Calculs de la température moyenne du fond diffus de l'univers et de la constante de Hubble

Claude Mercier ing., 9 juillet, 2012 claude.mercier@gctda.com
Rév. 27 août, 2016

En faisant les hypothèses que l'univers est en rotation [15] *et qu'il agit comme un corps noir, il est possible de calculer la température moyenne du fond diffus lointain de l'univers. En supposant une constante de Hubble de $H_0 \approx 71{,}5 \pm 1{,}3$ km/(s·MParsec) tel que le suggère les résultats récents d'une équipe de recherche qui a combiné différentes techniques de mesure* [1]*, nous obtenons une température d'environ 2,73 ± 0,03 ºKelvin.* [1] *Ce résultat est appuyé par une étude de D. J. Fixsen* [6] qui a réalisé d*es mesures précises de la température moyenne du fond diffus lointain de l'univers pour obtenir une température de $T \approx 2{,}72548 \pm 0{,}00057$ ºKelvin.*

Dans des conditions similaires, nous verrons qu'un univers qui n'aurait pas été en rotation aurait eu une température d'environ 31,9 ºKelvin, ce qui n'est évidemment pas le cas.

Suite à ces calculs, nous constatons que la mesure de T obtenue dans l'étude de D. J. Fixsen comporte moins d'incertitude que H_0. En supposant notre équation théorique correcte et égale à la valeur de T obtenue par Fixsen, nous pouvons obtenir une constante de Hubble théorique de $H_0 \approx 71{,}50 \pm 0{,}03$ km/(s·MParsec). Ce résultat est similaire à celui de l'équipe de recherche de David Rapetti [1] *qui a obtenu $H_0 \approx 71{,}5 \pm 1{,}3$ km/(s·MParsec). De plus, notre résultat est aussi en accord avec les mesures du projet WMAP de la NASA qui a obtenu $H_0 \approx 70{,}4 \pm 1{,}4$ km/(s·MParsec)* [3].

Selon nos calculs et selon le fait que l'univers soit en rotation, cela implique que la densité moyenne de l'univers est de $\sigma_u \approx 7{,}4643 \pm 0{,}0002 \times 10^{-33}$ kg/m³.

MOTS CLÉS : Univers, rotation, température, micro-ondes, fond diffus, Hubble, densité

1. INTRODUCTION

Dans la nature, nous pouvons citer plusieurs exemples d'objet tournant autour d'un autre (par exemple, les électrons autour du noyau de l'atome, la Terre autour du Soleil, notre système solaire autour du trou noir de notre galaxie, etc.). Nous émettons donc l'hypothèse que l'univers est en rotation. Plusieurs astrophysiciens envisagent cette même hypothèse, dont Stephen Hawking [15] et Fennelly [16].

[1] De récents travaux que nous avons réalisés nous ont permis d'évaluer la constante de Hubble à $H_0 \approx 72{,}09548632 \pm 0{,}000000046$ km/(s·MParsec) et la constante de gravitation universelle à $G \approx 6{,}67323036 \pm 0{,}00000030 \times 10^{-11}$ m³/(kg·s²). Cette situation nous a permis de réévaluer la température moyenne du fond diffus de l'univers (CMB) à $T \approx 2{,}7367951 \pm 0{,}0000026$ °K [17].

Nous pensons même qu'il est en rotation à une vitesse proche de celle de la lumière. Cette hypothèse nous amène à utiliser le concept du disque tournant d'Einstein. En effet, ce dernier a démontré que la circonférence d'un disque tournant est supérieure à celui d'un disque statique [7]. En faisant l'hypothèse que la circonférence de l'univers en rotation est divisée par la constante de la structure fine, nous obtenons une circonférence qui est environ 137 fois plus grande que si l'univers était statique. En assimilant l'univers à un immense corps noir, nous calculons ce que devrait être la température moyenne du fond diffus de l'univers. Le résultat obtenu coïncide parfaitement avec la mesure de la température faite par l'observation du rayonnement dans les micro-ondes du fond diffus.

Nous faisons alors la constatation que la température mesurée du fond diffus de l'univers est connue de manière très précise alors que la constante de Hubble H_0 possède encore beaucoup d'incertitude. Cela nous amène à faire l'hypothèse que notre équation est juste et qu'elle est précisément égale à la température mesurée du fond diffus de l'univers. En faisant le chemin inverse, il nous est possible d'isoler la valeur de la constante de Hubble H_0 pour la calculer de manière théorique en fonction de la température moyenne du fond diffus.

Pour finir, nous utiliserons notre valeur de la constante de Hubble pour calculer la densité moyenne de l'univers. Cette densité sera bien sûr affectée par le fait que l'univers est en rotation.

2. DÉVELOPPEMENT

2.1. Hypothèses sur l'univers

Notre univers peut avoir un des deux états suivants : être en rotation ou non. À priori, les électrons tournent sur eux-mêmes. Ils tournent autour d'un noyau. La Terre tourne autour d'elle-même. Elle tourne autour du Soleil. Notre Soleil tourne autour du trou noir qui est situé au centre de notre galaxie. Les exemples de systèmes en rotation sont nombreux dans la nature. En fait, très peu de choses peuvent être considérées statiques à long terme (s'il y en a). Les exemples de systèmes en rotation sont suffisamment nombreux pour nous laisser croire qu'il y a plus de probabilité pour que notre univers soit en rotation que de le voir être statique.

Einstein pensait que l'univers était fini et statique [11]. Cependant, même ses équations de la relativité générale [14] le menait à constater que l'univers était soit en expansion ou en contraction. C'est son acharnement à le penser statique qui l'a mené à concevoir la constante cosmologique (stratagème mathématique qui force les équations de l'univers à être statique). Cependant, Hubble a montré en 1929, grâce à ses observations, que l'univers était en expansion [12]. Einstein a alors reconnu avoir fait une erreur en inventant la constante cosmologique. Il aurait été le premier à faire la prédiction que l'univers était en expansion et ce, de manière totalement théorique.

Si notre univers est en rotation, cela a différents impacts. Premièrement, il aurait alors une orientation privilégiée. Il pourrait aussi avoir une charge électrique.

Pour que l'univers soit en rotation tout en ne violant pas le principe de conservation de la quantité de mouvement, deux possibilités s'offrent à nous.

La première possibilité consiste en la possibilité qu'il y ait un deuxième univers qui tourne en sens inverse. C'est une hypothèse qui reste non vérifiable car personne ne peut voir ou sonder en-dehors de notre univers. Notre univers est comme une prison d'où personne ne peut s'échapper. Dans cet état des choses, notre univers aurait une charge électrique inverse de celle de l'autre univers.

La deuxième possibilité consiste, quant à elle, à l'existence de quelque chose d'autre à l'intérieur même de notre univers qui tourne en sens inverse. La quantité de mouvement globale serait alors conservée et serait nulle. Ce quelque chose d'autre pourrait très bien être la sphère contenue à l'intérieur de l'horizon. Cette hypothèse est d'autant plus plausible que nous savons déjà que les trous noirs en général sont en rotation à une vitesse avoisinant celle de la lumière. Il se pourrait donc que ce soit le cas de l'horizon de notre univers. Dans cette version de notre hypothèse, la charge globale de notre univers serait nulle. La charge contenue dans le trou noir de l'univers serait inverse mais égale à la charge électrique contenue dans le restant de l'univers. L'univers serait comme un immense neutron avec une charge globalement nulle. En effet, un neutron est principalement composé d'un proton et d'un électron.

Cette deuxième hypothèse nous semble beaucoup plus probable que la première, car elle permettrait d'expliquer pourquoi il est requis que la vitesse de la lumière soit nulle à l'horizon de l'univers [5]. Par conséquent, c'est cette hypothèse que nous allons approfondir dans le présent document.

Nous pensons que l'hypothèse d'un univers en rotation implique une température moyenne dans l'univers qui doit avoisiner 2,72548 ºK tel que mentionné dans le document de Fixsen [6]. Le fait de trouver une équation qui expliquerait cette température moyenne de manière théorique en se basant sur nos hypothèses nous réconforterait sur l'exactitude de ces dernières.

2.2. L'univers vu comme un corps noir

L'univers possède toutes les propriétés d'un corps noir. En effet, tout comme un corps noir, il ne reflète pas la lumière puisque toute la lumière est nécessairement contenue dans l'univers (en admettant qu'il n'y a pas d'autres univers ou que notre univers n'entre pas en collision avec un autre univers hypothétique). De plus, il irradie de l'énergie à la surface de la sphère de l'univers lumineux selon la courbe théorique d'un corps noir. Le spectre émis ne dépend que de sa température.

La loi de Stefan-Boltzmann permet de déterminer la densité de flux M^o en fonction de la température T (en degré Kelvin) en W/m^2.

$$M^\circ(T) = \sigma \cdot T^4 \tag{1}$$

Ici, la constante σ est la constante de Stefan-Boltzmann. Elle est définie par :

$$\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k_B^4}{15 \cdot h^3 \cdot c^2} \approx 5{,}67 \times 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot {}^\circ\mathrm{K}^4} \tag{2}$$

Dans cette équation, $h \approx 6{,}62606957 \times 10^{-34}$ J·s est la constante de Planck [10], $c \approx 299792458$ m/s est la vitesse de la lumière dans le vide actuelle [10] et $k_B \approx 1{,}3806488 \times 10^{-23}$ J/°K est la constante de Boltzmann [10].

2.3. Calcul de la température moyenne du fond diffus de l'univers

La densité de flux à la surface de la sphère représentant l'univers lumineux peut être définie comme étant la puissance totale dissipée dans l'univers P_u sur l'aire totale A_u de la sphère de l'univers lumineux. La puissance dissipée P_u correspond à prendre l'énergie totale E_u et à la diviser par l'âge apparent de l'univers T_u=1/H_0 où H_0 est la constante de Hubble.

$$M^\circ = \frac{P_u}{A_u} = \frac{E_u}{A_u \cdot T_u} = \frac{E_u \cdot H_0}{A_u} \tag{3}$$

Einstein a montré que l'énergie totale d'un objet est donnée par l'équation suivante [13] :

$$E_t = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{4}$$

Selon Einstein, la masse d'un corps en mouvement est donnée par [13] :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{5}$$

Par conséquent, l'énergie totale d'un corps en mouvement est donnée par :

$$E_t = m \cdot c^2 \tag{6}$$

La masse apparente de l'univers est donnée par l'équation suivante [3,4] :

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \approx 1{,}8 \times 10^{53}\,\mathrm{kg} \tag{7}$$

Dans l'équation **(7)**, la constante de gravitation universelle est donnée par $G \approx 6{,}67384\times10^{-11}$ m^3/(kg·s^2) [10]. Pour ce qui est de la constante de Hubble H_0, la valeur la plus récente obtenue par l'équipe de recherche de David Rapetti [1] se situe autour de $H_0 \approx 71{,}5 \pm 1{,}3$ km/(s·MParsec). Dans le présent document, c'est d'ailleurs cette valeur qui sera utilisée.

La masse de l'univers m_u représente déjà celle de l'univers en expansion. Par conséquent, $m_u = m$ dans l'équation (6). L'énergie de l'univers E_u devient donc :

$$E_u = m_u \cdot c^2 = \frac{c^5}{G \cdot H_0} \tag{8}$$

En utilisant les équations **(1)**, **(2)**, **(3)** et **(8)**, nous obtenons :

$$T = \left(\frac{15 \cdot h^3 \cdot c^7}{2 \cdot \pi^5 \cdot k_B^4 \cdot G \cdot A_u} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{9}$$

Ludwig Boltzmann a exprimé l'entropie statistique en fonction du nombre de micro-états Ω définissant l'équilibre d'un système donné au niveau macroscopique :

$$S = k_B \cdot \ln(\Omega) \quad \text{où} \quad k_B = 1{,}380658 \times 10^{-23} \text{ J/°K [10]} \tag{10}$$

Nous avons montré que la vitesse d'expansion de l'univers matériel se faisait β fois plus lentement que l'expansion de l'univers lumineux [5]. La valeur de β est un nombre pur.

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0{,}76 \tag{11}$$

Comme l'entropie de l'univers est en quelque sorte une mesure du désordre dans l'univers, il convient de penser que l'entropie augmente au même rythme que l'expansion de l'univers. L'entropie qui est mesurée aux confins de l'univers lumineux aurait donc comme valeur *S'*:

$$S' = \frac{S}{\beta} = \frac{k_B \cdot \ln(\Omega)}{\beta} = k'_B \cdot \ln(\Omega) \quad \text{où} \quad k'_B = \frac{k_B}{\beta} \tag{12}$$

La « constante de Boltzmann » serait vraie seulement localement dans notre univers, c'est-à-dire à notre position r_u par rapport au centre de la sphère qui définie l'univers. Cependant, aux limites extrêmes de l'univers lumineux, c'est-à-dire à la position $R_u = r_u/\beta$, la « constante de Boltzmann » serait plutôt k'_B telle que définie à l'équation **(12)**. Par conséquent, aux confins de l'univers lumineux, l'équation **(9)** devient :

$$T = \left(\frac{15 \cdot h^3 \cdot c^7}{2 \cdot \pi^5 \cdot \left(k'_B\right)^4 \cdot G \cdot A_u} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{15 \cdot h^3 \cdot c^7}{2 \cdot \pi^5 \cdot \left(\frac{k_B}{\beta}\right)^4 \cdot G \cdot A_u} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{13}$$

Il nous reste à trouver l'aire de surface A_u de la sphère représentant l'univers lumineux. En supposant que l'expansion de l'univers lumineux se fait à la vitesse de la lumière [8] durant une période de temps égale à l'âge apparent de l'univers [9], le rayon apparent R_u de celui-ci est donné par :

$$R_u = \frac{c}{H_0} \approx 1{,}3 \times 10^{26} \text{ mètres} \tag{14}$$

Si l'univers était statique (mais, nous verrons que **ce n'est pas le cas**), l'équation de l'aire serait :

$$A_u = 4 \cdot \pi \cdot R_u^2 \quad \text{(Pour un univers statique)} \tag{15}$$

En appliquant cette hypothèse à l'équation **(13)**, cela mènerait à une température moyenne *T* de 31,9 °Kelvin. Cette hypothèse est évidemment fausse puisque des mesures présentées par Fixsen [6] montrent que la température moyenne de l'univers est de l'ordre de 2,72548 ± 0,00057 °Kelvin.

Faisons alors l'hypothèse que l'univers est en rotation. Einstein a déjà démontré qu'un disque tournant à une vitesse voisine à celle de la lumière possède une circonférence supérieure à celle d'un disque de même rayon qui serait statique [7]. Cet effet relativiste fait en sorte que le rayon servant à calculer la circonférence devient :

$$R'_u = \frac{R_u}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{(Pour univers en rotation)} \tag{16}$$

À plus petite échelle, c'est le même phénomène qui se passe au niveau de l'électron. Le rayon classique de l'électron permet de trouver la véritable grosseur (relativiste) de l'électron en rotation. Cependant, la longueur d'onde de Compton de l'électron mène à un rayon beaucoup plus grand. C'est celui qu'aurait l'électron s'il était statique. Le rapport de ces deux rayons donne la constante de structure fine α :

$$\alpha = \frac{r_e}{r_c} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 7{,}2973525698\times 10^{-3} \approx \frac{1}{137{,}0359991} \tag{17}$$

La vitesse de rotation de la périphérie de l'univers lumineux serait donc :

$$v = c\cdot\sqrt{(1-\alpha)\cdot(1+\alpha)} \approx 0{,}999973374\cdot c \tag{18}$$

Cette vitesse est très proche de celle de la lumière. Pour un observateur situé au centre de rotation, le temps qui s'écoule en périphérie de l'univers lumineux est dilaté et les distances sont compressées par le facteur de Lorentz.

Donc, l'équation **(16)** devient :

$$R'_u = \frac{R_u}{\alpha} \quad \text{(Pour univers en rotation)} \tag{19}$$

L'aire de surface de l'univers de l'équation (15) devient alors :

$$A_u = \frac{4\cdot\pi\cdot R_u^2}{\alpha^2} \quad \text{(Pour univers en rotation)} \tag{20}$$

Avec l'aide des équations **(14)** et **(20)**, l'équation **(13)** devient [2] :

$$T=\left(\frac{15\cdot\alpha^{2}\cdot h^{3}\cdot\beta^{4}\cdot c^{5}\cdot H_{0}^{2}}{8\cdot\pi^{6}\cdot k_{B}^{4}\cdot G}\right)^{\frac{1}{4}}\approx 2{,}73\pm 0{,}03\,°\mathrm{K} \qquad \textbf{(21)}$$

Monsieur Fixsen a calculé la combinaison statistique des différentes mesures de la température moyenne du fond diffus lointain de l'univers. Ces mesures proviennent, entre autres, du projet WMAP de la NASA [6]. Selon ces mesures, la température moyenne T du fond diffus de l'univers serait :

$$T\approx 2{,}72548\pm 0{,}00057\,°\mathrm{K} \qquad \textbf{(22)}$$

Nous constatons que l'équation **(21)** se trouve confirmée par ce résultat. Notons que le gros des incertitudes de l'équation **(21)** provient du fait que la constante de Hubble H_0 n'est pas connue précisément.

2.4. Calcul de la constante de Hubble

Il devient évident que l'incertitude sur la température moyenne du fond diffus telle que mesurée par la NASA est de loin plus petite que l'incertitude de la constante de Hubble.

Si la théorie menant à l'équation **(21)** est correcte, il devient possible de faire égaler cette équation au résultat obtenu en **(22)**. Ceci permet alors d'isoler la constante de Hubble H_0 de l'équation afin de pouvoir la calculer à partir de paramètres qui sont de loin plus précis.

Isolons donc H_0 de l'équation (21) :

$$H_{0}=\frac{\pi^{3}\cdot T^{2}\cdot k_{B}^{2}\cdot\sqrt{\dfrac{8\cdot G}{15\cdot c^{5}\cdot h^{3}}}}{\beta^{2}\cdot\alpha}\approx 71{,}50\pm 0{,}03\,\mathrm{km/(s{\cdot}MParsec)} \qquad \textbf{(23)}$$

Cette équation réduit l'incertitude d'un facteur 47 par rapport à la dernière mesure de $H_0 \approx 70{,}4 \pm 1{,}4$ km/(s·MParsec) présentée par l'équipe du projet WMAP de la NASA [2] et réduit l'incertitude d'un facteur 43 par rapport au résultat de l'équipe de recherche de David Rapetti [1] qui présente une constante de Hubble qui se situe autour de $H_0 \approx 71{,}5 \pm 1{,}3$ km/(s·MParsec) .

---

[2] De récents travaux que nous avons réalisés nous ont permis d'évaluer la constante de Hubble à $H_0 \approx 72{,}09548632 \pm 0{,}000000046$ km/(s·MParsec) et la constante de gravitation universelle à $G \approx 6{,}67323036 \pm 0{,}00000030 \times 10^{-11}$ $m^3/(kg{\cdot}s^2)$. Cette situation nous a permis de réévaluer la température moyenne du fond diffus de l'univers (CMB) à $T \approx 2{,}7367951 \pm 0{,}0000026$ °K [17].

Comme la constante de Hubble est couramment utilisée en astrophysique pour déterminer les grands paramètres de l'univers, nous proposons que sa mesure soit remplacée par la mesure précise de la température moyenne du fond diffus de l'univers. La valeur de la constante de Hubble serait ensuite déterminée par calcul.

Quelles que soient les méthodes utilisées présentement pour mesurer la constante de Hubble, la méthode utilisée pour mesurer la température du fond diffus de l'univers apparaît beaucoup plus simple et précise.

2.5. Calcul de la de la densité moyenne de l'univers

En mathématique, le volume d'une sphère de rayon R est donné par :

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \tag{24}$$

Cependant, en raison de l'effet relativiste décrit par Einstein, lorsque cette sphère tourne à une vitesse avoisinant celle de la lumière, le volume de cette sphère augmente sans que le rayon de la sphère n'augmente. En tenant compte de l'équation **(19)**, le volume de la sphère de l'univers lumineux sera :

$$V_u = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{R_u}{\alpha} \right)^3 \tag{25}$$

En tenant compte des équations **(7)**, **(14)** et **(23)**, la densité moyenne σ_u de l'univers sera :

$$\sigma_u = \frac{m_u}{V_u} = \frac{3 \cdot \alpha^3 \cdot H_0^2}{4 \cdot \pi \cdot G} \approx 7{,}4643 \pm 0{,}0002 \times 10^{-33} \mathrm{kg/m}^3 \tag{26}$$

Nous sommes conscients que cette valeur est bien en deçà de la valeur couramment montrée dans la littérature scientifique actuelle. Mais cela est dû au fait qu'il faut tenir compte que l'univers est en rotation.

3. CONCLUSION

Dans cet ouvrage, nous montrons que l'univers est en rotation. Cette hypothèse permet de trouver (en supposant une constante de Hubble qui serait de $H_0 \approx 71{,}5 \pm 1{,}5$ km/(s·MParsec) [1]) une équation pour calculer la température moyenne du fond diffus de l'univers $T \approx 2{,}73 \pm 0{,}03$ ºK à partir des paramètres fondamentaux c, h, G, α, k_B, et H_0.

Partant du fait que la mesure de la température du fond diffus lointain de l'univers mesurée par le projet WMAP de la NASA [2] comporte beaucoup moins d'incertitude que la mesure de la constante de Hubble, nous avons utilisé l'équation trouvée précédemment pour calculer la constante de Hubble en fonction des paramètres fondamentaux c, h, G, α, k_B, et T. Cela nous a permis de trouver une valeur calculée de la constante de Hubble qui comporte beaucoup moins d'incertitude que la valeur mesurée par l'équipe du WMAP [2] et de l'équipe de Fixsen [6]. Nous proposons donc que la nouvelle valeur de la constante de Hubble à utiliser soit dorénavant de $H_0 \approx 71{,}50 \pm 0{,}03$ km/(s·MParsec).

Une valeur plus précise de la constante de Hubble permet à plusieurs équations d'astrophysique de gagner en précision. De plus, le fait de savoir que l'univers est en rotation ouvre de nouvelles voies de recherche sur la genèse de l'univers.

Le fait que l'univers soit en rotation affecte la densité moyenne de celui-ci. Selon nos calculs, nous obtenons une valeur moyenne de $7{,}4643 \pm 0{,}0002 \times 10^{-33}$ kg/m^3.

4. RÉFÉRENCES

[1] Rapetti, David et al., "A Combined Measurement of Cosmic Growth and Expansion from Clusters of Galaxies, the CMB and Galaxy Clustering", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, déposé le 22 mai 2012, pp 1-10, arXiv:1205.4679v1 [astro-ph.CO]

[2] Jarosik, N. et al., "Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 192, no 2, février 2011, pp. 1-15.

[3] Carvalho, Joel C., "Derivation of the Mass of the Observable Universe", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 34, no 12, décembre 1995, p. 2507.

[4] 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/

[5] 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/

[6] Fixsen, D.J., "The Temperature of the Cosmic Microwave Background", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 707, décembre 2009, pp. 916-920.

[7] Einstein, Albert, "La relativité", *Petite Bibliothèque Payot*, v. 25, Paris, édition originale de 1956 de Gauthier-Villar reprise intégralement par les éditions Payot & Rivages pour l'édition de 2001, p. 109.

[8] Macleod, Alasdair, "Evidence for a Universe Expending at the Speed of Light", *University of highlands and islands physics*, Scotland, UK, avril 2004.

[9] Mercier, Claude, "Calcul de l'âge de l'univers", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 11 avril 2012, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

[10] "Latest (2010) Values of the Constants", NIST Standard Reference Database 121, dernière mise

à jour : avril 2012, article Internet à : http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html

[11] Einstein, Albert, "Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, publications Dover, 1952 (article original de 1917), pp. 176-188.

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

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

[14] Einstein, Albert, "The Foundation of the General Theory of Relativity", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, publications Dover, 1952 (article original de 1916), pp. 109-164.

[15] Hawking, Stephen, "On the Rotation of the Universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 142, 1969, pp. 129-141.

[16] Fennelly, A. J., "Effects of a Rotation of the Universe on the Number Counts of Radio Sources: Gödel's Universe", *The Astrophysical Journal*, v. 207, août 1976, pp. 693-699.

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