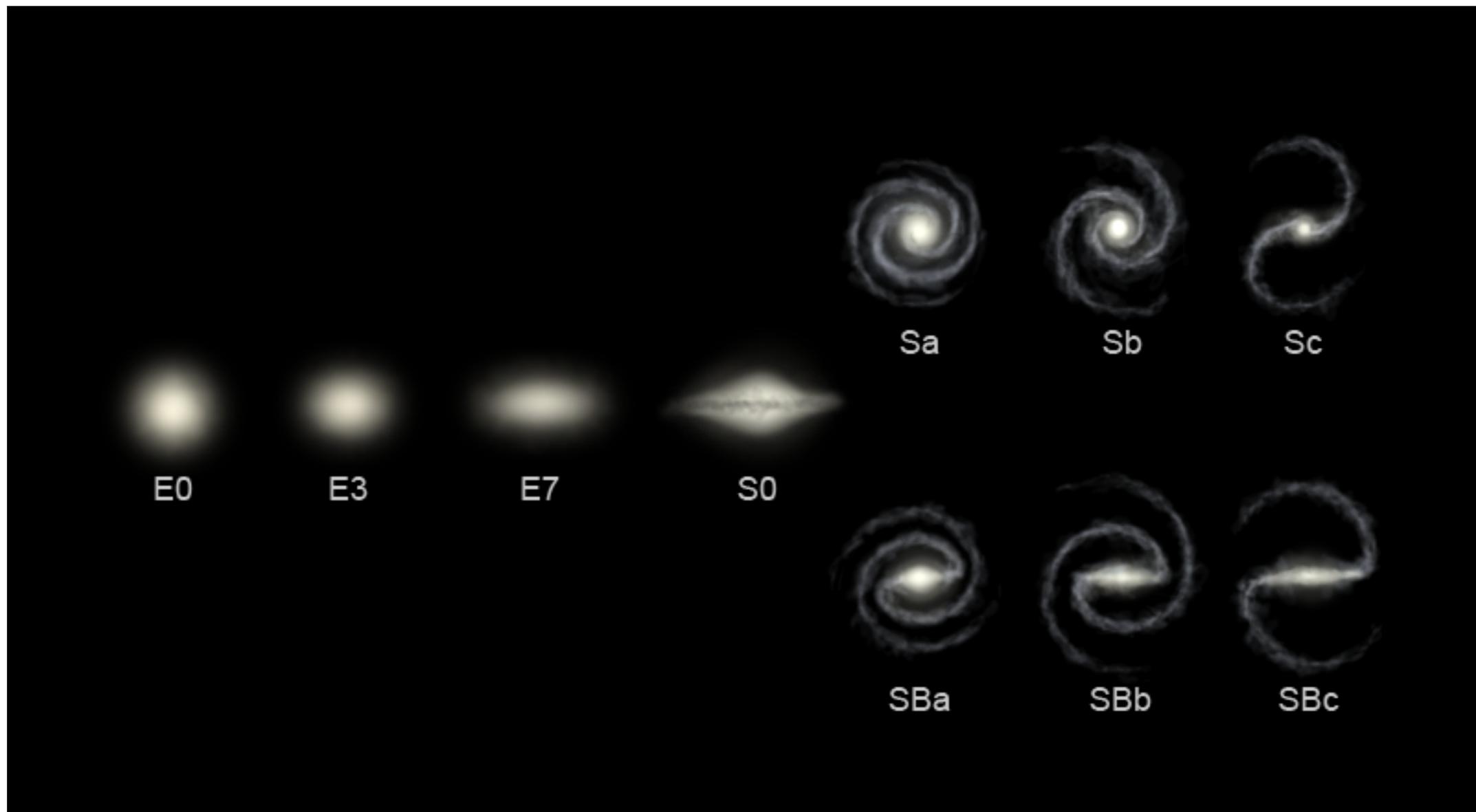
Partie 3: les autres galaxies



Arp 240

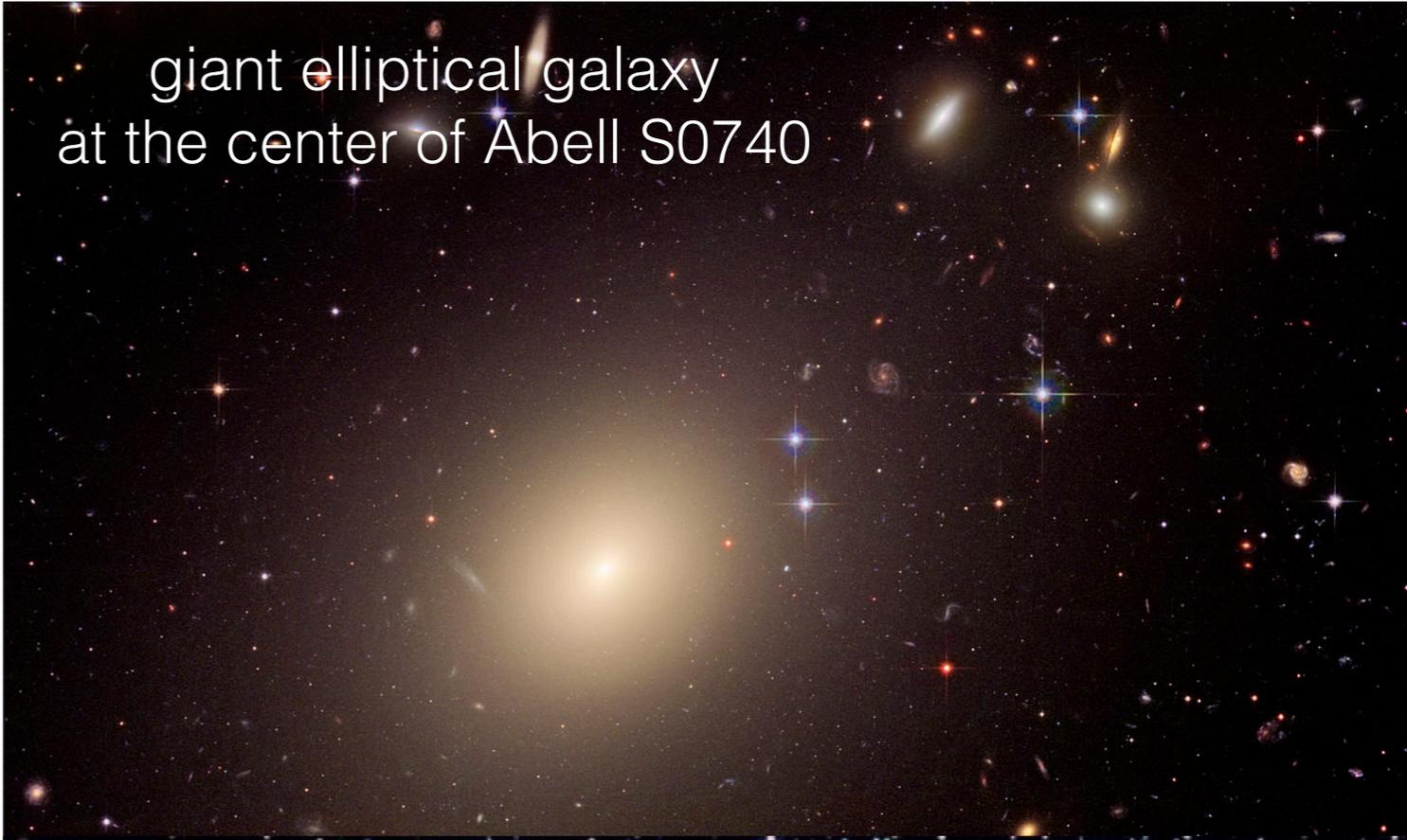
Classification de Hubble

- 4 types de galaxies:
elliptiques, lenticulaires, spirales et irrégulières



galaxies elliptiques

- lisses, rondes, pas de bras spiraux ni de zones obscurcies
- manque de gaz froid, peu d'étoiles jeunes et bleues
- Dominent les amas riches en galaxies. Les plus grandes (galaxies cD) sont trouvées dans les parties les plus denses des amas de galaxies
- Les galaxies elliptiques moins lumineuses se divisent en 2 catégories:
 - galaxies elliptiques compactes (rares, exp: M32)
 - galaxies elliptiques naines et diffuses (dE) et naines sphéroïdales (dSph) encore plus diffuses



giant elliptical galaxy
at the center of Abell S0740



M32 est une galaxie naine elliptique,
satellite de M31

galaxies lenticulaires

- disque en rotation en plus du bulbe elliptique central
- Type S0
- C'est une classe de transition entre les galaxies elliptiques et les spirales
- Souvent dans des régions denses en galaxies



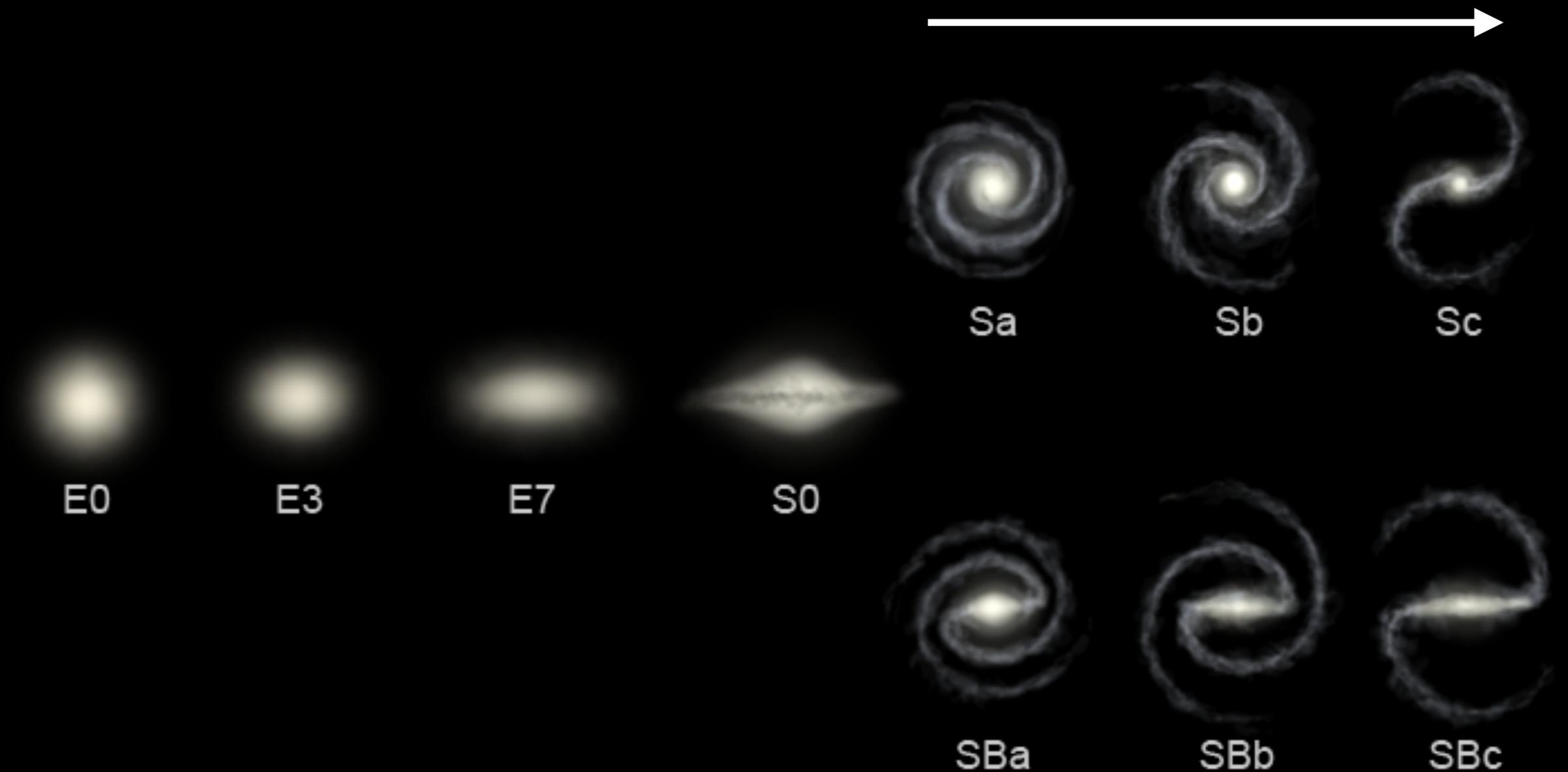
galaxie du sombrero

galaxies spirales

- présence de bras spiraux. Les bras sont soulignés par la présence d'étoiles chaudes O,B et des nuages de gaz et de poussières
- Environ la moitié des galaxies spirales ou lenticulaires ont des barres centrales. Séquence parallèle à celle des galaxies non barrées



le bulbe central devient de + en + important par rapport au disque en rotation, les bras spiraux deviennent plus ouverts et la fraction de gaz et d' étoiles jeunes augmente



- problèmes de la classification:
 - l'apparence d'une galaxie change avec la longueur d'onde
 - exemple M81:



Les types “**early type**” et “**late type**” sont souvent utilisées pour décrire la position des galaxies le long de la séquence des elliptiques aux spirales. Vient d’une vieille hypothèse d’évolution des galaxies aujourd’hui réfutée mais les termes subsistent.

Perturbant car les galaxies “late type” sont pleines d’étoiles jeunes et vice-versa



E0

E3

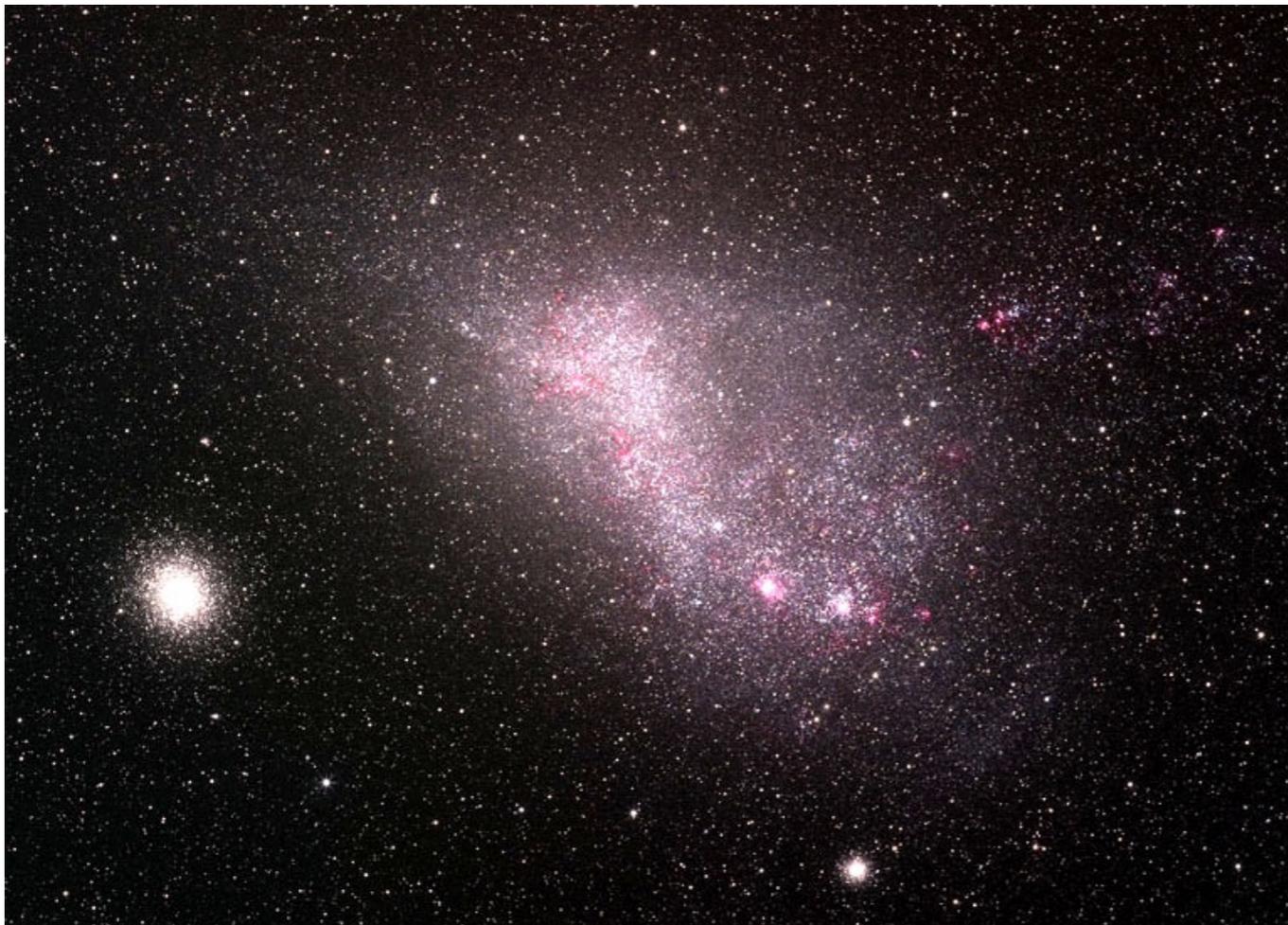
E7

S0

galaxies irrégulières

- galaxies sans structure organisée
- Les plus petites: naines irrégulières (dIrr), différentes des dSph car gaz et étoiles jeunes bleues

Galaxie naine irrégulière



mais aussi...

- galaxies starburst
 - beaucoup de formation d'étoile a eu lieu récemment
 - apparence perturbée due en partie au gaz éjecté par les explosions de SN ou autre
- Galaxies en interaction

M82



M51

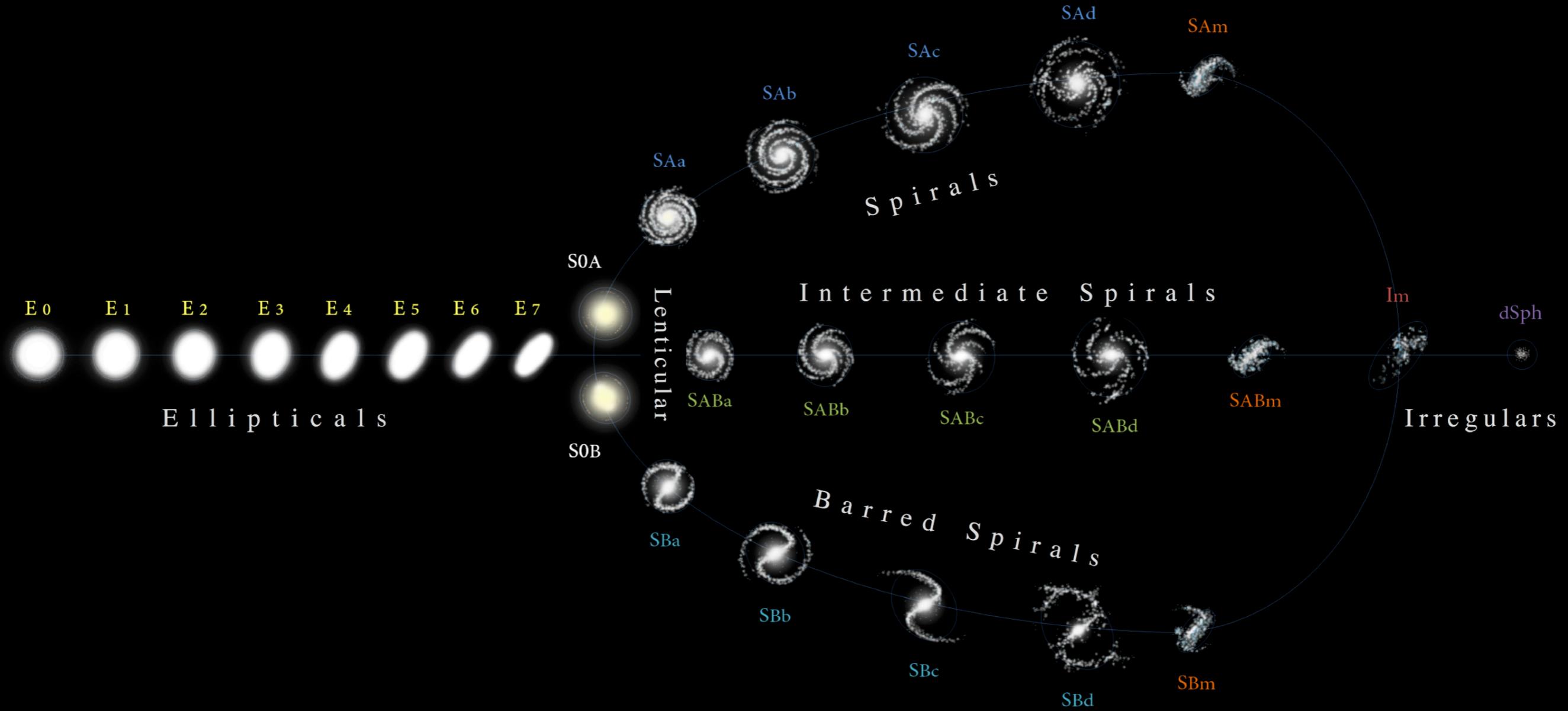


Collisions de galaxies

Quand deux galaxies se rencontrent, il n'y a **pas de collisions entre étoiles** : les tailles des étoiles sont trop petites par rapport aux distances entre étoiles.

Classification de de Vaucouleurs (1959)

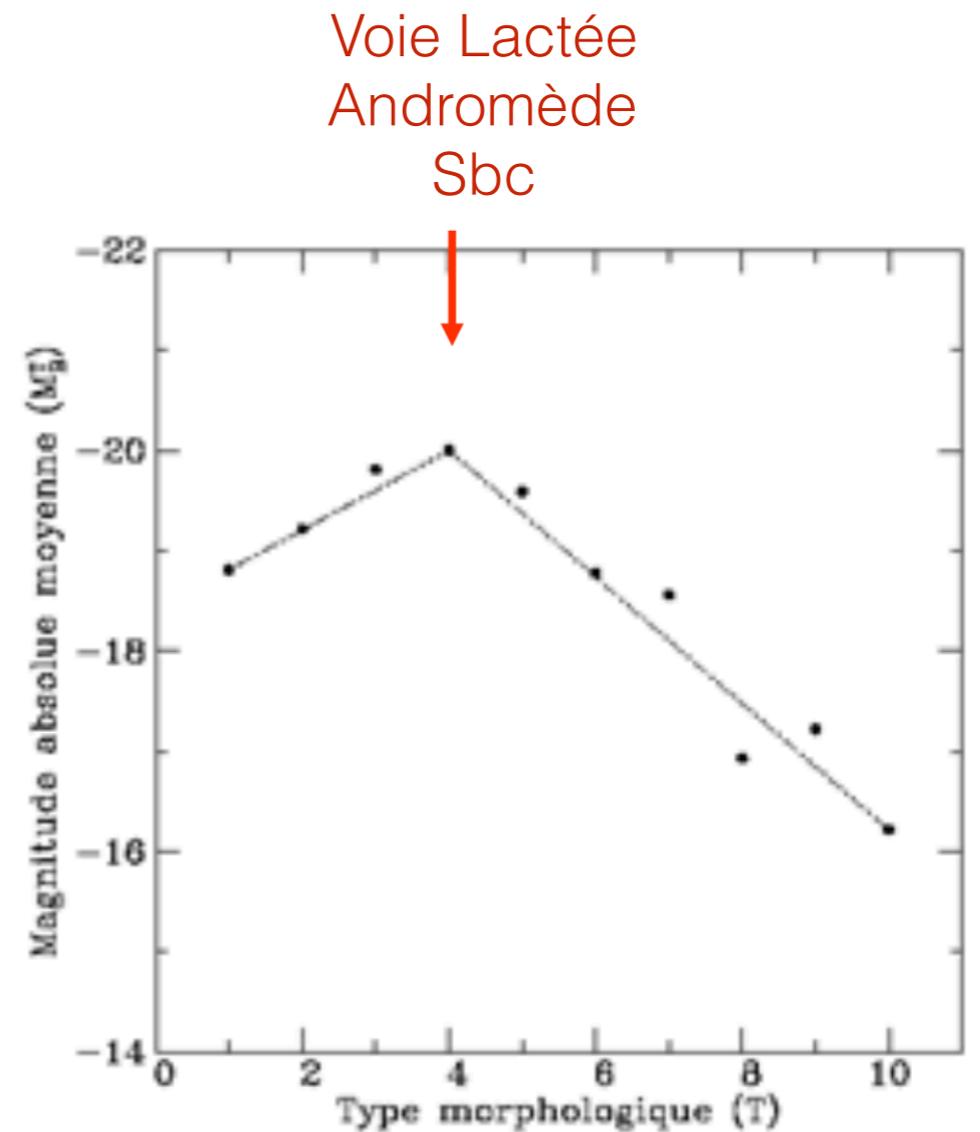
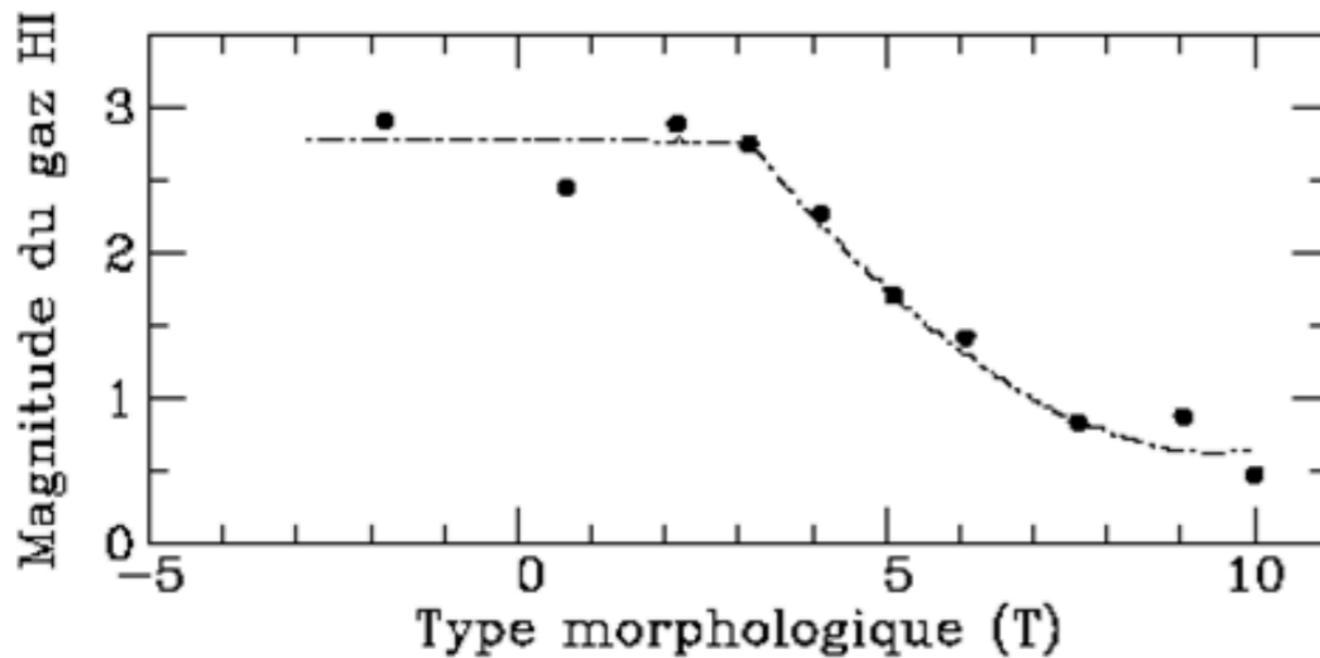
HUBBLE-DE VAUCOULEURS DIAGRAM



Hubble stage <i>T</i>	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
de Vaucouleurs class ^[8]	cE	E	E ⁺	S ₀ ⁻	S ₀ ⁰	S ₀ ⁺	S ₀ /a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im	
approximate Hubble class ^[9]	E			S ₀			S ₀ /a	Sa	Sa-b	Sb	Sb-c	Sc			Sc-Irr	Irr I		

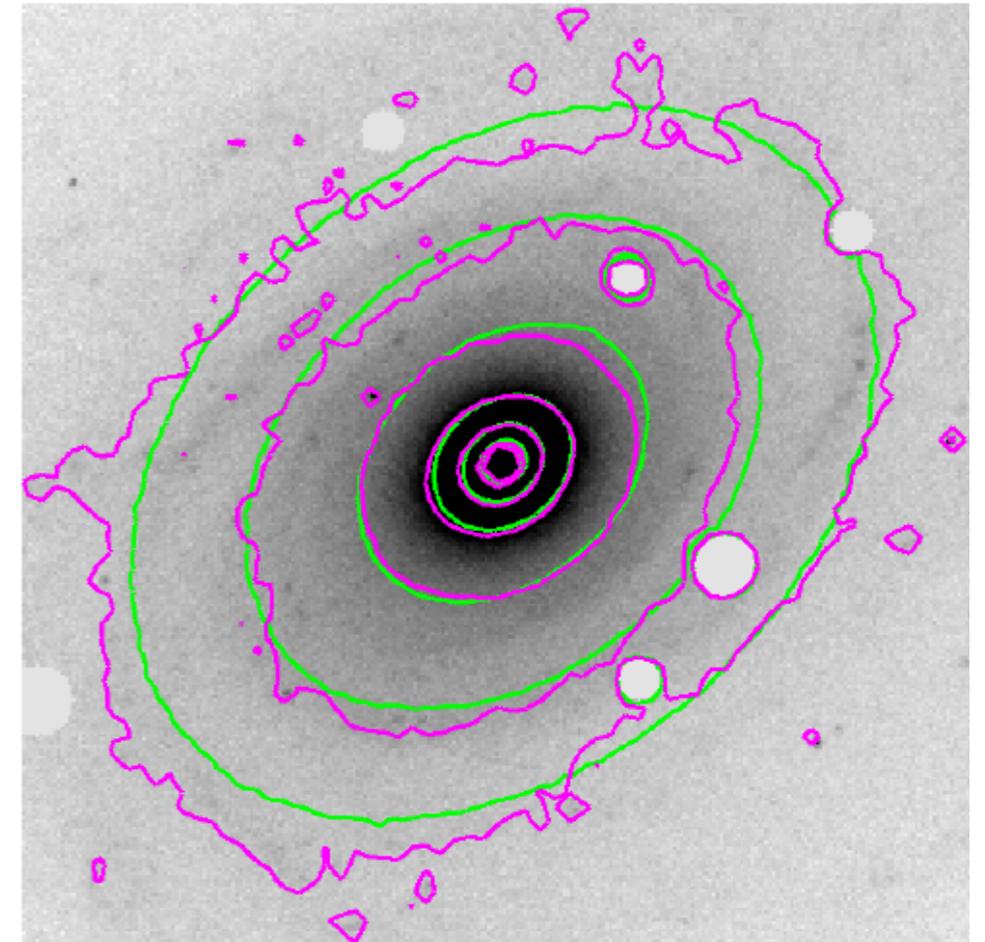
Hubble stage <i>T</i>	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
de Vaucouleurs class ^[8]	cE	E	E ⁺	S0 ⁻	S0 ⁰	S0 ⁺	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im	
approximate Hubble class ^[9]	E		S0			S0/a	Sa	Sa-b	Sb	Sb-c	Sc		Sc-Irr	Irr I				

elliptiques S0 -> Sb Sc —————> Irr
 pas de gaz peu de gaz de plus en plus de gaz



Photométrie des galaxies

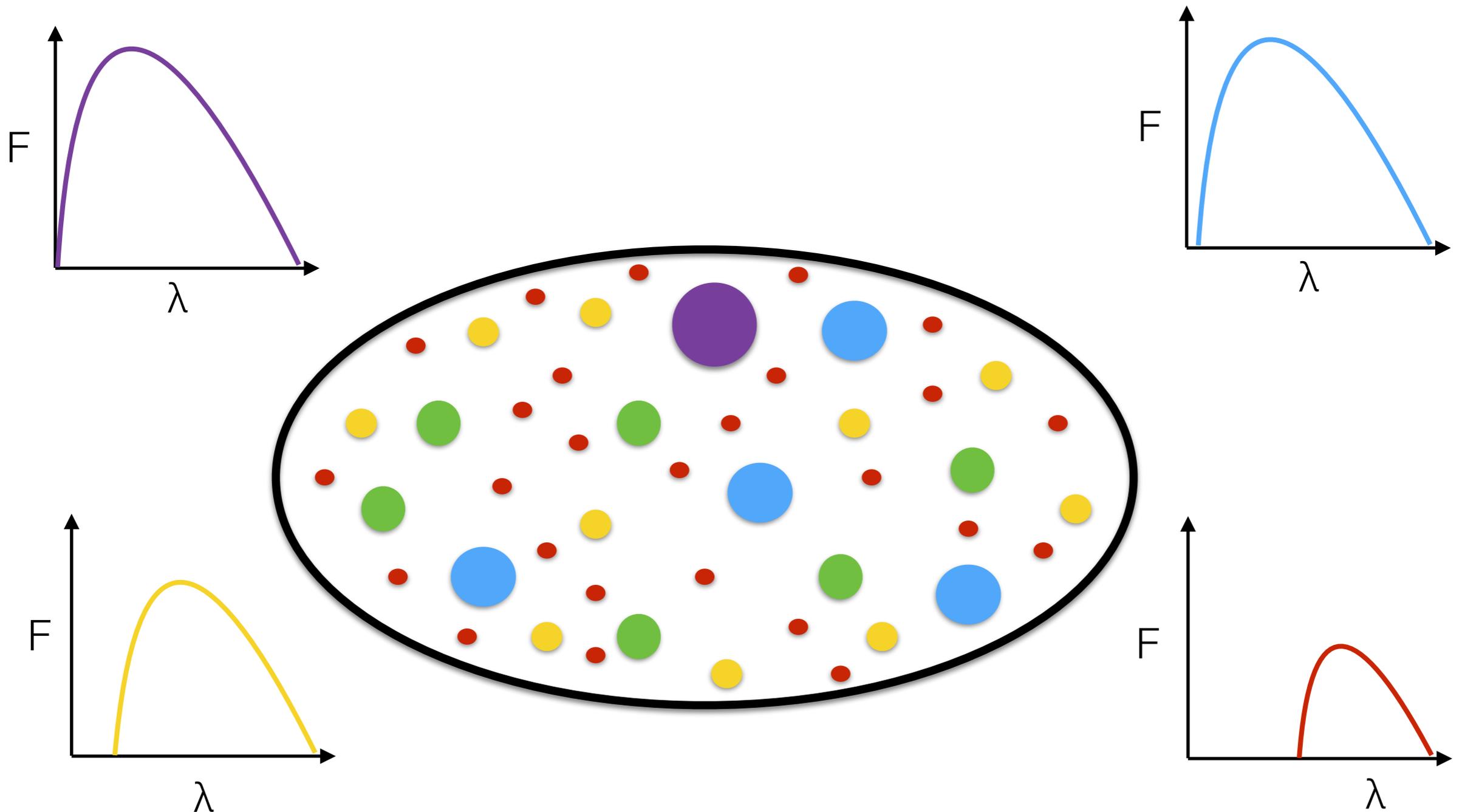
- Les galaxies sont des objets étendus sur le ciel
- **Brillance de surface**
 - $I(x)$ = quantité de lumière par seconde d'arc² sur le ciel en un point x .
 - Unité: mag.arcsec⁻².
 - C'est une quantité qui ne dépend pas de la distance



- Les contours de brillance de surface constante d'une image de galaxie sont appelés isophotes
- La taille des galaxies est souvent mesurée à l'intérieur d'un isophote donné
 - un choix classique: 25 mag.arcsec⁻² dans la bande B = R_{25}
 - autre option: rayon de Holmberg $I_B=26.5$ mag.arcsec⁻²

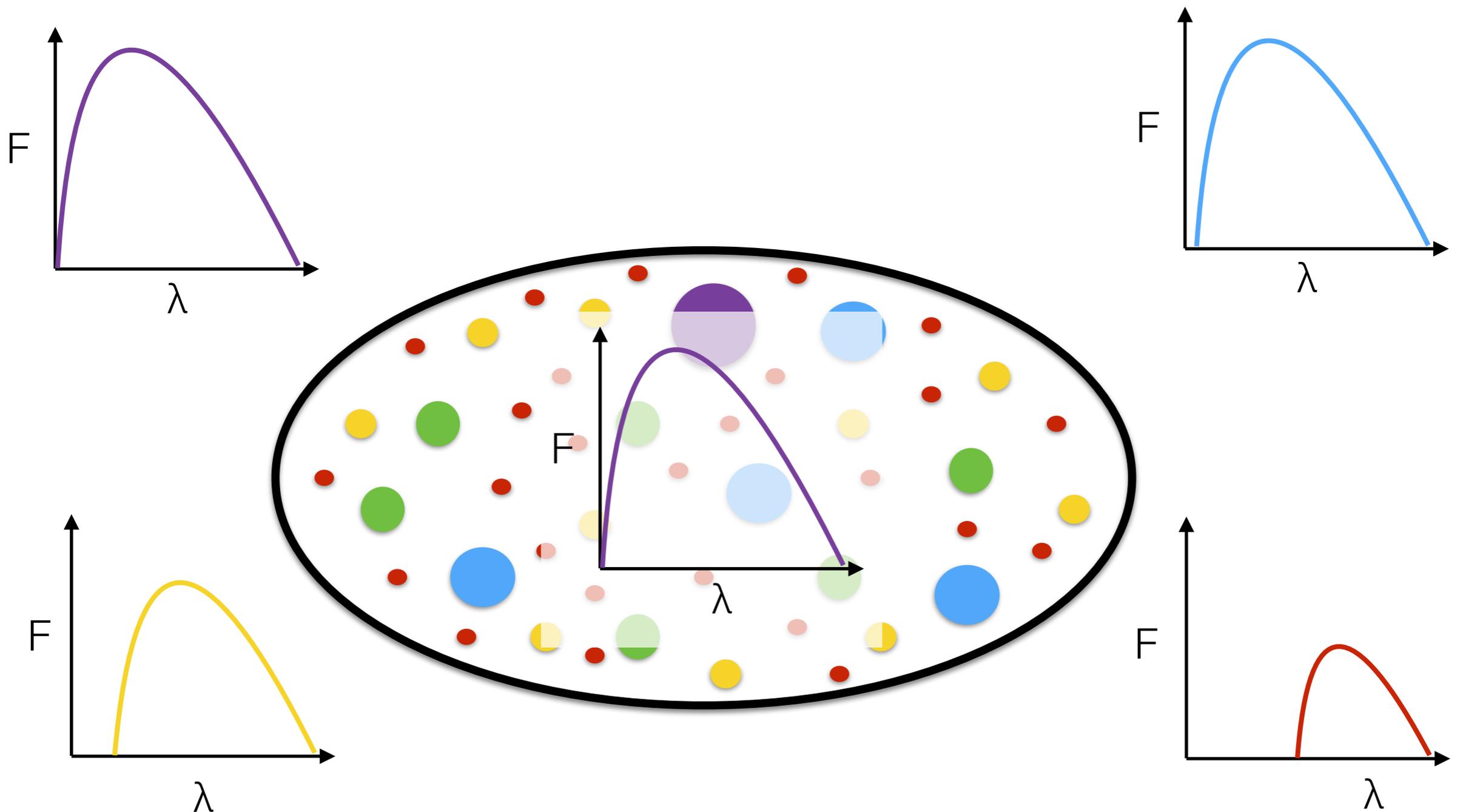
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



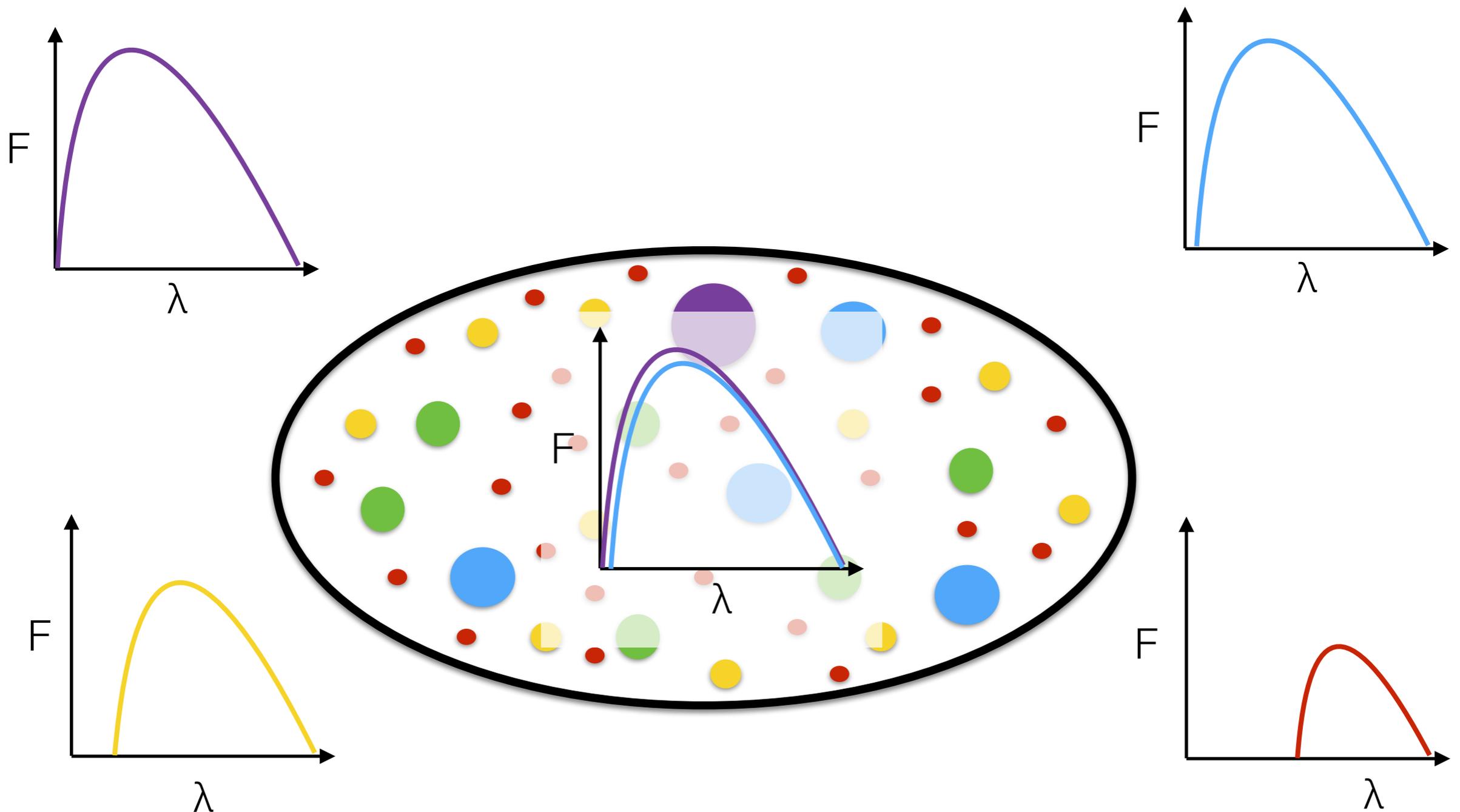
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



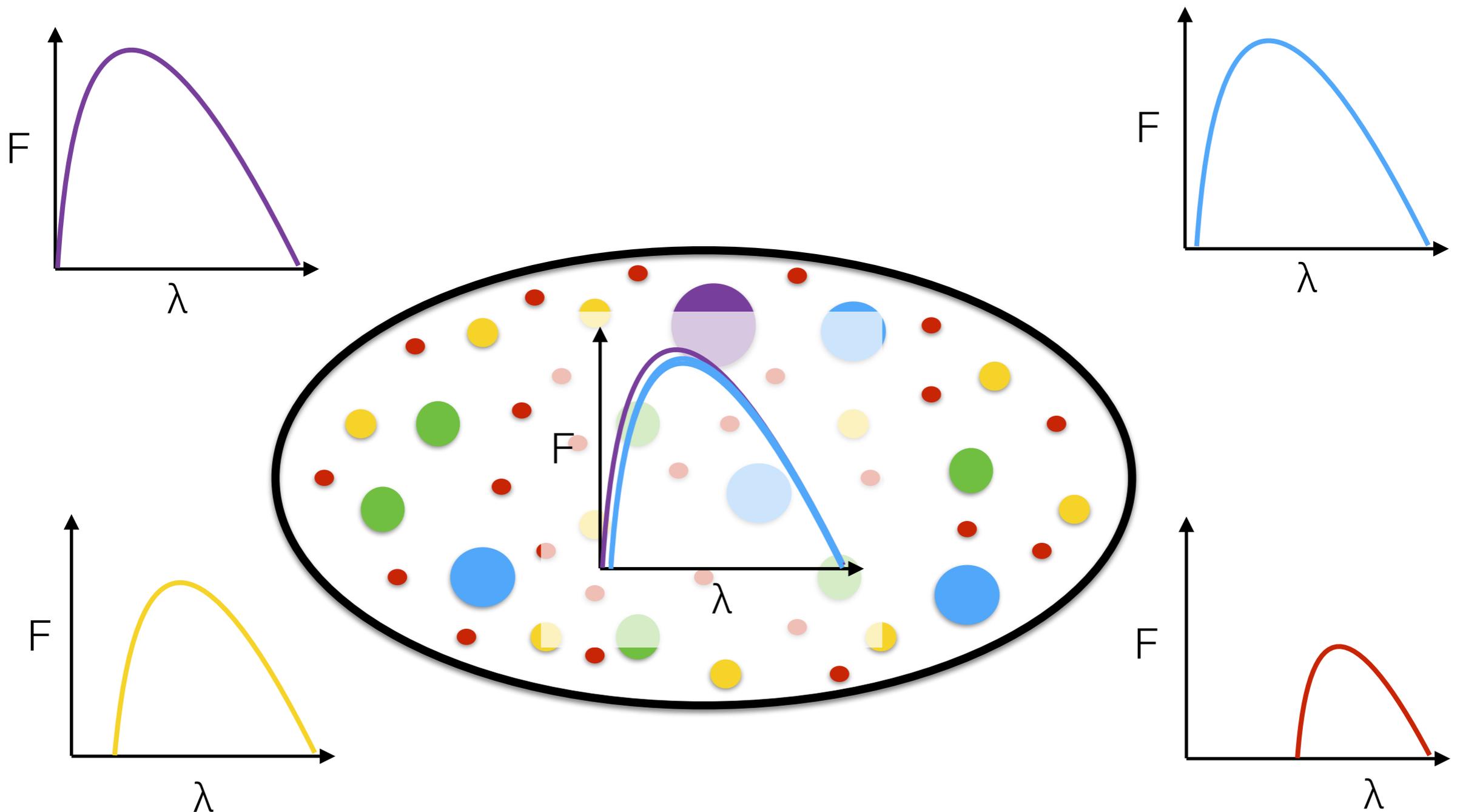
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



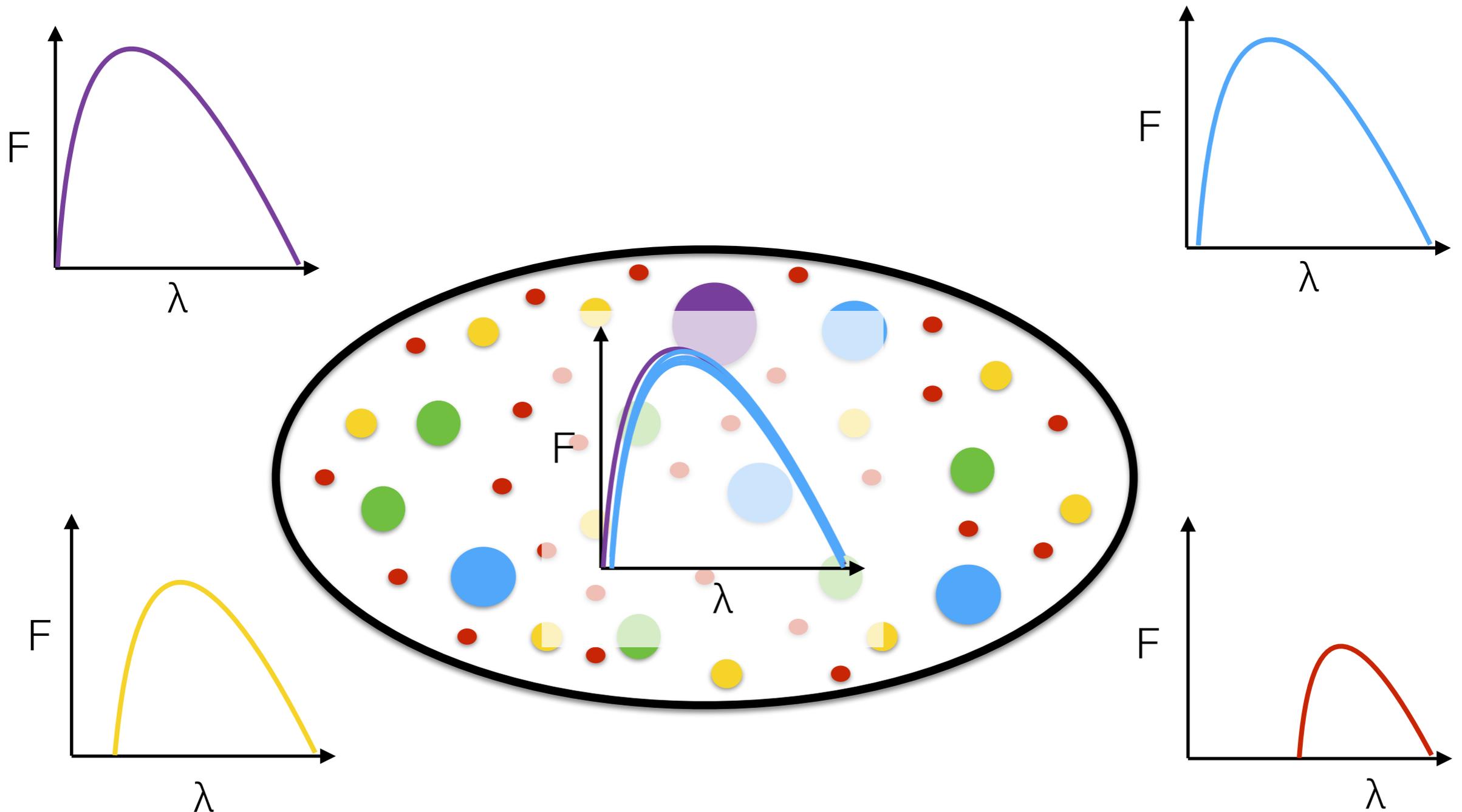
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



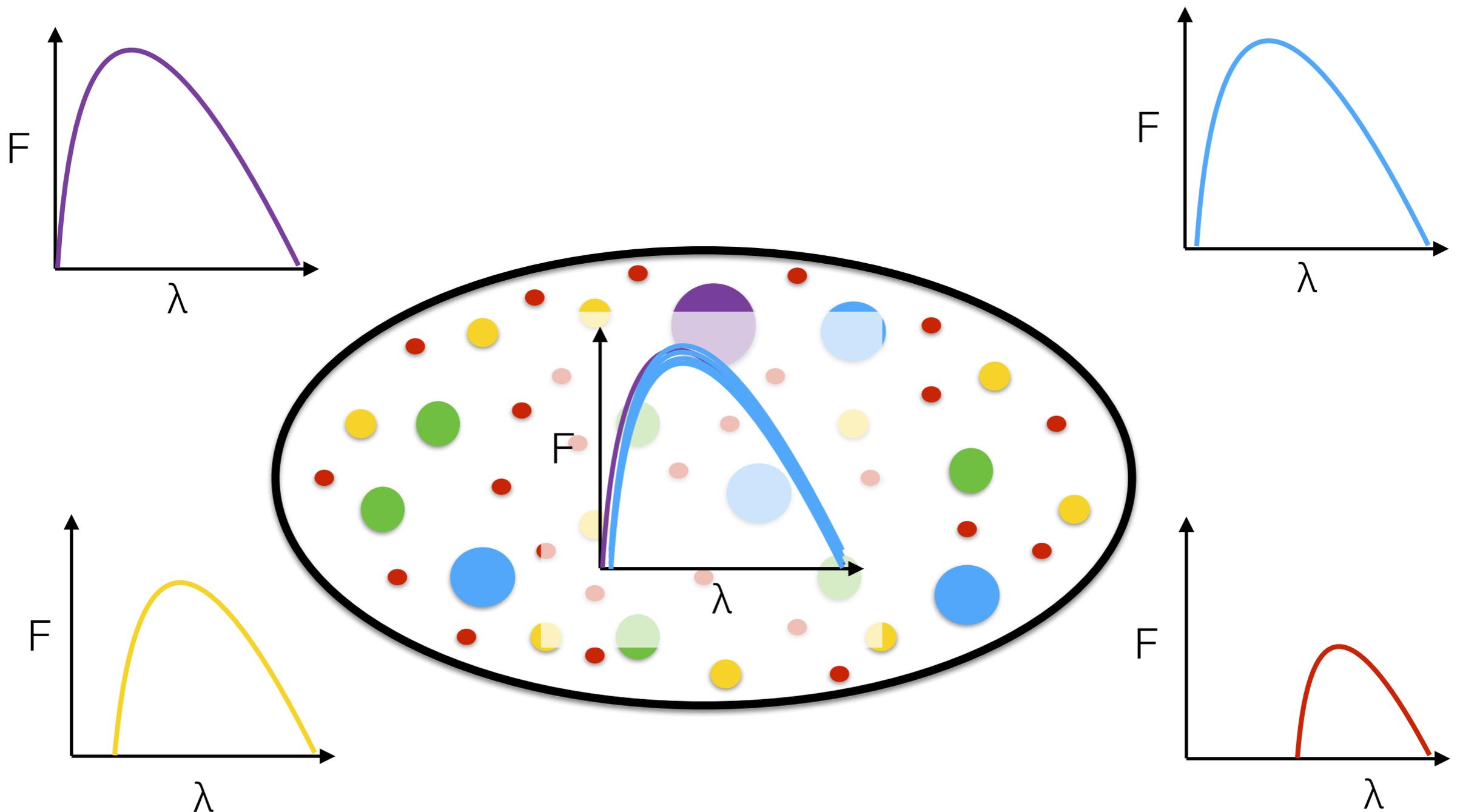
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



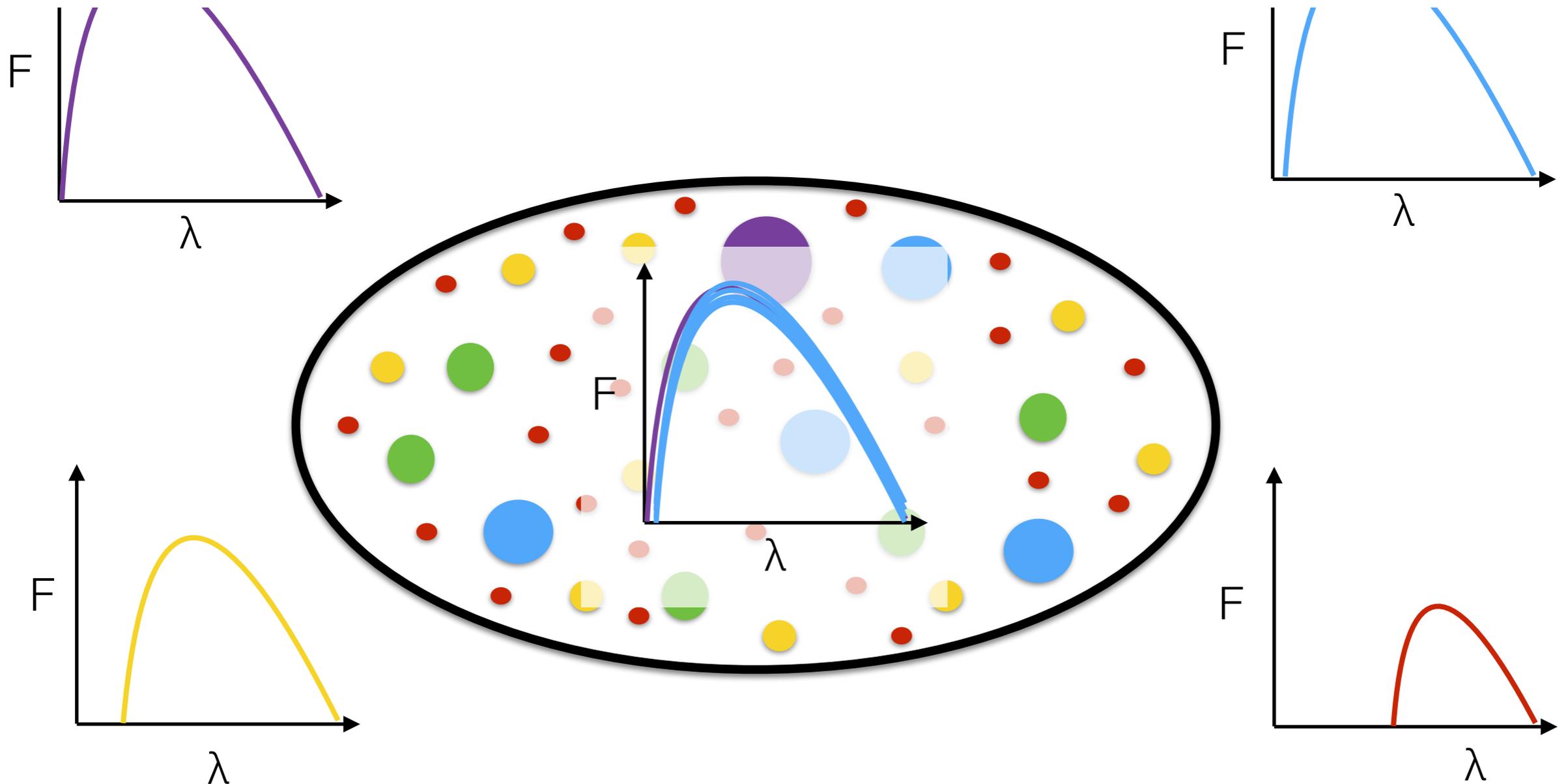
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes



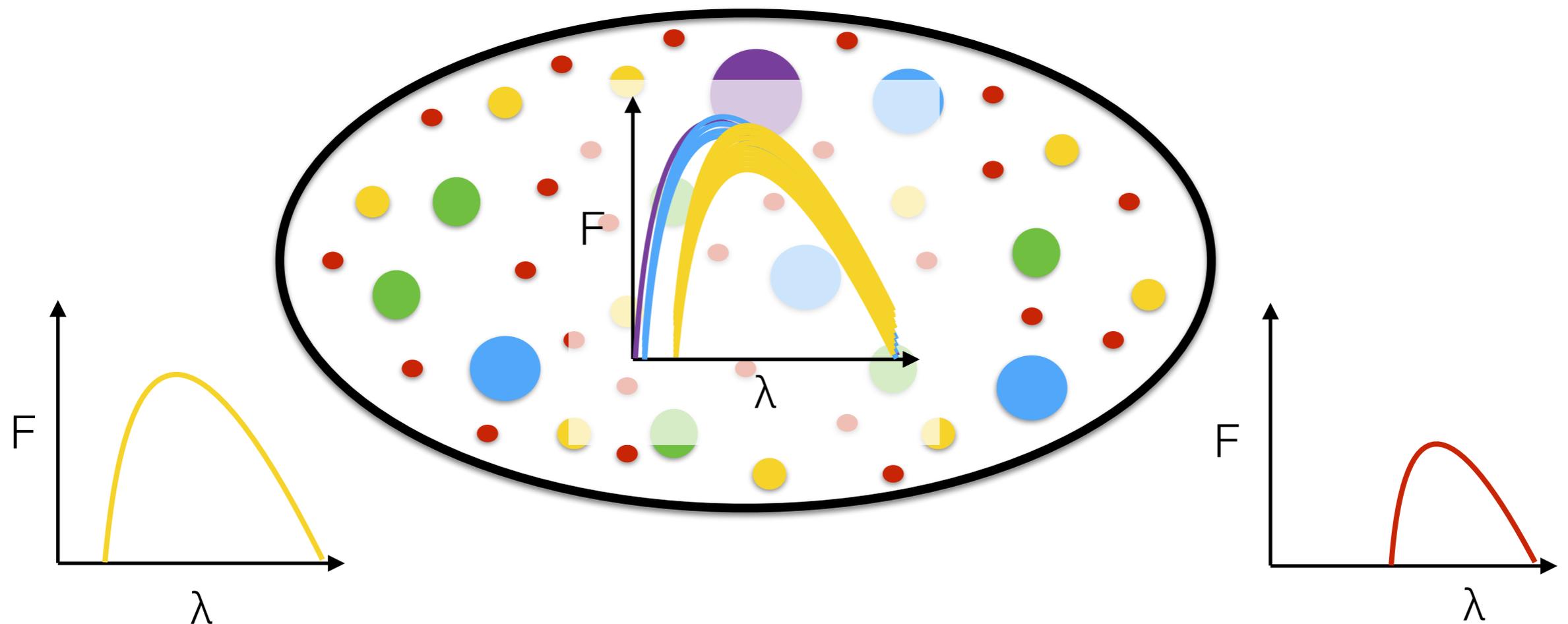
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes
 - Les étoiles O et B sont rares et ne contribuent pas fortement à la lumière visible d'une galaxie (sauf si elle a eu un burst récent de formation d'étoiles)



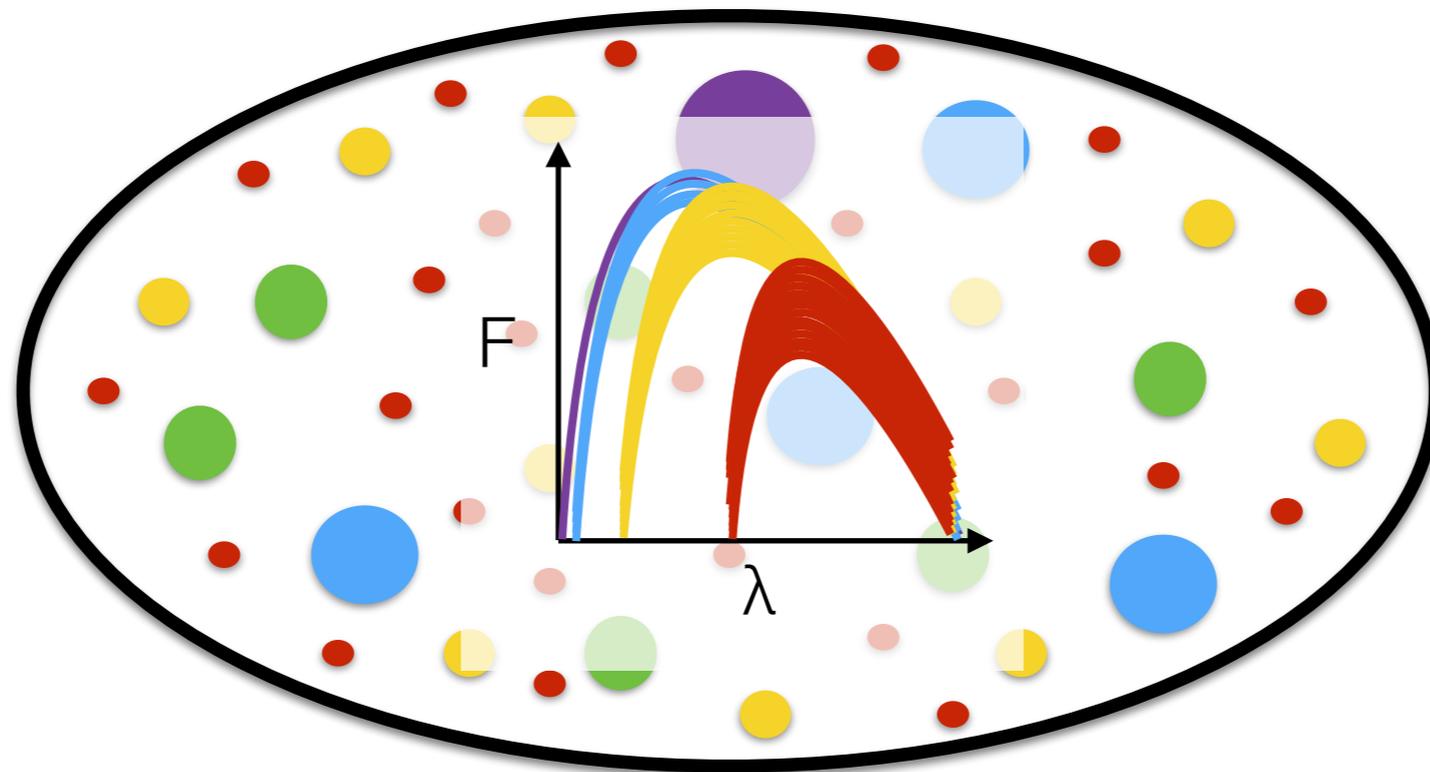
Spectre d'une galaxie

- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes
 - Les étoiles O et B sont rares et ne contribuent pas fortement à la lumière visible d'une galaxie (sauf si elle a eu un burst récent de formation d'étoiles)
 - Pour une galaxie comme notre Voie Lactée, les étoiles les plus chaudes (types A, F ou G) vont donner la majorité de la lumière dans le domaine bleu



Spectre d'une galaxie

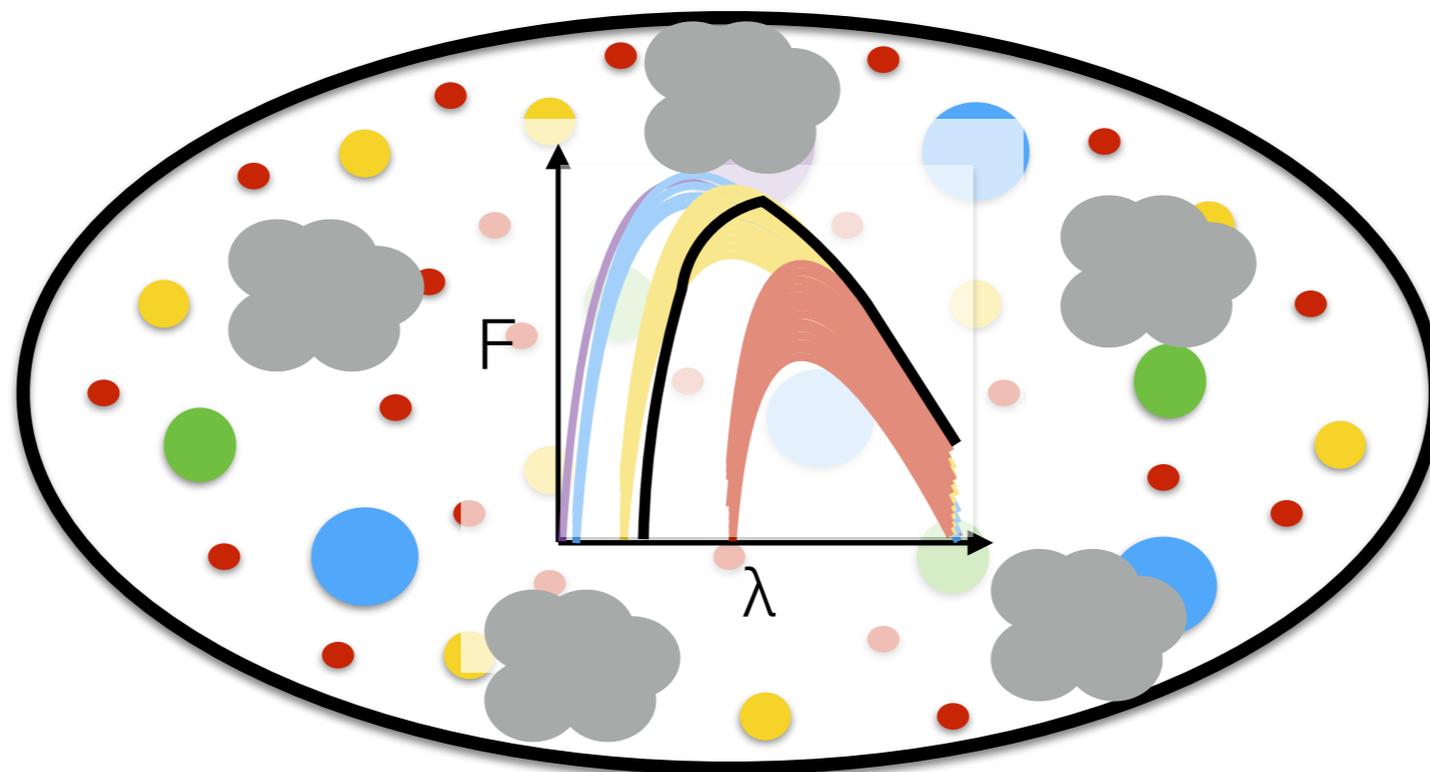
- spectre composite: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes
 - Les étoiles O et B sont rares et ne contribuent pas fortement à la lumière visible d'une galaxie (sauf si elle a eu un burst récent de formation d'étoiles)
 - Pour une galaxie comme notre Voie Lactée, les étoiles les plus chaudes (types A, F ou G) vont donner la majorité de la lumière dans le domaine bleu



- Dans la partie rouge du spectre, on voit des raies des étoiles froides de type K qui vont produire la plupart de la lumière de la galaxie dans la partie rouge

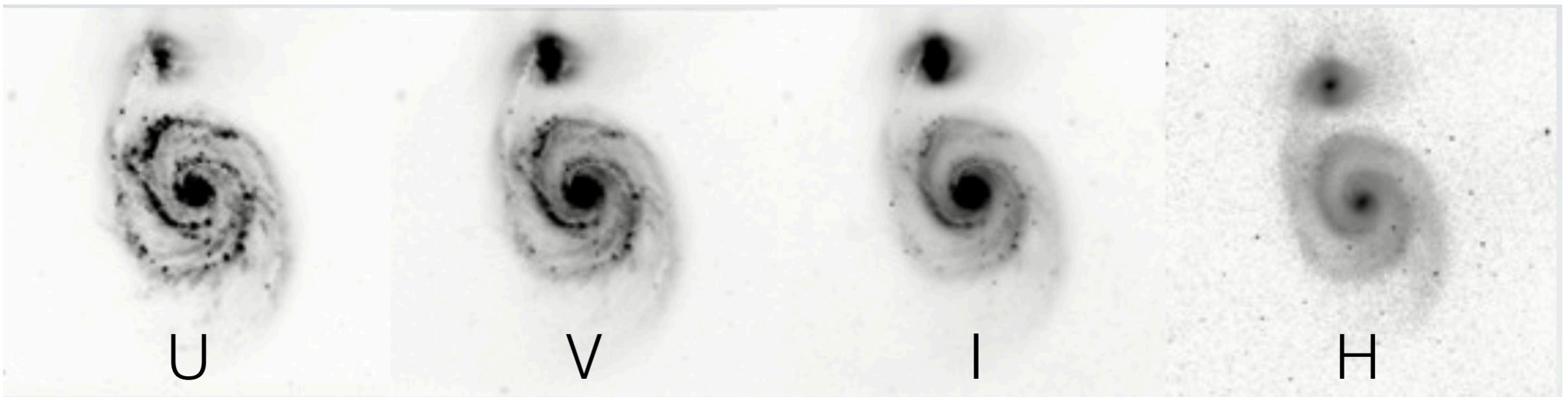
Spectre d'une galaxie

- **spectre composite**: contient la lumière mélangée de toutes les étoiles avec des températures différentes
 - Les étoiles O et B sont rares et ne contribuent pas fortement à la lumière visible d'une galaxie (sauf si elle a eu un burst récent de formation d'étoiles)
 - Pour une galaxie comme notre Voie Lactée, les étoiles les plus chaudes (types A, F ou G) vont donner la majorité de la lumière dans le domaine bleu



+ absorption
et diffusion
par les poussières

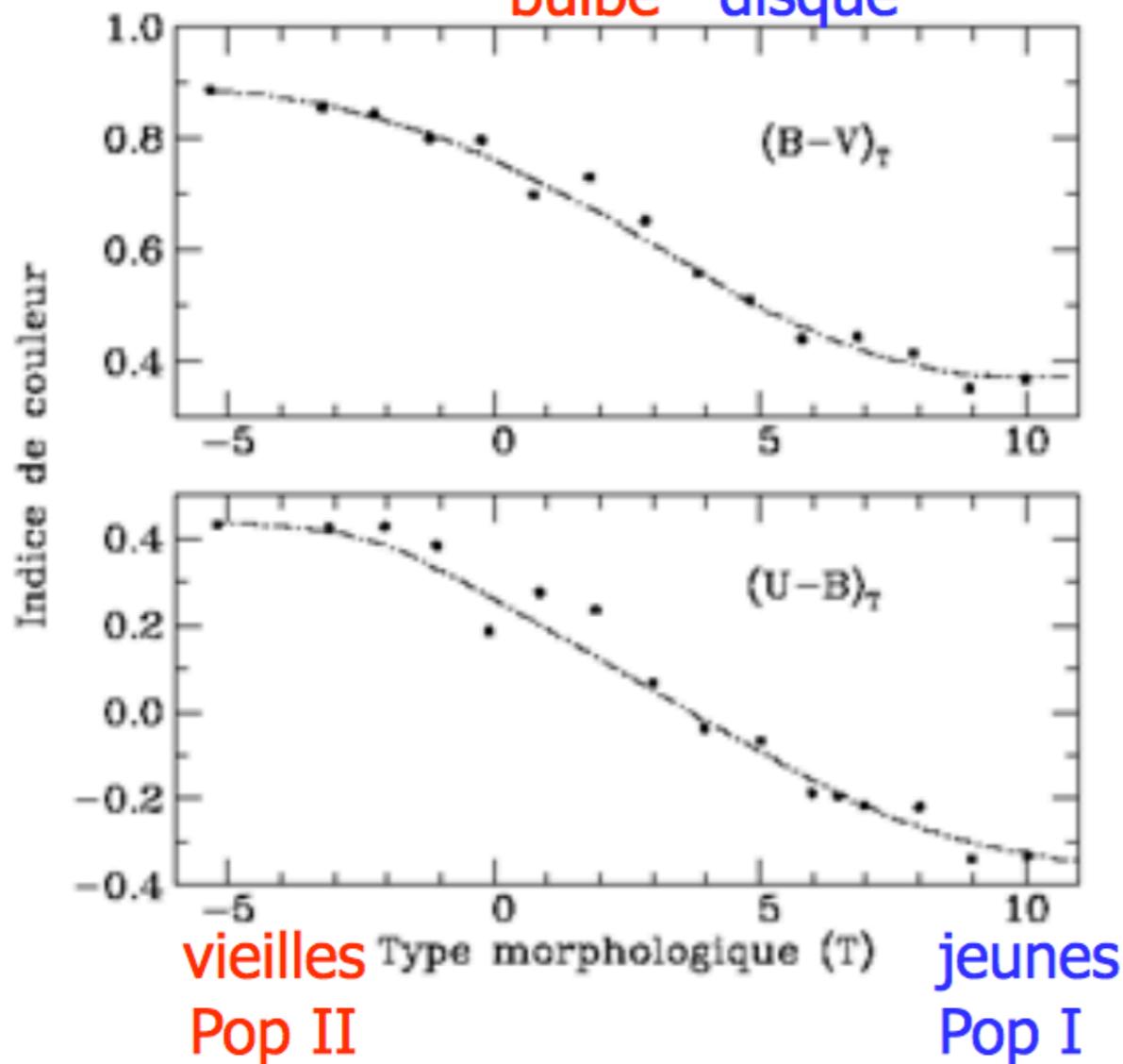
- Dans la partie rouge du spectre, on voit des raies des étoiles froides de type K qui vont produire la plupart de la lumière de la galaxie dans la partie rouge



elliptiques rouges

spirales bleues

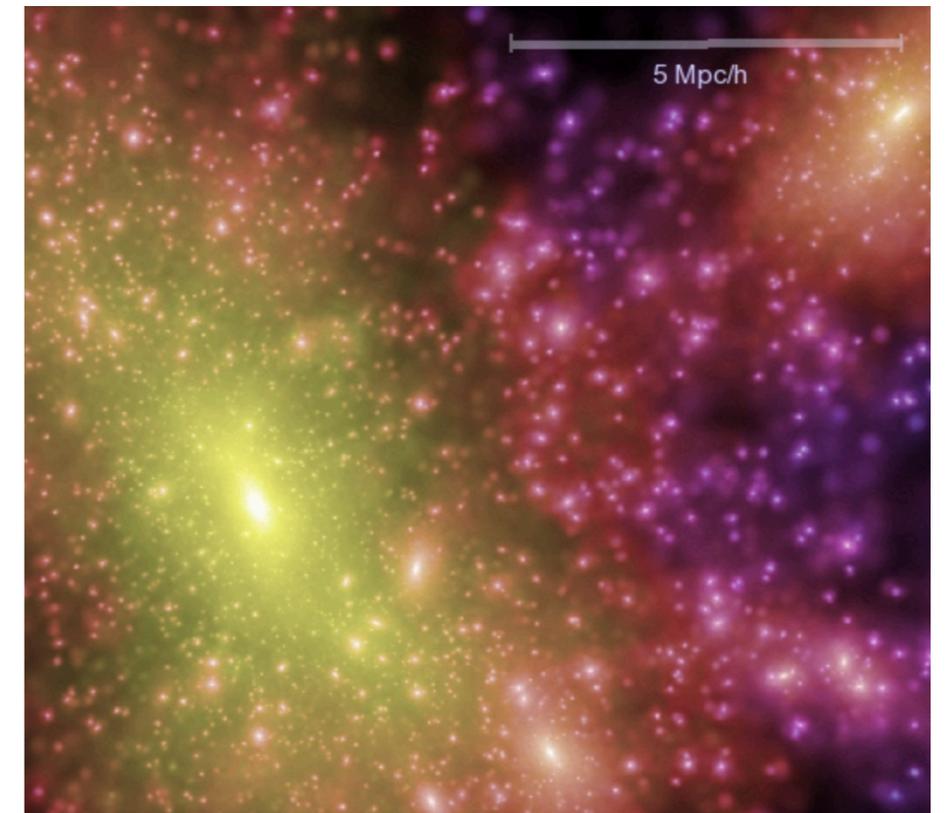
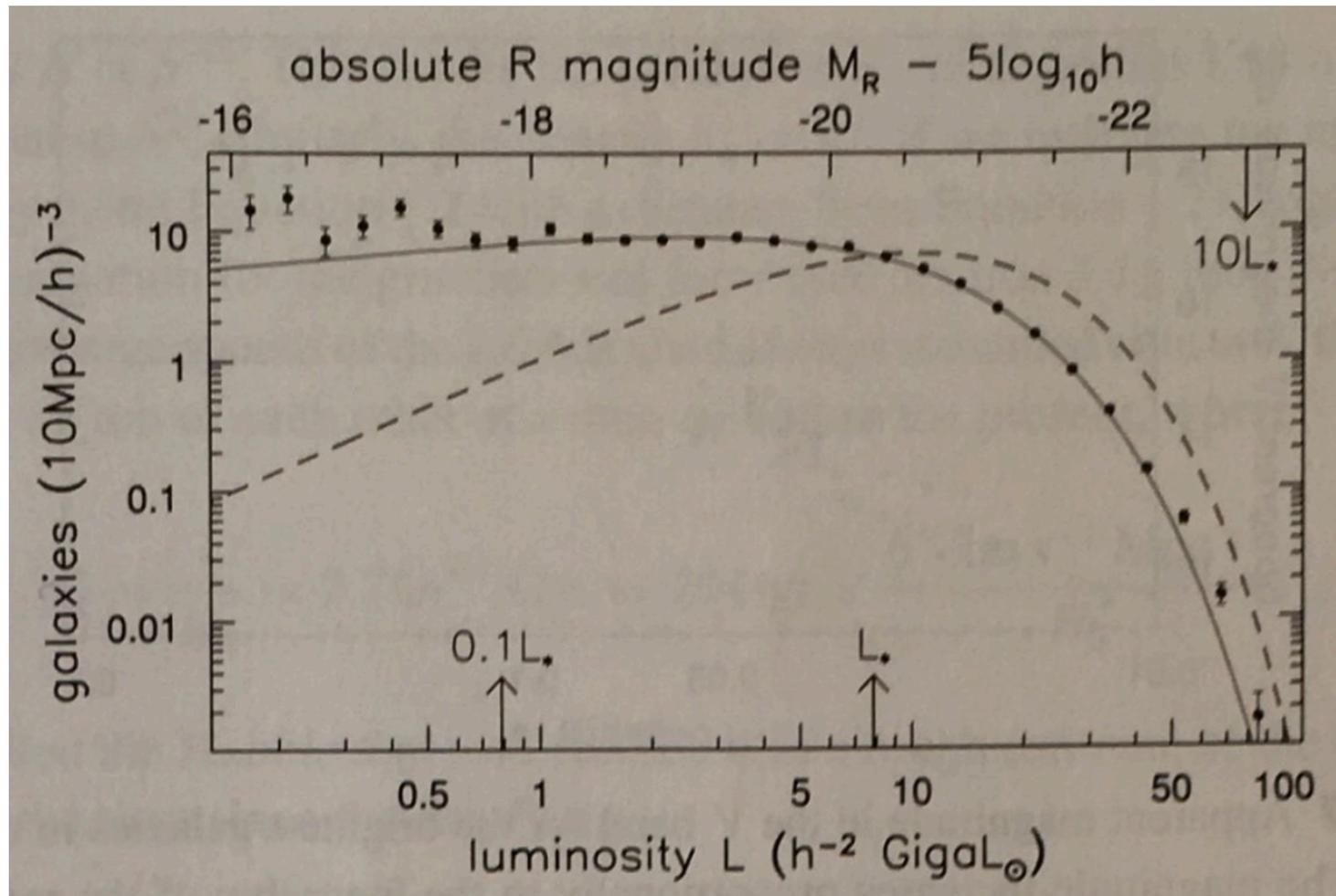
bulbe disque



- différentes bandes en longueur d'onde montrent différentes populations d'étoiles
- Les couleurs mesurent la proportion de chacune des populations stellaires dans les galaxies
- Les couleurs varient en fonction du type morphologique

Fonction de luminosité

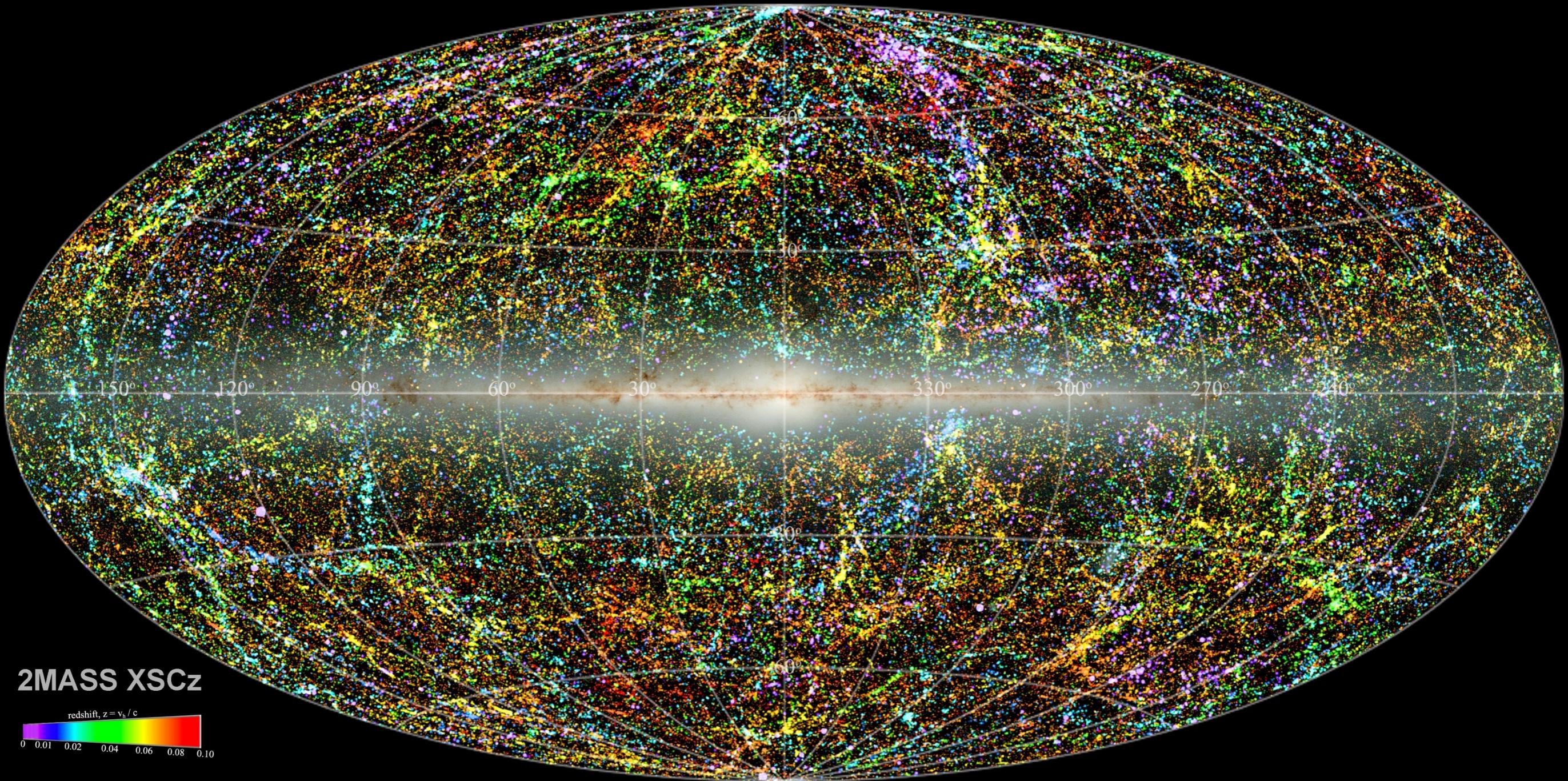
- Nombre de galaxies dans un volume de 10 Mpc^3 et entre une luminosité L et $L+\Delta L$

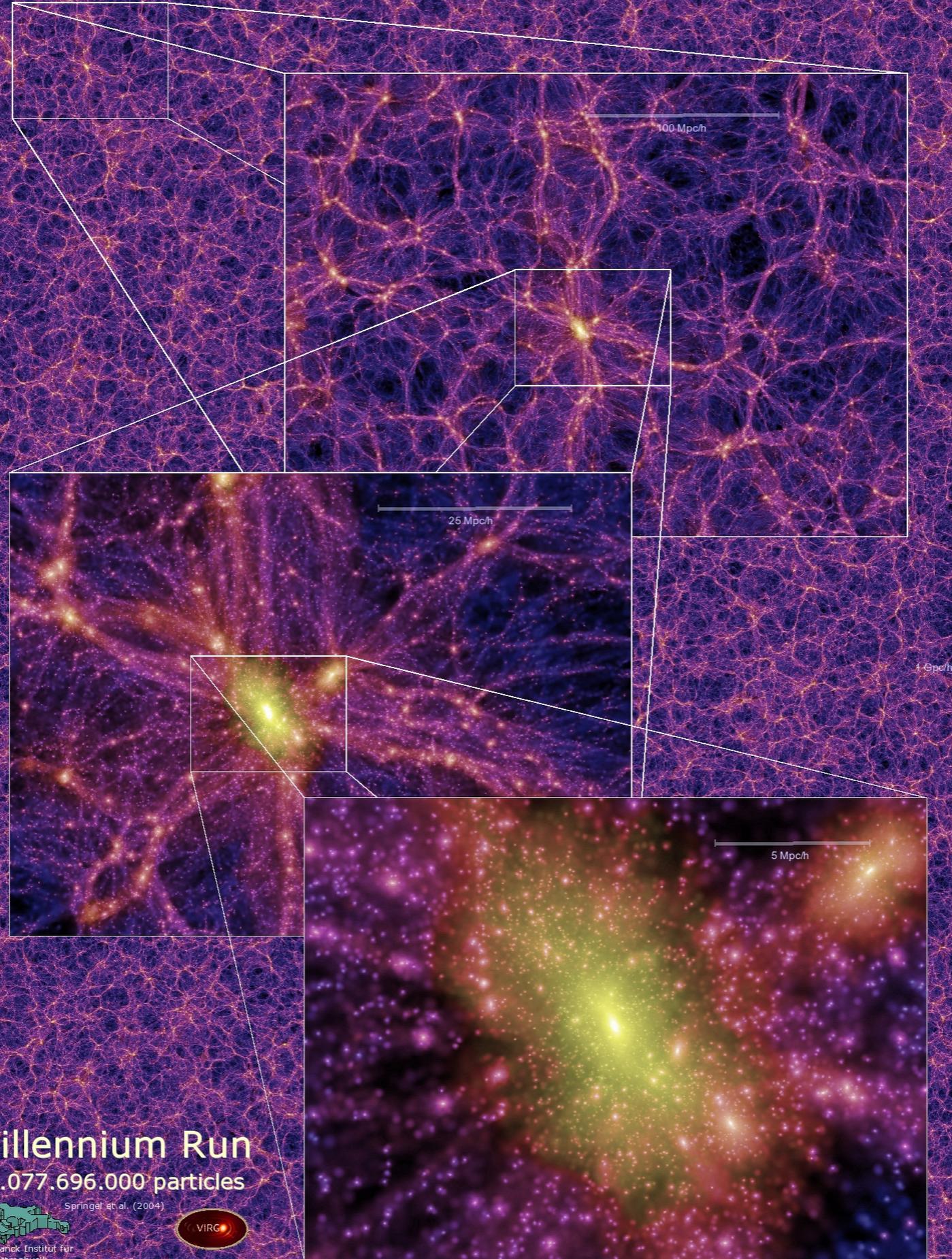


simulation Millenium

- Il y a beaucoup plus de petites galaxies peu brillantes que de grandes galaxies brillantes
- Le nombre de galaxies dans chaque intervalle de magnitude absolue est quasi constant pour $L < L_*$
- Le nombre de galaxies au dessus de L_* diminue très rapidement
- La fonction de luminosité varie d'un amas à l'autre. Répartition des galaxies fortement non uniforme!

Partie 3: les galaxies dans l'Univers





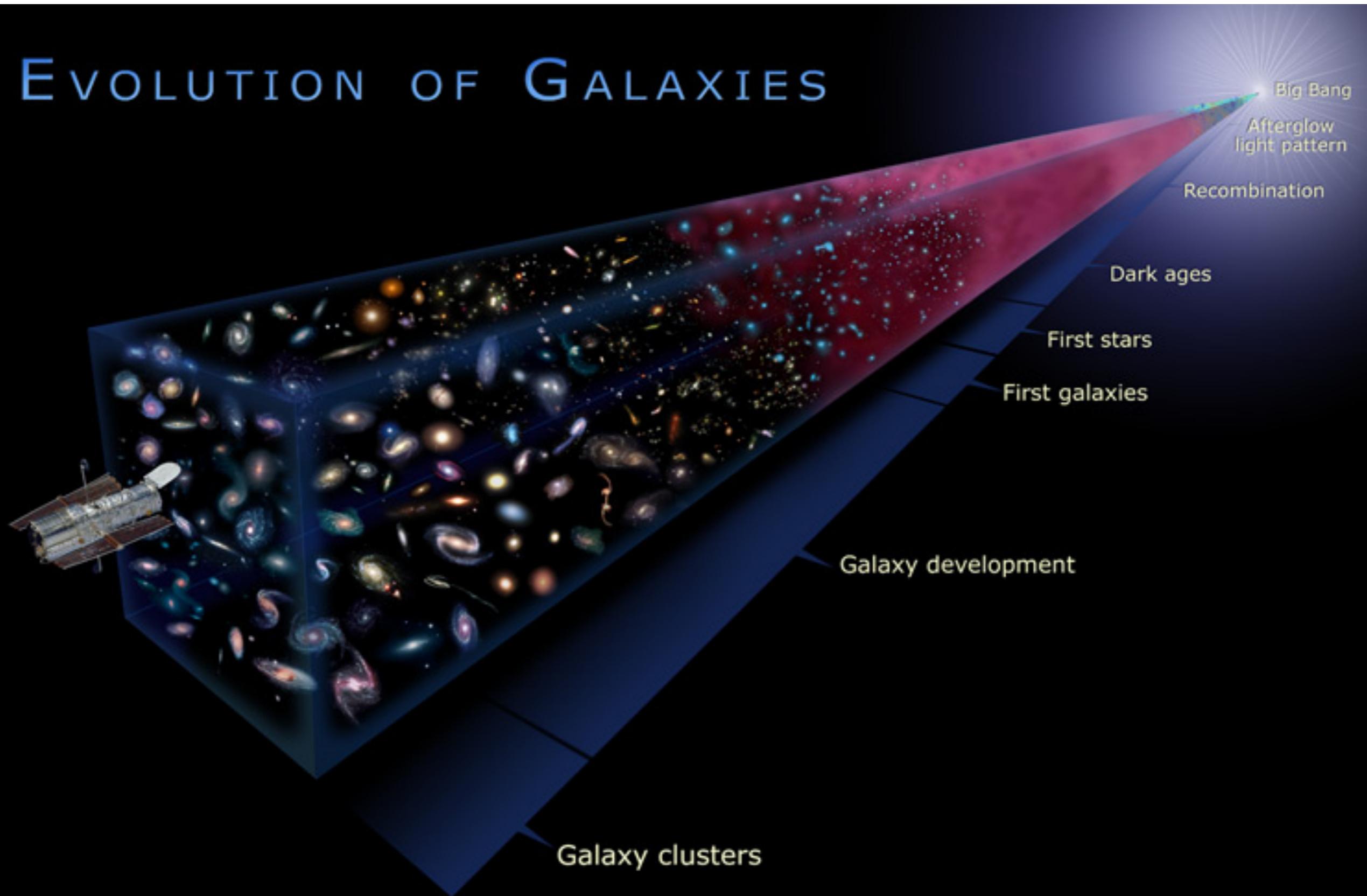
Millennium Run

10.077.696.000 particles

Springel et al. (2004)

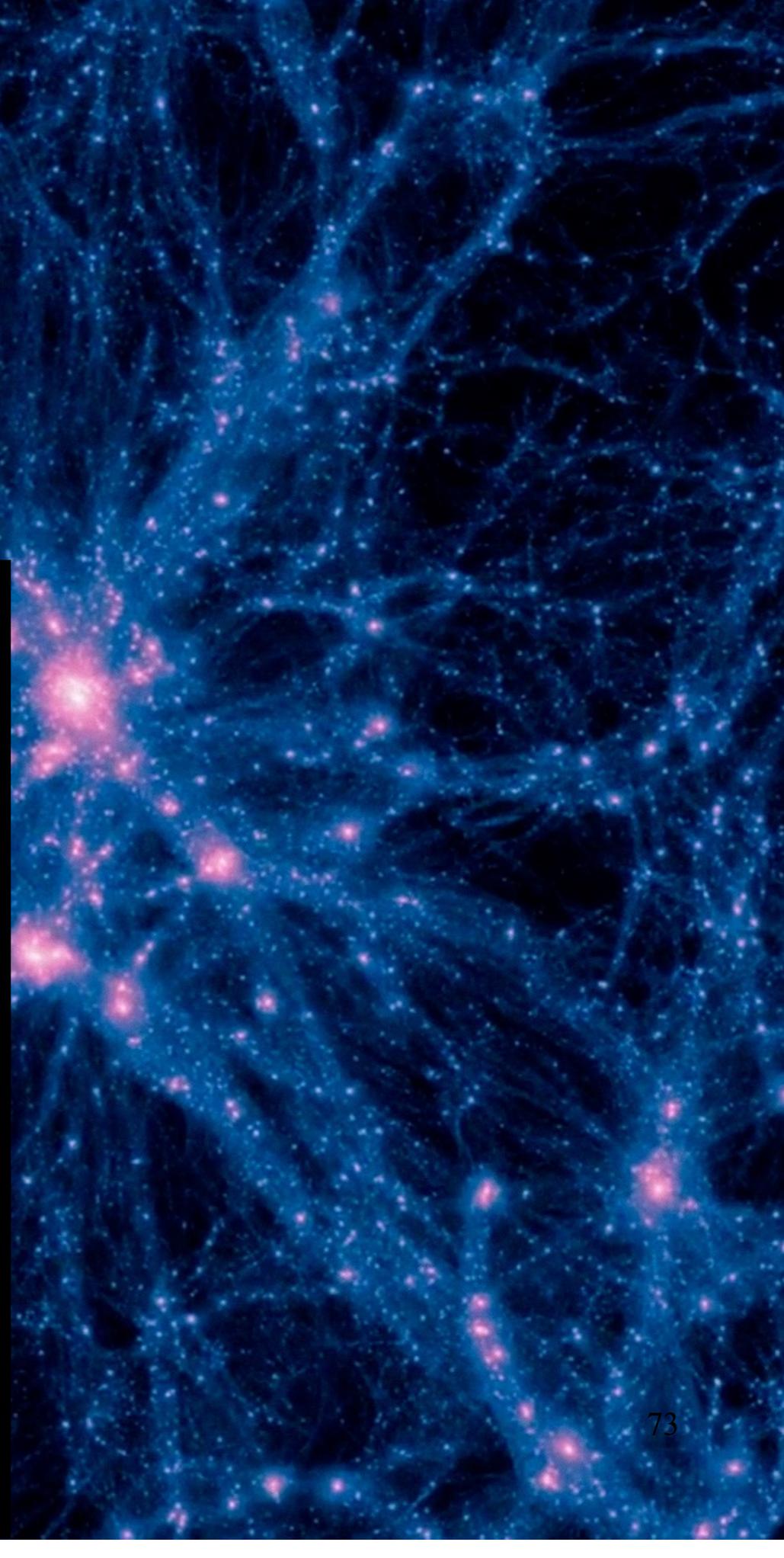
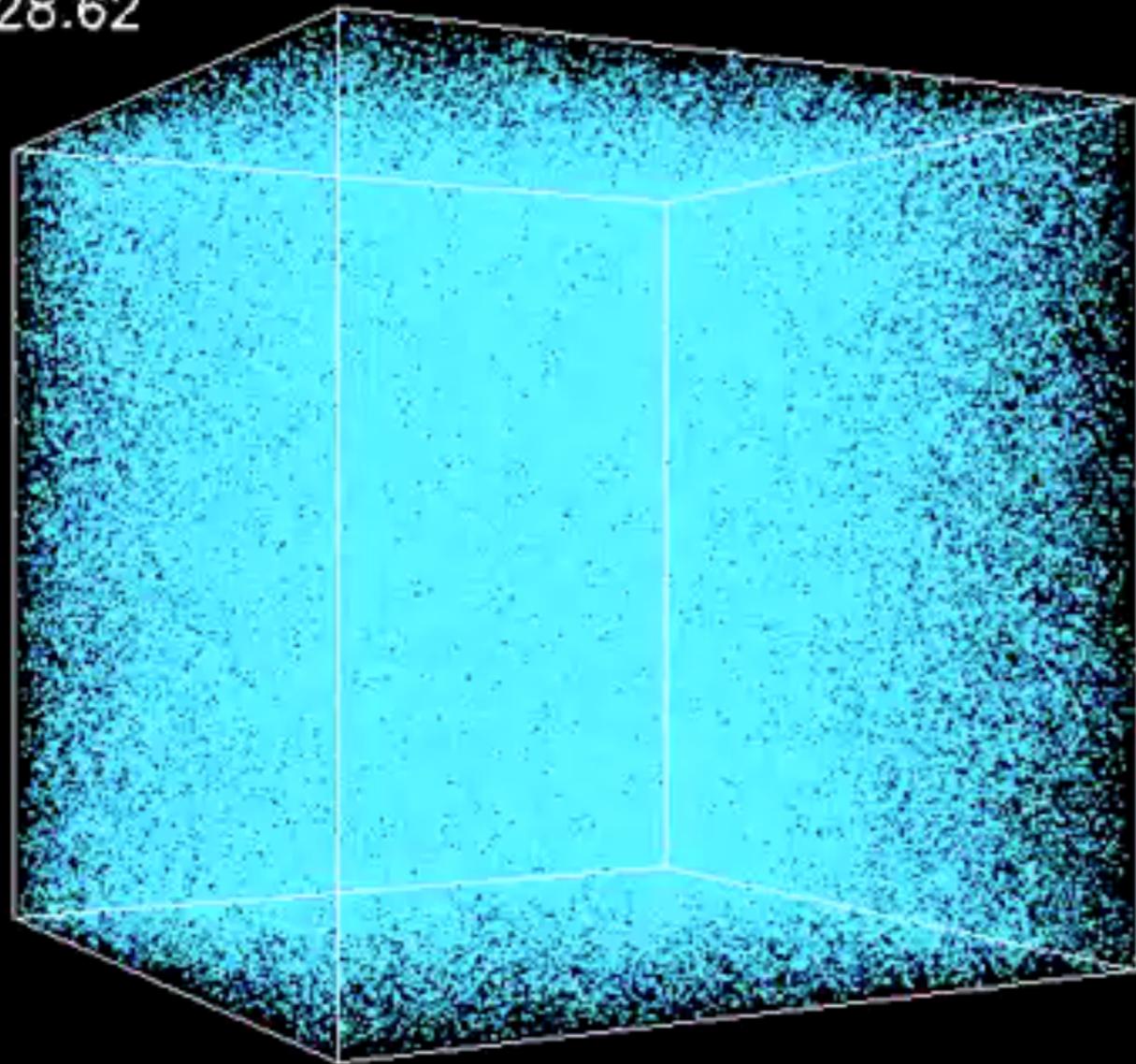


EVOLUTION OF GALAXIES



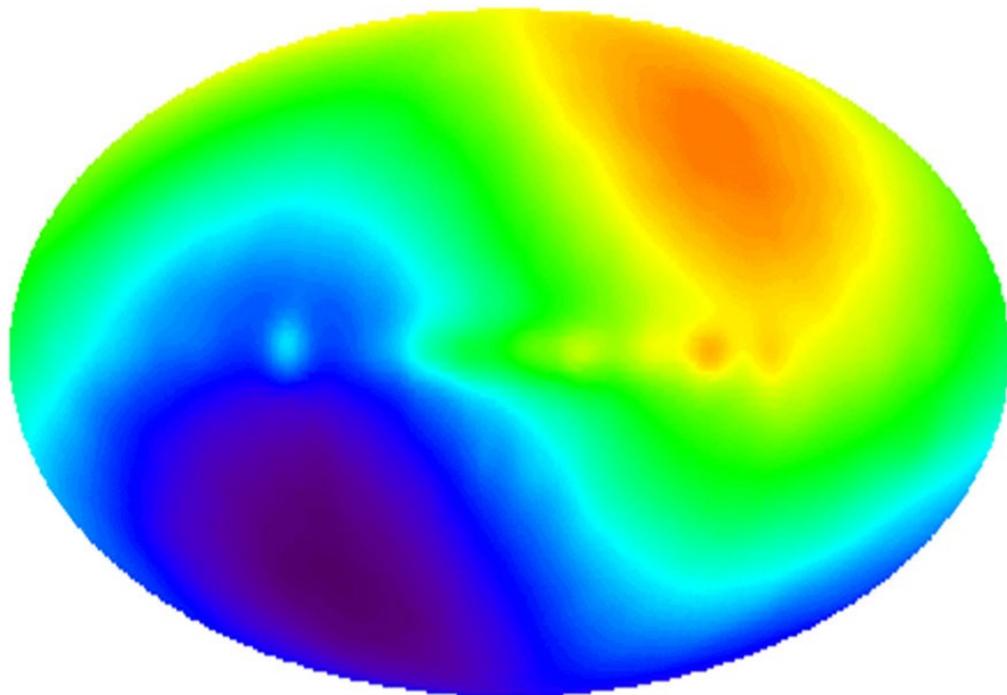
Formation des grandes structures
Simulations (Millenium, Illustris, ...)

$Z=28.62$

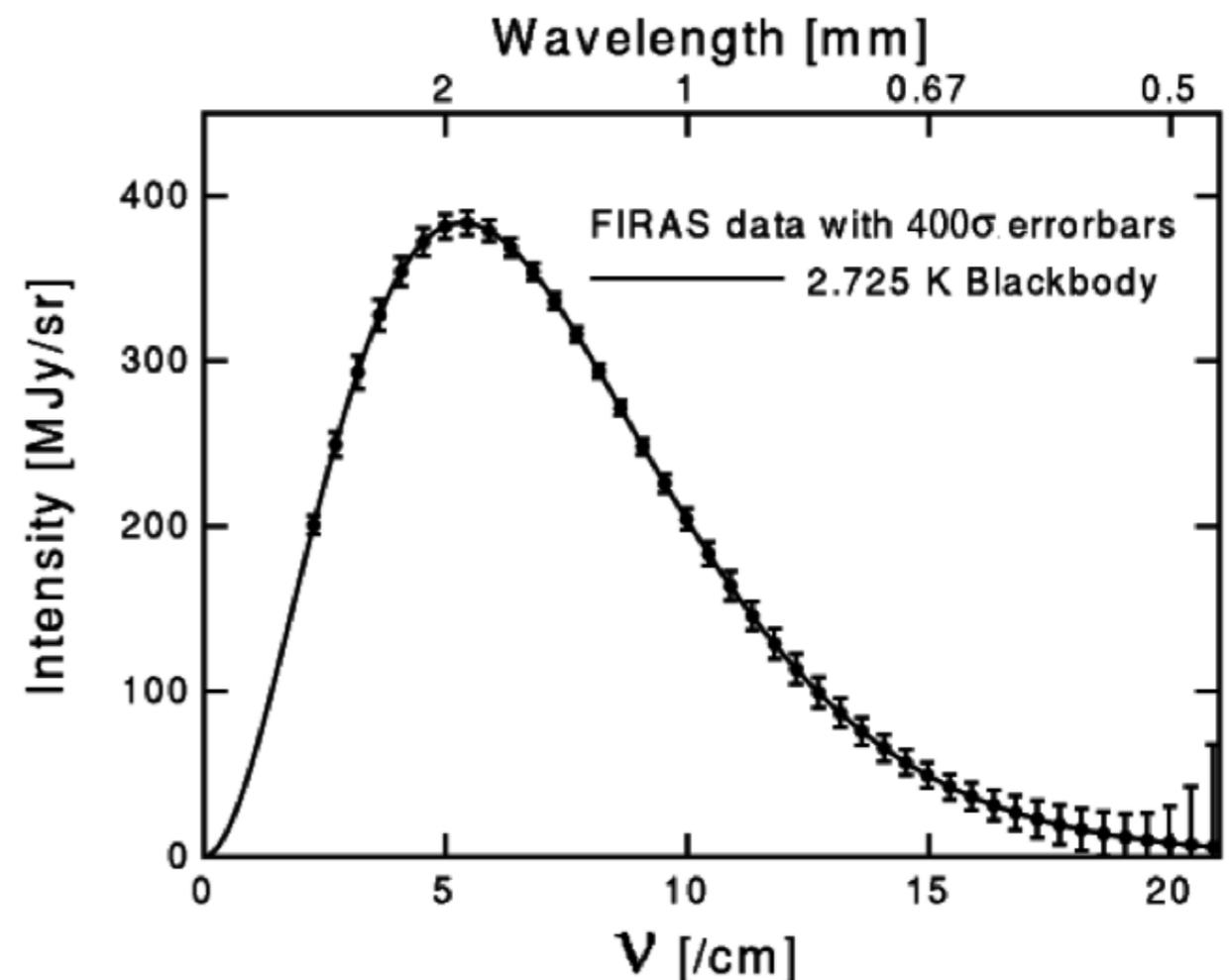


le rayonnement fossile

- 375 000 ans après le Big-Bang, la matière et la lumière se “découplent”
 - La matière va former des étoiles et des galaxies
 - La lumière se disperse et se refroidit
- La lumière de cette frontière - le **fond diffus cosmologique** (CMB) ou “rayonnement fossile” - est observable dans les ondes micro-ondes $T \sim 2.725$ K
 - Penzias & Wilson, prix nobel 1978

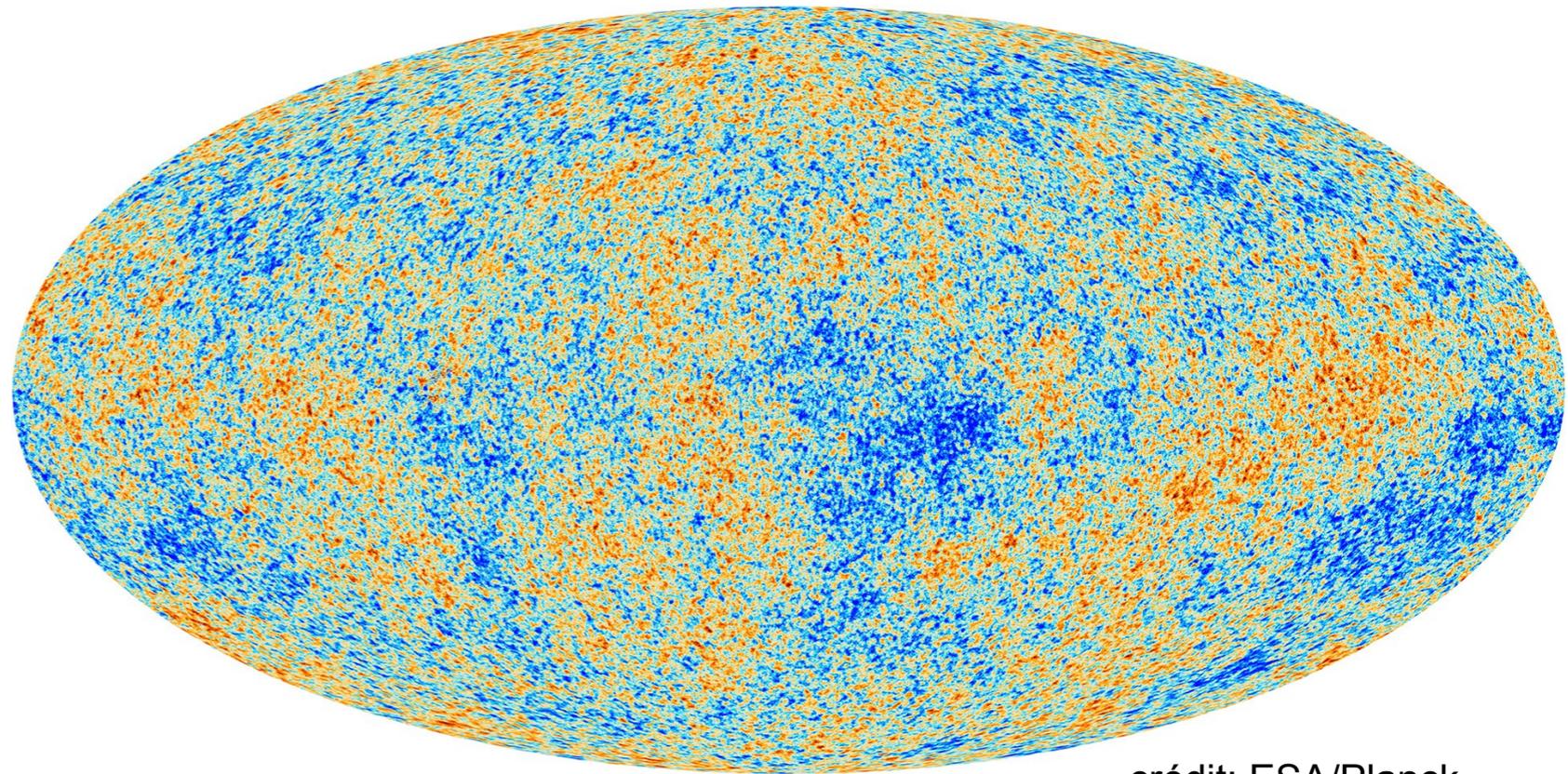


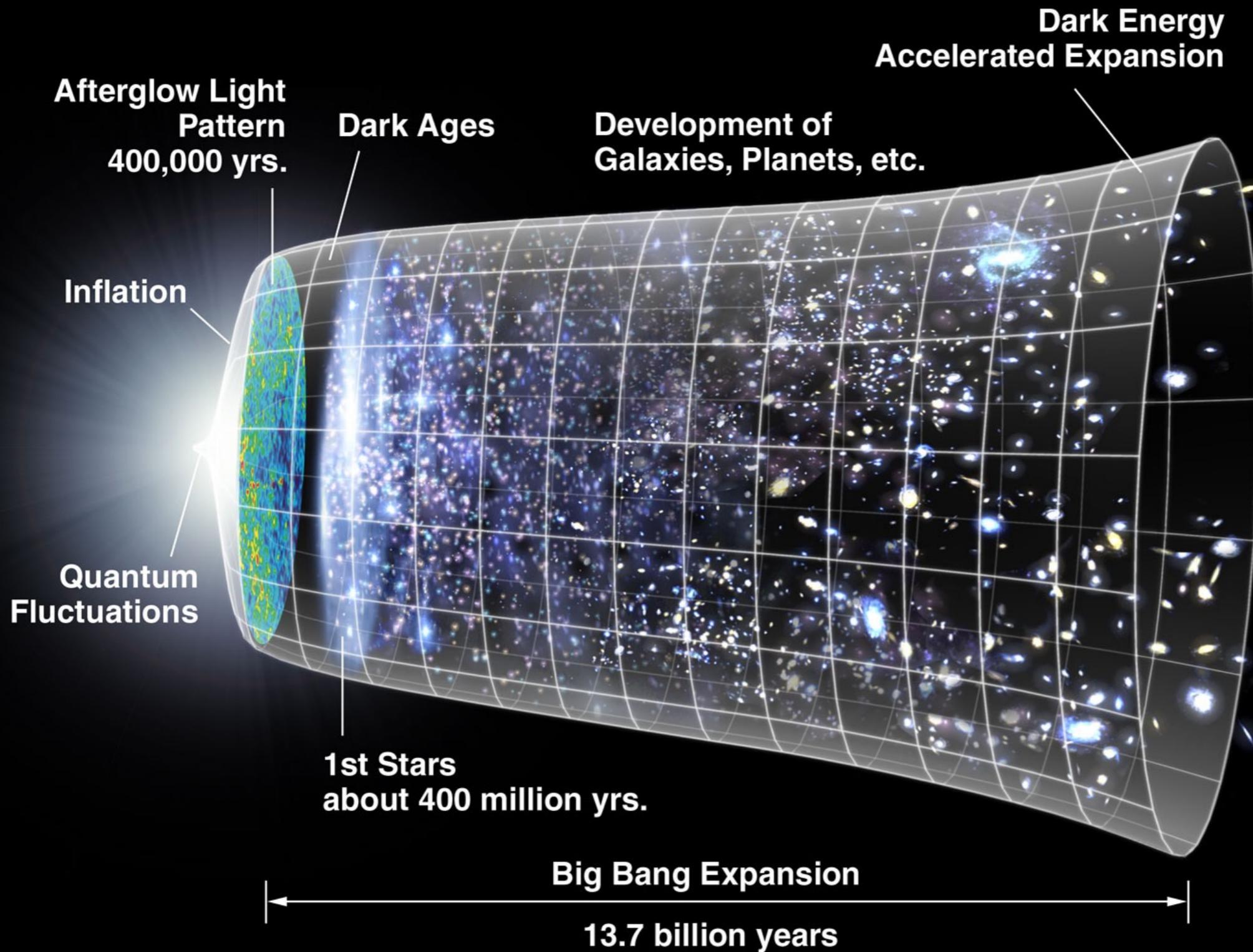
dipole du CMB



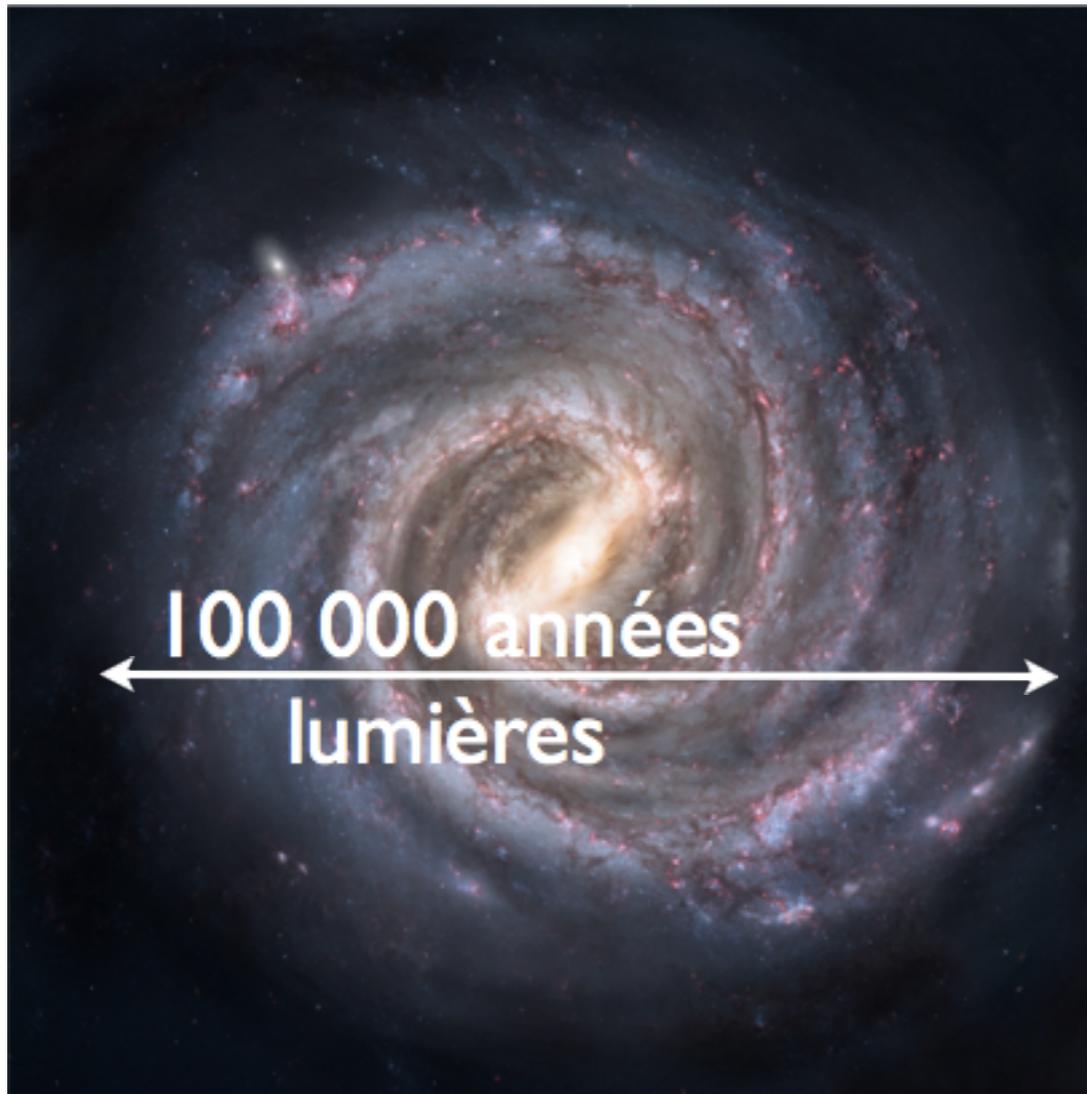
les fluctuations du fond cosmologique

- Les satellites COBE/WMAP/Planck ont mesuré de très petites **fluctuations** de températures ($\sim 10^{-5}$ K)
 - G. Smooth & J. Mather, prix nobel 2006
- Ces fluctuations reflètent les différences de densité dans la distribution initiale de la matière

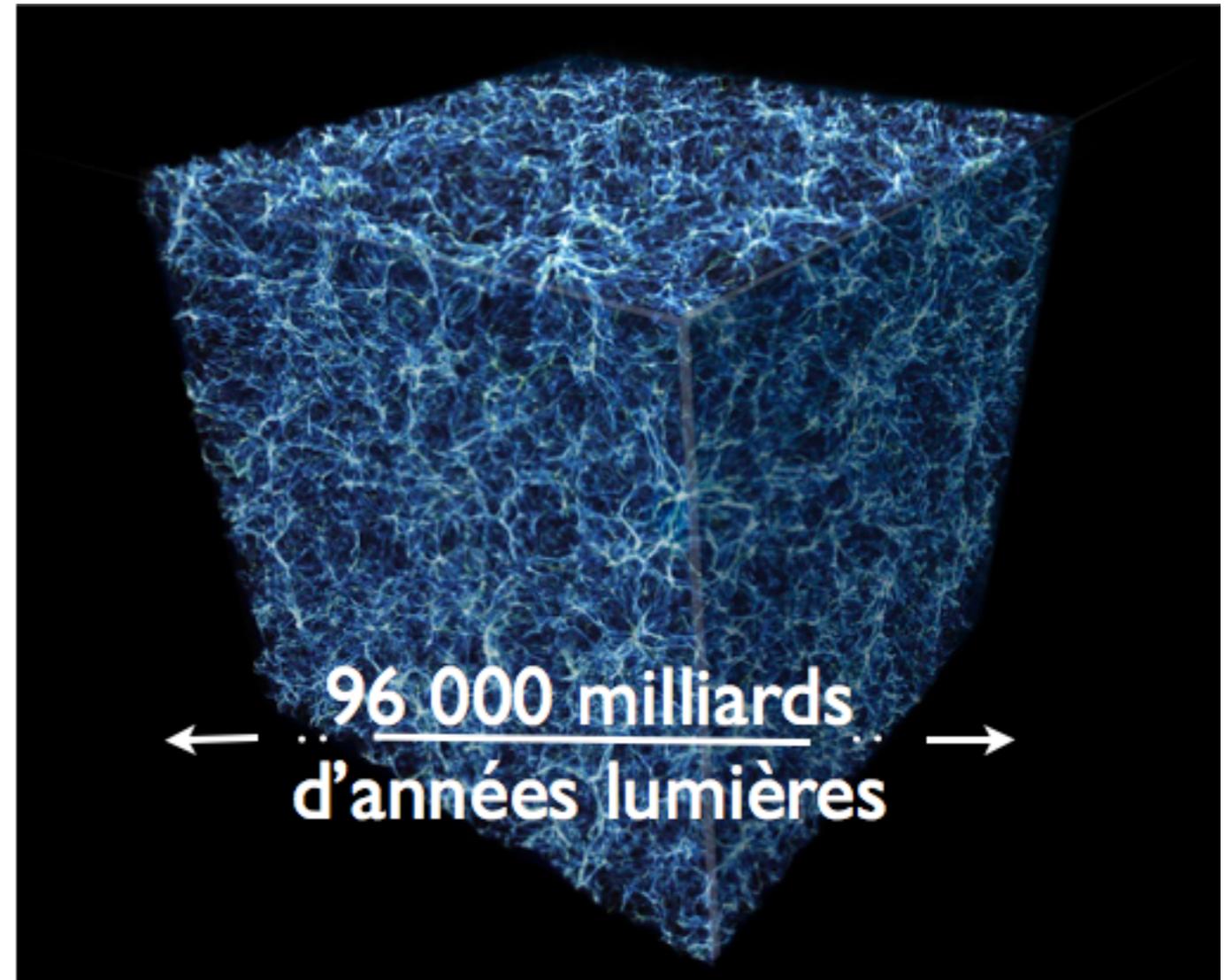




Conclusion



L'Univers connu en 1920



L'Univers tel que nous l'observons en 2017

Que saura-t-on en 2120?