

La Masse Noire est de l'Énergie Potentielle

Nicolas Poupart, Chercheur Indépendant (2025)
99 Chemin Scraire, Mille-Isles, Québec, Canada (J0R 1A0)
(450) 939-2167
nicolas.poupart@yahoo.fr

Introduction

Depuis le postulat de l'existence d'une matière noire galactique par Vera Rubin pour expliquer la platitude des courbes de rotation galactique (1) (2) (3) aucune explication convaincante sur la nature de cette matière noire ne fut apportée. Les tentatives pour expliquer cette masse manquante par une forme invisible de matière baryonique ordinaire furent, en grande partie, réfutées par les programmes AGAPE (4), MACHO (5) et EROS (6). Il en est de même pour les explications utilisant de la matière non-baryonique ordinaire ou une forme de particule exotique, pouvant expliquer cette masse manquante. Les nombreuses tentatives de détection ont pour l'instant toutes échouées comme les programmes LUX (7), PICASSO (8), PICO (9) ou le SuperCDMS (10). De même, le nouvel accélérateur du CERN semble confirmer que la physique se limite au modèle standard et l'existence d'une particule exotique est de moins en moins probable. Il semble également extrêmement difficile d'expliquer ce phénomène avec la théorie de la gravitation actuelle soit la gravitation de Newton ou la relativité générale.

En cosmologie, le modèle standard demeure le modèle Λ CDM qui postule l'existence d'une matière noire froide. Le concept de masse est indissociable, pour la majorité des physiciens, de celui de matière. D'ailleurs le terme « matière noire » est utilisé avec affirmation alors que dans les faits, il ne s'agit que de « masse noire ». Une alternative à l'existence d'une masse noire réelle consiste à modifier la gravitation de manière à adapter celle-ci au changement de régime au niveau galactique. Cependant, un tel projet se butte à la prodigieuse adéquation de la relativité générale à la réalité phénoménologique et à l'existence physique de la masse noire (11) (12) (13).

L'explication proposée dans le présent article est de nature entièrement différente. La masse noire n'est pas une forme de matière réelle quelconque, elle n'est pas non plus causée par une théorie de la gravitation alternative. Il ne s'agit que d'un épiphénomène causé par la théorie actuelle de la gravitation. Il ne s'agit que de l'énergie potentielle gravitationnelle stockée dans le champ gravitationnel. Les seuls axiomes utilisés sont $E = -GmM / d$ et $E = mc^2$. Il ne s'agit donc que de l'application judicieuse de la bonne vieille physique classique.

L'énergie potentielle gravitationnelle utile

Si nous considérons l'équation de la gravitation newtonienne $F = GmM / d^2$ nous obtenons par intégration, de d à l'infini, l'équation de l'énergie potentielle $E_p = -GmM / d$. Cette équation génère une énergie potentielle négative, utile en pratique pour calculer les mouvements des corps, cependant totalement inappropriée pour calculer l'énergie potentielle réelle totale d'un système. Pour calculer l'énergie potentielle « réelle » nous devons calculer l'énergie entre deux états du système comme en élevant une masse m de la position d d'une hauteur h ; soit $\Delta E_p = E_p(d + h) - E_p(d) = GmM / d - GmM / (d + h) = GmMh / (d^2 + dh)$. Il s'agit de la forme « utilisable » de l'énergie potentielle gravitationnelle car l'énergie absolue négative E_p n'a pas d'interprétation physique « utile ».

Cette équation (ΔE_p) bien qu'utile pour calculer l'énergie potentielle à la surface de la terre, par exemple, devient inutilisable lorsqu'il s'agit de calculer l'énergie potentielle entre deux planètes, deux étoiles ou deux galaxies. En effet, si la distance $d + h$, de centre à centre, est bien définie, celui de d est totalement obscurs. Nous résoudrons l'ambiguïté de d en calculant la différence d'énergie entre celui de l'état de boule compacte de masse $M_t = m + M$ et celui de l'état de deux boules de masses m et M séparées d'une distance centre à centre de d . Pour se faire, nous devons attribuer des rayons r et R et des volumes $v = 4\pi r^3/3$ et $V = 4\pi R^3/3$ à nos deux corps de masses volumiques m/v et M/V respectivement.

Le volume total de la boule compacte est $V_t = V + v = 4\pi/3 (R^3 + r^3)$ et son rayon $R_t = (R^3 + r^3)^{1/3}$. En supposant les masses volumiques égales $m/v = M/V$, celle de la boule compacte sera identique ($m/v = M/V = M_t/V_t$), dans le cas contraire, elle possèdera une masse volumique « moyenne » considérant l'apport respectif de matière des deux boules. Nous savons calculer l'énergie potentielle d'une boule homogène qui est $E_p = -3GM^2 / 5R$ nous avons donc :

$$\begin{aligned} \text{État initial :} & E_i = -(3GM_t^2 / 5R_t) \\ \text{État final :} & E_f = -(3GM^2 / 5R) - (3Gm^2 / 5r) - (GmM / d) \\ \text{Différence :} & \Delta E_p = E_f - E_i = (3GM_t^2 / 5R_t) - (3GM^2 / 5R) - (3Gm^2 / 5r) - (GmM / d) \end{aligned}$$

Cette équation permet donc de calculer la différence énergétique entre l'état initial de plus basse énergie, la boule compacte, et la séparation de celle-ci en deux boules compactes distinctes. Nous ferons remarquer qu'il s'agit d'un simple réarrangement de la position de la matière constituante soit qui préserve la masse volumique des composants. Cette stricte condition permet d'éviter d'impliquer d'autres forces que la gravité.

L'énergie potentielle gravitationnelle est massive

L'énergie potentielle gravitationnelle peut s'écrire $E_p = m_p c^2$ car elle doit nécessairement être stockée sous forme de masse dans le système. Cette affirmation peut très facilement se vérifier par une expérience de pensée très simple. Imaginez un réacteur nucléaire transformant une masse m_n en énergie électrique permettant d'élever une masse m d'une hauteur h . La question de savoir si la masse de la terre avant la transformation est égale à celle après la transformation ne devrait pas être sujette à débat. Comme il y a conservation de l'énergie de la masse m_n dans le système terre, la théorie de la relativité générale garantie qu'il n'y a aucune modification de son effet gravitationnel. La question de savoir s'il s'agit d'une « vraie » masse n'a aucun sens car la masse n'est que ce qui peut être mesurée par son effet gravitationnel ou inertiel. De plus, comme l'équivalence masse inertielle et gravitationnelle n'a jamais encore été violée (14), nous pouvons considérer, pour l'instant, la pleine égalité de cette énergie potentielle et de son équivalence massive.

Calcul de l'énergie potentielle de corps célestes

	m (kg)	M (kg)	r (m)	R (m)	d (m)	R_t (m)
Lune + Terre	7.348E+22	5.972E+24	1.738E+06	6.378E+06	3.844E+08	6.421E+06
Terre + Soleil	5.972E+24	1.989E+30	6.378E+06	6.963E+08	1.496E+11	6.963E+08
Jupiter + Soleil	1.898E+27	1.989E+30	6.991E+07	6.963E+08	7.780E+11	6.966E+08
Soleil + M80	1.989E+30	9.985E+35	6.963E+08	5.534217E+10	4.541E+17	5.534221E+10
Soleil + Galaxie	1.989E+30	5.000E+40	6.963E+08	2.040E+12	5.000E+20	2.040E+12

Ce tableau contient les valeurs standards des corps considérés sauf pour les rayons de l'amas globulaire M80 et de la galaxie type (cases grises). Nous avons utilisé pour calculer l'état initial une sphère R_t de masse $(M + m)$ possédant la densité solaire, l'état final est le soleil à la distance d d'une masse M de densité solaire. Pour le couple soleil et galaxie, $R = 2.03985712710655E+12$ et $R_t = 2.03985712713359E+12$. La logique de cette manipulation sera expliquée plus loin. Dans tous les cas, nous avons $R_t = (R^3 + r^3)^{1/3}$.

	E_i (j)	E_f (j)	ΔE_p (j)	ΔE_p (kg)	$m / \Delta E_p$
Lune + Terre	-2.2795E+32	-2.2413E+32	3.8176E+30	4.2477E+13	0.000000001
Terre + Soleil	-2.2751E+41	-2.2751E+41	1.3024E+36	1.4491E+19	0.000002427
Jupiter + Soleil	-2.2787E+41	-2.2751E+41	3.5519E+38	3.9520E+21	0.000002082
Soleil + M80	-7.2141E+50	-7.2141E+50	2.3949E+45	2.6647E+28	0.013396966
Soleil + Galaxie	-4.9079E+58	-4.9079E+58	3.2540E+48	3.6206E+31	18.20

Nous pouvons voir dans ce tableau les différences énergétiques gravitationnelles entre les états physiques actuels et la fusion des corps en un seul corps. Ainsi, en sachant que l'annihilation d'un kilogramme de matière correspond approximativement à la puissance d'une bombe H (2 kg de deutérium associé à 3 kg de tritium, entraîne une perte de masse de 1 kg soit approximativement la Tsar Bomba), la fusion de la lune avec la terre dégagerait une énergie de quarante mille milliards de bombes H. Cette énergie potentielle a une masse de quarante milliards de tonnes ce qui est loin d'être anecdotique. Si nous considérons l'énergie dégagée par la dissolution de la terre dans le soleil, nous parlons de plus de quatorze millions de milliards de tonnes. Ce qui est cependant moins que la masse perdue par le soleil toutes les heures par fusion nucléaire. Ainsi, dépendamment de sa répartition dans l'espace, il est fort possible que cette masse soit parfaitement mesurable. Si nous regardons le ratio $m/\Delta E_p$ de la masse du petit corps sur celui de l'énergie potentielle, nous voyons qu'il est négligeable sauf dans le cas galactique, atteignant une valeur dans l'ordre de grandeur du ratio de masse noire pour ce type de système. En continuant pour les amas nous serions dans l'ordre de 1000 et de 10 000 pour des superamas. Cependant comme nous pouvons le voir pour la galaxie, nous sommes à la limite du calcul numérique avec 15 chiffres significatifs.

L'énergie potentielle des systèmes célestes

La première chose que nous pouvons constater est que le terme $-GmM/d$ de ΔE_p est négligeable à toutes les échelles ($d \gg R \gg r$). Le bon sens physique permet de le comprendre aisément ; le changement de la distance entre la terre et la lune n'aurait que peu d'incidence énergétique mesurable comparativement à la fusion cataclysmique des deux corps. Ceci est vrai pour tous les corps célestes. L'équation se simplifie donc en $\Delta E_p = (3G/5)[M_t^2/R_t - M^2/R - m^2/r]$. Ainsi, la disposition relative des corps les uns avec les autres n'est pas pertinent pour calculer l'énergie totale. Si nous considérons un système de n masses m_i de rayons r_i que nous « fusionnons » les uns après les autres, nous obtenons pour chaque fusion $M_i = \sum_{j \leq i} m_j$, $R_i = (R_{i-1}^3 + r_i^3)^{1/3}$, $\Delta E_i = (3G/5)[M_i^2/R_i - M_{i-1}^2/R_{i-1} - m_i^2/r_i]$, l'énergie totale étant $\Delta E_p = \sum_i \Delta E_i$. Ce calcul pourrait se faire exactement de nos jours même pour la plus grosse des galaxies (1E5 milliards d'étoiles). Nous ferons remarquer que l'ordre de fusion est sans importance car le champ gravitationnel est conservatif.

Si nous réduisons le problème à une seule valeur de m et r nous pouvons alors simplifier grandement le calcul pour n boules. Nous avons alors $M_i = im$ et $R_i = (M_i r^3 / m)^{1/3}$ car nous savons que la boule M_i possède la même masse volumique que m . Donc $\Delta E_i = (3G/5)[M_i^2/R_i - M_{i-1}^2/R_{i-1} - m^2/r]$, $\Delta E_p = \sum_i \Delta E_i = (3G/5)[M_n^2/R_n - M_{n-1}^2/R_{n-1} - m^2/r + M_{n-1}^2/R_{n-1} - M_{n-2}^2/R_{n-2} - m^2/r + \dots + M_2^2/R_2 - M_1^2/R_1 - m^2/r + M_1^2/R_1 - m^2/r]$, les termes $-M_i^2/R_i + M_i^2/R_i$ s'annulent, il ne reste que $\Delta E_p = (3G/5)[M_n^2/R_n - nm^2/r]$. Il est important de remarquer que ΔE_p n'est que l'énergie potentielle de chacune des petites boules (m, r) soustrait de l'énergie potentielle de la boule initiale (M_n, R_n). Nous avons $M_n^2 = n^2 m^2$ et donc $\Delta E_p = (3G/5)[M_n^2/R_n - M_n^2/nr]$. De plus, $R_n = (M_n r^3 / m)^{1/3} = n^{1/3} r$ et donc $\Delta E_p = (3G/5)[M_n^2 / n^{1/3} r - M_n^2 / nr]$ (impliquant que le terme $-nm^2/r$ est négligeable) et comme $M_n = nm$, $\Delta E_p = (3G/5)[(n^{5/3} - n) m^2 / r]$. Cette dernière équation ramène l'expression de l'énergie uniquement en fonction de la masse, du rayon et du nombre des petites boules. Ainsi, un petit rayon et une grande masse des petites boules soit une grande masse volumique de celle-ci fera augmenter considérablement l'énergie potentielle produite.

En pratique, nous ne connaissons que l'histogramme de la population stellaire d'une galaxie. Nous pourrions alors séparer M_n en n tranches de masses (M_i, m_i). Nous calculons l'énergie de toutes les tranches par $\Delta E_{pa} = \sum (3G/5)[M_i^2/R_i - n_i m_i^2 / r_i]$ puis nous calculons ΔE_{pb} en « fusionnant » toutes les boules M_i de rayon $R_i = (M_i r_i^3 / m_i)^{1/3}$. Nous obtenons alors l'énergie totale $\Delta E_p = \Delta E_{pa} + \Delta E_{pb}$. Plus simple encore, considérons la fonction $f(m, r, M, M_i, R_i) \mapsto (\Delta E_p, M_t, R_t)$ celle-ci prend la définition des petites boules (m, r) et leur masse totale M ainsi que la définition d'une boule compacte initiale (M_i, R_i) pouvant être nulle, elle retourne l'énergie potentielle ainsi que la nouvelle boule compacte initiale (M_t, R_t). L'algorithme est simplement :

$$\begin{aligned} f(m, r, M, M_i, R_i) &\mapsto (\Delta E_p, M_t, R_t) : \\ n &= M / m \\ M_t &= M + M_i \\ R &= n^{1/3} r \\ R_t &= (R^3 + R_i^3)^{1/3} \\ \Delta E_p &= (3G/5)[M_t^2 / R_t - n m^2 / r] \end{aligned}$$

Pour calculer ΔE_p de structures plus massives comme un amas ou superamas de galaxies, nous devons préalablement compacter chacune des galaxies en utilisant le calcul précédent permettant d'obtenir ΔE_p , M_t et R_t . Nous avons donc la masse de cette boule compacte donnée par $M = M_t + \Delta E_p / c^2$ et son rayon $R = R_t$. Il suffit alors de réappliquer le même procédé de fusion avec ces boules galactiques de l'amas ou du superamas. Nous pouvons réitérer le processus d'une échelle à une autre. C'est le principe des poupées gigognes.

Le gaz galactique est problématique car nous n'avons pas de boule à fusionner, cependant, nous savons qu'il possède au moins autant d'énergie potentielle que les étoiles car le gaz est responsable de la formation stellaire par effondrement gravitationnel. Nous avons ici deux phases, premièrement l'effondrement du gaz en boules, deuxièmement la fusion de ces boules en une boule compacte initiale. La population stellaire jeune d'une galaxie est assez représentative du destin du gaz galactique et le plus simple serait donc de considérer le gaz exactement comme s'il contribuait à cette population. Cependant, si nous considérons le gaz s'effondrant à la fin, dans la boule initiale constituée des étoiles, il est tellement peu dense en comparaison que nous pourrions pratiquement considérer chacune de ses molécules isolément. Dans ce cas, le déplacement conservatif de chacune des molécules de gaz dans la boule initiale ne fait qu'accroître la taille de celle-ci tout en conservant sa masse volumique. Ainsi nous devrions utiliser le gaz exactement comme s'il contribuait, de façon indifférencié, à la masse stellaire. Nos tests confirment cette hypothèse et c'est ce que nous devons faire pour minimiser l'erreur sur les données expérimentales.

Le problème de la boule compacte initiale

Nous utilisons une boule compacte conservant les volumes des corps « fusionnés » avec cette boule. Cette stricte conservation des volumes permet de conserver exactement le même état de la matière avant et après la « compaction ». Nous savons que la gravité compacterait encore d'avantage cette boule dans la réalité, cependant dans cette situation, d'autres forces répulsives entreraient en jeu. Il faudrait alors tenir compte de ces forces, forces qui n'étaient pas considérées auparavant. Seule cette stricte condition de conservation des volumes permet de réaliser une transformation conservative de toutes les forces.

Si nous devons utiliser un autre rayon que celui conservant les volumes pour obtenir une meilleure évaluation de l'énergie potentielle, il faudrait déterminer pourquoi celui-ci est meilleur. Nous entrerions alors dans une forme d'arbitraire qui semble parfaitement déraisonnable. Cependant, il suffit de vérifier l'utilisation de la boule compacte conservant les volumes avec d'autres boules plus ou moins denses pour constater l'adéquation expérimentale. Moins dense n'aurait aucun sens car l'énergie potentielle est au minimum celle se trouvant dans les corps tels qu'ils sont. Plus dense générerait rapidement beaucoup trop d'énergie potentielle (voir les modèles théoriques), la quantité actuelle de masse noire produite n'étant absolument pas un problème de manque.

Le fait de ne pas impliquer d'autres forces que la gravité semble fondamentale. Dans ce cas, pourquoi ne pas utiliser un trou noir comme boule compacte initiale. En fait, pour ce faire, il suffirait de calculer l'ajout d'énergie de notre boule ΔE_b conservant les volumes (somme de toutes les étoiles) avec le trou noir de masse équivalente. Ce trou noir initial ne possède pas de spin. En effet, les étoiles fusionnées, possèdent des sens de rotation aléatoires et donc la boule initiale, conservant les volumes, n'a aucune rotation par annulation mutuelle des moments cinétiques. Par conséquent l'énergie apportée par l'effondrement de notre boule en trou noir (qui est en fait le film passé à l'envers) est $\Delta E_{bh} = \Delta E_b - E_{bh}$ mais notre trou noir possède comme seule énergie sa propre masse... par conséquent $E_{bh} = 0$ et donc $\Delta E_{bh} = \Delta E_b$. L'énergie potentielle d'un système est donc simplement ΔE_b , soit celle de notre boule conservant les volumes.

Modèle théorique

Nous utiliserons notre théorie pour générer les courbes théoriques de la masse noire générée par différentes galaxies en nombre d'étoiles (NS), chaque taille de galaxie étant une courbe différente (Figures 1, 2). En abscisse nous avons les différentes tailles moyennes d'étoiles (MS) exprimées en masse solaire. Leurs rayons sont donnés par la relation standard masse-rayon de la séquence principale. En ordonnée nous retrouvons le ratio de la masse noire totale générée (MG) sur la masse baryonique totale des étoiles (MB) soit MG/MB. Nous pouvons voir sur ces graphiques que pour une taille d'une galaxie de 100 milliards d'étoiles (ligne pointillée fine), celle-ci génère un ratio de matière

noire de 28 pour une taille moyenne des étoiles de ($1 M_{\odot}$, $1 R_{\odot}$). Avec 200 milliards d'étoiles nous sommes à un ratio de 45 et à 60 pour 300 milliards d'étoiles. Nous sommes donc au-dessus du ratio de 20 maintenant admis pour la voie lactée. Cependant, nous devons admettre que l'ordre de grandeur est bon bien que nous ne tenions pas compte du gaz et des trous noirs. Une chose est certaine, la question de la production de masse noire n'est pas un problème si on considère qu'il s'agit de l'énergie potentielle du système.

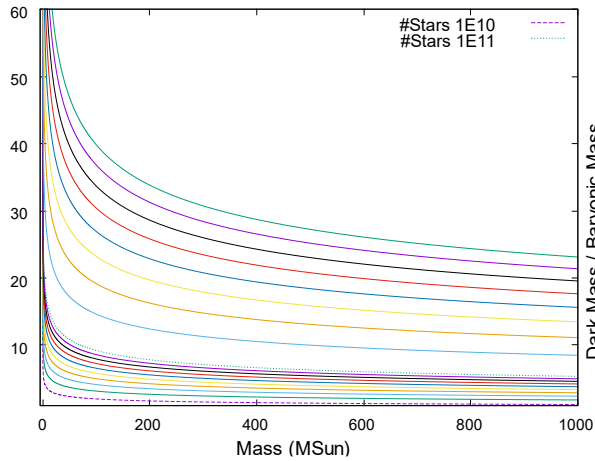


Figure 1

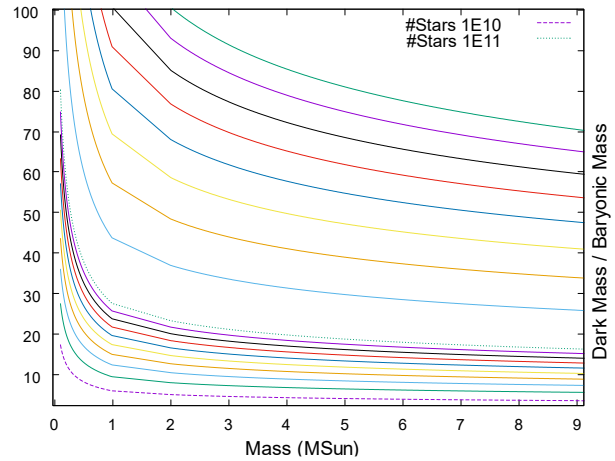


Figure 2

L'ajout d'étoiles peu denses comme des géantes rouges (Figures 3, 4) permet de faire diminuer rapidement la production de masse noire galactique. Il s'agit de la même population d'étoiles que précédemment mais de taille fixe d'une masse solaire ($1 M_{\odot}$, $1 R_{\odot}$), auquel on mélange une fraction de géantes rouges ($4 M_{\odot}$, $100 R_{\odot}$).

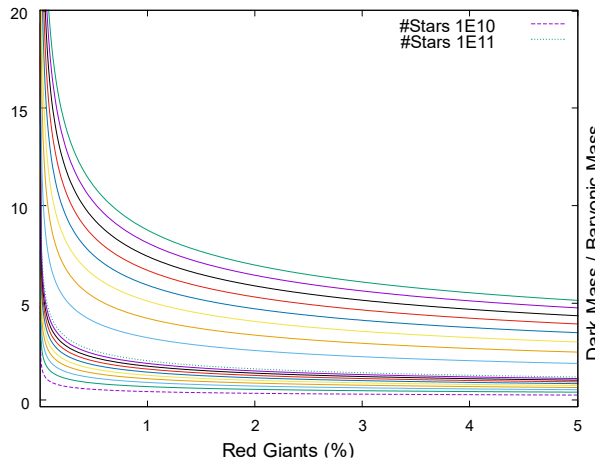


Figure 3

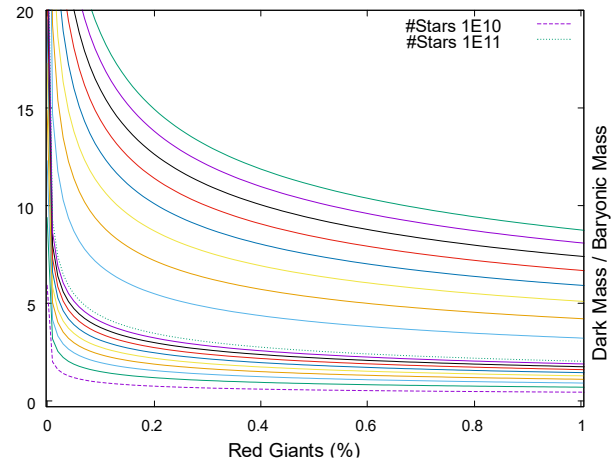


Figure 4

L'ajout d'étoiles denses (Figures 5, 6) comme des naines blanches ($0.6 M_{\odot}$, $0.0084 R_{\odot}$) ou des étoiles à neutrons ($1.35 M_{\odot}$, 10.8 km) produit un accroissement spectaculaire de la masse noire. Accroissement qui sera contrebalancé par la présence d'étoiles peu denses et de trous noirs.

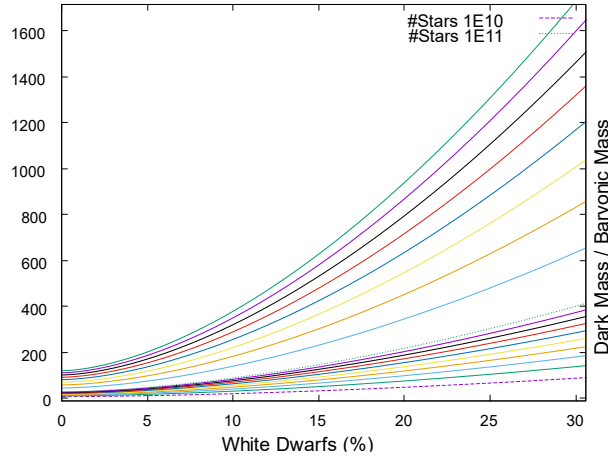


Figure 5

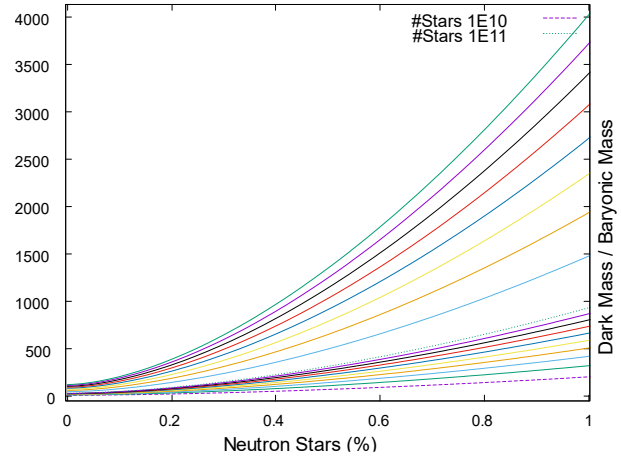


Figure 6

Les trous noirs

Si nous sommes maintenant en mesure de calculer l'énergie potentielle d'un système d'étoiles, passer à l'énergie potentielle des trous noirs dans ce système est plus complexe. Cependant, le principe reste le même, l'énergie potentielle stockée est celle entre les deux états, soit celui des trous noirs fusionnés en un seul versus les trous noirs séparés en deux trous noirs distincts.

Comme avec les étoiles, nous commençons par l'énergie de fusion de deux trous noirs. Le calcul de l'énergie potentielle de la fusion des trous noirs est donné (15) (16) par la relativité générale par la formule $M_f = (M + m) (1 - \eta \epsilon_{\text{rad}}(q, \chi))$ avec $\eta = Mm / (M + m)^2$, $q = m / M \leq 1$, χ = paramètre de spin et $\epsilon_{\text{rad}}(q, \chi)$ est une fonction empirique qui donne l'efficacité de l'émission gravitationnelle. Pour les trous noirs non-spinés, une approximation courante est $\epsilon_{\text{rad}}(q) = 0.048 (1-q)^2 / (1+q)^4$. Le spin effectif est $\chi_{\text{eff}} = (M\chi_M + m\chi_m) / (M + m)$, en considérant que nous fusionnons des trous noirs de spins aléatoires, M possédera rapidement un spin nul et $\chi_a \approx 0$.

Soit la fonction $f(m, M) \mapsto M_f$ permettant de fusionner deux trous noirs. Pour passer à la fusion de plusieurs trous noirs, nous réduisons le problème à la fusion de n trous noirs de masse identique m pour une masse totale de $M = nm$.

```

g(n, m)  $\mapsto$   $M_f$  :
  IF n = 2 THEN  $M_f = f(m, m)$ 
  IF n = 3 THEN  $M_f = f(m, m)$ ,  $M_f = f(m, M_f)$ ,
  ELSE
    isOdd = false
    IF Odd(n) THEN n = n - 1, isOdd = true
     $M_f = 2 g(n/2, m)$ 
     $M_f = f(M_f, M_f)$ 
    IF isOdd THEN  $M_f = f(m, M_f)$ 

```

Cet algorithme permet de simplement fusionner des trous noirs deux à deux avec à la base les trous noirs de masse m , puis $2m$, $4m$ et ainsi de suite. Il est alors possible d'utiliser la programmation dynamique pour mémoriser les valeurs de $g(a, b)$, ceci permettant de réaliser l'opération de calcul dans $O(\lg_2(n))$.

Nous constaterons que l'énergie potentielle est extrêmement faible car l'énergie est strictement tirée de la masse initiale des trous noirs. Ainsi l'énergie potentielle ne peut jamais dépasser la masse totale des trous noirs. Même en considérant l'énergie d'un spin prograde aligné (les meilleures conditions) en utilisant une approximation semi-analytique empirique basée sur des simulations numériques (17) (18) nous avons $E_{\text{gw}} / M \approx \eta (1 - 4\eta) [1 - 0.0686(1 - \chi_{\text{eff}})^2]$. Nous avons réussi à produire au maximum un 16% d'énergie potentielle avec des trous noirs de plus de 500

masses solaires avec un spin de pratiquement 1. Il faudrait donc considérer que la contribution des trous noirs, par fusion, à l'énergie potentielle des systèmes célestes est négligeable d'autant plus compte tenu de leur faible proportion.

Cependant, il est impossible de ne pas considérer l'énergie potentielle générée par les trous noirs car ils participent nécessairement à l'énergie potentielle au sein de la galaxie par l'équation $E_p = - GmM / d$. Considérons la boule initiale conservant les volumes de masse M et de volume V , résultat de la fusion du gaz et des étoiles. S'il reste n trous noirs de masse m et de volume v , alors la logique pousse à les traiter exactement comme le reste, soit à les introduire dans la boule initiale et donc $M' = M + nm$, $V' = V + nv$. Cependant un tel traitement laisse perplexe car il n'est pas conservatif. Si nous déplaçons les trous noirs dans la boule compacte initiale, ils se retrouveront les uns à côté des autres puis ils fusionneront et leur volume total diminuera. Les trous noirs possèdent justement cette curieuse propriété de ne pas conserver les volumes par fusion.

Ainsi, il semble que le traitement des trous noirs nécessite de les considérer exactement comme la matière ordinaire avec une boule conservant les volumes mais avec leur conservation des volumes particulière. Nous fusionnerons tous les trous noirs en un seul trou noir. Celui-ci pourrait posséder une densité élevée (1000 pour une masse de $4.3E6$ masses solaires) ou faible (0.001 pour une masse de $4.3E9$ masses solaires). Contrairement à l'intuition, la présence de beaucoup de trous noirs diminuerait donc l'énergie potentielle du système. Ceci est inévitable car la limite de l'augmentation de la proportion de trous noirs est un seul gros trou noir d'énergie potentielle nulle par la définition même d'un trou noir.

Voici ce que donne notre modèle théorique (Figures 7, 8, 9, 10) sur des galaxies possédant exactement les mêmes nombres d'étoiles que précédemment mais en fixant ces étoiles à la masse solaire ($1 M_\odot$, $1 R_\odot$). En abscisse nous avons la fraction (%) de la masse des étoiles en trous noirs. Nous pouvons voir qu'à 1.3% les courbes de 100, 200 et 300 milliards d'étoiles convergent vers des valeurs de 19.7, 22 et 23 ce qui est consistant avec la valeur de 95% de masse noire pour la Voie lactée et la fraction de trous noirs aux alentours de 1% (19). Cette tendance à diminuer la production de masse noire s'estompe vers le milliards d'étoiles pour s'inverser légèrement. Il est remarquable qu'avec seulement une proportion de 5% de trous noirs, la plupart des galaxies perdent toutes individualités et seulement les plus petites se distinguent encore en matière de production de masse noire.

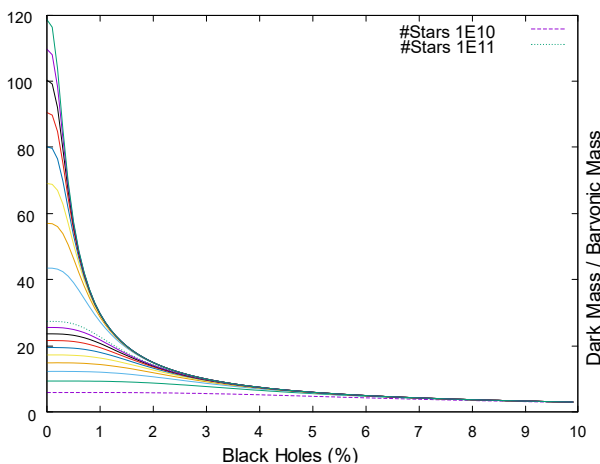


Figure 7

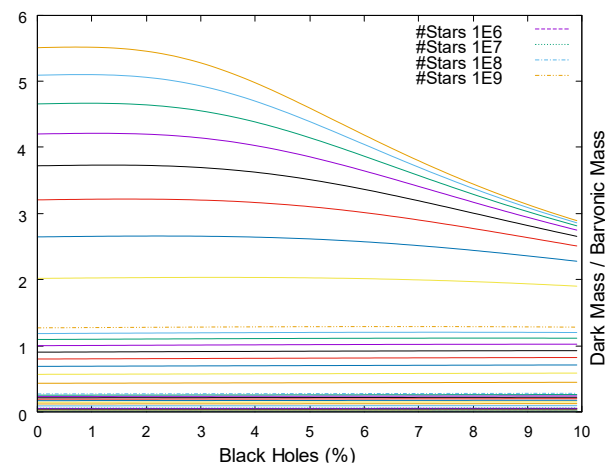


Figure 8

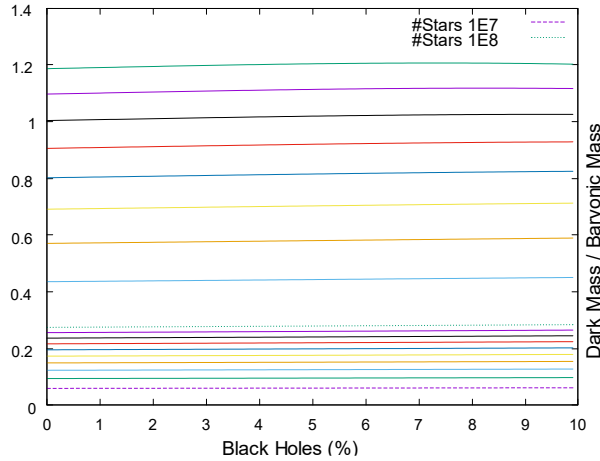


Figure 9

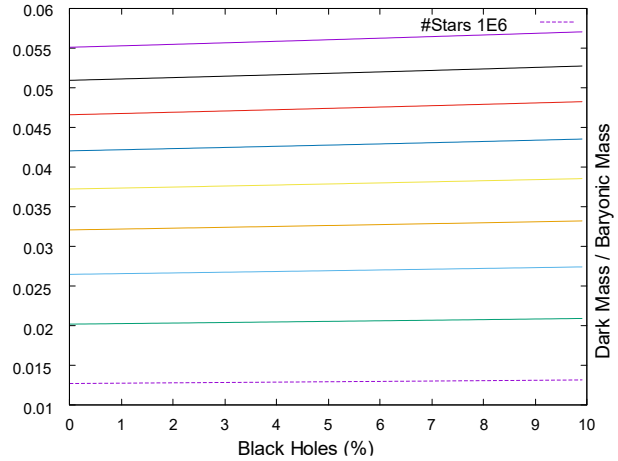


Figure 10

Les modèles galactiques

Nous avons utilisé l'échantillon SPARC (14) de 175 galaxies pour vérifier s'il est possible de produire la quantité nécessaire de masse noire avec l'énergie potentielle gravitationnelle. Nous avons rejeté deux galaxies ne possédant pas des marges d'erreurs acceptables. Cet échantillon de 173 galaxies contient 3362 points de données dont 3039 seront conservés (90%), les points proches du centre sans marge d'erreur ou produisant une masse noire négative furent retirés. Pour chacun de ces points, nous avons la masse baryonique (gaz et étoiles) à l'intérieur de l'orbite, ainsi que la vitesse orbitale. Chacun de ces points possède également une évaluation de la masse noire nécessaire M_{dark} en calculant le déficit de masse ainsi qu'une marge d'erreur eM_{dark} .

Pour chacun des points de donnée, nous utilisons notre méthode pour déterminer qu'elle proportion de trous noirs, naines blanches ($0.6 M_{\odot}$, $0.0085 R_{\odot}$), naines rouges ($0.4 M_{\odot}$, $0.5 R_{\odot}$) et géantes rouges ($4 M_{\odot}$, $100 R_{\odot}$), permettent de produire une masse noire E_{dark} minimisant l'erreur avec M_{dark} ($\Delta_{dark} = |E_{dark} - M_{dark}|$). Cette minimisation se fait en tentant, en premier lieu, d'entrer dans la marge d'erreur, soit d'obtenir $\Delta_{dark} < eM_{dark}$ ou $\Delta_{dark} < 2eM_{dark}$. Il serait en effet plus juste de considérer les deux marges d'erreurs, celle de M_{dark} et celle de Δ_{dark} ; attribuer la marge eM_{dark} à Δ_{dark} est une simplification pratique. En deuxième lieu, nous essayons simplement de minimiser Δ_{dark} . Chaque point de donnée est considéré comme un problème indépendant. Toutes nos erreurs ($\pm e$) sont d'un écart type.

L'adéquation est excellente, la masse noire de 86% (149 sur 173) des galaxies (pour 81% des points de données) est résolue sans aucune erreur avec $\Delta_{dark} < 2eM_{dark}$ et 74% (128 sur 173) des galaxies (pour 71% des points de données) avec $\Delta_{dark} < eM_{dark}$. Un total de 95% des points de données est résolu sans erreur avec $\Delta_{dark} < 2eM_{dark}$ et 92% avec $\Delta_{dark} < eM_{dark}$. Mieux encore, si nous considérons le positionnement de la valeur E_{dark} au sein de la marge d'erreur eM_{dark} (100% étant l'extrémité de la barre d'erreur, 0% exactement la valeur) pour nos 86% de galaxies sans erreur, le positionnement moyen est de $3\% \pm 9\%$, il est même de $1.4\% \pm 1.6\%$ pour nos 74% de galaxies sans erreur avec $\Delta_{dark} < eM_{dark}$.

Le plus intéressant est que pour réussir, l'algorithme a produit pour nos 86% de galaxies sans erreur, une moyenne de $5.4\% \pm 4.6\%$ de trous noirs, $30\% \pm 7.7\%$ de naines blanches, $20\% \pm 6.7\%$ de géantes rouges et $45\% \pm 7.7\%$ de naines rouges. Nous obtenons des résultats très semblables avec $\Delta_{dark} < eM_{dark}$ et même dans nos galaxies avec des erreurs. Ainsi, non seulement, l'énergie potentielle permet de générer la quantité de masse noire observée mais en plus cette production nécessite des proportions relatives acceptables des différents types d'étoiles et de trous noirs. Nous remarquerons que le taux élevé de naines blanches pourrait probablement être diminué par une petite fraction d'étoiles à neutron. Il en est probablement de même avec les géantes rouges et les hypergéantes.

Le modèle précédent permet de démontrer qu'il est possible de générer toute la masse noire nécessaire avec les types d'étoiles les plus habituels et des trous noirs. Cependant, il ne garantit aucune consistance d'un point de

donnée à l'autre à l'intérieur d'une galaxie. Pour ce faire, il faut lors de l'optimisation, ne permettre que de changer la proportion d'étoiles et de trous noirs que dans le point lui-même. Ceci ajoute de la contrainte au problème. Ainsi, nous obtenons 62% (108 sur 173) des galaxies (pour 49% des points de données) résolues sans aucune erreur avec $\Delta_{\text{dark}} < 2eM_{\text{dark}}$. Mais surtout, ceci permet d'obtenir des graphiques de la distribution stellaire. Voici deux exemples de résultats (Figures 11, 12) :

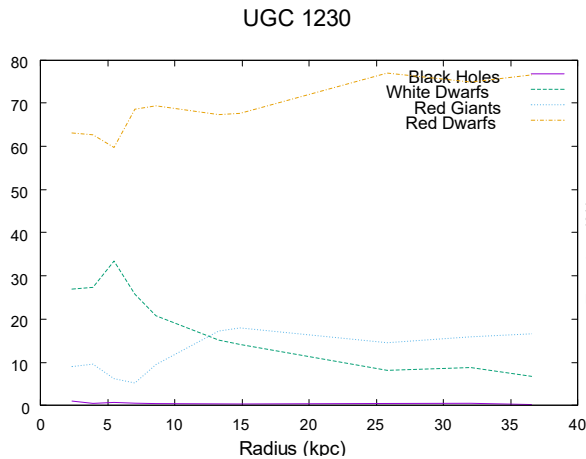


Figure 11

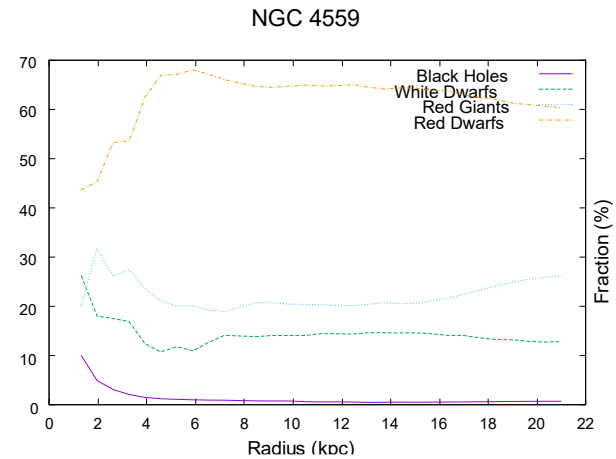


Figure 12

Les courbes de rotation galactique

Pour comprendre comment notre masse noire affecte les courbes de rotation galactique, il faudrait préalablement connaître la position de cette masse invisible. Cette masse-énergie se trouve dans le champ, le fait que celui-ci soit resté si longtemps invisible et intangible est un mystère, il est cependant possible de citer ici Leon Brillouin (21) (22) :

« Toute énergie possède une masse, mais il semble qu'on ait omis de discuter le cas de l'énergie potentielle. Les fondateurs de la Relativité n'en parlent guère. En fait l'énergie correspondante est répandue dans tout l'espace, et la masse n'en peut être exactement localisée. La symétrie de la distribution suggère de diviser la masse entre les diverses particules en interaction. Il faut donc, dès la Relativité classique, réviser les valeurs des masses. Bien avant les quanta, la *renormalisation* est indispensable (et fut omise) dans la Relativité d'Einstein. »

Même si le problème fut posé clairement par Brillouin en 1965, il ne semble pas avoir reçu de réponse satisfaisante. Nous postulons que la masse stockée dans le champ est directement proportionnel à l'intensité de ce champ. Ainsi, si à la position a il est possible de mesurer un champ $\Phi(E_a)$ produit par une masse noire E_a et un champ $\Phi(M_a)$ produit par une masse baryonique M_a alors à la position b de champ baryonique $\Phi(M_b)$ nous avons un champ $\Phi(E_b)$ produit par une masse noire E_b soumis à la relation $\Phi(E_b) / \Phi(E_a) = \Phi(M_b) / \Phi(M_a)$. Donc $\Phi(M_b) / \Phi(M_a) = M_b R_a / M_a R_b$, $\Phi(E_b) / \Phi(E_a) = E_b R_a / E_a R_b$ et par conséquent $E_b = E_a M_b / M_a$.

Dans le cas galactique, nous avons vu qu'on doit diviser la production de masse noire en plusieurs composants ayant chacune leur « efficacité » propre. Ainsi, si le composant « gas » produit une masse noire totale de E_{gas} à partir d'une masse baryonique de M_{gas} et le composant disque une masse noire totale de E_{disk} à partir d'une masse baryonique de M_{disk} alors il est indispensable de calculer séparément $e_{\text{gas}} = E_{\text{gas}} m_{\text{gas}} / M_{\text{gas}}$ et $e_{\text{disk}} = E_{\text{disk}} m_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$, $e_{\text{tot}} = e_{\text{gas}} + e_{\text{disk}}$. Cependant, le problème est beaucoup plus complexe car nous avons vu que l'énergie potentielle varie en fonction du type stellaire. Un calcul précis devrait considérer une division de la masse en plusieurs catégories stellaires et sans oublier les trous noirs.

Faute de ses informations, nous considérerons seulement le gas et le disque dont l'apport respectif sera donné par une fraction f ; $E_{\text{dark}} = E_{\text{gas}} + E_{\text{disk}} = f E_{\text{dark}} + (1-f) E_{\text{dark}}$ et donc pour chaque point de donnée, $e_{\text{gas}} = f E_{\text{dark}} m_{\text{gas}} / M_{\text{gas}}$ et

$e_{\text{disk}} = (1-f) E_{\text{dark}} m_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$. Il existe donc un seul paramètre f ajustable par Galaxie. Avec ce simple paramètre, nous pouvons générer la proportion correcte de masse noire pour tous les points de données de 76 galaxies sur les 175 de l'échantillon SPARC soit 43% des galaxies. De plus, nous avons attribué à e_{tot} la même marge d'erreur que E_{dark} ce qui est minimaliste. Voici deux exemples de résultats (Figures 13, 14) :

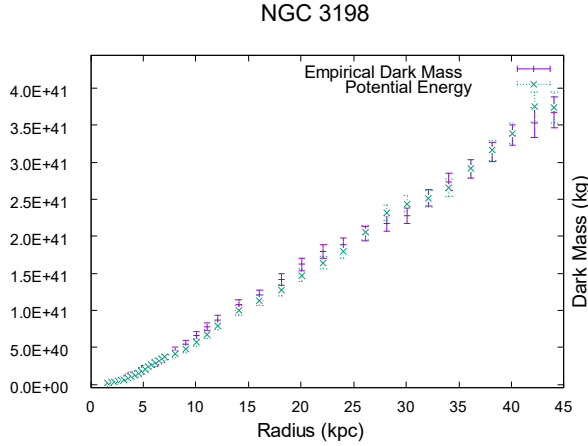


Figure 13

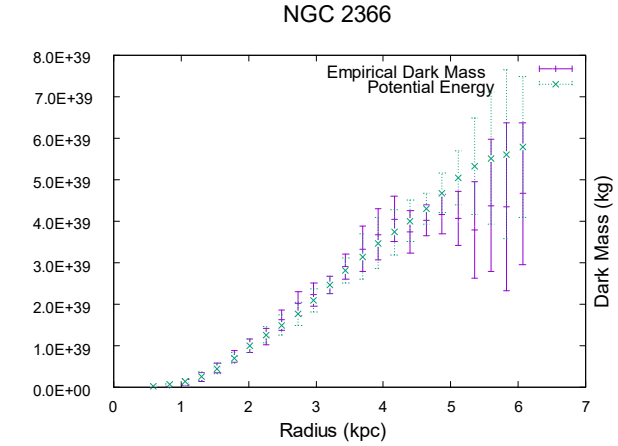


Figure 14

Il est possible d'ajouter plusieurs paramètres f jusqu'à ce que la courbe soit parfaitement ajustée ou du moins jusqu'à plus aucune amélioration ne soit possible. Nous obtenons alors 29 galaxies supplémentaires à deux paramètres, sans erreur, 6 galaxies à trois paramètres, sans erreur. Nous couvrons ainsi, sans erreur, 111 de nos 175 galaxies soit 63%. L'existence de cette relation directe entre la masse baryonique et la masse noire semble bel et bien se confirmer.

Conclusion

L'objectif de cet article était de prouver que l'énergie potentielle gravitationnelle était la cause du phénomène mal nommé « matière noire ». Nous avons démontré avec l'exemple d'une collision terre lune ou terre soleil qu'elle n'est pas négligeable et doit donc être considérée. Puis nous avons établi avec des modèles théoriques simples qu'elle permet d'expliquer dans les ordres de grandeurs attendus la masse noire galactique. Déjà, nous sommes confrontés à un dilemme ; si cette énergie potentielle n'est pas responsable du phénomène de la masse noire, il faudrait expliquer pourquoi la relation masse énergie $E = mc^2$ ne s'applique pas dans ce cas. En effet, l'énergie potentielle est réellement produite, elle existe et elle doit nécessairement générer de la masse ou du moins déformer l'espace-temps de façon équivalente à une masse équivalente. Ce que nous avons démontré est qu'une quantité d'énergie potentielle suffisante est générée pour produire le phénomène de la masse noire. Ceci est logiquement une condition suffisante, la masse noire doit exister car l'énergie potentielle existe et la relation masse énergie doit s'appliquer.

Par la suite, nous avons confronté notre modèle théorique à un nombre significatif de données expérimentales et obtenu une excellente correspondance, malgré le grand nombre de simplifications obligatoires. Ceci est logiquement une condition nécessaire, l'énergie potentielle est la cause du phénomène de la masse noire. Nous avons complété notre démonstration par le calcul des courbes galactiques en utilisant le principe « à causes égales, conséquences égales ». Ainsi, si une masse M d'un certain type, par exemple les étoiles d'une masse solaire, produisent une masse noire E alors une masse m du même type produira une masse noire de $e = E m/M$. Exprimé sous forme de champ gravitationnel, cela entraîne que la masse noire suit parfaitement le profil galactique de la masse baryonique si celle-ci est homogène (même types d'étoiles, même proportion de gaz). Cette relation déjà connu (19) (20) entre masse baryonique et masse noire trouve ici la justification fondamentale nécessaire dans la nature du champ. Ainsi l'application des conséquences logiques du fait que la masse noire est produite par l'énergie potentielle permet d'éclairer le mystère de sa distribution spatiale.

Que ce phénomène soit passé incognito si longtemps est probablement la question la plus intéressante de toute. L'énergie potentielle est connue depuis longtemps, la relation masse énergie également, leurs validations expérimentales indiscutables. Nous savons également que l'énergie de liaison atomique parfois appelée énergie de masse existe réellement, bien qu'elle n'existe que de façon indéfinie, quelque part dans le champ quantique. La seule raison pour laquelle l'énergie gravitationnelle fut rejetée d'emblée est la croyance dans l'affirmation qu'il s'agit d'une force faible. Par conséquent, elle ne peut pas produire de masse. Nous avons démontré que ceci est totalement faux ; alors que l'énergie de liaison nucléaire peine à produire une multiplication de la masse par un facteur de deux, la gravité peut facilement atteindre dix fois cette valeur dans une galaxie voir des milliers à plus grande échelle. La gravité est faible à l'échelle quantique mais puissante à l'échelle galactique. De façon réciproque, l'interaction forte est puissante au niveau quantique mais totalement insignifiante à l'échelle galactique.

L'autre grand problème est que la théorie Newtonienne de la gravitation (GN) n'est pas « La Théorie de la Gravitation » qui est maintenant la Relativité Générale (RG). L'énergie potentielle n'existe pas en RG, pire, Emmy Noether a démontré que l'énergie elle-même n'est pas conservée en RG. La conservation de l'énergie en présence d'un champ gravitationnel dynamique est un sujet très délicat en RG. La question de savoir comment la GN peut expliquer ce que la RG ne peut pas est très ennuyeuse. En fait, nous savons que l'approximation des champs faibles, soit la GN, est excellente, elle est même beaucoup plus simple à utiliser que la RG. Si un phénomène aussi majeur que la masse noire est produit par la gravitation, elle devrait être calculable avec la GN. En effet, il ne s'agit pas d'un détail comme la précession de mercure. Cependant, la GN ne nous donne que l'énergie potentielle d'un système, il faut la réintroduire dans le système pour calculer les mouvements corrects des corps. Il est difficile de croire que la RG ferait mieux à moins que nous ne calculions pas assez précisément l'auto-induction du champ (15) (16) (17) (18). Dans ce cas, le plus simple serait de trouver l'équivalent d'une simplification des champs faibles pour cette auto-induction ; l'équation de l'énergie potentielle devrait apparaître. Dans tous les cas, que la gravitation « reconnaisse » l'énergie potentielle produite par tous les autres champs et elle-même, de façon non discriminatoire, est un phénomène pour l'instant miraculeux. Tous les champs sont ici « unifiés » par ce phénomène. Le champ BEHHGK semble ici un meilleur candidat que la gravité pour « héberger » l'énergie potentielle, il pourrait transformer l'énergie potentielle des autres champs en quelque chose de « reconnaissable » par la gravitation.

Pour terminer, nous concluons que l'étude de la masse noire ne nécessite pas une théorie de la gravitation alternative, des particules exotiques ou même la relativité générale. La bonne vieille mécanique Newtonienne est suffisante. Mieux, nous avons démontré que des modèles simples, permettent d'expliquer précisément le phénomène. Il serait possible d'améliorer indéfiniment ces modèles en utilisant, par exemple, des courbes de distribution des populations stellaires ou un traitement des gaz plus précis. Il serait également possible d'étudier de grandes structures comme les amas et les superamas de galaxies. Une chose est certaine, il n'est plus possible d'ignorer l'énergie potentielle. Vous trouverez sur dark-mass-generator.sourceforge.io le programme C++ utilisé pour générer tous les calculs et graphiques.

References

1. *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*. **V. Cooper Rubin and W. K. Ford, Jr.** 1970, *Astrophysical Journal*, Vol. 159, p. 379.
2. *Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii from NGC 4605 ($R=4kpc$) to UGC 2885 ($R=122kpc$)*. **V. Cooper Rubin, W. K. Ford, Jr. and N. Thonnard.** 1980, *Astrophysical Journal*, Vol. 238, p. 471.
3. *Rotation Velocities of 16 Sa Galaxies and a Comparison of Sa, Sb, and Sc Rotation Properties*. **V. Cooper Rubin, et al.** *Astrophysical Journal*, Vol. 289, p. 81.
4. *AGAPE: a Microlensing Search for Dark Matter by Monitoring Pixels*. **P. Gondolo, et al.** s.l. : ASP Conference Series (Dark and Visible Matter in Galaxies), 1997, Vol. 117.
5. *The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of LMC Observations*. **C. Alcock, et al.** s.l. : *Astrophysical Journal*, 2000, Vol. 542, pp. 281-307.
6. *Limits on the Macho Content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds*. **P. Tisserand, et al.** s.l. : *Astronomy & Astrophysics*, 2007, Vol. 469.
7. *Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure*. **LUX Collaboration.** s.l. : *Physical Review Letters*, 2017, Vol. 118.
8. *Final results of the PICASSO dark matter search experiment*. **PICASSO Collaboration.** s.l. : *Astroparticle Physics*, 2017, Vol. 90, pp. 85-92. ISSN 0927-6505.
9. *Dark matter search results from the complete exposure of the PICO-60 C3F8 bubble chamber*. **PICO Collaboration** . s.l. : *Physical Review D*, 2019, Vol. 100.
10. *Search for low-mass dark matter via bremsstrahlung radiation and the Migdal effect in SuperCDMS*. **SuperCDMS Collaboration.** s.l. : *Physical Review D*, 2023.
11. *Probing Gravity at Cosmological Scales by Measurements which Test the Relationship between Gravitational Lensing and Matter Overdensity*. **Zhang, Pengjie, et al.** s.l. : *Physical Review Letters*, 2007, Vol. 99.
12. *Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities*. **Reyes, Reinabelle, et al.** s.l. : *Nature*, 2010, Vol. 464, pp. 256–258.
13. *Strong Gravitational Lensing as a Probe of Dark Matter*. **Vegetti, S., et al.** s.l. : *Space Science Reviews*, 2024, Vol. 220.
14. *Microscope Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle*. **MICROSCOPE Collaboration.** 2022, *Physical Review Letters*, Vol. 119.
15. *Transition from inspiral to plunge in binary black hole coalescences*. **Buonanno, Alessandra and Damour, Thibault** . 6, 2000, *Physical Review D*, Vol. 62.
16. *Gravitational-wave spectroscopy of massive black holes with the space interferometer LISA*. **Berti, Emanuele , Cardoso, Vitor and M. Will, Clifford.** 2006, *Physical Review D*, Vol. 73.
17. *Final spin from the coalescence of two black holes*. **Rezzolla, Luciano, et al.** 2008, *Physical Review D*, Vol. 78.
18. *Final mass and spin of black-hole mergers*. **Tichy , Wolfgang and Marronetti, Pedro** . 2008, *Physical Review D*, Vol. 78.
19. *The Black Hole Mass Function Across Cosmic Times. I. Stellar Black Holes and Light Seed Distribution*. **Sicilia, Alex , et al.** 2, 2022, *The Astrophysical Journal*, Vol. 924.
20. *SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves*. **Lelli, Federico , McGaugh, Stacy S. and Schombert, James M.** 6, s.l. : *The Astronomical Journal*, 2016, Vol. 152, p. 157.
21. *L'énigme $E = Mc^2$: énergie potentielle et renormalisation de la masse*. **Brillouin, Léon.** 10, Paris : s.n., 1964, *Journal de Physique*, Vol. 25.
22. *The actual mass of potential energy, a correction to classical relativity*. **Brillouin, Léon.** 3, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 53.
23. *The Radial Acceleration Relation in Rotationally Supported Galaxies*. **McGaugh, Stacy S. , Lelli, Federico and Schombert, James M.** 2016, *Physical Review Letters*, Vol. 117.
24. *One Law to Rule Them All: The Radial Acceleration Relation of Galaxies*. **Lelli, Federico , et al.** 2, 2017, *The Astrophysical Journal*, Vol. 836, p. 152.
25. *An explanation for dark matter and dark energy consistent with the standard model of particle physics and General Relativity*. **Deur, Alexandre.** 2019, *The European Physical Journal C*, Vol. 79, p. 883.

26. *Significance of Gravitational Nonlinearities on the Dynamics of Disk Galaxies.* **Deur, Alexandre , Sargent, Corey and Terzić, Balša.** 94, s.l. : The Astrophysical Journal, 2020, Vol. 896.
27. *Relativistic corrections to the rotation curves of disk galaxies.* **Deur, Alexandre.** s.l. : The European Physical Journal C, 2021, The European Physical Journal C, Vol. 81, p. 213.
28. *Effect of the field self-interaction of General Relativity on the cosmic microwave background anisotropies.* **Deur, Alexandre.** 13, s.l. : Classical and Quantum Gravity, 2022, Vol. 39.