

## Calcul de l'âge de l'univers

Claude Mercier ing., 9 avril, 2012  
Rév. 4 mai 2019

claudemercier@cima.ca

---

*Grâce à ses observations, Edwin Powell Hubble a découvert en 1929 que l'univers est en expansion. Il constata que les galaxies, indépendamment de leurs mouvements propres, se fuyaient les unes les autres à des vitesses d'autant plus grandes qu'elles étaient éloignées les unes des autres [1]. Il en déduisit une loi et un paramètre qu'il baptisa  $H_0$  (mieux connu sous le nom de constante de Hubble).*

*En se basant sur ce fait, plusieurs astrophysiciens calculent l'âge extrapolé de l'univers grâce à l'équation  $1/H_0$ , spécialement si la densité de l'univers est faible. C'est la méthode utilisée par la NASA pour calculer un âge de l'univers de 13,75 milliards d'années (voir les résultats de la septième année du projet WMAP [3]).*

*Cependant, le modèle de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker [4,5,6,7,8,9] prédit que l'âge de l'univers se situe plutôt autour de  $2/(3 \cdot H_0)$ .*

*Grâce aux seuls paramètres  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide actuelle),  $G$  (constante de gravitation universelle) et  $H_0$  (constante de Hubble), il est possible de calculer précisément l'âge de l'univers grâce à une intégrale. Cette nouvelle méthode a le mérite de réconcilier les deux méthodes citées précédemment en faisant la distinction fondamentale entre la partie « réelle » et l'âge « apparent » de l'univers.*

---

**MOTS CLÉS :** Âge de l'univers, lumière, big bang, expansion de l'univers

### 1. INTRODUCTION

La NASA estime présentement l'âge de l'univers de l'univers grâce à l'inverse de la constante de Hubble [3], c'est-à-dire  $1/H_0$ . Le modèle des physiciens Alexandre Friedman, de l'abbé George Lemaître, Howard P. Robertson et Arthur G. Walker prédit que pour un univers plat dominé par la présence de matière [4,5,6,7,8,9], le véritable âge de l'univers serait plutôt autour de  $2/(3 \cdot H_0)$ .

Einstein considérait l'univers statique [18], c'est-à-dire avec des dimensions espace-temps constantes. Lorsqu'il s'est rendu compte que sa théorie de la relativité générale menait à un univers en expansion ou en contraction, il ajouta une constante cosmologique à ses équations pour rendre son modèle de l'univers statique [18]. Mentionnons que dans sa théorie de la relativité, Einstein supposait la vitesse de la lumière dans le vide constante [13]. C'était tout à fait conséquent avec sa manière de voir l'univers. Un univers statique mène à une vitesse de la lumière constante, sauf bien sûr aux abords de masses imposantes [12,13].

En 1929, Hubble constatait que l'univers était en expansion [1]. Lorsqu'Einstein prit connaissance des observations de Hubble, il fut contraint d'admettre que l'ajout d'une constante cosmologique à son modèle de l'univers, pour le rendre statique, a été la plus grande erreur de sa vie [18]. Il semble qu'il n'ait pas vu, à ce moment, que l'accélération de la lumière au cours du temps devenait une conséquence directe de l'expansion de l'univers. Grâce à de récents travaux, nous avons montré qu'il est possible que la vitesse de la lumière n'ait jamais été constante au cours du temps [11].

Selon Einstein, le potentiel gravitationnel (et par conséquent, la masse) change l'indice de réfraction du vide et ralentit la lumière<sup>1</sup>. L'univers est en expansion [3] et nous nous éloignons du centre de masse de ce dernier [6]. Par conséquent, l'indice de réfraction diminue et la lumière accélère au cours du temps [11].

Dans un premier temps, nous commencerons par montrer comment est effectué présentement le calcul de l'âge approximatif de l'univers. Dans un deuxième temps, nous utiliserons certains résultats de travaux que nous avons réalisés récemment [11] pour évaluer l'âge de l'univers en effectuant l'intégrale de l'inverse de la vitesse d'expansion de l'univers matériel en fonction du rayon de courbure de l'univers. Pour finir, nous ferons l'approximation de l'âge de l'univers. Nous montrerons que  $1/H_0$  représente en fait une bonne approximation de l'âge apparent de l'univers et que  $2/(3 \cdot H_0)$  représente la partie réelle de l'âge de l'univers. Nous pourrions alors comparer les résultats et commenter.

## 2. DÉVELOPPEMENT

### 2.1. Méthodes de calcul actuelles de l'âge de l'univers

En 1929, Edwin Powell Hubble constata que les galaxies se distancent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à la distance qui les sépare [1]. Il en déduisit une loi impliquant une constante qu'il baptisa  $H_0$ . Elle représente la vitesse d'éloignement moyenne  $v$  des galaxies par unité de distance  $\Delta r$ .

$$\frac{v}{\Delta r} = H_0 \quad \text{où} \quad v = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1)$$

La valeur de  $H_0$  se situe probablement entre 70,4 [3] et 76,9 km/(s·MParsec) [17].

---

<sup>1</sup> Son premier article traitant de ce sujet date de 1911 [12]. Cependant, sur les bases de la relativité générale [13], il devait multiplier la variation d'indice de réfraction par 2 [14,15]. Sa théorie est confirmée par les lentilles gravitationnelles [15,16].

**Calcul de l'âge de l'univers**

3

Dans le présent document, nous utiliserons la valeur de 70,4 km/(s·MParsec), car elle découle des plus récents résultats du projet WMAP de la NASA [3]<sup>2</sup>. De l'équation (1), nous avons :

$$\Delta t = \frac{1}{H_0} \quad (2)$$

C'est avec cette équation que la NASA évalue présentement l'âge de l'univers en l'approximant à 3,75 milliards d'années [3]. Cette manière de calculer l'âge de l'univers suppose que la vitesse d'expansion de celui-ci est constante.

Selon le modèle de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker [4,5,6,7,8,9], le véritable âge de l'univers serait plutôt autour de :

$$\Delta t = \frac{2}{3 \cdot H_0} \approx 9,3 \times 10^9 \text{ ans} \quad \text{ou} \quad \Delta t \cdot H_0 = \frac{2}{3} \quad (3)$$

**2.2. Calcul de l'âge de l'univers**

De récents travaux que nous avons menés, nous portent à croire que la vitesse de la lumière et la vitesse d'expansion de l'univers matériel n'étaient pas constantes au cours du temps [11]. Nous utiliserons certains résultats de ces travaux pour effectuer l'intégrale de l'inverse de la vitesse d'expansion de l'univers matériel en fonction du rayon de courbure de l'univers. Nous calculerons ainsi l'âge de l'univers.

Des travaux d'Einstein ont montré que la présence d'un corps massif déformait l'espace-temps [13] et faisait augmenter l'indice de réfraction du vide situé à proximité de ce corps [12]. En s'éloignant du corps massif, l'influence gravitationnelle diminue et la vitesse de la lumière tend vers  $c$ .

Pour résumer nos travaux antérieurs [11], nous pouvons dire que l'univers lui-même est la masse la plus grande qui existe. Comme l'univers est en expansion [1], nous nous éloignons du centre de masse de ce dernier. Cela a pour effet de faire diminuer l'indice de réfraction du vide au cours du temps. La vitesse de la lumière augmente alors au cours du temps pour tendre éventuellement vers une constante que nous avons baptisée  $k$  (lorsque le rayon de courbure apparent de l'univers tend vers l'infini). Pour l'instant, la vitesse de la lumière dans le vide

---

<sup>2</sup> De récents travaux nous ont permis d'établir précisément la valeur de la constante de Hubble à 72,09548580(32) km/(s·MParsec) [19]. S.V.P. se référer à l'appendice A pour plus de détails.

est  $c$ . En fait, selon nos travaux antérieurs [11], la vitesse de la lumière augmente de 1 m/s à tous les 35,4 ans environ (l'accélération de la lumière serait de  $a_L = c \cdot H_0 / \beta \approx 8,95 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ ).

Nous résumons ici les valeurs des différents paramètres de l'univers qui ont été calculés dans l'ouvrage cité en [11]. Ces paramètres sont basés uniquement à partir de  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide actuelle),  $G$  (constante de gravitation universelle) et  $H_0$  (constante de Hubble actuelle).

Le rapport  $\beta$  entre la vitesse d'expansion de l'univers matériel  $v_m$  actuelle et la vitesse de la lumière actuelle  $c$  est [11] :

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0,76 \quad (4)$$

La vitesse asymptotique  $k$  de la lumière (lorsque le rayon de courbure apparent de l'univers tend vers l'infini) est [11] :

$$k = c \cdot \sqrt{2 + \sqrt{5}} \approx 2 \cdot c \approx 6 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (5)$$

La masse apparente  $m_u$  de l'univers est [10,11] :

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \approx 1,8 \times 10^{53} \text{ kg} \quad (6)$$

Le rayon de courbure apparent  $r_u$  de l'univers est [11] :

$$r_u = \frac{\beta \cdot c}{H_0} \approx 1,0 \times 10^{26} \text{ m} \quad (7)$$

Comme nous l'avions mentionné précédemment, Einstein a montré que la vitesse de la lumière est influencée par le potentiel gravitationnel. Selon des calculs de Schwarzschild basés sur la relativité générale, il est possible de calculer la vitesse de la lumière  $v_c$  en fonction de  $r$  [15,16].

$$v_c(r) = \frac{c}{n(r)} \quad \text{où} \quad n(r) = \sqrt{\frac{1+\omega}{1-\omega}} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r} \quad (8)$$

- $v_c(r)$  = Nouvelle vitesse de la lumière en fonction de la distance  $r$
- $r$  = Distance entre le centre de la masse  $m$  et là où  $v_c(r)$  est évaluée
- $m$  = Masse engendrant le champ gravitationnel
- $G$  =  $6,67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$  = Constante gravitation universelle
- $c$  =  $2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$  = Vitesse de la lumière dans le vide

Cette équation est valide pour le calcul de la vitesse de la lumière autour d'un trou noir, d'une étoile ou d'une galaxie. Autrement dit, cette équation est valide seulement dans l'instant présent.

Cependant, dès que nous cherchons à calculer la vitesse de la lumière pour un temps passé ou futur, il faut compter sur le fait que la vitesse de la lumière change en fonction du rayon de courbure apparent de l'univers [11]. Il faut alors remplacer le  $c$  de l'équation (8) par  $k$  (voir équation (5)). La vitesse de la lumière en fonction du rayon de courbure apparent de l'univers devient :

$$v_L(r) = \frac{k}{n(r)} \quad \text{où} \quad n(r) = \sqrt{\frac{1+y}{1-y}} \quad \text{et} \quad y = \frac{2 \cdot G \cdot m_U}{k^2 \cdot r} \quad (9)$$

Dans cette équation, il existe un rayon de courbure  $r_h$  pour lequel la vitesse de la lumière  $v_L(r_h) = 0$ . Cette position  $r_h$  est appelée l'horizon de l'univers. C'est la position pour laquelle le dénominateur du radical de l'équation (9) devient nul. De manière similaire à un trou noir, le rayon de courbure de l'horizon  $r_h$  est obtenu par le rayon de Schwarzschild où nous remplaçons  $c$  par  $k$  :

$$r_h = \frac{2 \cdot G \cdot m_U}{k^2} \approx 6,2 \times 10^{25} \text{ m} \quad (10)$$

C'est le même principe qu'un trou noir [11]. L'univers est en fait le plus gros trou noir qui existe puisqu'il possède la plus grande masse. Cependant, à la différence d'un trou noir, au lieu que la masse se trouve à l'intérieur des limites de l'horizon, une bonne partie de la masse du trou noir de l'univers se trouve à l'extérieur des limites de l'horizon. En fait, le trou noir de l'univers se trouve à être centré autour du centre de masse de l'univers.

La vitesse de l'expansion de l'univers se fait présentement à la vitesse de la lumière [2]. En se basant sur les principes de la relativité d'Einstein, la matière ne peut se déplacer à la vitesse de la lumière sans avoir une énergie infinie. Par conséquent, l'affirmation précédente ne peut être vraie que pour la lumière. L'expansion de l'univers matériel (contenant les galaxies, les nuages de poussières intergalactiques, etc.) se fait, lui, à  $\beta \cdot c$ . Le facteur  $\beta$  doit nécessairement être inférieur à 1. D'ailleurs, selon notre éq. (4), sa valeur se situerait autour de 0,76.

Lorsque l'univers a commencé son expansion à partir de  $r = r_h$ , l'expansion a démarrée à partir d'une vitesse nulle (car la vitesse de la lumière est nulle pour ce rayon de courbure).

Pour un rayon de courbure  $r$  supérieur à  $r_h$ , la vitesse d'expansion de l'univers matériel  $v_m(r)$  se situe toujours à  $\beta$  fois la vitesse de la lumière  $v_L(r)$  :

$$v_m(r) = \beta \cdot v_L(r) = \frac{\beta \cdot k}{n(r)} \quad \text{où} \quad n(r) = \sqrt{\frac{1+y}{1-y}} \quad \text{et} \quad y = \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r} \quad (11)$$

En faisant l'intégrale de l'inverse de la vitesse d'expansion de l'univers matériel  $v_m(r)$  par rapport au rayon de courbure  $r$ , il est possible de calculer l'âge de l'univers plus précisément qu'en utilisant une simple projection tangentielle.

Trouvons l'âge de l'univers  $T_u$  en faisant l'intégrale suivante entre le rayon de courbure de l'horizon  $r_h$  et le rayon de courbure apparent de l'univers  $r_u$  :

$$T_u = \int_0^{r_u} \frac{1}{v_m(r)} \cdot dr = T_{0h} + T_{hu} = \int_{r_h}^{r_u} \frac{1}{v_m(r)} \cdot dr + \int_0^{r_h} \frac{1}{v_m(r)} \cdot dr \quad (12)$$

En faisant le calcul de l'intégrale, nous obtenons :

$$\int \frac{1}{v_m(r)} \cdot dr = \frac{(z(r) + 2 \cdot G \cdot m_u \cdot \ln(2 \cdot [k^2 \cdot r + z(r)]))}{\beta \cdot k^3} \quad (13)$$

$$\text{où} \quad z(r) = \sqrt{k^4 \cdot r^2 - 4 \cdot G^2 \cdot m_u^2}$$

Par conséquent, la valeur de  $T_u$  devient :

$$T_u = T_{0h} + T_{hu} \approx (9,73 + 10,72 \cdot i) \times 10^9 \text{ ans} \quad \text{où} \quad i = \sqrt{-1} \quad (14)$$

Ce résultat est de type complexe. Dans l'équation (14), la première partie de l'intégrale est de type réel (entre  $r_h$  et  $r_u$ ). Cependant, la deuxième partie de celle-ci est une valeur de type imaginaire (entre 0 et  $r_h$ ).

Pour l'instant, personne n'est en mesure d'observer ce qui se passe à l'intérieur des limites de l'horizon d'un trou noir (entre 0 et  $r_h$ ). Dans ce document, nous ne ferons aucune conjecture en ce qui a trait à ce qui se passe dans un trou noir. L'interprétation physique d'un temps de type complexe est donc laissée à la postérité pour analyse. Ce qui est certain, c'est que seule la portion de temps écoulée  $T_{hu}$  (environ 9,73 milliards d'années) entre le rayon de courbure de l'horizon  $r_h$  (où la vitesse de la lumière devient nulle) et le rayon de courbure apparent de l'univers  $r_u$  est de type réel et s'est bel et bien écoulé. Lorsque nous désirons tenir compte du temps écoulé entre la position 0 du big bang et le rayon de courbure de l'horizon  $r_h$ , nous devons calculer le module du temps écoulé  $|T_u|$ . Nous définirons cette valeur comme étant l'âge apparent de l'univers car il ne représente pas nécessairement le véritable âge de l'univers. Ce nombre représente seulement une apparence d'âge dans le cas probable où le big bang ait existé.

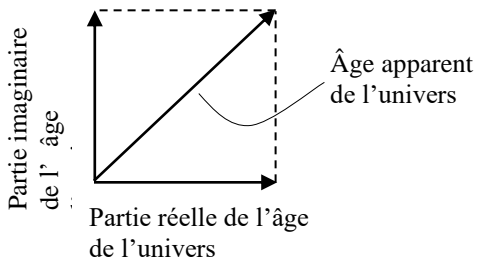
$$|T_u| = |T_{0h} + T_{hu}| = \sqrt{T_{0h}^2 + T_{hu}^2} \approx 14,48 \times 10^9 \text{ ans} \quad (15)$$

Nous constatons que la valeur obtenue est seulement 4,3 % supérieure à la valeur estimée en (2).

### 3. APPROXIMATION DE L'ÂGE DE L'UNIVERS

Tout comme le calcul de la puissance d'un moteur en électricité (avec la puissance réelle, la puissance inductive et la puissance apparente), l'âge de l'univers peut être vu comme suit : la partie « réelle » de l'âge de l'univers, la partie « imaginaire » de l'âge de l'univers et l'âge « apparent » de l'univers. Le module des deux composantes (réelle et imaginaire) peut se calculer à l'aide du théorème de Pythagore en faisant le radical de la somme des carrés de la partie réelle de l'âge de l'univers et de la partie imaginaire de l'âge de l'univers.

Le calcul de l'approximation de l'âge de l'univers se fera en trois parties : l'approximation de la partie réelle de l'âge de l'univers, l'approximation de la partie imaginaire de l'âge de l'univers et le calcul du module de l'âge apparent de l'univers.



**Figure 1** Ici, le module de l'âge apparent est décomposé en deux vecteurs : sa partie réelle et sa partie imaginaire.

#### 3.1. Approximation de la partie réelle de l'âge de l'univers

Faisons l'approximation de la partie réelle  $T_{hu}$  de l'âge de l'univers  $T_u$ .

Pour un rayon de courbure  $r_h$  de l'horizon, le radical suivant égale zéro :

$$z(r_h) = \sqrt{k^4 \cdot r_h^2 - 4 \cdot G^2 \cdot m_u^2} = 0 \quad (16)$$

Donc, selon les équations (12) et (13), nous obtenons :

$$T_{hu} = \frac{z(r_u) + 2 \cdot G \cdot m_u \cdot \ln\left(2 \cdot \left[k^2 \cdot r_u + z(r_u)\right]\right)}{\beta \cdot k^3} - \frac{2 \cdot G \cdot m_u \cdot \ln\left(2 \cdot k^2 \cdot r_h\right)}{\beta \cdot k^3} \quad (17)$$

où  $z(r_u) = \sqrt{k^4 \cdot r_u^2 - 4 \cdot G^2 \cdot m_u^2}$

En utilisant l'équation (10) et en faisant quelques simplifications, nous obtenons :

$$T_{hu} = \frac{1}{\beta \cdot k} \left( \sqrt{r_u^2 - r_h^2} + r_h \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{r_u^2 - r_h^2} + r_u}{r_h} \right) \right) \quad (18)$$

Cette même équation pourrait être réécrite de cette manière sans rien changer :

$$T_{hu} = \frac{r_u}{2 \cdot \beta \cdot c} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{2}\right) \cdot \underbrace{\left[ \frac{2 \cdot c}{k \cdot r_u \cdot \left(1 + \frac{\beta}{2}\right)} \cdot \left( \sqrt{r_u^2 - r_h^2} + r_h \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{r_u^2 - r_h^2} + r_u}{r_h} \right) \right) \right]}_{\approx 1} \quad (19)$$

Tel qu'illustré, le contenu de la parenthèse est environ égal à 1. En faisant cette approximation et en utilisant l'éq. (7), l'équation (19) devient :

$$T_{hu} \approx \frac{1}{2 \cdot H_0} \left(1 + \frac{\beta}{2}\right) \quad (20)$$

Nous utiliserons cette équation pour éventuellement faire le calcul de l'âge apparent de l'univers.

Montrons maintenant que cette équation peut encore être approximée pour obtenir une équation couramment utilisée par certains astrophysiciens pour calculer la valeur réelle de l'âge de l'univers.

Selon l'équation (4), la valeur de  $\beta \approx 0,76$ . Utilisons cette approximation pour réécrire l'équation (20). Après quelques simplifications, nous obtenons :

$$T_{hu} \approx \frac{1}{H_0} \left( \frac{69}{100} \right) \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{H_0} \quad (21)$$



Cette équation peut être déduite par le modèle de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker [4,5,6,7,8,9]. Par conséquent les équations (20) et (21) représentent de bonnes approximations de la partie réelle de l'âge de l'univers.

### 3.2. Approximation de la partie imaginaire de l'âge de l'univers

Trouvons maintenant la valeur possible de la partie imaginaire  $T_{0h}$  de l'âge de l'univers  $T_u$ . À partir des équations (12), (13) et (16), nous obtenons :

$$T_{0h} = \left[ \frac{2 \cdot G \cdot m_u \cdot \ln(2 \cdot k^2 \cdot r_h)}{\beta \cdot k^3} \right] - \left[ \frac{\sqrt{-4 \cdot G^2 \cdot m_u^2} + 2 \cdot G \cdot m_u \cdot \ln\left(2 \cdot \sqrt{-4 \cdot G^2 \cdot m_u^2}\right)}{\beta \cdot k^3} \right] \quad (22)$$

En utilisant l'éq. (10) et en faisant quelques simplifications, nous obtenons :

$$T_{0h} = \frac{r_h}{\beta \cdot k} \cdot [\ln(-i) - i] \quad \text{où } i = \sqrt{-1} \quad (23)$$

En utilisant la relation suivante :

$$\ln(-i) = -\frac{\pi}{2} \cdot i \quad (24)$$

L'équation (23), dont le résultat est de type purement imaginaire, se réécrit :

$$T_{0h} = -\frac{r_h}{\beta \cdot k} \cdot \left[1 + \frac{\pi}{2}\right] \cdot i \quad (25)$$

Nous pouvons réécrire l'éq. (25) de la manière suivante sans rien changer :

$$T_{0h} = -\frac{r_u}{2 \cdot \beta \cdot c} \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \underbrace{\left[ \frac{2 \cdot c}{k} \cdot \frac{r_h}{ru \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)} \right]}_{\approx 1} \cdot i \quad (26)$$

Tel qu'illustré, le contenu de la parenthèse est approximativement égal à 1. L'équation (19) devient alors :

$$T_{0h} = -\frac{1}{2 \cdot H_0} \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \cdot i \quad (27)$$

### 3.3. Approximation de l'âge apparent de l'univers

Calculons maintenant l'âge apparent de l'univers en utilisant l'éq. (15) avec les équations (20) et (27). Après quelques simplifications et une mise en valeur de  $1/H_0$ , nous obtenons :

$$|T_u| = |T_{hu} + T_{0h}| = \sqrt{T_{hu}^2 + T_{0h}^2} \approx \frac{1}{H_0} \cdot \underbrace{\left( \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\beta}{2}\right)^2 + \left(\left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\right)\right)^2} \right)}_{\approx 1} \quad (28)$$

Le contenu de la parenthèse de l'éq. (28) est approximativement égal à 1. Selon l'éq. (7), l'éq. (28) devient alors environ égale à l'éq. (2) :

$$|T_u| \approx \frac{1}{H_0} \quad (29)$$

Par conséquent, nous venons de montrer que l'intégrale présentée en (12) peut être approximée par l'équation (2). Selon nous, suite aux calculs d'approximation précédents qui nous ont menés à l'équation (29), l'équation (2) représente seulement l'âge apparent de l'univers puisqu'elle résulte du calcul du module de la somme complexe d'un âge de type réel et d'un âge de type imaginaire.

## 4. CONCLUSION

Dans cet ouvrage, nous nous sommes limités à calculer l'âge de l'univers. Nous n'avons pas fait de conjecture en ce qui a trait à ce qui se passe à l'intérieur des limites de l'horizon de l'univers.

Nous avons montré que la valeur  $1/H_0$  correspond à une approximation valable de l'âge apparent de l'univers. En supposant que cette valeur correspond à la partie réelle de l'âge de l'univers, les physiciens présupposent de manière erronée, selon nous, que la vitesse de la lumière dans le vide a été constante au cours du temps.

Nous avons montré que la valeur de  $2/(3 \cdot H_0)$  calculée par certains physiciens correspond à une approximation de la valeur réelle de l'âge de l'univers. Elle représente aussi la valeur la plus probable du véritable âge de l'univers.

L'originalité de notre ouvrage est que nous ayons calculé l'âge de l'univers à l'aide de l'intégrale de l'inverse de la vitesse de la lumière en fonction du rayon

de courbure apparent de l'univers. Les seuls paramètres requis pour faire ce calcul sont  $c$ ,  $G$  et  $H_0$ . Ce calcul n'aurait pas été possible sans les hypothèses formulées dans l'ouvrage cité en [11]. Nous montrions dans ce dernier, entre autres, que la vitesse de la lumière n'a jamais été constante au cours du temps.

Le deuxième point original de notre ouvrage a été de concilier le fait que certains physiciens calculaient l'âge de l'univers en utilisant l'équation  $1/H_0$  et que d'autres utilisaient l'équation  $2/(3 \cdot H_0)$ . Cette conciliation n'est permise que si nous prenons conscience que l'âge de l'univers est en fait de type complexe. Le module de l'âge apparent peut bel et bien être approximée par  $1/H_0$  alors que la partie réelle de l'âge de l'univers peut l'être par  $2/(3 \cdot H_0)$ .

Notre ouvrage suscite des questions qui nécessiteront des approfondissements :

- Pourquoi est-ce que la portion de temps entre le moment du big bang et le rayon de l'horizon est-elle de type imaginaire?
- Est-ce que l'univers est réellement né à partir d'un point de singularité?
- Qu'est-ce qui se passe à l'intérieur des limites de l'horizon de l'univers?
- Comment est-ce que l'univers a réussi à franchir le cap de l'horizon puisque la vitesse de la lumière y était nulle?

Malgré le changement radical de concept que nous avons apporté, nous constatons que nos calculs sont parfaitement en accord avec les valeurs d'âge de l'univers couramment utilisées par les astrophysiciens. Ce fait renforce la possibilité que nos hypothèses et travaux antérieurs soient corrects [11].

## 5. RÉFÉRENCES

- [1] Hubble, E. et Humason, M. L., "The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae", *The Astrophysical Journal*, v. 74, p.43.
- [2] Macleod, Alasdair, "Evidence for a Universe Expanding at the Speed of Light", *University of highlands and islands physics*, Scotland, UK, avril 2004.
- [3] 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, February 2011, pp. 1-15.
- [4] Friedmann, Alexandre, "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, v. 10, 1922, pp. 377-386. (Pour une courbure spatiale positive)
- [5] Friedmann, Alexandre, "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, v. 21, 1924, pp. 326-332. (Pour une courbure spatiale négative)

- [6] Lemaître, George, "Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques", *Annales de la société scientifique de Bruxelles*, v. A47, 1927, pp. 49-59.
- [7] Robertson, Howard P., "On the Foundations of Relativistic Cosmology", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 15, 1929, pp. 822-829. (Écriture unifiée des équations de Friedmann pour toute valeur de la courbure spatiale)
- [8] Robertson, Howard P., "Relativistic Cosmology", *Review of Modern Physics*, v. 5, 1933, pp. 62-90.
- [9] Walker, Arthur G., "On Milne's theory of world's structure", *Proceedings of the London Mathematical Society*, v. 42, 1936, pp. 90-126. (Résultats identiques à ceux de H.P. Robertson retrouvés indépendamment)
- [10] Carvalho, Joel C., "Derivation of the Mass of the Observable Universe", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 34, no 12, décembre 1995, p. 2507.
- [11] 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/](http://www.pragtec.com/physique/)
- [12] Einstein, Albert, "On the Influence of Gravitation on the Propagation of Light", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, Dover Publications, 1952 (article original 1911), pp. 97-108.
- [13] Einstein, Albert, "The Foundation of the General Theory of Relativity", *The Principle of Relativity (Dover Books on Physics)*, New York, Dover Publications, 1952 (article original 1916), pp. 109-164.
- [14] Binney, James and Michael Merrifield, "Galactic astronomy", *Princeton University Press*, 1998, p. 733, de l'équation A2.
- [15] Meneghetti, Massimo, "Introduction to Gravitational Lensing, Lecture scripts", *Institut für Theoretische Astrophysik*, Bologna, Italie, 2006, p. 7, de l'équation 1.19, Web. <<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~massimo/sub/Lectures/chapter1.pdf>>
- [16] Matzner, Richard A., "Dictionary of Geophysics, Astrophysics, and Astronomy (Comprehensive Dictionary of Physics)", *Boca Raton: CRC*, 2001.
- [17] Bonamente, Massimiliano et al, "Determination of the Cosmic Distance Scale from Sunyaev-Zel'dovich Effect and Chandra X-ray Measurements of High Redshift Galaxy Clusters", version 2, avril 2006, p. 1, arXiv:astro-ph/0512349v2, Web. [http://arxiv.org/PS\\_cache/astro-ph/pdf/0512/0512349v2.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0512/0512349v2.pdf)
- [18] Weinberg, Steven, "Einstein's Mistakes", *Physics Today*, novembre 2005, pp. 31-35.
- [19] 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/](http://www.pragtec.com/physique/)
- [20] "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>
- [21] Salvatelli V, Andrea M, Laura L-H, et Olga M (2013) "New constraints on Coupled Dark Energy from the Planck Satellite Experiment", *Physical Review*, D 88.023531, v. 88, version 2, pp. 9.

## 6. APPENDICE A (Ajout du 13 octobre 2014, révisé le 2 mai 2019)

Sans vouloir changer tout le document qui précède cet appendice, nous désirons apporter quelques précisions sur la constante de Hubble  $H_0$ . Cette "constante", qui en fait n'en est pas une, varie lentement au cours du temps. Depuis sa découverte par Hubble, plusieurs méthodes ont été utilisées pour la mesurer en utilisant les différentes observations faites par télescope. Malgré tous ces efforts, ce paramètre, qui est essentiel pour décrire notre univers, souffre d'un grand manque de précision. En effet, différentes mesures faites par différentes équipes montrent que ce paramètre se situe probablement entre 69 et 77 km/(s·MParsec). Tous les observateurs proposent des marges d'incertitude qui sont discordantes. Cependant, sans qu'une mesure exacte ne rallie tout le monde et tant que quelque chose de mieux ne puisse être proposé, un certain consensus s'établit autour d'une valeur de 72 km/(s·MParsec). La plupart des livres sérieux en astrophysique utilisent cette valeur.

Suite à de nouveaux calculs portant sur la constante gravitationnelle universelle  $G$  nous avons été en mesure de calculer précisément la constante de Hubble [19] :

$$H_0 = \frac{c \cdot \alpha^{19} \cdot \beta^{1/2}}{r_e} \approx 72,09548580(32) \text{ km/(s} \cdot \text{MParsec)} \quad (30)$$

Les valeurs suivantes proviennent du CODATA 2010 [20] :

- La vitesse de la lumière dans le vide actuelle  $c \approx 299792458 \text{ m/s}$
- La constante de structure fine  $\alpha \approx 7,2973525698 \times 10^{-3}$
- Le rayon classique de l'électron  $r_e \approx 2,8179403267 \times 10^{-15} \text{ m}$

La constante  $\beta$ , quant à elle, représente le rapport entre la vitesse d'expansion de l'univers matériel par rapport à la vitesse de la lumière (voir équation (4)).

La valeur montrée par l'équation (30) est confirmée par des mesures faites par Salvatelli [21] qui a obtenu  $H_0 \approx 72,1^{+3,2}_{-2,3} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MParsec}^{-1}$ .

L'âge apparent de l'univers est donné par :

$$\left| T_u \right| = \frac{1}{H_0} \quad (31)$$

Le MParsec est une unité de distance définie comme suit :

$$1 \text{ MParsec} \approx 3,085677581 \times 10^{22} \text{ m} \quad (32)$$

Le module de l'âge apparent de l'univers, en années, est donné par l'équation suivante :

$$|T_u| \approx \frac{\text{s} \cdot \text{MPasec}}{72,09548580 \text{ km}} \cdot \frac{3,085677581 \times 10^{22} \text{ m}}{1 \text{ MParsec}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ an}}{365,25 \text{ jours}} \cdot \frac{1 \text{ jour}}{24 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (33)$$

Le module de l'âge **apparent** de l'univers est donc de :

$$|T_u| \approx 1,356 \times 10^{10} \text{ ans} = 13,562 \text{ milliards d'années} \quad (34)$$

Rappelons que, selon notre modèle de l'univers, le véritable âge de l'univers est de type complexe.