Calcul théorique de la constante cosmologique et de la densité « d'énergie noire » dans l'univers

Claude Mercier ing., 25 décembre 2018 claude.mercier@cima.ca
Rév. 19 mars 2019

En 1916, Einstein publia son premier document sur la théorie de la relativité générale. Les équations de cette théorie prédisaient que l'univers était soit en contraction ou en expansion.

Selon les idées véhiculées à cette époque, l'univers était statique. Einstein, adhérant à cette idée, essaya de modifier son équation pour rendre son modèle cosmologique statique. En 1917, il publia ce nouveau modèle où figure, pour la première fois, cette fameuse constante.

En 1929, grâce à ses observations, Hubble montra que l'univers était plutôt en expansion [4]. *Bien sûr, Einstein regretta amèrement d'avoir modifié son équation, car il aurait été le premier à prédire l'expansion de l'univers. Einstein cessa d'utiliser sa constante cosmologique après avoir réalisé que l'univers n'était pas statique.*

De nos jours, plusieurs astrophysiciens tentent de raviver l'utilité de la constante cosmologique pour expliquer l'expansion de l'univers, notamment en faisant l'hypothèse de la présence d'énergie noire (parfois appelée énergie sombre). Malheureusement, personne n'a été en mesure, jusqu'à maintenant, de déterminer la nature réelle de cette fameuse énergie.

Dans le but de déterminer la valeur de la constante cosmologique, nous montrerons que l'énergie noire est en fait composée de photons de différentes longueurs d'ondes. Dans la grande majorité des cas, ces longueurs d'ondes nous sont invisibles, car nous ne sommes pas capables de les capter. Par conséquent, cette énergie, dont nous constatons les effets, nous semble mystérieuse sans pourtant l'être vraiment.

MOTS CLÉS : Constante cosmologique, énergie noire, énergie sombre, relativité

1. INTRODUCTION

Les équations d'Einstein montrent que l'univers est soit en expansion, soit en contraction. Pour d'autres considérations [22], telle que la troisième loi de la thermodynamique, l'univers ne peut pas évoluer en se contractant.

Selon notre modèle de l'univers [16], le « big crunch » n'aura jamais lieu puisque l'univers s'étend contre une absence totale de pression de radiation [22]. De plus, toujours selon notre modèle, la gravitation est un phénomène qui se constate lorsque nous sommes à l'intérieur de l'univers et qui est dû à une pression de radiation qui pousse les objets les uns contre les autres. Pour ces raisons, l'univers ne peut que s'étendre.

Quelque soit la véritable nature de « l'énergie noire », la constante cosmologique représente le morceau manquant pour faire en sorte que les équations de champs de la relativité générale d'Einstein puissent représenter un modèle de l'univers statique.

Aujourd'hui, en raison des recherches de Hubble [4], la grande majorité des astrophysiciens se rallient à l'idée que l'univers est en expansion.

Dans cet article, nous montrerons, grâce à notre modèle de l'univers, qu'il est possible de déterminer de manière théorique la valeur de la constante cosmologique et, par le fait même, la densité d'énergie du vide. Nous montrerons alors qu'il n'est pas requis de faire exister un concept « d'énergie noire », mais que cette énergie est tout simplement due à un bain de photons de différentes longueurs d'ondes, pour la plupart, indétectables en raison de nos capacités limitées à fabriquer les bons capteurs.

2. VALEUR DES PARAMÈTRES PHYSIQUES UTILISÉS

Énonçons tous les paramètres fondamentaux de physique que nous avons l'intention d'utiliser dans cet article. Ces valeurs sont toutes disponibles dans le CODATA 2014 [1].

- Vitesse de la lumière dans le vide $c \approx 299792458$ m/s
- Longueur de Planck $L_p \approx 1{,}616229(38) \times 10^{-35}$ m
- Masse de Planck $m_p \approx 2{,}176\ 470(51) \times 10^{-8}$ kg
- Masse de l'électron $m_e \approx 9{,}10938356(11) \times 10^{-31}$ kg
- Rayon classique de l'électron $r_e \approx 2{,}8179403227(19) \times 10^{-15}$ m
- Constante de structure fine $\alpha \approx 7{,}2973525664(17) \times 10^{-3}$
- Constante de gravitation universelle $G \approx 6{,}67408(31) \times 10^{-8}$ m^3/(kg·s^2)
- Constante de Planck $h \approx 1{,}054571800(13) \times 10^{-8}$ J·s

3. LES ÉQUATIONS DE CHAMPS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Comme nous l'avons déjà expliqué [21], la « force gravitationnelle » tel que Newton l'avait imaginé, n'est qu'un concept où l'on associe une force à une masse qui accélère. L'équation de la gravitation de Newton n'est pas une explication de la gravitation, mais une méthode de quantification.

De son côté, Einstein avait une conception différente de la force gravitationnelle. Il a fait une expérience de pensée impliquant un homme situé dans un ascenseur qui est localisé dans le vide sidéral (hors de toute gravitation). Il montre qu'une traction exercée sur l'ascenseur donnera l'impression à l'observateur, situé à l'intérieur de la cabine, qu'il subit une force gravitationnelle. En fait, il ne sera pas capable de faire la différence entre une force gravitationnelle et une traction accélérée.

Pour Einstein, l'univers est courbé par la présence des masses et les objets suivent ces trajectoires courbes. Les équations de champs de la relativité générale de 1917 d'Einstein [18] incluent une constante cosmologique Λ qu'il a volontairement ajouté à ses équations afin de se conformer à l'idée de l'époque qui voulait que l'univers était statique [17, 23] :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} + \Lambda \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu} \qquad \textbf{(1)}$$

Après la découverte de l'expansion de l'univers par Hubble en 1929 [4], Einstein laissa tomber l'idée d'utiliser une constante cosmologique.

Dans l'équation **(1)**, $R_{\mu\nu}$ et R sont le tenseur et scalaire de Ricci respectivement et g_{uv} est le tenseur qui décrit la structure de l'espace-temps dans un espace à 4 dimensions (longueur, largeur, hauteur, temps). G représente la constante gravitationnelle universelle de Newton et c est la vitesse de la lumière dans le vide (et nous ajoutons, hors gravitation).

Comme Hubble l'a constaté via ses observations en 1929, l'univers est en expansion [4]. Cela correspond à une valeur de constante cosmologique Λ non nulle et positive. Λ représente en quelque sorte la densité d'énergie de l'espace.

La valeur de la constante cosmologique Λ est donnée par [23] :

$$\Lambda = \frac{8\pi \cdot G \cdot \rho_v}{c^2} \qquad \textbf{(2)}$$

Dans cette équation, ρ_v représente la densité du vide (masse volumique du vide). C'est là que plusieurs font intervenir l'idée d'une « énergie noire » puisqu'ils croient, à tort, que le vide est une absence de tout. Pour cette raison, nous n'aimons pas vraiment cette interpellation puisqu'elle a une connotation qui mène à croire que le vide est une absence de tout. C'est une absence de matière mais, en réalité, le vide foisonne de photons de différentes longueurs d'ondes.

Comme le paramètre ρ_v est requis pour déterminer la valeur de la constante cosmologique, nous nous attarderons à calculer sa valeur.

4. CALCUL DE LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE
4.1. Les équations de départ

Pour expliquer l'énergie contenue dans le vide de l'espace de notre univers, certains feront intervenir le concept de « l'énergie noire ».

Selon notre modèle de l'univers, « l'énergie noire » serait en fait constituée uniquement de photons de longueurs d'ondes variant de $2\pi \cdot L_p$ jusqu'à $2\pi \cdot R_u$. La valeur de L_p est la longueur de Planck (~ 10^{-35} m) et R_u est le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux (~ 10^{26} m).

Pourquoi appellerions-nous cela alors de « l'énergie noire »? Tout simplement parce qu'il nous est impossible, pour l'instant, de fabriquer des antennes capables de capter ces longueurs d'ondes et de les détecter. Notre monde sur Terre est très limité par rapport aux dimensions de notre univers (autant dans l'infiniment grand que dans l'infiniment petit). Pour qu'une longueur d'onde soit captée, il faut fabriquer une antenne possédant une longueur égale au quart de longueur d'onde.

La partie du spectre électromagnétique qui est présentement détectable représente une infime partie du spectre réel des ondes électromagnétiques. Mais notre incapacité à détecter ces ondes électromagnétiques ne veut pas dire qu'elles n'existent pas. Elles sont là et elles nous influencent en créant une pression de radiation.

Rappelons qu'il n'y a pas si longtemps, les ondes électromagnétiques nous étaient inconnues. Elles ont été prédites par James Clerk Maxwell en 1864. Quant à elles, les ondes radio furent découvertes à la fin du XIXe siècle avec les travaux d'Alexandre Popov, Heinrich Hertz, Édouard Branly et de Nikola Tesla.

À notre avis, que l'univers soit courbé par les masses et que les équations de la relativité générale puissent déterminer précisément les trajectoires des objets ne représentent pas en soit une véritable explication de la nature des forces que nous pouvons leur associer.

Selon nous, la véritable nature de la « force gravitationnelle » découle plutôt d'une pression de radiation de photons de différentes longueurs d'ondes [21]. Tant que l'observateur se tient à l'intérieur de l'univers, il observera une accélération des objets les uns vers les autres qui pourra lui donner l'impression que les forces existent. Mais, à la frontière de notre univers, celui-ci est en expansion contre une absence totale de pression de radiation thermodynamique [22]. L'univers n'a pas d'autre choix que de s'étendre éternellement, tant qu'il ne rencontrera pas une quelconque pression de radiation inverse.

La meilleure analogie pour comprendre ce concept est la poussée d'Archimède. Tant que nous sommes sous l'eau, nous subissons la pression de l'eau. Une fois sortis de l'eau, la pression s'arrête (si nous ne considérons pas la pression de l'air).

Sachant que « l'énergie noire » peut être associée à la présence de photons de différentes longueurs d'ondes dans l'espace, essayons de déterminer le pourcentage de la masse apparente de l'univers Ω_v qui peut être associé à l'énergie desdits photons dans le vide intersidéral.

Considérons que la masse totale de l'univers m_t peut avoir deux provenances :

1) m_Λ : La masse associée à l'énergie des photons;
2) m_m : La masse associée à la matière (quelle qu'en soit la sorte, c'est-à-dire la « matière noire », la matière baryonique, etc.).

En tant qu'observateur situé sur ladite masse de l'univers matériel m_m en expansion, nous mesurons sa masse au repos, car nous voyageons à la même vitesse que celle-ci. Considérons alors que m_m est la masse au repos de la matière.

La masse totale est bien sûr la masse apparente de l'univers m_u et celle-ci peut être obtenue en sommant les masses provenant de l'énergie associée aux photons et de la matière (mesurée « au repos ») :

$$m_u = m_\Lambda + m_m \tag{3}$$

Grâce à nos travaux de recherche antérieurs [15], nous savons comment évaluer précisément la valeur de la masse apparente de l'univers m_u à partir de la constante de gravitation universelle G et de la constante de Hubble H_0 :

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \approx 1{,}728 \times 10^{53} \text{ kg} \tag{4}$$

Cette équation est identique à celle obtenue par Carvalho [14].

D’autres travaux [3] nous ont aussi permis de calculer précisément la constante gravitationnelle G en fonction de la vitesse de la lumière dans le vide c (hors gravitation), de la constante de structure fine α, de β, de la masse de l’électron m_e et du rayon classique de l’électron r_e.

$$G = \frac{c^2 \cdot r_e \cdot \alpha^{20}}{m_e \cdot \beta} \approx 6{,}673229809(86)\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^2} \tag{5}$$

Notons que cette valeur est très similaire à celle obtenue dans le CODATA 2014 qui est de $G \approx 6{,}67408(31) \times 10^{-11}$ m^3/(kg·s^2). Nous considérons que l’équation **(5)** est plus précise et c’est elle que nous utiliserons dans ce document.

Ces mêmes travaux de recherche [3] nous ont permis de calculer précisément la constante de Hubble H_0 en fonction de la vitesse de la lumière dans le vide c (hors gravitation), de la constante de structure fine α, de β et du rayon classique de l’électron r_e.

$$H_0 = \frac{c \cdot \alpha^{19} \cdot \beta^{1/2}}{r_e} \approx 72{,}09548580(32)\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s} \cdot \mathrm{MParsec}} \tag{6}$$

Ce résultat est similaire celui de Salvatelli [2] qui est de $72{,}1^{+3{,}2}_{-2{,}3}$ km/(s·MParsec). Nous considérons que l’équation (6) est plus précise et c’est elle que nous utiliserons dans ce document.

Selon Hubble, l’univers est en expansion [4]. Mais si nous retournons en arrière dans le temps, notre univers provient nécessairement d’un point plus dense. Si l’univers est né d’une singularité lors du big bang, la quantité de mouvement initiale était nécessairement nulle puisqu’elle ne pouvait pas avoir de mouvement par rapport à une quelconque référence.

Quelles que soient les quantités de mouvements des photons et de la matière, la somme totale p_t des quantités de mouvements est nulle. Cette constatation constituera une deuxième équation :

$$\vec{p}_t = \vec{p}_\Lambda + \vec{p}_m = 0 \tag{7}$$

Grâce aux équations (2) et (7), nous sommes capables de déterminer les proportions de masses qui s’imposent. Il nous faut maintenant trouver les valeurs de p_Λ et de p_m pour compléter l’équation.

Attention, pour évaluer la quantité de mouvement, nous devrons le faire en tant qu’observateur situé au repos au centre de masse de l’univers. Ceci a pour conséquence que nous devrons évaluer la quantité de mouvement en tenant compte des effets relativistes dus à la vitesse de l'univers en expansion.

3.1 Calcul de la quantité de mouvement p_{Λ} des photons

Déterminons l'équation nécessaire pour décrire p_{Λ} de l'équation **(7)**.

Les quantités de mouvement de chaque photon individuel et de chaque particule de matière sont vectorielles et peuvent avoir n'importe quelle direction dans l'espace. Mais si tous les modules de ces vecteurs étaient alignés sur une même droite (en tenant compte de la direction + ou -), nous aurions toujours l'égalité suivante :

$$\left|\vec{p}_{\Lambda}\right| = \left|\bar{p}_{m}\right| \quad \textbf{(8)}$$

D'une certaine manière, ce n'est pas trop difficile à comprendre. Chaque fois qu'un photon est émis, il transmet à la matière la même quantité de mouvement (inverse). Si nous ne tenons plus compte des directions vectorielles individuelles de chaque photon et de chaque particule de matière, l'égalité globale (seulement) tient encore en raison du fait que la somme doit être nulle. Simplifions la notation de l'équation (13) pour ne garder que les valeurs scalaires. Nous avons donc :

$$p_{\Lambda} = p_{m} \quad \textbf{(9)}$$

La quantité de mouvement p d'un photon est normalement déterminée par la constante de Planck h et par sa longueur d'onde λ :

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \textbf{(10)}$$

En raison de la dualité corpusculaire et ondulatoire, nous savons que l'énergie d'une onde électromagnétique de longueur λ peut être associée à l'énergie contenue dans une masse m. Grâce à l'équation d'énergie d'Einstein (à gauche, dans l'équation (11)) et de l'équation d'énergie de Planck (à droite, dans l'équation (11)), nous obtenons l'égalité suivante :

$$m_{\lambda} \cdot c^{2} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \textbf{(11)}$$

Grâce aux équations (10) et (11), nous sommes en mesure d'obtenir l'équation suivante qui donne la quantité de mouvement en fonction de la masse m_{λ} associée au photon de longueur d'onde λ:

$$p = m_{\lambda} \cdot c \tag{12}$$

Bien sûr, la valeur de la masse m_{λ} du photon dépend de la longueur de l'onde électromagnétique. Dans le vide de l'espace, plusieurs longueurs d'ondes peuvent être présentes variant de $2\pi \cdot L_p$ jusqu'à $2\pi \cdot R_u$. Supposons qu'il peut y avoir n_{λ} photons pour chaque longueur d'onde λ. Faisons la sommation de la quantité de mouvement p_{Λ} de tous les photons de l'univers, de $\lambda = 2\pi \cdot L_p$ jusqu'à $\lambda = 2\pi \cdot R_u$, par sauts discrets de $i \cdot L_p$ (où $i = 1$ à $N^{1/2}$) :

$$p_{\Lambda} = m_{\Lambda} \cdot c = \sum_{i=1}^{i=\sqrt{N}} n_{\lambda} \cdot m_{\lambda} \cdot c \Big|_{\lambda = 2\pi L_p \cdot i} \tag{13}$$

Ici, nous avons associé une valeur de masse m_{Λ} à l'ensemble de tous les photons de l'univers. Notons que N est le nombre maximal de photons de longueur d'onde $2\pi \cdot R_u$ pouvant être contenus dans la masse de l'univers m_u (en associant une masse à l'énergie de chaque photon). Sa valeur provient de l'hypothèse sur les grands nombres de Dirac [7]. Nous avons montré plusieurs méthodes pour l'obtenir [8], mais voici la plus précise [3] :

$$N = \frac{1}{\alpha^{57}} \approx 6{,}3 \times 10^{121} \tag{14}$$

Dans cette équation, α est la constante de structure fine.

Dans l'équation (13), notons aussi que la longueur de Planck L_p multipliée par le radical de N donne précisément la valeur du rayon de courbure apparent de l'univers R_u [6, 9 ,10] :

$$L_p \cdot \sqrt{N} = R_u \tag{15}$$

3.2 Calcul de la quantité de mouvement p_m de la matière

Déterminons l'équation nécessaire pour décrire p_m de l'équation (7).

Partons de notre modèle de l'univers. L'univers est en expansion. De manière globale, la lumière et la matière s'éloignent d'un centre de masse. Mais la matière ne peut pas se déplacer aussi vite que la lumière. En final, on se retrouve avec une première sphère de matière (que nous avons appelé l'univers matériel) imbriquée dans une autre sphère, plus grande, qui contient des ondes électromagnétiques (que nous avons appelé l'univers lumineux).

Ici, nous ne faisons aucune distinction entre les types de matière (matière baryonique ou « matière noire »). Nous la regardons dans son ensemble. En raison du principe de relativité d'Einstein, nous savons que la matière ne peut pas se déplacer du centre de masse aussi vite que la lumière. Nous avons déterminé par calculs (grâce à la résolution d'un système de 4 équations et 4 inconnues [16]) que la matière se déplace à $\beta \cdot c$. Ici, la valeur de β est donnée par :

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0{,}764 \tag{16}$$

Nous avons aussi déterminé que l'univers lumineux tournait sur lui-même à une vitesse proche de celle de la lumière. Par le même fait, la vitesse tangentielle de l'univers matériel doit aussi être $\beta \cdot c$. Nous constatons ici que chaque particule de matière se déplace dans 2 directions à la fois. Nous ne pouvons pas faire simplement une sommation vectorielle des vitesses, car les vitesses impliquées ici sont de nature relativiste. Il faut donc faire une sommation vectorielle relativiste.

Montrons comment faire une sommation relativiste de deux vecteurs vitesses $u_{x,y,z}$ et $w_{x,y,z}$. Pour simplifier le problème, nous choisissons un cadre de référence pour exprimer le vecteur vitesse $w_{x,y,z}$ de manière à ce que $w_y = 0$ et $w_z = 0$. Il s'agit de faire les rotations et les translations qui s'imposent pour superposer le vecteur $w_{x,y,z}$ avec l'axe des abscisses. Il est toujours possible de le faire.

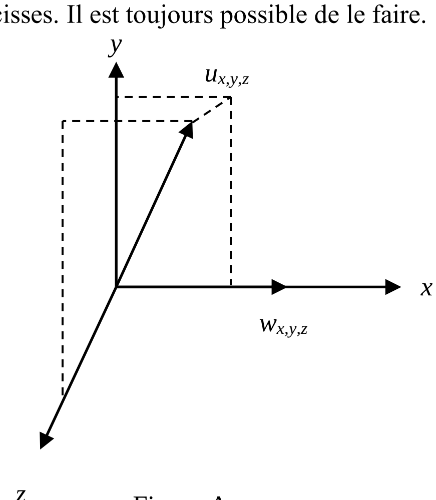

Figure A

S'en suivent les trois équations suivantes qui donnent le vecteur résultant $v_{x,y,z}$.

$$v_x = \frac{u_x + w_x}{1 + \frac{u_x \cdot w_x}{c^2}} \quad \textbf{(17)}$$

$$v_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \left(\frac{w_x}{c}\right)^2}}{1 + \frac{u_x \cdot w_x}{c^2}} \quad \textbf{(18)}$$

$$v_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \left(\frac{w_x}{c}\right)^2}}{1 + \frac{u_x \cdot w_x}{c^2}} \quad \textbf{(19)}$$

Supposons maintenant que localement nous analysons simultanément l'expansion et la rotation de l'univers matériel. Considérons le cas où l'univers matériel est en expansion à la vitesse $\beta{\cdot}c$ sur l'axe des ordonnées, c'est-à-dire $u_x = 0$, $u_y = \beta{\cdot}c$ et $u_z = 0$. Supposons également que, de manière arbitraire, l'univers est aussi en rotation sur l'axe des abscisses avec une vitesse tangentielle $w_x = \beta{\cdot}c$ et que $w_y = 0$ et $w_z = 0$ (tel qu'expliqué précédemment).

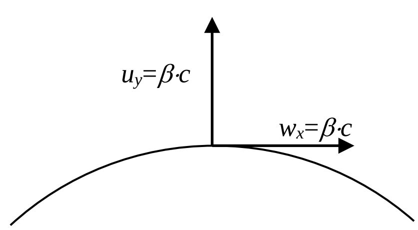

Figure B

Appliquons ces nouvelles données aux équations (17), (18) et (19). Ces équations se simplifient pour obtenir :

$$v_x = \beta \cdot c \quad \textbf{(20)}$$

$$v_y = \beta \cdot c\sqrt{1 - \beta^2} \quad \textbf{(21)}$$

$$v_z = 0 \text{ m/s} \quad \textbf{(22)}$$

Si nous calculons le module $|v_{x,y,z}|$ du vecteur résultant, nous obtenons :

$$\left|v_{x,y,z}\right| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = c \tag{23}$$

En faisant les remplacements qui s'imposent, nous obtenons :

$$v = \left|v_{x,y,z}\right| = \beta \cdot c\sqrt{2-\beta^2} \approx 0{,}909 \cdot c \tag{24}$$

La matière, dans son ensemble, voyage donc à une vitesse relativiste. Grâce à ses équations de la relativité restreinte [5], Einstein a montré qu'une masse au repos m_m accélérée à la vitesse v est perçue par un observateur au repos comme étant une masse égale à m' :

$$m' = \frac{m_m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \tag{25}$$

La quantité de mouvement d'une masse relativiste m' est donnée par :

$$p_m = m' \cdot v \tag{26}$$

Supposons que sa masse au repos est m_m. En utilisant les équations (24) et (25) dans l'équation **(25)**, sa quantité de mouvement, à la vitesse v, devient :

$$p_m = \frac{m_m \cdot \beta \cdot c\sqrt{2-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2 \cdot \left(2-\beta^2\right)}} \tag{27}$$

3.3 Résolution d'un système de 2 équations et de 2 inconnus

Provenant de l'équation (3), nous obtenons cette première équation :

$$m_u = m_\Lambda + m_m \tag{28}$$

À l'aide des équations (9), (13), et (27), nous obtenons cette deuxième équation :

$$m_\Lambda \cdot c = \frac{m_m \cdot \beta \cdot c\sqrt{2-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2 \cdot \left(2-\beta^2\right)}} \tag{29}$$

Les deux inconnus de ce système d'équations sont m_Λ et m_m. Avec 2 équations et 2 inconnus, nous pouvons résoudre ce système d'équations.

Dans l'équation (28), divisons tous les termes par m_u pour obtenir :

$$1 = \frac{m_\Lambda}{m_u} + \frac{m_m}{m_u} \quad \textbf{(30)}$$

Définissons Ω_Λ comme étant le rapport de la masse associée aux photons dans l'univers par rapport à la masse de l'univers m_u :

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{m_\Lambda}{m_u} \quad \textbf{(31)}$$

Définissons Ω_m comme étant le rapport de la masse associée à la matière (noire et baryonique) dans l'univers par rapport à la masse de l'univers m_u :

$$\Omega_m \equiv \frac{m_m}{m_u} \quad \textbf{(32)}$$

Nous obtenons alors l'équation suivante :

$$1 = \Omega_\Lambda + \Omega_m \quad \textbf{(33)}$$

De l'équation (29), nous remplaçons la valeur de m_m à l'aide de l'équation **(28)** pour obtenir :

$$\Omega_m = \frac{m_m}{m_u} = \frac{1}{\frac{\beta \cdot \sqrt{2-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2 \cdot \left(2-\beta^2\right)}} + 1} \approx 0{,}3141 \quad \textbf{(34)}$$

De même, à partir des équations (33) et (34), nous obtenons :

$$\Omega_\Lambda = \frac{m_\Lambda}{m_u} = 1 - \frac{1}{\frac{\beta \cdot \sqrt{2-\beta^2}}{\sqrt{1-\beta^2 \cdot \left(2-\beta^2\right)}} + 1} \approx 0{,}68586879\ldots \quad \textbf{(35)}$$

La masse de l'univers serait donc constituée de 68,59 % de photons de différentes longueurs d'ondes et de 31,41 % de matière quelconque (« matière noire » et baryonique).

Notons que les équations (34) et (35) donnent des nombres précis qui sont véritablement constants puisqu'ils ne dépendent que de β qui est aussi constant dans le temps.

En 2018, la sonde Planck de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a mesuré les valeurs suivantes [20] : Ω_Λ = 68,97 % ±0,57 et Ω_m = 31,03 % ±0,57.

En 2003, les sondes SDSS et WMAP de la NASA ont, quant à elles, mesuré les valeurs suivantes [24] : Ω_Λ = 68,5 % +3,2/-4,1 et Ω_m = 31,5 % +4,1/-3,2.

En 2013, la sonde WMAP de la NASA en combinaison avec le CMB a obtenu les valeurs suivantes [26] : Ω_Λ = 72,7 % ±3,8 et Ω_m = 27,3 % ±4,9.

Nous constatons que nos résultats théoriques concordent avec les mesures.

3.4 Calcul de la constante cosmologique

Nous désirons maintenant calculer la constante cosmologique.

L'équation de la densité de masse des photons dans l'univers est donnée par ρ_Λ :

$$\rho_\Lambda = \frac{\Omega_\Lambda \cdot H_0^2}{8\pi \cdot G} \approx 2{,}232 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg/m^3} \tag{36}$$

La constante cosmologique varie en fonction de ρ_Λ [23]:

$$\Lambda = \frac{8\pi \cdot G \cdot \rho_\Lambda}{c^2} \tag{37}$$

À l'aide de ces deux dernières relations, nous obtenons :

$$\Lambda = \frac{\Omega_\Lambda \cdot H_0^2}{c^2} = \frac{\Omega_\Lambda}{R_u^2} \approx 4{,}166 \times 10^{-53}\ \mathrm{m^{-2}} \tag{38}$$

Nous constatons que la « constante » cosmologique Λ n'est pas une constante puisqu'elle varie en fonction du rayon de courbure apparent de l'univers R_u.

Il peut être montré que l'équation suivante est également vraie, car le rayon de courbure apparent de l'univers R_u peut être décrit en fonction de la longueur de Planck et de la constante N [8] :

$$\Lambda = \frac{\Omega_\Lambda}{N \cdot L_p^2} \approx 4{,}166 \times 10^{-53}\ \mathrm{m^{-2}} \tag{39}$$

La valeur de la constante cosmologique est presque nulle par rapport aux autres termes de l'équation **(1)**. Par approximation, nous obtenons [19, 25] :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu} \tag{40}$$

5. CONCLUSION

Nous sommes en mesure de calculer de manière théorique la valeur de la constante cosmologique ainsi que la proportion massique de l'énergie des photons contenus dans l'univers sans avoir à faire intervenir le concept d'énergie noire. En fait, « l'énergie noire », comme certains l'appellent, n'est pas autre chose que l'ensemble des ondes électromagnétiques contenues dans l'univers. Comme nous ne sommes pas encore en moyen de capter les différentes longueurs d'ondes impliquées, cette énergie nous semble impalpable et mystérieuse.

Nous constatons bien que nos calculs théoriques nous mènent à des quantités similaires (pour Ω_Λ et Ω_m) à celles obtenues par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) grâce à la mission de la sonde Planck [20] et par la NASA grâce aux sondes SDSS et WMAP [24, 26].

6. RÉFÉRENCES

[1] "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014", Cornell University Library, juillet 2015, article Internet à : http://arxiv.org/pdf/1507.07956v1.pdf

[2] Salvatelli, Valentina, Andrea Marchini, Laura Lopez-Honorez et Olga Mena, "New constraints on Coupled Dark Energy from Planck", *Phys. Rev.*, 2013, pp. 9, https://arxiv.org/abs/1304.7119

[3] Mercier, Claude, "Calcul de la constante gravitationnelle universelle *G*", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 13 mars 2013, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

[4] Hubble, E. et Humason, M. L., "The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae", *The Astrophysical Journal*, v. 74, 1931, p.43.

[5] Einstein, Albert, "On the Electrodynamics of Moving Bodies ", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, Dover Publications, 1952 (original 1905), pp. 35-65.

[6] Mercier, Claude, "Calcul du rayon de courbure apparent de l'univers", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 9 juin 2013, article disponible sur Internet à: www.pragtec.com/physique/

[7] Dirac, P. A. M., "Cosmological Models and the Large Numbers Hypothesis", *Proceedings of the Royal Society*, Grande-Bretagne, 1974, pp. 439-446.

[8] Mercier, Claude, "Plus d'une centaine de manières d'obtenir le grand nombre N", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 20 mars, 2016, article disponible sur Internet à: www.pragtec.com/physique/

[9] Sepulveda, L. Eric, "Can We Already Estimate the Radius of the Universe", *American Astronomical Society*, 1993, p. 796, paragraphe 5.17.

[10] Silberstein, Ludwik, "The Size of the Universe: Attempt at a Determination of the Curvature Radius of Spacetime", *Science*, v. 72, novembre 1930, p. 479-480.

[14] Carvalho, Joel C., "Derivation of the Mass of the Observable Universe", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 34, no 12, décembre 1995, p. 2507.
[15] Mercier, Claude, "Calcul de la masse apparente de l'univers", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 5 mai 2012, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/
[16] Mercier, Claude, "La vitesse de la lumière ne serait pas constante", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 8 octobre 2011, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/
[17] Carroll, Sean M., " Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity", *Addison Wesley*, Pearson Education inc., San Francisco, 2004, p. 172.
[18] Einstein, Albert, "Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, Dover Publications, 1952 (original 1917), pp. 175-188.
[19] Einstein, Albert, "The Foundation of the General Theory of Relativity", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, Dover Publications, 1952 (original 1916), pp. 109-164.
[20] Aghanim, N. et al., "Planck 2018 Results: VI. Cosmological Parameters", Agence Spatiale Européenne (ESA), Astronomy & Astrophysics manuscript, no ms, 18 juin 2018, p. 68.
[21] Mercier, Claude, "Modèle expliquant la force gravitationnelle", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 22 août 2015, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/
[22] Mercier, Claude, "Calcul de l'accélération de l'expansion de l'univers", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 4 août 2017, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/
[23] "Constante cosmologique", *Wikipedia*, article disponible sur Internet à : https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_cosmologique
[24] Tegmark, Max et al., "Cosmological Parameters from SDSS and WMAP", *Physical Reviews D*, no 69, 103501, 5 mai 2004, p. 9.
[25] Carroll, Sean M., " Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity", *Addison Wesley*, Pearson Education inc., San Francisco, 2004, p. 2.
[26] Bennett, C. L. et al., "Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results", *The Astrophysical Journal supplement series*, vol. 208, no 2, octobre 2013, p. 16 de 25.