

# La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

Claude Mercier ing. , 8 oct., 2011  
Rév. 4 mai, 2019

claudemercier@cima.ca

---

*En 1911, Einstein démontrait qu'un champ gravitationnel pouvait ralentir la lumière en augmentant l'indice de réfraction du vide<sup>1</sup>. Sur cette base, nous formulons l'hypothèse que l'expansion de l'univers causerait une diminution de l'influence des champs gravitationnels sur la lumière, lui permettant une légère accélération. Selon nos calculs, la vitesse de la lumière (299 792 458 m/s) augmenterait de 1 m/s à tous les 35,4 ans.*

*En 1972 et 1973, la NASA lançait Pioneer 10/11 dans l'espace [2] et constatait que ces sondes ralentissaient de manière inexplicable [3,4,26,31]. L'effet Doppler, utilisé pour mesurer la vitesse des sondes, assumait que la vitesse de la lumière était constante. Cette présupposition a amené à croire, de façon erronée selon nous, que celles-ci ralentissaient.*

*Se référant aux constantes  $c$ ,  $G$ , et  $H_0$ , nous proposons 4 équations pour obtenir le rapport  $\beta$  entre la vitesse d'expansion de l'univers matériel et celle de la lumière, la masse apparente de l'univers  $m_{in}$ , son rayon de courbure  $r_{in}$ , et la vitesse asymptotique  $k$  de la lumière. Ces paramètres permettent de calculer l'accélération de la lumière  $a_L \approx 8,95 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  et celle des sondes Pioneer  $a_p = -a_L$  (comparable à  $a_p \approx 8,74 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  de Brownstein et Moffat [31]).<sup>2,3</sup>*

---

**MOTS CLÉS :** Lumière, Pioneer, Einstein, relativité, univers, réfraction

## 1. INTRODUCTION

Suite à la découverte de l'effet Pioneer et de l'analyse des différentes possibilités techniques [3,26], la NASA concluait que ce phénomène ne cadrerait pas avec les lois de physique connues. Nos travaux nous ont amenés à formuler l'hypothèse que la lumière accélérerait au cours du temps en raison de l'expansion de l'univers.

Nous présenterons notre modèle de l'univers et ses paramètres pour calculer l'accélération de la lumière  $a_L$ . Afin d'appuyer notre hypothèse, nous ferons le lien avec l'effet Pioneer.

---

<sup>1</sup> Article de 1911, voir [20]. Sur les bases de la relativité générale [1], il devait multiplier la variation d'indice de réfraction par 2 [21,27]. Sa théorie est confirmée par les lentilles gravitationnelles [32,27].

<sup>2</sup> Nous avons adopté la convention d'un signe négatif pour une accélération dirigée vers le Soleil.

<sup>3</sup> Mentionnons que de récents travaux que nous avons réalisés sur la constante de gravitation universelle et sur la constante de Hubble [33] nous ont permis d'établir que l'accélération de la lumière se situe plutôt autour de  $9,16903264(1) \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ .

## 2. NOTRE CONCEPTION DE L'UNIVERS

### 2.1. Modèle de l'univers

L'univers est comparable à un ballon en expansion [16,23]. Ce ballon est en grande partie rempli de « vide ». Cependant, le vide n'est pas le néant car il regorge d'ondes électromagnétiques. Même si le vide semble avoir une densité nulle, nous pensons qu'une grande quantité de vide n'a pas nécessairement une masse nulle. Selon la NASA, plus de 95,6 % de la masse de l'univers serait sous une forme qui n'a jamais pu être détectée en laboratoire (énergie noire ou matière noire) [12].

Pour capter une onde électromagnétique, il faut avoir une antenne qui est environ la moitié d'une longueur d'onde. Nous pensons que la plupart des photons contenus dans le vide ont des longueurs d'onde qui ne conviennent pas aux antennes que l'on peut concevoir sur Terre. Ils nous semblent alors invisibles ou inexistantes, d'où le terme « vide » qui laisse croire à tort qu'il n'y a rien. C'est d'ailleurs pourquoi, selon nous, la masse et l'énergie du vide échappent encore aux astrophysiciens. Cependant, leurs effets à grande échelle sont mesurables. Cette masse et cette énergie du vide ont d'ailleurs trouvé leur nom : l'énergie noire et la matière noire.

L'expansion de l'univers a été confirmée par un décalage vers le rouge du spectre de la lumière provenant des galaxies lointaines [15]. La matière s'éloigne d'un centre vide [30]. L'expansion de l'univers immatériel (la lumière) se fait à la vitesse de la lumière [29]. Cependant, il ne peut en être ainsi de l'univers matériel (galaxies, étoiles, etc.) car cela impliquerait une énergie infinie (lorsque  $v \rightarrow c$  dans les équations d'énergie cinétique) [25]. Pour que l'univers soit en expansion après plusieurs milliards d'années, la vitesse d'expansion doit être très élevée. Nous dirons que la vitesse d'expansion de l'univers matériel est égale à  $\beta \cdot c$ . Ici,  $c$  est la vitesse de la lumière actuelle. Nous verrons que cette valeur n'est pas constante en fonction du rayon de l'univers.

Lorenzi pense que la sphère créée par le big bang comporte un centre et confère un rayon à notre univers actuel<sup>4</sup>. L'observation d'un dipôle CMB exclut la possibilité d'une cosmologie sans centre<sup>5</sup>. Pour un observateur situé au centre de

---

<sup>4</sup> “[...] center of Big Bang sphere [...] of the sphere expanded to  $R_0$  to  $t_0$  [...]”, p. 1167 de [30].

<sup>5</sup> “The observation of the CMB dipole excludes the possibility of a cosmology without center. Thus, there has to be a center for the expansion of the universe, since a CMB dipole has been observed for the solar system.”, p. 3 de la référence [16].

la sphère, la surface de l'univers est homogène<sup>6</sup> et le centre de masse se situe au centre de la sphère. Tous les calculs se rapportant au potentiel gravitationnel de l'univers peuvent se faire en utilisant le rayon  $r_u$  et la masse  $m_u$ . Plusieurs admettent que l'univers possède une masse [13,19] et un rayon fini [6], surtout depuis que Hubble a démontré l'expansion de l'univers [22]. Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur la valeur de ces paramètres, certains présentent [6,13,19] des résultats similaires aux nôtres.

## 2.2. Vitesse de la lumière et de la matière en fonction du temps

Nous laisserons aux autres le soin de valider la théorie du big bang. Nous ferons l'hypothèse que la lumière a commencé à accélérer **à partir de l'horizon** qui se situe entre le centre de masse de l'univers et notre position actuelle. L'univers prenant de l'expansion, l'indice de réfraction du vide a commencé à diminuer. La lumière a accéléré au fil du temps pour en arriver à la vitesse  $c$  actuelle. Cette valeur, qui représente la vitesse maximale de la lumière dans le vide, ne peut être évaluée qu'en approximation puisqu'il nous est impossible de se mettre hors de tout champ gravitationnel. Nous subissons toujours l'influence d'un objet céleste quelconque.

En 1973, l'équipe de Evenson a mesuré la vitesse de la lumière avec un laser et a obtenu  $299\,792\,457,4 \pm 1,2$  m/s [18]. Elle a été réévaluée à  $299\,792\,458 \pm 1$  m/s en 1983 par le B.I.P.M. [17] et n'a pas changé depuis. Selon l'éq. (23) que nous verrons plus loin, la vitesse de la lumière a augmenté d'environ 1,1 m/s entre le 1<sup>er</sup> janvier 1973 et le 1<sup>er</sup> janvier 2011. Cette variation est encore à l'intérieur des tolérances des mesures de 1973 et de 1983.

Pour mesurer une variation de 2 fois la tolérance des mesures sur la vitesse  $c$ , les appareils de mesure doivent être beaucoup plus précis qu'en 1983. Si les vitesses de la lumière obtenues en 1973 et en 1983 sont exactes, nous pouvons déjà constater une tendance, car, durant cette période, la vitesse a augmenté d'environ 0,3 m/s (voir éq. (23)). Si nous ajoutons cette variation à la mesure de  $c$  en 1973, nous comprenons pourquoi, en 1983, la valeur mesurée était  $299\,792\,458 \pm 1$  m/s. Selon l'éq. (23), en 2011, la vitesse de la lumière aurait augmenté d'environ 1 m/s depuis 1973. C'est pourquoi la valeur mesurée en 1983 est encore correcte. En se basant sur la valeur officielle de 1983 et avec la résolution actuelle de  $\pm 1$  m/s, nous devons changer le dernier chiffre significatif de la valeur de référence vers 2054 car la lumière sera 2 m/s plus vite.

---

<sup>6</sup> "Unless the observer is positioned exactly at the center of the bubble, the distribution of matter, as seen by the observer, will be anisotropic.", p. 1 de la référence [28].

En étant mesurée sur Terre, la vitesse de la lumière est affectée par l'effet gravitationnel du Soleil et de la Terre. Grâce à éq. (9) que nous verrons plus loin, il est possible de tenir compte de l'effet gravitationnel de la Terre et du Soleil et de déduire la vitesse de la lumière  $c$  dans le vide hors de toute gravitation. La constante  $c$  est environ 6 m/s supérieure à la vitesse de la lumière mesurée sur Terre.

La lumière accélèrera au cours du temps et nous pensons qu'elle tendra vers une valeur asymptotique que nous nommerons  $k$ . Notre ouvrage se distingue par l'introduction d'un facteur  $\beta$ , qui est le rapport entre la vitesse d'expansion de l'univers matériel et la vitesse de la lumière.

### 3. CALCULS DES PARAMÈTRES ACTUELS DE L'UNIVERS

Pour obtenir l'accélération de la lumière  $a_L$ , nous devons calculer  $\beta$ ,  $k$ ,  $m_u$  et  $r_u$  à partir de  $c$  et de  $H_0$ . Toutes ces valeurs sont « apparentes » et probablement différentes de la réalité. L'univers est grand, massif et très âgé. Même en utilisant les meilleures théories tel que la relativité d'Einstein, il est risqué de se tromper sur les vraies valeurs qui caractérisent l'univers. Par exemple, il pourrait être tentant de croire que la masse de l'univers et la constante de gravitation universelle  $G$  sont constantes. Nous le souhaitons, mais rien ne prouve hors de tout doute que ce soit le cas. Deux options s'offrent alors à nous :

- 1) Chercher les vraies valeurs des paramètres actuels de l'univers en se basant sur la relativité d'Einstein.
- 2) Utiliser les valeurs « apparentes » des paramètres actuels de l'univers.

Définissons ce que nous voulons dire par valeurs apparentes. Les différents paramètres de l'univers peuvent suivre des courbes non-linéaires en fonction du rayon de l'univers. Étant donné que l'univers est grand et très âgé, nous serons tentés de penser que les différents paramètres sont constants ou qu'ils suivent une progression linéaire sur une courte période de temps. Ce sont ces valeurs que nous appellerons « apparentes ».

#### 3.1. $H_0$ : dérivée de la vitesse de la matière en fonction de la distance

En 1929, Hubble constata que les galaxies se distancent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à la distance qui les sépare [22]. Il baptisa sa constante  $H_0$ . Elle représente la variation de vitesse de la matière par unité de distance. Sa

**La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante**

5

valeur est entre 70,4 [12] et 76,9 km/(s·MParsec) [24]. Dans notre document, nous utiliserons la valeur de 70,4 km/(s·MParsec), car elle découle des plus récents résultats du projet WMAP de la NASA [12].<sup>7</sup>

Nous formulons l'hypothèse que la dérivée de la vitesse de la matière par rapport au rayon de courbure apparent de l'univers, évalué à  $r_u$ , est égal à la constante de Hubble actuelle.

$$\left. \frac{dv_m(r)}{dr} \right|_{r=r_u} = H_0 \quad (1)$$

**3.2. Rayon de courbure apparent de l'univers  $r_u$** 

L'expansion de l'univers se fait présentement à la vitesse de la lumière  $c$ . Cependant, selon les équations de la relativité d'Einstein, la matière (dont nous faisons partie) qui compose l'univers doit obligatoirement voyager à une vitesse  $v_m$  qui est moindre que  $c$ . Supposons qu'elle voyage à  $v_m = \beta \cdot c$  où  $\beta < 1$ .

Dans la dérivée décrite en (1),  $v_m$  qui est évaluée à  $r_u$  est égal à  $\beta \cdot c$ .

$$\left. \frac{dv_m(r)}{dr} \right|_{r=r_u} = \frac{\beta \cdot c}{r_u} = H_0 \quad (2)$$

Par conséquent, le rayon de courbure apparent de l'univers actuel est  $r_u$  :

$$r_u = \frac{\beta \cdot c}{H_0} \quad (3)$$

**3.3. Masse apparente de l'univers  $m_u$** 

Faisons l'hypothèse que l'expansion de l'univers s'est faite de manière identique dans l'infiniment petit et dans l'infiniment grand. Si notre hypothèse est correcte, le rapport de la masse par le rayon serait le même au niveau de l'univers qu'au niveau de la plus petite particule théorique possible. Pour faire une comparaison adéquate, il est important de comparer les mêmes éléments dans les deux cas.

La masse apparente actuelle de l'univers est  $m_u$ . Le rayon de courbure apparent de l'univers à notre position actuelle est  $r_u$ . Cependant, comme la lumière est plus rapide que la matière, elle s'est rendue plus loin et l'univers entier aurait plutôt un

<sup>7</sup> Nous aimerions préciser que selon de nouveaux travaux que nous avons effectués, nous sommes maintenant capables de calculer précisément la constante de Hubble. Selon ces calculs, sa valeur serait plutôt autour de 72,09548580(32) km/(s·MParsec) [33].

rayon de courbure égal à  $r_u/\beta$ .

La plus petite particule théorique aurait comme rayon la longueur de Planck  $L_p$ . Une telle particule tournerait sur elle-même à la vitesse de la lumière  $c$  et aurait une masse égale à la masse de Planck  $m_p$ . Les rapports masse/rayon sont :

$$\frac{m_u}{\left(\frac{r_u}{\beta}\right)} = \frac{m_p}{L_p} \quad (4)$$

Sachant que  $m_p$  et  $L_p$  sont définis comme étant :

$$m_p = \sqrt{\frac{h \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot G}} \quad (5)$$

$$L_p = \sqrt{\frac{h \cdot G}{2 \cdot \pi \cdot c^3}} \quad (6)$$

Nous obtenons le résultat suivant :

$$\frac{m_u}{r_u} = \frac{m_p}{\beta \cdot L_p} = \frac{c^2}{\beta \cdot G} \quad (7)$$

En utilisant la valeur de  $r_u$  obtenu en (3) dans l'équation (7), nous obtenons  $m_u$ :

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \quad (8)$$

Ce résultat est identique à celui de M. Joel C. Carvalho [19]. Nous utiliserons donc ce résultat en le considérant correct puisque différentes autres méthodes de calcul arrivent au même résultat.

### 3.4. Vitesse de la lumière dans un champ gravitationnel

L'équation (9), qui vient des calculs de Schwarzschild basés sur la relativité générale, permet de calculer la vitesse de la lumière  $v_c$  en fonction de  $r$  [21,27].

$$v_c = \frac{c}{n} \quad \text{où l'indice de réfraction } n = \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r}}{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r}}} \quad (9)$$

$v_c$  = Nouvelle vitesse de la lumière en fonction de la distance  $r$

$r$  = Distance entre le centre de la masse  $m$  et là où  $v_c$  est évaluée

$m$  = Masse engendrant le champ gravitationnel

$G$  =  $6,673\ 84 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$  = Constante gravitation universelle

$c$  =  $2\ 997\ 924\ 58 \text{ m/s}$  = Vitesse de la lumière dans le vide

Einstein a montré que la vitesse de la lumière dans le vide était réduite en présence d'un champ gravitationnel intense. En utilisant éq. (9), nous constatons qu'à la surface de la Terre, l'influence du Soleil sur la vitesse de la lumière est d'environ -6 m/s alors que l'influence de la Terre est seulement de -0,4 m/s. À l'époque, l'incertitude sur la valeur de  $c$  était supérieure à l'influence de la Terre et du Soleil et il était justifié de faire l'approximation que la vitesse de la lumière était  $c$  à la surface de la Terre. En 1973, grâce au laser, la vitesse de la lumière était mesurée à  $\pm 1$  m/s. À partir de éq. (9) et de  $v_c$  mesurée sur Terre, nous pouvons calculer la valeur théorique de  $c$  qui est hors gravitation.

L'univers est en expansion [22] et la vitesse limite, celle de la lumière, augmente en s'éloignant du centre de masse. Elle aura, dans un futur éloigné, une valeur asymptotique différente de  $c$  que nous nommerons  $k$ . Pour l'univers, remplaçons la constante  $c$  par  $k$  dans éq. (9) afin d'obtenir la vitesse de la lumière  $v_L(r)$  :

$$v_L(r) = \frac{k}{n_u(r)} \quad \text{où} \quad n_u(r) = \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}}{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}}} \quad (10)$$

Pour le rayon actuel de l'univers  $r = r_u$  nous savons que  $v_L$  doit être égale à  $c$  :

$$v_L(r_u) = \frac{k}{n_u(r_u)} = c \quad (11)$$

### 3.5. Accélération de la lumière et de l'univers

Nous voulons connaître l'accélération de la lumière  $a_L(r_u)$  et de la matière  $a_m(r_u)$ . L'univers immatériel est en expansion à une vitesse  $v_L(r)$  (voir (10)). La matière, qui se déplace plus lentement, possède une vitesse  $v_m(r) = \beta \cdot v_L(r)$ .  $\beta$  représente le rapport de la vitesse de la matière par rapport à la vitesse de la lumière.

$$v_m(r) = \frac{\beta \cdot k}{n_u(r)} \quad (12)$$

La dérivée de  $v_m$  par rapport à  $r$  au point  $r_u$ , dans éq. (12), donne  $H_0$ :

$$H_0 = \left. \frac{dv_m(r)}{dr} \right|_{r=r_u} = \frac{\beta \cdot y \cdot k}{r_u} \cdot \left( \frac{1}{(1+y) \cdot \sqrt{1-y^2}} \right) \quad \text{où} \quad y = \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u} \quad (13)$$

### 3.6. Évaluation numérique de $\beta$ , $k$ , $m_u$ , et $r_u$

Pour évaluer  $\beta$ ,  $k$ ,  $m_u$ , et  $r_u$ , il nous faut 4 équations. Notre système d'équations

est basé sur les éq. (3), (8), (11), et (13). En résolvant, nous obtenons :

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0,76 \quad (14)$$

$$k = c \cdot \sqrt{2 + \sqrt{5}} \approx 2 \cdot c \approx 6 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \approx 1,8 \times 10^{53} \text{ kg} \quad (16)$$

$$r_u = \frac{\beta \cdot c}{H_0} \approx 1 \times 10^{26} \text{ m} \quad (17)$$

Nous trouvons aussi que dans l'éq. (13) :

$$y = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = \frac{1}{\varphi} \quad \text{où } \varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \text{ (nombre d'or)} \quad (18)$$

$\beta$  est un nombre exact qui ne dépend d'aucune autre constante. La valeur de  $k$  dépend uniquement de  $c$  et n'est pas évolutive car elle représente la limite asymptotique de la vitesse de la lumière hors gravitation lorsque le rayon de l'univers tendra vers l'infini. Les valeurs de  $m_u$  et  $r_u$  dépendent malheureusement de  $H_0$ , ce qui limite leur précision à environ 5 %.

Comparons nos résultats avec d'autres. Dans un de ses articles, M. Rañada estime le rayon de l'univers visible à 4 200 MParsec (environ  $1,3 \times 10^{26}$  m) [6]. Comme le rapport de vitesse  $\beta$  évalué à éq. (14) est proche de l'unité, il s'en suit que le rayon de l'univers matériel évalué à éq. (17) est sensiblement du même ordre de grandeur que le rayon de l'univers immatériel. L'éq. (16) qui donne la masse de l'univers est la même que celle de M. Carvalho [19]. Comme certains de nos résultats sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs, nos résultats semblent plausibles.

### 3.7. Accélération actuelle de la lumière $a_L$ et de la matière $a_m$

Nous désirons ici calculer  $a_L$  et  $a_m$ . Nous anticipons que l'amplitude de  $a_L$  est égale à la valeur asymptotique de l'accélération Pioneer. Selon éq. (1) et le fait que  $v_m(r) = \beta \cdot v_L(r)$ , nous avons :

$$\left. \frac{dv_m(r)}{dr} \right|_{r=r_u} = \left. \frac{d(\beta \cdot v_L(r))}{dr} \right|_{r=r_u} = \beta \cdot \left. \frac{d(v_L(r))}{dr} \right|_{r=r_u} = H_0 \quad (19)$$

$$\left. \frac{d(v_L(r))}{dr} \right|_{r=r_u} = \frac{H_0}{\beta} \quad (20)$$

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

9

$$c = \left. \frac{dr}{dt} \right|_{r=r_u} \quad (21)$$

De éq. (20) et (21), nous obtenons l'accélération de la lumière  $a_L(r_u)$ :

$$a_L(r_u) = \left. \frac{dv_L(r)}{dt} \right|_{r=r_u} = \left( \left. \frac{dr}{dt} \cdot \frac{dv_L(r)}{dr} \right) \right|_{r=r_u} = c \cdot \left( \left. \frac{dv_L(r)}{dr} \right) \right|_{r=r_u} \quad (22)$$

$$a_L(r_u) = \frac{c \cdot H_0}{\beta} \approx 8,95 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (23)$$

Nous constatons que  $\beta$  est un facteur essentiel pour déterminer l'accélération de la lumière. Calculons maintenant l'accélération de la matière  $a_m(r_u)$ . L'accélération  $a_m(r_u)$  peut se calculer à partir des éq. (1) et (21) :

$$a_m(r_u) = \left. \frac{dv_m(r)}{dt} \right|_{r=r_u} = \left( \left. \frac{dr}{dt} \cdot \frac{dv_m(r)}{dr} \right) \right|_{r=r_u} = c \cdot H_0 \approx 6,84 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (24)$$

Nous anticipons que la valeur asymptotique du module de l'accélération Pioneer est égale à l'accélération de la lumière, le facteur  $\beta$  distingue nos résultats de ceux obtenus par d'autres [6,7,8]. En tenant compte du facteur  $\beta$ , nos calculs se rapprochent davantage de la valeur de l'accélération Pioneer mesurée par la NASA (qui est  $-8,74 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ ). Notons que l'accélération de la lumière calculée par d'autres est  $c \cdot H_0$ , ce qui correspondrait plutôt, selon nos résultats, à l'accélération de la matière et non à l'accélération de la lumière.

#### 4. SOLUTION DE L'EFFET PIONEER

Le fait que la lumière accélère dans le temps donne l'impression que la vitesse des objets, mesurée par l'effet Doppler, diminue. Cette illusion a mené la NASA à croire, à tort, à l'existence d'une accélération des sondes Pioneer vers le Soleil.

Pour appuyer l'hypothèse que la lumière accélère au cours du temps, nous présenterons une solution complète de l'effet Pioneer. Nous commencerons par décrire ce phénomène et nous présenterons des pistes de solutions déjà envisagées. Nous montrerons les constatations qui nous ont amené à faire un lien entre  $a_L$  et  $a_p$ . Nous présenterons ce qu'est l'indice de réfraction du vide. Nous finirons par faire le calcul de  $a_p$  en faisant le lien avec  $a_L$ .

##### 4.1. Description de l'effet Pioneer $a_p$

Le 2 mars 1972 et 5 avril 1973, la NASA lançait les sondes Pioneer 10/11 dans des directions presque opposées [2,26]. En 1980, à 20 ua du Soleil, une variation

de  $5,99 \times 10^{-9}$  Hz/s était mesurée par l'effet Doppler [3] et était interprétée comme étant une accélération  $a_p$  [3,4,5,6,7,26,31] des sondes dirigées vers le Soleil [4].

$$a_p \approx -8,74 \pm 1,33 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (25)$$

Brownstein et Moffat [31] présentent une courbe passant par l'ensemble des points des données recueillies par les sondes. La valeur de (25) est alors devenue la référence des documents traitant de l'effet Pioneer [3,4,5,6,7,26,31].

La NASA semble écarter les problèmes techniques [3,26]. Les sondes Galileo et Ulysse ont elles aussi subi une accélération  $a_p$  [5]. Il semble possible que les lois de Newton et de la relativité ne décrivent pas adéquatement l'effet Pioneer.

#### 4.2. Pistes de solutions et hypothèses

Plusieurs ont essayé de résoudre le mystère entourant l'effet Pioneer. Certains pensent que de mauvaises références peuvent expliquer le phénomène [5]. D'autres utilisent la théorie MOND [9] ou impliquent la masse et/ou l'énergie sombre [10,11]. Plusieurs décrivent l'effet Pioneer par  $a_p = -c \cdot H_0$  (voir [6,7,8])<sup>8</sup>. M. Rañada établit un lien direct entre  $a_L$  et  $a_p$  en affirmant que  $a_L = c \cdot H_0 \approx 0,8 \cdot a_p$  [6]. Il prédit aussi une accélération des horloges [6].

Jusqu'ici, aucune théorie n'explique systématiquement tous les points suivants :

- $a_p \approx -8,74 \pm 1,33 \times 10^{-10}$  m/s après 20 ua dirigée vers le Soleil.
- L'accélération croît jusqu'à 14 ua et devient quasi-constante après.

Nous avons analysé sans succès les possibilités suivantes :

- Le Soleil et la Terre auraient pu créer une lentille gravitationnelle.
- Une variation de l'indice de réfraction du vide aurait pu affecter l'effet Doppler.
- Le gain d'énergie créé par l'accélération de la lumière, dans un univers en expansion, aurait pu être compensé par une diminution de l'énergie potentielle.
- Si la masse-énergie du Soleil pourrait augmentait au cours du temps en raison de l'accélération de la lumière dans un univers en expansion.

Notre dernière approche, qui semble juste, a été de faire intervenir l'accélération de la lumière au cours du temps pour expliquer l'accélération Pioneer.

---

<sup>8</sup> Nous mettons l'équation négative pour signifier que l'accélération est dirigée vers le Soleil.

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

11

### 4.3. Constatations par échelles de grandeur

En multipliant  $H_0$  par  $c$ , nous obtenons  $a_p$ , avec 28 % d'erreur (voir éq. (25)).

$$a_p \approx -c \cdot H_0 \approx -6,84 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (26)$$

Cette équation laisse croire que  $a_p$  est l'accélération requise pour qu'après un temps égal à l'âge de l'univers, la lumière dans le vide ait la vitesse  $c$ . La constance de  $c$ , tel que postulé par Einstein [14], ne serait donc plus vraie.

Il semble improbable de concilier le résultat de (26) avec l'éq. (25). Il faudrait multiplier  $H_0$  par environ 1,28 pour arriver à la valeur  $-8,74 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ . L'équation (26) provient de comparaisons de grandeurs qui aboutissent à une valeur proche de  $a_p$ . Nous avons vu à éq. (23) qu'il manque une constante de proportionnalité dans éq. (26) et qu'il y a un lien direct entre  $a_p$  et  $a_L$  :

$$a_p = -a_L = -\frac{c \cdot H_0}{\beta} \approx -8,95 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (27)$$

$a_L$  n'explique pas implicitement que Pioneer 10/11 décélèrent.  $a_L$  et  $a_p$  ont la même amplitude, mais pas le même signe. De plus, si les données recueillies provenant de Pioneer 10/11 sont exactes,  $a_p$  dépend de la distance Soleil-sonde.

### 4.4. Indice de réfraction du vide

Dans (9), si  $2 \cdot G \cdot m / (c^2 \cdot r) \ll 1$  (vrai pour le système solaire) :

$$n(r) \approx 1 + \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r} \quad (28)$$

Lorsqu'un lieu donné est sous l'influence de plusieurs champs gravitationnels, c'est comme si nous avions l'effet de plusieurs masses en superposition :

$$n_{total} \approx 1 + \frac{2 \cdot G \cdot (m_1 + m_2 + \dots + m_i)}{c^2 \cdot r} = 1 + \frac{2 \cdot G \cdot m_1}{c^2 \cdot r} + \frac{2 \cdot G \cdot m_2}{c^2 \cdot r} + \dots + \frac{2 \cdot G \cdot m_i}{c^2 \cdot r} \quad (29)$$

Cela équivaut à faire une sommation de variations d'indices de réfraction :

$$n_{total} \approx 1 + (n_1 - 1) + (n_2 - 1) + \dots + (n_i - 1) = 1 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \dots + \Delta n_i \quad (30)$$

Lorsque les variations des indices de réfraction sont petites par rapport à l'unité, l'approximation suivante est valide :

$$n_{total} \approx n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \cdot n_i \quad (31)$$

Faisons la démonstration.

$$n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \cdot n_i = (1 + \Delta n_1) \cdot (1 + \Delta n_2) \cdot (1 + \Delta n_3) \cdot (1 + \Delta n_4) \cdot \dots \cdot (1 + \Delta n_i) \quad (32)$$

Si nous prenons la première parenthèse et que nous la multiplions par la deuxième, nous obtenons :

$$n_{total} \approx (1 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_1 \cdot \Delta n_2) \cdot (1 + \Delta n_3) \cdot (1 + \Delta n_4) \cdot \dots \cdot (1 + \Delta n_i) \quad (33)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{négligeable}}$

Lorsque les variations des indices de réfraction sont très petites devant l'unité, les produits des variations d'indice de réfraction deviennent négligeables :

$$n_{total} \approx (1 + \Delta n_1 + \Delta n_2) \cdot (1 + \Delta n_3) \cdot (1 + \Delta n_4) \cdot \dots \cdot (1 + \Delta n_i) \quad (34)$$

Si nous reprenons la première parenthèse de l'éq. (34) et que nous la multiplions par la deuxième, toujours en négligeant les produits des variations des indices de réfraction, nous obtenons :

$$n_{total} \approx (1 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3) \cdot (1 + \Delta n_4) \cdot \dots \cdot (1 + \Delta n_i) \quad (35)$$

En appliquant le même processus jusqu'à  $(1 + \Delta n_i)$ , nous concluons que :

$$n_{total} \approx 1 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \dots + \Delta n_i \approx n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \cdot n_i \quad (36)$$

Pour des raisons de simplicité, lorsque des calculs faisant intervenir différents champs gravitationnels relativement faibles sont effectués, il est préférable d'utiliser l'approximation (31).

#### 4.5. Calcul de l'effet Pioneer

L'effet gravitationnel normal du Soleil fait ralentir les sondes qui s'éloignent du Soleil, mais nous n'en tiendrons pas compte pour aider à faire ressortir l'accélération Pioneer. Supposons maintenant une sonde qui part de la Terre avec une vitesse constante  $v_p$ . La NASA mesure sa vitesse avec l'effet Doppler [14]. La sonde émet toujours la fréquence  $f_0 = c/\lambda_0$  (où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde) :

$$f = f_0 \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v_p}{c}}}{\sqrt{1 + \frac{v_p}{c}}} = \frac{c}{\lambda_0} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v_p}{c}}}{\sqrt{1 + \frac{v_p}{c}}} \quad (37)$$

En raison de son déplacement relatif à un observateur immobile sur Terre, la fréquence perçue sera  $f$  plutôt que  $f_0$ . Connaissant  $f_0$ , la vitesse  $v_p$  peut être calculée en mesurant la fréquence  $f$ .

À la différence d'une expérience faite sur Terre, les sondes Pioneer s'éloignent de la Terre et du Soleil d'une distance considérable et durant une longue période de temps. Nous devons alors considérer que la lumière accélère au cours du temps.

D'un point de vue mathématique, il y a 2 façons différentes, mais équivalentes, d'interpréter la variation de  $f$  dans le temps, mesurée par la NASA :

- 1) Nous continuons de penser que  $c$  est constant et cela nous amène à

conclure qu'il existe une accélération Pioneer.

2) Il n'y a pas d'effet Pioneer, mais il y a une accélération de la lumière.

Analysons la première option. Supposons que la sonde fait un voyage d'une durée  $\Delta t$  en s'éloignant du Soleil.  $\Delta t$  peut être calculé en fonction de  $r$  relativement au Soleil en sachant que la distance Soleil-Terre est  $r_{ST}$  (1 ua) :

$$\Delta t = \frac{r - r_{ST}}{v_p} \quad \text{pour } r \geq r_{ST} \quad (38)$$

L'accélération de la lumière donne l'illusion que les sondes ont une accélération  $a_p(r)$  et une réduction de vitesse  $a_p(r) \cdot \Delta t$ . En mettant la variation de vitesse positive dans éq. (39), cela mettra en évidence le signe de l'accélération Pioneer. Un signe négatif voudra dire qu'elle est dirigée vers le Soleil puisque la plus grande variation d'indice de réfraction vient de celui-ci. De (37) et (38) :

$$f(r) = \frac{c}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{\left(v_p + a_p(r) \cdot \frac{(r - r_{ST})}{v_p}\right)}{c}}{1 + \frac{\left(v_p + a_p(r) \cdot \frac{(r - r_{ST})}{v_p}\right)}{c}}} \quad (39)$$

Analysons maintenant la deuxième option : l'expansion de l'univers fait accélérer la lumière au cours du temps. La constante  $c$  dans éq. (37) doit alors être remplacée par la fonction  $v_L(\Delta t)$  qui tiendra compte de  $a_L$  (voir éq : (23)) :

$$v_L(\Delta t) = c + a_L \cdot \Delta t = c \cdot \left(1 + \frac{H_0 \cdot \Delta t}{\beta}\right) \approx c \cdot \left(1 + \frac{H_0}{\beta} \cdot \frac{(r - r_{ST})}{v_p}\right) \quad (40)$$

Cette équation tient seulement compte de l'accélération de la lumière due à l'expansion de l'univers durant un voyage de durée  $\Delta t$ .

En s'éloignant du Soleil, l'indice de réfraction du vide diminue et fait augmenter la vitesse de la lumière. Comme les observateurs sur Terre pensent que  $c$  est constant, ils ne savent pas que la fréquence de référence de leurs instruments de mesure change dans le temps. Sur Terre, si nous comparons deux horloges de même fréquence, en ne voyant aucune variation au cours du temps, nous penserons qu'elles conservent la même fréquence. Cependant, en réalité, toutes les horloges auront accéléré de la même valeur au cours du temps.

Il faut donc appliquer un facteur multiplicatif à la deuxième partie de la première parenthèse de (40). Ce facteur doit être nul sur Terre et doit être égal à l'unité lorsque les distances impliquées sont infinies. Entre les deux, il faut que le facteur

change comme change l'indice de réfraction du vide, car c'est ce changement qui est à la base de l'effet Pioneer. À la surface de la Terre, les deux influences prédominantes sont le Soleil et la Terre. Donc, l'indice de réfraction total à la surface de la Terre est  $n_S(r_{ST}) \cdot n_T(r_T)$ . Ici,  $r_{ST}$  est la distance Soleil-Terre et  $r_T$  est le rayon de la Terre. La différence entre l'indice de réfraction total à l'infini et l'indice de réfraction total à la surface de la Terre est donnée par  $\Delta n_{Total}$  :

$$\Delta n_{Total} = n_S(\infty) \cdot n_T(\infty) - n_S(r_{ST}) \cdot n_T(r_T) \quad (41)$$

Lorsque  $r \rightarrow \infty$ , il n'y a plus d'influence gravitationnelle et l'indice de réfraction tend vers l'unité. Par conséquent, l'équation (49) peut être réécrite comme ceci :

$$\Delta n_{Total} = 1 - n_S(r_{ST}) \cdot n_T(r_T) \quad (42)$$

Cherchons maintenant à déterminer la variation de l'indice de réfraction qu'un objet peut subir en s'éloignant de la Terre. Cette variation, qui est une fonction de la distance  $r$  par rapport au Soleil, sera nommée  $\Delta n(r)$  et sera donnée par :

$$\Delta n(r) = n_S(r) \cdot n_T(r - r_{ST} + r_T) - n_S(r_{ST}) \cdot n_T(r_T) \quad (43)$$

Notons qu'en partant, la variation de l'indice de réfraction  $\Delta n(r)$  obtenue en éq. (43) est nulle à la surface de la Terre. Elle devient égale à  $\Delta n_{Total}$  lorsque  $r$  tend vers l'infini. Le rapport  $\Delta n(r) / \Delta n_{Total}$  permet de savoir dans quelle proportion l'indice de réfraction total causé par le Soleil et la Terre peut être ressenti lorsque les sondes s'éloignent de la Terre et du Soleil. Ce même rapport multipliera le deuxième terme de (40) pour donner ceci :

$$v_L(r) = v_L = c \cdot \left( 1 + \frac{H_0}{\beta} \cdot \left( \frac{r - r_{ST}}{v_P} \right) \cdot \left( \frac{\Delta n(r)}{\Delta n_{Total}} \right) \right) \quad (44)$$

Nous pouvons alors reformuler (37) comme suit en remplaçant  $c$  par  $v_L$  :

$$f = \frac{v_L}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v_P}{v_L}}{1 + \frac{v_P}{v_L}}} \quad (45)$$

Les deux façons de considérer la situation donne le même résultat. Faisons donc équaler éq. (39) et (45). En résolvant l'équation pour obtenir  $a_p(r)$ , nous obtenons :

$$a_p(r) = -v_p \cdot \frac{(c \cdot v_L^3 - v_p \cdot c \cdot v_L^2 - c^3 \cdot v_L - c^3 \cdot v_p + v_p \cdot v_L^3 - v_p^2 \cdot v_L^2 + v_p \cdot c^2 \cdot v_L + c^2 \cdot v_p^2)}{(v_L^3 - v_p \cdot v_L^2 + c^2 \cdot v_L + c^2 \cdot v_p) \cdot (r - r_{ST})} \quad (46)$$

Comme  $v_L \approx c$  et que  $v_p \ll c$ , nous obtenons l'approximation suivante en négligeant les termes contenant  $v_p$  dans les parenthèses de (46):

$$a_p(r) \approx \frac{-v_p \cdot c \cdot (v_L^2 - c^2)}{(r - r_{ST}) \cdot (v_L^2 + c^2)} \quad (47)$$

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

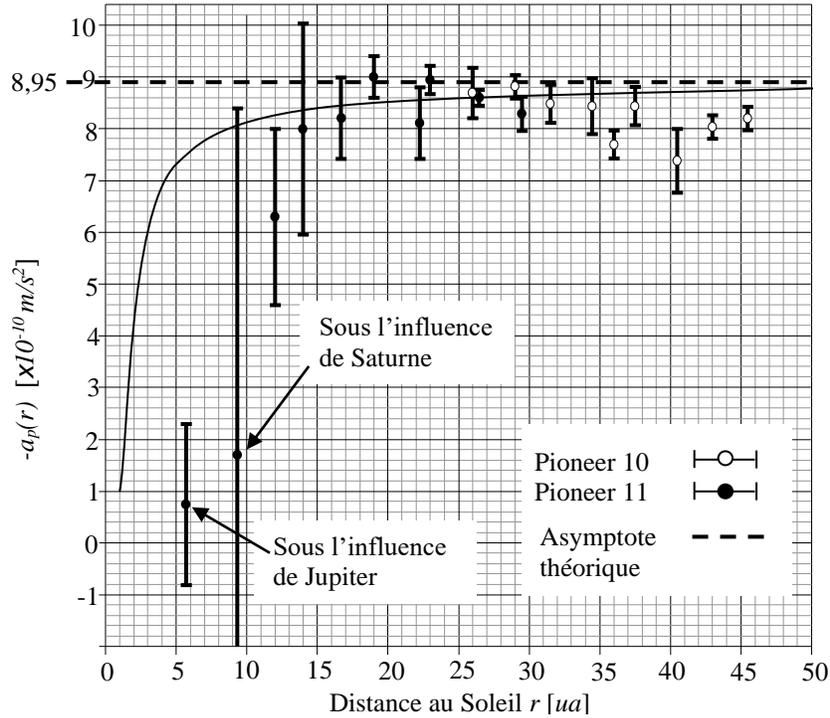
15

En remplaçant  $v_L$  par éq. (44), nous obtenons :

$$a_p(r) \approx \frac{-v_p \cdot c}{(r - r_{ST})} \cdot \frac{\left[ 1 + \frac{H_0}{\beta} \cdot \left( \frac{r - r_{ST}}{v_p} \right) \cdot \left( \frac{\Delta n(r)}{\Delta n_{Total}} \right)^2 \right] - 1}{\left[ 1 + \frac{H_0}{\beta} \cdot \left( \frac{r - r_{ST}}{v_p} \right) \cdot \left( \frac{\Delta n(r)}{\Delta n_{Total}} \right)^2 \right] + 1} \quad (48)$$

En faisant quelques autres approximations, nous obtenons :

$$a_p(r) \approx -\frac{c \cdot H_0}{\beta} \cdot \left( \frac{\Delta n(r)}{\Delta n_{Total}} \right) \quad (49)$$



**Figure 1** La courbe de  $-a_p(r)$  vient de éq. (49). Ici, nous n'avons pas tenu compte de l'influence de Jupiter et de Saturne sur la courbe théorique de l'effet Pioneer. Les accélérations montrées pour Pioneer 10/11 proviennent de Brownstein et Moffat [31].

Dans (49), si  $r = r_{ST}$  (sur Terre),  $a_p = 0$  (voir (42) et (43)). Mais, si  $r = \infty$ ,  $a_p$  est :

$$a_p \approx -\frac{c \cdot H_0}{\beta} \approx -8,95 \times 10^{-10} m/s^2 \quad (50)$$

Dans éq. (49) et (50),  $a_p$  est indépendante de la vitesse des sondes. Contrairement à  $a_L$ ,  $a_p$  prend un signe négatif. Le signe négatif signifie que l'accélération est dirigée vers le Soleil et s'oppose au déplacement de la sonde qui possède une vitesse  $v_p$  en s'éloignant du Soleil. Le module de la valeur asymptotique de  $a_p$  est exactement égal à  $a_L$ . Nous traçons  $-a_p(r)$  sur la Figure 1 à l'aide de (49) pour la comparer aux données de Brownstein et Moffat [31].

À la Figure 1, les données expérimentales montrées entre 1 et 10 ua ont été prises près de Jupiter et de Saturne. Elles ont été fortement influencées à la baisse par l'augmentation de l'indice de réfraction du vide près de ces planètes. L'éq. (49) ne tient pas compte du passage des sondes Pioneer près des planètes. Nous pourrions tenir compte de celles-ci en modifiant éq. (42) et (43) à l'aide de (31). Nous aurions une courbe avec 2 dents de scie qui passeraient par les données relevées par la NASA autour de Jupiter et Saturne. Nous ne montrons pas cette courbe car les distances d'approche exactes des sondes par rapport aux planètes ne nous sont pas connues.

Le fait de considérer la vitesse de la lumière constante donne l'impression que les sondes ralentissent. Les sondes ne ralentissent pas. C'est la lumière qui accélère et qui crée l'illusion de décélération des sondes Pioneer.

## 5. QUELQUES IMPACTS POSSIBLES DE L'OUVRAGE

### 5.1. Accélération des horloges

Une des conséquences de ne pas tenir compte de l'accélération de la lumière au cours du temps, c'est de « créer » une accélération du temps. Dans un de ses articles, M. Rañada fait valoir le fait que les horloges accélèrent au cours du temps [6].

La « seconde » est définie, en 1968, comme étant la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à 0 °K [32].

Supposons, en un premier temps, que la vitesse de la lumière est constante et égale à  $c$ . La lumière parcourra une distance  $d$  durant un délai  $\Delta t_l$ .

**La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante**

17

$$\Delta t_1 = \frac{d}{c} \quad (51)$$

Si la lumière possède l'accélération  $a_L$  prédite en éq. (23), la distance  $d$  sera parcourue dans un délai  $\Delta t_2$  (inférieur à  $\Delta t_1$ ).

$$\Delta t_2 = \frac{d}{c \cdot \left(1 + \frac{H_0 \cdot \Delta t_2}{\beta}\right)} \quad (52)$$

Définissons l'accélération du temps  $a_T$  comme étant la variation de temps par seconde. Les unités de  $a_T$  sont des secondes/seconde. Ainsi, nous avons :

$$a_T = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1} \quad (53)$$

Pour de petites valeurs de  $\Delta t_2$ , l'approximation suivante est acceptable :

$$a_T \approx -\frac{H_0 \cdot \Delta t_2}{\beta} \quad (54)$$

Pour  $\Delta t_2 \approx \Delta t_1 = 1$  seconde, nous obtenons l'accélération suivante :

$$a_T \approx -\frac{H_0}{\beta} \approx -2,99 \times 10^{-18} \text{ s/s} \quad (55)$$

Si  $a_L = c \cdot H_0 / \beta \approx 8,95 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  (voir éq. (23)), nous perdons environ  $H_0 / \beta \approx 2,99 \times 10^{-18}$  secondes à chaque seconde.

L'équipe d'Anderson a mesuré une accélération constante de Pioneer 10/11 [3] (voir éq. (25)). Rañada interprète cette valeur par une accélération des horloges :

$$a_T = \frac{a_p \cdot \Delta t}{c} \approx -2,9 \pm 0,3 \times 10^{-18} \text{ s/s} \text{ si } \Delta t = 1 \text{ seconde (selon Anderson)} \quad (56)$$

Notre résultat théorique de (55) est 3 % inférieur à celui de (56).

## 5.2. Valeur réelle de $H_0$

Plusieurs équations en astrophysique dépendent de  $H_0$ . À partir des éq. (14), (23), et (50), nous pouvons calculer sa valeur à partir de constantes connues :

$$H_0 = \frac{a_L \cdot \beta}{c} = \frac{-a_p \cdot \beta}{c} \quad (57)$$

En utilisant la valeur de  $a_p \approx -8,74 \pm 1,33 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  de Anderson [3] :

$$H_0 = 68,7 \pm 10,5 \frac{\text{km}}{\text{MP sec}} \quad (58)$$

La plage d'erreur est assez importante, mais elle correspond assez bien aux connaissances actuelles de  $H_0$  qui est entre 70,4 km/(s·MParsec) [12] et

76,9 km/(s·MParsec) [24]. En utilisant de nouvelles technologies et sondes qui auraient pour but de mesurer  $a_p$ , nous pourrions améliorer la mesure de  $H_0$ .

## 6. CONCLUSION

### 6.1. Atteinte du but fixé initialement

La physique moderne nous enseigne que la vitesse de la lumière dans le vide est constante et tous les instruments de mesure sont conçus à partir de ce postulat.

Après avoir présenté notre modèle de l'univers, nous avons vu que l'expansion de ce dernier entraîne une diminution de l'indice de réfraction du vide, ce qui permettrait à la lumière d'accélérer au cours du temps. Selon éq. (23), en 2054, la lumière sera 2 m/s plus vite qu'en 1983.

Dans un deuxième temps, afin d'appuyer l'hypothèse de l'accélération de la lumière au cours du temps, nous avons fait le lien avec l'effet Pioneer. Nos calculs théoriques correspondent avec ce qui a été mesuré par la NASA. Notre hypothèse semble donc plausible. Pour faire une expérience de longue durée qui sera précise (voyages spatiaux), il faudra tenir compte de  $a_L$  au cours du temps.

### 6.2. Limites de l'ouvrage

Nous nous sommes limités à démontrer que la vitesse de la lumière n'était pas constante au cours du temps et qu'elle expliquait l'effet Pioneer. Pour des fins de calculs, nous avons évalué certains paramètres de notre univers ( $m_u$ ,  $r_u$ ,  $k$  et  $\beta$ ) en limitant leur utilisation au cadre de notre projet seulement.

### 6.3. Questions soulevées pour l'avenir

Notre ouvrage suscite des questions qui nécessiteront des approfondissements :

- L'analyse, par l'effet Doppler, de la vitesse de déplacement des astres et des galaxies est peut-être faussée par le fait que nous pensions que la vitesse de la lumière dans le vide était constante et immuable partout dans l'univers.
- L'accélération de la lumière a probablement plusieurs implications au niveau atomique. Il serait intéressant de les découvrir.
- Il serait intéressant de connaître les implications de notre travail sur les autres constantes en physique, car il se peut que certaines soient affectées par  $a_L$ .

## 7. RÉFÉRENCES

- [1] 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.
- [2] Lasher, Larry, "NASA - Pioneer-10 and Pioneer-11." *NASA - Home*. N.p., 26 mars 2007, Web. <<http://www.nasa.gov/centers/ames/missions/archive/pioneer10-11.html>>.
- [3] Turyshev, Slava G., et al.. "Study of Pioneer Anomaly: A problem set.", *American Journal of Physics*, v. 73, no. 11, novembre 2005, pp. 1033-1044.
- [4] Lorenzo, Iorio, "Can the Pioneer Anomaly be of Gravitational Origin? A Phenomenological Answer.", *Foundations of Physics*, v. 37, no. 6, juin 2007, pp. 897-918.
- [5] Masreliez, C. Johan, "A Cosmological Explanation of the Pioneer Anomaly.", *Astrophysics and Space Science*, v. 299, no. 1, septembre 2005, pp. 83-108.
- [6] Rañada, Antonio F., "The Pioneer Anomaly as Acceleration of Clocks", *Foundations of Physics*, v. 34, no. 12, mars 2005, pp. 1955-1971.
- [7] Oliveira, Firmin J., "Is the Pioneer Anomaly a Counter Example to the Dark Matter Hypothesis?", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 46, no. 12, juin 2007, pp. 3193-3200.
- [8] Yi, Yong Gwan, "On the Indication from Pioneer 10/11 Data of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration", *General Relativity and Gravitation*, v. 36, no. 4, novembre 2004, pp. 875-881.
- [9] Famaey, Benoit, "Gravitation Modifiée et Matière Noire", *Ciel et Terre. Bulletin de la Société Royale belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe*, v. 123, no. 2, avril 2007, pp. 42-51.
- [10] Ellman, Roger, "A Common Solution: Dark matter, Dark Energy and the Pioneer Anomaly", version 7, mars 2006, 5 p., arXiv:physics/9808051v7, Web. <<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/9808/9808051.pdf>>.
- [11] Reynaud, S., and M.-T. Jaekel, "Tests of General Relativity in the Solar System", *Atom Optics and Space Physics*, Amsterdam, IOS Press, v. 168, 2009, pp. 203-217.
- [12] 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.
- [13] Gingerich, Owen, et Kenneth Lang, *Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900-1975 (Source Books in the History of the Sciences)*, Cambridge, Harvard University Press, 1979, p.724.
- [14] 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.
- [15] Carmeli, Moshe. "Cosmological Relativity: Determining the Universe by the Cosmological Redshift as Infinite and Curved", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 40, no. 10, novembre 2004, pp. 1871-1874.
- [16] Tomozawa, Yukio, "The cmb Dipole and Existence of a Center for Expansion of the Universe", version 1, octobre 2007, 4 p., arXiv:0710.5321v1, Web. <[http://arxiv.org/PS\\_cache/arxiv/pdf/0710/0710.5321v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0710/0710.5321v1.pdf)>
- [17] "The International System of Units (SI)", Bureau International des Poids et Mesures, 8<sup>ème</sup> édition, 2006, Web. <[http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure\\_8\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf)>.
- [18] Mulligan, Joseph F., "Some Recent Determinations of the Velocity of Light. III", *American Journal of Physics*, v. 44, publication 10, octobre 1976, pp. 960-969.
- [19] Carvalho, Joel C., "Derivation of the Mass of the Observable Universe", *International Journal of Theoretical Physics*, v. 34, no 12, décembre 1995, p. 2507.

- [20] 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.
- [21] Binney, James and Michael Merrifield, "Galactic astronomy", *Princeton University Press*, 1998, p. 733, de l'équation A2.
- [22] Kirshner, Robert P., "Hubble's Diagram and Cosmic Expansion", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 101, no. 1, 2004, pp. 8-13.
- [23] Lineweaver, Charles H. et Tamara M. Davis, "Misconceptions about the Big Bang", *Scientific American*, mars 2005, p. 36.
- [24] 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)>
- [25] Okun, Lev B., "The Concept of Mass", *Physics Today*, v. 42, publication 6, juin 1989, pp. 31-36.
- [26] Anderson, John D., et al., "Study of the Anomalous Acceleration of Pioneer 10 and 11", *Physical Review D*, v. 65, publication 8, 2002, 50 p.
- [27] 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>>
- [28] Alnes, Håvard et Morad Amarzguioui, "CMB Anisotropies Seen by an Off-center Observer in a Spherically Symmetric Inhomogeneous Universe", *Physical Review D*, v. 74, no. 10, 2006, 9 p.
- [29] Macleod, Alasdair, "Evidence for a Universe Expanding at the Speed of Light", *University of highlands and islands physics*, Scotland, UK, avril 2004.
- [30] Lorenzi, Luciano, "The Expanding Universe from the Huge Void Center: Theory & Modelling", *Memorie della Societa Astronomia Italiana*, v. 71, publication 4, 17 juin, 2000, pp. 1163-1181.
- [31] Brownstein, J. R. et J. W. Moffat, "Gravitational Solution to the Pioneer 10/11 Anomaly", *Classical and Quantum Gravity*, vol. 23, no. 10, 2006, pp. 3427-3436.
- [32] Matzner, Richard A., "Dictionary of Geophysics, Astrophysics, and Astronomy (Comprehensive Dictionary of Physics)", *Boca Raton: CRC*, 2001.
- [33] Mercier, Claude., "Calcul de la constante de gravitation universelle G", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 13 mars 2013, article disponible sur Internet à : [www.pragtec.com/physique/](http://www.pragtec.com/physique/)
- [34] Vargas, J. G. et D.G. Torr, "Gravitation and Cosmology: From the Hubble Radius to the Planck Scale", *Springer*, v. 126, 2003, pp. 10.
- [35] Sepulveda, L. Eric, "Can We Already Estimate the Radius of the Universe", *American Astronomical Society*, 1993, p. 796, paragraphe 5.17.
- [36] 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.

## 8. APPENDICE A : RÉOLUTION DU SYSTÈME D'ÉQUATIONS Claude Mercier ing. (Ajout du 20 octobre 2018)

Dans cet appendice, nous allons nous attarder à expliciter en détails les calculs qui ont permis de résoudre le système de quatre équations à quatre inconnus.

Il est généralement reconnu par les astrophysiciens [34,35,36] que le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux est  $R_u$ . Ce rayon est la distance qu'aurait parcourue la lumière durant un temps  $T = 1/H_0$  à vitesse constante  $c$ .

$$R_u = \frac{c}{H_0} \quad (59)$$

Il est vrai que selon nos hypothèses, la vitesse de la lumière n'est pas constante au cours du temps et qu'elle accélère. C'est d'ailleurs pourquoi nous disons que c'est le rayon de courbure "apparent" de l'univers lumineux.

Présentement, sans savoir si l'univers est en expansion ou non, sans savoir si la vitesse de la lumière est constante ou non, l'univers semble avoir un rayon  $R_u$  lorsqu'on fait les hypothèses suivantes :

- 1) Que la vitesse de la lumière dans le vide est constante et égale à  $c$ .
- 2) Que l'âge apparent de l'univers est  $T = 1/H_0$ .

En supposant que nous nous déplaçons dans l'univers à une vitesse inférieure à celle de la lumière dans le vide (Einstein a montré qu'il était impossible à une masse de voyager à une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière dans le vide), nous sommes alors présentement positionné à une distance  $r_u$  qui est une fraction de  $R_u$ , soit la valeur arbitraire  $\beta \cdot R_u$ . Reste à déterminer la valeur de  $\beta$ .

La distance entre le centre de masse de l'univers et où nous sommes présentement possède alors la valeur  $r_u$ .

$$r_u = \frac{\beta \cdot c}{H_0} = \beta \cdot R_u \quad (60)$$

Dans ce document, nous prenons pour acquis que la masse apparente de l'univers donnée par l'équation de Carvalho [19] est correcte:

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \quad (61)$$

À l'aide de la relativité générale, Schwarzschild [21,27] a montré que la vitesse de la lumière  $v_L$  dans le vide pouvait être influencée par un champ gravitationnel causé par une masse importante lorsqu'elle était évaluée à une distance  $r$ .

$$v_L(r) = \frac{c}{n(r)} \quad \text{où} \quad n(r) = \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r}}{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2 \cdot r}}} \quad (62)$$

Bien sûr, dans cette équation, lorsque nous faisons tendre  $r$  vers l'infini, c'est-à-dire pour une distance qui est hors champ gravitationnel, la vitesse de la lumière  $v_L$  devient égale à  $c$ .

Notons que c'est avec l'équation (62) qu'il est possible de calculer le rayon de l'horizon d'un trou noir. En effet, à l'horizon d'un trou noir, c'est-à-dire à la position  $r_{TN}$ , l'indice de réfraction  $n(r) \rightarrow \infty$  et la vitesse de la lumière est nulle. Pour cette condition précise, le dénominateur de  $n(r)$  est égal à 0. Nous obtenons alors l'équation (63) qui détermine le rayon  $r_{TN}$  de l'horizon d'un trou noir en fonction de sa masse  $m$ , de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  (hors gravitation locale) et de la constante de gravitation universelle  $G$  :

$$r_{TN} = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2} \quad (63)$$

Pour revenir à l'équation (62), elle est uniquement valide pour une parcelle de l'univers suffisamment petite pour que la vitesse de la lumière  $v_L$  hors gravitation y soit constante et égale à  $c$ . Tel que décrit dans notre article, l'univers est immense et la vitesse de la lumière est influencée par le champ gravitationnel causé par la masse de l'univers  $m_u$ . Bien sûr la vitesse de la lumière asymptotique hors gravitation n'est plus  $c$ , mais quelque chose d'autre que nous nommerons arbitrairement  $k$ . Même si la vitesse finale de la lumière hors gravitation n'est plus la même, la forme de l'équation demeure la même que dans l'équation (62) :

$$v_L(r) = \frac{k}{n_u(r)} \quad \text{où} \quad n_u(r) = \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}}{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}}} \quad (64)$$

Pour le rayon de courbure actuel de l'univers  $r = r_u$ , nous savons que la vitesse de la lumière  $v_L$  doit être égale à  $c$  puisque c'est ce que nous mesurons ici dans notre coin de l'univers.

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

23

Nous avons donc :

$$v_L(r_u) = \frac{k}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u}} \sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u}}} = \frac{k}{\sqrt{\frac{1+y}{1-y}}} = c \quad \text{où } y = \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u} \quad (65)$$

L'équation (64) permet de trouver la vitesse de la lumière à la distance  $r$  par rapport au centre de masse de l'univers. Nous ne sommes pas en mesure de voir l'évolution de l'expansion de l'univers lumineux. Cependant, lorsque nous scrutons le ciel, ce sont des astres que nous y voyons, et ceux-ci se déplacent à une vitesse inférieure à celle de la lumière. En moyenne, l'univers matériel est en expansion à une vitesse  $v_m(r)$ .

$$v_m(r) = \beta \cdot v_L(r) = \frac{\beta \cdot k}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}} \sqrt{1 - \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r}}} \quad (66)$$

Si nous faisons la dérivée de la vitesse  $v_m$  par rapport à la distance  $r$ , nous obtenons :

$$\frac{dv_m(r)}{dr} = \frac{\beta \cdot y \cdot k}{r} \cdot \left( \frac{1}{(1+y) \cdot \sqrt{1-y^2}} \right) \quad \text{où } y = \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r} \quad (67)$$

Pour une distance  $r = r_u$ , cette dérivée est égale à la constante de Hubble  $H_0$  puisque nous obtenons l'âge apparent de l'univers évalué ici à notre emplacement.

$$H_0 = \left. \frac{dv_m(r)}{dr} \right|_{r=r_u} = \frac{\beta \cdot y \cdot k}{r_u} \cdot \left( \frac{1}{(1+y) \cdot \sqrt{1-y^2}} \right) \quad \text{où } y = \frac{2 \cdot G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u} \quad (68)$$

Retenons donc les quatre équations suivantes: (60), (61), (65) et (68). Dans ces équations, les valeurs inconnues sont:  $r_u$ ,  $m_u$ ,  $\beta$  et  $k$ . C'est un système de 4 équations à 4 inconnues qui peut théoriquement se résoudre mathématiquement.

Commençons la résolution du système d'équations.

Dans l'équation (65), nous isolons la valeur de  $k$  et nous obtenons :

$$k = c \cdot \sqrt{\frac{1+y}{1-y}} \quad (69)$$

Dans l'équation (68), nous isolons aussi la valeur de  $k$  pour obtenir :

$$k = \frac{H_0 \cdot r_u}{y \cdot \beta} \cdot (1+y) \sqrt{1-y^2} \quad (70)$$

Nous faisons égarder les équations (69) et (70) pour obtenir :

$$c \cdot \sqrt{\frac{1+y}{1-y}} = \frac{H_0 \cdot r_u}{y \cdot \beta} \cdot (1+y) \sqrt{1-y^2} \quad (71)$$

Mettons au carré chaque côté de l'équation :

$$c^2 \cdot \frac{(1+y)}{(1-y)} = \frac{H_0^2 \cdot r_u^2}{y^2 \cdot \beta^2} \cdot (1+y)^2 \cdot (1-y^2) \quad (72)$$

Isolons le carré de la vitesse de la lumière  $c^2$  :

$$c^2 = \frac{H_0^2 \cdot r_u^2}{y^2 \cdot \beta^2} \cdot (1-y^2)^2 \quad (73)$$

De l'équation (60), nous obtenons :

$$\frac{r_u^2}{\beta^2} = \frac{c^2}{H_0^2} \quad (74)$$

Faisons le remplacement dans l'équation (73) :

$$c^2 = \frac{H_0^2 \cdot c^2}{y^2 \cdot H_0^2} \cdot (1-y^2)^2 \quad (75)$$

Faisons quelques simplifications :

$$y^2 = (1-y^2)^2 \quad (76)$$

Faisons la racine carrée des deux côtés de l'équation et ramenons tout du bord gauche de l'équation :

$$y^2 + y - 1 = 0 \quad (77)$$

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

25

Isolons y pour obtenir :

$$y = \frac{-1 \pm \sqrt{5}}{2} \quad (78)$$

En raison de l'équation (68), nous savons également que :

$$y = \frac{2G \cdot m_u}{k^2 \cdot r_u} \quad (79)$$

Tous les paramètres de cette équation sont strictement positifs. Par conséquent, la valeur de y est nécessairement positive :

$$y = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \quad (80)$$

En mettant le résultat de (80) dans l'équation (65), nous obtenons :

$$\frac{k}{\sqrt{\frac{1 + \frac{\sqrt{5} - 1}{2}}{1 - \frac{\sqrt{5} - 1}{2}}}} = c \quad (81)$$

Après simplifications, nous obtenons :

$$k = c \cdot \sqrt{2 + \sqrt{5}} \quad (82)$$

Dans l'équation (68), substituons la valeur de y devant la parenthèse par sa valeur algébrique :

$$H_0 = \frac{2G \cdot m_u \cdot \beta}{k \cdot r_u^2} \cdot \left( \frac{1}{(1 + y) \cdot \sqrt{1 - y^2}} \right) \quad (83)$$

Dans l'équation (83), remplaçons la valeur de  $m_u$  par l'équation (61) :

$$H_0 = \frac{2c^3 \cdot \beta}{k \cdot r_u^2 \cdot H_0} \cdot \left( \frac{1}{(1 + y) \cdot \sqrt{1 - y^2}} \right) \quad (84)$$

Dans l'équation (84), remplaçons la valeur de  $r_u$  par l'équation (60) :

$$H_0 = \frac{2c^3 \cdot \beta \cdot H_0^2}{k \cdot \beta^2 \cdot c^2 \cdot H_0} \cdot \left( \frac{1}{(1 + y) \cdot \sqrt{1 - y^2}} \right) \quad (85)$$

Simplifions et isolons  $\beta$ :

$$\beta = \frac{2c}{k} \cdot \left( \frac{1}{(1+y) \cdot \sqrt{1-y^2}} \right) \quad (86)$$

Dans l'équation (86), remplaçons la valeur de  $k$  par l'équation (82) et simplifions :

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{2+\sqrt{5}}} \cdot \left( \frac{1}{(1+y) \cdot \sqrt{1-y^2}} \right) \quad (87)$$

Dans l'équation (87), remplaçons  $y$  par l'équation (80) :

$$\beta = \frac{2}{\left(1 + \frac{\sqrt{5}-1}{2}\right) \cdot \sqrt{2+\sqrt{5}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right)^2}} \quad (88)$$

$$\beta = \frac{2}{\left(\frac{2+\sqrt{5}-1}{2}\right) \cdot \sqrt{2+\sqrt{5}} \cdot \frac{\sqrt{4 - (\sqrt{5}-1)^2}}{2}} \quad (89)$$

$$\beta = \frac{8}{(1+\sqrt{5}) \cdot \sqrt{2+\sqrt{5}} \cdot \sqrt{4 - (6-2\sqrt{5})}} \quad (90)$$

$$\beta = \frac{8}{(1+\sqrt{5}) \cdot \sqrt{2+\sqrt{5}} \cdot \sqrt{2(\sqrt{5}-1)}} \quad (91)$$

Mettons au carré les deux côtés de l'équation :

$$\beta^2 = \frac{64}{(1+2\sqrt{5}+5) \cdot (2+\sqrt{5}) \cdot 2(\sqrt{5}-1)} \quad (92)$$

$$\beta^2 = \frac{16}{(3+\sqrt{5}) \cdot (3+\sqrt{5})} \quad (93)$$

$$\beta^2 = \frac{4^2}{(3+\sqrt{5})^2} \quad (94)$$

Faisons le radical carré de chaque côté et gardons seulement la racine positive car nous avons défini  $\beta$  comme étant un ratio positif :

La vitesse de la lumière n'est peut-être pas constante

27

$$\beta = \frac{4}{3 + \sqrt{5}} \quad (95)$$

Multiplions le numérateur et le dénominateur par le conjugué du dénominateur et simplifions :

$$\beta = \frac{4}{3 + \sqrt{5}} \cdot \frac{3 - \sqrt{5}}{3 - \sqrt{5}} = 3 - \sqrt{5} \quad (96)$$

La valeur de  $\beta$  est sans unité.

En résumé, nous obtenons :

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0,76 \quad (97)$$

$$k = c \cdot \sqrt{2 + \sqrt{5}} \approx 2 \cdot c \approx 6 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (98)$$

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \approx 1,8 \times 10^{53} \text{ kg} \quad (99)$$

$$r_u = \frac{\beta \cdot c}{H_0} \approx 1 \times 10^{26} \text{ m} \quad (100)$$

Nous constatons bien qu'il est possible de résoudre le système de 4 équations et de 4 inconnus que nous avons au départ.

Connaissant la valeur de  $r_u$  et de  $\beta$ , il est possible d'évaluer la valeur du rayon de courbure apparent de l'univers  $R_u$  [34,35,36] :

$$R_u = \frac{c}{H_0} \approx 1,3 \times 10^{26} \text{ m} \quad (101)$$

Mentionnons que le lecteur pourra constater, en lisant d'autres documents plus récents de l'auteur, que la valeur de  $\beta$  est utile pour calculer une multitude de constantes de physique fondamentales.

Il semble donc qu'il y ait une sorte de géométrie dans la matière qui relie l'infiniment petit avec l'infiniment grand.