

Rapport Ecrit MALLET BOUCROT

March 27, 2017

I.La Voie Lactée

0.0.1 I.1.Caractéristiques de la Voie Lactée

Quelques chiffres :

Diamètre : 100 000 à 200 000 al

Epaisseur moyenne (resp. au niveau du soleil) : 10 000 al (rep. 700 al)

Nombre d'étoiles qu'elle contient : 100 à 200 milliards

Masse (en masse solaire Ms) de la Voie Lactée (resp. du bulbe central) : 2000×10^9 Ms (resp. $2,7 \times 10^6$ Ms)

Age du Halo : 11 à 12 milliards d'années

Vitesse (% au fond diffus) : 550 km.s-1

Il existe de nombreuses galaxies dans l'Univers. Notre système solaire appartient à la Voie Lactée, qui est constituée de nébuleuses et de plusieurs bras. Il est possible de visualiser cela avec un schéma d'une coupe de la Galaxie.

```
In [50]: from IPython.display import Image
         Image(filename= '220px-Coupe-de-la-voie-lactée.jpg')
```

```
Out [50]:
```

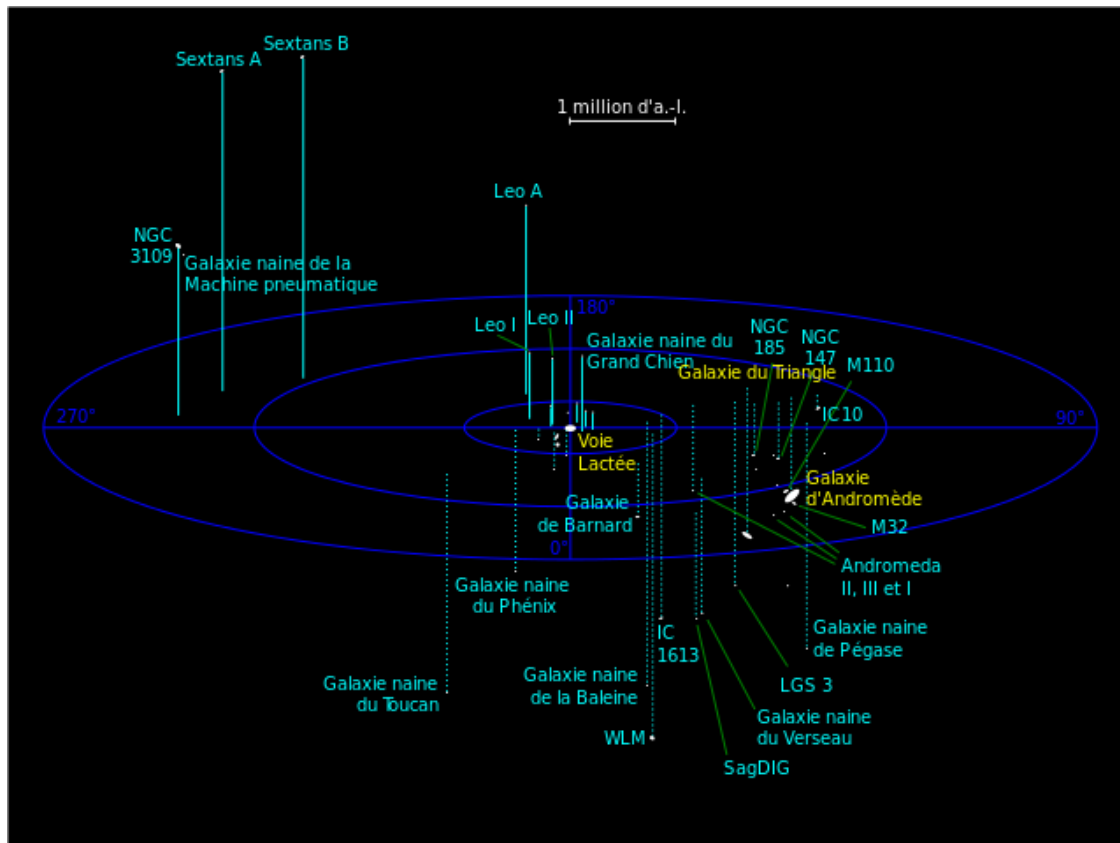


La Voie lactée appartient à un groupe de galaxies simplement appelé Groupe local, qui comprend deux grandes galaxies : la Voie lactée et la galaxie d'Andromède (aussi appelée M31), quelques objets intermédiaires et plus de 25 galaxies naines. Le Groupe local est organisé suivant deux sous-groupes, chacun centré sur la Voie lactée et M31 respectivement.

La galaxie d'Andromède est la grande galaxie la plus proche de notre galaxie, à environ 2,5 millions d'années lumière mais il y a beaucoup de petites galaxies très proches. La plus proche de toutes est la galaxie du Grand Chien, située à environ 25 000 années-lumière de nous et à 42 000 années-lumière du centre galactique, suivie respectivement par la galaxie du Sagittaire à 80 000 années-lumière, puis par le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan à 179 000 et 210 000 années-lumière respectivement.

```
In [51]: from IPython.display import Image
         Image(filename= 'Galaxies_du_Groupe_local_svg.png')

Out[51]:
```



0.0.2 I.2.Modélisation de la Voie Lactée

On sait donc que la Voie Lactée est une galaxie en spirale composée de plusieurs bras. On peut alors simuler sa rotation et sa forme en spirale :

```
In [52]: %matplotlib
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import animation

def al_to_kparsec(al):
    return (al/1000)*306.601

def kparsec_to_al(kparsec):
    return kparsec*3261.6

def Vkpc_to_al(kpc):
    return kpc*1.029e+17

def coef(radius,vitesse):
```

```

echelledist=10000
echelletemps=0.1
perimetre=radius*3.14159265*2*echelledist
Ttotale=(perimetre/vitesse)*echelletemps
#26 secondes
coef=11/Ttotale
return coef

def nvlle(name,rad,NEW_ou_MOND,couleur) :
    global n
    n=n+1
    name=plt.Circle((5, -5), size, fc=couleur)
    radius.append(rad)
    nom.append(name)
    if (NEW_ou_MOND==0):
        coeffic.append(coef(rad,Vkpc_to_al(s0/((1+(al_to_kparsec(rad*10**4
    else:
        coeffic.append(coef(rad,655))
    return

def init():
    for i in range(n) :
        ax.add_patch(nom[i])
    return nom

def animate(t):
    for i in range(n) :
        x,y = nom[i].center
        nom[i].center=(xcenter+radius[i] * np.sin(np.radians(t*coeffic[i]))
        '''t1=t*coeffic[0]
        t2=t*coeffic[1] #mettre le radius en dizaine de milliers d'années lun
        t3=t*coeffic[2]
        x3=xcenter+radius[2] * np.sin(np.radians(t3))
        y3=ycenter+radius[2] * np.cos(np.radians(t3))
        x2=xcenter+radius[1] * np.sin(np.radians(t2))
        y2=ycenter+radius[1] * np.cos(np.radians(t2))
        x=xcenter+radius[0] * np.sin(np.radians(t1))
        y=xcenter+radius[0] * np.cos(np.radians(t1))
        patch.center=(x,y)
        soleil.center=(x2,y2)
        saturne.center=(x3,y3) '''
        #plt.plot(x,y,'ro')
    return nom

def model(nbEtoile):
    variable=[]

```

```

    for i in range(nbEtoile):
        variable.append(['E'+str(i)])
        j=i
        if i==0:
            j=0.1
        nvllle(variable[i],j*0.1,1,'b')
    return

global radius
global size
global coeffic
global s0
global nom
s0=2.3*10**40/1**2 # en kg/kpc^2
rc=1 # en kpc
coeffic=[]
radius=[]
nom=[]
global n
n=0
fig=plt.figure()
fig.set_dpi(100)
fig.set_size_inches(7,6.5)

ax = plt.axes(xlim=(0,10),ylim=(0,10),)

size = 0.01
xcenter = 5
ycenter = 5
#1 unité = 10 000 années lumières
#1 seconde = 10 million d'années
echelledist=10000
echelletemps=0.1
plt.plot(5,5,'.',color='black')

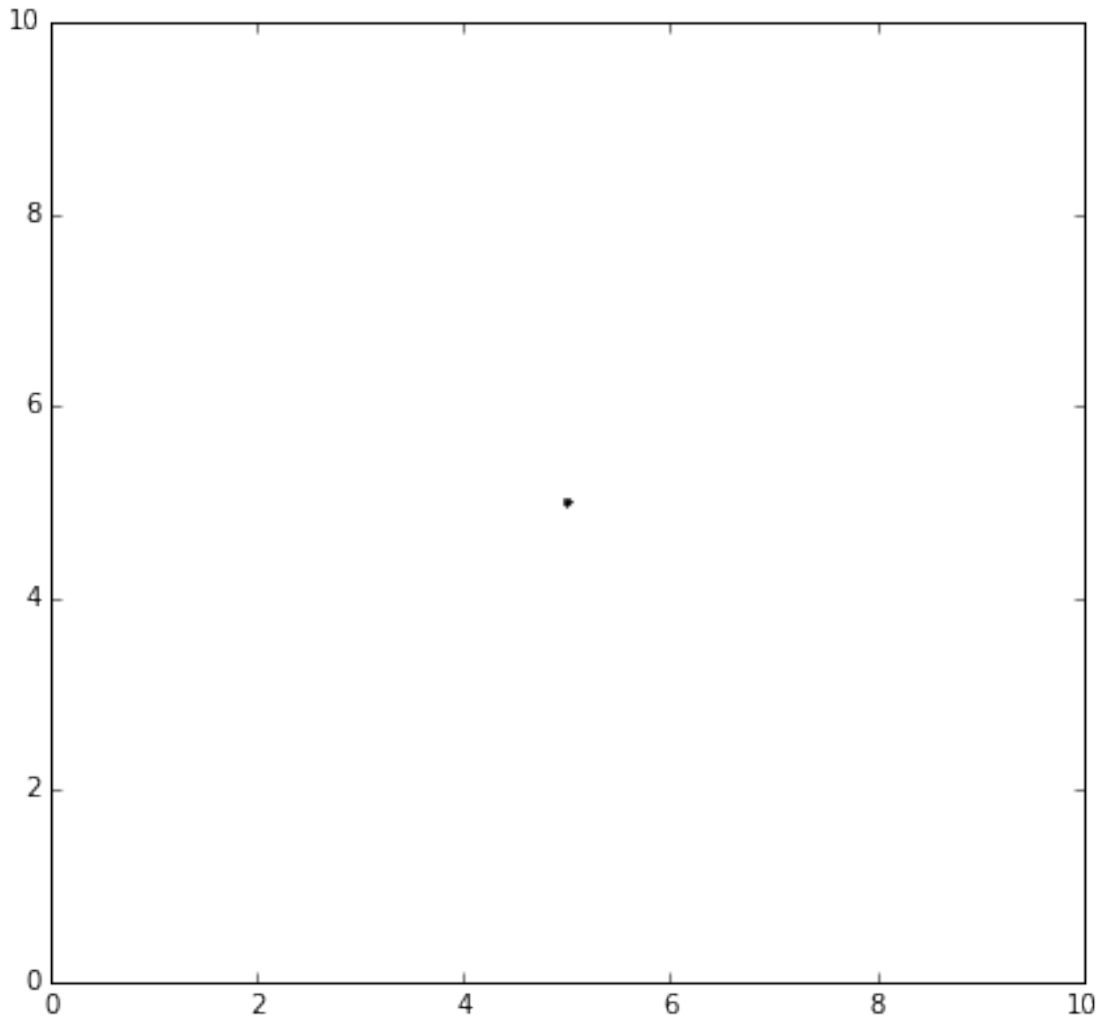
'''nvllle(E1,4,1,'b')
nvllle(soleil,2.7,1,'b')
nvllle(E2,2,1,'b')
nvllle(E3,3,1,'b')'''

model(50)

```

```
anim=animation.FuncAnimation(fig, animate, init_func=init, frames=10000, interval=100, repeat=True)
plt.show()
```

Using matplotlib backend: TkAgg



Ceci n'est pas une simulation exacte de la Voie Lactée, elle se rapproche plus d'une généralité des galaxies en spirale. La vitesse de rotation ne correspond pas forcément non plus à celle de la Voie Lactée, dont on va parler dans la seconde partie.

0.1 II. Différence entre observation et théorie

0.1.1 II.1. La rotation des galaxies

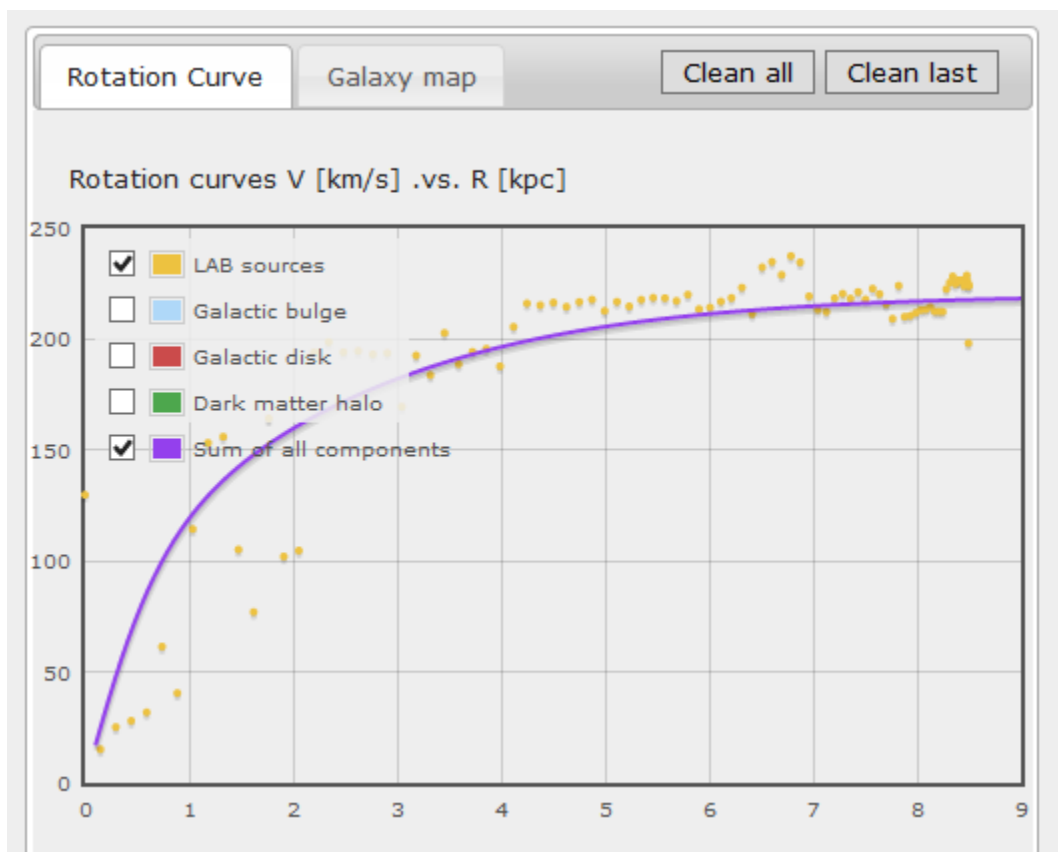
La rotation des galaxies est en partie à l'origine de l'émergence de la matière noire dans les esprits. En effet, les calculs prévoyant la courbe de rotation des galaxies ne sont pas en accord avec les

observations réalisées par les physiciens. On observe en réalité une vitesse presque constante, alors que les calculs utilisant les lois de Newton prévoient une vitesse de rotation qui décroît lorsque la distance au centre de la galaxie augmente. Il existe un nombre limité d'explications alternatives à la matière noire, dont la théorie de MOND, même si l'existence de matière noire reste la piste privilégiée pour expliquer cette différence entre observations et théorie.

On a pu observer nous même, sur le site Eu-HOU, une partie de la Galaxie, et donc obtenir une courbe de rotation qui lui est propre :

```
In [53]: from IPython.display import Image
         Image(filename= '2hgfi.png')
```

Out [53]:



Cette courbe ne ressemble pas du tout à ce qui était prévu, et c'est alors là qu'intervient la théorie de MOND.

0.1.2 II.2. La théorie de MOND (MODified Newtonians Dynamics)

La théorie de MOND vient du physicien israélien Mordehai Milgrom en 1983 afin de résoudre le problème de la rotation trop rapide des galaxies. La théorie MOND cherche alors à être en accord avec les observations et reprend les calculs de Newton ainsi que les formules, en effectuant des

approximations et des modifications afin de coller au modèle observé. Voici les calculs réalisés par Milgrom, quelque peu simplifiés :

D'après les lois de Newton, on peut écrire une expression de a en fonction de v et de r , et en fonction de G , M et r :

$a = v^2/r = G \cdot M/r^2$ où a est l'accélération, v la vitesse du corps que l'on étudie, G la constante de gravitation universelle, M la masse de la galaxie et r le rayon de la trajectoire circulaire.

La masse de la galaxie est donnée par :

$M = \pi(R_{\max})^2 \cdot e \cdot p$ où R_{\max} est le rayon de la galaxie, e l'épaisseur de la galaxie et p sa masse volumique.

Si on suppose que la totalité de la masse se trouve à l'intérieur du rayon (ce qui est en réalité une approximation), on peut déduire le rayon de la galaxie, qui est alors environ égal à r :

$R_{\max} = \sqrt{M/\pi \cdot e \cdot p}$ Cela nous donne alors, avec la première équation, une expression de la vitesse :

$v = \sqrt{G(M \cdot \pi \cdot e \cdot p)^{1/4}}$ La seconde loi de Newton conduit à une expression de l'accélération, en fonction de la constante gravitationnelle, de la masse du corps qui attire l'objet et de la distance entre les deux :

$a = G \cdot M/r^2$ On observe alors que dans cette théorie, l'attraction de deux corps décroît comme le carré de leur distance l'un à l'autre. Mordehai Milgrom n'est pas en accord avec cela, et il modifie alors la loi de Newton.

Il postule alors qu'au lieu de la traditionnelle " $F=m \cdot a$ ", la formule la plus juste est :

$F = m \cdot u(a/a_0) \cdot a$, avec $u(x) = 1$ si $x \gg 1$ et $u(x) = x$ sinon. De plus, avec une bonne approximation, la force gravitationnelle est :

$F = G \cdot M \cdot m/r^2$ Puisque a est très petit devant a_0 , on a :

$u(a/a_0) = a/a_0$ et $a = (\sqrt{G \cdot M \cdot a_0})/r$ On a alors la vitesse de rotation :

$v = (G \cdot M \cdot a_0)^{1/4}$ On a alors, d'après Milgrom, une vitesse constante quel que soit l'éloignement au centre de la galaxie.

La valeur de a_0 (en $m \cdot s^{-2}$) est la valeur que Milgrom a déterminé pour sa constante à partir d'observations astrophysiques, la valeur de G est celle de la constante universelle de gravitation (en $m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$) et M est égale à la masse de la Voie Lactée (en kg).

On peut modéliser la différence entre le modèle de Newton et celui que propose Milgrom en Python.

```
In [54]: %matplotlib inline
```

```
from pylab import *
G=(6.66*10**(-11))*2.5*10**(9) #en kpc^2.kg^-1.s-2, constante de gravitation
a0=(1.1*10**(-10))*2.5*10**(9) # kpc.s-2, constante de Milgrom
```



```

rc=1 # en kpc
s0=2.3*10**40/1**2 # en kg/kpc^2
M=4.3*10**(41) # en kg, masse de la galaxie

x = np.linspace(0, 50, 100)
v=(G*M*a0)**1/4+x-x
s=s0/((1+x**2+rc**2)**3/2)

figure(figsize=(10,6), dpi=80)
plot(x, s, color="blue", linewidth=2.5, linestyle="-", label="théorie de M")

plot(x, v, color="red", linewidth=2.5, linestyle="-", label="théorie de M")

xmin ,xmax = x.min(), x.max()
ymin, ymax = v.min(), v.max()
dx = (xmax - xmin) * 0.2
dy = (ymax - ymin) * 0.2
xlim(xmin - dx, xmax + dx)
ylim(ymin - dy, ymax + dy)

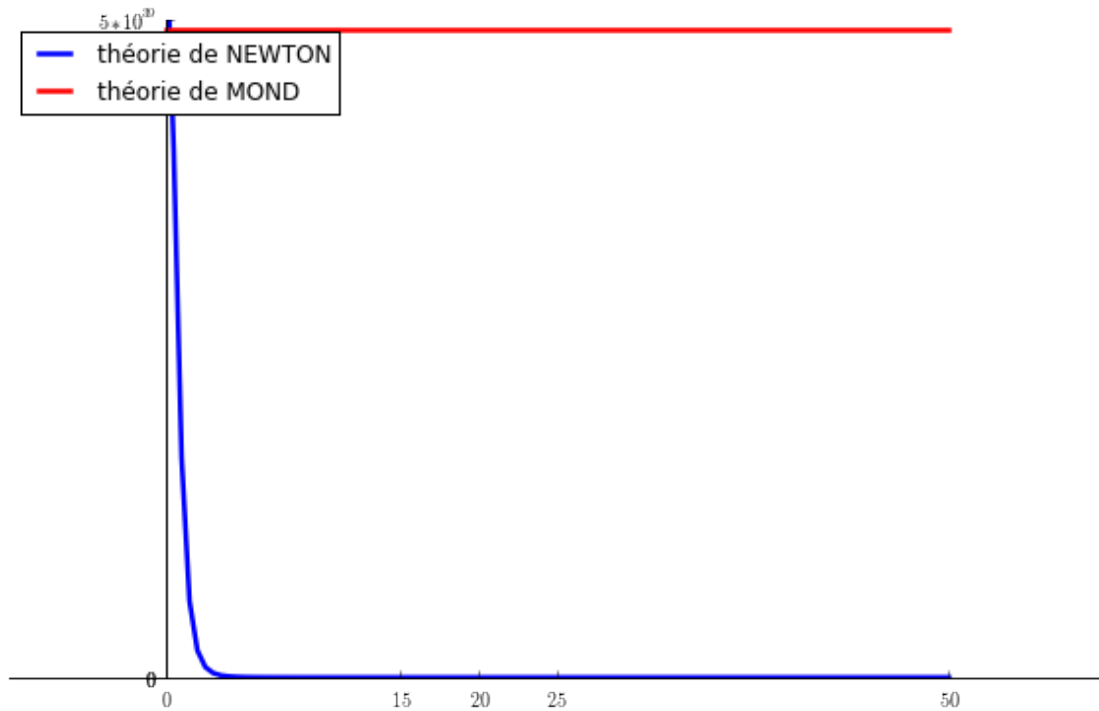
xticks([0, 15, 20, 25, 50],
        [r'$0$', r'$15$', r'$20$', r'$25$', r'$50$'])
yticks([0, 0, 5*10**(39)],
        [r'$0$', r'$0$', r'$5*10^{39}$'])

ax = gca()
ax.spines['right'].set_color('none')
ax.spines['top'].set_color('none')
ax.xaxis.set_ticks_position('bottom')
ax.spines['bottom'].set_position(('data',0))
ax.yaxis.set_ticks_position('left')
ax.spines['left'].set_position(('data',0))

legend(loc='upper left')

show()

```



0.2 III. La matière Noire

0.2.1 III.1 La nature de la matière Noire et sa place dans l'Univers

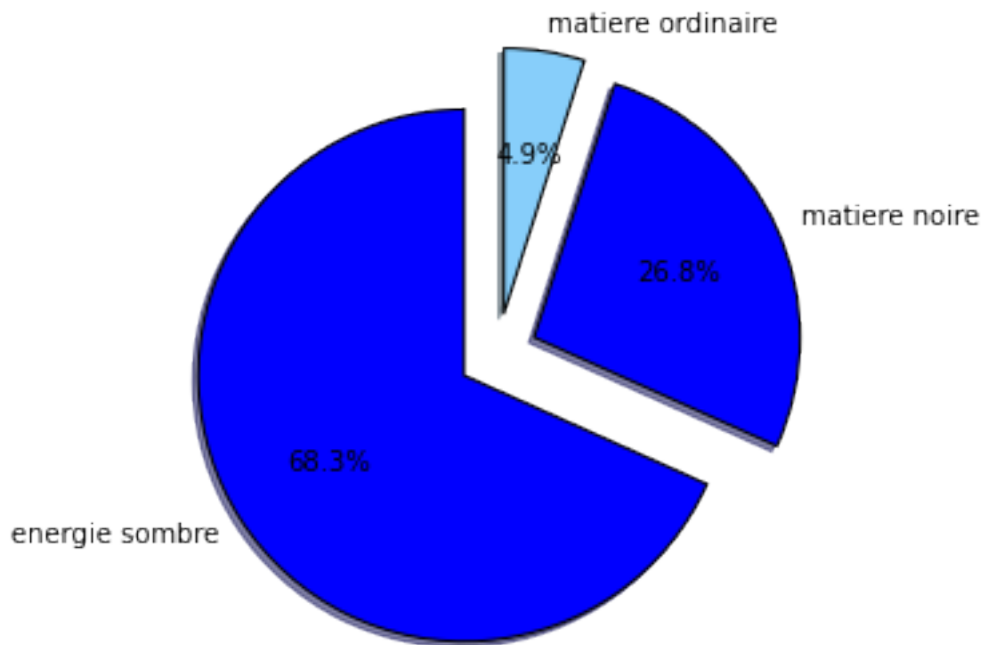
À partir des vitesses de rotation des étoiles et des galaxies, il a été possible de déduire sa répartition. Une grande quantité de cette matière devrait se trouver au sein même des galaxies, non pas dans le disque galactique mais sous forme d'un halo englobant la galaxie. Cette configuration permet une stabilité du disque galactique. Il est en revanche impossible que la matière noire se trouve dans le disque galactique, car on devrait alors observer dans le mouvement des étoiles une oscillation perpendiculaire au disque, que nous ne voyons pas.

La matière constitue une grande partie de l'Univers, même si on sait pas ce qu'elle est réellement .

```
In [55]: %matplotlib inline
import matplotlib.pyplot as plt
labels = 'energie sombre', 'matiere noire', 'matiere ordinaire'
sizes = [68.3, 26.8, 4.9]
colors = ['blue', 'blue', 'lightskyblue']
explode=[0.15, 0.15, 0.15]
plt.pie( sizes, explode=explode, labels=labels, colors=colors,
        autopct='%1.1f%%', shadow=True, startangle=90)

plt.axis('equal')
```

```
plt.show()
```



La matière Noire a émergé dans les esprits en 1933, lorsque l'astronome suisse Fritz Zwicky étudie un petit groupe de sept galaxies dans l'amas de la Chevelure de Bérénice. Son objectif est de calculer la masse totale de cet amas en étudiant la vitesse et il découvre alors des anomalies par rapport aux prévisions. A l'époque, le matériel étant de moins bonne qualité qu'à ce jour, il n'exclut pas les erreurs de mesures mais en parle tout de même à ses collègues. De là naît la théorie de l'existence de la matière Noire.

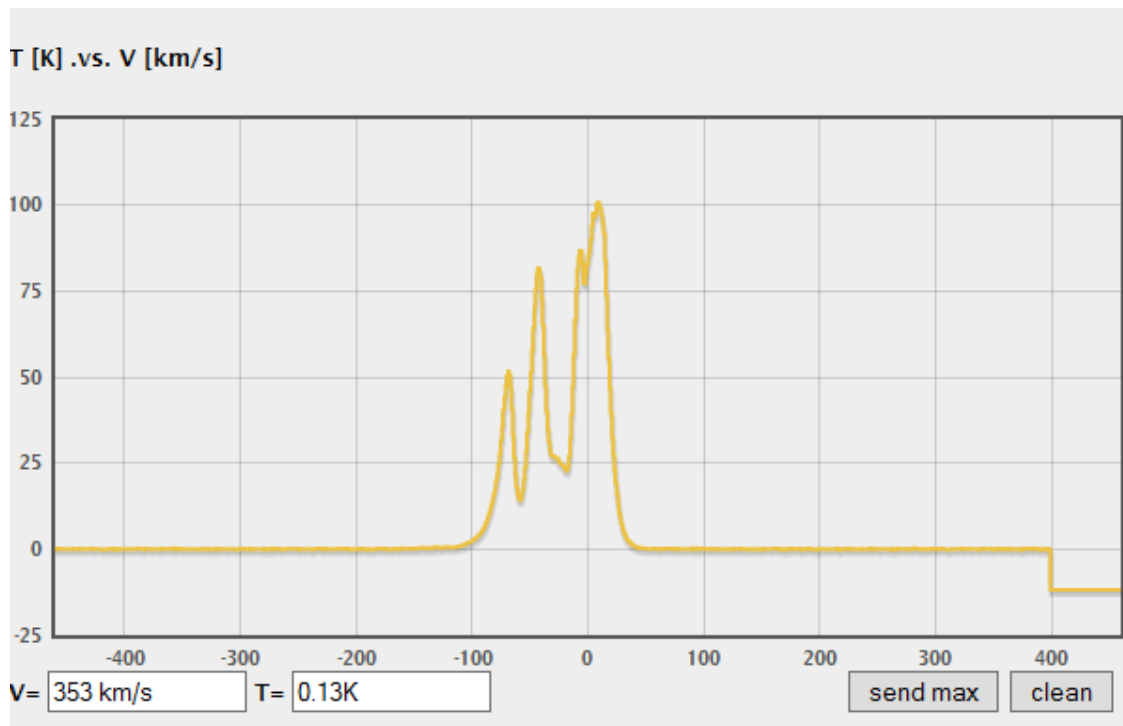
Comme nous l'avons souligné précédemment, cette idée vient en grande partie du fait des courbes de rotation des galaxies plates, même si Mordehai Milgrom a fondé une toute autre théorie que l'existence de cette matière.

La nature de la matière est d'ailleurs à ce jour inconnue. Deux grandes théories s'affrontent : la matière Noire chaude et la matière Noire froide. Celles-ci reposent sur la masse des particules composant la matière noire et par conséquent, à leur vitesse. Dans le cas de matière noire dite « chaude », les particules ont des vitesses proches de celle de la lumière, tandis que celles composant une matière noire dite « froide » seraient plus massives et donc plus lentes.

Dans les années 1990, des cartographies précises des sources d'émission de rayons X dans l'Univers, obtenues grâce au satellite Rosat, ont mis en évidence la présence de gigantesques nuages de gaz ionisés au sein des amas de galaxies. Ces nuages sont la preuve de la présence de matière noire autour des galaxies. En effet, pour atteindre de telles températures, les particules constituant le nuage doivent être accélérées à des vitesses très élevées, ce que nous pouvons visualiser ici :

```
In [56]: from IPython.display import Image
         Image(filename= '2hgf.png')
```

Out [56] :



Le pic correspond à une forte augmentation de température, donc de densité, et on l'explique par la présence d'un nuage de gaz.

0.2.2 III.2 Radioastronomie et spectroscopie de l'Hydrogène neutre.

La radioastronomie est une branche de l'astronomie traitant de l'observation du ciel dans le domaine des ondes radio. C'est une science relativement jeune qui a fait ses débuts dans les années 1930.

La première observation radio astronomique a été faite accidentellement par Karl Jansky en 1933. Il cherchait à éliminer le bruit de fond d'un récepteur de radio dans le domaine décimétrique (haute fréquence). Le bruit de fond est produit par l'agitation thermique des électrons dans l'appareil lui-même, et ne peut être supprimé que si le récepteur est à la température de 0 K. A une température non nulle (donc à toute température réelle), un bruit de fond est inévitable. Il est d'autant plus intense que la température est plus élevée.

Jansky mesurait le bruit de fond qu'il recevait, et le trouvait plus intense que ce que le calcul prévoyait. Après avoir éliminé toutes sortes de sources possibles, il ne restait plus qu'une seule explication : un rayonnement radioélectrique provenait de l'espace. Il a remarqué que le bruit capté était variable au cours de la journée et, mesurant la période de cette variation, il a trouvé 23 h 56 mn. On reconnaît là la période sidérale de rotation de la Terre, ce qui montre que le surcroît de bruit n'était pas lié à la Terre, mais à l'espace extérieur. Les antennes utilisées par Jansky étaient simplement des dipôles, des fils électriques tendus.

Vers 1935, en utilisant des antennes directrices, il a montré que le rayonnement était plus intense vers la Voie Lactée, et particulièrement dans la direction du Sagittaire.

Son travail a été repris en 1945 par Groote Reber, qui a construit lui-même une antenne à miroir parabolique de 9 m de diamètre. Le miroir renvoie les ondes vers son foyer, où est placée l'antenne réceptrice. Il a établi, à la longueur d'onde de 1,87 m, la première carte du ciel montrant les isophotes (lignes qui émettent la même intensité lumineuse) de la Voie Lactée.

```
In [57]: from IPython.display import Image  
         Image(filename= 'tele.png')
```

Out [57]:



Ceci est le premier radiotélescope, de Groote Reber

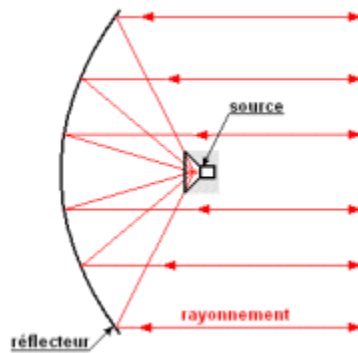
Karl Jansky est donc le découvreur des ondes radio cosmiques, et Groote Reber le créateur de la radioastronomie. Ce radiotélescope a été transporté, il est aujourd'hui visible à Green Bank en Virginie.

Le radar a été inventé et utilisé lors de la seconde guerre mondiale. A la fin de celle-ci, certains appareils ne servant plus ont été récupérés par des astronomes pour constituer des paraboles réceptrices à peu de frais. Ce sont les ancêtres des radiotélescopes.

Un radiotélescope est comme un télescope optique : il allie un collecteur de lumière à un détecteur. Comme en optique, les signaux les plus faibles sont les plus intéressants, et on doit les capter dans de bonnes conditions. Il faut donc, pareillement, augmenter la surface de réception des ondes, et les concentrer en un point où se trouve le détecteur. On utilise donc des miroirs qui renvoient les ondes vers le détecteur, comme on le fait dans un télescope optique.

```
In [58]: from IPython.display import Image  
         Image(filename= 'bloup.png')
```

Out [58] :

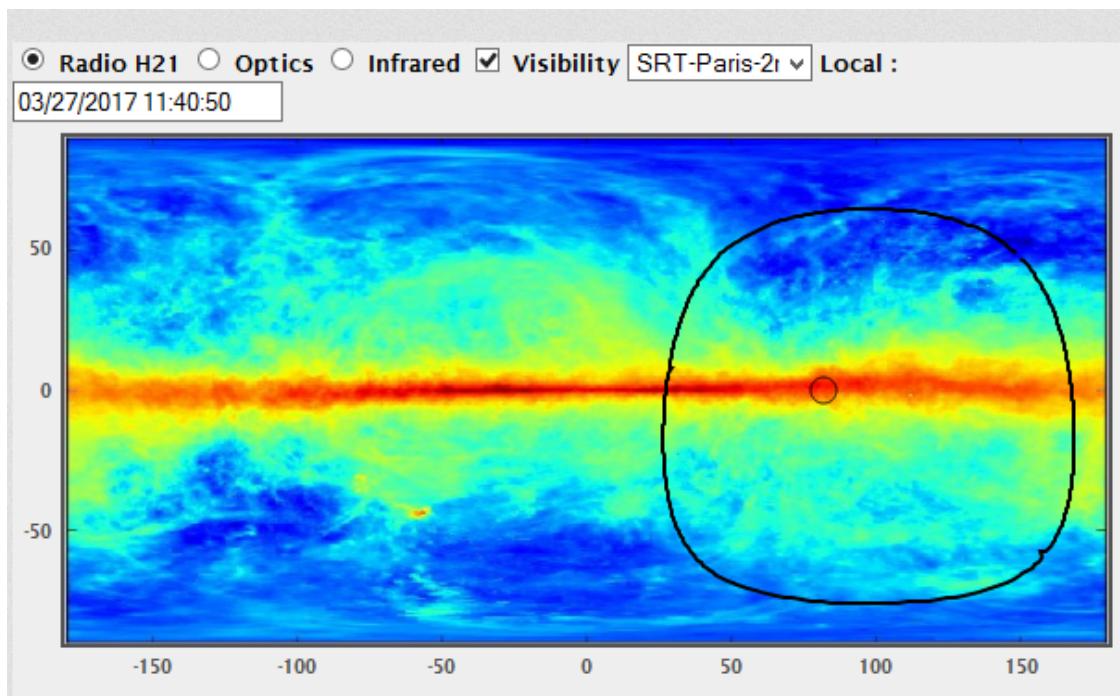


Une région HI (lire « H 1 ») est un nuage interstellaire composé d'hydrogène atomique neutre. Ces régions ne sont pas lumineuses mais sont détectables car les atomes présents en faible quantité émettent un rayonnement dans la région à 21 cm (1 420 MHz) du spectre radio, même à basse température.

Les spectres et autres données reçus par l'antenne proviennent des émissions de l'Hydrogène neutre dans la Galaxie, ce qui permet alors de déterminer la densité, et à fortiori la température, pour réaliser le graphe donné plus tôt.

```
In [59]: from IPython.display import Image
         Image(filename= 'hyd.png')
```

Out [59] :



Ici, la couleur rouge correspond à une émission élevée donc à une forte densité.