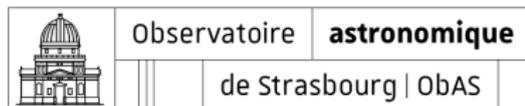


Formation et Evolution des Galaxies

Arnaud Siebert



2021

Organisation des enseignements et des évaluations

- ▶ Contact : Arnaud Siebert,
arnaud.siebert@astro.unistra.fr, bureau E1.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Organisation des enseignements et des évaluations

- ▶ Contact : Arnaud Siebert,
arnaud.siebert@astro.unistra.fr, bureau E1.
- ▶ Deux cours par semaine pendant 6 semaines (mercredi
et jeudi soir, toujours à l'observatoire)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Organisation des enseignements et des évaluations

- ▶ Contact : Arnaud Siebert,
arnaud.siebert@astro.unistra.fr, bureau E1.
- ▶ Deux cours par semaine pendant 6 semaines (mercredi et jeudi soir, toujours à l'observatoire)
- ▶ 3 évaluations :
 - ▶ TP noté (TP3 sur les courbes de rotations de galaxies)
 - ▶ Présentation orale le dernier cours : 10mn questions incluses (plus de temps si nombre de groupe faible)
 - ▶ Examen écrit durée deux heures le mercredi de la dernière semaine

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Présentation orale :

Par groupe de deux (minimum) ou plus si le nombre d'étudiants l'impose.

Recherche sur internet : wikipedia et autre (attention, les sites anglophones contiennent plus d'information, penser à faire vos recherches en anglais)

Doit expliquer la physique du problème sans entrer dans trop de détails (ne veut pas dire pas d'équations)

Présentation orale : **fichier pdf à envoyer par email la veille de l'examen.**

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Liste de sujets possibles (autres sujets possibles sous réserve d'acceptation par l'enseignant.)

- ▶ les trous noirs super-massifs
- ▶ les galaxies actives (AGNs)
- ▶ le centre de la Voie Lactée
- ▶ la structures des halos de matière noire (NFW 1D \Rightarrow 3D)
- ▶ les fusions de galaxies
- ▶ les supernovae comme chandelles standard
- ▶ les lentilles gravitationnelles
- ▶ les alternatives à la matière noire (MOND)
- ▶ les problèmes du modèle Λ CDM.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Définitions et Rappels

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Qu'est-ce qu'une galaxie ?

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Qu'est-ce qu'une galaxie ?



- ▶ Une galaxie est un ensemble d'étoiles liées par la gravitation
 - ⇒ Il y a un grand nombre d'étoiles dans une galaxie
- ▶ mais pas que des étoiles
 - ⇒ du gaz
 - ⇒ de la matière noire

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

La morphologie change avec la longueur d'onde !

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

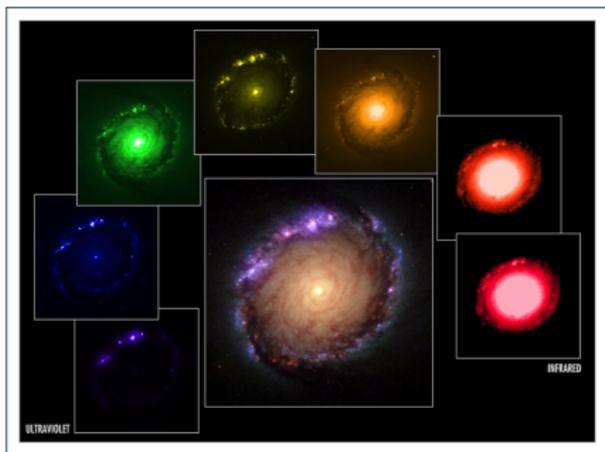
Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des



La morphologie change avec la longueur d'onde !

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

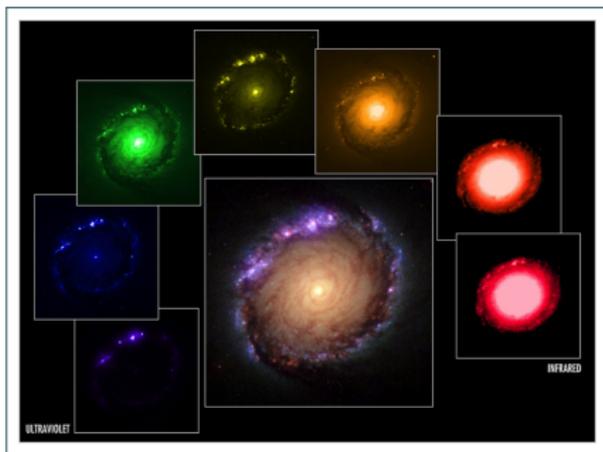
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Ces changements
correspondent à

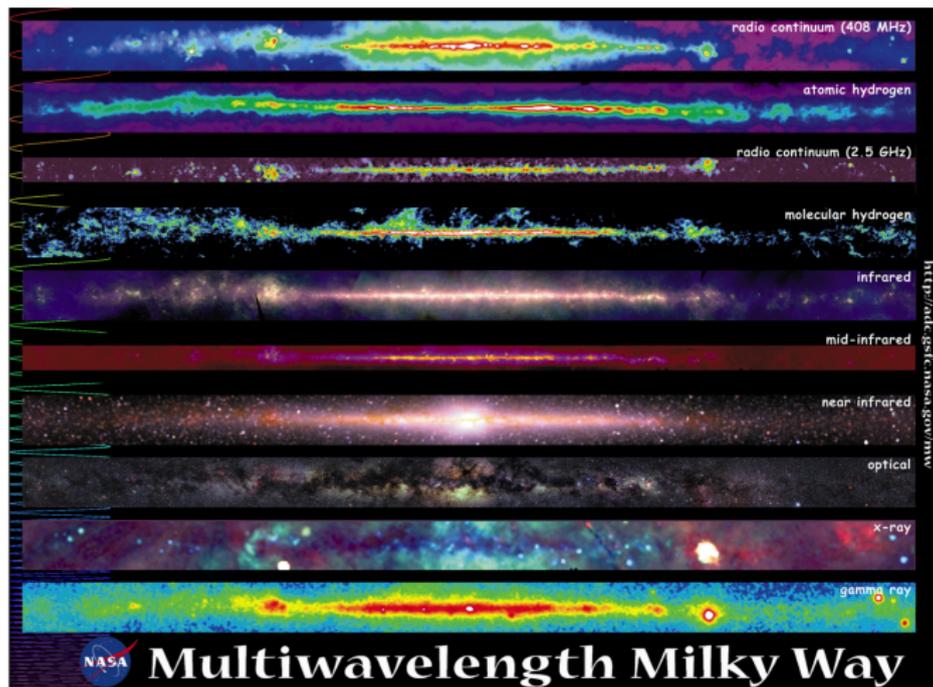
- ▶ des sources
astrophysiques
différentes
- ▶ des états de la
matière/processus
physiques différents



C'est pareil pour la Voie Lactée

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Une étoile

- ⇒ du plasma en fusion
- ⇒ le rayonnement émis suit une loi du corps noir (purement thermique) en première approximation

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Intensité spécifique (expérimental) :

à basse fréquence = approximation de Rayleigh-Jeans

$$I_\nu = \frac{2kT\nu^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

à haute fréquence = approximation de Wien

$$I_\nu \propto \nu^3 \exp\left(-\frac{cst\nu}{T}\right)$$

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Les deux approximations ont été rassemblées par Planck

- ▶ Pour retrouver la formule on se place dans le cas d'un atome simplifié à deux niveaux d'énergie u et l (pour u_p et l_o).
- ▶ On suppose que les atomes sont placés dans un conteneur et qu'ils sont à l'équilibre thermodynamique.

Le rapport des deux populations (correspondant aux deux états d'excitation) est donné par

$$\frac{N_u}{N_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta\chi}{kT}\right)$$

où

$$\begin{aligned}\Delta\chi &= \text{différence des potentiels d'excitation} \\ &\quad \text{des deux niveaux} \\ &= h\nu \rightarrow \text{énergie d'un photon libéré par} \\ &\quad \text{la transition } u \rightarrow l\end{aligned}$$

Les g_i sont les poids statistiques ($g_n = 2n^2$ pour l'hydrogène)

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

On applique maintenant l'hypothèse d'**équilibre thermodynamique**

$$N_u A_{ul} + N_u B_{ul} I_\nu = N_l B_{lu} I_\nu + coll$$

A_{ul} , B_{ul} et B_{lu} sont les coefficients d'Einstein

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

On applique maintenant l'hypothèse d'**équilibre thermodynamique**

$$N_u A_{ul} + N_u B_{ul} I_\nu = N_l B_{lu} I_\nu + coll$$

Le premier terme décrit l'émission spontanée de photons. Il est proportionnel au nombre d'atomes dans l'état haut.

On applique maintenant l'hypothèse d'**équilibre thermodynamique**

$$N_u A_{ul} + N_u B_{ul} I_\nu = N_l B_{lu} I_\nu + coll$$

Le deuxième terme décrit l'émission stimulée de photons. Il est proportionnel au nombre d'atomes dans l'état haut et à l'intensité du rayonnement ambiant.

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

On applique maintenant l'hypothèse d'**équilibre thermodynamique**

$$N_u A_{ul} + N_u B_{ul} I_\nu = N_l B_{lu} I_\nu + coll$$

Le troisième terme décrit l'absorption de photons. Il est proportionnel au nombre d'atomes dans l'état bas et également à l'intensité du rayonnement ambiant.

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

On applique maintenant l'hypothèse d'**équilibre thermodynamique**

$$N_u A_{ul} + N_u B_{ul} I_\nu = N_l B_{lu} I_\nu + \text{coll}$$

Le dernier terme est un terme de collision. A l'équilibre ce terme doit valoir 0 car il doit y avoir autant de transitions $u \rightarrow l$ que de transitions $l \rightarrow u$ dues aux collisions entre atomes.

On veut résoudre cette équation pour I_ν

$$\begin{aligned}\Rightarrow I_\nu &= \frac{A_{ul}}{B_{lu} \left(\frac{N_l}{N_u} \right) - B_{ul}} \\ &= \frac{A_{ul}}{\left(\frac{g_l}{g_u} \right) B_{lu} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) - B_{ul}}\end{aligned}$$

où la deuxième égalité vient de l'utilisation du rapport de population.

Pour $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$, on doit retrouver l'approximation de Rayleigh-Jeans.

Dans ce régime, on peut procéder à l'expansion de Taylor de l'exponentielle ($\exp(x) \approx 1 + x$) :

$$\Rightarrow I_\nu = \frac{A_{ul}}{\left(\frac{g_l}{g_u}\right) B_{lu} - B_{ul} + \left(\frac{g_l}{g_u}\right) B_{lu} \frac{h\nu}{kT}} = 2kT \frac{\nu^2}{c^2}$$

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

L'égalité n'est vrai que si

$$B_{ul} = B_{lu} \frac{g_l}{g_u}$$

et

$$A_{ul} = 2 \frac{h\nu^3}{c^2} B_{ul}$$

$$\Rightarrow I_\nu = 2 \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad \text{Loi de Planck}$$

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

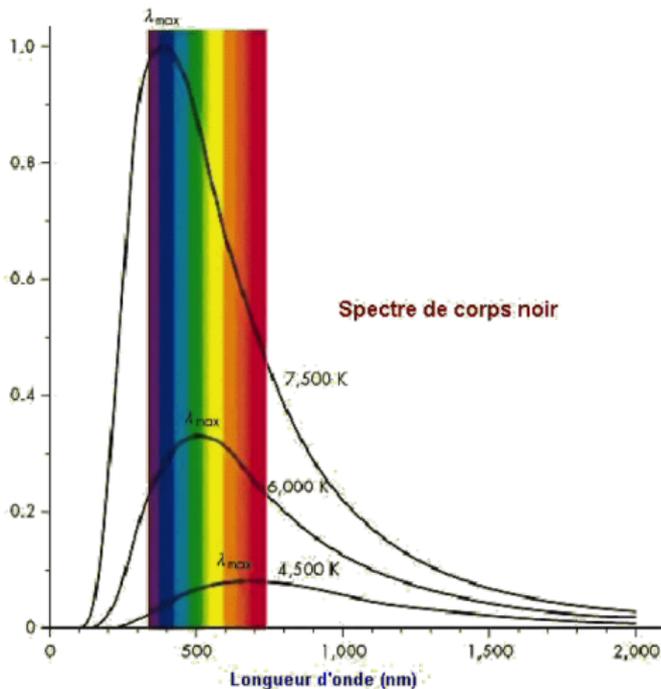
Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Mais aussi :

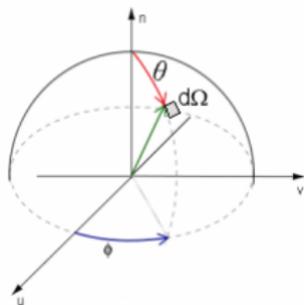
$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \cdot 10^6}{T(K)} \text{ (nm)} \rightarrow \text{Loi de Wien}$$

et

$$F = \sigma T^4 \rightarrow \text{Loi de Stephan-Boltzmann}$$

Flux \Rightarrow quantité d'énergie émise sur la sphère :

$$\mathcal{F}_\nu = \oint I_\nu \cos\theta d\Omega$$



Si I_ν indépendant de θ et Φ , alors $\mathcal{F}_\nu = \pi I_\nu$ (valable uniquement pour des sources résolues)

$$\text{Luminosité totale } L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

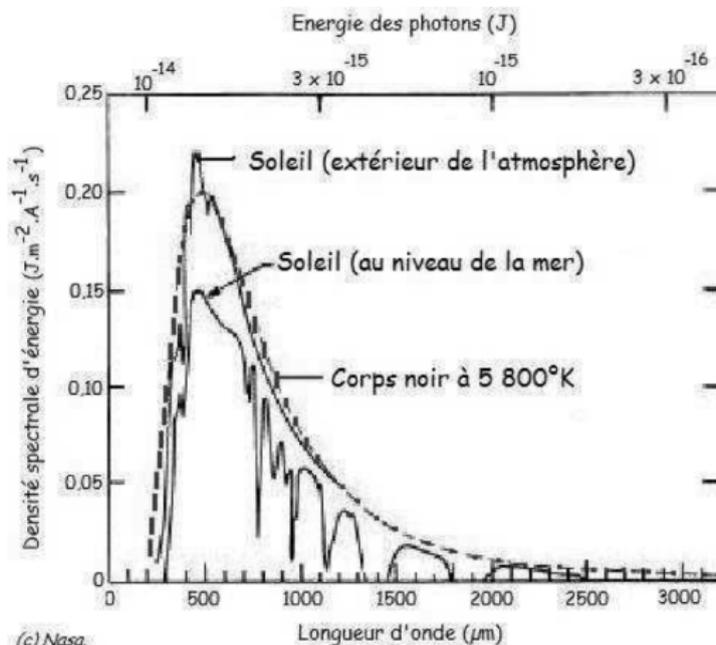
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

La loi de Planck donne la forme globale du spectre d'une étoile



(c) Nasa

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

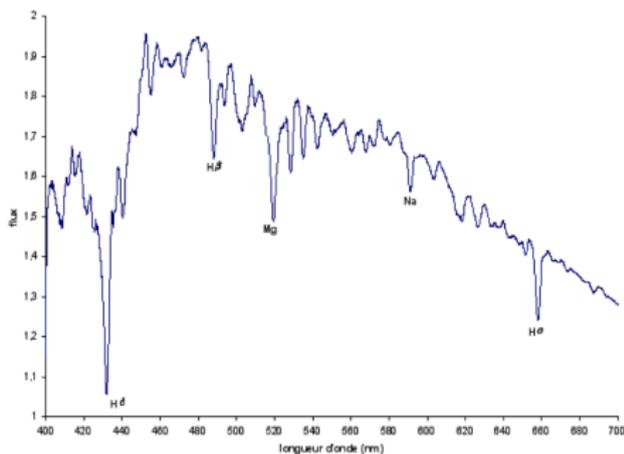
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

La photosphère des étoiles contient aussi des atomes qui peuvent absorber le rayonnement \Rightarrow création de raies d'absorption



Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Ces raies sont importantes car elles permettent de remonter à

- ▶ la vitesse de l'étoile le long de la ligne de visée (pour des études de cinématique/dynamique)
- ▶ renseignent sur le contenu en élément lourds de l'objet (varie en fonction du temps)
- ▶ les propriétés de l'étoile car les profils des raies dépendent de
 - ▶ de la température du plasmas
 - ▶ composition chimique
 - ▶ de la gravité
 - ▶ etc

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

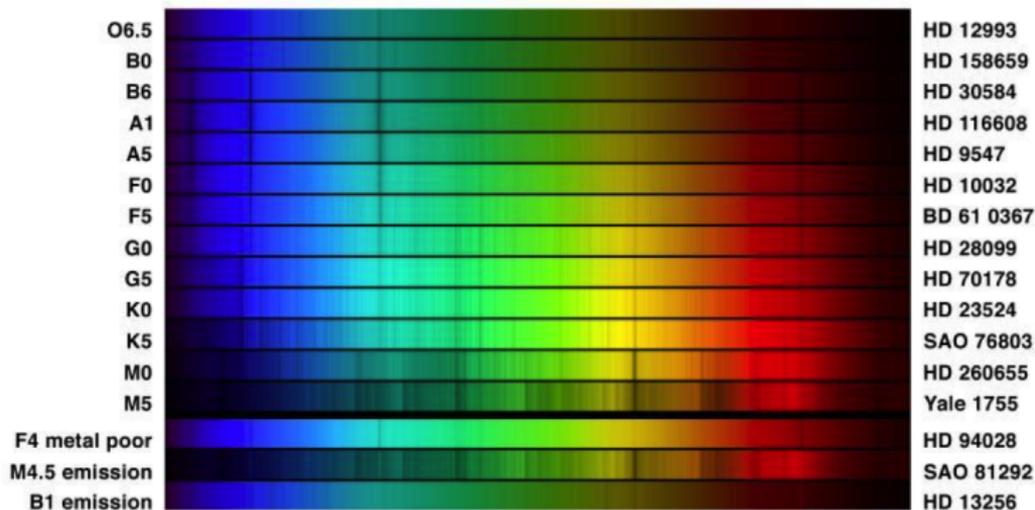
Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Changement en fonction de la température



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Pour émettre un spectre (donc monter la température de la photosphère à T), il faut de l'énergie.

- ▶ Cette énergie est tirée de réactions de fusion nucléaires dans le coeur des étoiles.
- ▶ Réaction de fusion \Rightarrow création de noyaux lourds à partir de noyaux légers.
- ▶ L'élément le plus présent dans une étoile est l'hydrogène (nucléosynthèse primordiale) \Rightarrow c'est lui qui va fusionner au départ
- ▶ Le cycle/chaine de fusion dépend de la masse au moment de l'ignition (ce moment est appelé Zero Age Main Sequence ou ZAMS)

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Étoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

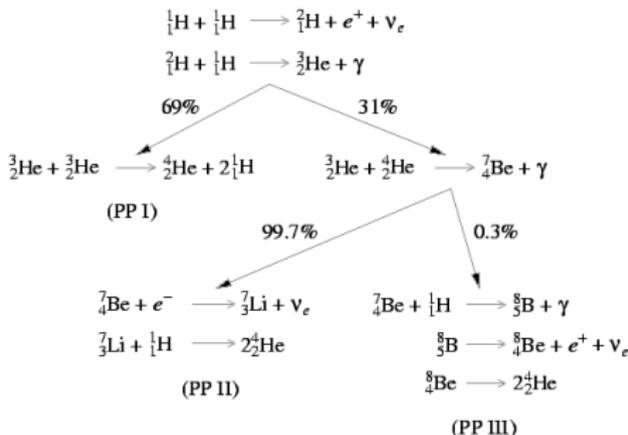
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Pour les étoiles de faible masse ($M < 1.2M_{\odot}$) et de température modérée, c'est la chaîne proton-proton (pp) qui est le cycle principal.

Pour vaincre la barrière de Coulomb, la température doit être supérieure à 5 MK (18 MK au coeur de l'étoile).



Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

La première réaction de fusion est très lente car il faut à la fois franchir la barrière de Coulomb et une interaction faible pour transformer un proton en neutron par désintégration β^+ .

Ceci explique pourquoi les étoiles de faible masse mettent plus de temps à "bruler" leur hydrogène.

Le produit final de cette réaction est de l'hélium.

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

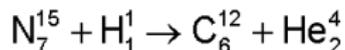
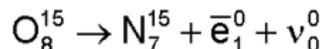
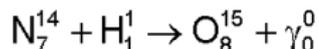
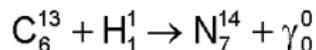
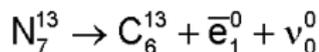
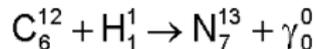
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Pour les étoiles de masse supérieure à $1.2 M_{\odot}$, c'est le cycle CNO qui domine.

La température de coeur pour ces étoiles est supérieure à 17 MK.



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

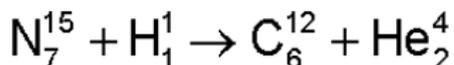
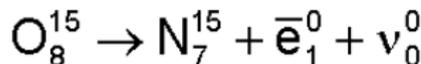
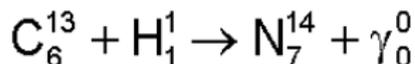
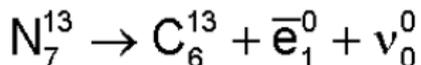
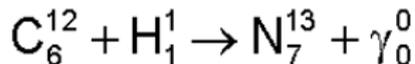
Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des



- ▶ Attention C N et O sont des catalyseurs
- ▶ C'est un cycle de fusion de l'hydrogène
- ▶ La réaction la plus lente est la capture du proton par $\text{N}_7^{14} \Rightarrow$ accumulation de N dans l'étoile

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

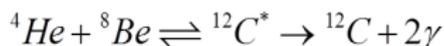
Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Une fois l'hydrogène épuisé dans le coeur, le plus gros de la vie d'une étoile est passé. Les réactions de fusion de He_2^4 commencent (cycle 3α).



Le carbone produit peut également fusionner avec He_2^4 pour produire O^{16} .

Les éléments plus lourds sont produits par capture lente ou rapide de protons jusqu'au fer qui est l'élément le plus stable.

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

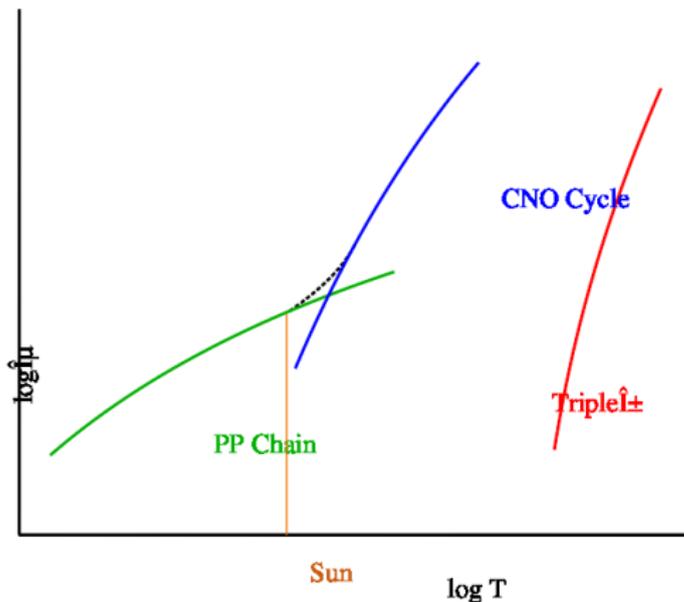
Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

- ▶ Flux total = énergie rayonnée par seconde et unité de surface

$$\mathcal{F} = \sigma T_{eff}^4 \text{ (loi de Stephan-Boltzmann)}$$

- ▶ Luminosité = énergie totale rayonnée par l'étoile par seconde

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4, \text{ } R \text{ le rayon de l'étoile}$$

⇒ à T fixé, plus l'étoile est large, plus elle est lumineuse.

- ▶ Magnitude apparente

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)$$

où f est le flux reçu sur le détecteur

c'est une quantité différentielle, le point 0 est fixé par l'étoile Véga (pour le système Végamag)

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

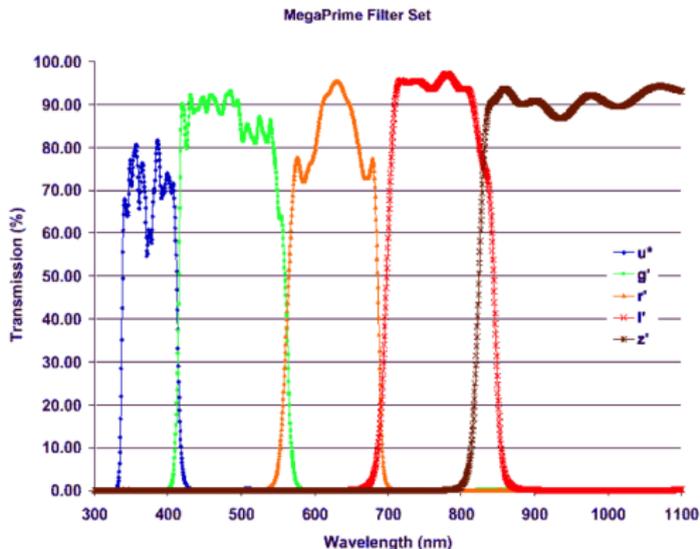
Relation entre le flux , la luminosité et le flux reçu

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

$$f = \frac{1}{4\pi r^2} \int_0^{+\infty} \mathcal{F}_\nu T_\nu F'_\nu R_\nu d\nu$$

- ▶ T_ν = transmission de l'atmosphère à la fréquence ν
- ▶ F'_ν = transmission du filtre utilisé
- ▶ R_ν = efficacité du télescope
- ▶ r la distance à l'objet

Exemple de filtres utilisés : le CFHT



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Couleurs : c'est la différence entre les magnitudes dans deux filtres différents

- ▶ Attention : on soustrait toujours la magnitude dans le filtre le plus rouge au filtre le plus bleu (par exemple $g'-r'$)
- ▶ La couleur renseigne effectivement sur la couleur d'un astre (cf rayonnement du corps noir) et donc sa température effective.

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Magnitude absolue et relation avec la magnitude apparente :

Soit F le flux reçu pour une étoile située à la distance D et f le flux reçu pour la même étoile à une distance d .

Le flux varie en $\frac{1}{r^2}$ par rapport à la distance, on a donc la relation

$$f = \left(\frac{D}{d}\right)^2 F$$

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

On appellera M (magnitude absolue), la magnitude apparente de l'étoile située à D .

Avec la définition de la magnitude apparente, on a alors

$$m = -2.5 \log_{10}(f) + cst$$

et donc

$$m - M = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f}{F} \right) = 5 \log_{10} \left(\frac{d}{D} \right)$$

D est par convention fixé à 10 pc.

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

$m - M$ est le module de distance et, si d est exprimé en parsec, on a

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 + A$$

Le terme A est un terme d'absorption qui permet de prendre en compte les effet d'absorption du rayonnement par le gaz présent dans le milieu interstellaire.

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

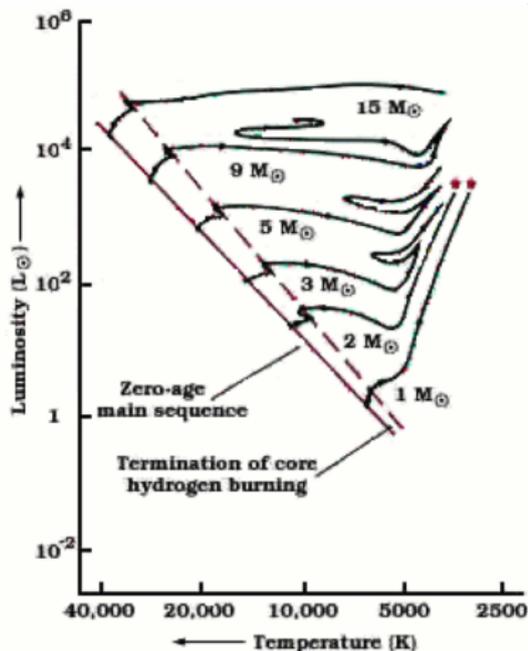
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

Dans un diagramme température-luminosité (HR théorique) ou couleur-magnitude absolue (CMD observationnel), les étoiles évoluent en fonction du temps.



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

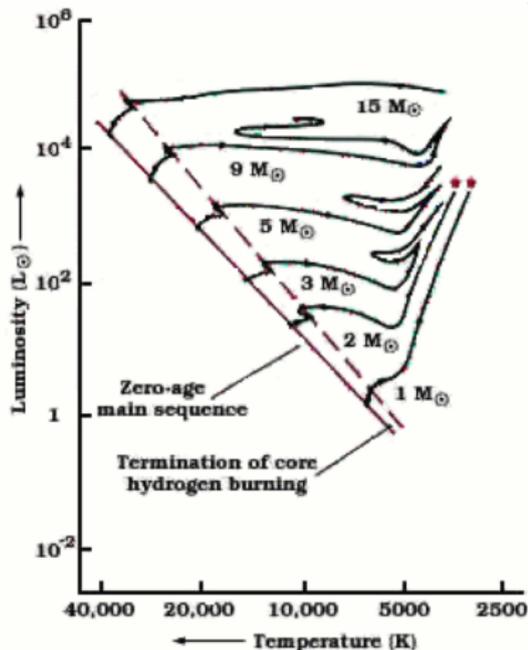
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

Dans ces diagrammes, l'évolution stellaire dépend principalement de la masse.



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

Définitions et Rappels

Galaxie ?
Etoiles et rayonnement
Evolution stellaire
Mesure des distances
Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Le temps de vie sur la
séquence principale en
dépend aussi

$\tau_{MS} \sim 10^{10} \frac{M}{L} \text{Gyr} \sim$
 $10^{10} M^{-2.5} \text{Gyr}$ où M est la
masse en masse solaires.

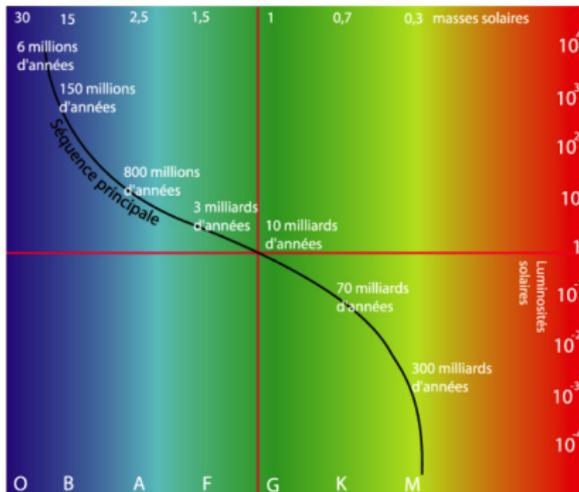
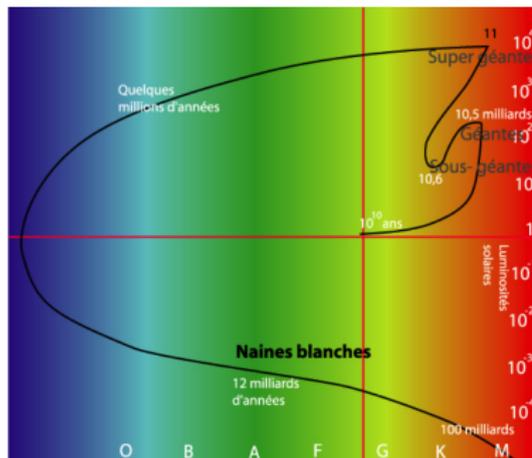


Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Evolution d'une étoile de
masse solaire



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

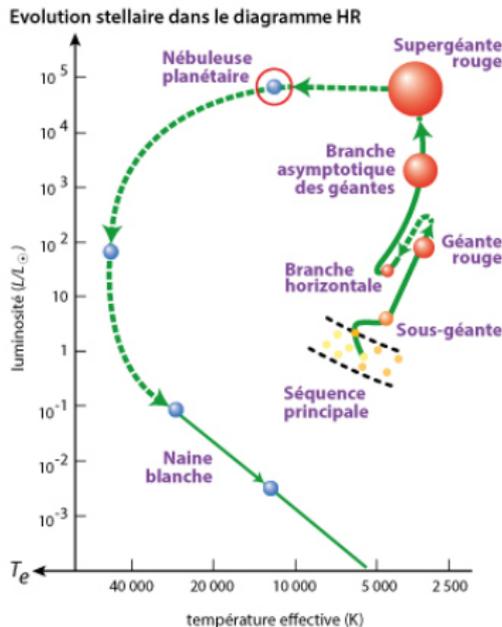
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

On distingue plusieurs phases dans l'évolution d'une étoile.
Ces phases correspondent à différentes étapes des cycles nucléaires.



© Christophe-Louis Mele

Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

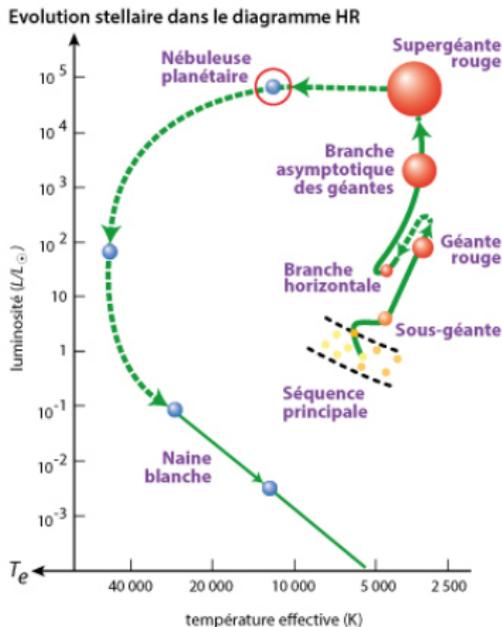
Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

- ▶ séquence principale (SP)
- ▶ branche des sous géantes (SGB)
- ▶ branche des géantes rouges (RGB)
- ▶ branche asymptotique des géantes (AGB)



© Christophe-Louis Mele

Définitions et Rappels

Galaxie ?
Etoiles et rayonnement
Evolution stellaire
Mesure des distances
Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Les étoiles sont classées en groupes en fonction de leurs propriétés observables :

- ▶ en fonction de la température : 7 groupes du plus chaud au plus froid O, B, A, F, G, K, M
- ▶ divisé en sous partie pour plus de précision : de 1 à 9
- ▶ une classe de luminosité en fonction de l'état d'évolution
 - ▶ V → naines (SP)
 - ▶ IV → sous géantes (SGB)
 - ▶ III → géantes (RGB)
 - ▶ I → supergéantes (AGB)

Le soleil est une naine : classe G2V

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Si l'on connaît les propriétés intrinsèques d'une étoile, le module de distance permet d'estimer cette dernière

$$m_x - M_x = 5 \log_{10} d - 5 - A_x$$

- ▶ nécessite de connaître la magnitude absolue
- ▶ nécessite de connaître l'absorption jusqu'à l'étoile en question
- ▶ relation logarithmique entre le module de distance et la distance : Attention aux erreurs

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Étoiles et rayonnement

Évolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Si l'on peut mesurer le spectre d'une étoile avec suffisamment de précision et de résolution, on peut mesurer les paramètres atmosphériques de l'étoile : gravité, température, métallicité.

Avec ces informations et l'utilisation de modèles d'évolution stellaire, on peut remonter à la luminosité absolue de l'étoile et donc estimer son module de distance.

Attention : très coûteux, il faut un spectre pour chaque étoile !

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

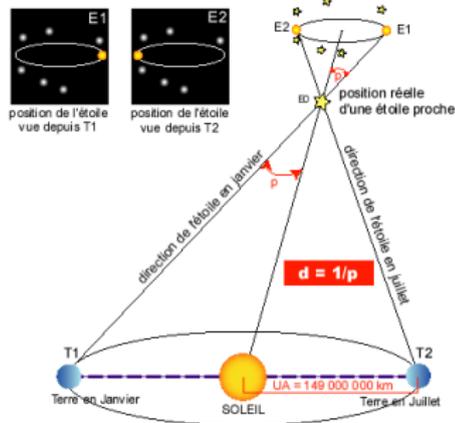
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

La seule mesure qui ne fait pas intervenir des propriétés de l'étoiles (magnitude ou autre) est la mesure de l'angle parallactique (ou parallaxe) qui est une mesure purement géométrique.

- ▶ la parallaxe $\pi = \frac{1}{d}$
- ▶ si π en seconde d'arc, d est en parsec
- ▶ définit la mesure de distance parsec : 1 parsec $\equiv \pi = 1$ arcsec
- ▶ $1\text{pc} = 3.08 \cdot 10^{16}\text{m} = 3.26 \text{ A.L.}$



© soc. d'astronomie de
Rennes

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Une **population stellaire** = un ensemble d'étoile de même âge et même métallicité

- ⇒ les étoiles se sont formées durant le même épisode de formation stellaire
- ⇒ dans la même région de la galaxie

Définitions et
Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

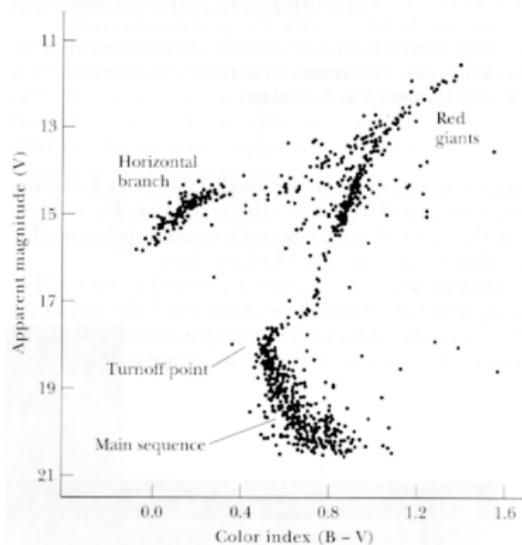
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Exemple de population stellaire

Un exemple courant de population stellaire : les amas globulaires

On retrouve les différentes phases d'évolution des étoiles



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

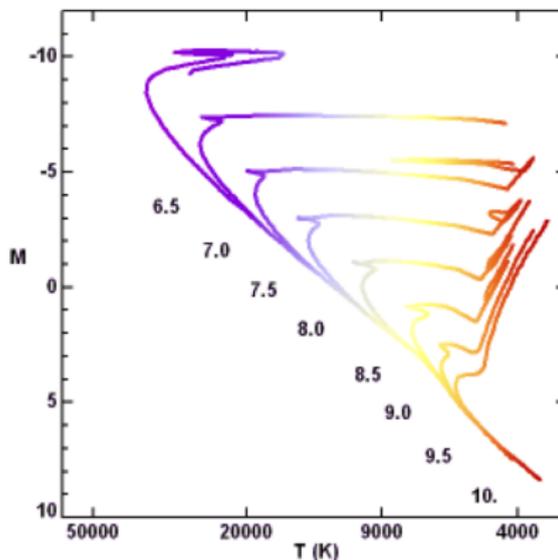
La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Equivalent théorique et effet de l'âge

Comme les étoiles d'une population stellaire ont le même âge et la même métallicité, elle peut être représentée par un isochrone dans le diagramme HR.

On notera l'effet de l'âge qui tend à rendre plus rouge et moins lumineuse une population stellaire avec le temps.



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

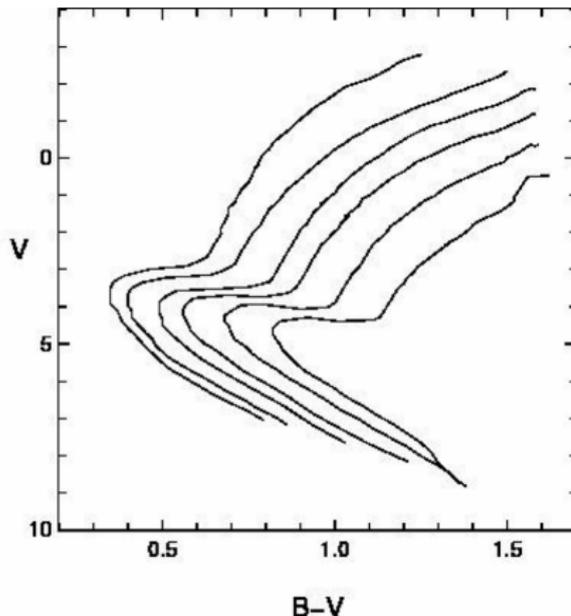
Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Le contenu en éléments
lourds des étoiles influe sur
la température de surface.

la métallicité croit de
gauche à droite sur les
isochrones de la figure
pour le même âge.



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

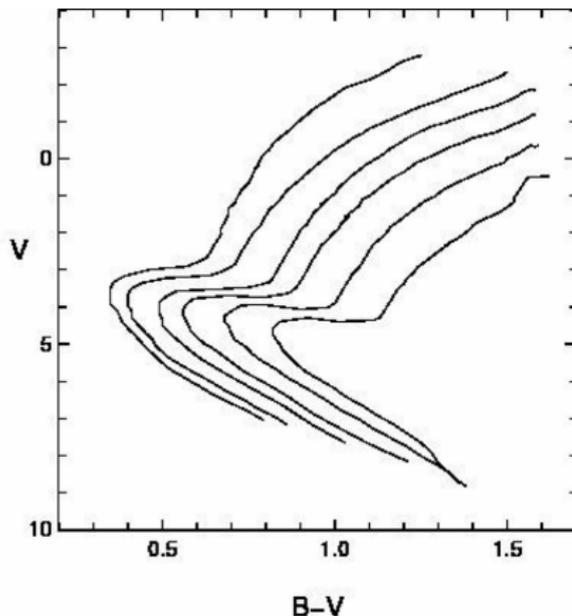
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Les métaux présents dans l'atmosphère bloque le passage du rayonnement. La surface "visible" de l'étoile est donc repoussée vers l'extérieur. Le gradient de température étant négatif, la température effective est donc plus basse quand on accroit le contenu en métaux et l'étoile apparaît plus rouge et aussi moins lumineuse.



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Définitions et Rappels

Galaxie ?
Étoiles et rayonnement
Evolution stellaire
Mesure des distances
Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

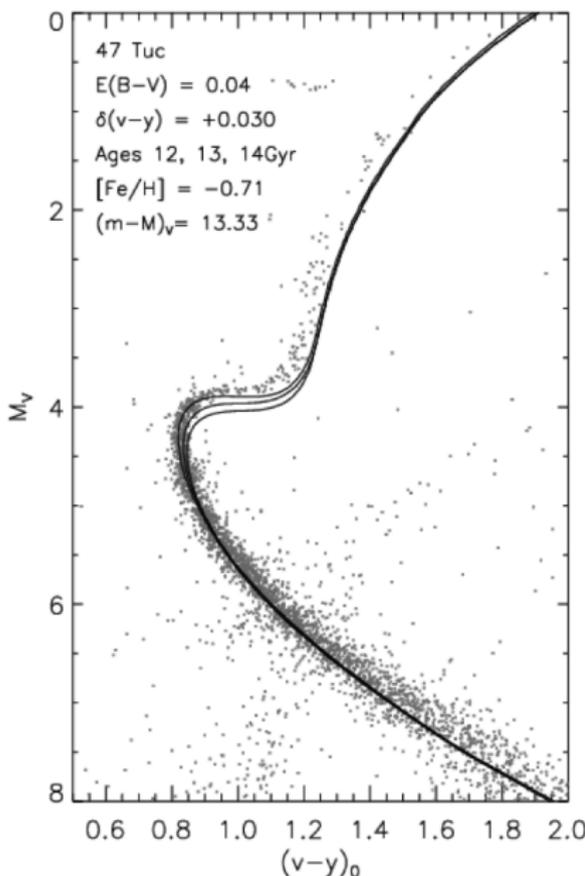
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Dans le cas des amas
stellaires (ouverts ou
globulaires), les étoiles sont
toutes à la même distance
On peut utiliser le CMD
pour connaître trois
paramètres :

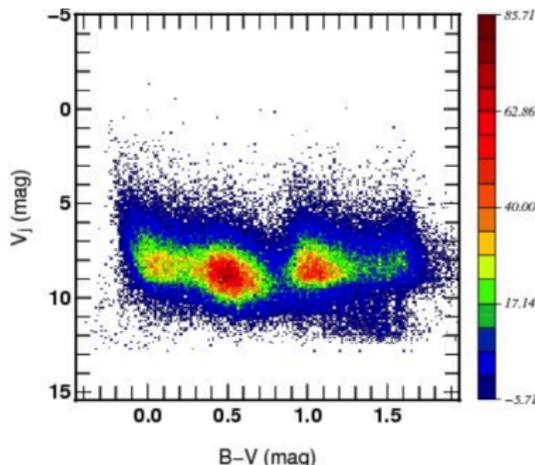
- ▶ âge
- ▶ métallicité
- ▶ distance



Cas compliqué par le fait
que l'on ne connaît pas à
priori la distance

- ▶ blurring de la
séquence principale
- ▶ pas de mesure d'âge
ou de métallicité
disponible directement

⇒ dégénérescence
distance - magnitude



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

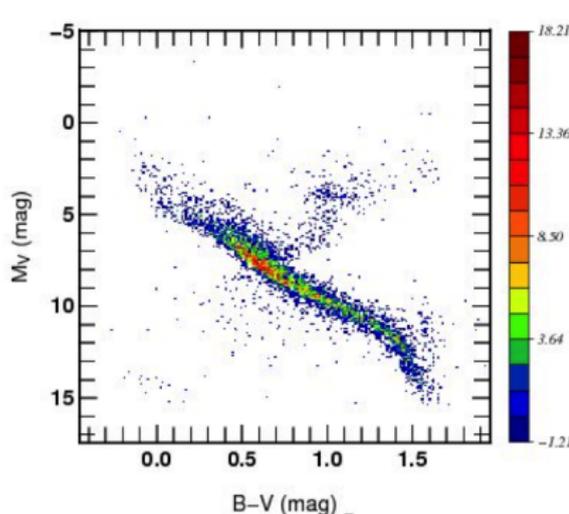
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Cas du voisinage solaire

Si l'on connaît la distance (via la mesure de la parallaxe ou de la parallaxe spectrophotométrique), la dégénérescence est levée. On voit qu'il y a deux populations stellaires principales dans le voisinage du soleil ($D < 100 \text{ pc}$) :

- ▶ une population jeune : étoiles chaudes
- ▶ une population plus vieille : présence d'une branche des géantes



Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

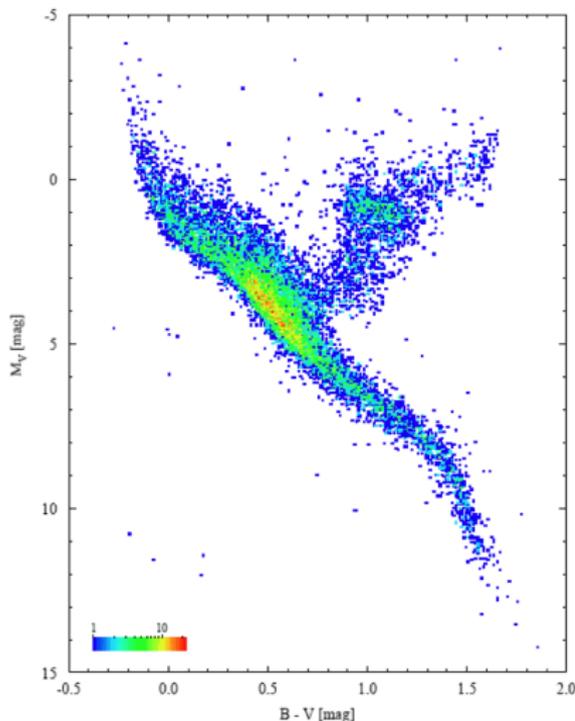
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

Les isochrones pour les populations simples nous renseignent sur les propriétés globales de la population stellaire (âge, métallicité).
Si l'on regarde le diagramme observé, la répartition dans les régions n'est ni homogène, ni aléatoire !



Définitions et Rappels

- Galaxie ?
- Etoiles et rayonnement
- Evolution stellaire
- Mesure des distances
- Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

La densité d'étoiles dans chaque région est modulée par plusieurs quantités ou relations :

- l'IMF (fonction de masse initiale) : les étoiles, au cours de leur formation, ne se créent pas avec des masses aléatoires et n'ont pas toutes la même masse.

Le nombre d'étoiles formées par interval de masse peut être approximé par une loi de puissance type Salpeter

$$N(m)dm \propto m^{-2.35} dm \equiv dN$$

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des

- le taux de formation stellaire au cours du temps (SFH) que l'on note $SFR(t)$
- la fonction de luminosité de la population : c'est la trace de la population dans le CMD (en pratique une isochrone)
- l'histoire de l'enrichissement en métaux $Z(t)$ (sera abordé plus en détail dans le chapitre sur l'évolution chimique).
- de la distribution spatiale de la population $\rho(\mathbf{x})$

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Etoiles et rayonnement

Evolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des

Toutes ces quantités sont reliées dans une équation :
l'équation de la statistique stellaire

$$\begin{aligned}dN &= N(m_1, m_1 - m_2 | \mathbf{x}) dm_1 d(m_1 - m_2) d^3 \mathbf{x} \\ &= \sum_i \iiint_{\mathbf{x}} \int_0^t SFR_i(\tau) \Phi_i(m_1, m_1 - m_2, Z_i(\tau)) \rho_i(\tau) d^3 \mathbf{x} d\tau \\ &\quad dm_1 d(m_1 - m_2)\end{aligned}$$

où Φ est la fonction de luminosité normalisée
 $\Phi(m_1, m_1 - m_2, Z) dm_1 d(m_1 - m_2) =$
 $IMF(m(M_1)) f(M_1, m_1 - m_2) dm_1 d(m_1 - m_2)$

Définitions et Rappels

Galaxie ?

Étoiles et rayonnement

Évolution stellaire

Mesure des distances

Populations stellaires

Classification des galaxies

Notions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

*Composition et variation en
fonction du type*

*Quelques ordres de
grandeur*

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Classification des galaxies

Pourquoi classifier les galaxies ?

Il existe des galaxies de toute taille et de toute masse avec des apparences très différentes.

Tout comme pour les plantes, les roches ou autre, classifier ces objets permet de mettre en évidence des similitudes au niveau des groupes et de différences entre les groupes.

Par extension, on peut attendre que les processus physiques en jeux dans un groupe sont les mêmes. On peut ainsi se focaliser sur des aspects globaux de la physique au sein des groupes. Les liens potentiels entre les groupes font également intervenir des processus physiques particuliers que l'on peut chercher à identifier.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

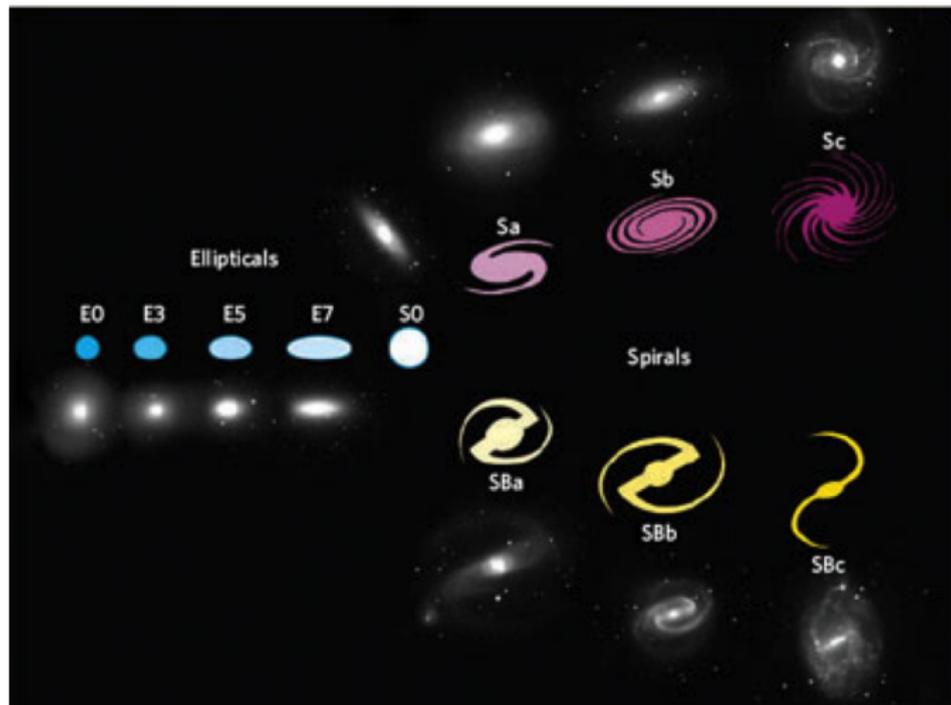
Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

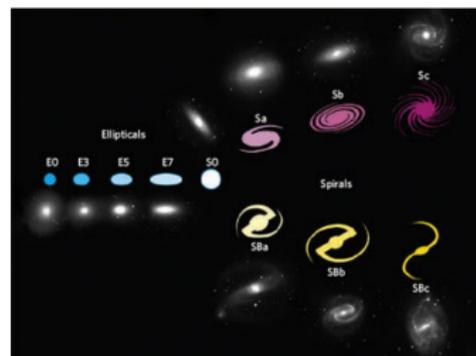
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

- ▶ Classification proposée par Hubble ~ 1936
- ▶ Deux types principaux
 - ▶ Les galaxies elliptiques
 - ▶ Les galaxies spirales



Il y a plusieurs sous-types pour chaque type principal

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

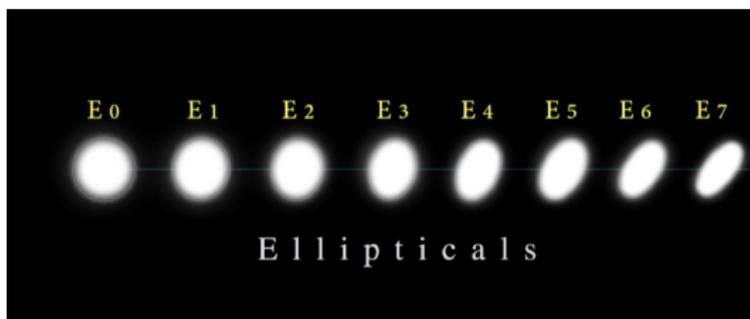
Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies



Les galaxies **elliptiques** sont notées E, de E0 à E7.

Le chiffre indique le degré d'ellipticité : plus il est grand, plus l'aplatissement est fort

⚠ il n'y a pas d'elliptique plus aplatie que E7

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

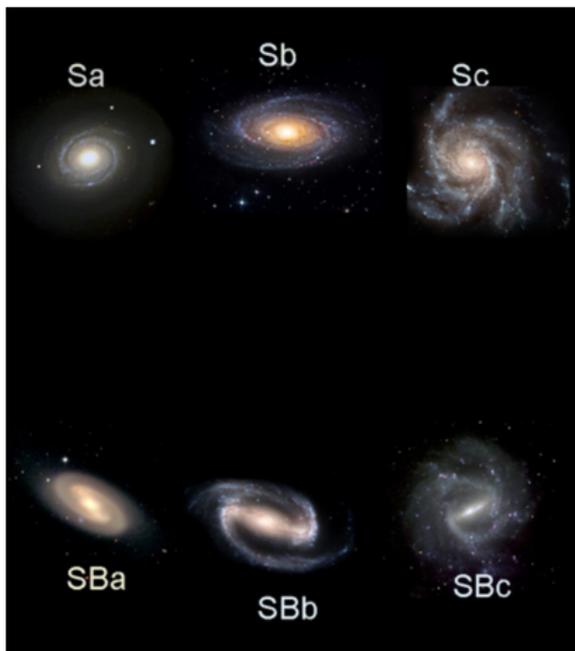
Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Les galaxies à disque ou **spirales** sont divisées en deux branches :

- ▶ les spirales Sa → Sd
- ▶ les spirales barrées SBa → SBd

les lettres a..d indiquent le type de spirales de fermées à ouvertes

Le bulbe devient également de moins en moins important de Sa → Sd



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Aux deux types principaux viennent s'ajouter deux autres types :

- ▶ les galaxies lenticulaires ou S0 qui sont parfois divisées en deux sous-types
- ▶ les galaxies irrégulières qui n'ont pas de forme particulière (exemple les nuages de Magellan)



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Pendant longtemps, cette séquence était considérée comme une séquence temporelle. On considérait que les galaxies se déplaçaient de la gauche vers la droite dans ce diagramme au cours de temps (des elliptiques vers les spirales). C'est pourquoi les elliptiques sont aussi appelées les galaxies **early type** et les spirales ou disques des galaxies **late type**.

Aujourd'hui nous savons que cela n'est pas le cas et la réalité est beaucoup plus complexe (voir le chapitre sur la formation hiérarchique des galaxies).

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

- ▶ Les étoiles → 90% de la masse visible
- ▶ Gaz
 - atomique (HI, He)
 - moléculaire (H₂, CO)
 - ionisé (formation stellaire H α)
 - poussières (molécules complexes)

⚠ gaz froid $T \sim 10\text{K}$

- ▶ Matière noire, $\approx 90\%$ de la masse dynamique

La composition exacte varie en fonction du type de galaxie.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Variation des propriétés le long de la séquence de Hubble

Formation et Evolution des Galaxies

A. Siebert

Définitions et Rappels

Classification des galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en fonction du type

Quelques ordres de grandeur

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des galaxies

The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The disposition of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at:
<http://sings.stsci.edu/>

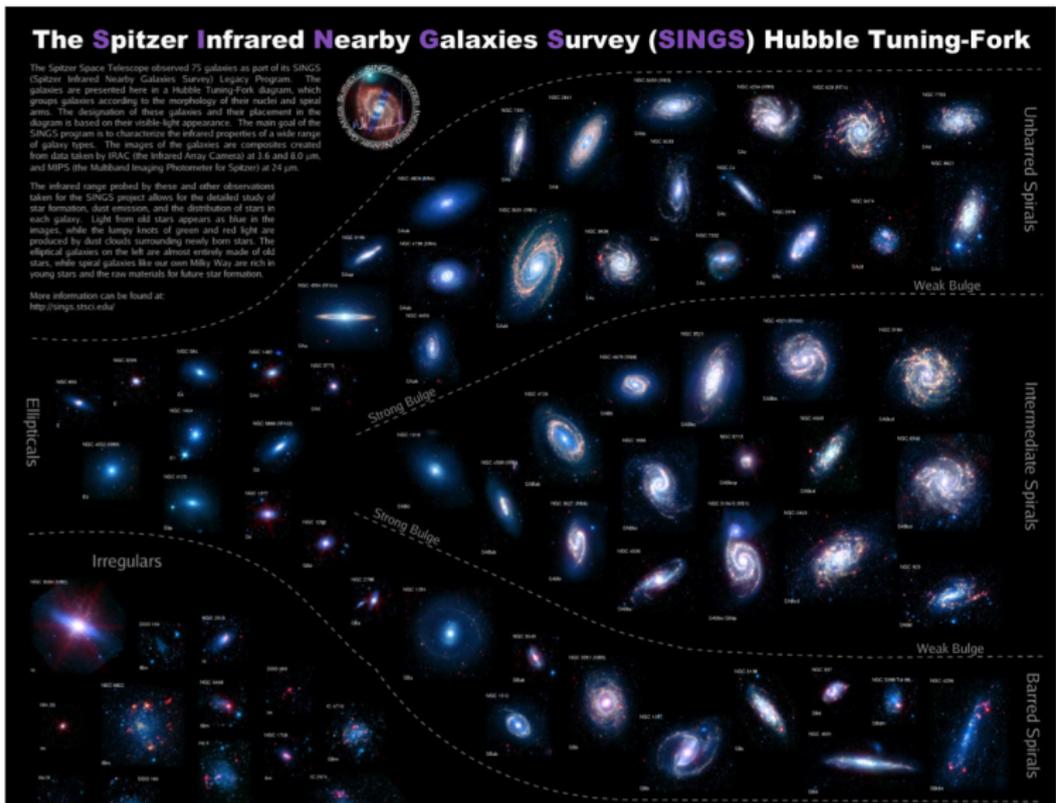
Ellipticals

Irregulars

Unbarred Spirals

Intermediate Spirals

Barred Spirals



Variation des propriétés le long de la séquence de Hubble

Définitions et Rappels

Classification des galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en fonction du type

Quelques ordres de grandeur

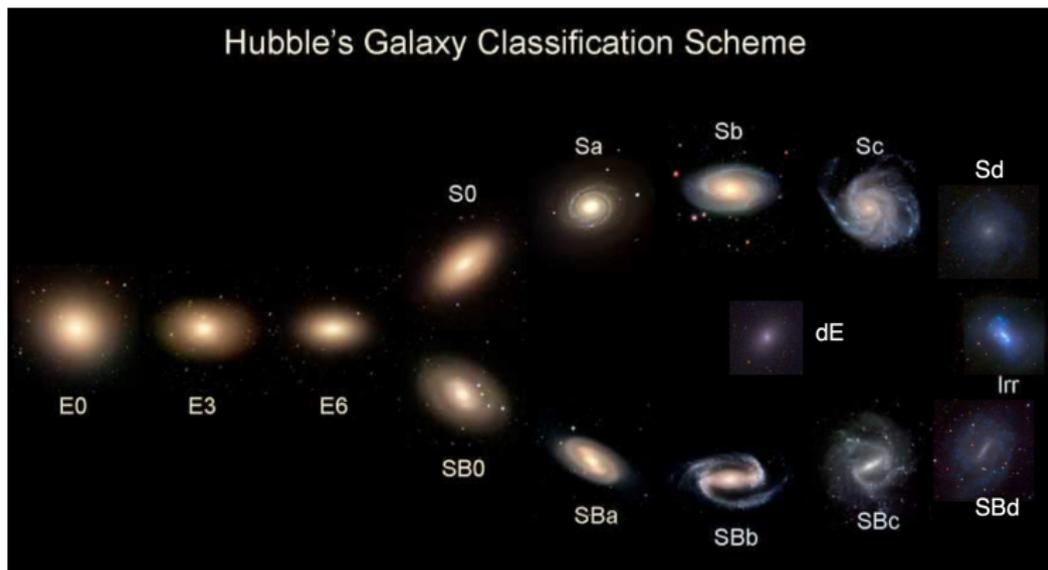
Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des galaxies



Variation des propriétés le long de la séquence de Hubble

On peut résumer l'évolution le long de la séquence de Hubble par :

| | | |
|------------------|---|-----------------------|
| E | → | Sd/Irr |
| support pression | → | support rotation |
| passive | → | active |
| rouge | → | bleue |
| gaz chaud | → | gaz froid/poussières |
| vieille | → | en cours de formation |

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

⚠ d'autres propriétés comme la masse, la luminosité, la taille ne sont pas corrélées avec le type morphologique !
→ il y a un large spectre de propriétés (dispersion) pour chaque type

⇒ la séquence de Hubble est superficielle car basée uniquement sur la morphologie, PAS sur les propriétés physiques

⇒ Cette évolution des propriétés est très certainement due à l'évolution de la SFH le long de la séquence.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Masses :

- ▶ Naine : $10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- ▶ Spirale type Voie Lactée $\sim 10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$
- ▶ Elliptiques $\sim 10^8 - 10^{13} M_{\odot}$

Taille \rightarrow dépend du type morphologique ET de l'environnement.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes
Composition et variation en
fonction du type
Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Répartition des galaxies dans l'univers local (De Vaucouleur 1963)

- ⇒ Spirales 63%
- ⇒ S0 21%
- ⇒ Elliptiques 13%
- ⇒ Irrégulières 5%

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Classifications courantes

Composition et variation en
fonction du type

Quelques ordres de
grandeur

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

- ⇒ Disques 25%
- ⇒ Sphéroïdes 73% \triangle inclu les bulbes des spirales
- ⇒ Irrégulières 2%

Cette répartition évolue avec le temps. Par exemple, à $z \sim 1.1$ (7.7 Gyr) les irrégulières représentaient 30% des galaxies.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

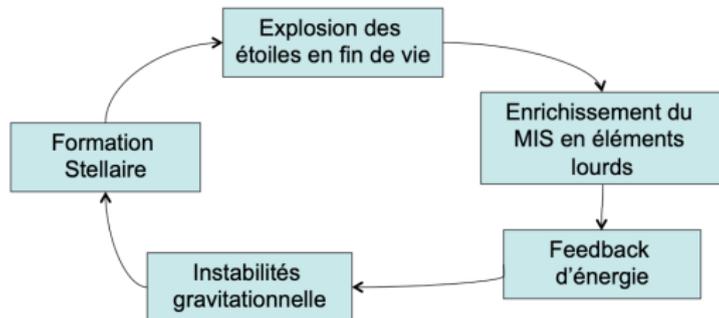
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Notions d'évolution chimique



l'évolution des galaxies est complexe : elle fait intervenir à la fois des processus de macrophysique (gravitation) et de microphysique (production d'éléments lourds)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

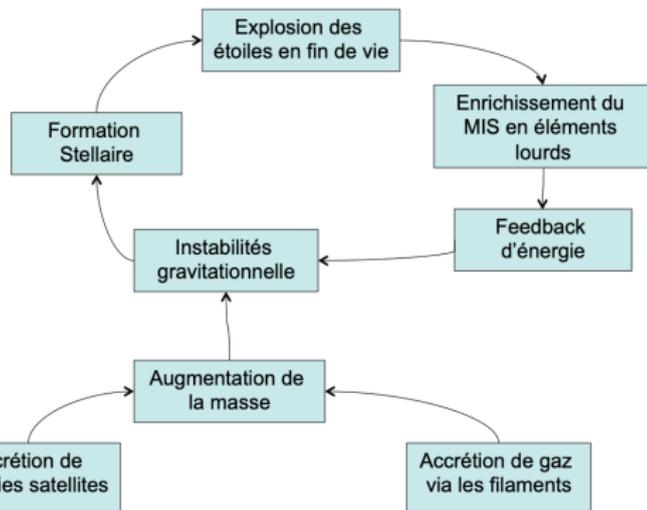
Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies



les échelles de temps des différents processus sont très différentes \Rightarrow modélisation de l'ensemble compliquée.

Définitions et Rappels

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Le cycle de matière dans les galaxies

Closed box model

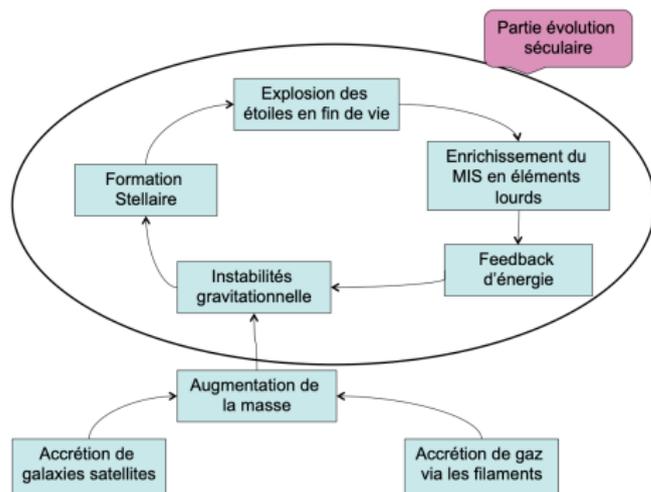
Un modèle plus complet

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la formation hiérarchique des galaxies



- les phases internes à la galaxie correspondent à l'évolution séculaire si les autres aspects peuvent être négligés.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

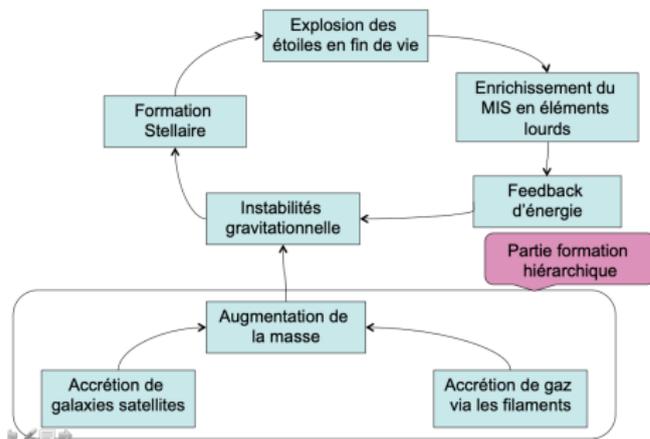
Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies



- Ces parties dépendent de l'environnement et de l'histoire de fusion de la galaxie : lien avec la formation hiérarchique (modèle cosmologique)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

En astrophysique on note la métallicité Z .

⚠ métallicité ne veut pas dire métaux à proprement parler.

En astrophysique, "métaux" désigne les éléments plus lourds que l'hélium (et parfois l'hydrogène).

La métallicité est un rapport de masse, c'est le rapport entre la masse des éléments lourds et la masse totale du gaz (MIS ou étoile)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

$$Z = \frac{M_h}{M_g}$$

où M_h est la masse en éléments lourds (h pour heavy) et M_g la masse du gaz.

Par exemple pour le soleil on a $Z_{\odot} = 0.02$. On utilisera dans ce chapitre m pour désigner les masses d'étoiles individuelles et M pour les masses des composantes (gaz, étoiles, éléments lourds...)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Ce modèle repose sur deux hypothèses fortes :

- ▶ recyclage instantané (pas de délai entre la formation des étoiles et l'injection d'éléments lourds dans le MIS)
- ▶ mélange instantané (les produits de la formation stellaire - éléments lourds- sont repartis uniformément et sans délai dans toute la boite)

Le modèle de boite fermée suppose également que l'accrétion de gaz ou autre est négligeable sur l'intervalle de temps où l'on étudie l'évolution de la boite.

Condition initiale : à $t = 0$ la matière est sous forme de gaz et $M_h = 0$.

La variation du contenu en métaux s'écrit

$$\delta M_h = p\delta M_s - Z\delta M_s = (p - Z)\delta M_s$$

Le premier terme à droite est la quantité de métaux formée par la génération d'étoiles de masse totale M_s .

p est le yield, la fraction de métaux retournée dans le MIS par la génération d'étoile (donné par la physique stellaire).

Le deuxième terme représente les métaux utilisés pour former la génération d'étoiles.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

On peut en déduire l'évolution de la métallicité Z

$$\delta Z = \delta \left(\frac{M_h}{M_g} \right) = \frac{1}{M_g} (\delta M_h - Z \delta M_g)$$

qui combinée à l'équation précédente et à la conservation de la masse ($\delta M_s = -\delta M_g$) permet de simplifier la relation en

$$\delta Z = -p \frac{\delta M_g}{M_g}$$

Si p reste constant pour chaque génération d'étoile, on peut intégrer et on obtient

$$Z(t) = -p \ln \left[\frac{M_g(t)}{M_g(0)} \right] + cste$$

Avec la condition initiale $M_h(0) = 0$, $cste = 0$ sinon $cste = Z(0)$.

Il y a une relation logarithmique entre la fraction de gaz et la métallicité Z .

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Une quantité qui peut être comparée aux observation est la distribution cumulée $M_{star} [< Z(t)]$ qui est la masse sous forme d'étoiles avec $Z < Z(t)$.

Cette quantité est directement

$$M_{star} [< Z(t)] = M_s(t) = M_g(0) - M_g(t).$$

On a donc

$$M_{star} [< Z(t)] = M_g(0) \left(1 - \exp \left(- \frac{Z(t) - Z(0)}{p} \right) \right).$$

Quand tout le gaz est utilisé

$$dM_{star}(Z) \propto \exp\left(-\frac{Z - Z(0)}{p}\right) dZ$$

où $dM_{star}(Z)$ est la masse d'étoiles avec $Z \in [Z, Z + dZ]$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

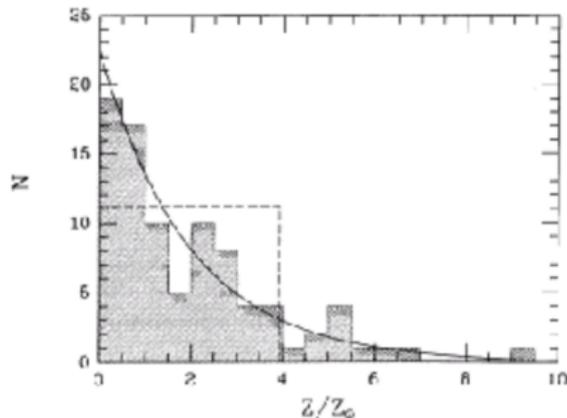
Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Ce résultat est très simplifié et beaucoup de détails de la physique sont cachés. Néanmoins, un modèle simple peut apporter des informations sur l'évolution de certaines populations. Exemple : le bulbe de la Voie Lactée



Rich (1990)

FIG. 8.—Differential abundance distribution of bulge giants compared to two limiting cases of the simple model of chemical evolution. *Solid line*: simple "closed box" model with complete gas consumption; $\langle z \rangle = 2.0 z_{\odot}$. *Dashed line*: Simple model, in the limiting case where a small fraction of the initial volume of gas is converted to stars, the remainder being lost from the system.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Résoudre le "vrai" problème est plus compliqué et en général, l'utilisation de méthodes numériques est nécessaire.

On peut néanmoins passer en revue les différents ingrédients et équations nécessaires pour modéliser l'évolution chimique d'une galaxie (ou une région de galaxie).

Lois de conservation :

$$M = M_s + M_g \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = f - e \quad (2)$$

$$\frac{dM_s}{dt} = \Psi - E \quad (3)$$

$$\frac{dM_g}{dt} = -\Psi + E + f - e \quad (4)$$

$$= \frac{dM}{dt} - \frac{dM_s}{dt}$$

M = masse totale

M_s = masse dans les étoiles

M_g = masse dans le gaz

f = taux d'infall

e = taux d'éjection

Ψ = taux de formation
stellaire

E = taux d'éjection de gaz

E est donné par l'équation :

$$E(t) = \int_{m_t}^{\infty} [m - \omega_m] \Psi(t - \tau_{MS}(m)) \Phi(m) dm \quad (5)$$

c'est une intégrale sur la masse des étoiles (sur la ZAMS).

- ▶ $m_t \rightarrow$ masse au turnoff au temps t
- ▶ $m - \omega_m \rightarrow$ masse éjectée (m = masse initiale sur la ZAMS et ω_m = masse du remanent)
- ▶ $\tau_m(m) \rightarrow$ temps de vie sur la séquence principale pour une masse ZAMS m
- ▶ $\Psi(t - \tau_{MS}(m)) \Phi(m) \rightarrow$ taux de formation de masse m au temps $t - \tau_{MS}(m) =$ taux de décès à t

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

L'équation (5) donne la masse totale de gaz éjectée. Il faut également déduire la masse éjectée en éléments lourds (métaux).

Pour les métaux, l'équation (4) se réécrit

$$\frac{dZ M_g}{dt} = -Z\Psi + E_Z + Z_f \cdot f - Z e \quad (6)$$

avec $Z_f \cdot f$ l'infall des métaux et E_Z le taux d'éjection des métaux donné par

$$E_Z(t) = \int_{m_t}^{\infty} [(m - \omega_m)Z(t - \tau_{MS}(m)) + m \cdot p_{Z_m}] \Psi(t - \tau_{MS}(m)) \Phi(m) dm \quad (7)$$

où $m \cdot p_{Z_m}$ représente les métaux produits par une étoile de masse m qui s'est formée à la métallicité Z .

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueLe cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Pour résoudre ces équations, il faut connaître en détail l'évolution des étoiles en fonction de la masse initiale m .

- + l'histoire de la formation stellaire
- + la fonction de masse initiale.

Il manque en plus les effets "dynamiques" car la formation stellaire est localisée spatialement dans les galaxies et les instabilités dans les disques de galaxie engendrent des mouvements à grande échelle du gaz et des étoiles (churning et blurring).

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

On peut simplifier les équations et on doit retrouver l'approximation de boîte fermée si l'on considère l'hypothèse de mélange instantané. Pour simplifier les calculs, on définit deux quantités

$$R = \int_{m1}^{\infty} (m - \omega_m) \Phi(m) dm \quad (8)$$

qui est la masse renvoyée dans le MIS par masse d'étoile formée, et

$$y = \frac{1}{1 - R} \int_{m1}^{\infty} m \cdot p(\tau_{MS}) \Phi(m) dm \quad (9)$$

qui est un yield donnant la masse de métaux produits par masse de rémanent. $m1$ est la masse au turnoff d'une population stellaire formée à t_1 au temps t . Les intégrales (8) et (9) sont sur les étoiles mortes.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueLe cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Avec ces définitions $(1 - R)M$ représente la masse des rémanents et le gaz éjecté est donné par $R.M$.

Si maintenant on ajoute le recyclage instantané alors $\Psi(t - \tau_{MS}) \approx \Psi(t)$ et si l'on considère que l'IMF ne dépend pas de t (e.g. $R = cste$) alors

$$(5) \Rightarrow E(t) = R.\Psi(t)$$

$$(7) \Rightarrow E_Z(t) = R.Z(t)\Psi(t) + (1 - R)y(t)\Psi(t)$$

et donc (6) devient $\frac{dZ.M_g}{dt} = (1 - R)(-Z + y)\Psi + Z_f.f - Z.e$

Si l'on combine (5) et (3) on obtient

$$\frac{dM_s}{dt} = (1 - R)\Psi(t)$$

et (5) et (4)

$$\frac{dM_g}{dt} = -(1 - R)\Psi(t) + f - e$$

$$+(6) \Rightarrow M_g \frac{dZ}{dt} = (1 - R)y(t)\Psi(t) + (Z_f - Z)f + e.Z.$$

On retrouve l'approximation de boîte fermée si $f = e = 0$ et avec le bon choix de conditions initiales. CQFD.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Le cycle de matière dans les
galaxies

Closed box model

Un modèle plus complet

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
problème de la matière noire

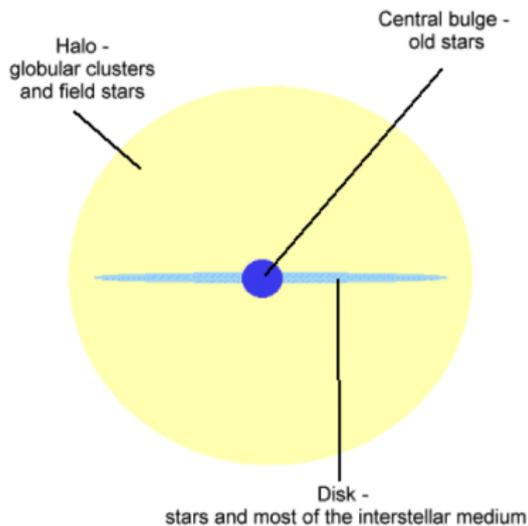
Structure des disques de
galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques



La structure/morphologie d'une galaxie spirale (ou disque) se décompose en trois composantes principales

- ▶ le disque : support rotation
- ▶ le halo stellaire : support pression
- ▶ le bulbe : support pression, pas présent dans toutes les galaxies S

Définitions et Rappels

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Morphologie et propriétés photométriques

Courbes de rotations et propriétés dynamiques

Galaxies elliptiques

Galaxies à barres

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

Introduction à la cosmologie

Il existe plusieurs types de spirales :

Spirales "grand design"



Spirales flocculentes



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Structure et dynamique
interarmes

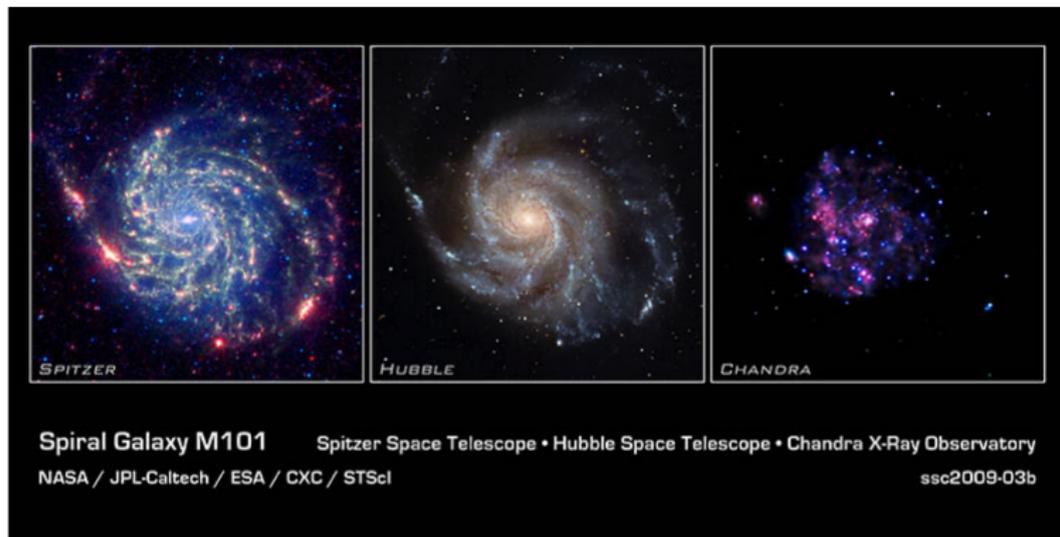
Structure et dynamique
des galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

⚠ Les bras spiraux dans les étoiles et dans le gaz ne sont
forcément reliés



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Galaxies elliptiques
et spirales
barrées

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

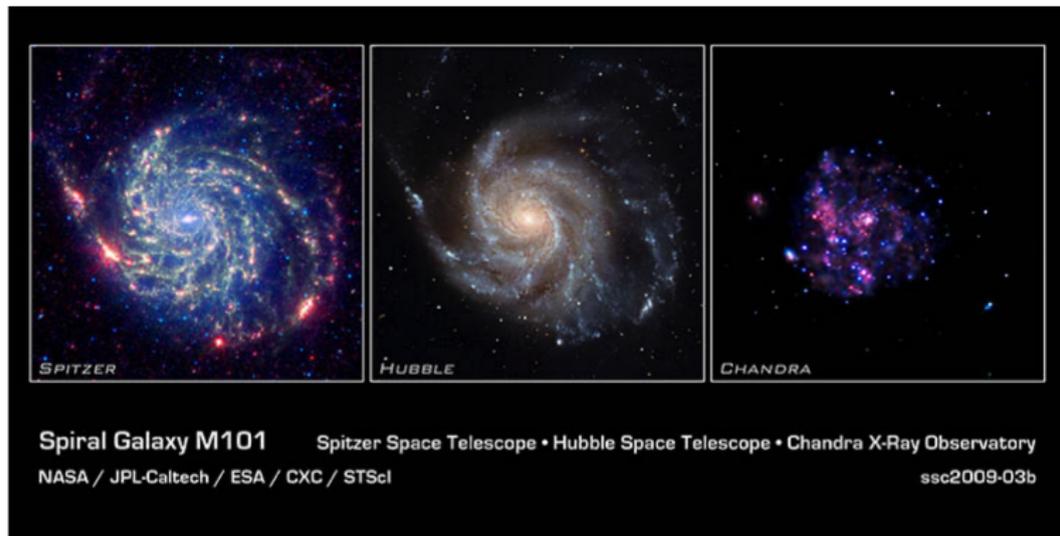
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Morphologie d'une galaxie spirale

- ▶ gaz → population collisionnelle
- ▶ étoiles → population non-collisionnelle

⇒ ce ne sont pas les mêmes équations qui régissent le mouvement + masses très variables



Les galaxies spirales sont des objets complexes

- apparences diverses
- structures fines diverses
 - ▶ ratio bulbe/disque
 - ▶ structure et nombre de bras spiraux
- populations stellaires diverses (de vieille à très jeune)
- propriétés dynamiques variées
 - ▶ support pression (bulbe, halo)
 - ▶ support rotation (disque)
- présence de gaz

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

La Voie Lactée et
les galaxies proches

La Voie Lactée et
les galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Morphologie d'une galaxie spirale

Formation et Evolution des Galaxies

A. Siebert

Définitions et Rappels

Classification des galaxies

Notions d'évolution chimique

Galaxies spirales et stabilité des disques galactiques

Morphologie et propriétés photométriques

Courbes de rotation et

la Voie Lactée

la Voie Lactée

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires

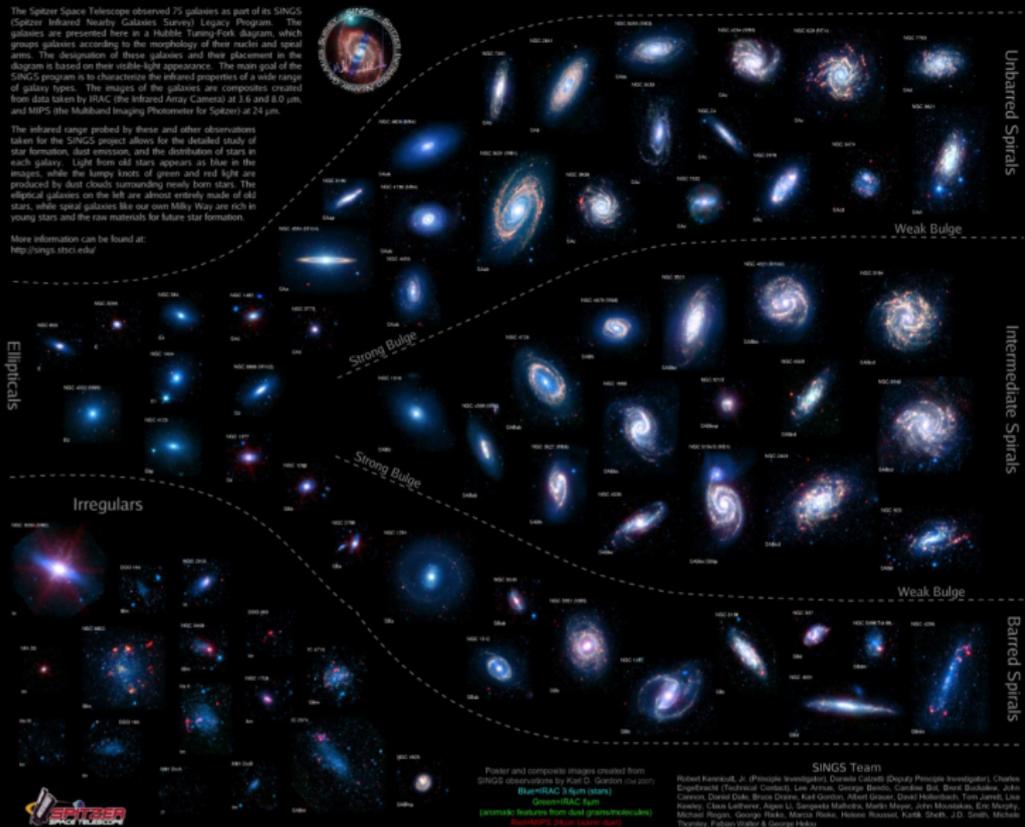
Introduction à la

The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) Hubble Tuning-Fork

The Spitzer Space Telescope observed 75 galaxies as part of its SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) Legacy Program. The galaxies are presented here in a Hubble Tuning-Fork diagram, which groups galaxies according to the morphology of their nuclei and spiral arms. The distribution of these galaxies and their placement in the diagram is based on their visible-light appearance. The main goal of the SINGS program is to characterize the infrared properties of a wide range of galaxy types. The images of the galaxies are composites created from data taken by IRAC (the Infrared Array Camera) at 3.6 and 8.0 μm , and MIPS (the Multiband Imaging Photometer for Spitzer) at 24 μm .

The infrared range probed by these and other observations taken for the SINGS project allows for the detailed study of star formation, dust emission, and the distribution of stars in each galaxy. Light from old stars appears as blue in the images, while the lumpy knots of green and red light are produced by dust clouds surrounding newly born stars. The elliptical galaxies on the left are almost entirely made of old stars, while spiral galaxies like our own Milky Way are rich in young stars and the raw materials for future star formation.

More information can be found at: <http://sings.stsci.edu/>



Render and composite images created from SINGS observations by Reid D. Gordon (lead author), www.stsci.edu
 Blue+IRAC 3 μm (stars)
 Green+IRAC 8 μm
 (primarily features from dust (protoplanetular))
 Red+MIPS 24 μm (star-forming)

SINGS Team

Robert Kennicutt, Jr. (Principal Investigator), Daniela Calzetti (Deputy Principle Investigator), Charles Engelbracht (Technical Contact), Eric Armijo, George Berrin, Catherine Bot, Brent Bourdieu, John Casper, Daniel Dale, Brian Daines, Karl Gebert, Robert Leroy, Daniel Malinich, Tony Jarrett, Lisa Hawley, Chaeun Lee, Arjen U. Sampaio Martins, Mark Meyer, Afra Moshir, Eric Murphy, Michael Regan, George Rieke, Adrian Rieke, Hironori Iwamoto, Kirk Smith, J.D. Smith, Melissa Thumby, Fabian Walter & George Helou



Le disque :

- ▶ en général riche en métaux et en gaz
- ▶ orbites quasi-circulaires avec peu de mouvement désordonné
- ▶ il peut y avoir plusieurs disques !
 - ▶ disque jeune (mince) : jeune, formant des étoiles, dynamiquement très froid
 - ▶ disque épais : plus vieux, passif, rotation ralentie avec plus de mouvements désordonnés

Le bulbe :

- ▶ de pauvre à très riche en métaux pour les étoiles
- ▶ densité stellaire grande
- ▶ dynamiquement, ce sont les mouvements désordonnés qui dominant

- ▶ Dans 50% des cas, le bulbe contient une barre galactique
 - ▶ étoiles vieilles dominant dans les barres
 - ▶ dynamiquement : rotation solide

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
modèles de rotation

Galaxies à barres et
galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Le halo stellaire :

- ▶ population stellaire vieille, pauvre en métaux
- ▶ densité très faible
- ▶ un peu de gaz chaud si présent
- ▶ dynamiquement, peu ou pas de rotation. Mouvements désordonnés dominants.

Propriétés le long de la séquence de Hubble

| | S0 - Sa | Sb - Sc | Sd - Sm |
|----------------|-----------------------------------|----------|-------------------------------------|
| Bras spiraux | absents/très enroulés | | ouverts |
| Couleur | rouge (late G*) | early G* | bleue ; late F* |
| Etoiles jeunes | peu | | beaucoup |
| Contenu en gaz | peu | | beaucoup |
| Luminosité (B) | $1 - 4 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ | | $< 0.1 - 2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ |
| Masse | $0.5 - 3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ | | $< 0.2 - 1 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ |
| Rotation | rapide | | lente |

Distribution radiale :

L'intensité lumineuse I suit une loi exponentielle.

La brillance de surface (densité de flux par unité d'angle solide en mag/asec²) suit une loi linéaire

$$I(R) = I(0) \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) \text{ ou } \mu = \mu(0) - y\left(\frac{R}{h_R}\right)$$

avec $\mu(0)$, la brillance de surface centrale (typiquement de l'ordre de 21-22 mag/asec²), et h_R est la longueur d'échelle (entre 1 et 10 kpc) . y est un paramètre normalement fixé.

⚠ $\mu(0)$ n'est pas mesuré directement, principalement à cause de la présence du bulbe \Rightarrow on doit extrapoler la relation observée à $R = 0$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

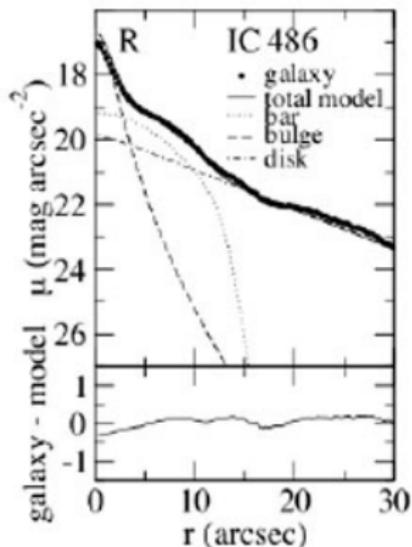
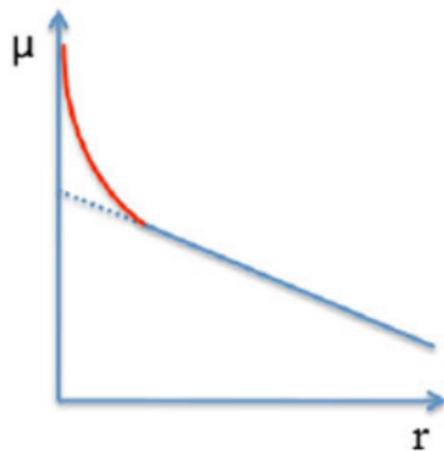
Galaxies de rotation et

Galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité de matière

Galaxies à rotation et
galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
galaxie

On peut également chercher à modéliser les deux populations en même temps

$$\mu_{bulbe} = \mu_{0b} + x \left[\left(\frac{R}{r_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right]$$

$$\mu_{disque} = \mu_{0d} - y \left(\frac{R}{h_R} \right)$$

et $\mu = \mu_{disque} + \mu_{bulbe}$.

La distribution verticale suit également une loi exponentielle :

$$I_R(z) \propto \exp\left(-\frac{|z|}{h_z}\right)$$

où h_z est appelé la hauteur d'échelle.

⇒ la loi de densité sous-jacente est donc de la forme

$$\rho(R, z) \propto \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) \exp\left(-\frac{|z|}{h_z}\right)$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Galaxies irrégulières et
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

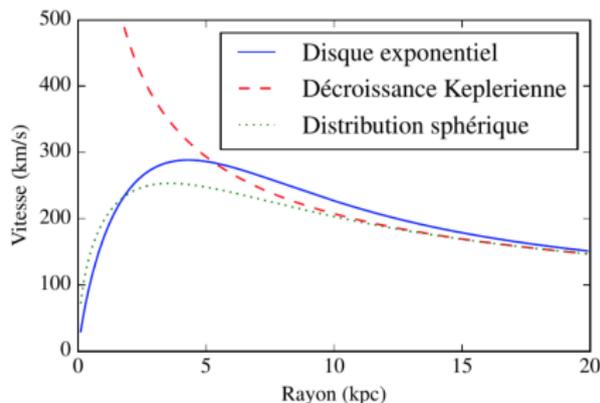
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Courbe de rotation des galaxies spirales

Le disque domine la distribution lumineuse et également la masse dans les galaxies spirales.

La courbe de rotation (vitesse de rotation de l'orbite circulaire en fonction du rayon) doit donc être proche de la courbe attendue pour un disque exponentiel



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
problème de la matière noire

Galaxies elliptiques et
sphériques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

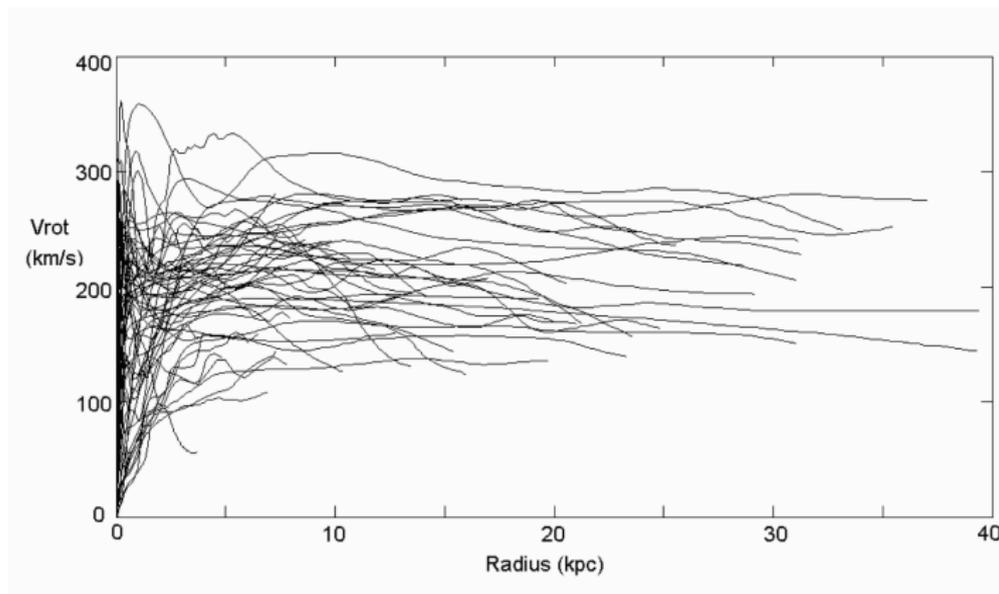
Introduction à la
cosmologie

Courbe de rotation des galaxies spirales

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Voici des courbes de rotation observées à partir de
l'hydrogène neutre (HI 21cm) :



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
problème de la matière noire

Galaxies à barres et
galaxies

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Ces courbes de rotation ne correspondent pas aux attentes pour un disque exponentiel

- ▶ on n'observe pas la décroissance après le rayon optique (le disque de gaz est plus grand que le disque stellaire et peu massif, on devrait observer une décroissance)
- ▶ les courbes sont stables à grande échelle \Rightarrow ca ne peut pas être une sous-estimation de la masse du gaz

La vitesse de rotation est liée à la masse et les courbes de rotations sont plates pour R grand. Qu'est-ce que cela nous apprend sur la distribution de masse dans les galaxies ?

La force d'attraction gravitationnelle est donnée par $F = -\frac{d\Phi}{dr} = -\frac{GM}{r^2}$, avec Φ le potentiel gravitationnel.

L'accélération centripète est quant-à elle donnée par $a_c = \frac{v_{\perp}^2}{r}$.

L'orbite circulaire est atteinte quand les deux accélérations se compensent $a_c = -F$

$$\Rightarrow v_c^2 \equiv v_{\perp}^2 = r|F| = r \frac{d\Phi}{dr} = \frac{GM(r)}{r}$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
problème de la matière noire

Galaxies elliptiques et
sphériques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

$$v_c^2 = \frac{GM(r)}{r}$$

pour que la courbe de rotation soit plate à grande échelle :

$M(r)$ doit croître comme r .

⇒ ρ doit décroître comme r^{-2} ou de manière équivalente.

Si l'on combine toute la matière visible, il manque de la masse pour expliquer ça !

Courbe de rotation des galaxies spirales

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

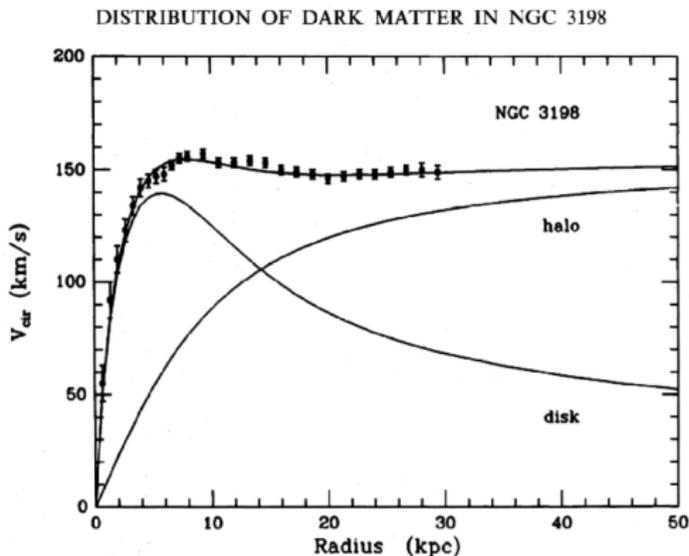
Courbes de rotations et
problème de la matière noire

Galaxies elliptiques et
sphériques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

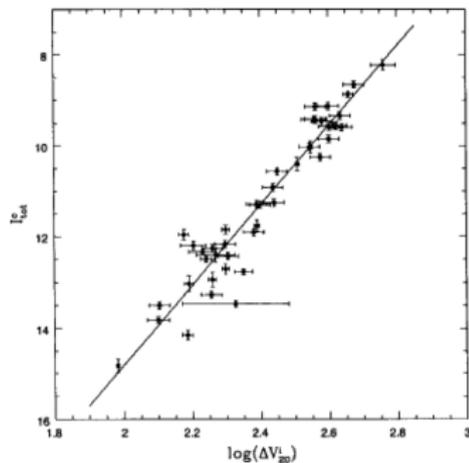
Introduction à la



~ 90% de la masse est cachée ! **C'est la matière noire.**

Certaines propriétés des galaxies spirales sont corrélées avec un $\log(\Delta V_{20})$ correlation très fine. La relation la plus "ancienne" et plus importante est la relation de Tully-Fisher (1977).

Un exemple de cette relation pour les galaxies spirales de l'amas de Fornax est montré ci-contre.



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
profil de densité

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Relation de
Faber-Jackson

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

La relation de Tully-Fisher dit

$$M = b \log W + c$$

où M est la magnitude absolue de la galaxie et W est une mesure de la rotation à partir de la raie H1 de l'hydrogène.

$$\Leftrightarrow L \propto V_{c,max}^4$$

où L est la luminosité et $V_{c,max}$ est la vitesse de rotation maximale en fonction de R .

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriquesCourbes de rotation et
profil de densitéRelation fondamentale :
Tully-FisherGalaxies à
rotationGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
cosmologie

Pourquoi cette relation est-elle surprenante ?

→ cette relation est fine (dispersion $\sim 10 - 15\%$)

→ le fait qu'elle couvre une large gamme de magnitude absolue (donc de masse) indique que les processus physiques sont régulés

⇒ connection entre le halo sombre ($V_{c,max}$ est principalement du au halo) et le produit intégré de la formation stellaire (la luminosité vient des étoiles)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Galaxies à faible
redshift

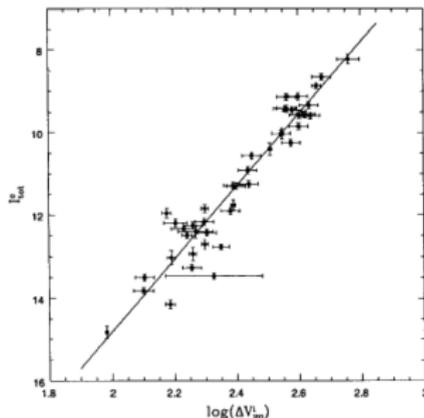
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

C'est la très faible dispersion autour de la relation moyenne, plus que la corrélation, qui indique une régulation des processus physiques.

→ Si l'on tient compte de la dispersion observée de tous les paramètres physiques pour les processus intervenant dans la relation de TF, la dispersion devrait être beaucoup plus grande



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
profil de densité de rotation

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Galaxies à barres et
centrales

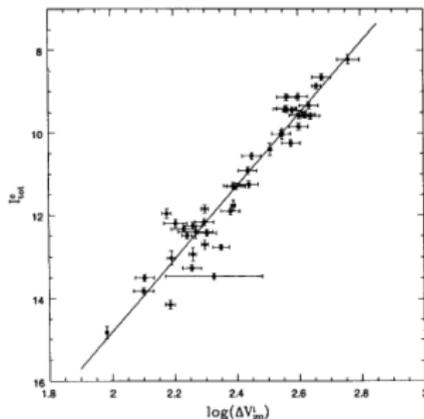
Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

C'est la très faible dispersion autour de la relation moyenne, plus que la corrélation, qui indique une régulation des processus physiques.

⇒ Le halo de matière noire (structure à grande échelle) influence le processus de formation stellaire (à petite échelle) !



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Galaxies elliptiques
et stabilité des
disques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Pour expliquer la relation moyenne, on se rappelle que les disques de galaxies spirales ont un profil exponentiel

$$I(R) = I(0) \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right)$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow L &\propto \int_0^\infty 2\pi R I(0) \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) dR \\ &\propto I(0) h_R^2.\end{aligned}$$

Si la masse suit la luminosité alors

$$M(R) \propto L(R) \propto \int_0^R 2\pi R' I(0) \exp\left(-\frac{R'}{h_R}\right) dR'$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriquesCourbes de rotation et
profil de la matière noireRelation fondamentale :
Tully-FisherGalaxies à
rotationGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
galactique

Ensuite, on se rappelle que

$$v_c^2 = \frac{GM(R)}{R}$$

et l'intégrale de l'exponentielle se calcule et donne

$$\int_0^R R' \exp\left(-\frac{R'}{h_R}\right) dR' = h_R \left[h_R - \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) (h_R + R) \right],$$

donc

$$v_c^2(R) \propto \left[\frac{h_R}{R} - \frac{h_R}{R} \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) - \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) \right] \times h_R$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Galaxies à
rotation

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

On cherche la vitesse de rotation maximale et l'expression entre crochets atteint la valeur max à $R \sim 1.8 \times h_R$.

$$\text{Donc } v_{c,max} \propto \sqrt{h_R}$$

$$\Rightarrow \boxed{L \propto v_{c,max}^4}$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotations et
problème de la matière noire

Relation fondamentale :
Tully-Fisher

Galaxies à courbes de
rotation

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

On cherche la vitesse de rotation maximale et l'expression entre crochets atteint la valeur max à $R \sim 1.8 \times h_R$.

$$\text{Donc } v_{c,max} \propto \sqrt{h_R}$$

$$\Rightarrow \boxed{L \propto v_{c,max}^4}$$

⚠ on a supposé $I(0) = cste$ et $M/L = cste$! Ceci est faux, le rapport M/L dépend des propriétés des populations stellaires des galaxies et varie d'une galaxie à une autre, de même $I(0)$ ne peut pas être le même pour toutes les galaxies. L'origine de la relation TF est donc plus compliquée.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et

Relation fondamentale :
Tully-FisherGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la

Sous l'action de la gravité, les régions de l'espace doivent s'effondrer (chute libre si pas d'accélération autre que gravité).

Les disques de galaxies spirales sont à priori stables (si instables, on ne devrait pas en observer autant).

Quels sont les mécanismes sous-jacents ?

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité rotationnel

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Pour les systèmes gravitationnels, l'instabilité basique est l'instabilité de Jeans (1929).

On considère une distribution d'étoiles presque homogène qui possède une petite région surdense de taille L et de densité ρ .

Cette surdensité doit s'effondrer sous l'effet de la gravité si les mouvements aléatoires des étoiles ne permettent pas aux étoiles de quitter la région avant que celle-ci ne s'effondre.

L'expression physique de cette assertion est obtenue de la manière suivante.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Le temps d'effondrement est obtenu en prenant une étoile au repos sur les bords de la surdensité.

L'accélération gravitationnelle subie par cette étoile à cause de la surdensité est simplement GM/L^2 où M est la masse de la surdensité

$$M = \frac{4}{3}\pi L^3 \rho.$$

Par ailleurs, le temps nécessaire à l'étoile pour tomber au centre de la surdensité (temps de chute libre) est la moitié de la période orbitale Keplerienne pour une étoile orbitant à $L/2$ un objet de masse M :

$$t_{ff} \text{ où } t_{coll} = \frac{1}{2} 2\pi \frac{(L/2)^{3/2}}{\sqrt{GM}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriquesCourbes de rotation et
profil de la rotationStabilité des disques de
galaxieGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
cosmologie

D'un autre coté, le temps nécessaire pour qu'une étoile sorte de la région surdense est donné simplement par la relation

$$t_{esc} = L/v_* = L/\sigma,$$

où v_* est une vitesse caractéristique des étoiles dans le milieu, ici σ qui est la dispersion de vitesse (largeur de la fonction Gaussienne qui approxime la distribution des vitesses des étoiles).

On notera que le temps de chute libre (ou d'effondrement) ne dépend pas de la taille de la région, alors que le temps d'échappement croit linéairement avec L .

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

- ▶ Une région sera stable si $t_{esc} < t_{ff}$
- ▶ Inversement une région sera instable si $t_{esc} > t_{ff}$
- ▶ Une taille critique peut être estimée en prenant la limite de stabilité $t_{ff} = t_{esc}$. C'est la longueur de Jeans

$$L_J = \sqrt{\frac{3\pi}{32} \frac{\sigma^2}{G\rho}}$$

⇒ seules les régions surdenses de taille $L > L_J$ sont sujettes à l'instabilité de Jeans, les régions plus petites sont protégées par les mouvements aléatoires des étoiles qui empêchent l'effondrement.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
profil de densité

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

Les calculs précédents sont pour le cas général à trois dimensions. Les disques de galaxie étant très fins, on les approxime souvent par un cas à deux dimensions où la densité ρ est remplacée par la densité de colonne $\Sigma(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(R, z) dz$.

Les relations précédentes (avec le même raisonnement) sont

$$M = \pi L^2 \Sigma$$
$$t_{ff} = \sqrt{\frac{\pi}{8} \frac{L}{G \Sigma}}$$
$$L_J = \frac{\pi}{8} \frac{\sigma^2}{G \Sigma}$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriquesCourbes de rotation et
problème de la matière noireStabilité des disques de
galaxieGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
cosmologie

Si on considère les mouvements d'ensemble dans le disque, il faut ajouter les accélérations d'entraînement qui dépendent du rayon.

Tout d'abord, il y a les forces de marée ou de cisaillement dues à la rotation du disque (la région de taille $\Delta R \equiv L$ subit un cisaillement car la partie externe tourne moins vite que la partie interne) :

$$F_{tid} = \frac{d\Omega^2 R}{dR} \Delta R \equiv \kappa^2 L.$$

Ensuite la force de gravité internes de la région sur ΔR

$$F_G = \frac{G\Sigma\pi\Delta R^2}{\Delta R^2} \equiv \frac{G\Sigma\pi L^2}{L^2} = G\pi\Sigma.$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesMorphologie et propriétés
photométriquesCourbes de rotation et
profil de densitéStabilité des disques de
galaxieGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la

Pour que la région soit stable, la force de cisaillement due à la rotation doit être supérieure à la force de gravité de la région :

$$F_{tid} > F_G$$

On peut donc définir une longueur critique de stabilité pour la rotation $L_{crit} \sim \frac{\pi G \Sigma}{\kappa^2}$ ou de façon équivalente une dispersion de vitesse critique $\sigma_{crit} = \frac{\pi G \Sigma}{\kappa}$. Les forces de marées détruisent donc toute structure plus grande que L_{crit} .

- ▶ Si $L > L_{crit}$ la région est stable et ne peut pas s'effondrer à cause du cisaillement induit par la rotation différentielle du disque.
- ▶ Si $L < L_{crit}$ la région est instable et la rotation différentielle ne pourra pas empêcher l'effondrement.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la

Pour que toutes les régions soient stables il faut que

$$L_{crit} < L_J$$

ou de façon équivalente

$$\sigma > \sigma_{crit} = \frac{\pi G \Sigma}{\kappa}$$

Le critère de Toomre (1964) dit que toute région avec le paramètre $Q = \frac{\sigma}{\sigma_{crit}} > 1$ est stable.

$$Q = \frac{\kappa \sigma}{\pi G \Sigma} > 1$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Morphologie et propriétés
photométriques

Courbes de rotation et
problème de la matière noire

Stabilité des disques de
galaxie

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
cosmologie

$$Q = \frac{\kappa \sigma}{\pi G \Sigma} > 1$$

Influence des composantes :

- Masse du disque : $\Sigma \nearrow \Rightarrow$ déstabilise
- Fraction de gaz : abaisse $\langle \sigma \rangle \Rightarrow$ déstabilise
- Bulbe : augmente Ω et κ sans modifier $\Sigma \Rightarrow$ stabilise
- Matière noire : idem que pour un bulbe si dans le halo

Galaxies elliptiques et notions de dynamique galactique

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protonucléaires

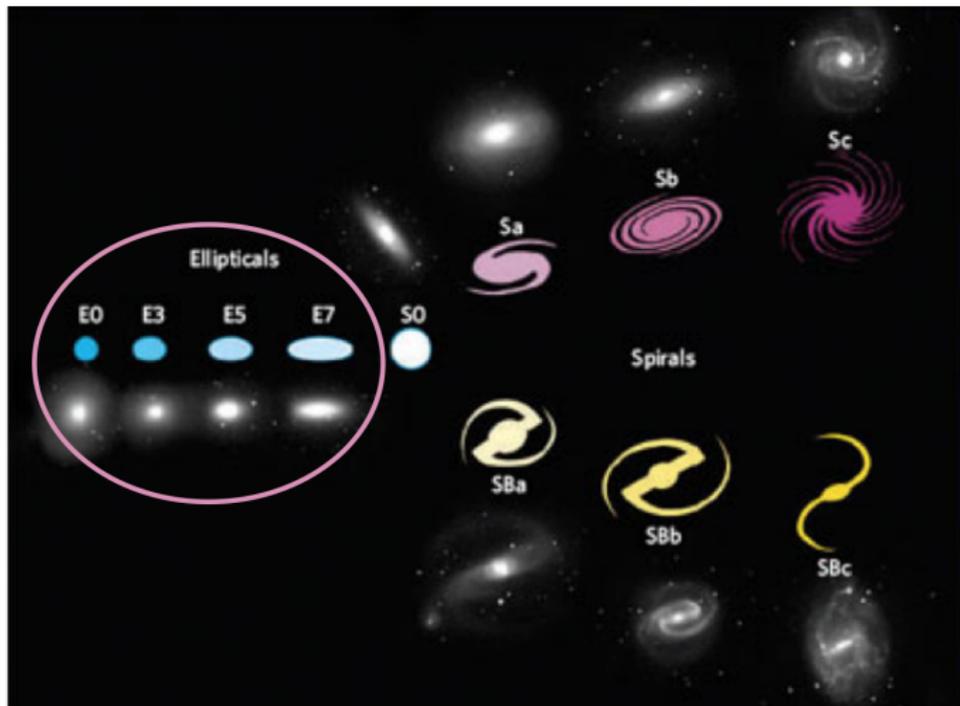
Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Le profil radial de lumière des galaxies elliptiques peut être représenté par la loi de de Vaucouleurs :

$$I(R) = I(0) \exp(-k R^{1/4})$$

$$\Leftrightarrow I(R) = I_e \exp\left(-7.67 \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/4} - 1\right]\right)$$

où R_e est le rayon de mi-luminosité défini par

$$\int_0^{R_e} 2\pi r I(r) dr = \frac{1}{2} \int_0^\infty 2\pi r I(r) dr \quad (10)$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueMorphologie et propriétés
photométriquesLes galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Un autre profil utilisé est le profil de Sersic (1963, plus général) :

$$I(R) = I(0) \exp\left(-\left(\frac{R}{\alpha}\right)^{1/n}\right)$$

où $I(0)$ est l'intensité centrale, α une longueur d'échelle (rayon où l'intensité diminue d'un facteur e^{-1}) et n est le paramètre de forme (indice de Sersic).

Ce profil est plus général car il permet de décrire presque tous les profils :

- ▶ galaxies elliptiques
 $1.5 < n < 20$
- ▶ pseudo-bulbes
 $1 < n < 2$
- ▶ disques $n \sim 1$
- ▶ bulbe $1.5 < n < 10$
- ▶ barre $n \sim 0.5$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

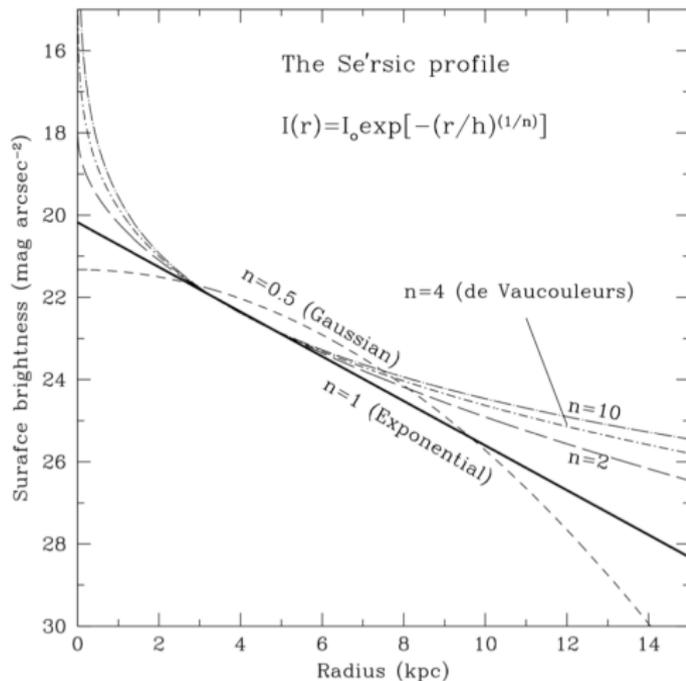
Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

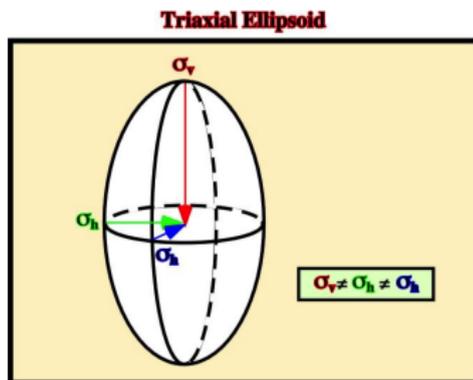
Introduction à la
formation

La morphologie des galaxies elliptiques n'est pas aussi simple que ça.

Ce sont des ellipsoïdes triaxiaux.

Les isophotes (courbes d'égale intensité) sont elliptiques.

Les demi-axes suivent $a \geq b \geq c$.



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Dans la classification de Hubble, les elliptiques sont notées En .

$n = 10\varepsilon$ avec $\varepsilon = 1 - \frac{b}{a}$. ε est appelé l'ellipticité.

⚠ L'ellipticité mesurée n'est pas intrinsèque, elle dépend de l'observation car le profil 3D intrinsèque est projeté en 2D.

Trois classes de profils possibles :

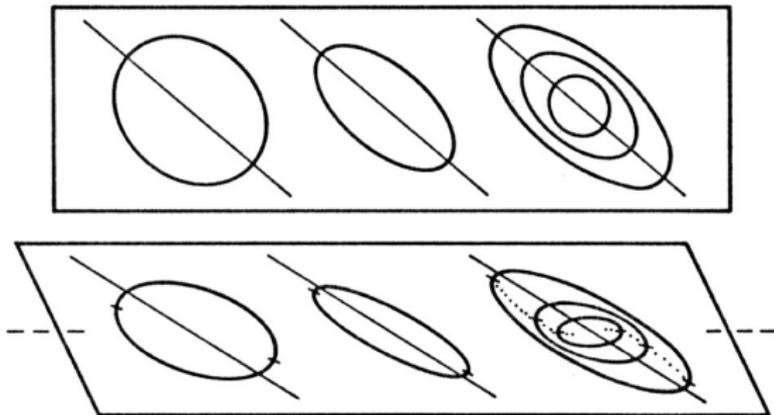
- ▶ $a = b > c \Rightarrow$ oblong
- ▶ $a > b = c \Rightarrow$ prolat
- ▶ $a > b > c \Rightarrow$ triaxial

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueMorphologie et propriétés
photométriquesLes galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Toutes les galaxies elliptiques sont triaxiales avec un rapport d'axe "typique" $a : b : c \sim 1 : 0.95 : 0.65$.



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

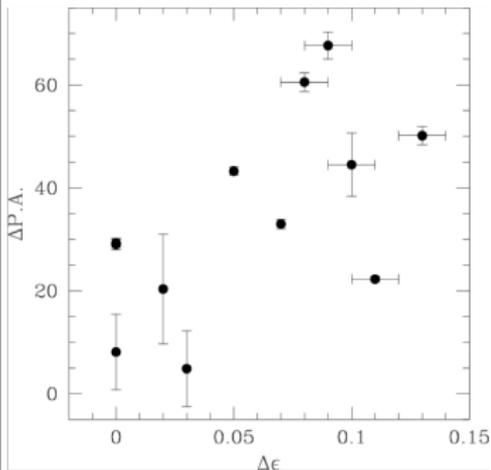
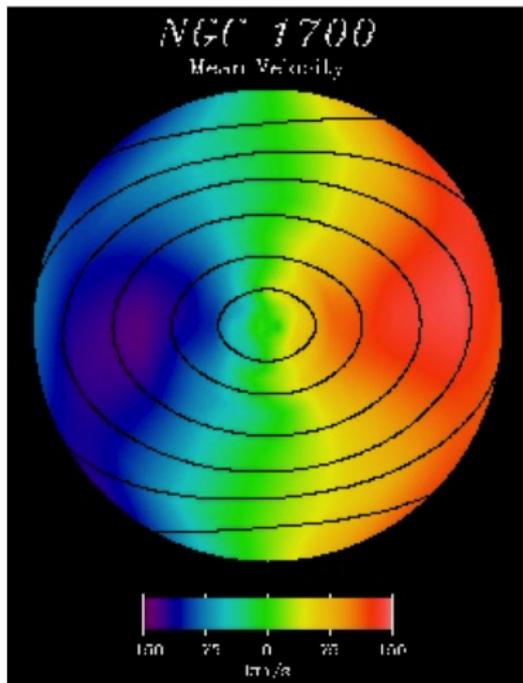
Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

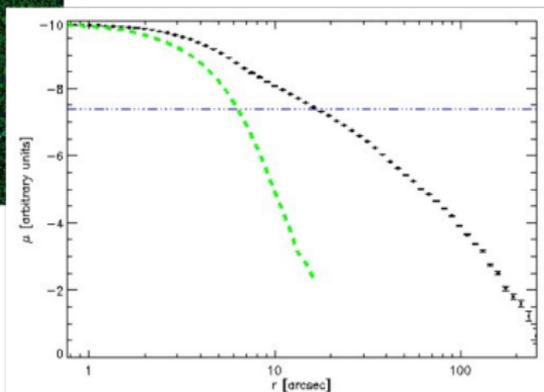
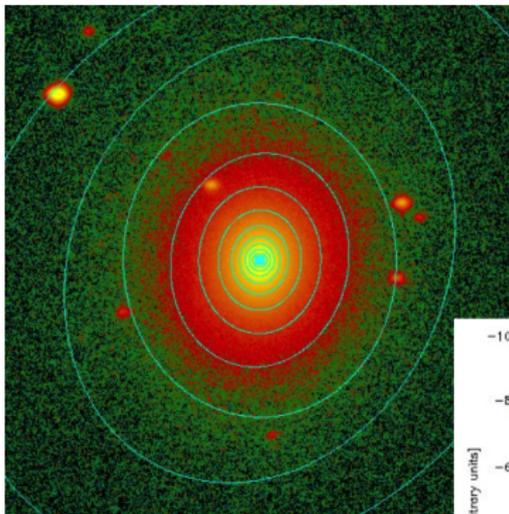
Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Toutes les galaxies elliptiques ne sont pas forcément parfaitement elliptiques : deux cas existent **boxy** et **disky**

FIGURE 3. — Distribution of the ellipticity classes for all observed elliptical galaxies.

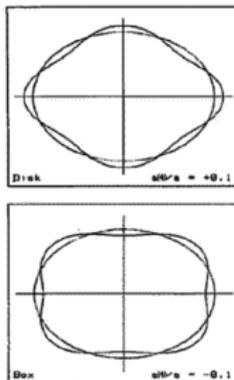


FIGURE 5. — Schematic drawing illustrating isophotes with $a(4)/a \sim +0.1$ and $a(4)/a \sim -0.1$.

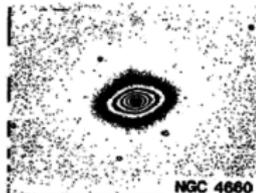


FIGURE 6. — R-image of NGC 4660, an elliptical galaxy with a disk-component in the isophotes ($a(4)/a \sim +0.03$).



FIGURE 7. — R-image of NGC 5322, an elliptical galaxy with box-shaped isophotes ($a(4)/a \sim -0.01$).

Exemples for boxy and disky isophotes from Bender et al. (1988)

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

Morphologie et propriétés
photométriques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

⇒ le degré de "boxiness" ou "diskiness" d'un isophote est mesuré par la différence entre l'isophote réelle et le meilleur ajustement par une ellipse

$$\delta(\phi) = \langle \delta \rangle + \sum a_n \cos(n\Phi) + \sum b_n \sin(n\Phi)$$

Par symétrie, les termes $n < 4$ s'annulent et $a_4 > 0$ pour une disky et inversement $a_4 < 0$ pour une boxy.

Les galaxies elliptiques ont peu ou pas de rotation. Il n'est donc pas possible d'utiliser une courbe de rotation pour comparer la masse "dynamique" à la masse "baryonique".

La masse dynamique est obtenue à partir du gaz chaud dans les régions externes de ces galaxies et permet de mesurer la distribution radiale de température. Ce gaz doit être à l'équilibre hydrostatique.

Appliquer les équations de l'équilibre hydrostatique + le profil de température (et quelques hypothèses) permet d'obtenir la masse totale.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protonique

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

On compare cette masse à la luminosité totale de la galaxie et on obtient un rapport masse-luminosité $\gamma = \frac{M}{L} \sim 80 - 100$.

Pour une population stellaire du type de celle rencontrée dans les galaxies elliptiques, on attend $\gamma \sim 5$.

L'écart entre ces deux valeurs de γ est un signe de la présence de matière noire.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

proton@ipm

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

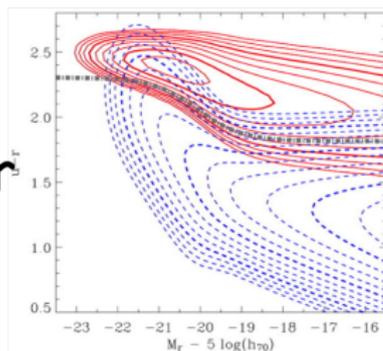
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Il y a une corrélation en la luminosité et la couleur. Plus une galaxie elliptique est lumineuse, plus elle est rouge.

← Truncation of the blue cloud

Couleur



Red sequence

Blue cloud

← Luminosité

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protogalaxies

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

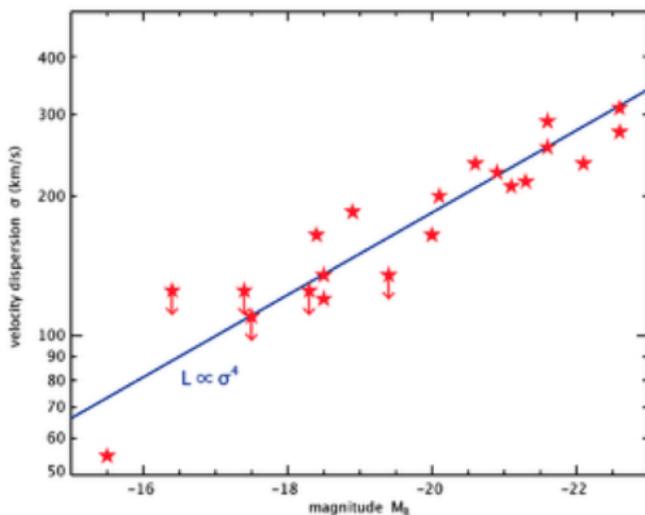
Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Relation de Faber-Jackson : $L \propto \sigma_0^4$, avec σ_0 la dispersion de vitesse au centre et L la luminosité.



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

problématiques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

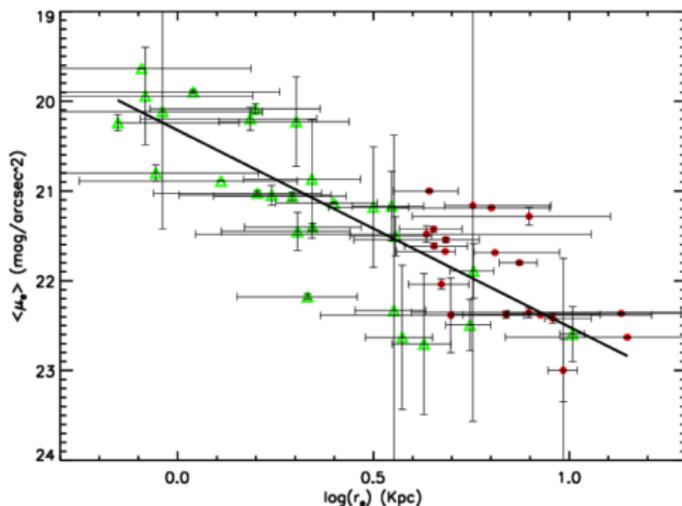
Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Relation de Kormendy : $R_e \propto I_e^{-0.25}$



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

prototypiques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

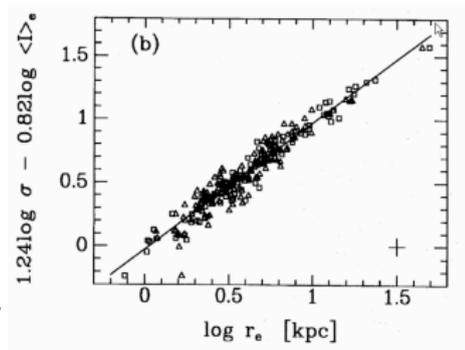
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Les deux relation
précédentes sont en réalité
deux projections d'une
relation plus fondamentale
appelée le plan
fondamental des galaxies
elliptiques :

$$\log R_e = -0.82 \log I_e + 1.24 \log \sigma_0$$

A nouveau : dispersion de
l'ordre de 10%



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

problèmes

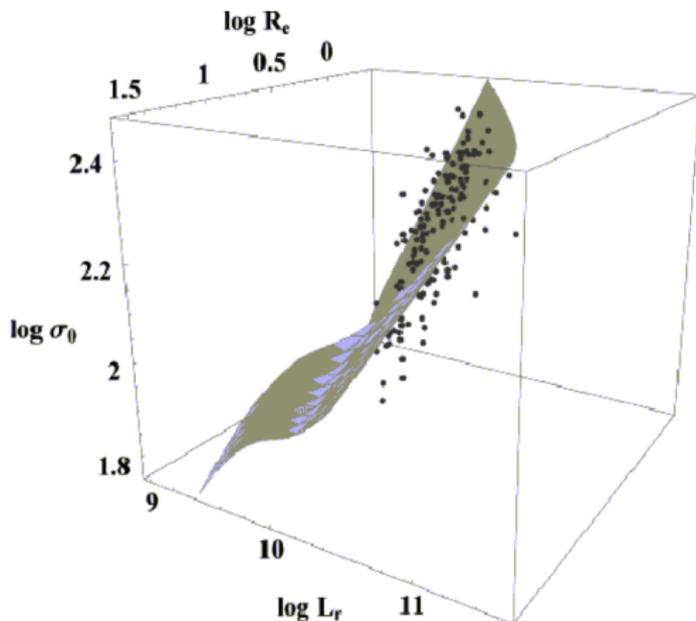
Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

prototypiques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

On va considérer la fonction de distribution des étoiles dans l'espace des phases (positions/configurations et vitesses) :
 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3x d^3v dt \equiv$ le nombre d'étoiles au temps t dans le volume défini par $d^3x d^3v$ centré sur (\mathbf{x}, \mathbf{v}) .

La densité d'étoiles à la position \mathbf{x} est donc donné par :
 $\rho(\mathbf{x}, t) = \int f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3v$.

Si les étoiles changent leurs positions et vitesses de manière graduelle, alors le taux de variation du nombre d'étoiles dans une région de l'espace des phases est égal au flux net hors et vers cette région :

⇒ doit obéir une relation de continuité dans l'espace des phases (conservation de la masse)

⇒ peut être écrit : $0 = \frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^6 \frac{\partial f \dot{\omega}_i}{\partial \omega_i} \equiv \nabla \cdot (f \dot{\omega})$

avec $\omega = (\mathbf{x}, \mathbf{v})$.

Ensuite on remarque que $\dot{\omega} = (\dot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{v}}) = (\mathbf{v}, -\nabla\Phi)$ où Φ est le potentiel gravitationnel donné par l'équation de Poisson

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$$

et ρ est relié à la fonction de distribution par
 $\rho = \int f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3v$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protoniques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

**Relations fondamentales et
principes de la dynamique**

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

$$\begin{aligned}\Rightarrow \sum_{i=1}^6 \frac{\partial(f\dot{\omega}_i)}{\partial \omega_i} &= \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(fv_i)}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(f\dot{v}_i)}{\partial v_i} \\ &= \sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial v_i}\end{aligned}$$

où pour le premier terme de la deuxième équation, le terme v_i est sorti de la différentielle car x et v sont des variables indépendantes.

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0}$$

qui est l'équation de Vlasov ou Boltzmann sans collision (CBE), équation qui régit l'évolution d'un fluide stellaire (non collisionnel).

Cette équation est rarement utilisable sous cette forme car elle fait intervenir la fonction de distribution qui n'est pas forcément connue.

On a en général accès à des moments de cette fonction de distribution (vitesses moyennes et densité). Pour obtenir l'équation aux moments utile, on multiplie la CBE par v_j et l'on intègre sur les vitesses, on obtient ainsi :

$$\frac{\partial(\rho \overline{v_j})}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{v_i v_j}) + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0$$

Ce sont les équations de Jeans (il y en a trois, une par coordonnée de vitesse).

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

problèmes

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Elles se réécrivent de façon vectorielle

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w^2) + \rho \nabla \Phi = 0$$

où w^2 est le tenseur dont les éléments i, j sont $w_{ij}^2 = \overline{v_i v_j}$.

Rappel : $\int f \cdot d^3 v = \rho$ et $\int v_i \cdot f \cdot d^3 v = \rho \bar{v}_i$.

L'équation précédente fait intervenir le tenseur $\overline{v_i v_j}$ et la densité qui sont difficiles à mesurer. Pour aller plus loin, on soustrait $\overline{v_i}$ fois l'équation de continuité pour obtenir

$$\rho \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial t} - \overline{v_j} \sum_i \frac{\partial(\rho \overline{v_i})}{\partial x_i} + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{v_i v_j}) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}$$

Il faut maintenant séparer les mouvements globaux des mouvements aléatoires.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

problèmes

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

Pour cela, on va expliciter le terme croisé de vitesse :

$$\begin{aligned}\Rightarrow \overline{v_i v_j} &= \overline{v_i} \overline{v_j} + \sigma_{ij}^2 \\ &= \overline{v_i} \overline{v_j} + \overline{(v_i - \overline{v_i})(v_j - \overline{v_j})}\end{aligned}$$

puis on divise par ρ . Les équations de Jeans se simplifient alors en

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{v}} = -\nabla \Phi - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \sigma^2)$$

qui sont les équations d'Euler pour les fluides non collisionnels. Elles équivalent aux équations d'Euler pour les fluides à l'exception du fait que σ^2 peut-être un tenseur anisotrope contrairement au cas fluide ($P = \rho \sigma^2$).

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protonucléaires

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Théorèmes du Viriel :

Maintenant, nous allons repartir des équations de Jeans, les multiplier par x_k et intégrer sur le volume. On obtient

$$\int x_k \frac{\partial \rho \overline{v_j}}{\partial t} d^3x = - \int x_k \sum_i \frac{(\rho \overline{v_i v_j})}{\partial x_i} d^3x - \int \rho x_k \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} d^3x$$

Si l'on applique le théorème de la divergence pour montrer

$$\int x_k \sum_i \frac{\partial \rho \overline{v_i v_j}}{\partial x_i} d^3x = - \int \rho \overline{v_j v_k} d^3x = -2T_{jk}$$

où T_{jk} est le tenseur d'énergie cinétique

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protoniques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Application du théorème de la divergence

$$\int_V d^3\mathbf{x} \nabla \cdot \mathbf{F} = \oint_S d^2\mathbf{S} \cdot \mathbf{F} \text{ théorème de la divergence}$$

$$\Rightarrow \int_V d^3\mathbf{x} \frac{\partial F_j}{\partial x_j} = \oint_S F_j d^2 S_j$$

$$\Rightarrow \int d^3\mathbf{x} g \nabla \cdot \mathbf{F} = \oint_S g \mathbf{F} \cdot d^2\mathbf{S} - \int d^3\mathbf{x} (\mathbf{F} \cdot \nabla) g \text{ avec } g \text{ un scalaire}$$

Application du théorème de la divergence

On utilise cette équation pour montrer

$$\begin{aligned}\int x_k \nabla \cdot (\rho \overline{v_i v_j}) d^3 \mathbf{x} &= \oint x_k \rho \overline{v_i v_j} d^2 S - \int d^3 \mathbf{x} \rho \overline{v_i v_j} \frac{\partial x_k}{\partial x_i} \\ &= - \int d^3 \mathbf{x} \delta_{ij} \rho \overline{v_i v_j}\end{aligned}$$

où le premier terme s'annule si l'on considère la galaxie dans son ensemble ($\rho \rightarrow 0$ quand $R \rightarrow \infty$) et le deuxième terme se simplifie car les x_i sont indépendent pour obtenir le résultat.

et on identifie

$$\begin{cases} W_{jk} = - \int \rho x_k \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} d^3x & \text{le tenseur d'énergie potentielle} \\ I_{jk} = \int \rho x_j x_k d^3x & \text{le tenseur du moment d'inertie} \end{cases}$$

On obtient alors

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + W$$

qui est le théorème du Viriel tensoriel.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protonucléaires

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

**Relations fondamentales et
principes de la dynamique**

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

sous sa version scalaire, il se réécrit

$$2T + W = \frac{1}{2} \ddot{I}$$

et si le système est stationnaire alors

$$2 \langle T \rangle + \langle W \rangle = 0$$

qui est le viriel de Clausius.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protonucléaires

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

**Relations fondamentales et
principes de la dynamique**

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation

En utilisant le viriel de Clausius et en notant

$$\begin{cases} W = -\frac{GM^2}{R_g} = m\Phi(r) = \frac{1}{2} \int \rho(r)\Phi(r)dr & \text{l'énergie potentielle} \\ T = \frac{1}{2}M \langle v^2 \rangle & \text{l'énergie cinétique} \end{cases}$$

$$\text{alors } W = -2T \Leftrightarrow \frac{GM^2}{R_g} = M \langle v^2 \rangle$$

Si on utilise $\gamma = \frac{M}{L}$ et on définit $c_v = \frac{\langle v^2 \rangle}{\langle v_{max}^2 \rangle}$ (cas spirales)
alors

$$L = \frac{R_g c_v}{G\gamma} v_{max}^2$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

protoniques

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Si $R_g \propto h_R$ et toutes les spirales ont le même I_0 tel que
 $L = \pi R_g^2 I_0$ alors

$$L \propto v_{max}^4$$

qui est la relation de Tully-Fischer.

Si maintenant on définit $c_V = \frac{\langle v^2 \rangle}{\sigma_0^2}$ et $c_R = \frac{R_G}{R_e}$ pour une galaxie elliptique (les quantités sont adimensionnelles donc ok) on a

$$R_e = \frac{c_V c_R}{G \pi \gamma} \frac{\sigma_0^2}{\langle I \rangle_e}$$

$$\Rightarrow \log R_e = \log \frac{c_V c_R}{G \pi} + 2 \log \sigma_0 + 0.4 \mu - \log \gamma$$

c'est très proche du plan fondamental mais

- ▶ relation observée est $\sigma_0^{1.4}$ et pas σ_0^2
- ▶ pour les spirales on suppose implicitement $\Sigma(R) = cste$ et $I_0 = cste$ ce qui n'est pas vrai.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

problèmes

Les galaxies elliptiques et la
matière noire

Relations fondamentales

Relations fondamentales et
principes de la dynamiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

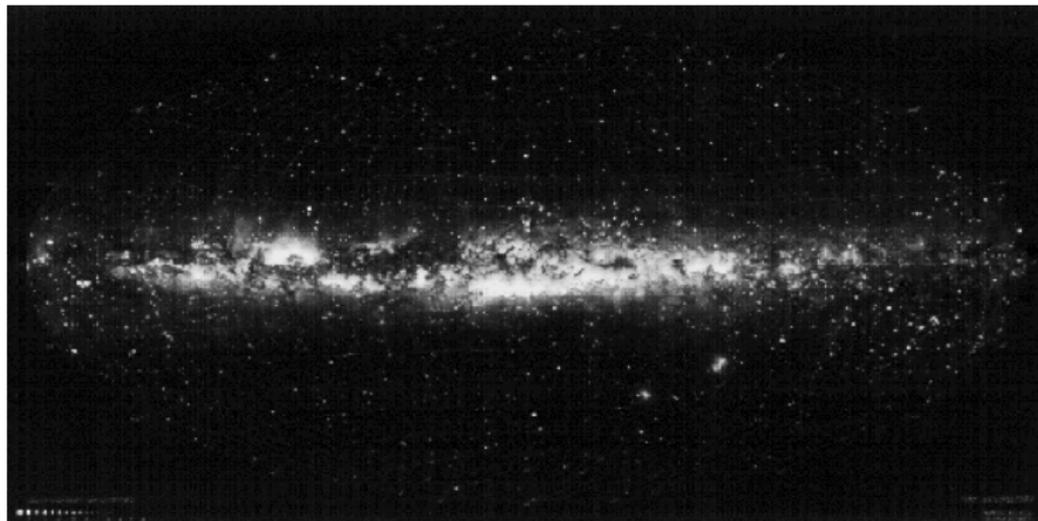
Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Voie Lactée

La Voie Lactée et mouvements quasi-circulaires



La Voie Lactée est une galaxie disque : c'est une spirale barée de type Sbc dans la classification de Hubble.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

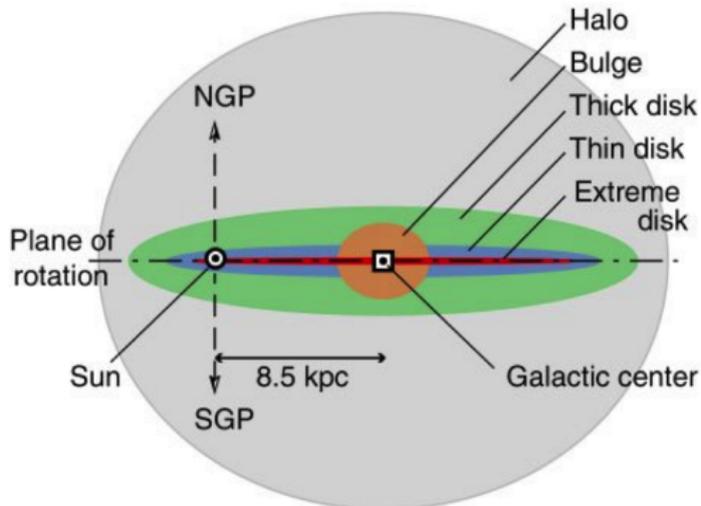
**Structure et population
stellaires**

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

- ▶ rayon du disque ~ 14 kpc, bulbe ~ 2.3 kpc
- ▶ Masse totale $\sim 10^{12} M_{\odot}$
- ▶ Masse visible $\sim 7.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - ▶ 78% disque
 - ▶ 22% bulbe
- ▶ distance soleil-centre galactique $7.8 \rightarrow 8.5$ kpc
- ▶ vitesse de rotation à $R_0 \sim 180 \rightarrow 240$ km/s

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

**Structure et population
stellaires**

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

- ▶ Bulbe : $1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - ▶ $Z \sim 0.4Z_{\odot} \rightarrow 12 - 15$ Gyr
 - ▶ $Z < 0.4Z_{\odot} \rightarrow 10 - 14$ Gyr
- ▶ Halo : $0.01 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - ▶ $Z < 0.4Z_{\odot} \rightarrow 10 - 14$ Gyr
- ▶ Disque mince : $6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - ▶ $Z \sim 1.5Z_{\odot} \rightarrow 0.02 - 0.05$ Gyr
 - ▶ $Z = 0.5 - 1Z_{\odot} \rightarrow 1 - 10$ Gyr
- ▶ Disque épais : $0.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 - ▶ $Z = 0.25Z_{\odot} \rightarrow 10$ Gyr

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

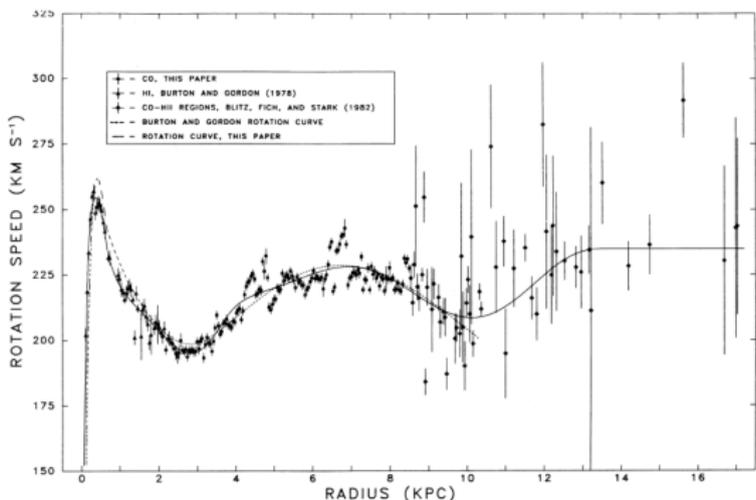
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Modélisation de la courbe de rotation : $M_{tot}/M_* \approx 10 \Rightarrow$
présence de matière noire dans la Voie Lactée

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

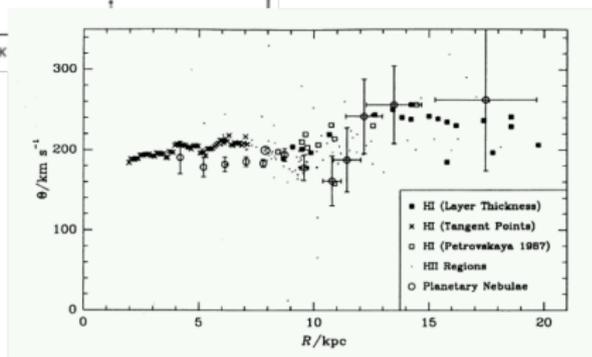
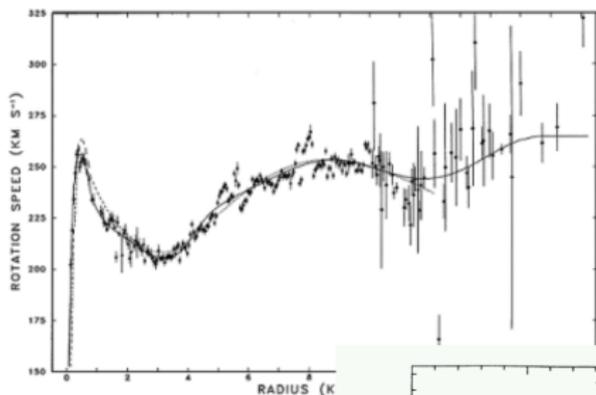
Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

...



⚠ Seul le rapport $\frac{v_{c0}}{R_0}$ est bien connu !

Diagramme $l - v$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

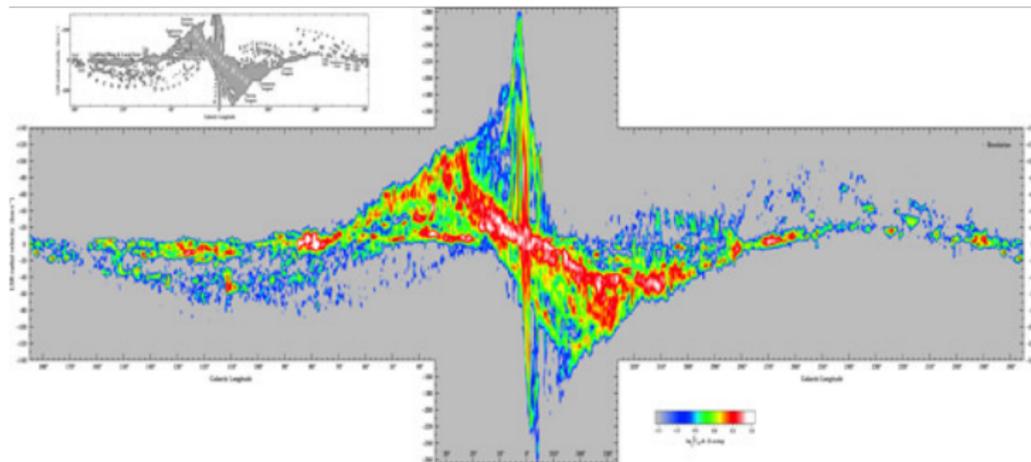
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

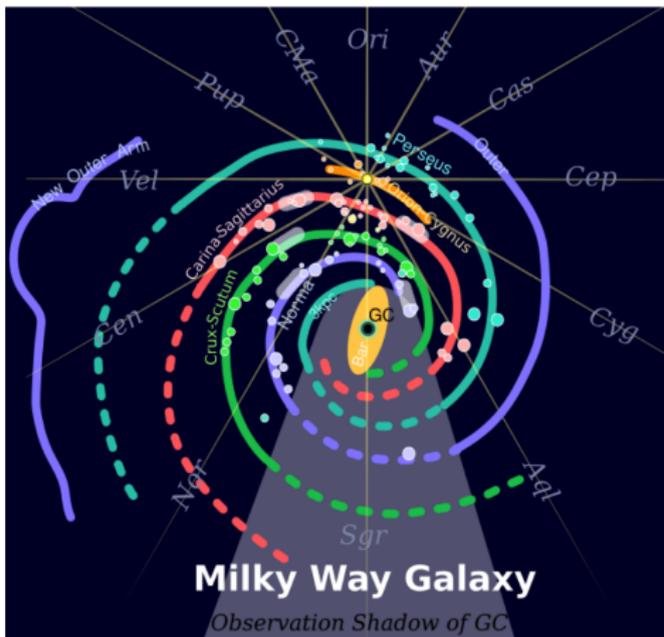
Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Beaucoup de structures ! On voit la signature des *instabilités* du disque.



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

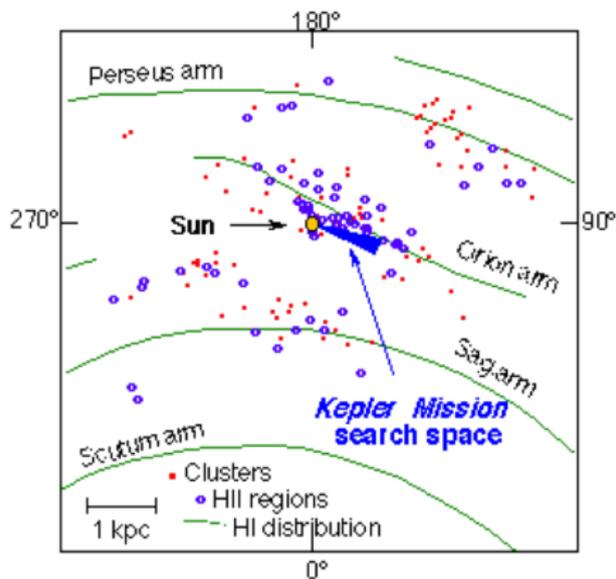
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Inventory of the Solar Neighbourhood

| | Component | volume density | vertical velocity dispersion | surface density |
|-------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | $M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ | km s^{-1} | $M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ |
| Gas | Molecular Hydrogen H_2 | 0.021 | 4.0 | 3.0 |
| | Ionised Hydrogen H I | 0.028 | 8.0 | 8.0 |
| | warm gas | 0.001 | 40.0 | 2.0 |
| Stars | giants | 0.0006 | 17.0 | 0.4 |
| | $M_V < 2.5$ | 0.0031 | 7.5 | 0.9 |
| | $2.5 < M_V < 3.0$ | 0.0015 | 10.5 | 0.6 |
| | $3.0 < M_V < 4.0$ | 0.0020 | 14.0 | 1.1 |
| | $4.0 < M_V < 5.0$ | 0.0024 | 19.5 | 2.0 |
| | $5.0 < M_V < 8.0$ | 0.0074 | 20.0 | 6.5 |
| | $M_V > 8.0$ | 0.014 | 20.0 | 12.3 |
| | white dwarfs | 0.005 | 20.0 | 4.4 |
| | brown dwarfs | 0.008 | 20.0 | 6.2 |
| | stellar halo | 0.0001 | 100.0 | 0.6 |

 Définitions et
Rappels

 Classification des
galaxies

 Notions
d'évolution
chimique

 Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

 Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

 La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

 Structure et population
stellaires

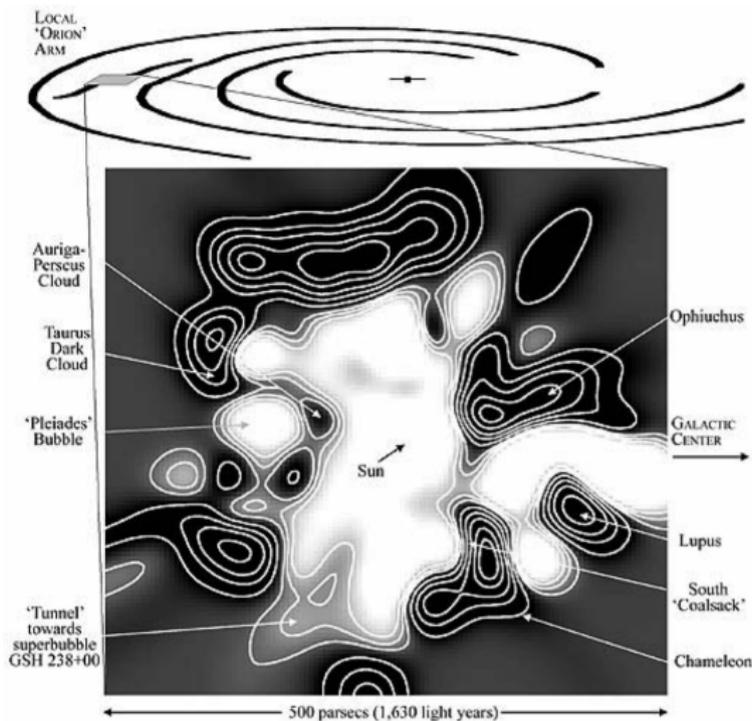
 Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

 Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Un endroit particulier



© Vergely et al.

Formation et
Evolution des
Galaxies

A. Siebert

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

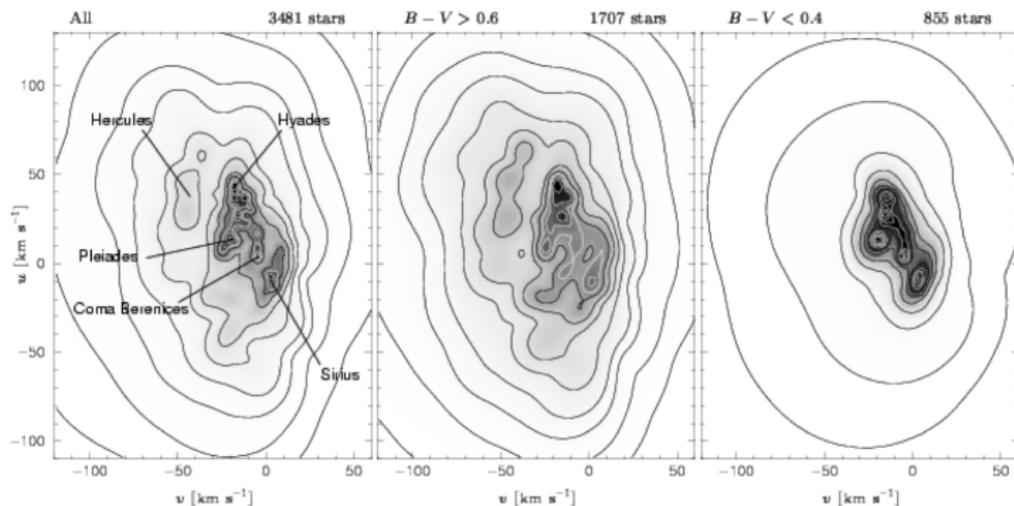
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



© Dehnen 98

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

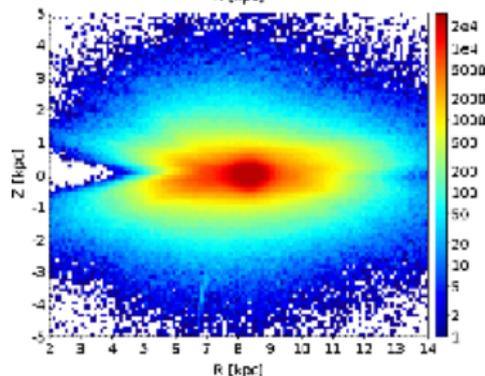
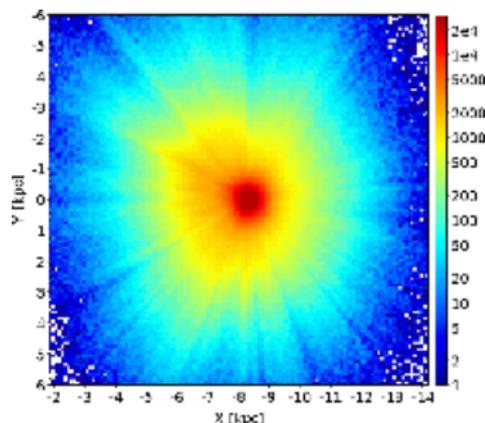
Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Le satellite de l'ESA Gaia
lançé en décembre 2013
mesure les parallaxes,
vitesses radiales et
propriétés atmosphériques
des étoiles.

Ses mesures révolutionne
l'idée que l'on se faisait de
la Voie Lactée en ce
moment même !



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

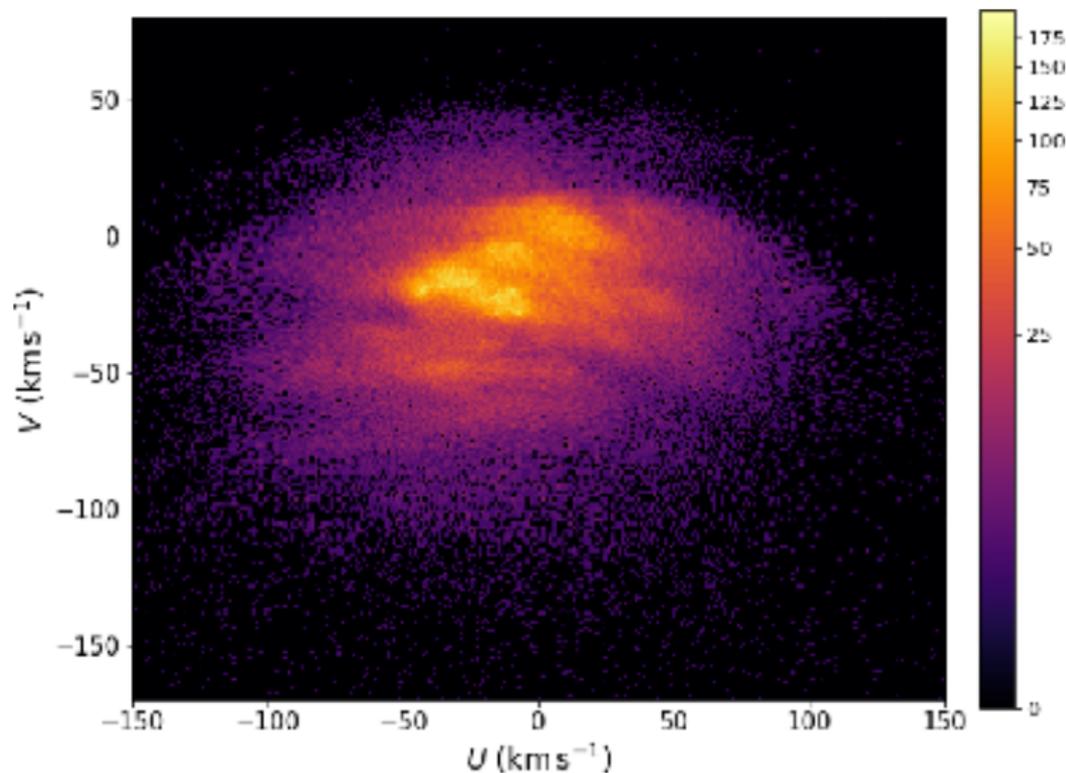
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

A. Siebert

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

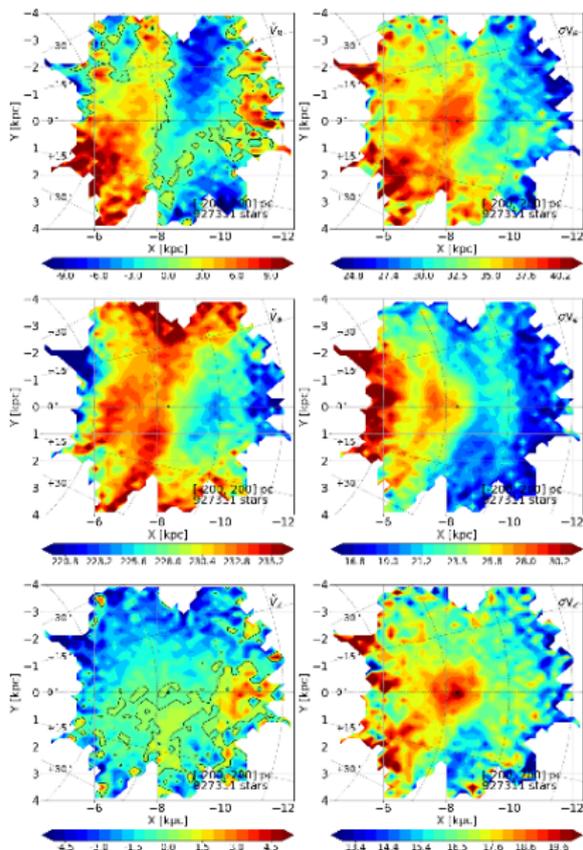
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

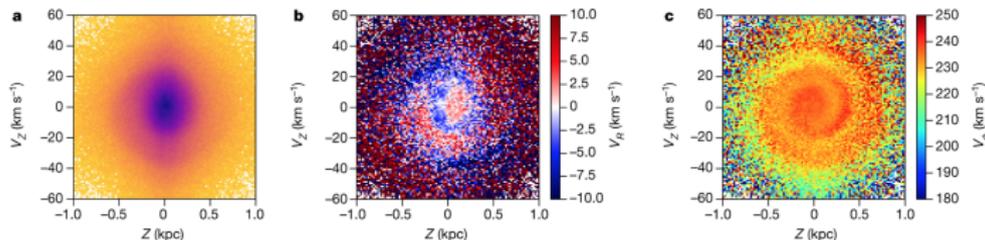
Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

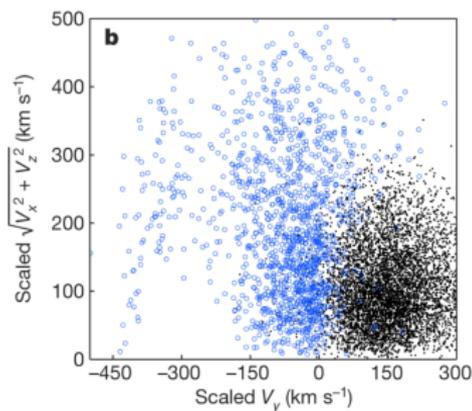
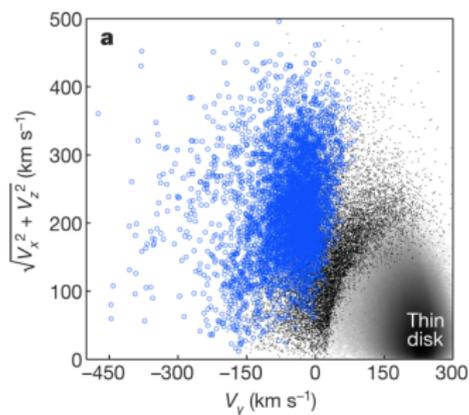
Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

La galaxie n'est pas stationnaire ! (Antoja et al. 2018)



On voit les traces de la formation de la Voie Lactée! (Helmi et al. 2018)



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On voit les traces de la formation de la Voie Lactée !

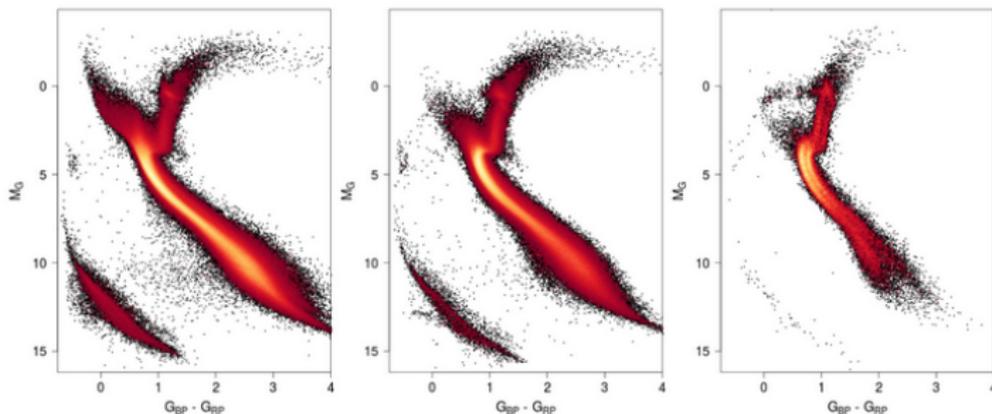


Fig. 21. *Gaia* HRDs with kinematic selections based on the tangential velocity: *panel a:* $V_T < 40 \text{ km s}^{-1}$ (1 893 677 stars), *panel b:* $60 < V_T < 150 \text{ km s}^{-1}$ (1 303 558 stars), and *panel c:* $V_T > 200 \text{ km s}^{-1}$ (64 727 stars).

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Pour modéliser les mouvements des étoiles dans la Voie Lactée (où dans les disques de galaxies), il faut tenir compte du fait que les orbites ne sont pas purement circulaires.

Néanmoins, ces orbites sont proches du mouvement circulaire en général car les disques sont en rotation.

On considère un potentiel gravitationnel axisymétrique (symétrie par rapport au plan de la galaxie), sans rotation. Les coordonnées sont alors (R, θ, z) .

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Les déplacements sont gouvernés par le Lagrangien

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \frac{1}{2}\mathbf{v}^2 - \Phi \\ &= \frac{1}{2}(\dot{R}^2 + (R\dot{\theta})^2 + \dot{z}^2) - \Phi(R, z) \text{ en coordonnées cylindriques}\end{aligned}$$

et le Hamiltonien est donné par

$$\begin{aligned}H &= \frac{1}{2}\mathbf{v}^2 + \Phi \\ &= \frac{1}{2}(p_R^2 + \frac{p_\theta^2}{R^2} + p_z^2) + \Phi(R, z)\end{aligned}$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Les équations du mouvements sont alors $\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}$ et $\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}$ qui se réécrivent

$$\dot{p}_R = \frac{p_\theta^2}{R^3} - \frac{\partial \Phi}{\partial R}$$

$$\dot{p}_\theta = \frac{d}{dt}(R^2\dot{\theta}) = 0 \text{ car conservation de } L_z$$

$$\dot{p}_z = \ddot{z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

Ces équations décrivent des oscillations couplées en R et z .

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia**Mouvement épicyclique**Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Elles peuvent donc se réécrire

$$\begin{aligned}\ddot{R} &= -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial R} \\ \ddot{z} &= -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial z}\end{aligned}$$

où $\Phi_{eff} = \Phi(R, z) + \frac{L_z^2}{2R^2}$.

⇒ le mouvement se résume à un mouvement 2D dans le plan (R, z) avec le Hamiltonien modifié

$$H_{eff} = \frac{1}{2}(P_R^2 + p_z^2) + \Phi_{eff}(R, z) = E$$

qui est l'énergie totale de l'orbite.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

La différence $E - \Phi_{eff}$ est l'énergie cinétique dans le plan (R, z) .

$E_c > 0$, alors les mouvements sont restreint dans le plan méridional par la courbe $E \geq \Phi_{eff}$.

Le minimum de Φ_{eff} est le "centre dynamique" du système et défini le rayon d'une orbite circulaire à L_z , $\Phi_{eff} = E$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On peut encore simplifier ces équations. Pour cela on se place dans un repère (x, z) dont l'origine est au minimum de Φ_{eff} .

On a $x = R - R_g$ avec R_g satisfaisant $\frac{\partial \Phi_{eff}}{\partial R}(R_g, 0) = 0$.

$$\Leftrightarrow \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} \right)_{(R_g, 0)} = \frac{L_z^2}{R_g^3} = R_g \dot{\theta}^2$$

qui est la condition pour une orbite circulaire à R_g avec une vitesse angulaire $\dot{\theta}$.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia**Mouvement épicyclique**Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On fait ensuite une expansion de Taylor de Φ_{eff} autour de R_g

$$\Phi_{eff} = \Phi_{eff}(R_g, 0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{eff}}{\partial R^2} \right)_{(R_g, 0)} x^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{eff}}{\partial z^2} \right)_{(R_g, 0)} z^2 + \mathcal{O}(xz^2)$$

(⚠ le terme en xz vaut 0 à cause de la symétrie par rapport au plan).

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia**Mouvement épicyclique**Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Les équations du mouvement se simplifient alors en

$$\ddot{R} = -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial R} \Rightarrow \ddot{x} = -\kappa^2 x$$

$$\ddot{z} = -\frac{\partial\Phi_{eff}}{\partial z} \Rightarrow \ddot{z} = -\nu^2 z$$

avec $\kappa^2(R_g) = \left(\frac{\partial^2\Phi_{eff}}{\partial R^2}\right)_{(R_g,0)}$ et $\nu^2(R_g) = \left(\frac{\partial^2\Phi_{eff}}{\partial z^2}\right)_{(R_g,0)}$.

Ce sont les équations de deux oscillateurs harmoniques et κ et ν sont les fréquences épicycliques radiales et verticales.

On a alors les trois fréquences suivantes :

$$\kappa^2(R_g) = \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} \right)_{(R_g,0)} + \frac{3L_z^2}{R_g^4} = \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} \right)_{(R_g,0)} + \frac{3}{R_g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} \right)_{(R_g,0)}$$

$$= \left(R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2 \right)_{R_g}$$

$$\nu^2(R_g) = \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right)_{(R_g,0)}$$

$$\Omega^2(R) = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} \right)_{(R,0)} = \frac{L_z^2}{R^4}$$

Les périodes radiales et azimutales sont $T_R = \frac{2\pi}{\kappa}$ et $T_\theta = \frac{2\pi}{\Omega}$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

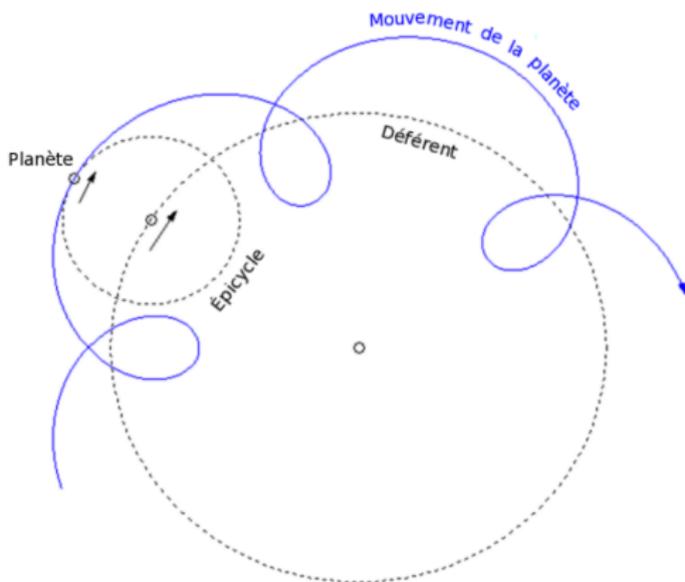
Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la



Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Si Ω et κ sont commensurables ($a\Omega = b\kappa$ avec a et b des entiers) \Rightarrow orbites fermées particulières

Dans le disque, $v_c \sim \text{cste} \Rightarrow \kappa^2 \approx 2\Omega^2$

L'équation de Poisson se réécrit en coordonnées cylindriques

$$\begin{aligned} 4\pi G\rho &= \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Phi}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \\ &\approx \frac{1}{R} \frac{dv_c^2}{dR} + v^2 \end{aligned}$$

et on a $\Omega^2 \approx \frac{GM}{R^3} = \frac{4}{3}\pi G\bar{\rho}$

$\Rightarrow \frac{v^2}{\kappa^2} \approx \frac{3}{2} \frac{\rho}{\bar{\rho}}$ donc le rapport des fréquences épicycliques indique le degré de concentration dans le plan.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Si en plus du potentiel axisymétrique on ajoute une petite perturbation qui tourne à une fréquence angulaire propre Ω_p et que l'on cherche à étudier le mouvement d'une orbite autour du centre guide R_g , on peut réemployer la théorie épicyclique.

Pour simplifier les notations, on se restreindra au cas 2D dans le plan de la galaxie. L'extension en 3D est possible mais dans ce cas il vaut mieux utiliser la CBE et des coordonnées angle-action.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On se place dans le référentiel (R, θ) qui tourne avec la perturbation à la fréquence Ω_p . On choisit l'axe $\theta = 0$ pour qu'il coïncide à l'axe principal du potentiel (si il existe).

Dans ce système de coordonnées, le Lagrangien s'écrit

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \dot{R}^2 + \frac{1}{2} [R(\dot{\theta} + \Omega_p)]^2 - \Phi(R, \theta)$$

Les équations du mouvement se réécrivent alors

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= R(\dot{\theta} + \Omega_p)^2 - \frac{\partial \Phi}{\partial R} \\ \frac{d}{dt} [R^2(\dot{\theta} + \Omega_p)] &= -\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \end{aligned}$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On suppose la perturbation du potentiel faible par rapport au potentiel axisymétrique, on peut alors séparer le potentiel

$$\Phi(R, \theta) = \Phi_0(R) + \Phi_1(R, \theta) \text{ avec } \left| \frac{\Phi_1}{\Phi_0} \right| \ll 1$$

et on procède de même pour les coordonnées au premier ordre :

$$R(t) = R_0 + R_1(t) ; \theta(t) = \theta_0(t) + \theta_1(t)$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On injecte ces développements dans les équations du mouvement et on sépare les différents ordres.

A l'ordre 0 (les termes qui ne contiennent que des grandeurs avec l'indice 0), les équations du mouvement deviennent

$$R_0(\dot{\theta}_0 + \Omega_p)^2 = \left(\frac{d\Phi_0}{dR} \right)_{R_0}$$
$$\dot{\theta}_0 = \text{cste}$$

Ce sont des équations d'équilibre centrifuge à R_0 .

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Pour le potentiel axisymétrique, on a la fréquence angulaire

$$\Omega(R) = \pm \sqrt{\frac{1}{R} \frac{d\Phi_0}{dR}} \text{ et } \Omega_0 = \Omega(R_0)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \dot{\theta}_0 &= \Omega_0 - \Omega_p \\ \Rightarrow \theta_0(t) &= (\Omega_0 - \Omega_p) t + \text{cste} \end{aligned}$$

Dans le référentiel de la perturbation, l'angle θ_0 croît linéairement en fonction du temps.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesStructure et population
stellairesLe voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

A l'ordre 1, les équations du mouvement donnent

$$\ddot{R}_1 + \left(\frac{d^2\Phi_0}{dR^2} - \Omega^2 \right)_{R_0} R_1 - 2 R_0 \Omega_0 \dot{\theta}_1 = - \left(\frac{\partial\Phi_1}{\partial R} \right)_{R_0}$$
$$\ddot{\theta}_1 + 2\Omega_0 \frac{\dot{R}_1}{R_0} = - \frac{1}{R_0^2} \left(\frac{\partial\Phi_1}{\partial\theta} \right)_{R_0}$$

Pour continuer, il faut maintenant spécifier Φ_1 .

Une forme générale s'écrit

$$\Phi_1(R, \theta) = \Phi_a(R) \cos(m\theta) \text{ avec } m \text{ un entier positif}$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

Cas d'une barre galactique : $m = 2$ (quadrupole) et $\Phi_p < 0$.
On suppose pour l'instant que $\theta_1 \ll 1$

$$\Rightarrow \theta(t) \sim (\Omega_0 - \Omega_p) t$$

donc on a

$$\ddot{R}_1 + \left(\frac{d^2\Phi_0}{dR^2} - \Omega^2 \right)_{R_0} R_1 - 2 R_0 \Omega_0 \dot{\theta}_1 = - \left(\frac{d\Phi_p}{dR} \right)_{R_0} \cos [m(\Omega_0 - \Omega_p) t] \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}_1 + 2\Omega_0 \frac{\dot{R}_1}{R_0} = \frac{m\Phi_p(R_0)}{R_0^2} \sin [m(\Omega_0 - \Omega_p) t] \quad (2)$$

et on intègre (2) pour obtenir

$$\dot{\theta}_1 = -2\Omega_0 \frac{R_1}{R_0} - \frac{\Phi_p(R_0)}{R_0^2 (\Omega_0 - \Omega_p)} \cos [m(\Omega_0 - \Omega_p) t] + \text{cste}$$

on injecte ce résultat dans (1) pour obtenir

$$\ddot{R}_1 + \kappa_0^2 R_1 = - \left[\frac{d\Phi_p}{dR} + \frac{2\Omega\Phi_p}{R(\Omega - \Omega_p)} \right]_{R_0} \cos [m(\Omega_0 - \Omega_p)t] + \text{cste}$$

$$\text{où } \kappa_0^2 = \left(\frac{d^2\Phi_0}{dR^2} + 3\Omega^2 \right)_{R_0} = \left(R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2 \right)_{R_0}.$$

On retrouve un oscillateur harmonique de fréquence propre κ_0 et qui tourne à $m(\Omega_0 - \Omega_p)$.

La solution générale est donnée par

$$R_1(t) = C_1 \cos(\kappa_0 t + \alpha) - \left[\frac{d\Phi_p}{dR} + \frac{2\Omega\Phi_p}{R(\Omega - \Omega_p)} \right]_{R_0} \frac{\cos[m(\Omega_0 - \Omega_p)t]}{\Delta}$$

où C_1 et α sont des constantes arbitraires et

$$\Delta = \kappa_0^2 - m^2(\Omega_0 - \Omega_p)^2$$

Comme $\theta_0(t) = (\Omega_0 - \Omega_p) t$, on peut éliminer t

$$\Rightarrow R_1(\theta_0) = C_1 \cos\left(\frac{\kappa_0 \theta_0}{\Omega_0 - \Omega_p} + \alpha\right) + C_2 \cos(m\theta_0)$$

$$\text{où } C_2 = -\frac{1}{\Delta} \left[\frac{d\Phi_p}{dR} + \frac{2\Omega\Phi_p}{R(\Omega - \Omega_p)} \right]_{R_0}$$

- ▶ Si $C_1 = 0 \rightarrow$ l'orbite est périodique et de période $\frac{2\pi}{m}$
- ▶ Si $C_1 \neq 0 \rightarrow$ orbite non fermée apparentée à $C_1 = 0$

Seules les orbites fermées nous intéressent pour l'instant, on se focalise donc sur les cas $C_1 = 0$.

Cas singuliers :

(1) $\Omega_0 = \Omega_p \Rightarrow$ corotation, $\dot{\theta}_0 = 0 \Rightarrow$ le centre guide tourne avec la perturbation

(2) $m(\Omega_0 - \Omega_p) = \pm\kappa_0 \Rightarrow$ résonances de Lindblad (pour $m = 2$)

- ▶ $C_2 > 0$ orbites alignées avec la barre (x_1)
- ▶ $C_2 < 0$ orbites perpendiculaires à la barre (x_2)

Quand R_0 approche le rayon d'une de ces résonances, R_1 devient grand.

⇒ la linéarisation des équations du mouvement n'est plus valable !

Avec un traitement adapté, on peut montrer que l'équation du mouvement se résume à

$$\frac{d^2\Psi}{dt^2} = -p^2 \sin \Psi$$

avec $\Psi = 2\theta_1$ et $p^2 = \frac{4}{R_0^2} |\Phi_p(R_0)| \frac{4\Omega_0^2 - \kappa_0^2}{\kappa_0^2}$.

C'est l'équation d'un pendule.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Structure et population
stellaires

Le voisinage solaire et
apports de Gaia

Mouvement épicyclique

Effet d'une barre
galactique : perturbation
linéaire

Introduction à la

On peut écrire son énergie totale $E_p = \frac{1}{2}\Psi^2 - p^2 \cos \Psi$
(conservée car énergie)

- ▶ $E_p < p^2$ petites oscillations autour d'un point de Lagrange (orbite trapée par la résonance)
- ▶ $E_p > p^2$ circulation de l'orbite

Introduction à la formation hiérarchique des galaxies

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques



Evolution séculaire = les galaxies sont isolées des autres galaxies !

⇒ seul moyen d'accroître la masse est via l'infall

⇒ pas suffisant pour expliquer la présence des "grosses" galaxies

Si on considère les galaxies dans leur environnement : amas de galaxies, grandes structures ⇒ elles ne sont pas isolées

- ▶ les "grosses" galaxies sont dans des régions denses
- ▶ on observe des fusions de galaxies
- ⇒ le moyen principal pour accroître la masse est par fusion (merger)
- ⇒ le taux de fusion est directement lié à la structure et à l'évolution de l'univers, donc à la cosmologie
 - ⇒ donc à l'évolution des structures de matière noire

La formation des galaxies se passe en plusieurs étapes :

- ▶ formation des grandes structures et création des halos de matière noire par effondrement non-collisionnel
- ▶ condensation des baryons (matière ordinaire) à l'intérieur des puits de potentiel des halos
- ▶ accroissement de la masse par fusion des halos et des galaxies à l'intérieur de ces halos

En se basant sur les résultats obtenus en étudiant l'effondrement sphérique, la surdensité critique pour un effondrement au temps t_i pour le temps d'effondrement t est donné par (pour $\Omega_0 = 1$) :

$$\delta_c(t_i, t) = \left(\frac{2 \times 1.095 t_i}{t} \right)^{2/3} = 1.686 \left(\frac{t_i}{t} \right)^{2/3}$$

où $t = 2t_{max}$ (t_{max} le temps où la gravité contrebalance l'expansion de l'univers) et $\delta_c = \frac{\rho_c}{\rho_0} - 1$.

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensitéEvolution non-linéaire :
simulations numériques

Il est à présent plus simple de travailler dans l'espace de Fourier et nous allons étudier les variations de $\delta(\mathbf{x})$ au fur et à mesure que l'on ajoute des termes en \mathbf{k} (fréquences spatiales). La transformé de Fourier s'écrit

$$\delta(\mathbf{x}) = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{k}} \delta_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \quad V \text{ étant le volume}$$
$$\delta_{\mathbf{k}} = \int_V d^3\mathbf{x} \delta(\mathbf{x}) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}$$

Cela revient à ajouter à $\delta(\mathbf{x})$, Δ_K à chaque étape.

Δ_K est la perturbation globale dont le vecteur d'onde est dans une coquille sphérique dans l'espace de Fourier

$$\Delta_K = \frac{1}{V} \sum_{K \leq |\mathbf{k}| < K+dK} \delta_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}$$

Δ_K est la somme d'un grand nombre d'ondes et les $\delta_{\mathbf{k}}$ sont indépendants.

⇒ la PDF de Δ_K doit être Gaussienne (conséquence du théorème central limite).

Si on pose σ_K^2 comme la variance de $\delta(\mathbf{x})$ avec $|\mathbf{k}| \leq K =$
Spectre de puissance $P(K)$

$\Rightarrow \sigma_K^2$ augment monotoniquement à partir de 0 à chaque
fois que l'on ajoute une coquille

\Rightarrow comme Δ_K n'est pas corrélé à la valeur de $\delta(\mathbf{x})$ avant
que l'on ajoute $\Delta_K \Rightarrow \sigma_K^2$ augmente de $\langle \Delta_K \rangle$ à chaque
pas.

Par contre $|\delta(\mathbf{x})|$ n'augmente pas forcément car Δ_K peut être de signe opposé à $\delta(\mathbf{x})$ (il y a des surdensités et des sous-densités).

$\Rightarrow \delta(\mathbf{x})$ suit une marche aléatoire. Comme σ_K^2 augmente monotoniquement et $\sigma_K^2 = \langle |\delta_{\mathbf{k}}|^2 \rangle$ par définition, on l'utilisera à la place de K .

\Rightarrow permet de s'affranchir du spectre de puissance des fluctuations.

\Rightarrow quand $\delta(\mathbf{x})$ passe au-dessus de la limite $\delta_c \left(\frac{t_i}{t} \right)$ pour un σ_K^2 , \mathbf{x} appartient à une région de taille K^{-1} qui s'effondrera au temps t .

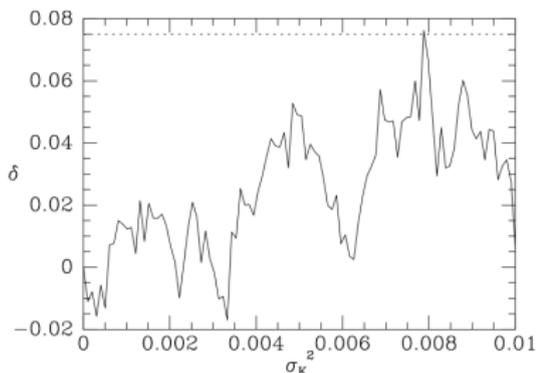


Figure 9.10 The overdensity $\delta(\mathbf{x})$ at some location smoothed by including only waves with wavenumbers $< K$, versus the corresponding variance $\sigma_K^2 = \langle \delta^2(\mathbf{x}) \rangle$ (solid line). The vertical coordinate executes a random walk, with σ_K^2 playing the role of the number of steps. The dashed line shows the critical overdensity δ_c (eq. 9.67) for fluctuations that will collapse by $t_f = 196t_i$.

Quand $t \nearrow$, $\delta_c \searrow \Rightarrow$ déplacement vers la gauche de $\sigma_K^2 \Rightarrow$ accroissement de la masse par des petites accrétions (minor mergers).

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques

- ▶ Quand δ_c diminue et touche le sommet d'un pic, déplacement brutal vers la gauche et accroissement significatif de la masse, c'est une accréation majeure (major merger).
- ▶ La masse de la région de taille K^{-1} est donnée par
$$M_K = \frac{6\pi^2 \rho_0}{K^3}.$$

A la place de δ on peut également représenter le temps t/t_i .

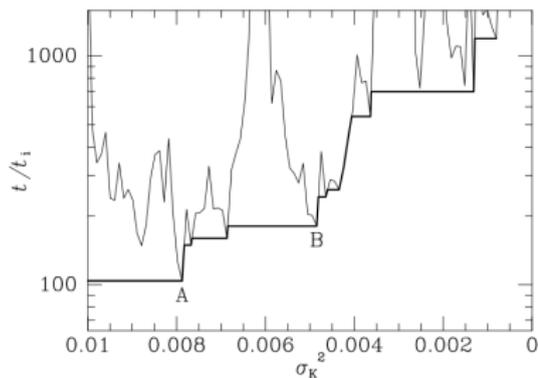


Figure 9.11 The light curve is as in Figure 9.10 but with δ replaced by $t/t_i = (1.686/\delta)^{3/2}$ and with the ordering of the horizontal axis reversed so M_K rather than σ_K^2 increases to the right. The heavy curve shows how M_K increases discontinuously with time.

A $t/t_i = t_A/t_i$, $\sigma_K^2 = \sigma_{K,A}^2$, à t_A l'élément \mathbf{x} fusionne avec un halo de taille K_A^{-1} et à $t_B > t_A$ fusionne avec un halo de taille K_B^{-1} .

Ceci décrit l'évolution d'une surdensité pour une réalisation de l'univers.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques

Il faut également s'intéresser aux propriétés statistiques !

On veut par exemple connaître la probabilité qu'à une étape σ_K^2 dans le processus, la surdensité à un point \mathbf{x} aléatoire est dans l'intervalle $(\delta, \delta + d\delta)$, noté $p_K(\delta)d\delta$ (\triangleq fonction de σ_K^2).

Si on considère un grand nombre N de positions \mathbf{x} , le nombre de points dans $(\delta, \delta + d\delta)$ vaut $N_{p_K}(\delta) d\delta$.

- ▶ plus on ajoute d'échelles K , $\sigma_K^2 \nearrow$ alors que la surdensité va croître à certains points et décroître à d'autres.
 - ▶ le nuage de points se diffuse le long de la ligne δ
- ⇒ la densité du nuage $N_{p_K}(\delta)$ doit satisfaire une équation de diffusion où σ_K^2 joue le rôle du temps

$$\frac{\partial p_K}{\partial \sigma_K^2} = C \frac{\partial^2 p_K}{\partial \delta^2}$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensitéEvolution non-linéaire :
simulations numériques

Il faut maintenant estimer le coefficient de diffusion C . On a

$$\sigma_K^2 = \langle \delta^2 \rangle = \int d\delta \delta^2 p_K(\delta)$$

Si on dérive les deux côtés par rapport à σ_K^2 , on inverse l'intégrale et la dérivée à droite et on utilise l'équation de diffusion précédente, alors on montre

$$\Rightarrow 1 = C \int d\delta \delta^2 \frac{\partial^2 p_K}{\partial \delta^2}$$

$p_K(\delta)$ étant une probabilité, si on intègre par partie on obtient $C = \frac{1}{2}$.

L'équation de diffusion est alors

$$\frac{\partial p_K}{\partial \sigma_K^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p_K}{\partial \delta^2}$$

une solution est donc donnée par

$$p_K(\delta) = \frac{1}{(2\pi\sigma_K^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_K^2}\right)$$

avec comme condition aux limites $p_K(\delta) = 0$ si $\delta \neq 0$ pour $\sigma_K^2 = 0$.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

**Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité**

Evolution non-linéaire :
simulations numériques

Une solution associée est donnée par

$$p_K(\delta) = \frac{1}{(2\pi\sigma_K^2)^{1/2}} \left[\exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_K^2}\right) - \exp\left(-\frac{(\delta - 2\delta_c)^2}{2\sigma_K^2}\right) \right]$$

qui est la différence de densité de probabilité de particules qui sont initialement à l'origine et celles qui sont à $\delta = 2\delta_c$
 \Rightarrow densité de probabilité de particules lâchées à l'origine diffusant vers la barrière $\delta = \delta_c$ (si l'on se restreint à $\delta < \delta_c$ car $p_K(\delta_c) = 0$).

On commence par calculer la probabilité que à t , le plus grand halo qui contient un élément de masse donné a une échelle K^{-1} . On la note $p_1(K, t)d\sigma_K^2$.

On remarque ensuite que cette probabilité est la même que la probabilité que la marche aléatoire de δ dépasse $\delta_c(t_i, t)$ pour la première fois au pas $\sigma_K^2 \rightarrow \sigma_K^2 + d\sigma_K^2$.

⇒ On peut utiliser la solution précédente de la barrière absorbante pour la calculer.

Tout d'abord on note que la probabilité que $\delta < \delta_c$ est

$$\int_{-\infty}^{\delta_c} p_K(\delta) d\delta$$

→ le calcul de cette intégrale donne la probabilité que δ_c n'est pas atteinte

⇒ $-1 \times$ le taux de variation de cette probabilité est la probabilité que nous cherchons

$$\begin{aligned}\Rightarrow p_1(K, t) &= -\frac{\partial}{\partial \sigma_K^2} \int_{-\infty}^{\delta_c} p_K(\delta) d\delta \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\partial p_K}{\partial \delta} \Big|_{-\infty}^{\delta_c}\end{aligned}$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensitéEvolution non-linéaire :
simulations numériques

On utilise ensuite la solution de la barrière absorbante pour obtenir

$$p_1(K, t) = \frac{\delta_C(t_i, t)}{(2\pi)^{1/2} \sigma_K^3} \exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma_K^2}\right)$$

et $p_1(K, t)d\sigma_K^2$ est la probabilité que, au temps t , un élément de masse choisi (quelconque) est dans un halo de taille K^{-1} , halo qui n'est pas dans un halo plus grand : CQFD.

Si $f(M_K, t)dM_K$ est la probabilité que le plus grand halo qui contient l'élément de masse a une masse dans l'intervalle $(M_K, M_K + dM_K)$ alors

$$f(M_K, t) = p_1(K, t) d\sigma_K^2$$

$$\Rightarrow f(M_K, t) = \frac{\delta_c / \sigma_K}{(2\pi)^{1/2} M_K} \exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma_K^2}\right) \left| \frac{d\ln \sigma_K^2}{d\ln M_K} \right|$$

Définitions et
RappelsClassification des
galaxiesNotions
d'évolution
chimiqueGalaxies spirales et
stabilité des
disques galactiquesGalaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactiqueLa Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulairesIntroduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensitéEvolution non-linéaire :
simulations numériques

Finalement, si dn est le nombre de halos par unité de volume avec une masse dans l'intervalle $(M_K + dM_K)$, la masse totale par unité de volume dans ces halos est $M dn$ et $M dn = \rho_0 f(M, t) dM$.

On a donc

$$\left. \frac{dn}{d \ln M} \right|_t = \rho_0 f(M, t)$$

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

**Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité**

Evolution non-linéaire :
simulations numériques

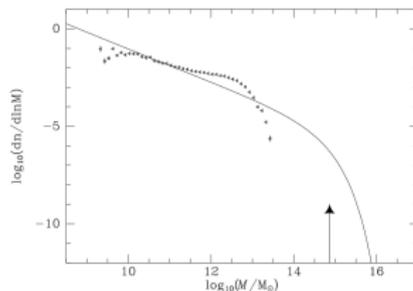


Figure 9.12 The mass function of halos in the standard standard Λ CDM model from equation (9.77) (curve) and the galaxy luminosity function (symbols) scaled to mass-to-light ratio $\Upsilon_R = 220 M_\odot / L_\odot$ (eq. 1.76). The luminosity function is taken from Blanton et al. (2005). The error bars on most points are too small to be seen. The vertical arrow marks the value of M_c .

On remarque une coupure dans la distribution qui correspond à une masse critique M_c où $\sigma_K^2(t_i) = \frac{1}{6} \delta_c^2(t_i, t)$. Au delà de M_c décroissance rapide, en dessous la forme dépend du spectre de puissance.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

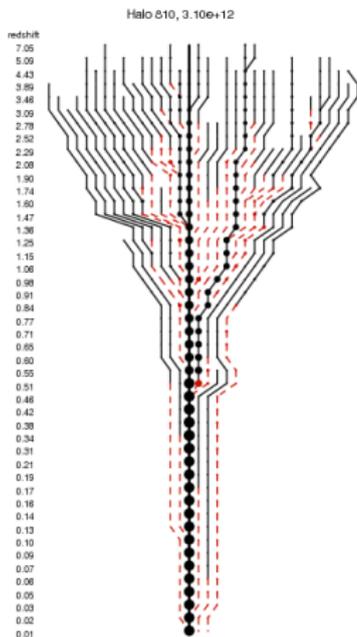
La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques



On peut ensuite prédire,
l'histoire d'accrétion/fusion
d'un halo quelconque !
⚠ Valable que pour la
matière noire

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques

Pour aller plus loin dans l'étude de la formation hiérarchique, les effets non-linéaires doivent être pris en compte de même que l'influence et la physique des baryons.

On a alors besoin de simulations numérique ou de modèles semi-analytiques.

Deux vidéos :

- ▶ Formation des grandes structures : matière noire seulement
- ▶ Formation d'une "Voie Lactée" : les baryons sont inclus dans une resimulation de matière noire.

Définitions et
Rappels

Classification des
galaxies

Notions
d'évolution
chimique

Galaxies spirales et
stabilité des
disques galactiques

Galaxies elliptiques
et notions de
dynamique
galactique

La Voie Lactée et
mouvements
quasi-circulaires

Introduction à la
formation
hiérarchique des
galaxies

Principes généraux

Théorie linéaire : croissance
d'une surdensité

Evolution non-linéaire :
simulations numériques