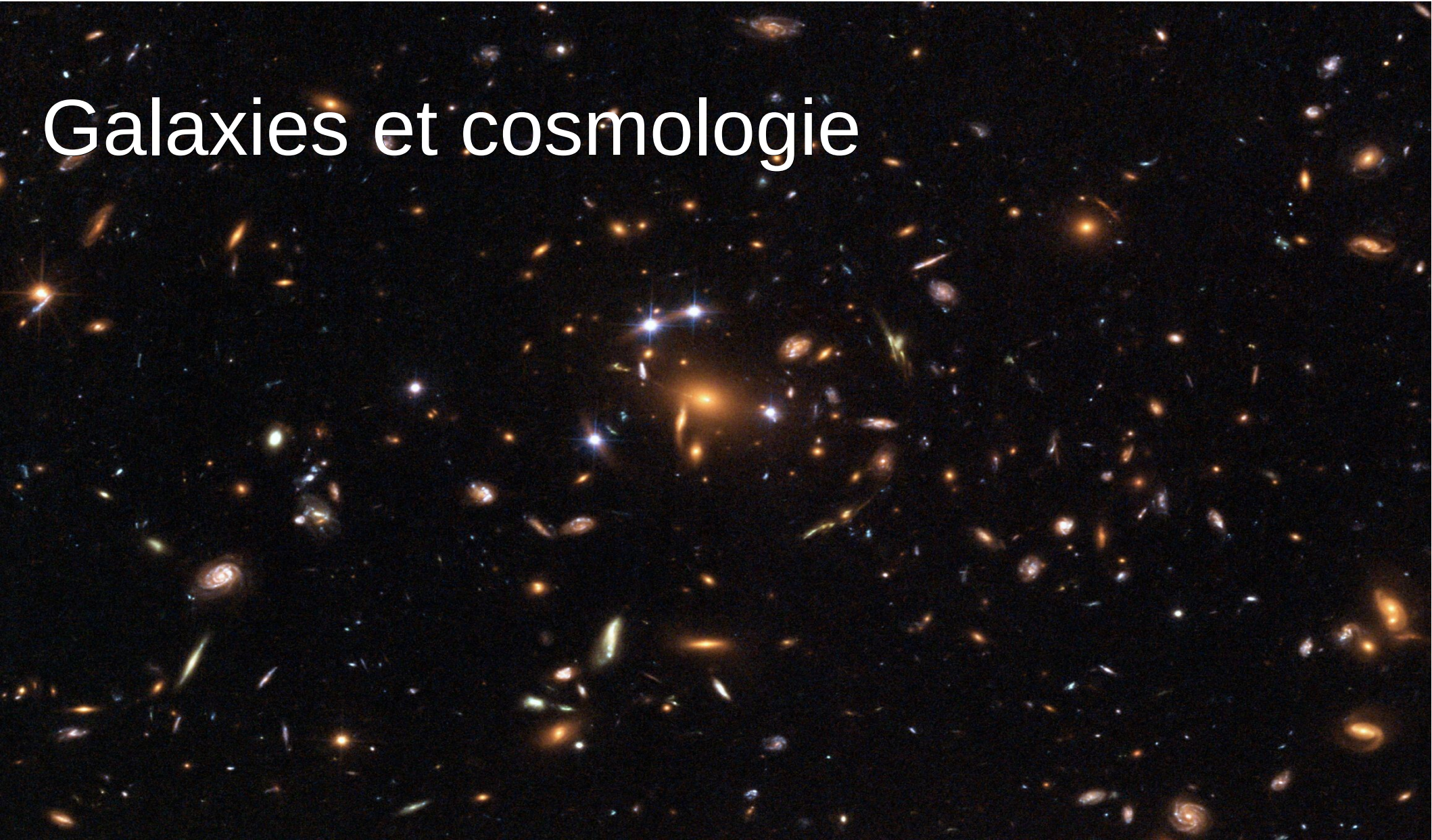


Introduction à l'astrophysique

Galaxies et cosmologie



Plan global (10 séances)

Chapitre 1 : Les galaxies

- I. Vue d'ensemble
- II. La Voie Lactée
- III. Instabilités gravitationnelles

→ 3 séances (18 Fev + 20 Fev + 13 Mar)

Chapitre 2 : Introduction à la cosmologie

- I. Contexte et motivations
- II. Dynamique universelle : l'Univers est en expansion
- III. Le fond diffus cosmologique
- IV. L'abondance des éléments légers

→ 2 séances (18 Mar + 20 Mar)

Activité pratique : mise en oeuvre de l'étude de Vera-Ciro & Helmi (2005)

→ 4 séances (6-7 Mai)

Contrôle : présentation d'un article de recherche en lien avec le cours

→ 1 séance (8 Avril)

1 séance = 1h20

Les galaxies

0. Objectifs pédagogiques

I. Vue d'ensemble

- I.1 Éléments historiques
- I.2 Des systèmes complexes
- I.3 Des briques élémentaires

II. La Voie Lactée

- III.1 Structures principales - composition
- III.2 Évolution chimique
- III.3 Comprendre l'histoire de la VL
- III.4 La VL dans son environnement

III. Instabilité gravitationnelle

Cours au tableau noir



0. Objectifs pédagogiques

Culture scientifique :

- Savoir expliquer ce qu'est une galaxie,
- Connaître les principaux ordres de grandeurs,
- Connaître la distribution approximative de la masse de la Voie Lactée dans ses structures (morphologie) et ses composantes (gaz, étoiles, ...)
- Connaître les principaux outils observationnels et de modélisation utilisés pour étudier les galaxies,
- Notion de population stellaire,
- Notion de métallicité : définition, processus physique associés

Compétences scientifiques :

- Savoir reconnaître une galaxie d'après sa morphologie,
- Savoir identifier les principales structures composant une galaxie,
- Compréhension et capacité à utiliser les liens entre distribution de masse et potentiel de gravitation,
- Savoir utiliser la métallicité comme outil de diagnostic

Culture numérique :

- Connaître les méthodes classiques de modélisation de la dynamique des galaxies

I. Vue d'ensemble

I.1 Éléments historiques

I.2 Les galaxies en tant que systèmes complexes

I.3 Les galaxies en tant que briques élémentaires

I.4 Aspects observationnels

II. La Voie Lactée

III. Instabilité gravitationnelle

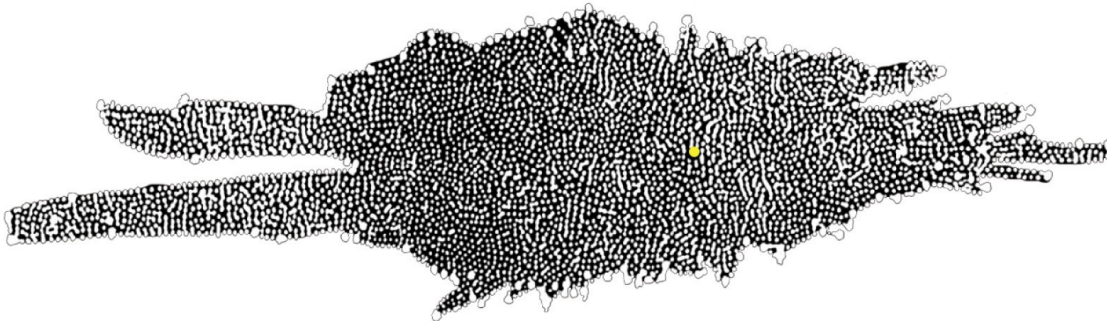
I. Vue d'ensemble

I.1 Éléments historiques : la Voie Lactée

1784 – William Herschel propose une nouvelle structure astronomique : La Galaxie

Méthode = comptage d'étoiles

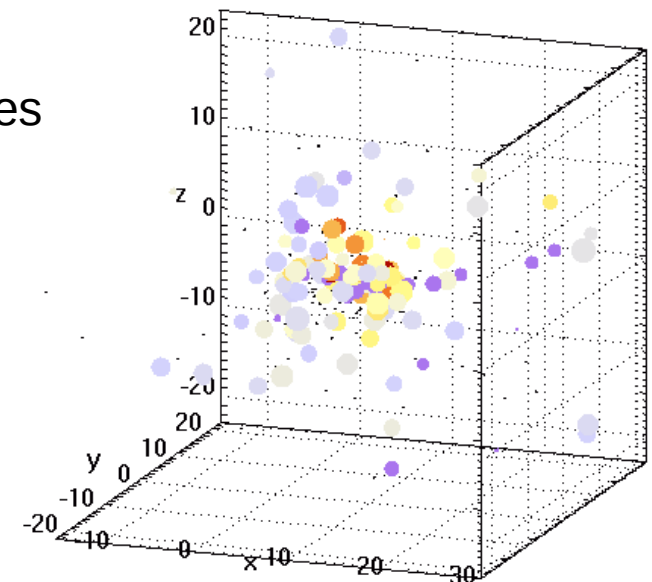
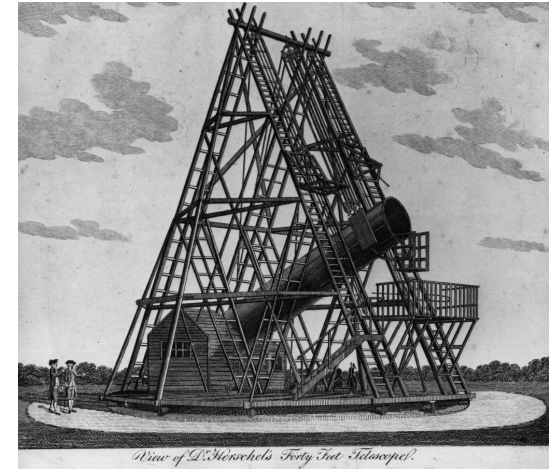
Perfectionnement par Kapteyn (1905)



1838 – Bessel : 1ère mesure de parallaxe

~1850-1900 – développement des distances photométriques

- Kirchhoff 1859 : spectres de raies
 - Secchi 1868 : classification des spectres stellaires
 - Schwarzschild 1890 : théorie atmosphères stellaires
 - Planck 1906 : corps noir
- ⇒ Shapley 1918 : dimension de l' "Univers"



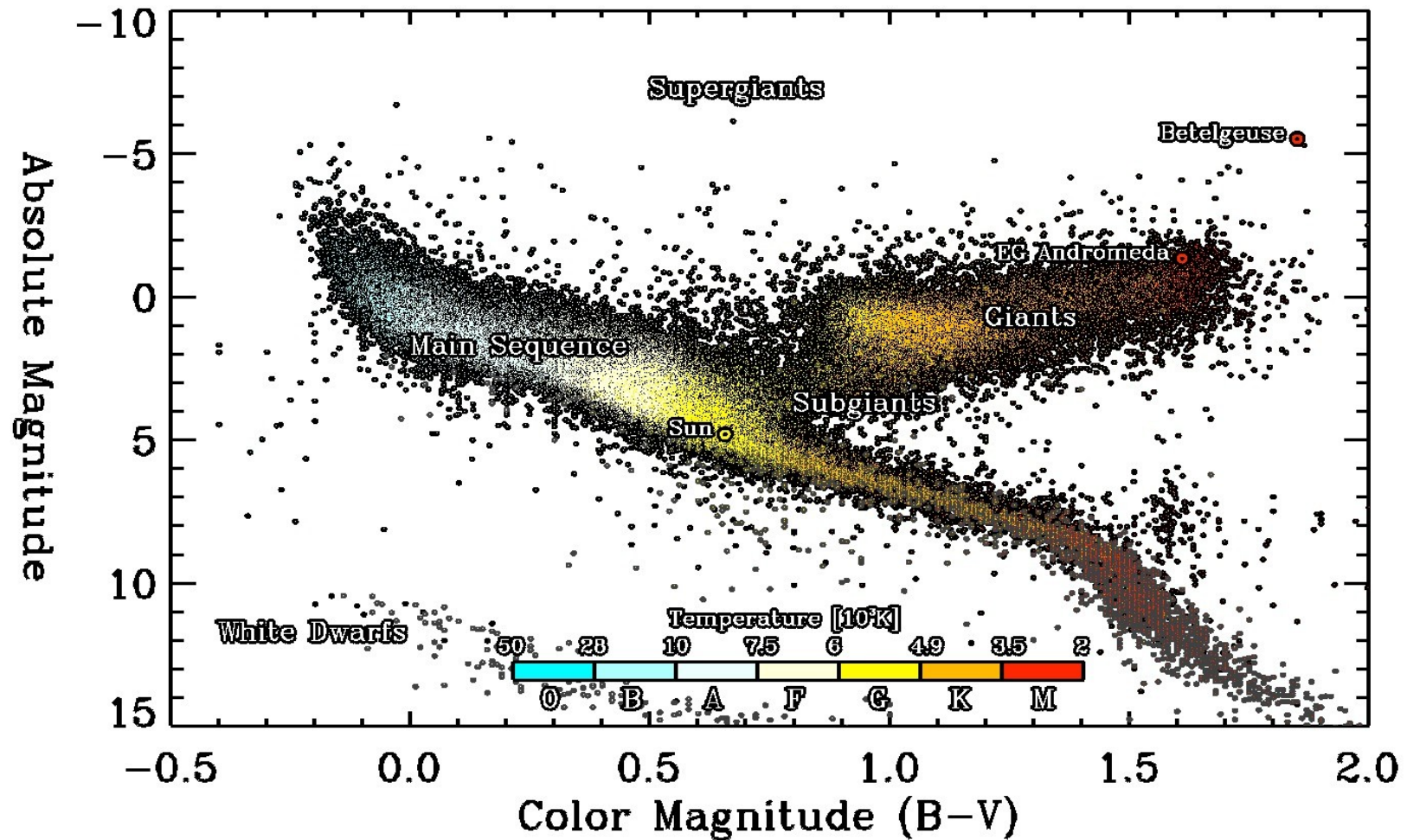
À voir / à faire :

https://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_etalonage-primaire/rr-lyrae-sexercer.html

I. Vue d'ensemble

I.1 Éléments historiques : la Voie Lactée

1913 – Hertzsprung et Russel



Paul A. Higgins (Astrophysics Research Group / Trinity College Dublin)

1920 – Lindblad : interprétation des bras spiraux comme ondes de densité

I. Vue d'ensemble

I.1 Éléments historiques : les autres galaxies

<XXe – “Nébuleuses spirales” (E. Kant propose la notion d'Univers-Île dès 1755)

1912 – Slipher : décallage spectral systématique vers le rouge

1912 – Miss Leavitt : relation période – luminosité des Céphéïdes

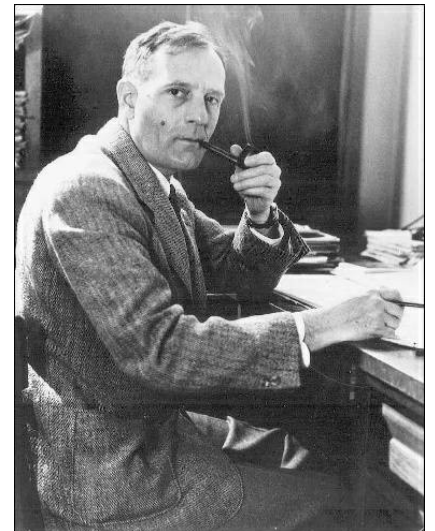
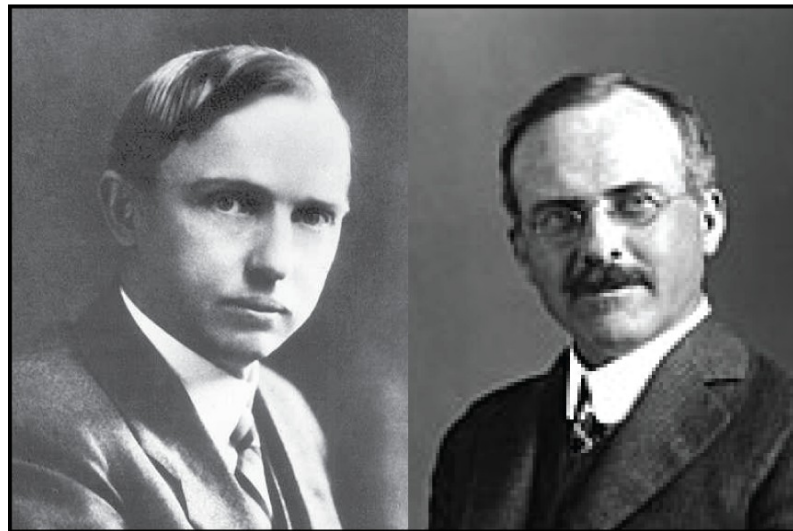
1917 – Curtis et Ritchey : novae dans les spirales

1920 – grand débat Shapley (in) vs. Curtiss (out)

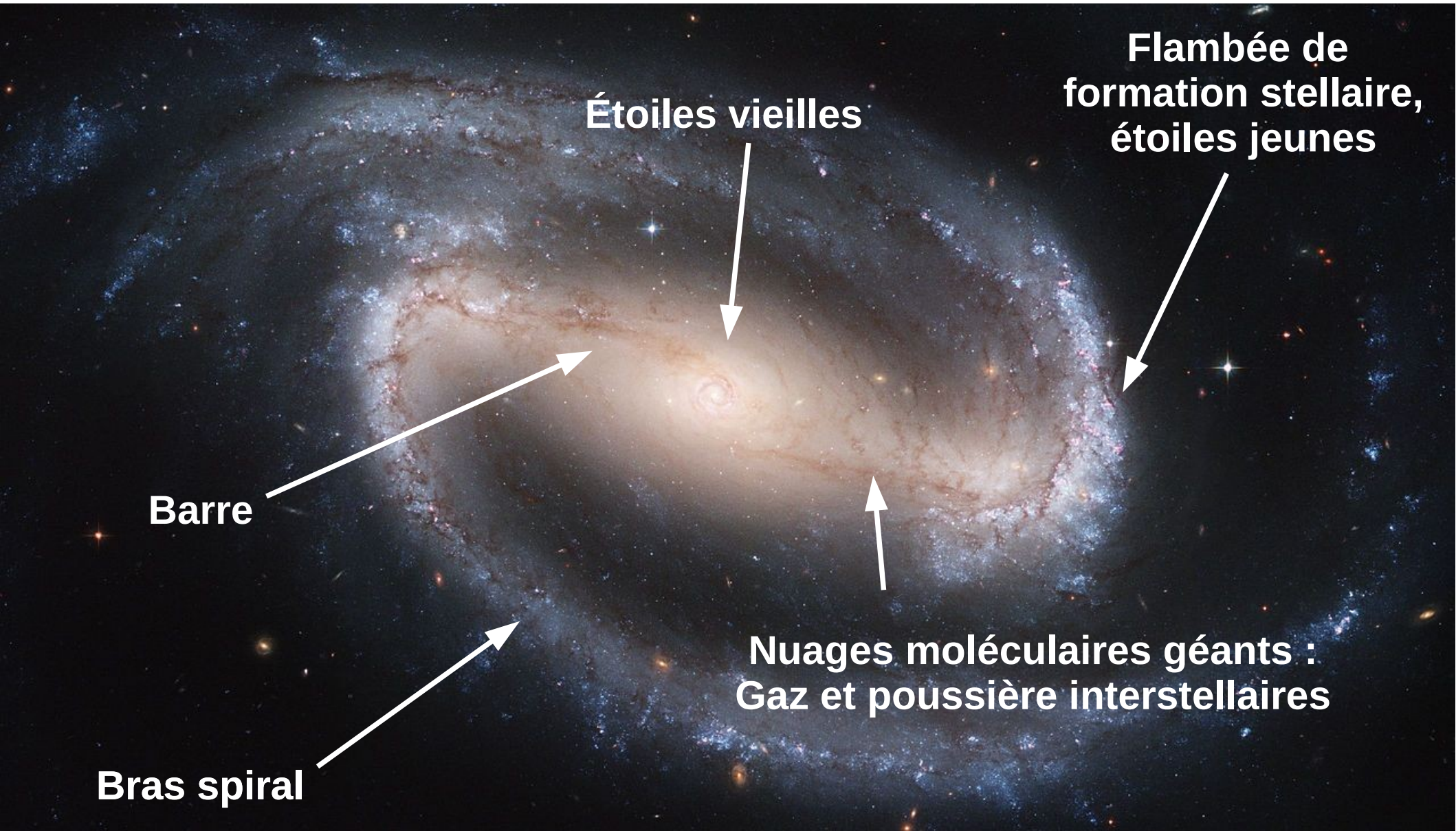
1923 – Hubble : une Céphéïde dans M31

1925 – Hubble : classification morphologique des galaxies

1929 – Loi de Hubble

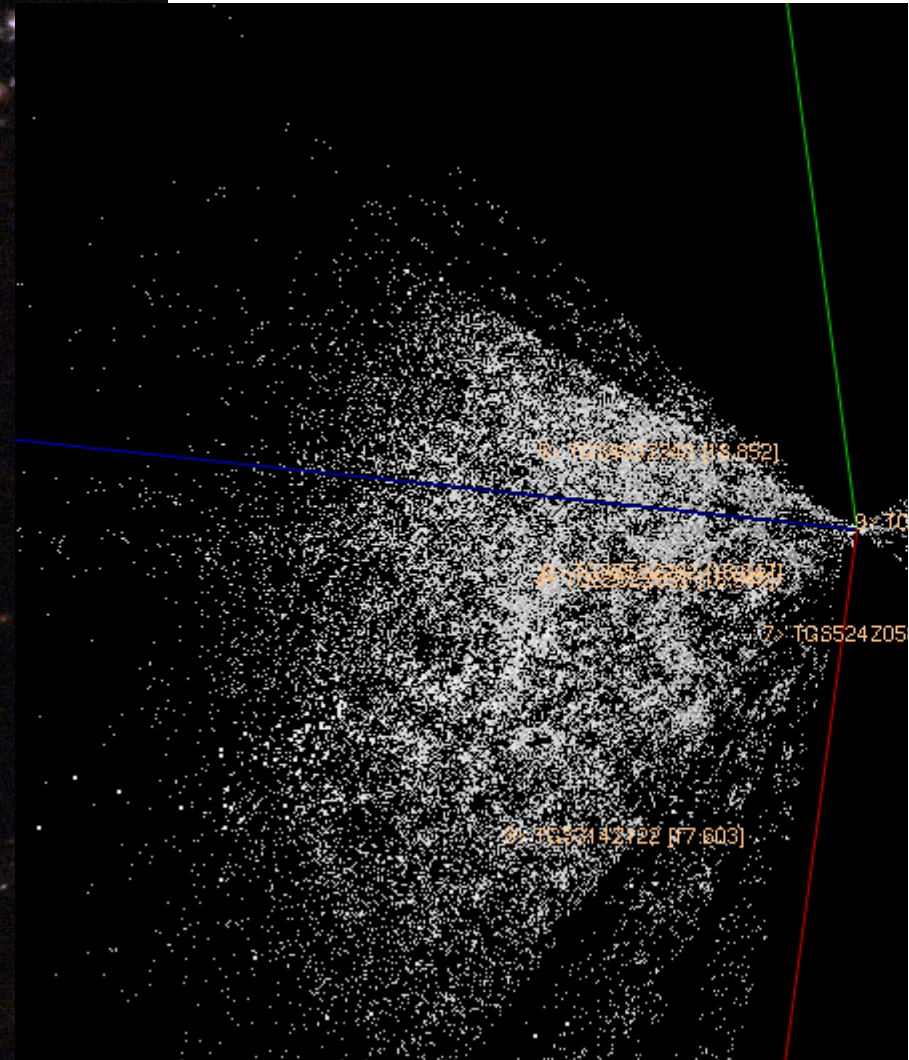


I. Vue d'ensemble
I.2 Les galaxies en tant que systèmes complexes



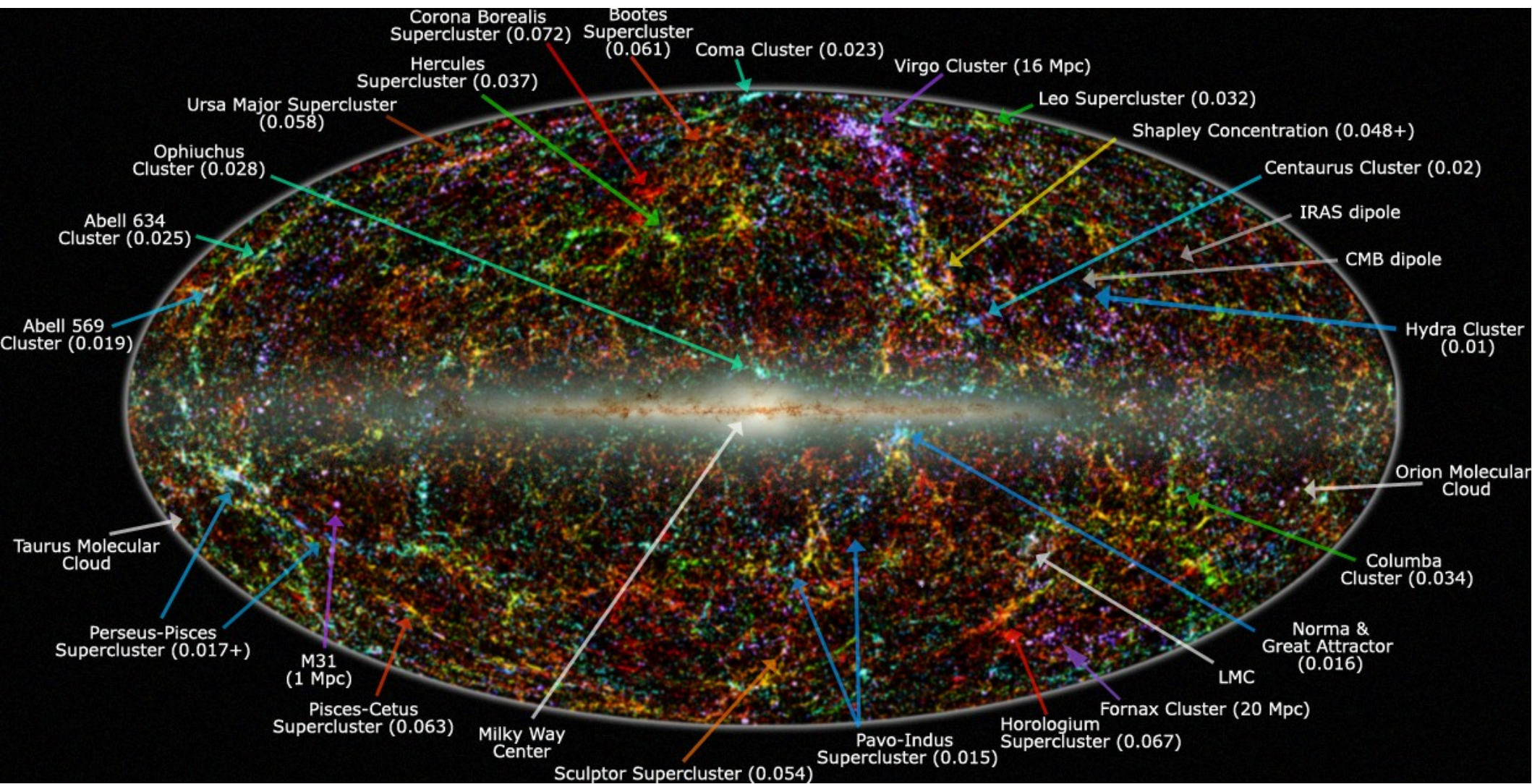
I. Vue d'ensemble

I.3 Les galaxies en tant que briques élémentaires



I. Vue d'ensemble

I.4 Aspects observationnels



I. Vue d'ensemble

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales et composition

II.2 Évolution chimique

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

III. Instabilité gravitationnelle

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales - Composition

Position particulière du Soleil dans le disque de la Voie Lactée :

⇒ émission bien visible dans le ciel nocturne

⇒ MAIS structure difficile à observer



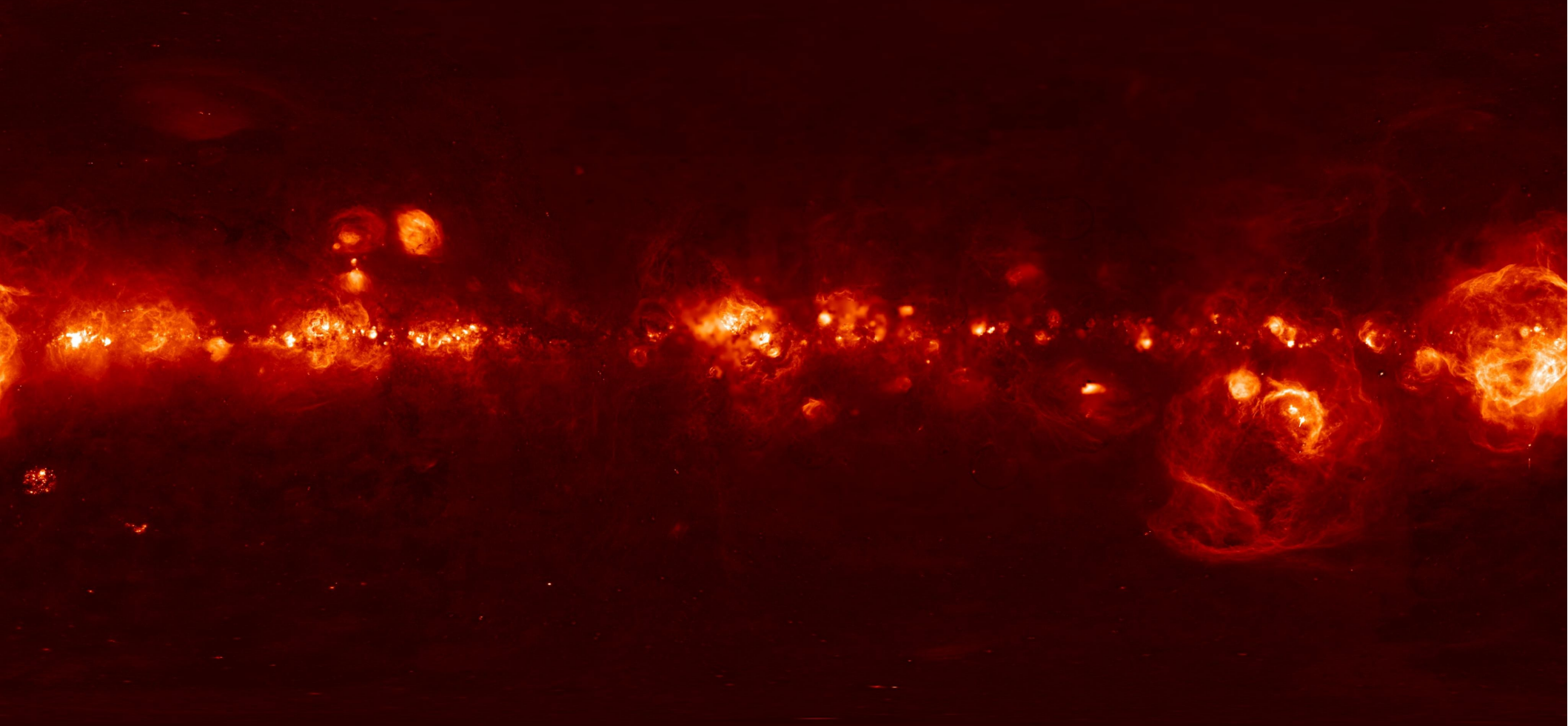
II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales - Composition

La Voie Lactée dans le domaine IR proche, vue par 2MASS : dominée par l'émission des étoiles

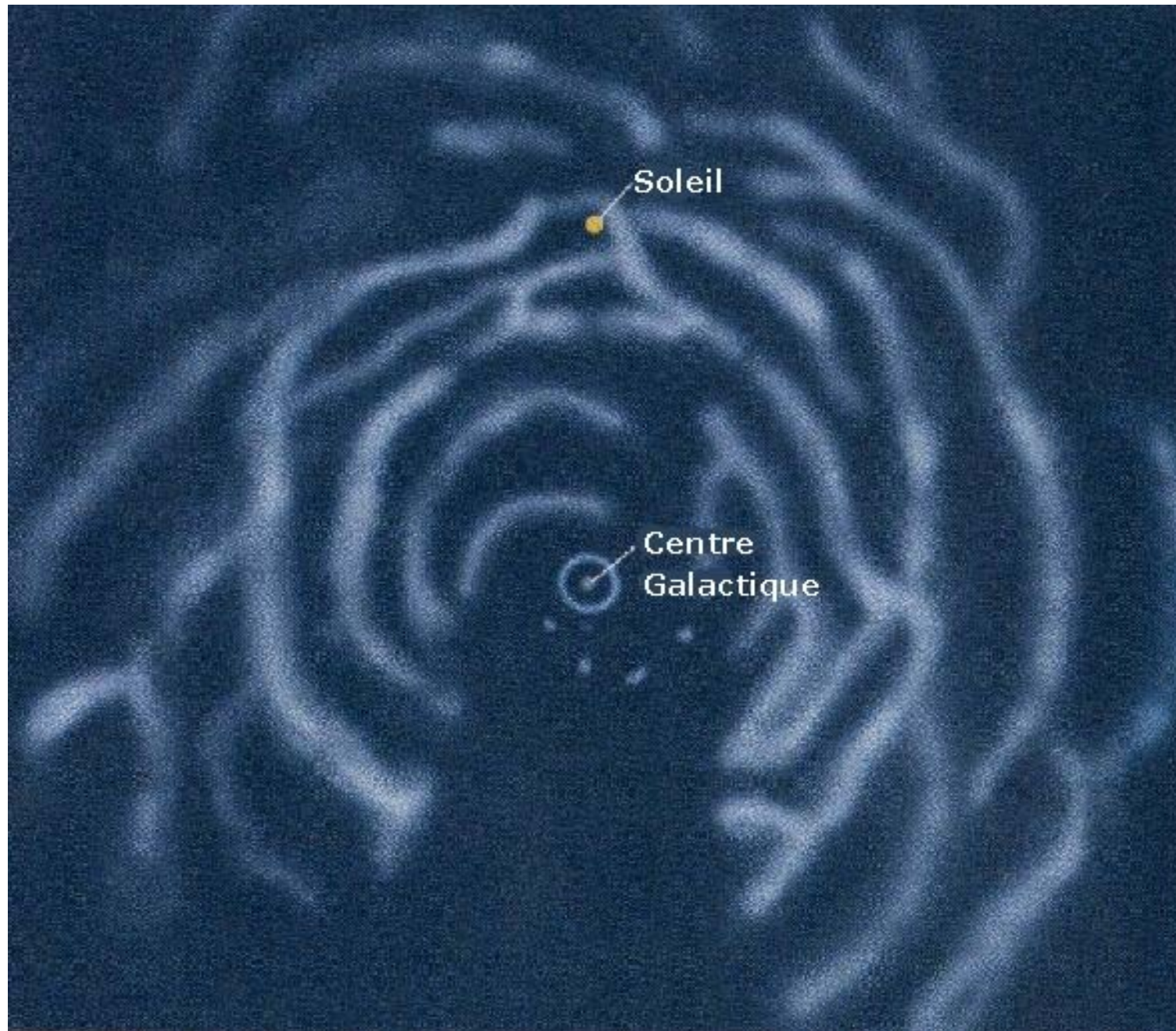


La Voie Lactée à 656.28 nm (H-Alpha Sky Survey) : dominée par l'émission du gaz chaud

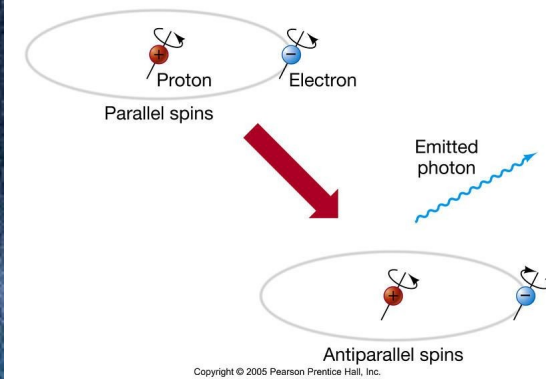


II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales - Composition



Historiquement, 1ère observation directe de la structure du gaz par l'émission HI À 21 cm (=hydrogène atomique)



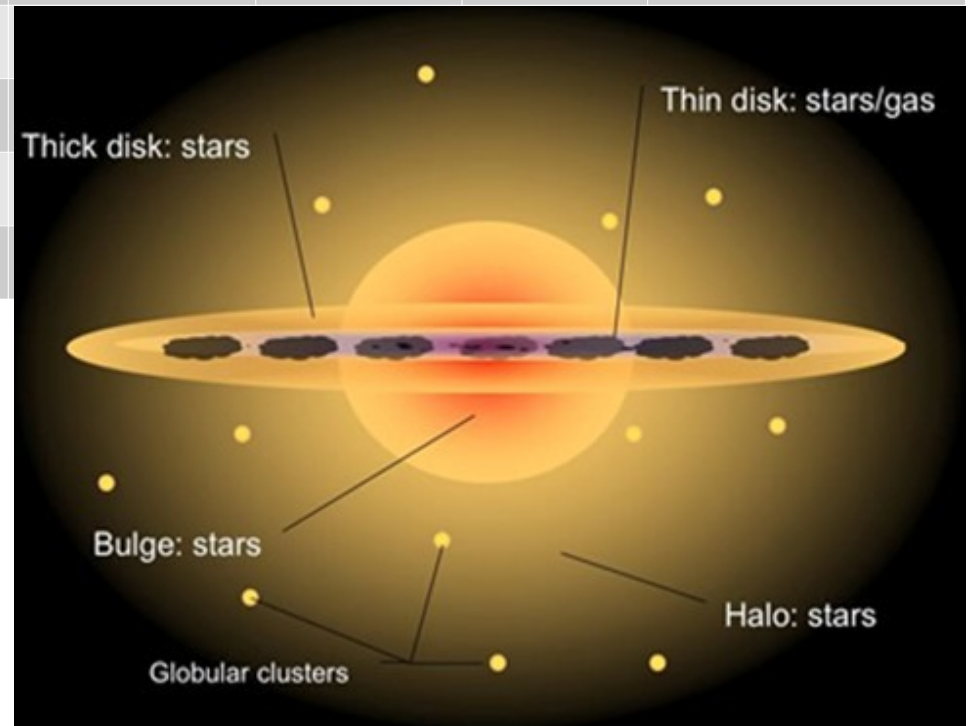
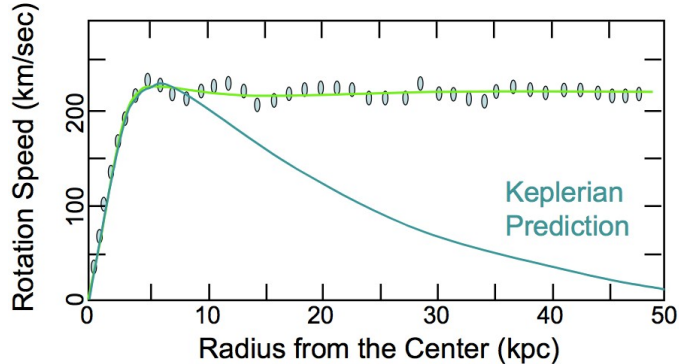
- * Intensité ~ densité HI
- * Profil de raie
⇒ vitesse(s) radiale(s)
⇒ distances

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales - Composition

Composante	M[Msun]	M/L	σ_w [km/s]	[Fe/H]	Âge [Gyr]	Hz[pc]	Membres
Disque mince	2e10 / 6e10	- / 3	8 / 20	>-0.1 / -0.5à+0.1	<2 / <10	50 / 325	Régions HII / *A, F
Disque épais	<1e10	~15	50	-0.6à-0.4	14-17	1400	Amas, *G, M
Bulbe/barre	1e10	3	120	-1à+1	0-17	400	*M
Halo stellaire	1e9	~1	90	-4.5à-0.5	14-17	3000	Amas glob.
Halo sombre	2e11?	-	?	-	?	1e5?	?
HI	4e9	-	-				
HII	8e7	-	-				
H2	3e8	-	-				
Poussière	4e7	-	-				

Écart prévision – observation interprété en termes de “halo de matière noire”



I. Vue d'ensemble

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales et composition

II.2 Évolution chimique

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

III. Instabilité gravitationnelle



II. La Voie Lactée

II.2 Évolution chimique

Notion de “métallicité” : dans le contexte astrophysique, métal = $Z > 2$ (!!!)
⇒ métallicité = mesure de l'abondance en éléments (un peu) lourds

Beaucoup utilisés :

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \log(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\text{solaire}}$$

$$[\alpha/\text{H}] = \log(N_{\alpha}/N_{\text{H}}) - \log(N_{\alpha}/N_{\text{H}})_{\text{solaire}}$$

$$[\alpha/\text{Fe}] = \log(N_{\alpha}/N_{\text{Fe}}) - \log(N_{\alpha}/N_{\text{Fe}})_{\text{solaire}}$$

α = O, Ne, Mg, Si, Ca, Ti (et/ou)

Pratique : possible de se baser sur la détection de raies dans les spectres stellaires

Problème : confusion fréquente entre plusieurs définitions

Ordre de grandeurs :

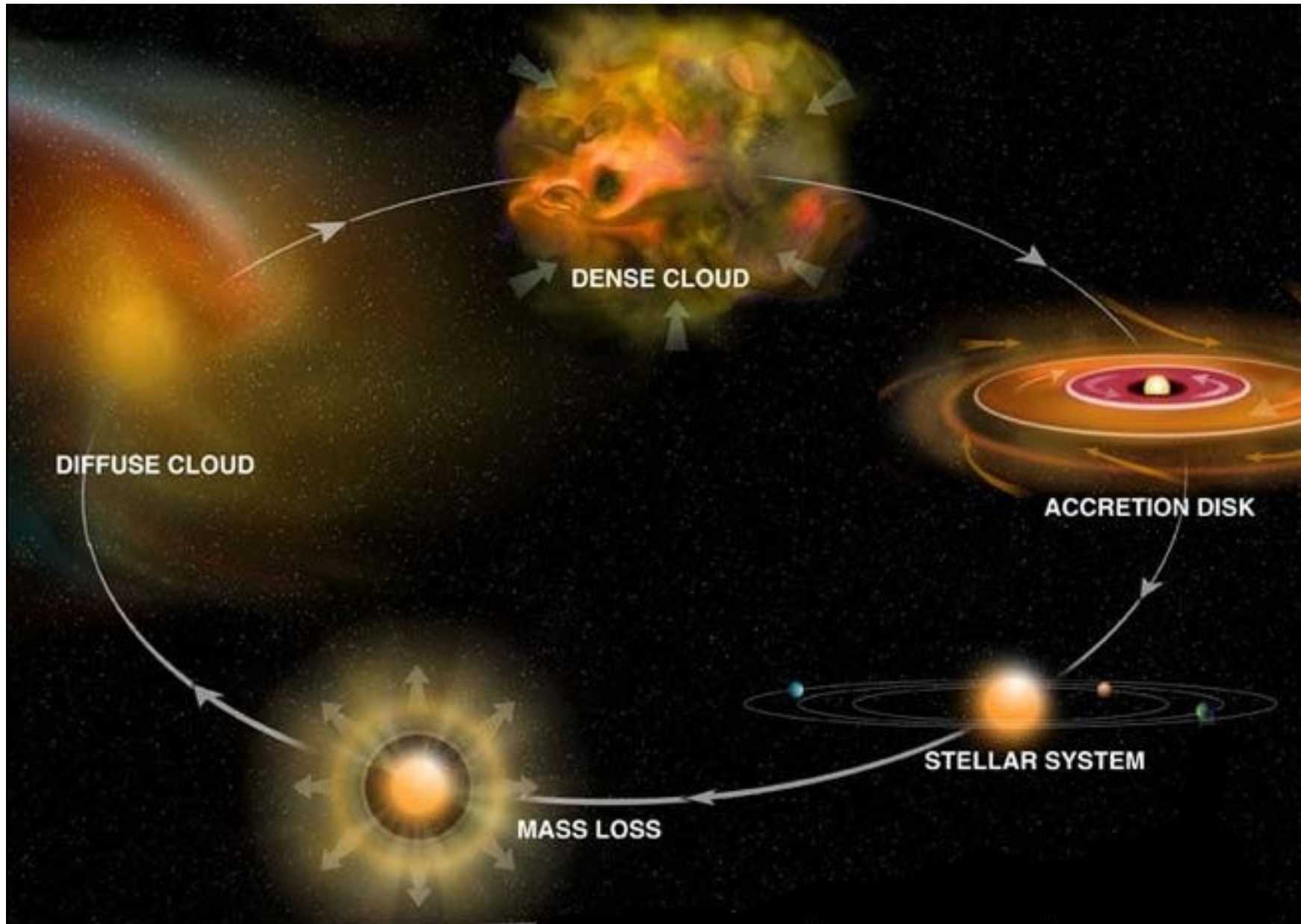
$[\text{Fe}/\text{H}] = -4.5$: étoiles les plus pauvres connues dans la Voie Lactée

$[\text{Fe}/\text{H}] = +0.3$: métallicité double du Soleil

$[\text{Fe}/\text{H}] = +1.0$: étoiles riches

II. La Voie Lactée

II.2 Évolution chimique

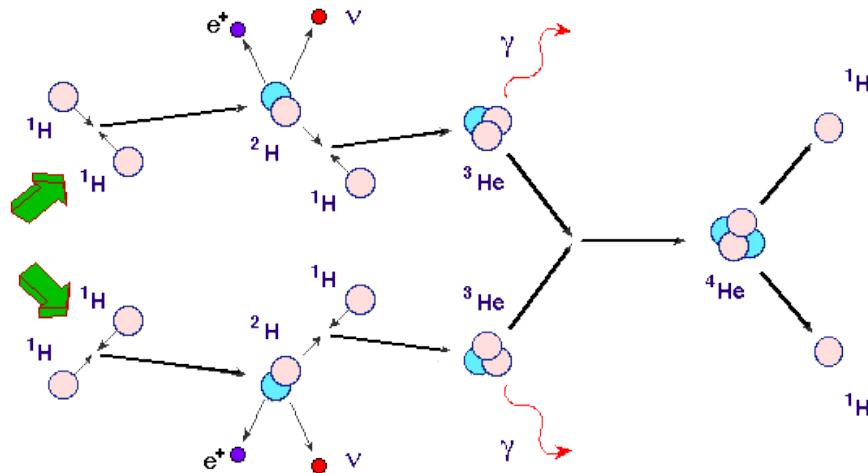


II. La Voie Lactée

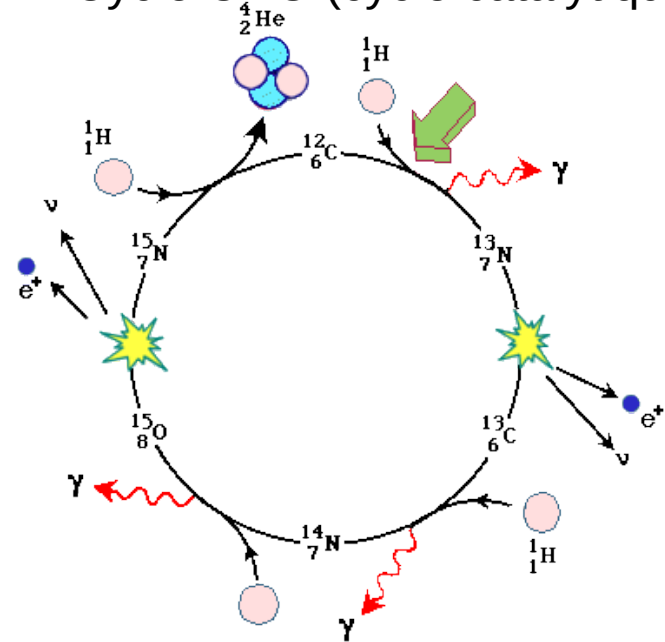
II.2 Évolution chimique

Formation d'Hélium au coeur des étoiles sur la séquence principale : <http://www.cosmovisions.com/nusy.htm>

Cycle proton-proton



Cycle CNO (cycle catalytique)

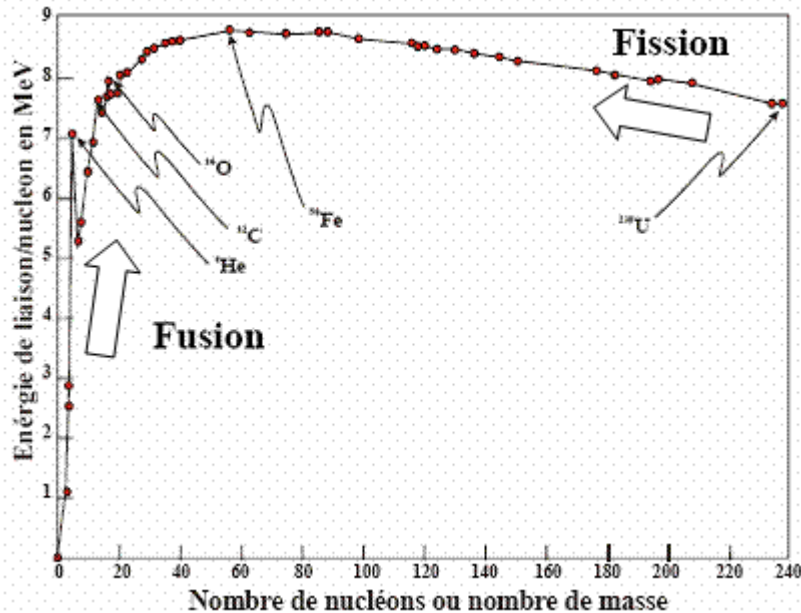


Formation des éléments au coeur des étoiles évoluées :

X consommé	T [K]	Étoile 0.3 Msun	Étoile 1 Msun	Étoile 25 Msun
H	4 – 15 – 40 e6	~800 Gyr	10-12 Gyr	7 Myr
He	1e8	-	~200 Myr	500000 ans
C	1e9	-	-	200 ans
Ne	1.2e9	-	-	1 an
O	2e9	-	-	5 mois
Si	3e9	-	-	~ 1jour

II. La Voie Lactée

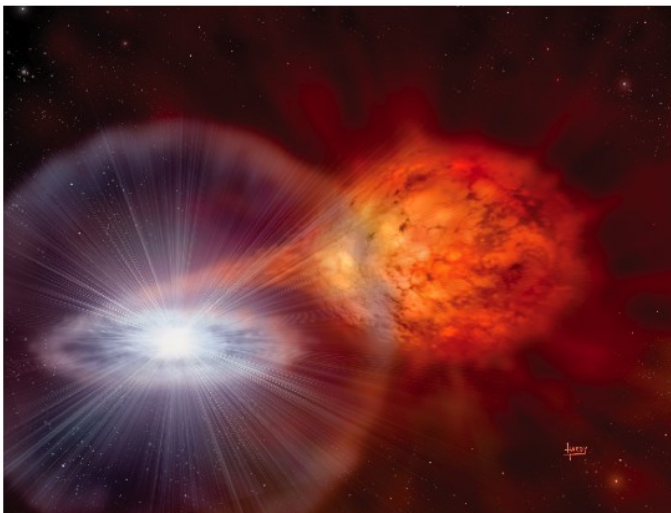
II.2 Évolution chimique



Fe = max de stabilité $\Rightarrow$ pas de fusion au-delà
 $\Rightarrow$ explosion en SN II
 $\Rightarrow$ bombardement intense de neutron
 $\Rightarrow$ nucléosynthèse explosive
 $\Rightarrow$ libération de tous les éléments dans le MIS

SNII : forte proportion en éléments alpha

Temps caractéristiques $\sim$ qq Myr



Artist's rendition of a white dwarf accumulating mass from a nearby companion star. This type of progenitor system would be considered singly-degenerate.

Image courtesy of David A. Hardy, © David A. Hardy/www.astroart.org.

Accrétion de gaz par une étoile dégénérée jusqu'à $M > 1.44 M_{\text{sun}}$
 $\Rightarrow$ supernova thermonucléaire (= SN Ia)

SN Ia : plus forte proportion de Fe

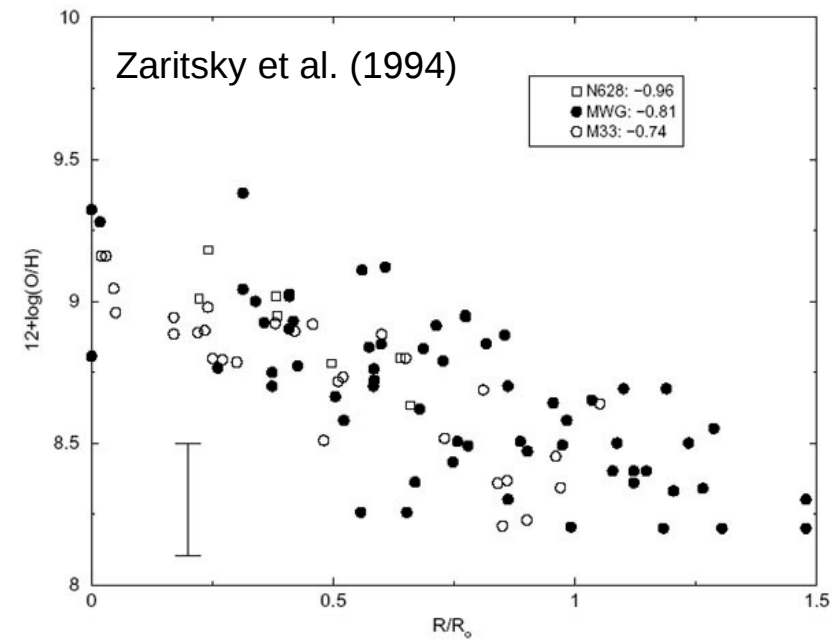
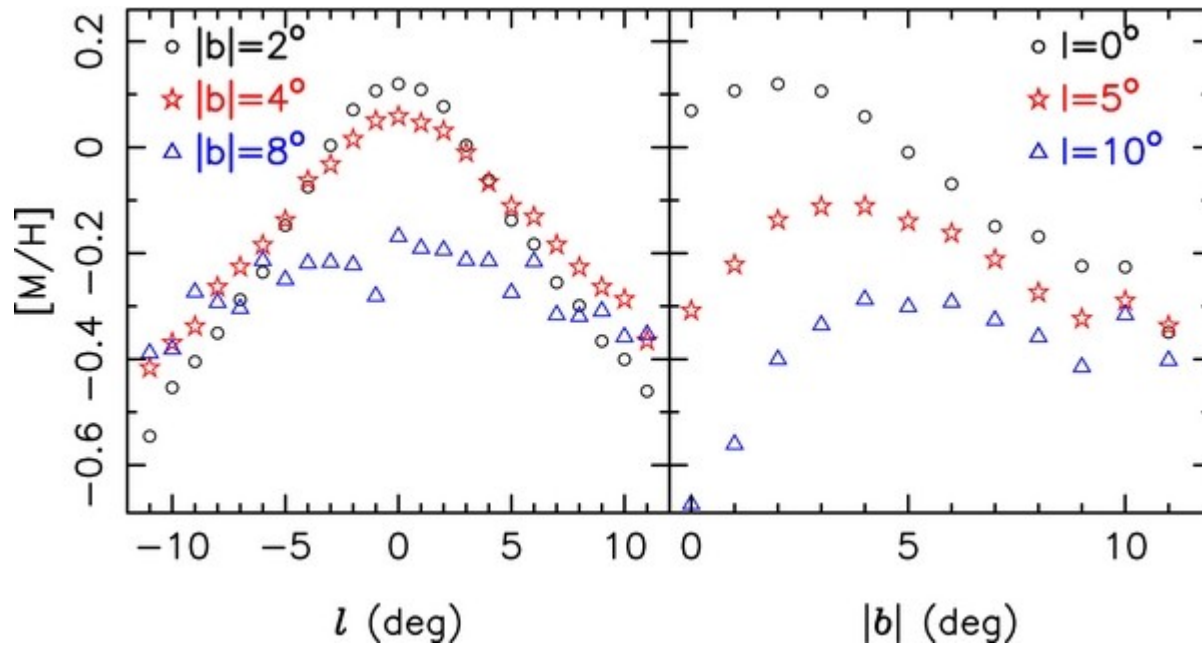
Temps caractéristique $\sim$ qq Gyr

II. La Voie Lactée

II.2 Évolution chimique

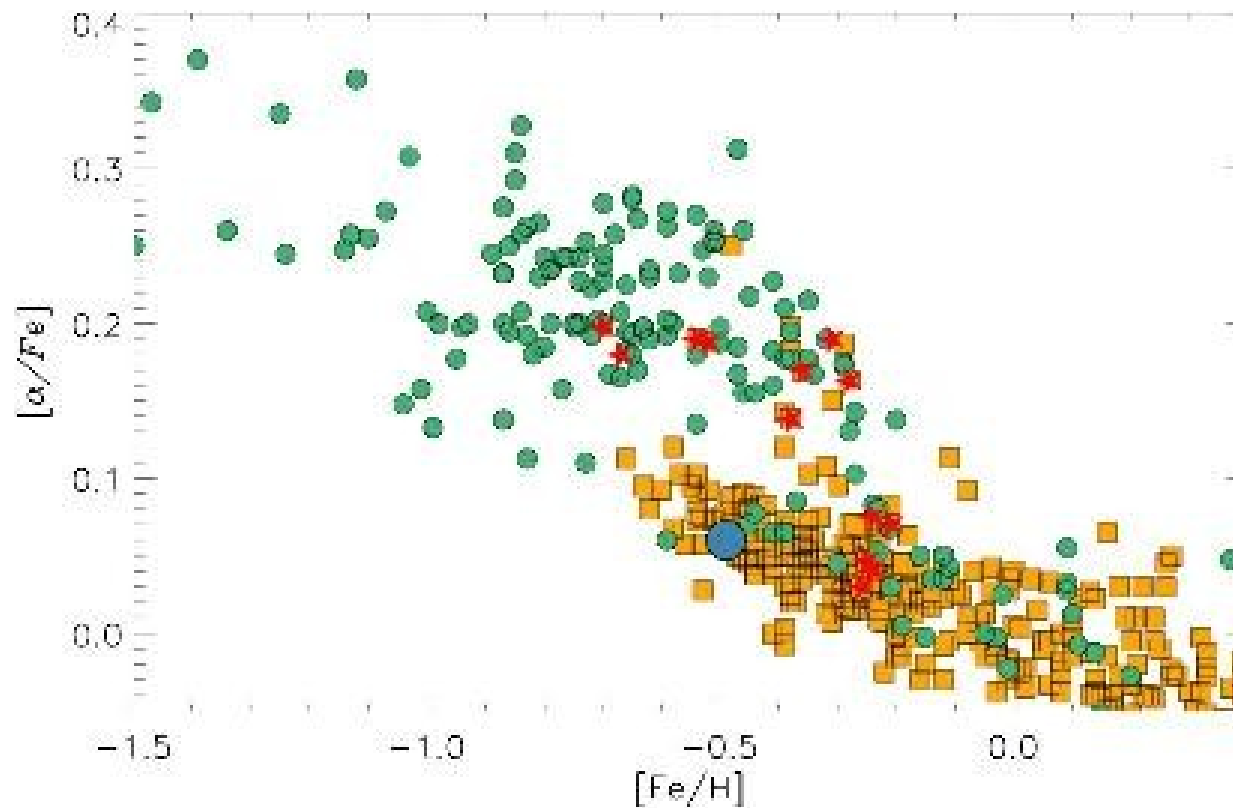
Exemple 1 : gradients galactiques de métallicité

Inma Martinez-Valpuesta and Ortwin Gerhard, ApJ, 2013



Exemple 2 : distinguer chimiquement les composantes galactiques

Disque mince (jaune) vs. disque épais (vert) au voisinage solaire (classification cinématique)



I. Vue d'ensemble

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales et composition

II.2 Évolution chimique

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

III. Instabilité gravitationnelle

II. La Voie Lactée

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

Le halo : vestige d'un effondrement monolithique ou témoin d'une formation hiérarchique ?

1962 : Eggen, Lynden-Bell, Sandage

- corrélation métallicité – excentricité des étoiles du halo
- ⇒ Scénario d'effondrement monolithique d'une $\sim$ sphère de gaz primordial
 - ⇒ temps caractéristique ~ 100 Myr
 - ⇒ étoiles de faible métallicité (OK)
 - ⇒ gradient radial de métallicité : NON !

Autres difficultés :

- la corrélation n'est pas confirmée par les observations récentes
- l'âge des amas globulaires s'étale sur plusieurs Gyr
- étoiles de faible métallicité dans le voisinage solaire, sans excentricité

1978 : Searle et Zinn

- observation des amas globulaires
- ⇒ âges distribués sur qq Gyr
- ⇒ évolution chimique distincte des autres composantes de la VL
 - ⇒ accréation de gaz non-galactique

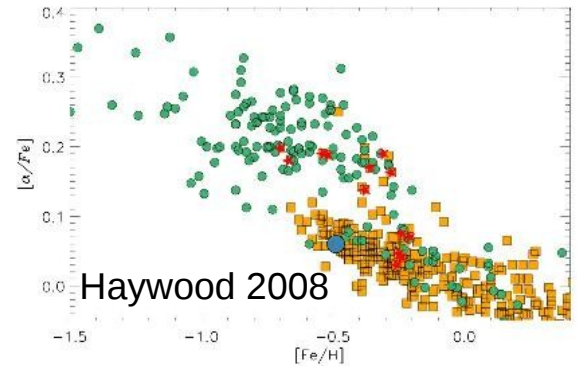
Today : rôle respectif des deux scénarios-limites toujours activement débattu

II. La Voie Lactée

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

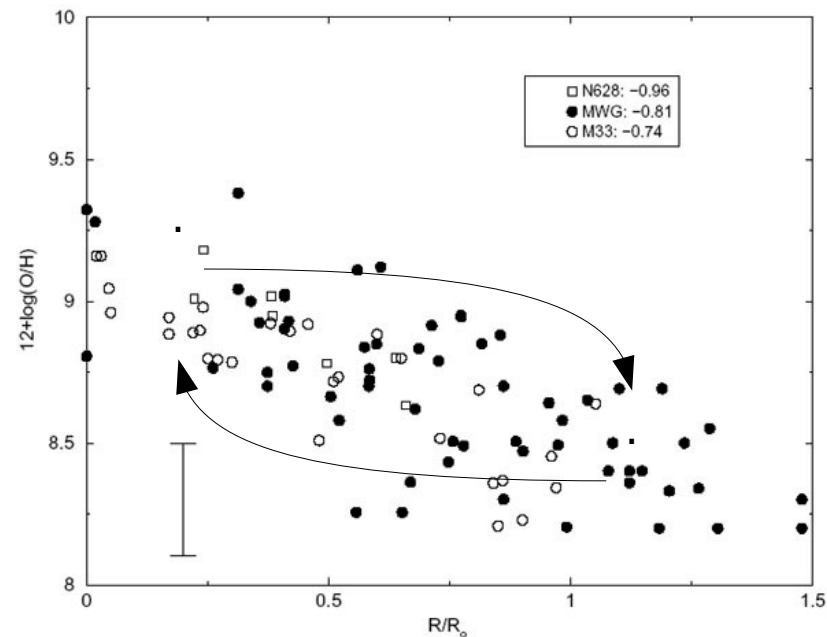
Complexité du disque mince

Au voisinage solaire :
MIS homogène vs. dispersion de la métallicité des étoiles
Pourtant, $M(\text{étoile}) = M(\text{milieu d'origine})$?



Oui, mais :

- gradients galactiques de métallicité (notamment radial)
- mélange dynamique des étoiles (migration $\sim$ qq kpc / Gyr)



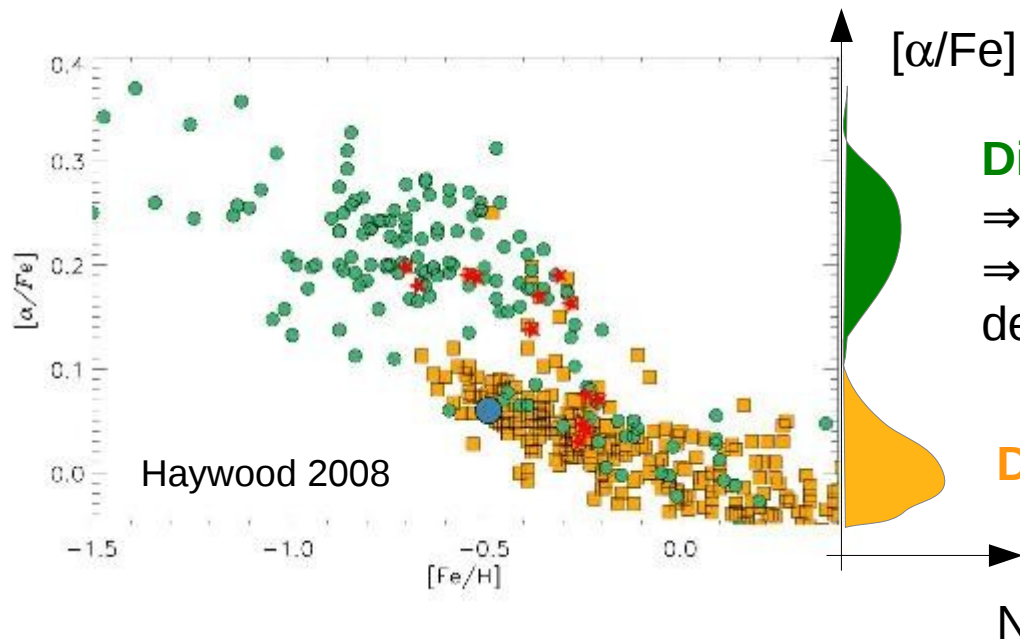
II. La Voie Lactée

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

Disque épais : quelle origine ?

Scénarios :

- (1) disque mince initial “chauffé” par une collision ?
- (2) nouvelles étoiles par accrétion d'une galaxie satellite ?
- (3) accrétion de gaz extragalactique + épisode de formation stellaire ?



Disque épais : α élevé $\Rightarrow$ bcp de SNI
 $\Rightarrow$ issu d'un épisode intense de formation st.
 $\Rightarrow$ incompatible avec (2), d'après observation des galaxies naines satellite de VL

Disque mince

Zone de fort recouvrement en $[\text{Fe}/\text{H}]$ = zone de forte différence en $[\alpha/\text{Fe}]$
 $\Rightarrow$ 2 populations historiquement distinctes ?

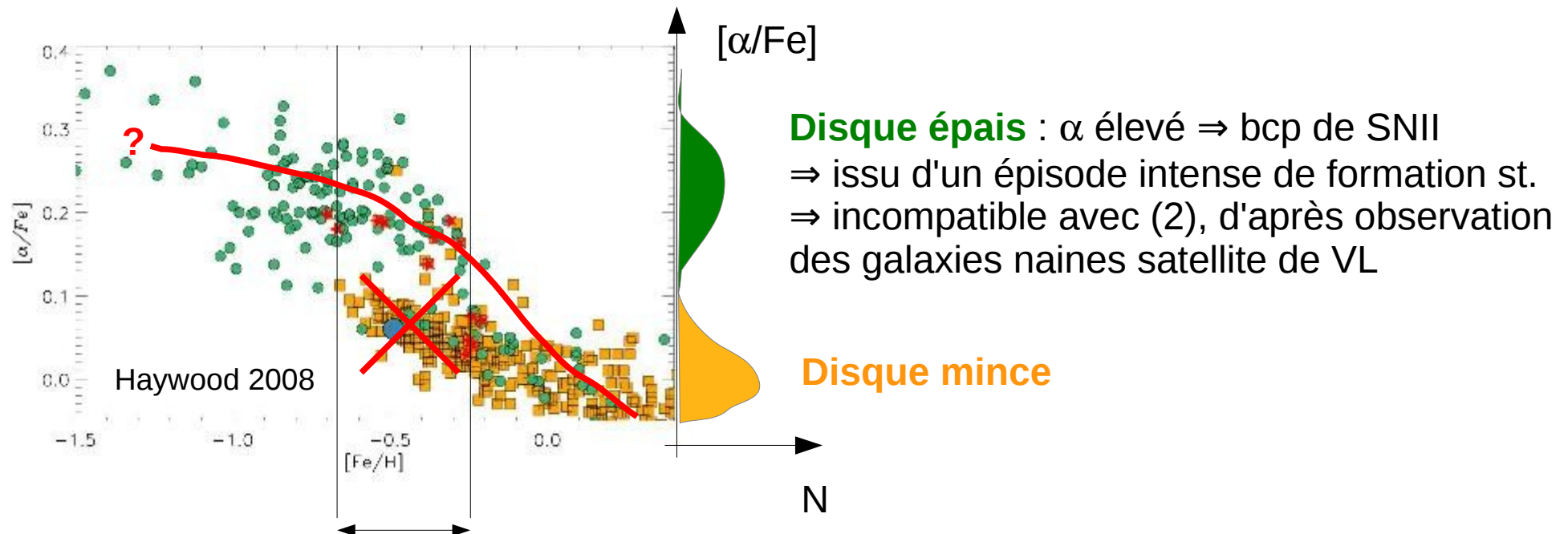
II. La Voie Lactée

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

Disque épais : quelle origine ?

Scénarios :

- (1) disque mince initial “chauffé” par une collision ?
- (2) nouvelles étoiles par accrétion d'une galaxie satellite ?
- (3) accrétion de gaz extragalactique + épisode de formation stellaire ?



Zone de fort recouvrement en $[\text{Fe}/\text{H}]$ = zone de forte différence en $[\alpha/\text{Fe}]$

$\Rightarrow$ 2 populations historiquement distinctes ?

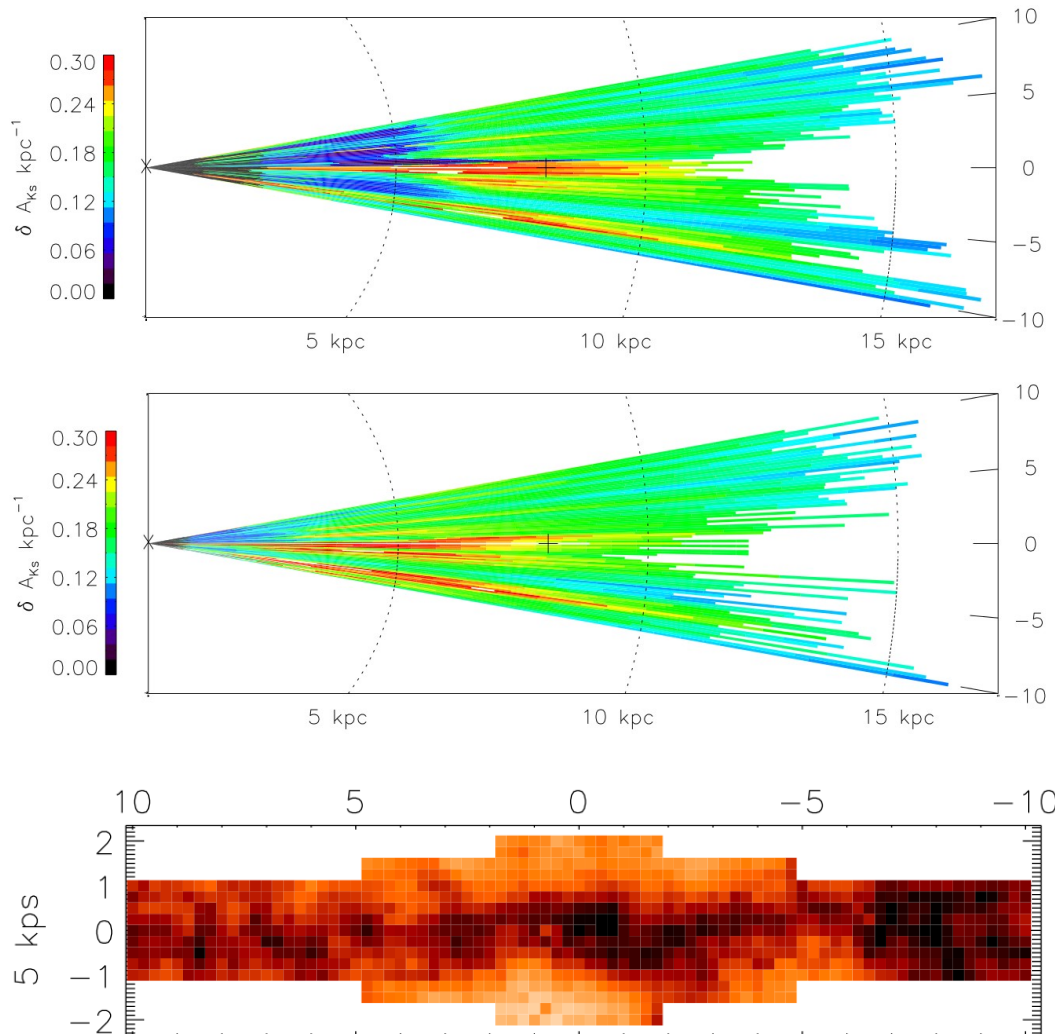
À moins que le **mélange radial** ne justifie la présence d'étoiles à faible $[\text{Fe}/\text{H}]$ au voisinage solaire ?

II. La Voie Lactée

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

Bulbe galactique

Difficile à étudié car caché par la poussière interstellaire



- plus forte densité stellaire de la VL
- population vieille
- très peu de matière interstellaire
- plutôt barre ou barre+bulbe que bulbe

Barre = structure triaxiale

- dimensions $\sim 1\text{kpc}$
- aplatissement ~ 0.6
- angle axe principal – ligne de visée $\sim 20^\circ$

Forte extinction $\Rightarrow$ spectro difficile

Grande distance ($\sim 8\text{kpc}$) $\Rightarrow$ mouvement propre difficile à mesurer
 $\Rightarrow$ cinématique et métallicité très limitées

I. Vue d'ensemble

II. La Voie Lactée

II.1 Structures principales et composition

II.2 Évolution chimique

II.3 Comprendre l'histoire de la Voie Lactée

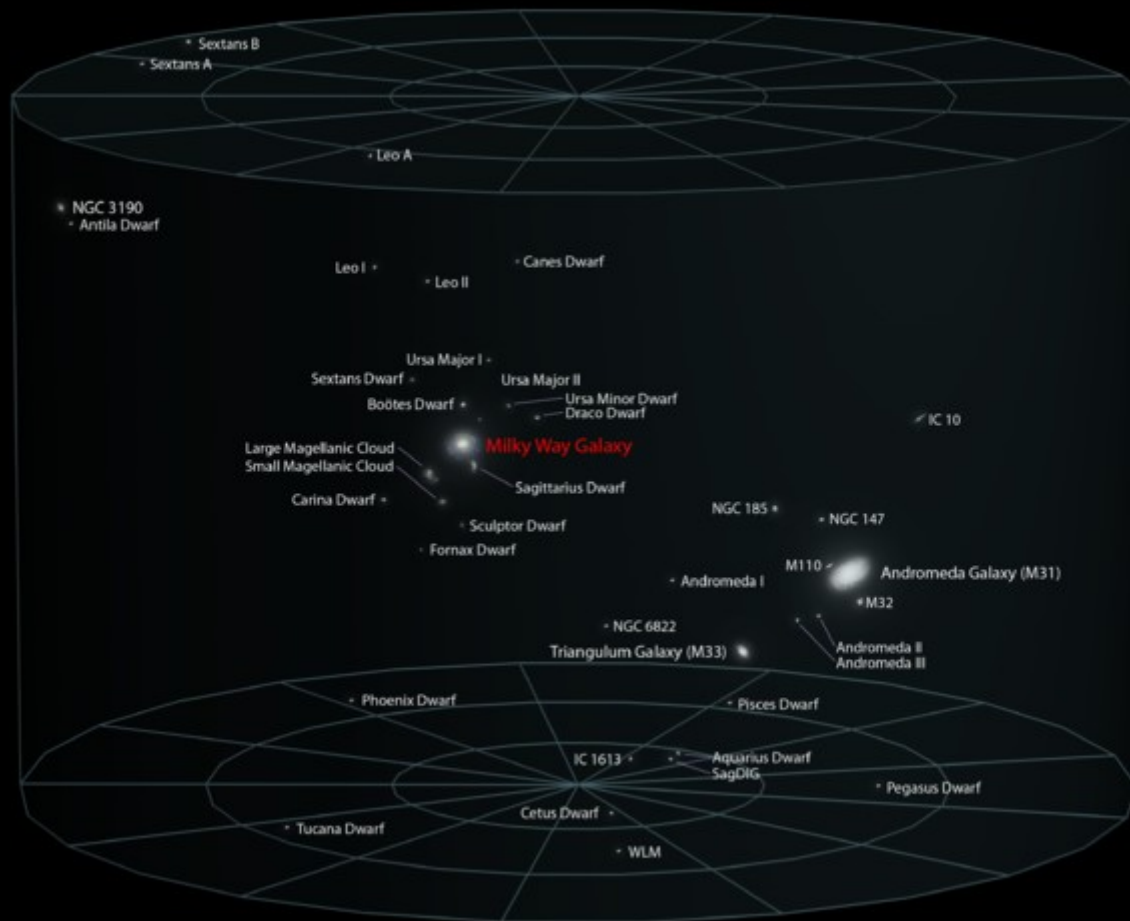
II.4 La Voie Lactée dans son environnement

III. Instabilité gravitationnelle

II. La Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

Local Galactic Group



Groupe local = petit groupe sur un filament entre 2 grands groupes (Fornax et Vierge)

~50 galaxies

~2-3 Mpc

- 2 galaxies majeures : VL + M31

- cdm à mi-chemin

- Majorité des galaxies mineures = sphéroïdes naines

Beaucoup sont satellites de VL ou M31

Groupe peu dense

Distance VL-M31 ~ 20 x taille

Pas de galaxie elliptique géante

Collision prévue entre VL et M31 d'ici ~4 Gyr

(cf. Vidéo e.g. @ http://fr.wikipedia.org/wiki/Collision_entre_Androm%C3%A8de_et_la_Voie_lact%C3%A9e)

II. La Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement



Illustration of the Milky Way and Andromeda Galaxy Collision

NASA, ESA, Z. Levay and R. van der Marel (STScI), and A. Mellinger ■ STScI-PRC12-20a



II. La Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

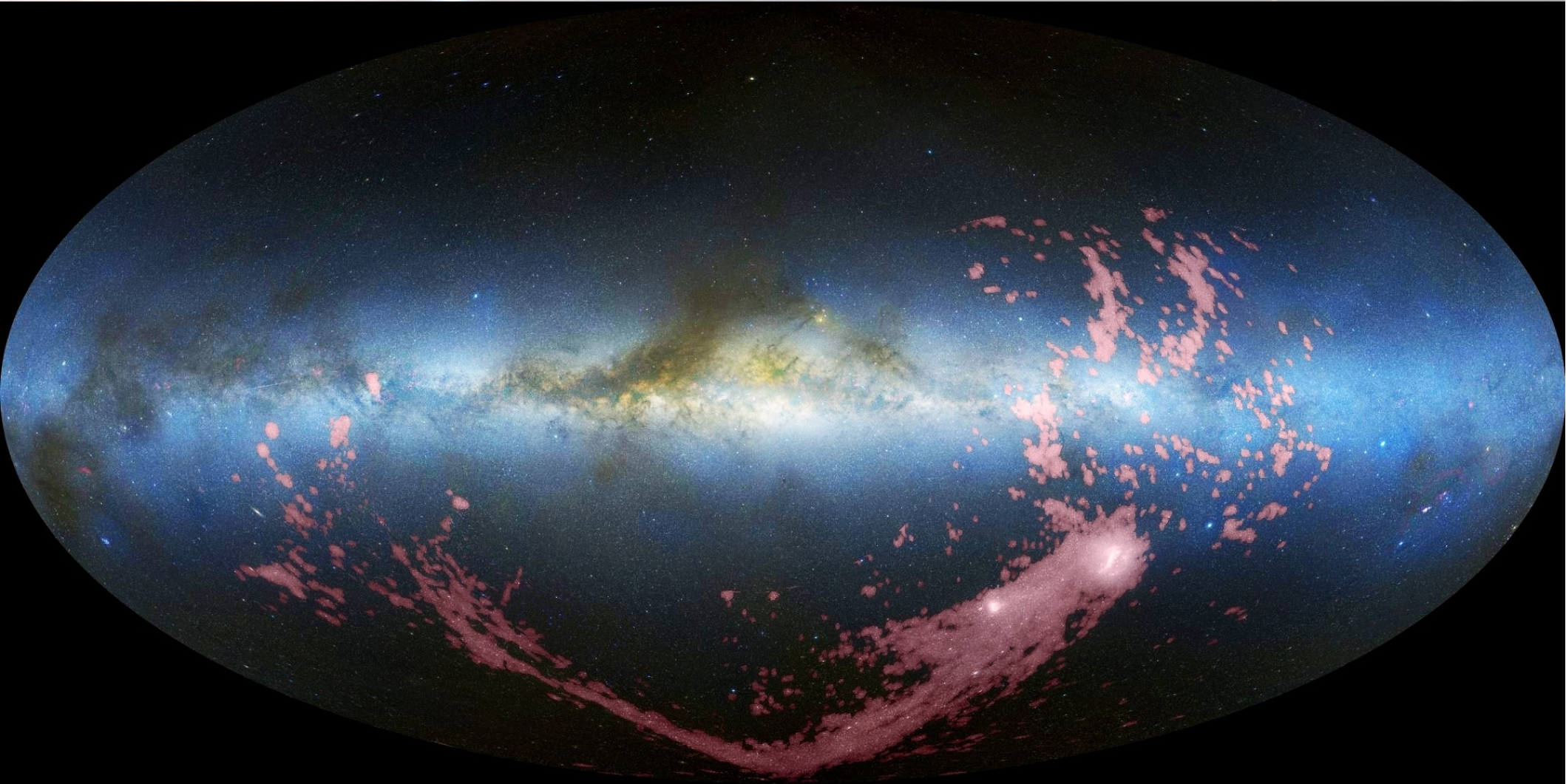
Nuages de Magellan

LMC : 48.5 kpc – $1e10$ Msun

SMC : 61 kpc – $6.5e9$ Msun

II. La Voie Lactée

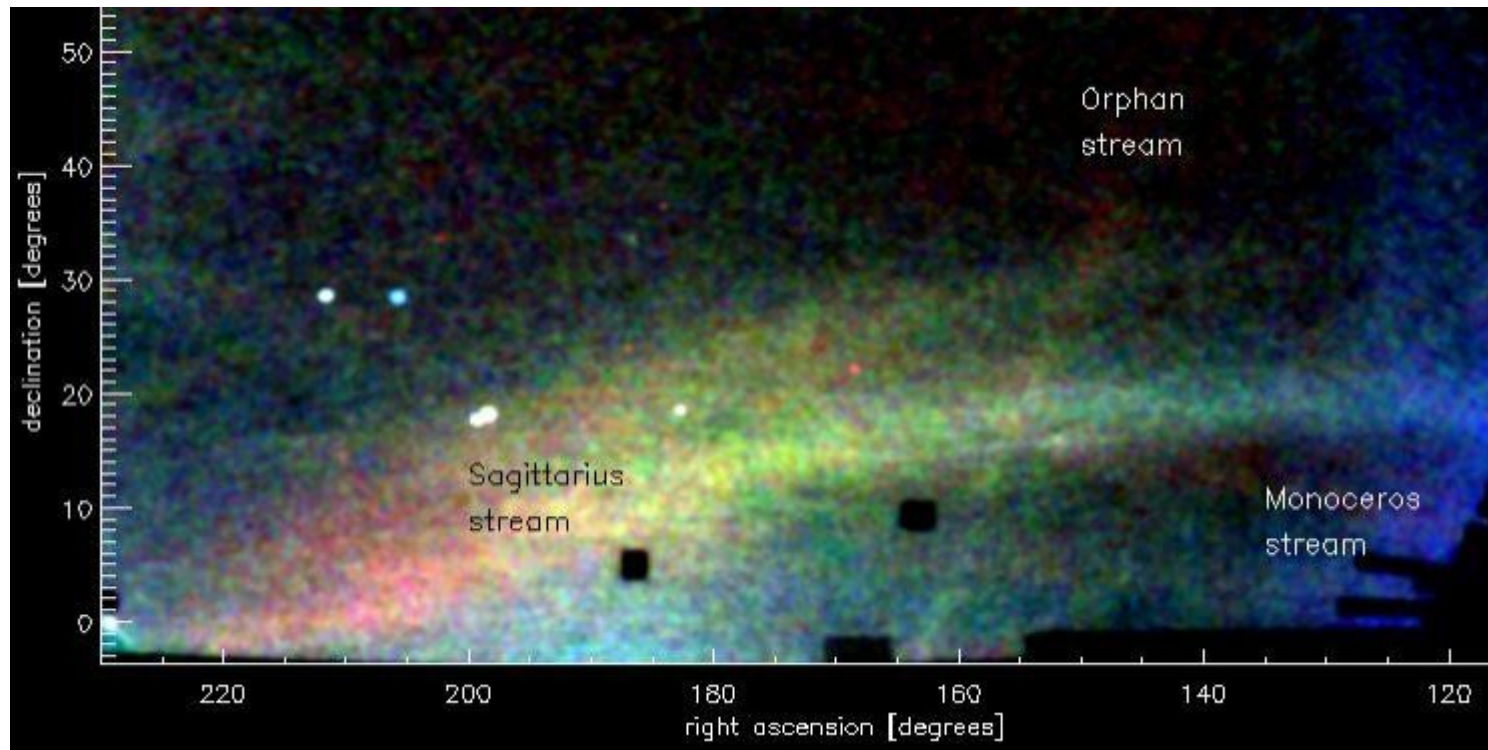
II.4 La Voie Lactée dans son environnement



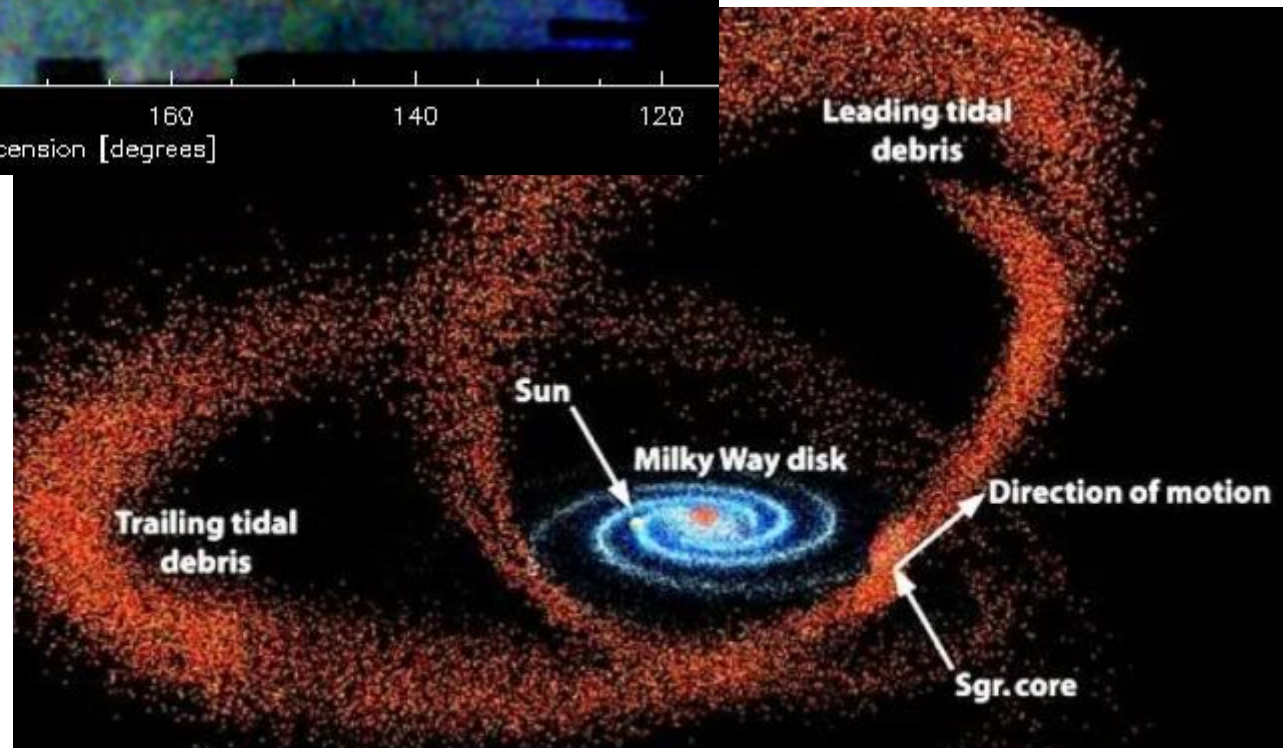
Courant Magellanique : témoin de l'interaction VL – nuages de Magellan
Trainée de gaz (HI) et d'étoiles (?)

II. La Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement



- galaxies satellites
 - courants stellaires
- ⇒ VL = système en interaction permanente
- ⇒ notion d' "Univers-Île" invalide

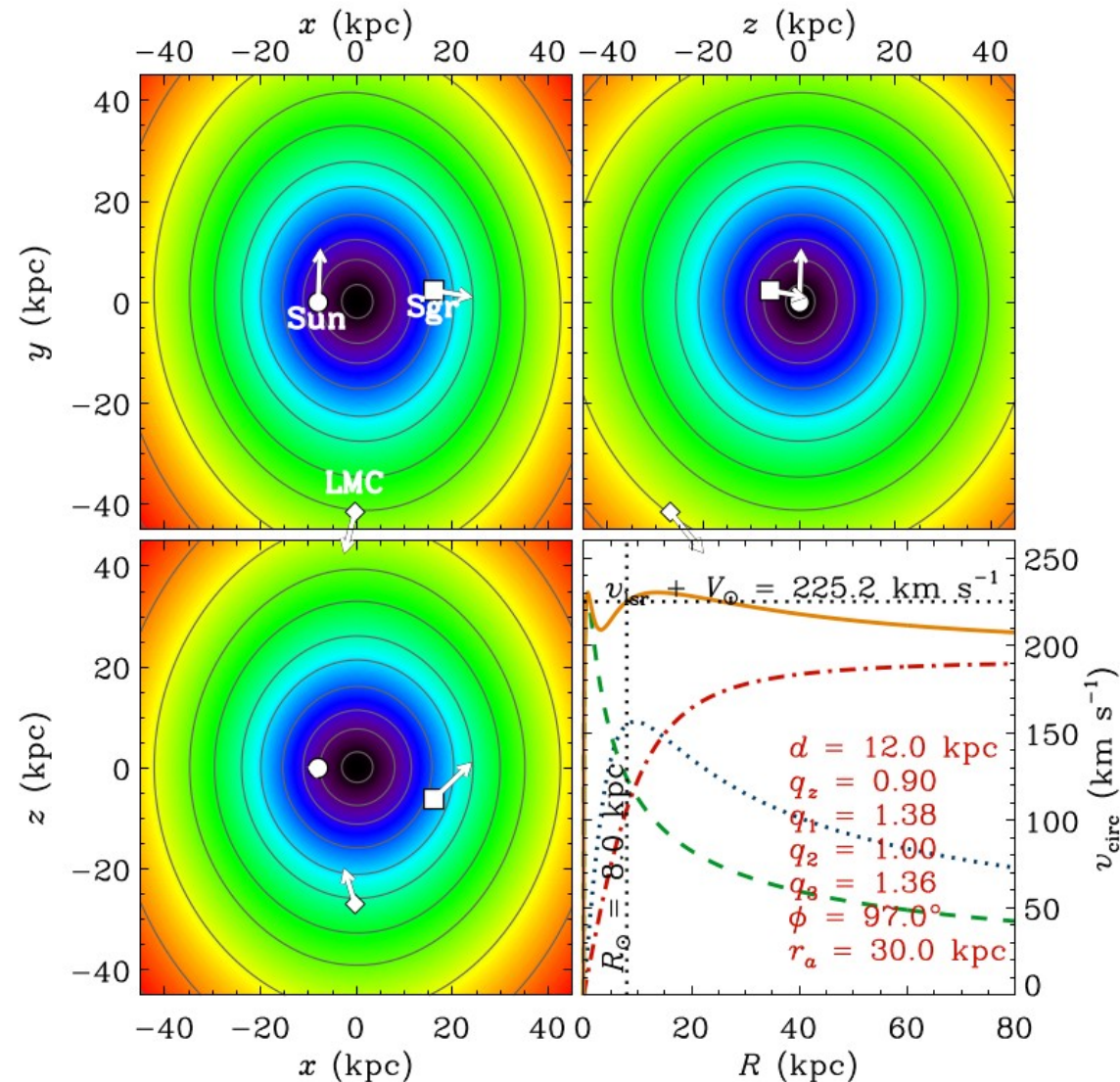


II. La Voie Lactée

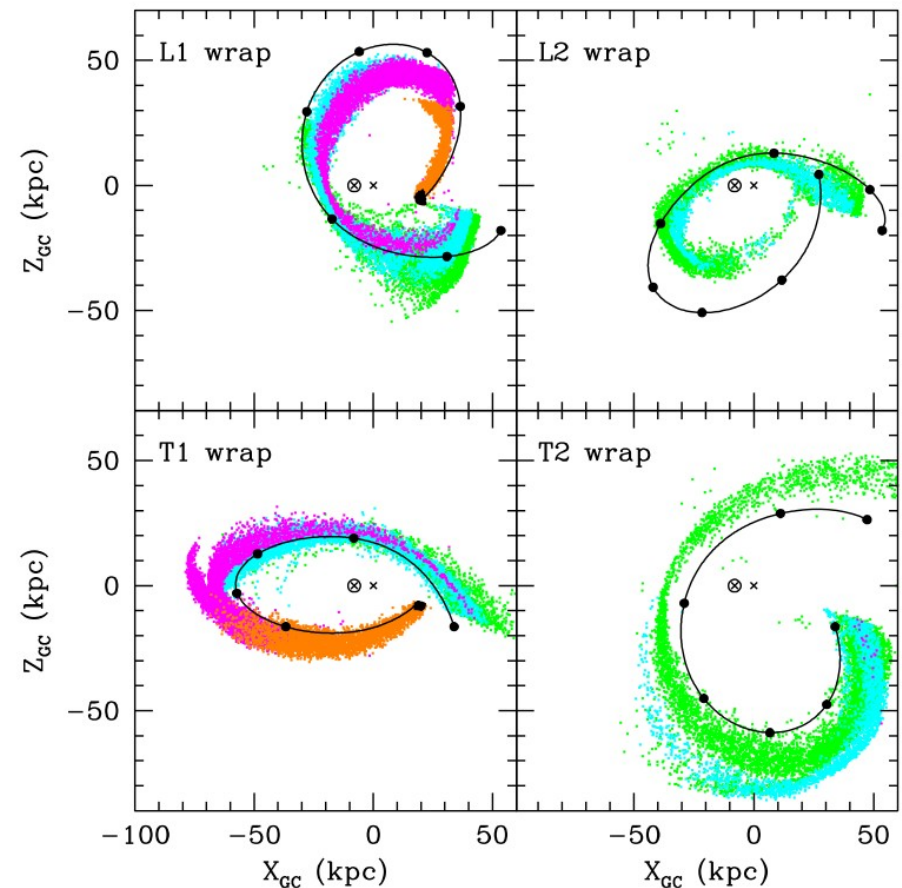
II.4 La Voie Lactée dans son environnement

Contraindre la structure du halo sombre à l'aide des courants stellaires

⇒ calculer la trajectoire du courant à partir d'un modèle de potentiel gravitationnel



Vera-Ciro et Helmi 2013



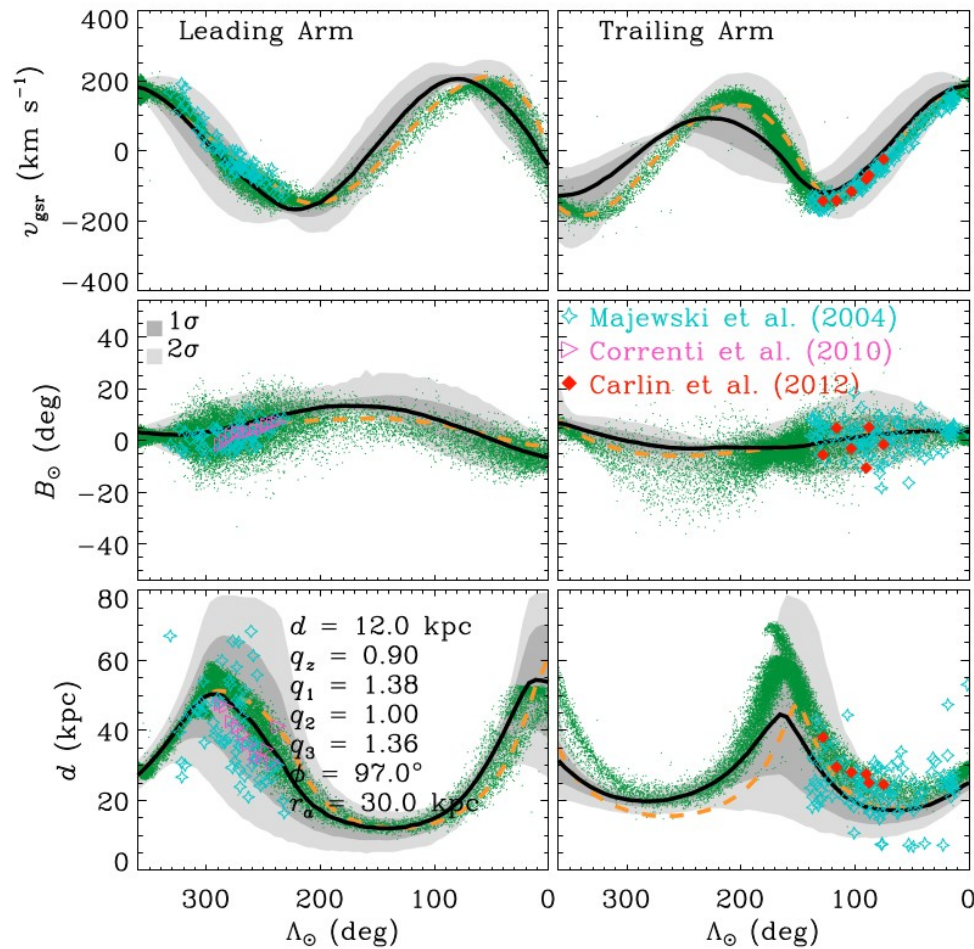
Law et Majewski 2010

II. La Voie Lactée

II.4 La Voie Lactée dans son environnement

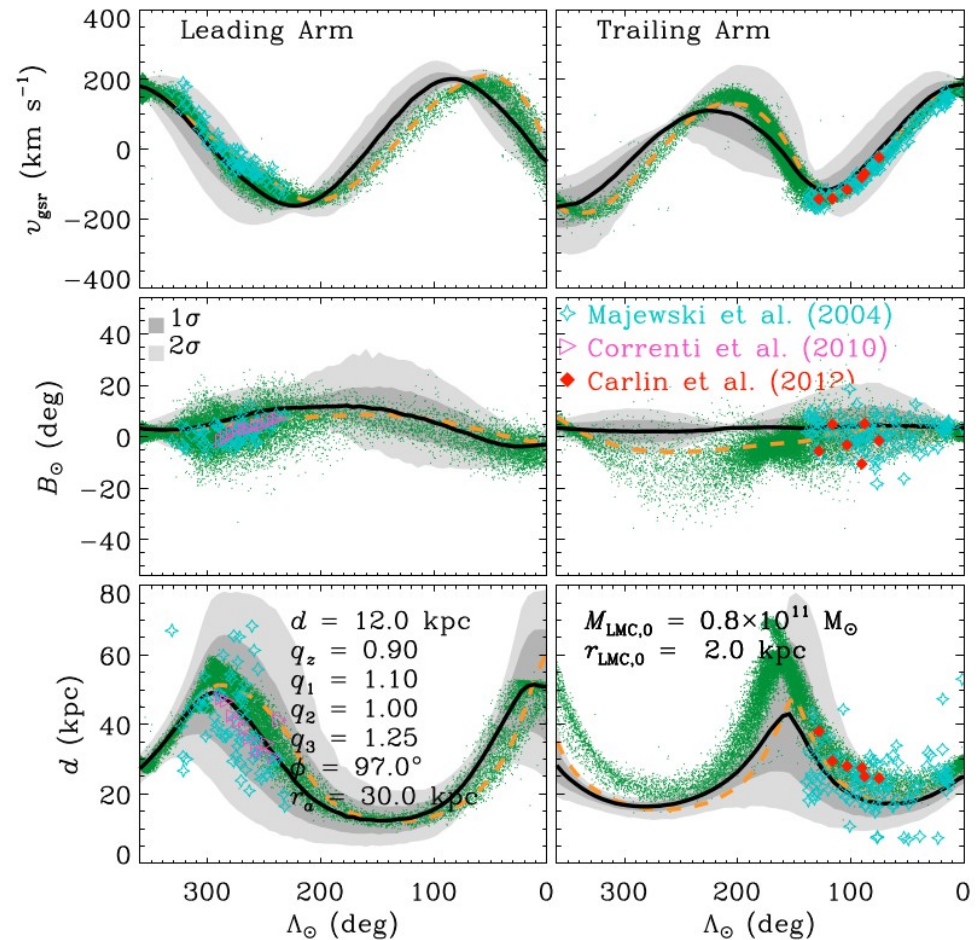
Contraindre la structure du halo sombre à l'aide des courants stellaires

Vera-Ciro et Helmi 2013

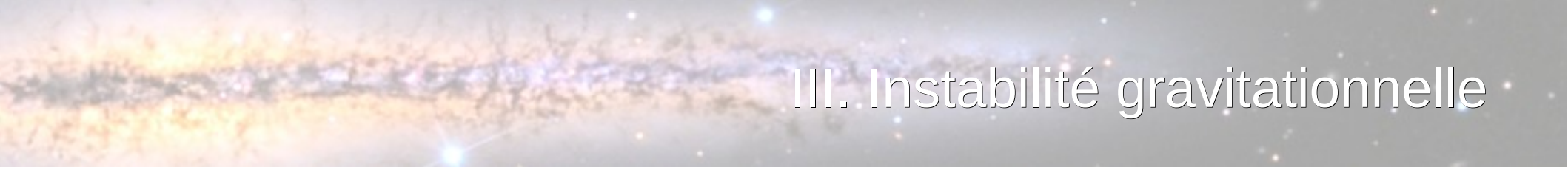


Halo triaxial

⇒ Exercice



Halo (moins) triaxial + LMC



III. Instabilité gravitationnelle

I. Vue d'ensemble

II. La Voie Lactée

III. Instabilité gravitationnelle
cours au tableau noir

Cosmologie

I. Un peu d'histoire

- I.1 Les premiers pas
- I.2 Expansion de l'Univers
- I.3 La théorie du Big Bang

II. Dynamique universelle

- III.1 La densité critique
- III.2 Le paramètre d'échelle
- III.3 L'équation de Friedmann
- III.4 Univers ouverts / fermés

III. Le fond diffus cosmologique

- III.1 Observations
- III.2 Anisotropie du CMB

IV. L'abondance des éléments légers

V. Conclusions

I. Un peu d'histoire

I.1 Les premiers pas

I.2 Expansion de l'Univers

I.3 La théorie du Big Bang

II. Dynamique universelle

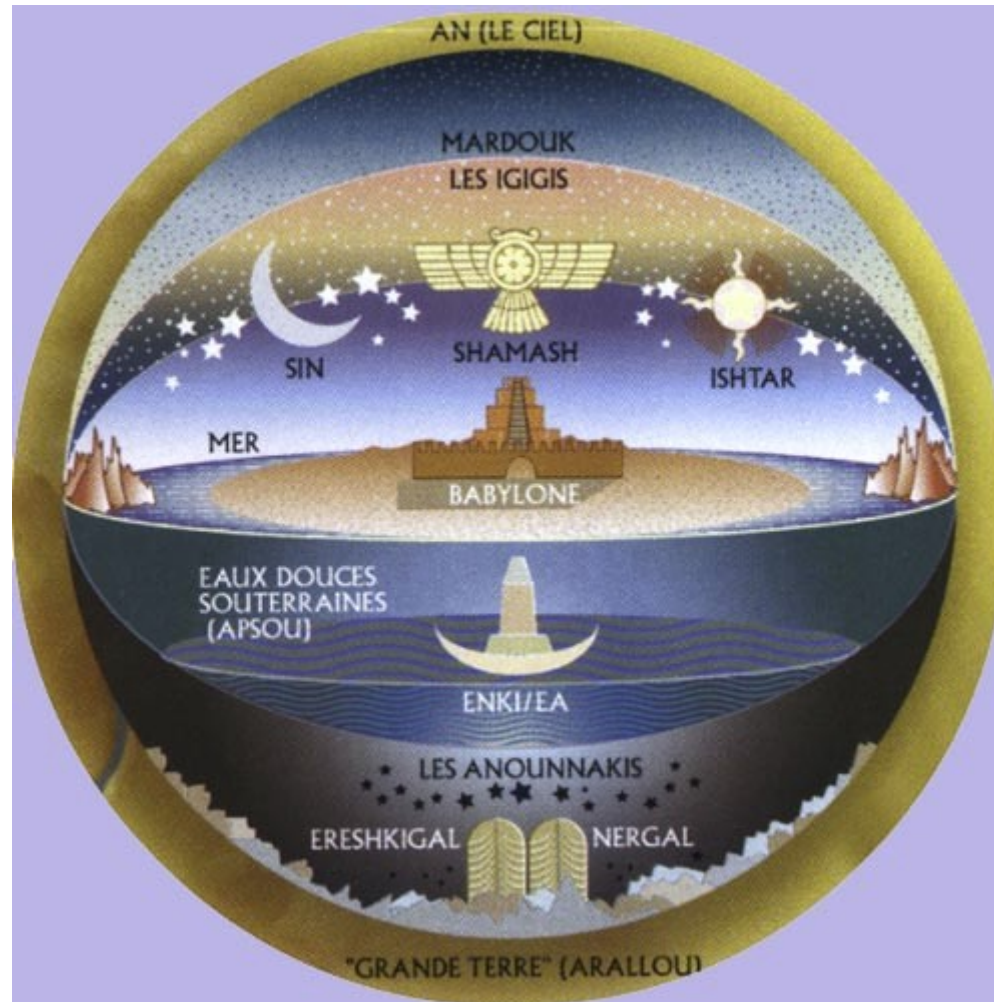
III. Le fond diffus cosmologique

IV. L'abondance des éléments légers

V. Conclusions

I. Un peu d'histoire

I.1 Les premiers pas



1905 : Einstein publie la théorie de la **relativité restreinte**

1915 : Einstein publie la théorie de la **relativité générale**

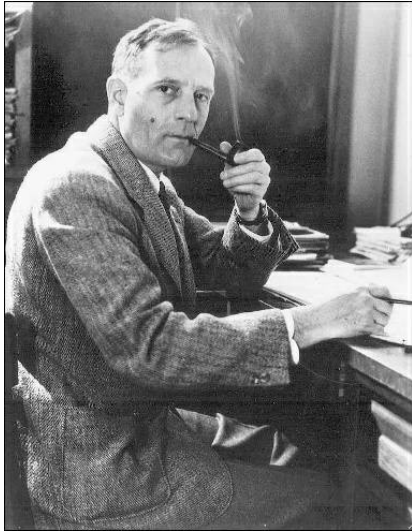
1917 : Einstein propose le premier modèle cosmologique :

- Univers stationnaire
- Univers homogène et isotrope (“principe cosmologique”)
- Existence d'une constante cosmologique (postulée) pour équilibrer la gravitation
- Espace courbé positivement (“hyper-sphère”)

Stationnaire $\Rightarrow$ prédiction : décalage Doppler des galaxies nul en moyenne

I. Un peu d'histoire

I.2 Expansion de l'Univers



1929

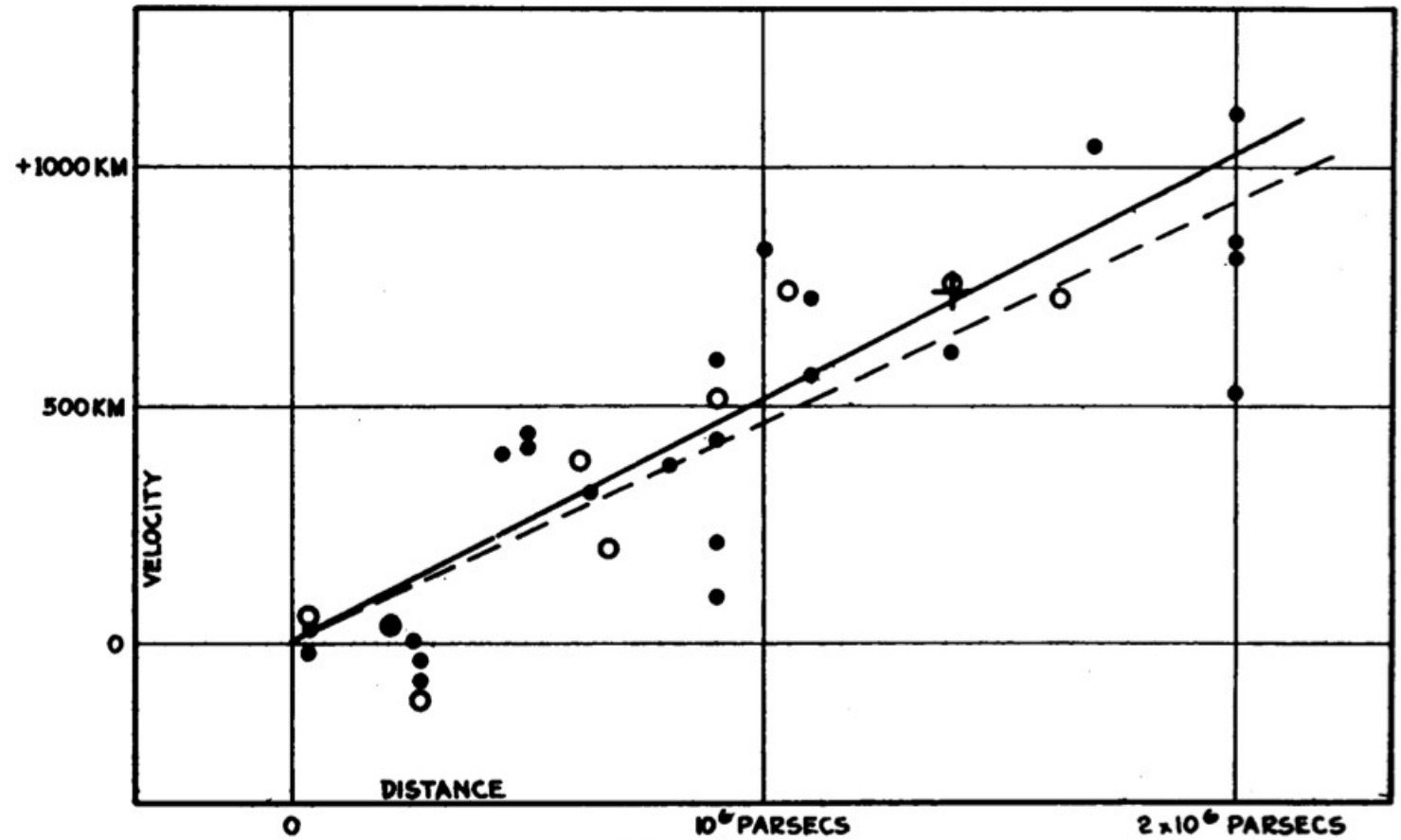


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

I. Un peu d'histoire

I.3 La théorie du Big Bang

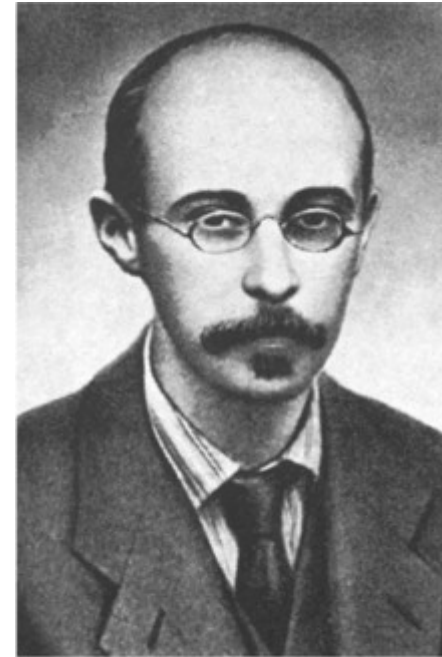
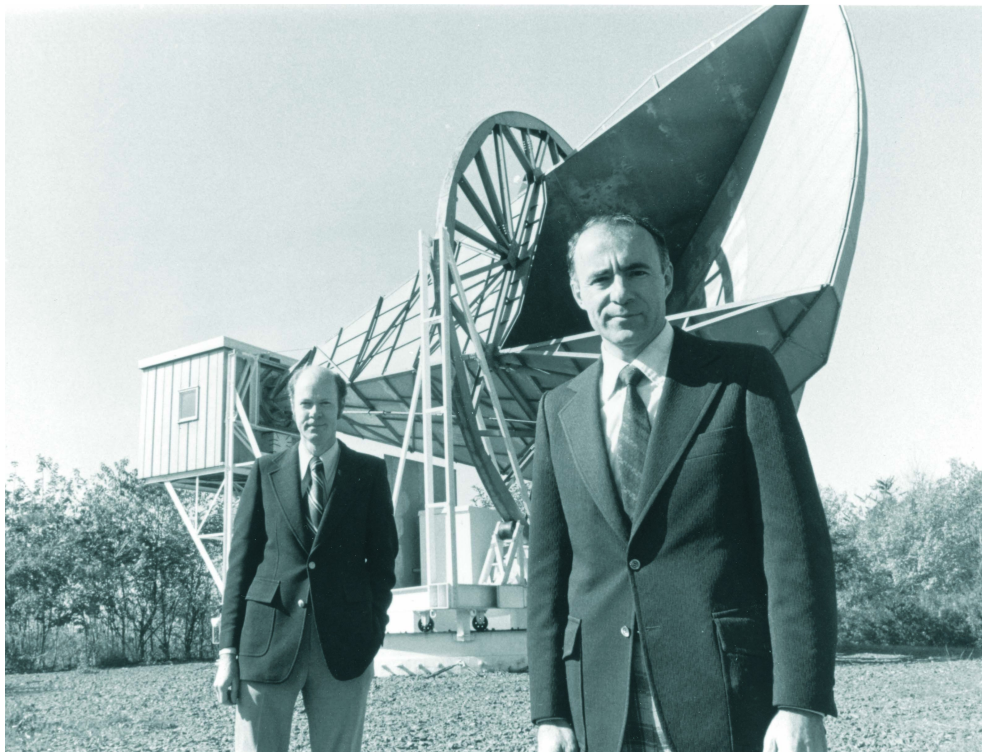
1922 : Alexandre Friedmann

1927 : George Lemaître

“L'Univers est en expansion”

→ Prédiction d'un rayonnement fossile

Confirmation en 1965 par Penzias & Wilson



A. Friedmann



“Grand Boum” : ironie de Fred Hoyle, partisant des modèles d'Univers stationnaires

I. Un peu d'histoire

II. Dynamique universelle

II.1 La densité critique

II.2 Le paramètre d'échelle

II.3 L'équation de Friedmann

II.4 Univers ouvert / fermé

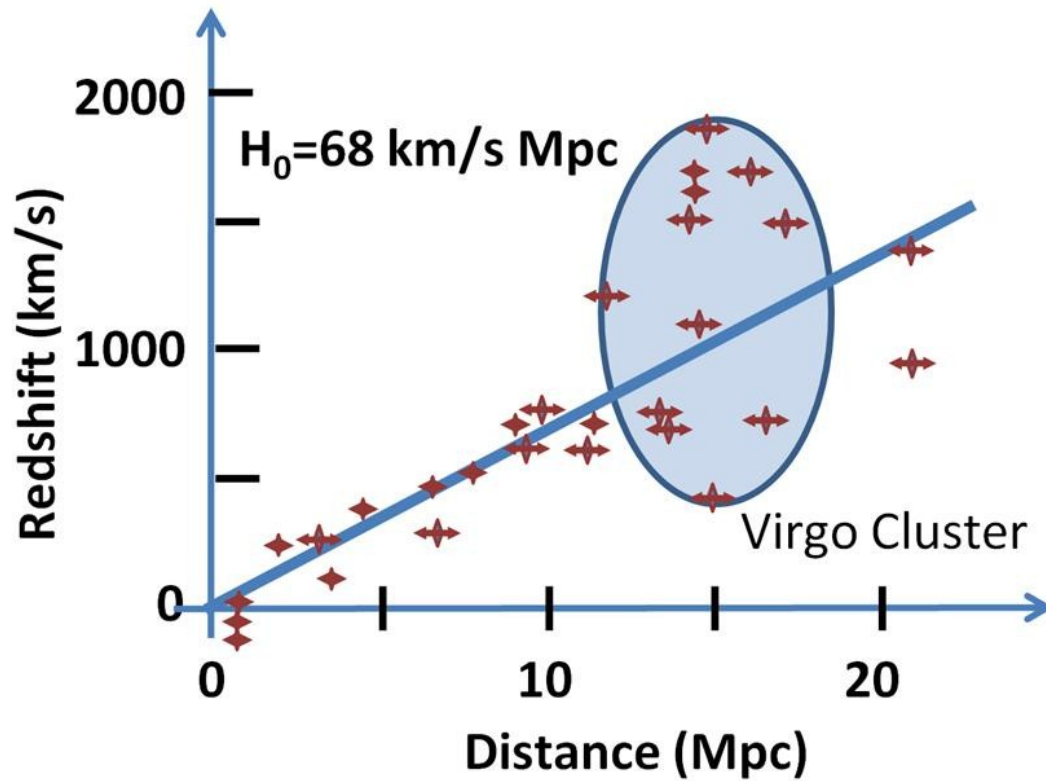
III. Le fond diffus cosmologique

IV. L'abondance des éléments légers

V. Conclusions

II. Dynamique universelle

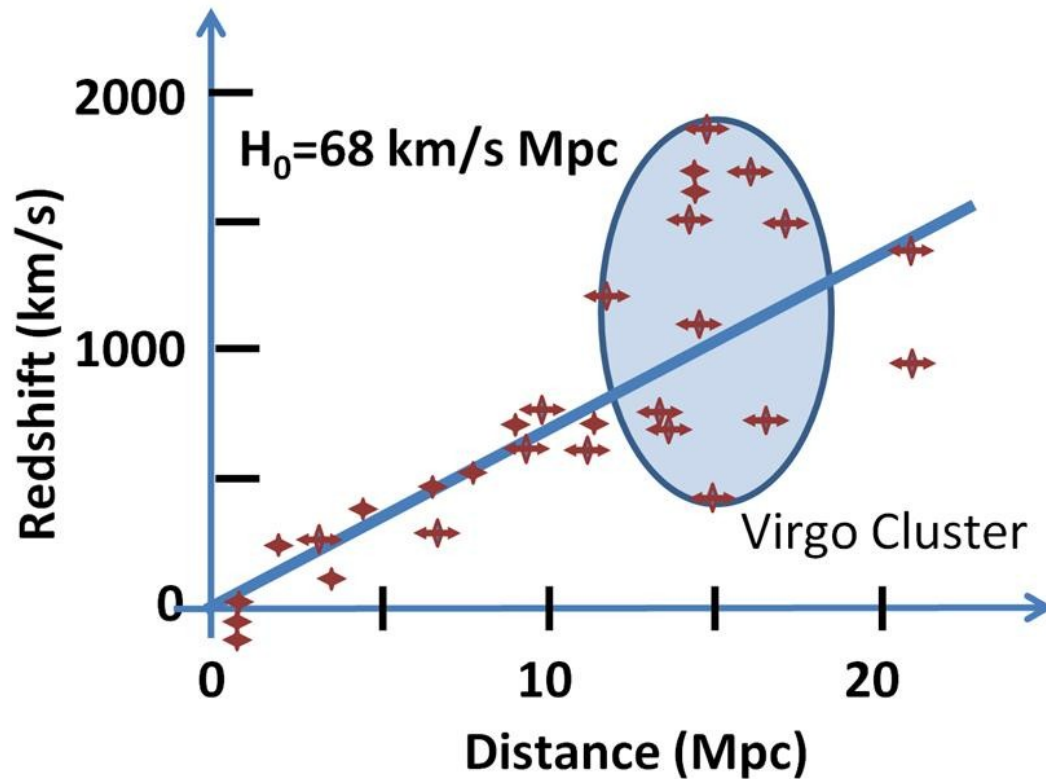
II.1 Densité critique



Exercice : à partir de la constante de Hubble et de la constante de gravitation, former une quantité homogène à une densité volumique de masse

II. Dynamique universelle

II.1 Densité critique



$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G$$

→ densité critique, utilisée pour former des densités adimensionnées actuelles :

$$\Omega_T = \rho_T / \rho_c \quad (\text{densité totale})$$

$$\Omega_B = \rho_B / \rho_c \quad (\text{densité baryonique})$$

Etc...



II. Dynamique universelle

II.2 Le paramètre d'échelle

Univers en expansion lisible dans les vitesses des galaxies

⇒ on introduit le “paramètre d'échelle” : $a(t)$ propto <distances intergalactiques>

Lié à la constante de Hubble par : $da/dt(t_0) = a(t_0) H_0$ t_0 : aujourd'hui

Si le nombre de galaxies était constant, on pourrait écrire :

$$a(t) = a_0 [n_{\text{gal}}(t_0) / n_{\text{gal}}(t)]^{1/3}$$

Mais variation du nombre de galaxies, alors que durée de vie du proton $> 10^{32}$ ans :

$$a(t) = a_0 [n_b(t_0) / n_b(t)]^{1/3} \quad n_b = \text{densité de baryons}$$

(Rq: pour $T > \text{GeV}$, plasma baryon-antibaryon – en fait quarks/antiquarks

⇒ $n_b = \text{nombre de baryons} - \text{nombre d'antibaryons}$)

Valeur de a_0 mal connue. On peut utiliser $a_0 = H_0^{-1} / |1 - \Omega_T|^{1/2}$

Sinon, on préfère adimensionner $a(t)$: $\hat{a}(t) = a(t) / a_0$

Distance d'une galaxie décrite par la constante $\chi = R(t) / a(t) = \text{coordonnée “comobile”}$

II. Dynamique universelle

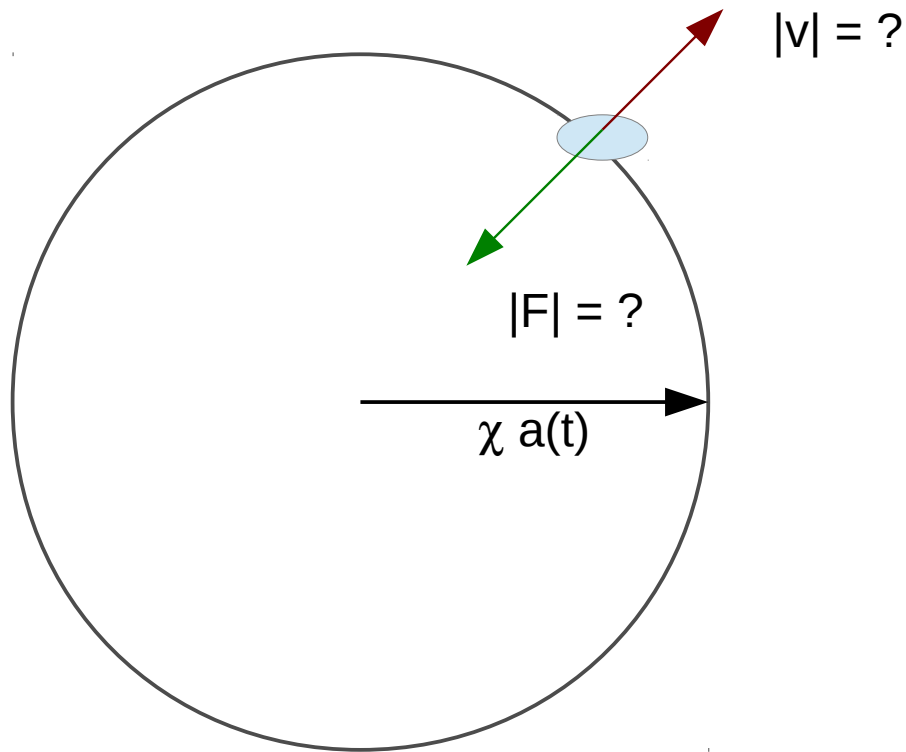
II.3 L'équation de Friedmann

Si pas de gravitation : $d^2a/dt^2 = 0$

Gravitation : $d^2a/dt^2 < 0$

Approche newtonnienne de l'expansion de l'Univers.

Exercice : compléter le schéma en fonction de χ



$M(\chi) = ?$ (masse dans $\text{sph}(\chi)$)

$T = ?$ (énergie cinétique)

$U = ?$ (énergie potentielle grav.)

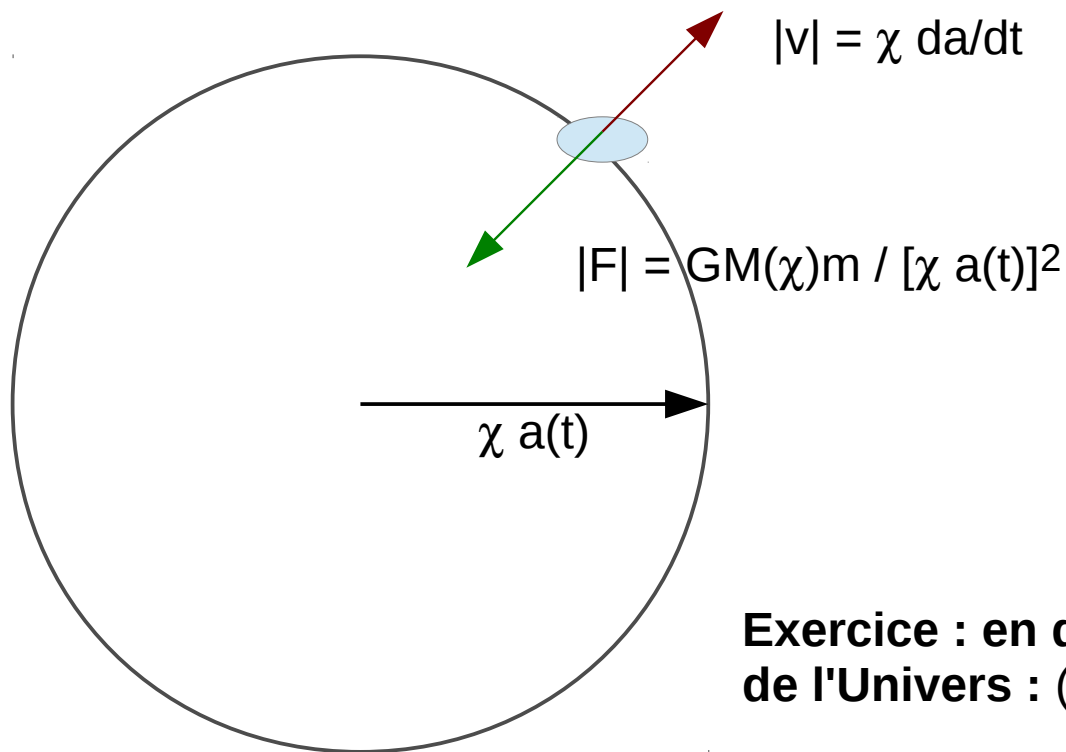
II. Dynamique universelle

II.3 L'équation de Friedmann

Si pas de gravitation : $d^2a/dt^2 = 0$

Gravitation : $d^2a/dt^2 < 0$

Approche newtonnienne de l'expansion de l'Univers.



$$M(\chi) = \rho \, 4\pi (a\chi)^3 / 3$$

$$T = m (\chi da/dt)^2 / 2$$

$$U = - G m M(\chi) / a\chi$$

Exercice : en déduire l'équation de décélération de l'Univers : $(d^2a/dt^2) / a = ?$

 = galaxie

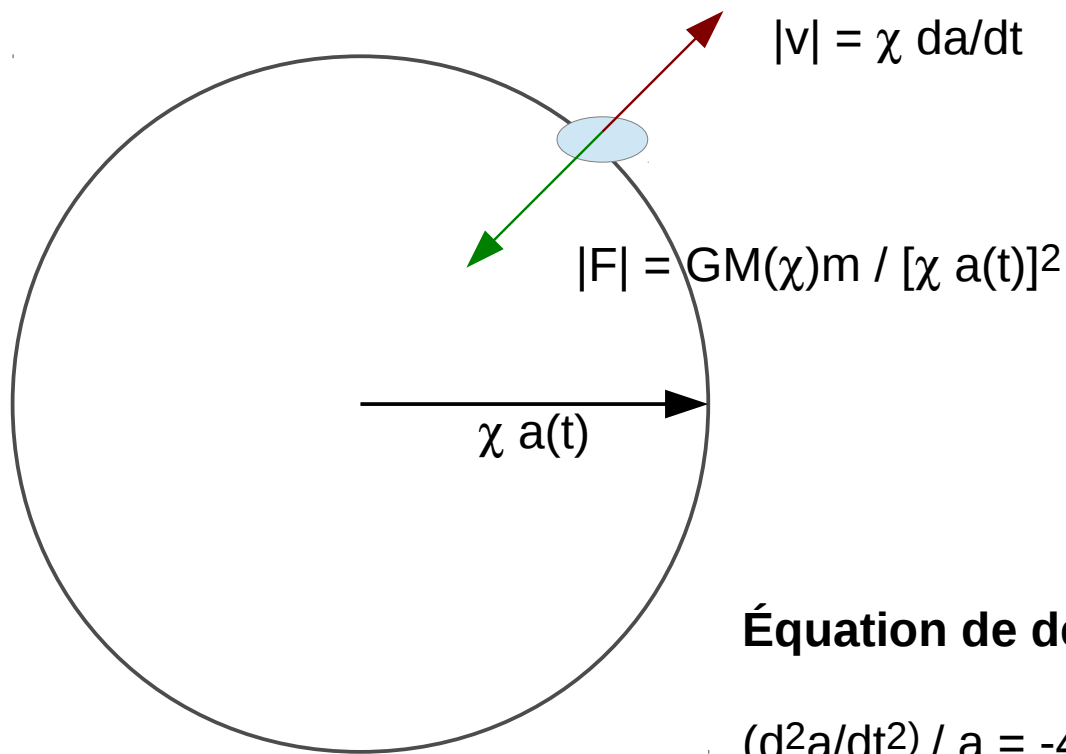
II. Dynamique universelle

II.3 L'équation de Friedmann

Si pas de gravitation : $d^2a/dt^2 = 0$

Gravitation : $d^2a/dt^2 < 0$

Approche newtonnienne de l'expansion de l'Univers.



$$M(\chi) = \rho \, 4\pi (a\chi)^3 / 3$$

$$T = m (\chi da/dt)^2 / 2$$

$$U = - G m M(\chi) / a\chi$$

Équation de décélération de l'Univers :

$$(d^2a/dt^2) / a = -4\pi G \rho / 3$$

(équation correcte si matière non relativiste)

 = galaxie

Exercice :

- a) En remarquant que $\rho a^3 = \text{constante}$, intégrer l'équation de décélération (on pourra multiplier l'équation par da/dt).
- b) Rappeler la relation entre a_0 , a et H_0 .
- c) Rappeler la relation entre Ω_T et ρ_T .
- d) Utiliser les résultats des questions b) et c) pour déterminer la constante d'intégration issue de la question a).
- e) Reformuler le résultat de a) en faisant apparaître la quantité $[(da/dt)/a]^2$

Exercice :

a) En remarquant que $\rho a^3 = \text{constante}$, intégrer l'équation de décélération (on pourra multiplier l'équation par da/dt).

$$\rightarrow [da/dt]^2 = [8\pi G \rho a^3 / 3] a^{-1} + \text{constante}$$

b) Rappeler la relation entre $da/dt(t_0)$, a_0 et H_0 .

$$\rightarrow da/dt(t_0) = a_0 H_0$$

c) Rappeler la relation entre Ω_T et $\rho(t_0)$

$$\rightarrow H_0^2 \Omega_T = 8\pi G \rho(t_0) / 3$$

d) Utiliser les résultats des questions b) et c) pour déterminer la constante d'intégration issue de la question a).

$$\rightarrow \text{constante} = H_0^2 a_0^2 (1 - \Omega_T)$$

e) Reformuler le résultat de a) en faisant apparaître la quantité $[(da/dt)/a]^2$

$$\rightarrow [(da/dt)/a]^2 - 8\pi G \rho / 3 = H_0^2 (a/a_0)^2 (1 - \Omega_T) \quad \text{C'est l'équation de Friedmann}$$

Exercice :

- f) Montrer qu'on peut comprendre l'équation de Friedmann en termes de conservation de l'énergie de la galaxie.
- g) Que peut-on dire de l'énergie totale si $\Omega_T > 1$ ou si $\Omega_T < 1$?
- h) Exprimer la densité $\rho(a)$ en fonction de $\rho(a_0)$ et $\hat{a}$, puis faire apparaître la densité réduite Ω_T .
- i) Reformuler l'équation de Friedmann.

Exercice :

f) Montrer qu'on peut comprendre l'équation de Friedmann en termes de conservation de l'énergie de la galaxie.

$$\rightarrow \left(m\chi^2 / 2 \right) (U+T) = [da/dt]^2 - 8\pi G\rho a^2$$

g) Que peut-on dire de l'énergie totale si $\Omega_T > 1$ ou si $\Omega_T < 1$?

$$\rightarrow \Omega_T > 1 \Rightarrow \text{énergie totale négative}$$

$$\rightarrow \Omega_T < 1 \Rightarrow \text{énergie totale positive}$$

h) Exprimer la densité $\rho(a)$ en fonction de $\rho(a_0)$ et $\hat{a}$, puis faire apparaître la densité réduite Ω_T .

$$\rightarrow \rho(a) = \rho(a_0) \hat{a}^{-3} = \Omega_T [3H_0^2 / 8\pi G] \hat{a}^{-3}$$

i) Reformuler l'équation de Friedmann.

$$\rightarrow [(da/dt)/a]^2 = H_0^2 [\Omega_T \hat{a}^{-3} + (1 - \Omega_T) \hat{a}^{-2}]$$

On voit que l'équation de Friedmann donne le taux d'expansion à l'instant t en fonction du taux actuel et du contenu de l'Univers.

N.B. Équation valable pour un Univers de matière non relativiste



II. Dynamique universelle

II.4 Univers ouverts et fermés

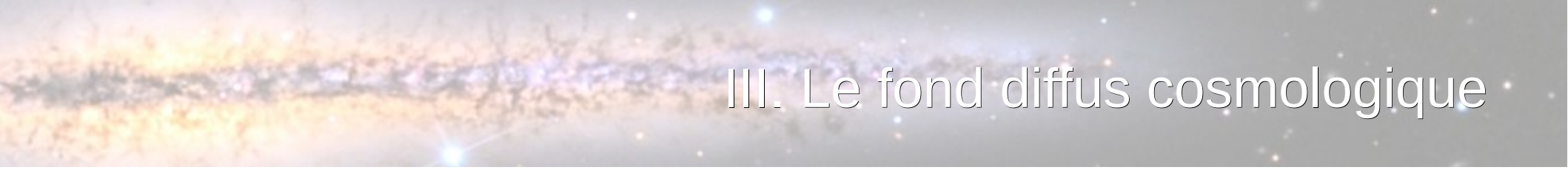
Équation de Friedmann : $[(da/dt)/a]^2 = H_0^2 [\Omega_T \hat{a}^{-3} + (1 - \Omega_T) \hat{a}^{-2}]$

⇒ évolution de $a(t)$ dépend de Ω_T :

* $a(t)$ pour $\Omega_T = 0$?

* $a(t)$ pour $\Omega_T = 1$?

* Quelles allures pour $a(t)/a_0$ vs $(t-t_0)H_0$?

A horizontal strip at the top of the slide showing a colorful, grainy image of the Cosmic Microwave Background (CMB) with various shades of orange, yellow, and blue.

III. Le fond diffus cosmologique

I. Un peu d'histoire

II. Dynamique universelle

III. Le fond diffus cosmologique

III.1 Observations

III.2 Anisotropies du CMB

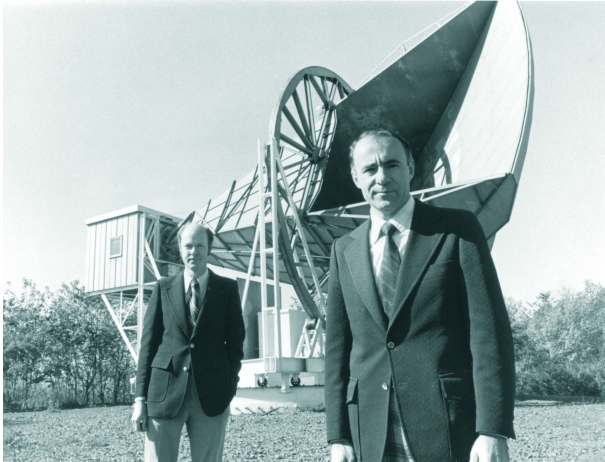
IV. L'abondance des éléments légers

V. Conclusions

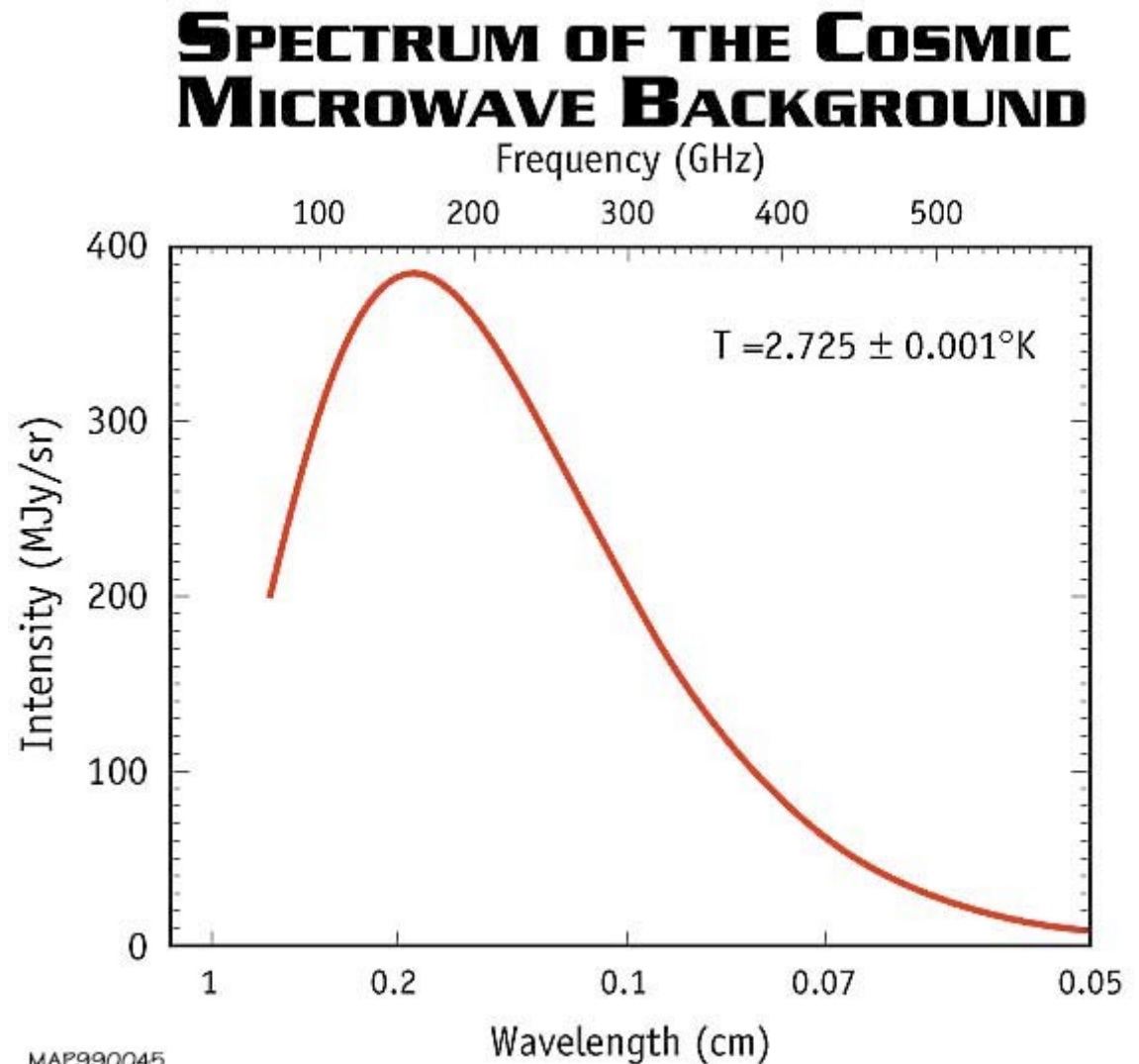
III. Le fond diffus cosmologique

III.1 Observations

1ere observation : Penzias & Wilson, 1965

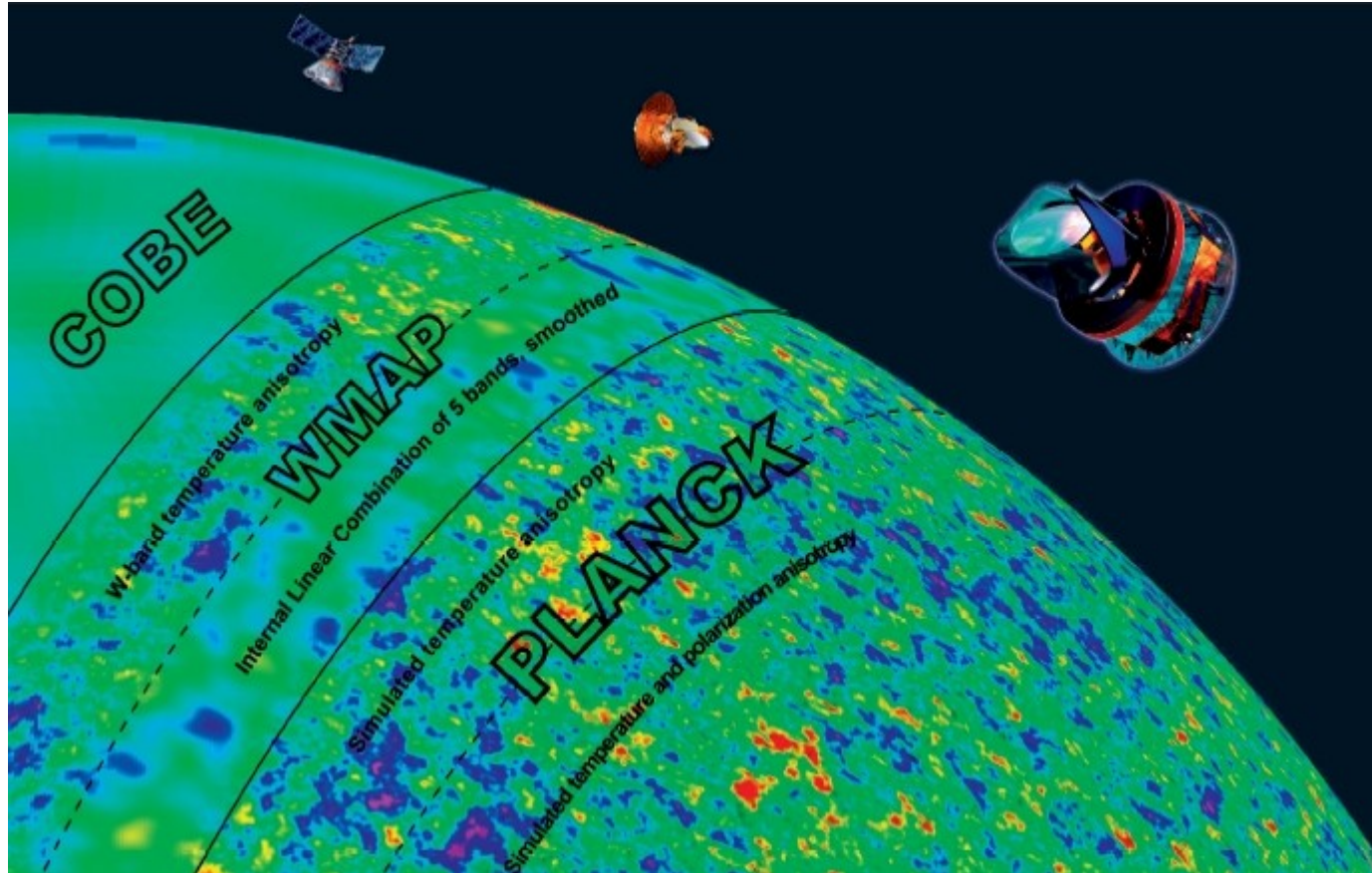


$T \sim 2.3 \pm 0.3 \text{ K}$



III. Le fond diffus cosmologique

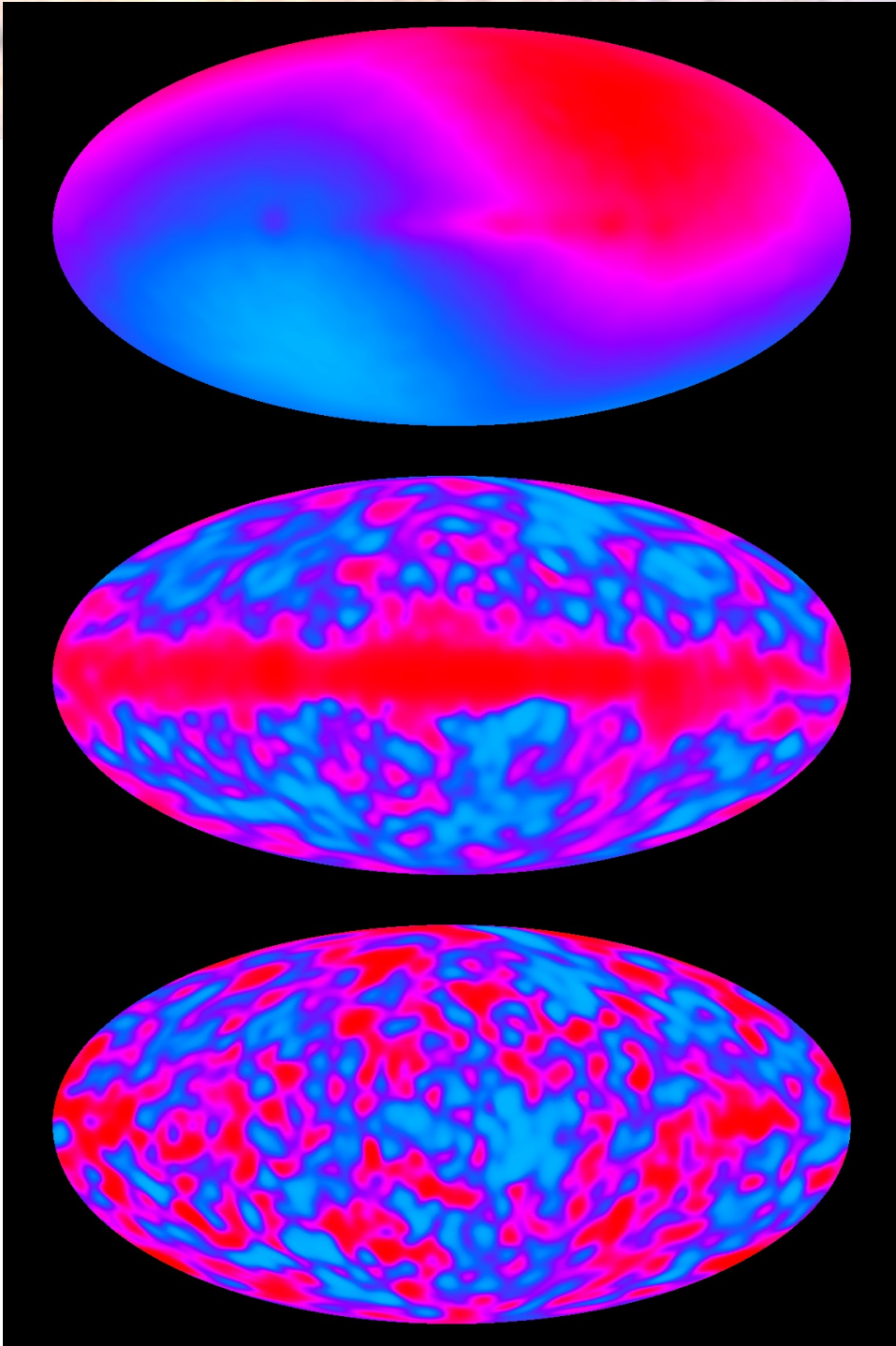
III.1 Observations



III. Le fond diffus cosmologique

III.1 Observations

Nettoyage :



III. Le fond diffus cosmologique

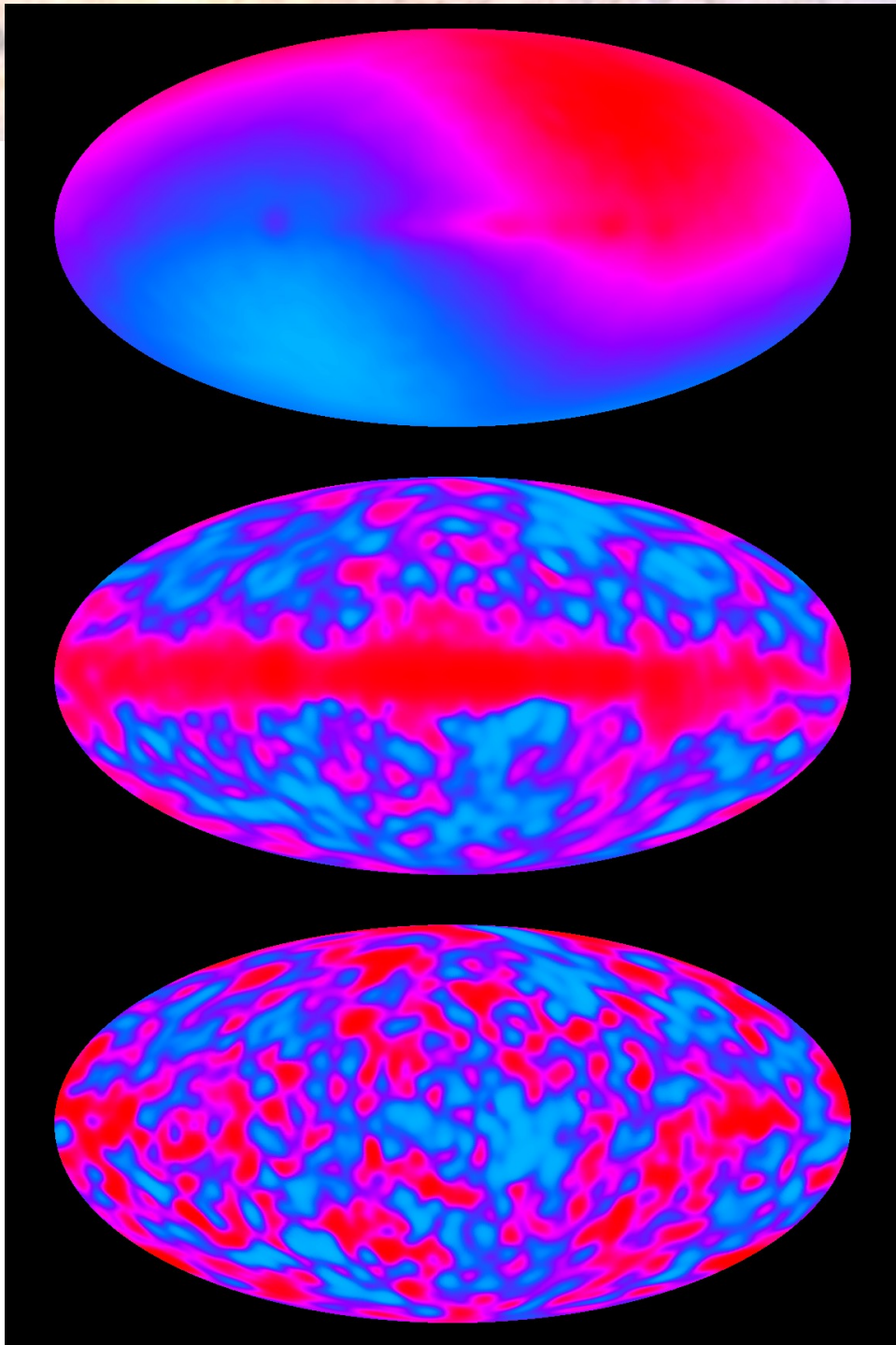
III.1 Observations

Nettoyage :

- mouvement propre de l'observateur
- avant-plan galactique
- avant-plan extra-galactique

Caractérisation :

$$T(\theta, \varphi) = (2.725 \pm 0.01) \text{ K} \\ + (3.358 \pm 0.02) \text{ mK} \cos\theta \\ + \sum_{l>1, m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

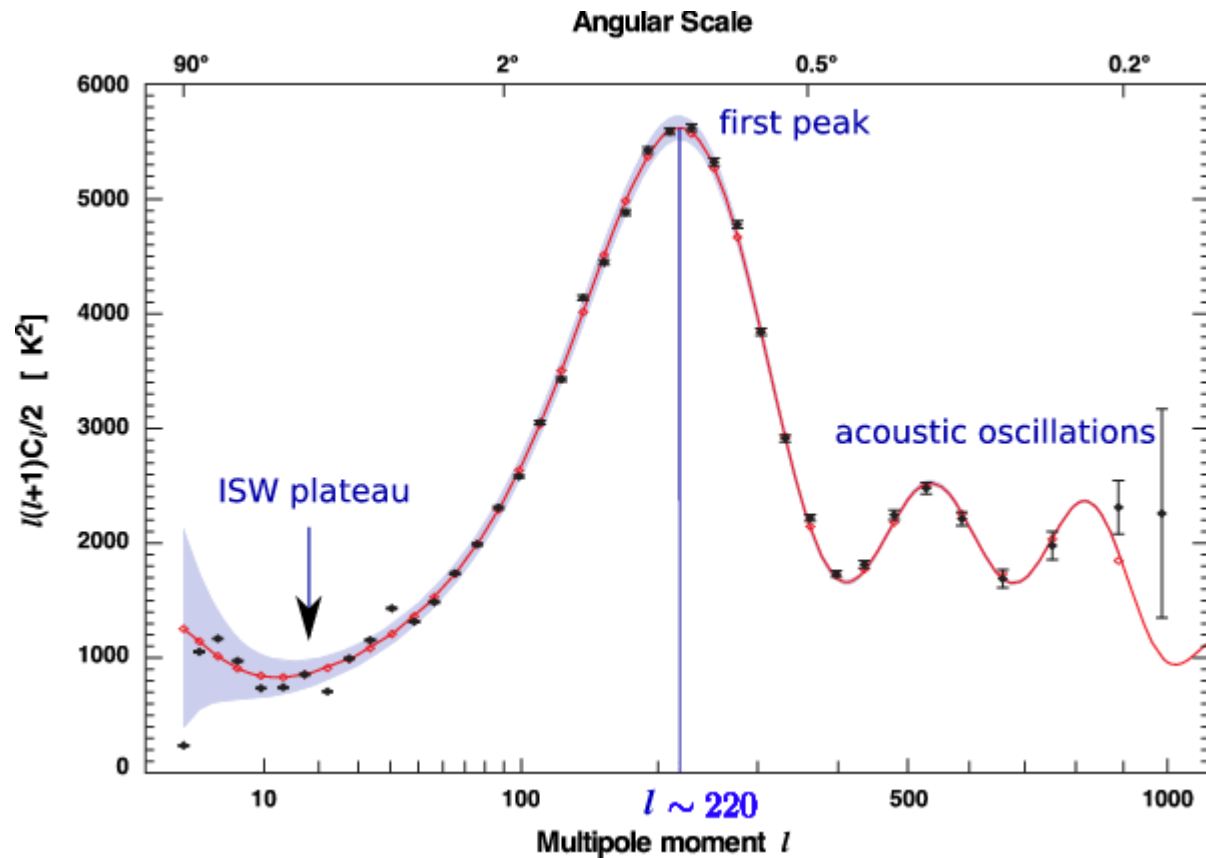


III. Le fond diffus cosmologique

III.1 Observations

Caractérisation :

$$T(\theta, \varphi) = (2.725 \pm 0.01) \text{ K} + (3.358 \pm 0.02) \text{ mK} \cos\theta + \sum_{l>1, m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



III. Le fond diffus cosmologique

III.2 Anisotropies du CMB

Sources :

→ inhomogénéités de densité : $\Delta\lambda_0/\lambda_0 = (1/3) GM_1/(a_1 r_1) + GM_1 t_1/(a_1 r_1)^2$

Terme de Sachs-Wolfe
= redshift gravitationnel

$= \vec{v}_1 \cdot \vec{n}_{\text{obs}} \Rightarrow$ terme Doppler

($\Rightarrow$ Fluctuations apparentes de température)

→ fluctuations de l'instant (= redshift) de recombinaison dues à des fluctuations réelles de T

Au total :

$$\Delta T_0 / T_0 (\theta, \varphi) = (1/3) \Phi(r_1) + \vec{v}_1 \cdot \vec{n}_{\text{obs}} + \Delta T_1 / T_1$$

0 : observation

1 : émission

III. Le fond diffus cosmologique

III.2 Anisotropies du CMB

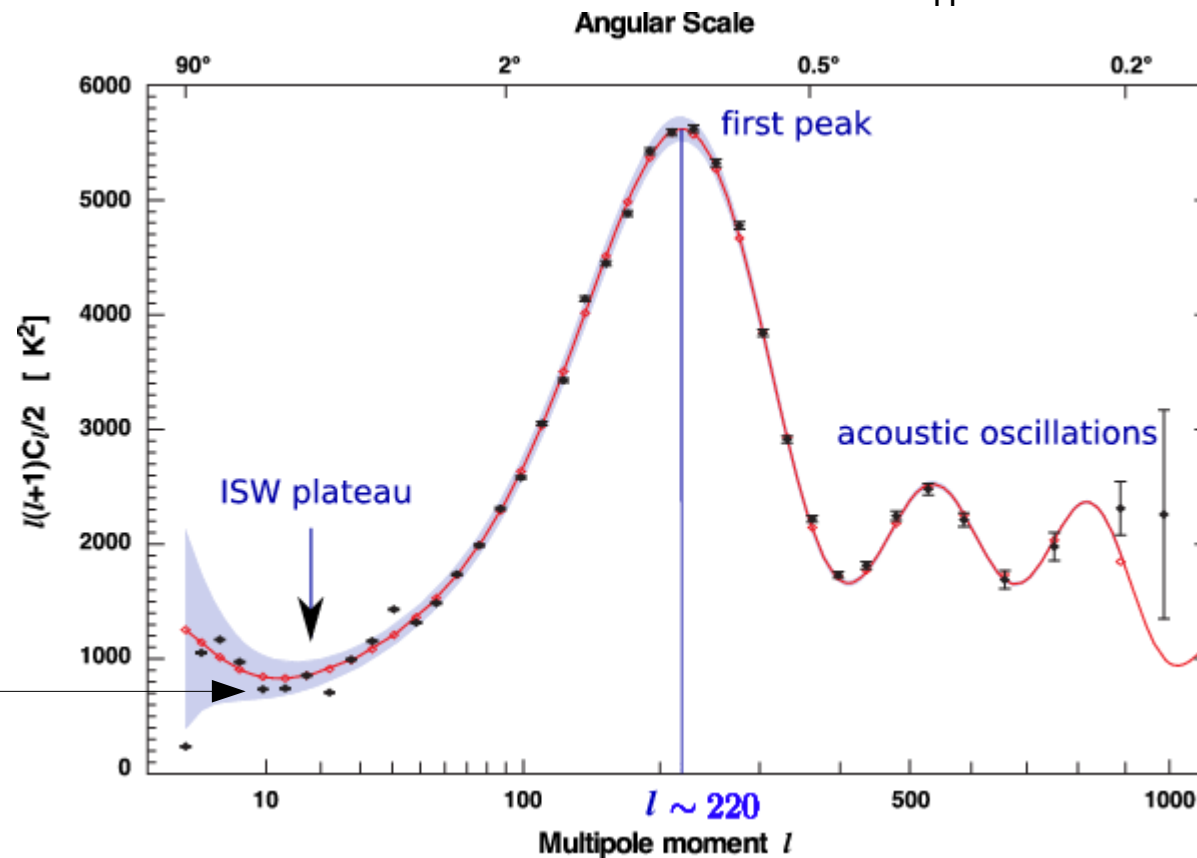
Distance de Hubble : $d_H = cH^{-1}$ = distance horizon ; $\theta_H \sim$ angle de vue de d_H

Fluctuations à grande échelle : $\Delta\theta > \theta_H$

Terme dominant = SW

$SW \sim G\Delta M/R \sim G\langle\rho\rangle [\Delta\rho/\rho]_R (4\pi R^3/3) / R \sim [\Delta\rho/\rho]_R R^2/d_H^2$

Or inflation $\Rightarrow [\Delta\rho/\rho]_R \sim R^{-2} \Rightarrow$ SW invariant d'échelle et $\sim [\Delta\rho/\rho]_{R=d_H}$

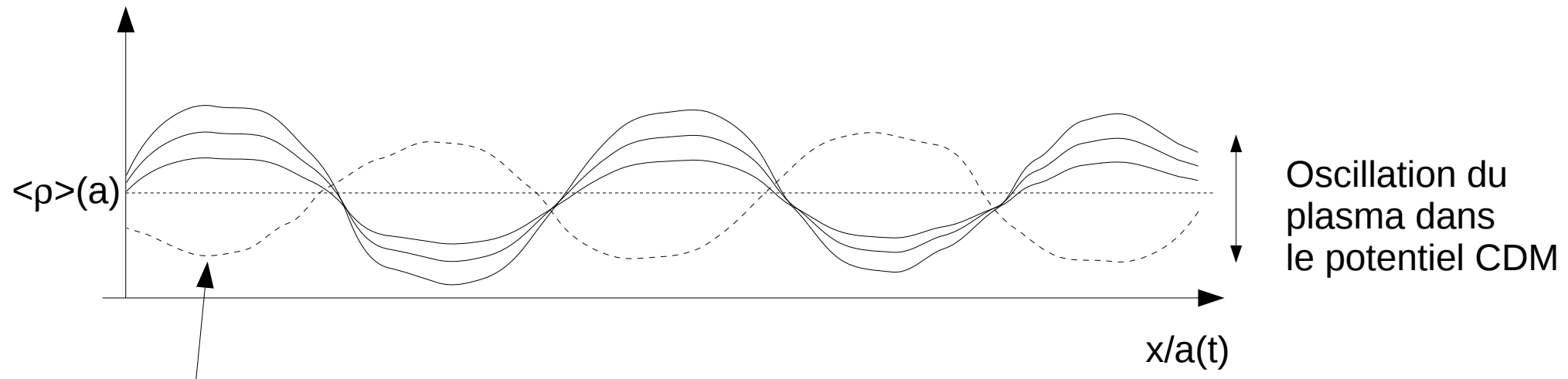


III. Le fond diffus cosmologique

III.2 Anisotropies du CMB

Fluctuations à petite échelle : $\Delta\theta > \theta_H$

Sub-Hubble $\Rightarrow$ effets de pression du plasma photons-baryons



Matière noire froide (CDM)

- pas d'oscillation
- croissance $\sim a(t)$

$$\omega = kc_s / \hat{a} \quad \text{avec (espace plat) } c_s = c / 3^{1/2}$$

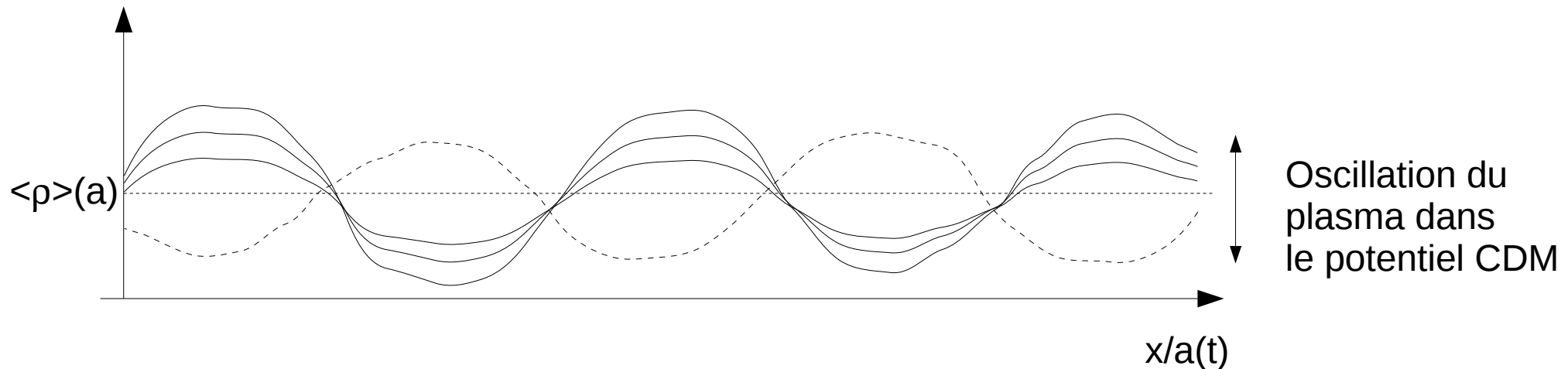
Signe de la fluctuation dépend de la phase à la recombinaison Θ_{rec}

III. Le fond diffus cosmologique

III.2 Anisotropies du CMB

Fluctuations à petite échelle : $\Delta\theta > \theta_H$

Sub-Hubble $\Rightarrow$ effets de pression du plasma photons-baryons



$\Theta_{\text{rec}} = n\pi$ avec $n = 1, 3, 5, \dots \Rightarrow$ effet intrinsèque :
haute compression $\Rightarrow$ haute $T_1 \Rightarrow$ max de T_0

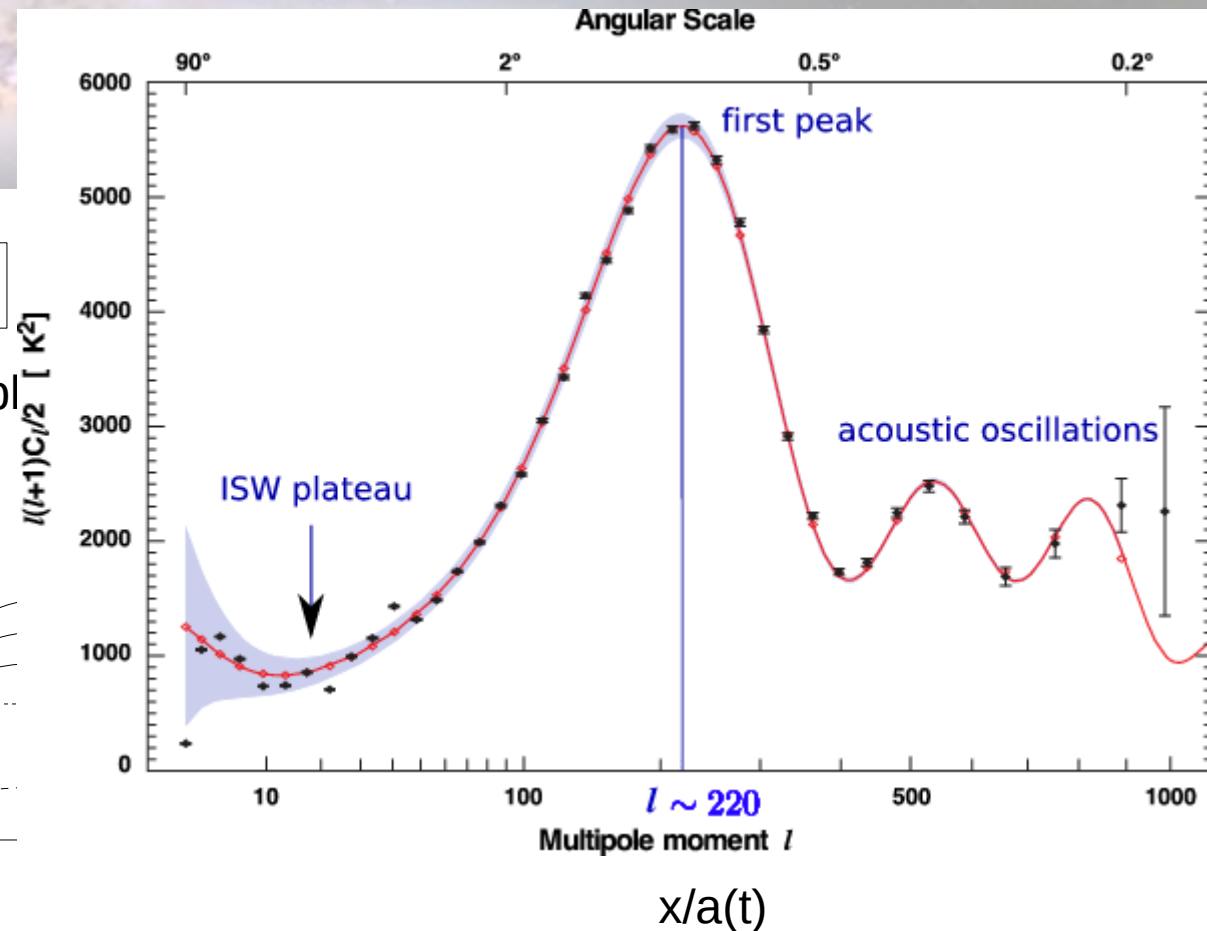
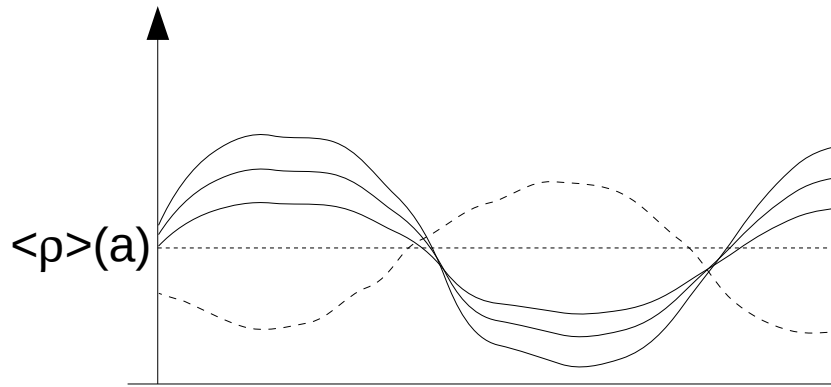
$\Theta_{\text{rec}} = n\pi$ avec $n = 2, 4, 6, \dots \Rightarrow$ effet redshift gravitationnel (SW) :
pression moyenne $\Rightarrow T_1 \Rightarrow$ moyenne basse T_0

$\Theta_{\text{rec}} = n\pi/2$ avec $n = 1, 3, 5, \dots \Rightarrow$ effet vitesse plasma :
Intrinsèque et SW se compensent $\Rightarrow$ reste la vitesse



Fluctuations à petite échelle : $\Delta\theta > \theta_H$

Sub-Hubble $\Rightarrow$ effets de pression du pl



$\Theta_{\text{rec}} = n\pi$ avec $n = 1, 3, 5, \dots \Rightarrow$ effet intrinsèque :
haute compression $\Rightarrow$ haute $T_1 \Rightarrow$ max de T_0

Effet dominant $\Rightarrow$ modes en $n\pi$

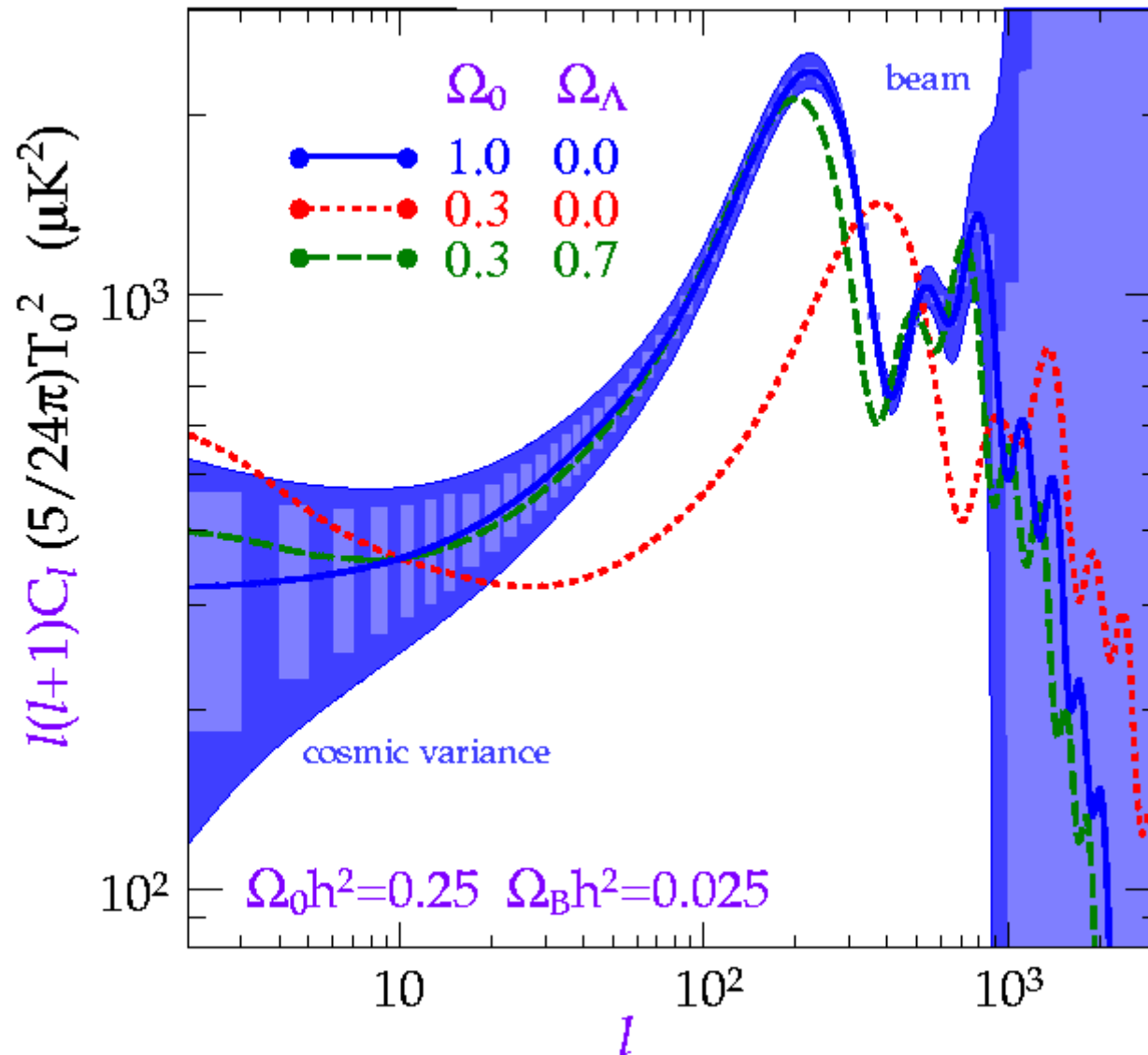
$\Theta_{\text{rec}} = n\pi$ avec $n = 2, 4, 6, \dots \Rightarrow$ effet redshift gravitationnel (SW) :
pression moyenne $\Rightarrow T_1 \Rightarrow$ moyenne basse T_0

$\Theta_{\text{rec}} = n\pi/2$ avec $n = 1, 3, 5, \dots \Rightarrow$ effet vitesse plasma :
Intrinsèque et SW se compensent $\Rightarrow$ reste la vitesse

III. Le fond diffus cosmologique

III.2 Anisotropies du CMB

Contraintes des paramètres cosmologiques



I. Un peu d'histoire

II. Dynamique universelle

III. Le fond diffus cosmologique

IV. L'abondance des éléments légers
Cours au tableau noir

V. Conclusions
Oral

