
GRAVITATION

Niveau

Commentaires du jury

- 2017 : Les applications ne doivent pas nécessairement se limiter à la gravitation terrestre.
- 2016 : Les analogies entre l'électromagnétisme et la gravitation classique présentent des limites qu'il est pertinent de souligner.
- 2015 : Deux nouvelles leçons ont été ajoutées [dont] une leçon intitulée « Gravitation », pour laquelle les candidats s'attacheront, dans le cadre de la physique classique, à développer quelques caractéristiques de l'interaction gravitationnelle.

Bibliographie

- BUP Lien
- J'intègre physique tout en un MPSI PTSI, Salamito page 732
- Mécanique MPSI PCSI Brasselet page 238

Pré-requis

- Principe fondamental de la dynamique.
- Electrostatique, théorème de Gauss.

Expériences

—

Table des matières

1	Force gravitationnelle	2
1.1	Historique et construction	2
1.2	Champ Gravitationnel	2
2	Trajectoire dans le champ de gravité (étude à l'échelle du système solaire)	3
2.1	Loi des aires et force centrale	3
2.2	Aspect énergétique : potentiel effectif	4
2.3	Trajectoires circulaires et satellite géostationnaire	5
3	Etude des galaxies spirales	6
3.1	Description	6
3.2	Equilibre vertical (tampon)	7
3.3	Courbe de rotation et matière noire	8

Introduction

La gravité est une des 4 interactions fondamentales (gravité, électromagnétique, interaction forte (cohésion des particules subatomiques) et faible (responsable de la radioactivité alpha)). C'est cette même interaction qui fait tomber les objet au sol et qui régit le grand ballai de l'univers. Pour arriver au formalisme actuel, il a fallut le travail d'un grand nombre de chercheur.euses (comme d'habitude en science).

1 Force gravitationnelle

1.1 Historique et construction

- Copernic (XV-XVI) : Les planètes tournent autour du soleil dans le système solaire.
- Kepler : (XVIe siècle)
 - Les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le soleil est l'un des foyer.
 - Le rapport entre le demi grand axe de la trajectoire au cube avec le carré de la période est une constante du système solaire. *Enfin, il est certain et tout à fait exact que la proportion qui lie les temps périodiques de chaque couple de planètes est précisément la proportion sesquialtère des distances moyennes.*
- Galilée (XVII) tout corps en chute libre a la même vitesse indépendante de la masse.
- Newton (fin XVII) Principe fondamental de la dynamique et principe d'action réaction (notion de dérivée, calcul différentiel...).

Mélangions tout cela pour faire apparaître la gravité (attention ce n'est plus vraiment une approche historique mais c'est pour nous faire comprendre comment toutes les observations sont transcrites dans la force) :

- 2nd loi de Newton : $m\vec{a} = \vec{F}$ avec Gallilé indépendant de la masse donne : $\vec{F} \propto m_1$
- Principe des actions réciproques : $\vec{F} \propto m_1 m_2$
- On observe que les objet sont **attirés** vers le centre de le Terre ("Bramaghupta") : $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} \propto m_1 m_2 \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$
- 3eme loi de Kepler $\frac{T^2}{R^3} = \text{cte}$ et approximation des orbites circulaires : l'accélération radiale est proportionnelle (analyse dimensionnelle ici) : $r \propto \frac{R}{T^2}$ donc $a_r \propto \frac{1}{R^2}$. Donc comme $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} \propto m_2 \vec{a}_r$ on a $\vec{F} \propto \frac{1}{R^2}$

Conclusion on a

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\frac{\mathcal{G} m_1 m_2}{R^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

Avec $\mathcal{G} = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ la constante gravitationnelle. Elle est introduite en 1873 par Alfred Cornu et Jean-Baptistin Baille.

Mesure de $\mathcal{G}$: c'est une des constantes les plus difficiles à mesurer, car il est difficile de s'affranchir des corps massifs alentours (les murs du labo...). Parmi les mesures effectuées au XXI^e siècle, certaines s'excluent mutuellement !

La première mesure est due à Henry Cavendish, qui a utilisé une balance de torsion.

Ordres de grandeur :

$$F_{\text{proton-électron dans l'atome}} \simeq 10^{-47} N$$

$$F_{\text{humain sur terre}} \simeq 10^3 N$$

$$F_{\text{Soleil Terre}} \simeq 10^{22} N$$

La gravité domine à l'échelle astronomique, des objets massifs.

1.2 Champ Gravitationnel

On écrit $\vec{F} = m\vec{G}$. avec $\vec{G} = \frac{\mathcal{G}M}{r^2} \vec{e}_r$. $\vec{G}$ est le champ gravitationnel.

Cela ça marche pour deux masses ponctuelles. Mais attendez ! Qu'est ce qui nous permet de justifier que la Terre se comporte comme un objet ponctuel pour nous ? On est pas au même degrés de ponctualité quand même. Pour voir cela il faut supposer que la Terre est à symétrie sphérique. Mais pour commencer, le champ de gravité induit par N masses ponctuelles correspond à la sommes des champs créés par toutes les masses. On voit cela par l'additivité des forces dans la loi de Newton.

$$\vec{G} = \sum_i \frac{\mathcal{G}m_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} (\vec{r} - \vec{r}_i)$$

On peut passer au continu :

$$\vec{G} = \iiint \frac{\mathcal{G}\rho}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} (\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}'$$

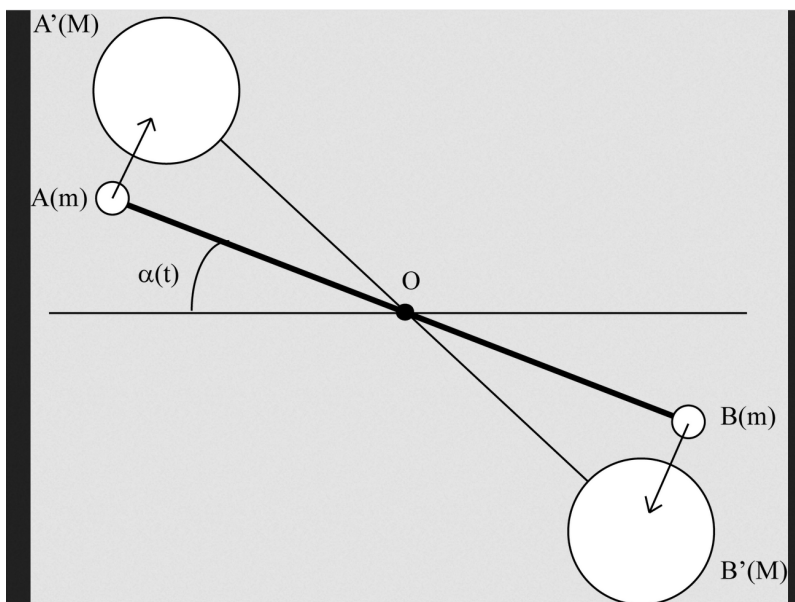


FIGURE 1 – Schéma de la balance de torsion. Les 2 grosses masses influencent le mouvement des petites masses. Cavendish

On retrouve alors la forme du champ $\vec{E}$ créé par des charges. Aussi on peut faire une analogie électrostatique :

Gravité	Electrostatique
m ou ρ massique	q ou ρ densité de charge
$\mathcal{G}$	$\frac{-1}{4\pi\epsilon_0}$
$\vec{G} = -\nabla\phi$	$\vec{E} = -\nabla V$
$\Delta\phi = 4\pi\mathcal{G}\rho$	$\Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$

Limites :

- Le signe, la gravité n'est qu'attractive.
- Les lois de l'électrostatique ne sont valables que si les charges sont au repos.
- Ce ne sont pas du tout les mêmes ordres de grandeurs

Appliquons ceci au cas de la terre. On considère la Terre homogène et sphérique. On applique le théorème de Gauss :

$$\oint \vec{G} d\vec{S} = -4\pi\mathcal{G} \iiint \rho$$

On en déduit lorsque l'on se place à l'extérieur de la Terre :

$$\vec{G} = \frac{\mathcal{G}M}{r^2} \vec{e}_r$$

Avec r la distance au centre de la Terre. On en déduit 2 choses : pour les astres sphériques, on peut les considérer comme des points tant qu'on est à l'extérieur des astres. De plus dans le cas de la vie sur Terre, les échelles de hauteur de la vie quotidienne sont très faibles devant le rayon terrestre ($R_T = 6400$ km), aussi, localement, un individu ressentira un champ gravitationnel constant. On comprends ainsi l'utilisation de $\vec{g} = \frac{\mathcal{G}M}{R_T^2} \vec{u}_z$.

En fait, ce qu'il y a à remettre en cause en premier lieu sur la non uniformité de $\vec{g}$ c'est la force centrifuge due à la rotation de la Terre et les racines crustales.

2 Trajectoire dans le champ de gravité (étude à l'échelle du système solaire)

2.1 Loi des aires et force centrale

On considère le mouvement de la Terre autour du soleil. On considère le soleil fixe comme l'origine d'un repère permettant de définir un référentiel supposé galiléen.

Notre système est la Terre. La seule force qui s'y applique et l'attraction gravitationnelle du Soleil :

$$\mathbf{F} = -\frac{\mathcal{G}M_T M_S}{r^2} \vec{\mathbf{u}}_r$$

On dit que cette force est centrale, car elle passe toujours par le centre du Soleil, supposé fixe.

Ainsi, plutôt que d'utiliser une approche avec le PFD on utilise le TMC :

$$\frac{d\vec{\mathbf{L}}}{dt} = \sum_i \vec{\mathbf{m}} = \vec{\mathbf{0}} \quad \text{avec} \quad \vec{\mathbf{L}} = \vec{\mathbf{S}}\vec{\mathbf{T}} \times M_T \vec{\mathbf{v}}$$

Pourquoi utiliser ceci : on a une quantité conservée ! Cela va faciliter nos calculs. Mais cela nous permet également de montrer que la trajectoire est plane. En effet, $\vec{\mathbf{v}}$, $\vec{\mathbf{S}}\vec{\mathbf{T}}$ et $\vec{\mathbf{L}}$ forment un trièdre, dont $\vec{\mathbf{L}}$ est fixe. $\vec{\mathbf{L}}$ définit alors la normale à un plan dans lequel la trajectoire aura lieu.

Récrivons le moment cinétique :

$$\vec{\mathbf{L}} = \vec{\mathbf{S}}\vec{\mathbf{T}} \times M_T \vec{\mathbf{v}} = M_T r^2 \dot{\theta}$$

La conservation du moment cinétique nous permet de déduire que

$$C = r^2 \dot{\theta} = \text{Cste}$$

Avec les mains, plus on se rapproche du centre attracteur et plus on accélère en tournant autour de ce centre attracteur : Lien.

On appelle C la constante des aires, pourquoi ? Parce que si on considère un intervalle de temps courts, on peut approximer l'aire balayée par le segment ST par l'aire d'un triangle (*en fait on le fait à l'ordre 1 pendant un temps infinitésimal dt donc ça passe*). Or l'aire d'un triangle s'écrit $dA = \frac{1}{2} \|\vec{\mathbf{OM}} \times d\vec{\mathbf{OM}}\|$ Donc :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\delta A}{\delta t} = \frac{\|\vec{\mathbf{S}}\vec{\mathbf{T}} \times \vec{\mathbf{v}} \delta t\|}{2\delta t} = \frac{C}{2}$$

code Kepler aire.

2.2 Aspect énergétique : potentiel effectif

On va maintenant utiliser la conservation de l'énergie mécanique pour déterminer toutes les trajectoires possibles.

$$E_c = \frac{1}{2} M_T \vec{\mathbf{v}}^2 = \frac{1}{2} M_T \left(\dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 \right) = \frac{1}{2} M_T \dot{r}^2 + \frac{1}{2} M_T \frac{C^2}{r^2}$$

Pour déterminer E_p on remarque que la force gravitationnelle est conservative :

$$\begin{aligned} \delta W &= \vec{\mathbf{F}} \cdot d\vec{\mathbf{S}}\vec{\mathbf{T}} \\ &= -\frac{\mathcal{G}M_T M_S}{r^2} dr \\ &= -d\left(\frac{-\mathcal{G}M_T M_S}{r}\right) \\ &= -dE_p \end{aligned}$$

On en déduit donc l'énergie mécanique que l'on sépare en deux parties :

$$E = \frac{1}{2} M_T \dot{r}^2 + E_{p,\text{eff}}(r) \quad \text{avec} \quad E_{p,\text{eff}} = \frac{1}{2} M_T \frac{C^2}{r^2} - \frac{\mathcal{G}M_T M_S}{r}$$

On peut tracer le profil et on distingue plusieurs cas : Code Energie eff :

- $E < 0$ La trajectoire est liée. La trajectoire est une ellipse. La planète se déplace entre $r_{\min}$ et $r_{\max}$. De plus pour de E de l'ordre de $E_{\min}$ alors on peut approximer le potentiel par une parabole et la trajectoire est circulaire (on parle de libérations).
- $E = 0$, $r_{\max}$ est rejeté à l'infini. On a une parabole.
- $E > 0$ Ce sont des états libres. La trajectoire est une hyperbole.

Théorème de Bertrand, les seules forces centrales qui admettent une trajectoire fermée sont les forces en $\vec{\mathbf{r}}$ ou $\frac{\vec{\mathbf{r}}}{r^3}$ ouf!!!

Je ne pense pas que faire la transformation de Babinet soit le mieux.... C'est calculatoire et franchement on voit tout là.

2.3 Trajectoires circulaires et satellite géostationnaire

Considérons le cas particulier des orbites circulaire, par exemple dans le cas d'un satellite autour de la Terre. On peut commencer par se demander à quelle vitesse il tourne. On utilise le PFD :

$$\vec{O}\vec{M} = r\vec{u}_r \quad \vec{v} = r\dot{\theta}\vec{u}_\theta \quad \vec{a} = r\ddot{\theta}\vec{u}_\theta - r\dot{\theta}^2\vec{u}_r$$

$$ma_r = \frac{-\mathcal{G}mM_T}{r^2}$$

$$ma_\theta = 0$$

On en déduit que $\ddot{\theta} = 0$ et :

$$v = \sqrt{\frac{\mathcal{G}M_T}{r}}$$

On peut alors remonter facilement à la troisième loi de Kepler : En effet, la période s'écrit $T = \frac{2\pi r}{v}$. On en déduit que :

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{r^3}{4\pi^2 r^2} \frac{\mathcal{G}M}{r} = \frac{\mathcal{G}M}{4\pi^2} = \text{Cste}$$

Ce résultat s'étant aux trajectoires elliptique (mais c'est plus simple en rond).

Enfin pour finir sur la dynamique autour du système solaire : on s'intéresse à la distance à laquelle les satellites doivent se positionner pour être en orbite géostationnaire (c'est à dire toujours en face du même point sur Terre) : J'intègre physique tout en un MPSI PTSI, Salamito page 732

On doit avoir $T = 1\text{jour} = 86400s$. En réalité il faut prendre en compte le jour sidéral c'est à dire prendre en compte à la fois la rotation de la terre sur elle même et autour du soleil. En effet en 24 h la Terre tourne d'un angle $2\pi + \alpha$ avec α l'angle dont elle se déplace dans son orbite autour du soleil, c'est à dire $\alpha = \frac{2\pi}{365.25}$.

$$T_{\text{sidéral}} = T \frac{2\pi}{2\pi + \alpha} = 86164s$$

donc en utilisant la loi de Kepler juste trouver, on a $r = \sqrt[3]{\frac{T^2 \mathcal{G}M_T}{4\pi^2}} = 4.22 \times 10^7 \text{ m}$ avec $M_T = 5.9722 \times 10^{24} \text{ kg}$. Pour avoir l'altitude, il faut retrancher le rayon de la Terre $R_T = 6378 \text{ km}$:

$$h = r - R_T = 35\,786 \text{ km}$$

Nous avons vu les implications de la gravité à l'échelle du système solaire, nous allons discuter de

Les lois de Kepler (résumé pour la leçon loi de Kepler)

- Les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le soleil est l'un des foyer
- On le montre avec l'approche énergétique, on a des trajectoire entre $r_{\min}$ et $r_{\max}$
- Pour montrer que ce sont des ellipses, soit on utilise el vecteur de Runge Lenz :

$$\vec{R} = \frac{\mathcal{G}Mm}{L} \vec{e} \times \vec{L} \quad \text{Avec} \quad \vec{e} = \frac{L}{\mathcal{G}Mm} \vec{v} - \vec{e}_\theta$$

on montre qu'il est constant, dans le plan du mouvement et on calcul son produit scalaire avec $\vec{r}$

- Transformation de Binet : on pose $u = \frac{1}{r}$, et on transforme

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \frac{-M\mathcal{G}}{r^2} \quad \text{en} \quad \frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{\mathcal{G}M}{C^2}$$

On en déduit :

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta)} \quad \text{avec} \quad p = \frac{C^2}{\mathcal{G}M} \quad \text{et} \quad e = \text{excentricité}$$

- Loi des aires.
- On la démontre en utilisant le théorème de moment cinétique pour la force centrale qu'est la gravité. On passe de C à l'aire en considérant sur un temps élémentaire l'aire balayé par le segment Terre Soleil

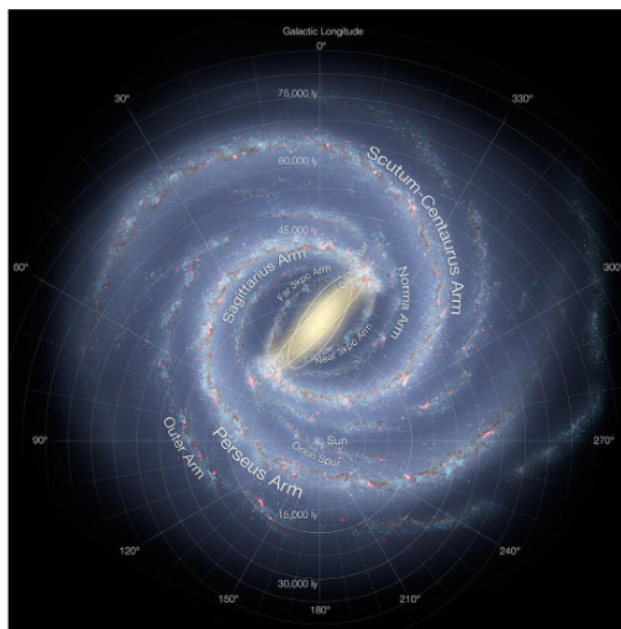
- Troisième loi de Kepler : $\frac{a^3}{T^2} = cst$
 - Pour la trajectoire circulaire, la démo est faite plus haut.
 - Pour une trajectoire elliptique, on utilise la loi des aires. on sait que l'aire d'une ellipse vaut : $\pi a^2 \sqrt{1 - e^2} = \frac{CT}{2}$ puis on fait disparaître l'excentricité en utilisant $2a = r_{max} + r_{min}$ et l'équation de l'ellipse
- Ecart aux lois de Kepler : (Mécanique MPSI PCSI Brasselet page 238 lien dans le site de Francis Pagaud)
 - Ecart de quelques dixième de pourcent dans la troisième loi de Kepler
 - Il faut prendre en compte les autres corps célestes. (c'est l'observation de l'orbite d'Uranus qui a permis de découvrir Neptune elles s'influencent donc.)
 - La non sphéricité de la Terre entraîne des perturbations des satellites qui ne vérifient plus les lois de Kepler car la force n'est plus centrale
 - plus de calculs dans le livre

3 Etude des galaxies spirales

Leçon de Pascal et http://www.orpb.fr/wp-content/uploads/2015/01/Poster_fs2008.pdf

3.1 Description

Vue d'artiste de la voie Lactée



Ordres de grandeur:

bulbe ~ 1 kpc

taille totale ~ 200000 a.l.
 ~ 60 kpc

masse $\sim 10^{10}$ masses solaires

épaisseur ~ 0.3 kpc

masse volumique
 $\rho_0 \sim 1.15 M_{\odot} / \text{pc}^3$

Luminosité par unité de surface
 $l_0 \sim 10^{-6} \text{ W/m}^2$

$$l(r) = l_0 \exp\left(-\frac{r}{R_0}\right)$$

FIGURE 2 – $1\text{pc} = \frac{648000}{\pi} \text{u.a.} \simeq 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$ Distance pour une parallaxe d'une seconde d'arc avec une distance terre soleil avec $1\text{u.a.} = 150 \times 10^6 \text{ km}$ et enfin une année lumière $9.46 \times 10^{12} \text{ km}$

Forme de Disque avec des bras en forme de spirale. On remarque que son épaisseur $h_0 = 0.3\text{kpc}$ est très faible devant son diamètre $D = 60\text{kpc}$.

La voie Lactée contient environ 10^{10} étoiles. On va considérer le disque comme pouvant être décrit de manière continue avec ρ .

- Structure orthoradiale : Bras (que l'on néglige) On suppose $\vec{G}(r, \theta, z) = \vec{G}(r, z)$. Les bras apparaissent plus lumineux car ils correspondent à des ondes de densité menant à la formation d'étoiles!
- Structure radiale. On considère le disque très fin $h_0 \gg D$, donc $\vec{G}(r, z) = \vec{G}(r) = -G(r)\vec{e}_r$.
- On ignore le Bulbe. on observe que la luminosité est max au centre et décroît comme $l(r) = l_0 \exp\left(-\frac{r}{R_0}\right)$ avec $l_0 = 1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ et $R_0 \simeq 10\text{kpc}$. La luminosité est la quantité totale d'énergie émise par unité de temps,

en W , (le flux énergétique), par une étoile, une galaxie, ou un objet astronomique quelconque. On appelle la courbe correspondant à cette équation courbe de lumière.

- La stabilité radiale est issue d'un équilibre entre rotation et gravité. On suppose que les étoiles ont des orbites circulaires. On a donc en faisant un PFD en considérant les trajectoires circulaire :

$$\frac{v^2}{r} = G(r) \quad \implies \quad v(r) = \sqrt{rG(r)}$$

3.2 Equilibre vertical (tampon)

Origine de l'épaisseur : Qu'est ce qui s'oppose à la gravité pour donner une épaisseur finie ? C'est la dispersion des vitesses verticales $\langle v_z^2 \rangle \neq 0$ qui engendre une pression cinétique $P = \rho \langle v_z^2 \rangle$. Les étoiles ont un mouvement verticale. On les considère comme des particules de gaz qui s'agitent. Il y a un gradient de pression entre le centre et le haut, c'est ce qui s'oppose à la gravité.

Hypothèse :

- Stationnaire (pas de t)
- La séparation d'échelle permet de considérer un modèle 1D vertical.
- Les étoiles ont une dispersion de vitesse $\sigma_z^2 = \langle v_z^2 \rangle$ indépendant de z

On utilise $\vec{G} = -\nabla\phi$ et on utilise deux choses : l'équilibre hydrostatique (comme en mécaflu) :

$$\nabla P = -\rho \nabla \phi$$

et l'équation de poisson que l'on déduit de l'analogie électrostatique :

$$\Delta \phi = 4\pi G \rho$$

$$\Delta \phi = \nabla \cdot \nabla \phi = -\sigma_z^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right)$$

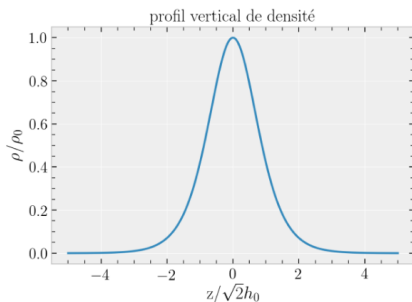
Donc

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right) = \frac{-\sigma_z^2}{4\pi G} \rho$$

Une solution est :

$$\rho(r, z) = \frac{\rho(r, z=0)}{ch^2 \left(\frac{z}{\sqrt{2}h_0(r)} \right)} \quad \text{avec} \quad h_0(r) = \left(\frac{\sigma_z^2}{2\pi G \rho_0(r)} \right)^{1/2} \quad \text{la hauteur caractéristique}$$

Le numérateur de la hauteur caractéristique correspond à la dispersion que l'on compare au dénominateur : la gravité.



Comparaison avec les observations pour la voie lactée

observations
 $h(r) \simeq \text{cte} \sim 0.3 \text{ kpc} \Rightarrow \rho_0(r) \propto \exp\left(-\frac{r}{R_0}\right)$
 hypothèse : $\rho_0(r) \propto I(r)$
 le rapport masse-lumière est constant

théorie
 $\sigma_z^2(r) \propto e^{-\frac{r}{2R_0}}$
 même Doppler

en accord avec les observations ✓

FIGURE 3 – Pascal Wang

On a utilisé des outils continus... On aurait pas réussi avec Newton seul.

3.3 Courbe de rotation et matière noire

On a la loi $v(r) = \sqrt{rG(r)}$. Ainsi pour trouver l'évolution de la vitesse avec le rayon, il nous suffit de déterminer $G(r)$. Pour cela, il faut intégrer l'équation de poisson :

$$\Delta\phi = 4\pi\mathcal{G}\rho \quad \text{avec} \quad \rho \propto e^{-r/R_0}$$

On trouve ρ en étudiant la luminosité, et en considérant le rapport masse lumière constant. On utilise une approche numérique :

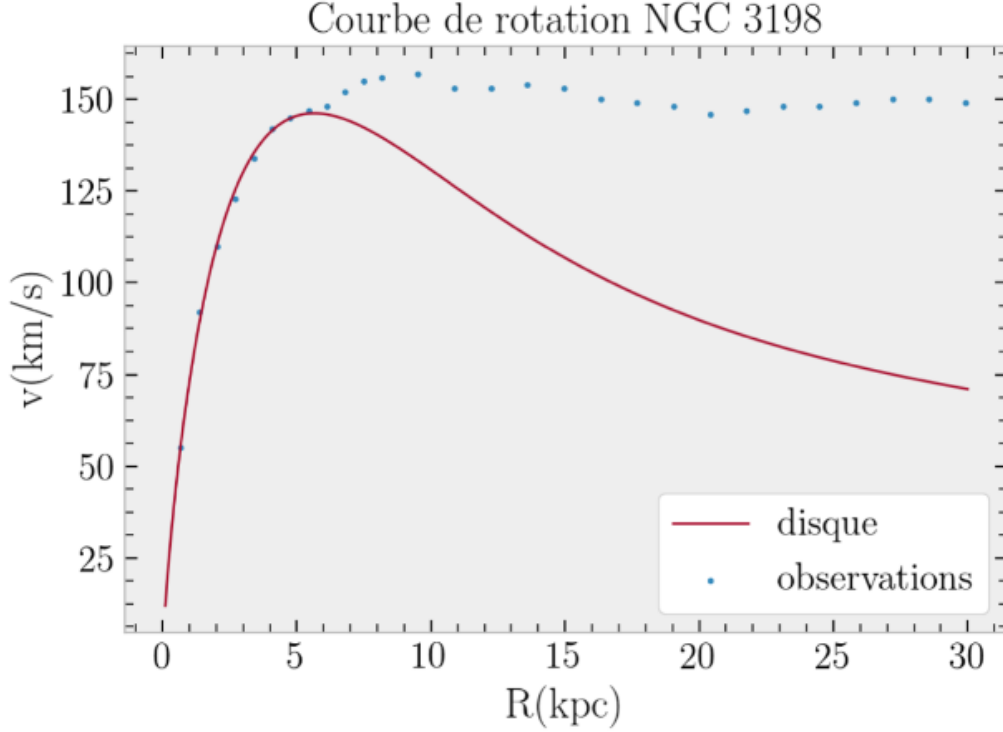


FIGURE 4 – Vitesse pour la galaxie NGC 3198 de rayon 12kpc

On observe que la vitesse des étoiles dans les disques sont censé, d'après nos hypothèse être plus faible sur les bords. Cependant ce n'est pas ce qui est observé... On s'attend notamment qu'à l'extérieur du disque : $r > 12kpc$ la vitesse décroisse : $G \propto M_t/r^2$ donc $v \propto M_t/\sqrt{r}$. Mais on observe que la vitesse reste constante!!!

Comment interpréter ? Si la vitesse de rotation est plus élevée, cela signifie que le champ gravitationnel est plus intense, donc qu'il y a plus de masse que ce que l'on peut déduire en analysant la lumière... C'est l'argument pour la matière noire.

Résolution : On suppose que la matière noire ajoute

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \left(\frac{r}{R_c}\right)^2}$$

ρ_0 et R_c sont des paramètres de fit, on arrive à ajuster. On choisit cette distribution car pour avoir $v = \sqrt{rG(r)} = cst$ il faut que $G(r) \propto M/r^2 \propto \frac{1}{r}$. Le fait que ce soit en $1 + (r/R_c)^2$ est pour éviter la divergence en 0.

Ouverture Il reste encore à montrer l'existence d'une telle matière noire.

"La mission spatiale Euclid, en cours de réalisation pour le compte de l'Agence spatiale européenne, a notamment pour but de mesurer la distribution de la matière noire dans l'Univers et la manière dont cette répartition a évolué depuis le big bang, à l'aide du phénomène de lentilles gravitationnelles. Rappelons que ce rayonnement fossile est observable sous forme d'un rayonnement de corps noir à la température homogène de 2,725 kelvins. Mais d'infimes inhomogénéités de température trahissent l'existence d'inhomogénéités de densité dans la matière primordiale, germes des futures galaxies. Dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, l'étude statistique de

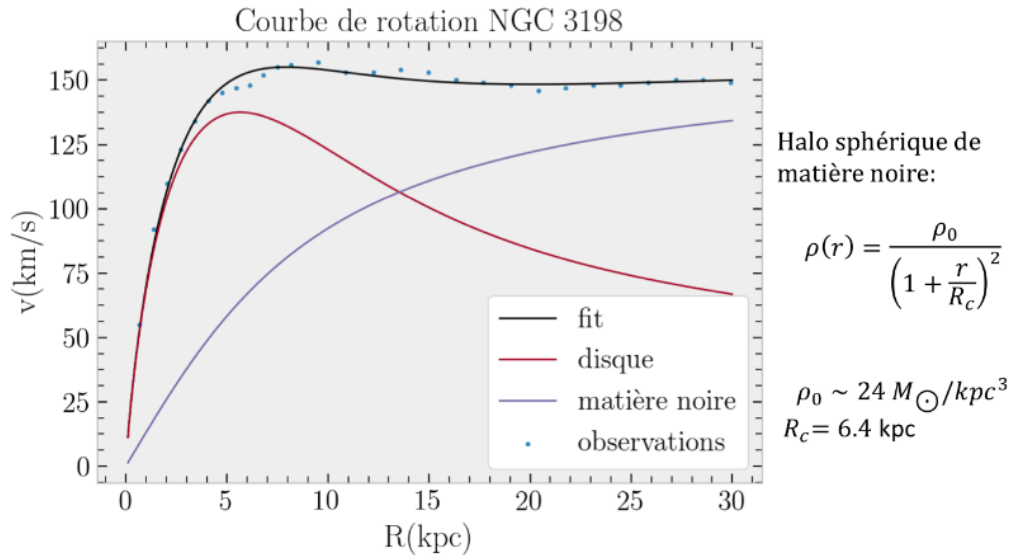


FIGURE 5 – Vitesse pour la galaxie NGC 3198 de rayon 12kpc

ces inhomogénéités permet d'estimer la densité de matière et d'énergie dans l'Univers. Le résultat est surprenant : non seulement la densité de matière dépasse d'un facteur 5 la densité de matière ordinaire (26,8 % contre 4,9 %), mais la densité totale est dominée par une composante d'énergie non détectée jusque-là (68,3 % contre 31,7 % pour la matière)" (pascal)

Conclusion

Nous avons vu que le formalisme permettant de décrire la gravité a été découvert entre le XV et XVII eme siècle, mais qu'il pose encore des question aujourd'hui. D'autres théories sont utilisées pour les objets très massifs (théorie de la relativité générale, elle aussi remise en cause à cause de l'incompatibilité quantique).

Tout d'abord, la compréhension des lois de la gravité permet de comprendre les mouvements de notre échelle à l'échelle des Galaxies. On peut notamment retrouver les lois de Kepler qui sont des observations expérimentales, ou encore calculer les distance nécessaire pour envoyer des satellites géostationnaire. Des anomalies dans le comportement des galaxies avec ce formalisme, nous pousse à supposer l'existence de la matière noire, qui n'est pas encore aujourd'hui vérifiée.