Variations des "constantes de physique" au cours du temps

Claude Mercier ing., 16 mars, 2014 claude.mercier@gctda.com
Rév. 27 Décembre, 2015

En 1937, Dirac soupçonnait que la plupart des constantes de physique étaient en vérité des paramètres variables en évolution lente dans le temps [1]. *Après la publication de Dirac, plusieurs autres physiciens émirent des hypothèses similaires* [18,19]. *D'autres étaient persuadés, tout au moins, que certaines constantes, telles que la constante de gravitation universelle, pouvaient changer au cours du temps* [19, 20, 21].

En 1929, Hubble observait que l'univers est en expansion [2]. *Dans un modèle de l'univers que nous avons élaboré, la matière et les photons qui composent l'univers s'éloignent du centre de masse de l'univers* [3]. *Cela a pour effet de faire augmenter légèrement l'indice de réfraction du vide et de faire augmenter lentement la vitesse de la lumière au cours du temps* [3]. *Les variations sont lentes et bien en-dessous du seuil de détection pour les appareils de mesure actuels. Selon notre modèle, la vitesse de la lumière ne serait pas la seule à évoluer dans le temps. Plusieurs autres paramètres feraient de même. Malgré tout, quelques paramètres méritent réellement le titre de « constantes ».*

MOTS CLÉS : Dirac, constantes de physique, expansion de l'univers

1. INTRODUCTION

Les constantes de physique sont très utiles dans diverses équations pour décrire l'univers et les phénomènes qui nous entourent. Ces valeurs sont utiles en raison de leur constance dans le temps. Mais le sont-elles toujours vraiment?

Certaines "constantes" de physique sont réellement des constantes pour des raisons purement géométriques. D'autres sont réellement constantes en raison du fait qu'elles proviennent d'un rapport de valeurs possédant les mêmes unités. Dans un tel rapport, le pourcentage de variation du numérateur dans le temps est identique à celui du dénominateur. Les deux variations s'annulent donc et le rapport obtenu devient réellement constant. Cependant, d'autres constantes fondamentales de physique varient légèrement et lentement au cours du temps en raison de l'expansion de l'univers.

Nous voulons mettre en garde le lecteur que le fait de définir les constantes de physique par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide c a pour effet de donner l'impression que les constantes ne varient pas dans le temps. En effet, en faisant une métaphore, si plusieurs voitures de course accélèrent au même rythme tout en étant côte à côte et si les conducteurs utilisent l'une ou l'autre des voitures comme point de référence, ils pourraient perdre momentanément de vue qu'en réalité, ils accélèrent par rapport à la piste de course. Dans le cas qui nous préoccupe, si la lumière accélère au cours du temps et que la vitesse de la lumière est prise comme référence pour les unités de longueur, de temps, etc., il pourrait arriver que personne ne constate de variation dans le temps. Les paramètres variables dans le temps pourraient alors ressembler à de véritables constantes, sans l'être en réalité.

Lorsque vient le temps de se munir d'un système de mesures universellement reconnu, la vitesse de la lumière demeure, pour l'instant, la meilleure option. Et ce, même si nous savons maintenant que la lumière accélère lentement au cours du temps. Alors, décider, en toute connaissance de cause, de maintenir la valeur de la vitesse de la lumière constante pour faciliter la création d'étalons de mesure peut être utile.

Cependant, tout comme les pilotes de voiture, il ne faut pas perdre de vue que la lumière accélère. Si un pilote de course est en accélération sur une piste de course et si ce dernier se pense à l'arrêt, il aura de la misère à expliquer pourquoi tout le décor bouge autour de lui. Dans la même optique, penser que la lumière ne varie pas dans le temps pourrait mener à des phénomènes difficiles à expliquer de manière raisonnable.

Dans ce document, **<u>en considérant que la lumière accélère au cours du temps</u>**, nous nous attarderons à déterminer un à un les effets de l'expansion de l'univers sur ce que nous considérons communément comme étant des "constantes" de physique. Nous ferons, en conclusion, un résumé des valeurs et des variations associées à chacune des constantes de physique que nous avons analysées.

2. DÉVELOPPEMENT

Dans ce chapitre, nous énumérerons les différentes constantes de physique et trouverons les variations de chacune d'entre elles au cours du temps. Comme certaines constantes proviennent en réalité de constantes plus fondamentales, il peut être difficile de traiter certains cas au début. Par conséquent, il s'agit de trouver les constantes les plus fondamentales, celles qui sont réellement constantes dans le temps, et de les traiter en premier. Ensuite, cela permet de traiter les constantes qui n'ont qu'un inconnu à la fois. Il faut donc suivre un certain ordre logique pour arriver à faire cet exercice. Il ne serait pas permis de le faire en commençant n'importe où.

2.1. Variation de la constante *N* au cours du temps

Le nombre N découle de l'hypothèse des grands nombres de Dirac [22]. Si nous associons une masse m_{ph} à un photon qui possède une longueur d'onde égale à la circonférence apparente de l'univers $2\cdot\pi\cdot R_u$, la valeur du nombre N correspondrait au nombre de photons pouvant être contenu dans la masse apparente de l'univers m_u [4]. Nous montrerons ici que le nombre N est constant. Le nombre N est un nombre sans unité défini comme étant :

$$N = \frac{m_u}{m_{ph}} \approx 6{,}3\times10^{121} \quad \textbf{(1)}$$

Sans être précis, Dirac fait état, dans son hypothèse sur les grands nombres [22], d'un nombre N qui est autour de 10^{120}. Dans son livre "The Thermodynamic Universe", Sidharth énumère plusieurs relations qui mènent approximativement à ce nombre. Cependant, dans un ouvrage que nous avons déjà présenté par le passé, nous énumérons plusieurs relations menant au nombre N que nous pouvons considérer exactes [4].

Einstein a déjà démontré qu'une masse m peut être convertie en pure énergie (photons) grâce à la célèbre équation [5,6] :

$$E = m\cdot c^2 \quad \textbf{(2)}$$

Ici, c est la vitesse de la lumière dans le vide. Selon le CODATA 2010 [8], $c \approx 299792458$ m/s.

Cette équation est bidirectionnelle. En poussant le raisonnement plus loin, cela veut dire que la matière est en quelque sorte faite de photons. Quels que soient l'arrangement et les méthodes de confinement des photons utilisés pour obtenir les différents constituants de la matière, cela veut dire que la particule la plus élémentaire servant à bâtir la matière, c'est simplement de la lumière confinée.

Si nous acceptons l'hypothèse que toutes les masses de l'univers sont constituées de photons et que ces derniers subiront tous les mêmes variations au cours du temps, le rapport N présenté est nécessairement constant puisque les variations des masses s'annuleront entre le numérateur et le dénominateur de l'équation **(2)**.

$$N = \text{constante} \quad \textbf{(3)}$$

En plus d'être constant, le nombre N, si un jour il est entièrement découvert, devra être un entier positif pair composé de 122 chiffres. En effet, si une quelconque particule naît dans le vide, elle naît avec sa jumelle qui contrebalancera l'énergie et la quantité de mouvement pour que l'énergie totale du système (l'univers dans son entier) et la quantité de mouvement soient nulles.

2.2. Variation de la constante de structure fine α en fonction du temps

Nous montrerons ici que la constante de structure fine est réellement constante au cours du temps.

Nous avons déjà montré que la constante N peut aussi être associée à la constante de structure fine α par l'équation suivante [7] :

$$N = \frac{1}{\alpha^{57}} \approx 6{,}30341951(12)\times 10^{121} \quad \textbf{(4)}$$

Selon le CODATA 2010 [8], $\alpha \approx 7{,}2973525698(24)\times 10^{-3}$.

Comme N est constant au cours du temps en raison du fait qu'il représente un rapport sans unité, nous concluons que la valeur de α est constante au cours du temps et n'est pas influencé par le processus d'expansion de l'univers. La constante de structure fine α est sans unité et, tout comme N, c'est un rapport et toute variation appliquée au numérateur qui lui est associé serait aussi appliquée au dénominateur correspondant, ce qui fait que α est une vraie constante au cours du temps.

$$\alpha = \text{constante} \quad \textbf{(5)}$$

2.3. Variation de la "constante" de Hubble H_0 en fonction du temps

Grâce à ses observations, Edwin Powell Hubble a montré en 1929 que l'univers est en expansion [2]. 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. Il en déduisit une loi et un paramètre qu'il baptisa "constante de Hubble H_0".

Comme l'âge apparent de l'univers T_u est relié à l'inverse de la constante de Hubble [10], la constante de Hubble H_0 n'est pas réellement une constante. Elle semble constante à notre échelle de temps en raison du fait que l'univers est relativement âgé. Essayons de déterminer la variation annuelle de la constante de Hubble ΔH_0.

L'âge apparent de l'univers T_u est défini comme suit :

$$T_u = \frac{1}{H_0} \quad \textbf{(6)}$$

Nous avons déjà montré que la valeur présente de la constante de Hubble H_0 pouvait se décrire en fonction de la constante de structure fine α, de la vitesse de la lumière c, du rayon classique de l'électron r_e et de β de la manière suivante [11] :

$$H_0 = \frac{c \cdot \alpha^{19} \cdot \beta^{1/2}}{r_e} \approx 72{,}09548632(46)\ \text{km/(s} \cdot \text{MParsec)} \quad \textbf{(7)}$$

Selon le CODATA 2010 [8], $r_e \approx 2{,}817940326\,7(27) \times 10^{-15}$ m.

La valeur de β est irrationnel. Elle exprime le rapport entre la vitesse d'expansion de l'univers matériel et la vitesse de la lumière dans le vide c [3] :

$$\beta = 3 - \sqrt{5} \approx 0{,}764 \quad \textbf{(8)}$$

Cette constante β provient d'un travail où nous avons supposé que la vitesse de la lumière est en constante progression (présentement égale à c) au cours du temps pour tendre vers une valeur asymptotique k lorsque le rayon de courbure apparent de l'univers R_u tendra vers l'infini. Pour connaître les démarches qui ont été suivies, nous vous référons à l'article disponible sur Internet [3].

La valeur de la constante k est donnée par :

$$k = c \cdot \sqrt{2 + \sqrt{5}} \approx 6{,}17024151 \times 10^{8}\,\text{m/s} \quad \textbf{(9)}$$

La valeur de la constante de Hubble H_0 obtenue à l'équation **(7)** est corroborée par la valeur mesurée par l'équipe de Xiaofeng Wang [14] qui obtenait $H_0 \approx 72{,}1 \pm 0{,}9$ km/(s·MParsec).

Dans un an, l'âge apparent de l'univers sera donné en fonction de H_0' :

$$\frac{1}{H_0'} = T_u + 1\,\text{an} \approx \frac{1}{H_0} + 31557600\ \text{s} \quad \textbf{(10)}$$

Présentement, la variation annuelle de H_0 pourrait être évaluée par ΔH_0 :

$$\Delta H_0 = \frac{H_0' - H_0}{1\,\text{an}} \approx -5{,}3 \times 10^{-9}\ \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{MParsec} \cdot \text{an}} \quad \textbf{(11)}$$

Selon l'équation **(11)**, nous pourrions encore améliorer la valeur de la constante de Hubble H_0 de l'équation **(7)** d'un facteur 87 environ.

2.4. Variation des rayons de courbure apparents R_u et r_u de l'univers en fonction du temps

Si l'univers est en expansion, il est normal d'envisager que le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u augmente au cours du temps. Essayons d'évaluer sa variation annuelle.

Présentement, notre meilleure évaluation de R_u repose sur la connaissance de la constante de Rydberg R_∞. Elle est la constante qui est connue avec le plus de précision. Selon le CODATA 2010 [8], la valeur de R_∞ est :

$$R_\infty = \frac{m_e \cdot q_e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c} \approx 10973731{,}568539(55)\ \text{m}^{-1} \quad \textbf{(12)}$$

Selon le CODATA 2010 [8] :

- La masse de l'électron $m_e \approx 9{,}10938291(40) \times 10^{-31}$ kg
- La charge de l'électron $q_e \approx 1{,}602176565(35) \times 10^{-19}$ c
- La permittivité du vide $\varepsilon_0 \approx 8{,}854187817 \times 10^{-12}$ F/m
- La constante de Planck $h \approx 6{,}62606957(29) \times 10^{-34}$ J·s

Habituellement, le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u (parfois surnommé rayon de Hubble ou dimension de l'univers) est décrit comme suit [15,16,17] :

$$R_u = \frac{c}{H_0} \quad \textbf{(13)}$$

Dans des travaux antérieurs, nous avons montré que le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u pouvait être défini comme suit [9] :

$$R_u = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R_\infty \cdot \beta^{1/2} \cdot \alpha^{16}} \quad \textbf{(14)}$$

$$R_u \approx 1{,}2831078806(68) \times 10^{26}\,\text{m} \quad \textbf{(15)}$$

Cette méthode de calcul de R_u est, pour l'instant, la plus précise de toutes [9].

Présentement, la vitesse de la lumière dans le vide est c. En négligeant la variation subie par la lumière dans le vide au cours du temps [25], la variation annuelle du rayon apparent de l'univers ΔR_u sera (considérant que 1 an ≈ 31557600 secondes) :

$$\Delta R_u \approx c \cdot 31557600 \text{ s/an} \approx 9{,}5 \times 10^{15} \text{ m/an} \tag{16}$$

Nous concluons qu'il est encore possible d'améliorer notre estimation du rayon apparent de l'univers d'un facteur d'environ 72. Au-delà de ça, la variation annuelle de ce paramètre cosmologique fera changer les dernières décimales annuellement.

La valeur du rayon de courbure apparent de l'univers matériel r_u est :

$$r_u = \beta \cdot R_u \approx 9{,}802071983(52) \times 10^{25} \text{ m} \tag{17}$$

La variation annuelle du rayon de courbure de l'univers matériel Δr_u est :

$$\Delta r_u = \beta \cdot \Delta R_u \approx 7{,}2 \times 10^{15} \text{ m/an} \tag{18}$$

2.5. Variation du rayon classique de l'électron r_e en fonction du temps

Bien que la plupart des physiciens s'entendent maintenant pour dire que l'électron est en réalité ponctuel (il serait, selon nous, probablement de l'ordre de grandeur de la longueur de Planck l_p), le rayon classique r_e de l'électron représente le rayon de la sphère pour laquelle toute l'énergie électromagnétique de l'électron est égale à l'énergie de masse m_e de l'électron (selon l'électrodynamique classique).

Selon le CODATA 2010 [8], le rayon classique de l'électron est $r_e \approx 2{,}8179403267(27) \times 10^{-15}$ m.

Dans des travaux antérieurs [9], nous avons déjà montré que le rayon classique de l'électron r_e était lié au rayon de courbure apparent de l'univers R_u comme suit :

$$R_u = \frac{r_e}{\beta^{1/2} \cdot \alpha^{19}} = \frac{r_e \cdot N^{1/3}}{\beta^{1/2}} \tag{19}$$

En isolant r_e, nous obtenons :

$$r_e = \frac{R_u \cdot \beta^{1/2}}{N^{1/3}} \tag{20}$$

Nous constatons que, dans le côté droit de l'équation, N et β sont constants dans le temps. Par conséquent, le rayon classique de l'électron r_e doit croître dans les mêmes proportions que le rayon de courbure apparent de l'univers R_u au cours du temps. La variation annuelle du rayon classique de l'électron Δr_e sera donc :

$$\Delta r_e \approx \frac{r_e}{R_u} \cdot \Delta R_u \approx 2{,}1 \times 10^{-25} \text{ m/an} \tag{21}$$

2.6. Variation de la vitesse de la lumière *c* au cours du temps

Pour calculer la variation annuelle de la vitesse de la lumière, partons de l'équation **(7)**. Nous pouvons montrer que la variation annuelle ΔH_0 est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta H_0 = \left[\frac{(c + \Delta c \cdot 31557600 \text{ s})}{r_e + \Delta r_e \cdot 31557600 \text{ s}} - \frac{c}{r_e} \right] \cdot \frac{\alpha^{19} \cdot \beta^{1/2}}{1 \text{ an}} \tag{22}$$

D'un autre côté, nous savons aussi que ΔH_0 est égal à :

$$\Delta H_0 = \frac{H_0}{(1 + H_0 \cdot 31557600 \text{ s}) \cdot 1 \text{ an}} \tag{23}$$

Faisons égaler les équations **(22)** et **(23)**. Isolons ensuite Δc. Nous obtenons alors en utilisant l'équation **(7)** et en faisant quelques approximations :

$$\Delta c = \frac{c \cdot \Delta r_e}{r_e} \approx \frac{0{,}022 \text{ m/s}}{\text{an}} \tag{24}$$

Grâce à la théorie de la relativité, Einstein a montré que la présence d'une masse imposante changeait l'indice de réfraction *n* du vide qui l'entoure. Son premier article sur ce sujet date de 1911 et était basé sur la relativité restreinte. Cependant, en se basant sur la relativité générale, il devait multiplier la variation d’indice de réfraction par 2. Sa théorie a ensuite été confirmée par la découverte de l’existence des lentilles gravitationnelles.

Selon un modèle de l'univers que nous avons exposé dans de précédents travaux, quelle que soit la dispersion de la matière dans celui-ci, le fait que l'univers soit en expansion nous force à nous éloigner d'un certain centre de masse. Grâce à une métrique de Schwarzschild modifiée, nous avons montré que l'indice de réfraction diminue et permet une légère augmentation de la vitesse de la lumière au cours du temps.

La variation annuelle Δc de l’équation **(24)** correspond à la variation de vitesse correspondant à l'accélération de la lumière $a_L = c \cdot H_0$ en périphérie de l'univers lumineux [3] (si nous convertissions les unités en m/(s·an)) :

$$\Delta c = c \cdot H_0 \cdot 31557600\,\text{s/an} \approx \frac{0{,}022\,\text{m/s}}{\text{an}} \tag{25}$$

L'effet Pioneer [3] est causé par l'accélération de la lumière au cours du temps. En effet, les vitesses des sondes Pioneer 10/11 sont déterminées à l'aide de l'effet Doppler qui est basé sur la relativité restreinte d'Einstein. Comme Einstein a supposé, à tort (selon nous), que la vitesse de la lumière était constante dans le temps, les équations de l'effet Doppler utilisent la constante c sans tenir compte de la variation de la vitesse de la lumière au cours du temps. Cela mène à conclure, à tort, que les sondes ralentissent au cours du temps. En fait, les sondes ne subissent aucune décélération. L'effet Pioneer n'est qu'une illusion causée par l'utilisation d'une équation (effet Doppler) qui ne tient pas compte de l'accélération de la lumière au cours du temps [3].

2.7. Variation de la perméabilité du vide μ_0 en fonction du temps

La vitesse de la lumière dans le vide est une fonction de la perméabilité du vide μ_0 et de la permittivité du vide ε_0 , car :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \tag{26}$$

Les physiciens avaient le choix entre décider de faire varier la perméabilité μ_0 du vide ou de la considérer fixe et faire varier la permittivité du vide ε_0. Ils ont choisi de considérer la perméabilité μ_0 constante et de lui attribuer cette valeur :

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \times 10^7\ \text{T} \cdot \text{m/A} \tag{27}$$

La variation annuelle de cette constante est donc nulle.

2.8. Variation de la permittivité du vide ε_0 en fonction du temps

À partir de l'équation **(26)**, nous sommes en mesure d'isoler la constante de permittivité du vide ε_0 :

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} \approx 8{,}85418782 \times 10^{-12}\,\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 / \left(\text{kg} \cdot \text{m}^3\right) \tag{28}$$

La variation annuelle de la constante de permittivité du vide $\Delta\varepsilon_0$ sera donc :

$$\Delta\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot 1\,\text{an}} \cdot \left(\frac{1}{(c + \Delta c \cdot 1\,\text{an})^2} - \frac{1}{c^2} \right) \tag{29}$$

Si Δc est calculé pour la périphérie de l'univers lumineux, $\Delta\varepsilon_0$ vaut :

$$\Delta\varepsilon_0 \approx -1{,}3\times10^{-21}\,\mathrm{A}^2\cdot\mathrm{s}^4/\left(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{an}\right)\ \text{(pour univers lumineux)} \tag{30}$$

2.9. Variation de l'impédance du vide Z_0 en fonction du temps

L'impédance du vide Z_0 peut être décrite en fonction de la perméabilité du vide μ_0 et de la vitesse de la lumière c.

$$Z_0 = \mu_0\cdot c \approx 376{,}730313\ \Omega \tag{31}$$

Comme nous l'avons montré précédemment, la perméabilité du vide μ_0 est constante, mais la vitesse de la lumière varie au cours du temps. Il en va donc de même avec l'impédance du vide.

La variation annuelle de l'impédance du vide sera ΔZ_0 :

$$\Delta Z_0 = \mu_0\cdot\Delta c \tag{32}$$

Aux confins de l'univers lumineux, ΔZ_0 vaut :

$$\Delta Z_0 \approx 2{,}8\times10^{-8}\ \Omega/\mathrm{an} \tag{33}$$

Cependant, pour l'univers matériel, la variation annuelle de l'impédance du vide ΔZ_0 vaut :

$$\Delta Z_0 \approx 3{,}6\times10^{-8}\ \Omega/\mathrm{an} \tag{34}$$

2.10. Variation de la masse apparente de l'univers m_u en fonction du temps

La masse apparente de l'univers est habituellement définie comme suit [12,13] :

$$m_u = \frac{c^3}{G\cdot H_0} \tag{35}$$

Grâce aux équations **(7)** et **(44)**, elle peut être définie en fonction de la masse de l'électron m_e, de la constante de structure fine α et de β comme suit [7] :

$$m_u = \frac{m_e\cdot\beta^{1/2}}{\alpha^{39}} \approx 1{,}72809823(8)\times10^{53}\ \mathrm{kg} \tag{36}$$

En raison du principe de conservation de l'énergie, nous savons que l'énergie globale de l'univers E_u demeure une constante dans le temps.

$$E_u = m_u\cdot c^2 = \text{constante} \tag{37}$$

Il s'en suit que la masse apparente de l'univers peut être déterminée comme ceci :

$$m_u = \frac{E_u}{c^2} \qquad \textbf{(38)}$$

Comme la vitesse de la lumière c varie dans le temps, nous pouvons déterminer la variation annuelle de la masse apparente de l'univers comme ceci :

$$\Delta m_u = \frac{E_u}{1\,\text{an}} \cdot \left(\frac{1}{(c + \Delta c \cdot 1\,\text{an})^2} - \frac{1}{c^2} \right) \approx \frac{m_u \cdot c^2}{1\,\text{an}} \cdot \left(\frac{1}{(c + \Delta c \cdot 1\,\text{an})^2} - \frac{1}{c^2} \right) \qquad \textbf{(39)}$$

$$\Delta m_u \approx -2{,}5 \times 10^{43}\,\frac{\text{kg}}{\text{an}} \qquad \textbf{(40)}$$

C'est énorme puisque cela représente, annuellement, une perte de masse équivalente à environ 13 mille milliards de fois la masse de notre Soleil.

2.11. Variation de la masse des photons m_{ph} en fonction du temps

Nous définissons la masse m_{ph} comme étant celle associée au photon de plus faible énergie, c'est-à-dire celui qui a comme longueur d'onde la circonférence apparente de l'univers $2\pi R_u$.

À partir des équations **(1)**, **(4)** et **(36)**, nous obtenons la valeur précise de m_{ph} :

$$m_{ph} = \alpha^{18} \cdot m_e \cdot \beta^{1/2} \approx 2{,}741525(12) \times 10^{-69}\,\text{kg} \qquad \textbf{(41)}$$

La variation annuelle de la masse des photons Δm_{ph} sera proportionnelle au rapport entre la variation annuelle de la masse apparente de l'univers Δm_u et la masse apparente de l'univers m_u :

$$\Delta m_{ph} = m_{ph} \cdot \frac{\Delta m_u}{m_u} \approx -4{,}0 \times 10^{-79}\,\frac{\text{kg}}{\text{an}} \qquad \textbf{(42)}$$

Cette valeur est beaucoup trop petite pour que nous puissions, pour l'instant, mesurer sa valeur.

2.12. Variation de la masse de Planck m_p en fonction du temps

Couramment, la masse de Planck est calculée ainsi :

$$m_p = \sqrt{\frac{h \cdot c}{2\pi \cdot G}} \qquad \textbf{(43)}$$

Selon le CODATA 2010, $m_p \approx 2{,}17651(13) \times 10^{-8}$ kg. Cette valeur est peu précise en raison de l'incertitude pesant sur la constante gravitationnelle universelle G.

Dans des travaux antérieurs, nous avons trouvé une équation qui permet de trouver précisément la valeur de G :

$$G = \frac{c^2 \cdot r_e \cdot \alpha^{20}}{m_e \cdot \beta} \approx 6{,}67323036(30)\times 10^{-11}\ \mathrm{m^3/(kg \cdot s^2)} \tag{44}$$

Nous savons aussi que la masse de l'électron m_e peut être calculée à partir de l'équation d'égalité masse-énergie et énergie ondulatoire suivante :

$$m_e \cdot c^2 = \frac{h \cdot c \cdot \alpha}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \tag{45}$$

À partir des équations **(43)**, **(44)** et **(45)**, nous pouvons calculer précisément la masse de Planck m_p comme suit :

$$m_p = m_e \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^{21}}} \approx 2{,}17660867(10)\times 10^{-8}\,\mathrm{kg} \tag{46}$$

Cette valeur est donc 1300 fois plus précise que celle présentée dans le CODATA 2010 (voir équation **(43)**).

Il peut être démontré que la masse de Planck m_p est la moyenne géométrique entre la masse apparente de l'univers m_u et la masse du photon de plus faible énergie m_{ph}.

$$m_p = \sqrt{m_u \cdot m_{ph}} \tag{47}$$

À partir des équations **(1)** et **(47)**, nous pouvons montrer que :

$$N = \frac{m_u^2}{m_p^2} = \frac{m_p^2}{m_{ph}^2} \tag{48}$$

La variation annuelle de la masse de Planck Δm_p sera proportionnelle au rapport entre la variation annuelle de la masse apparente de l'univers Δm_u et la masse apparente de l'univers m_u :

$$\Delta m_p = m_p \cdot \frac{\Delta m_u}{m_u} \approx -3{,}2\times 10^{-18}\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{an}} \tag{49}$$

La valeur de la masse de Planck peut donc être améliorée d'un bon facteur 400000 fois avant que nous constations que sa valeur change annuellement.

2.13. Variation de la masse de l'électron m_e en fonction du temps

À l'équation **(46)**, nous montrons que la masse de Planck m_p peut être décrite en fonction de la masse de l'électron m_e. Donc, la masse de l'électron m_e est égale à :

$$m_e = m_p \cdot \sqrt{\frac{\alpha^{21}}{\beta}} \quad \textbf{(50)}$$

Par conséquent, à partir de cette même équation et à partir de l'équation **(48)**, nous obtenons l'équation suivante :

$$N = \frac{m_u^2 \cdot \alpha^{21}}{m_e^2 \cdot \beta} \quad \textbf{(51)}$$

La variation annuelle de la masse de l'électron Δm_e sera proportionnelle au rapport entre la variation annuelle de la masse de l'électron Δm_e et la masse apparente de l'univers m_u :

$$\Delta m_e = m_e \cdot \frac{\Delta m_u}{m_u} \approx -1{,}3 \times 10^{-40}\ \frac{\text{kg}}{\text{an}} \quad \textbf{(52)}$$

Selon le CODATA 2010 [8], $m_e \approx 9{,}10938291(40) \times 10^{-31}$ kg. Il serait donc possible d'améliorer la mesure de la masse de l'électron d'environ 300 fois avant que nous constations que sa valeur change annuellement.

2.14. Variation de la longueur de Planck L_p en fonction du temps

En raison du principe d'incertitude d'Heisenberg, la longueur de Planck L_p est considérée comme étant la plus petite unité de mesure réalisable. Selon le CODATA 2010, la valeur de L_p est :

$$L_p = \sqrt{\frac{h \cdot G}{2 \cdot \pi \cdot c^3}} \approx 1{,}616199(97) \times 10^{-35}\,\text{m} \quad \textbf{(53)}$$

Remarquons ici que nous avons volontairement omis d'utiliser l'équation **(44)** qui nous aurait assurément permis d'utiliser une valeur plus précise de la constante de gravitation universelle G et d'améliorer la précision de la valeur du temps de Planck t_p. Cependant, en connaissant les équations **(44)** et **(45)**, il est possible de réécrire l'équation **(53)** de la manière suivante :

$$L_p = r_e \cdot \sqrt{\frac{\alpha^{19}}{\beta}} \approx 1{,}616125436(53) \times 10^{-35}\,\text{m} \quad \textbf{(54)}$$

Cette manière de calculer la longueur de Planck est environ 18000 fois plus précise que la valeur mesurée montrée dans le CODATA 2010.

Essayons maintenant d'évaluer la variation annuelle de la longueur de Planck.

La valeur du rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u peut être décrite en fonction du rayon classique de l'électron r_e par l'équation suivante :

$$R_u = \frac{r_e}{\beta^{1/2} \cdot \alpha^{19}} \tag{55}$$

Grâce aux équations **(4)**, **(54)** et **(55)**, il est possible de démontrer que la constante N peut s'écrire en fonction du rayon apparent de l'univers lumineux R_u et de la longueur de Planck L_p comme suit :

$$N = \frac{R_u^2}{L_p^2} \tag{56}$$

Comme nous avons montré précédemment que N doit être constant, la longueur de Planck L_p est obligée de croître au cours du temps au même rythme que la variation du rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u (dans la proportion requise pour garder N constant).

La variation annuelle de la longueur de Planck ΔL_p sera proportionnelle au rapport entre la variation annuelle du rayon de courbure apparent de l'univers lumineux ΔR_u et le rayon de courbure apparent de l'univers lumineux R_u :

$$\Delta L_p \approx L_p \cdot \left(\frac{\Delta R_u}{R_u} \right) \approx 1{,}2 \times 10^{-45} \text{ m/an} \tag{57}$$

La longueur de Planck L_p s'accroît donc chaque année en raison de l'expansion de l'univers.

2.15. Variation du temps de Planck t_p en fonction du temps

Le temps de Planck t_p est la plus petite unité de temps existante et est décrit par :

$$t_p = \sqrt{\frac{h \cdot G}{2 \cdot \pi \cdot c^5}} \tag{58}$$

Selon le CODATA 2010 [8], le temps de Planck $t_p \approx 5{,}39106(32) \times 10^{-44}$ s.

Remarquons ici que nous avons volontairement omis d'utiliser l'équation **(44)** qui nous aurait assurément permis d'utiliser une valeur plus précise de la constante de gravitation universelle G et d'améliorer la précision de la valeur du temps de Planck t_p. Cependant, en connaissant les équations **(44)** et **(45)**, il est possible de réécrire l'équation **(58)** de la manière suivante :

$$t_p = \frac{r_e}{c} \cdot \sqrt{\frac{\alpha^{19}}{\beta}} \approx 5{,}3908142(52) \times 10^{-44}\,\text{s} \tag{59}$$

Avec les valeurs de r_e, c et α qui proviennent du CODATA 2010 [8], l'équation **(59)** permet de calculer la valeur du temps de Planck t_p de manière 1200 fois plus précise que l'équation **(58)**.

Grâce aux équations **(4)**, **(6)**, **(7)** et **(59)**, il est possible de démontrer que :

$$N = \frac{T_u^2}{t_p^2} = \frac{1}{H_0^2 \cdot t_p^2} \tag{60}$$

Nous constatons que la variation annuelle du temps de Planck Δt_p doit être proportionnelle à celle de la variation annuelle de l'âge apparent de l'univers, c'est-à-dire proportionnelle à l'inverse de la constante de Hubble H_0.

$$\Delta t_p = \frac{t_p \cdot H_0 \cdot 31557600\,\text{s}}{1\,\text{an}} \approx 4{,}0 \times 10^{-54}\ \text{s/an} \tag{61}$$

2.16. Variation de la fréquence de Planck f_p en fonction du temps

Le temps de Planck t_p est la plus petite unité de temps qui existe. Son inverse mène donc à la fréquence la plus élevée qui soit qui est associée à une particule. Cette fréquence f_p est nommée ″fréquence de Planck″.

La précision de la fréquence de Planck f_p est directement tributaire de la précision du temps de Planck t_p. Selon le CODATA 2010 [8], le temps de Planck est donné par $t_p \approx 5{,}39106(32) \times 10^{-44}$ s. Cependant, nous avons vu à l'équation **(59)** qu'il est possible d'obtenir une meilleure estimation de cette constante. Selon cette équation, $t_p \approx 5{,}3908142(52) \times 10^{-44}$ s. Cette valeur mène au résultat suivant :

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot t_p} = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^{19}}} \approx 2{,}9523360(28) \times 10^{42}\,\text{Hz} \tag{62}$$

Attention, il arrive que, dans la littérature, cette fréquence soit donnée en radian/s comme suit :

$$f_p = \frac{1}{t_p} \approx 6{,}9 \times 10^{39}\,\text{radian/s} \tag{63}$$

La variation annuelle de la fréquence de Planck Δf_p , en Hz/an, est donnée par :

$$\Delta f_p = \frac{1}{2\pi \cdot \text{an}} \cdot \left(\frac{1}{t_p + \Delta t_p} - \frac{1}{t_p} \right) \approx -2{,}2 \times 10^{32}\,\text{Hz/an} \tag{64}$$

La variation annuelle de la fréquence de Planck Δf_p , en radian/(s·an), est donnée par :

$$\Delta f_p = \frac{1}{\text{an}} \cdot \left(\frac{1}{t_p + \Delta t_p} - \frac{1}{t_p} \right) \approx -1{,}4 \times 10^{33}\,\text{radian/(s} \cdot \text{an)} \tag{65}$$

2.17. Variation de la constante de Planck *h* en fonction du temps

Présentement, la valeur de la constante de Planck dans le CODATA 2010 est de :

$$h \approx 6{,}62606957(29) \times 10^{-34}\,\text{J/°K} \tag{66}$$

Calculons la variation annuelle de la constante de Planck Δh en partant de l'équation suivante qui fait l'égalité entre l'énergie contenue dans la masse de l'électron m_e et l'onde qui est associée à cette masse :

$$m_e \cdot c^2 = \frac{h \cdot c \cdot \alpha}{2\pi \cdot r_e} \tag{67}$$

Isolons la constante de structure fine α :

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot r_e \cdot m_e \cdot c}{h} \tag{68}$$

Nous savons que la variation annuelle de la constante de structure fine $\Delta\alpha$ est nulle. Par conséquent, nous avons :

$$\Delta\alpha = 2\pi \left(\frac{(r_e + \Delta r_e \cdot 1\,\text{an}) \cdot (m_e + \Delta m_e \cdot 1\,\text{an}) \cdot (c + \Delta c \cdot 1\,\text{an})}{(h + \Delta h \cdot 1\,\text{an})} - \frac{r_e \cdot m_e \cdot c}{h} \right) \tag{69}$$

En forçant la variation annuelle de la constante de structure fine à être $\Delta\alpha = 0$ et en isolant la variation annuelle de la constante de Planck Δh , nous obtenons :

$$\Delta h = \frac{h \cdot \left(r_e + \Delta r_e \cdot 1\text{an}\right) \cdot \left(m_e + \Delta m_e \cdot 1\text{an}\right) \cdot \left(c + \Delta c \cdot 1\text{an}\right)}{r_e \cdot m_e \cdot c} - h \quad \textbf{(70)}$$

Si nous utilisons quelques approximations, nous obtenons:

$$\Delta h \approx h \cdot \left(\frac{\Delta r_e \cdot 1\,\text{an}}{r_e}\right) \cdot \left(\frac{\Delta m_e \cdot 1\,\text{an}}{m_e}\right) \cdot \left(\frac{\Delta c \cdot 1\,\text{an}}{c}\right) \quad \textbf{(71)}$$

Ensuite, si nous évaluons la valeur de la variation de la constante de Planck Δh , nous obtenons :

$$\Delta h \approx -5{,}3 \times 10^{-64}\,\text{J} \cdot \text{s/an} \quad \textbf{(72)}$$

Cette variation est tellement plus petite que l'incertitude de cette constante que nous pouvons considérer la constante de Planck h comme étant réellement constante. Cette assertion permet alors de maintenir le principe de conservation de l'énergie de l'univers au cours du temps.

2.18. Variation de la constante gravitationnelle universelle *G* en fonction du temps

Grâce à nos travaux antérieurs, nous savons que la constante gravitationnelle universelle G est donnée par l'équation suivante :

$$G = \frac{c^2 \cdot r_e \cdot \alpha^{20}}{m_e \cdot \beta} \approx 6{,}67323036(30) \times 10^{-11}\ \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \quad \textbf{(73)}$$

Comme nous avons déjà calculé les variations liées à chacune des constantes physiques impliquées, nous sommes en mesure de calculer la variation annuelle de la constante gravitationnelle ΔG :

$$\Delta G = \frac{\alpha^{20}}{\beta \cdot 1\,\text{an}} \cdot \left(\frac{\left(c + \Delta c \cdot 1\,\text{an}\right)^2 \cdot \left(r_e + \Delta r_e \cdot 1\,\text{an}\right)}{\left(m_e + \Delta m_e \cdot 1\,\text{an}\right)} - \frac{c^2 \cdot r_e}{m_e}\right) \quad \textbf{(74)}$$

$$\Delta G \approx 2{,}5 \times 10^{-20}\,\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{an}) \quad \textbf{(75)}$$

Nous constatons que la constante gravitationnelle G augmente au cours du temps. La précision de cette constante pourrait être améliorée d'un facteur 325000 environ par rapport à la valeur montrée dans le CODATA 2010 [8] qui est $G \approx 6{,}67384(80) \times 10^{-11}$ $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$. Elle pourrait être améliorée d'un facteur 120 environ si nous utilisons l'équation **(73)**.

Notons tout de suite que contrairement à ce que certains pourraient penser, la variation au cours du temps de la constante gravitationnelle G ne peut pas expliquer le phénomène de l'effet Pioneer. En effet, une fois que nous avons également tenu compte de la variation des masses et des distances au cours du temps (en raison de l'expansion de l'univers), cet effet est nettement inférieur à l'effet Pioneer. À notre avis, seule l'accélération de la lumière au cours du temps arrive à expliquer pleinement l'effet Pioneer.

2.19. Variation de la constante de Rydberg R_∞ en fonction du temps

La constante de Rydberg peut s'écrire ainsi :

$$R_\infty = \frac{\alpha^3}{4 \cdot \pi \cdot r_e} \approx 10973731{,}568539(55)\ \text{m}^{-1} \tag{76}$$

Comme la constante de structure fine est constante dans le temps, la variation annuelle de la constante de Rydberg ΔR_∞ est proportionnelle à l'inverse de la variation annuelle du rayon classique de l'électron Δr_e.

$$\Delta R_\infty \approx \frac{\alpha^3}{4 \cdot \pi \cdot an} \cdot \left(\frac{1}{r_e + \Delta r_e \cdot 1\,\text{an}} - \frac{1}{r_e} \right) \approx -8{,}1 \times 10^{-4}\ \text{m}^{-1}/\text{an} \tag{77}$$

Nous en concluons donc que l'incertitude sur la constante de Rydberg R_∞ est légèrement sous-estimée, d'un facteur 15 environ, par rapport à la valeur donnée dans le CODATA 2010. En effet, celle-ci ne peut être plus précise que sa variation annuelle. Les auteurs de l'expérience qui a mené à l'évaluation de la constante de Rydberg n'ont probablement pas répété suffisamment de fois leur expérience au cours du temps pour se rendre compte que cette dernière variait légèrement. Lors de la prochaine impression des valeurs à jour du CODATA, la valeur de la constante de Rydberg R_∞ risque donc de changer à la baisse.

Il serait intéressant de connaître l'historique de l'évaluation de la constante de Rydberg R_∞ dans le temps. Son évolution permettrait peut-être de mettre en lumière, de façon indirecte, l'expansion de l'univers et, par le fait même, valider une partie de notre modèle de l'univers. Malheureusement, si nous nous fions aux dernières versions du CODATA disponibles ou que nous remontons trop loin dans le temps, les valeurs obtenues n'étaient pas suffisamment précises pour vérifier notre hypothèse, car la marge d'erreur est encore trop grande. Ce sont les valeurs qui seront mesurées durant les prochaines années qui permettront probablement de vérifier notre hypothèse.

2.20. Variation de la charge de l'électron q_e en fonction du temps

Einstein nous a montré que l'énergie contenue dans la masse d'un électron est la suivante :

$$E_e = m_e \cdot c^2 \tag{78}$$

Le rayon classique r_e d'un électron découle de l'électrostatique classique. En fait, il n'a pas réellement ce rayon, car l'électron est ponctuel. Cependant, il est généralement admis que toute l'énergie E_e d'un électron est entièrement contenue dans ce rayon. Par conséquent, si nous prenons la charge q_e d'un électron et que nous la rapprochions du centre de la charge q_e d'un autre électron, nous effectuerons un travail. Si nous amenons la charge à une distance r_e par rapport au centre de l'électron, l'énergie contenue dans cette charge sera entièrement due à son énergie électrostatique. Nous aurons alors l'équation suivante :

$$E_e = F \cdot r_e = \frac{q_e^2}{4 \cdot \pi \cdot r_e^2} \cdot r_e = \frac{q_e^2}{4 \cdot \pi \cdot r_e} \tag{79}$$

À l'aide des équations **(26)**, **(78)** et **(79)**, nous obtenons une équation qui donne la charge d'un électron en fonction de la masse m_e et du rayon classique r_e.

$$q_e = -\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r_e}{\mu_0}} \approx -1{,}602176565(35) \times 10^{-19} \text{ C} \tag{80}$$

Du point de vue mathématique, il faut faire ± en avant du radical. Bien sûr, la charge de l'électron q_e est négative. Cependant, la charge du positron q_{e+} est positive.

La variation annuelle de la charge d'un électron Δq_e sera donc :

$$\Delta q_e = \frac{-\sqrt{\frac{4\pi}{\mu_0}}}{1\,\text{an}} \cdot \left(\sqrt{(m_e + \Delta r_e \cdot 1\,\text{an}) \cdot (r_e + \Delta r_e \cdot 1\,\text{an})} - \sqrt{m_e \cdot r_e}\right) \tag{81}$$

$$\Delta q_e \approx 5{,}9 \times 10^{-30} \text{ C/an} \tag{82}$$

De même, la variation annuelle de la charge du positron q_{e+} devient :

$$\Delta q_e \approx -5{,}9 \times 10^{-30} \text{ C/an} \tag{83}$$

Nous concluons qu'il serait possible d'améliorer d'un facteur 4200 environ la précision de la mesure de la charge de l'électron q_e et du positron q_{e+} présentement connue dans le CODATA 2010 [8]. Ensuite, nous constaterions une variation annuelle qui entacherait les derniers chiffres significatifs.

2.21. Variation de la constante de Von Klitzing R_k en fonction du temps

Découverte en 1980 par le physicien Klauss Von Klitzing, la constante de Von Klitzing, en physique quantique, permet de calculer avec une grande précision la valeur d'une résistance électrique. La résistance de Klitzing R_k est liée à l'impédance du vide Z_0.

$$R_k = \frac{h}{q_e^2} = \frac{Z_0}{2 \cdot \alpha} = \frac{\mu_0 \cdot c}{2 \cdot \alpha} \approx 25812{,}8074434(84)\,\Omega \tag{84}$$

Utilisons la dernière équation qui dépend de la vitesse de la lumière c. La vitesse de la lumière est le seul paramètre non constant de cette équation, car nous avons montré précédemment que μ_0 et α sont constants.

La variation annuelle de la résistance de Klitzing ΔR_k devient alors :

$$\Delta R_k = \frac{\mu_0 \cdot \Delta c}{2 \cdot \alpha} \approx 1{,}9 \times 10^{-6}\ \Omega/\text{an} \tag{85}$$

Nous constatons que cette constante est connue assez précisément, car la variation annuelle est à peine 4 fois plus petite que l'incertitude de R_k. En réduisant encore l'incertitude d'un facteur 4, il serait possible de constater une variation annuelle de cette constante.

2.22. Variation de la constante de l'effet Josephson k_j en fonction du temps

L'effet Josephson se manifeste par l'apparition d'un courant entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche faite d'un matériau isolant ou métallique non supraconducteur [23]. Il existe un effet Josephson en courant continu et en courant alternatif. Selon le CODATA 2010 [8], la valeur de la constante de Josephson k_j est la suivante :

$$k_j = \frac{2 \cdot q_e}{h} \approx -483597{,}870(11) \times 10^9\ \text{Hz/Volt} \tag{86}$$

Nous constatons que la constante de Josephson est une fonction de la constante de Planck et de la charge électrique q_e qui varient au cours du temps. La variation annuelle de la constante de Josephson Δk_j est donnée par :

$$\Delta k_j = 2\left(\frac{q_e + \Delta q_e \cdot 1\,\text{an}}{h + \Delta h \cdot 1\,\text{an}} - \frac{q_e}{h} \right) \tag{87}$$

$$\Delta k_j \approx -1{,}8\times10^{4}\ \text{Hz/(Volt}\cdot\text{an)} \qquad \textbf{(88)}$$

Il serait donc possible d'améliorer cette mesure d'un facteur 600 environ avant de constater une variation annuelle de cette constante de physique.

2.23. Variation de la température moyenne du fond diffus de l'univers T_u en fonction du temps

Afin de conserver le principe de conservation de l'énergie, l'énergie totale E_u contenue dans l'univers est constante, la température T moyenne du fond diffus de l'univers est en baisse. Pour preuve, la température moyenne du fond diffus avoisine maintenant 2,7 °K alors que l'univers avait immanquablement une température plus élevée à ses débuts. Dans des travaux antérieurs, nous avons fait le calcul de la température moyenne du fond diffus de l'univers T :

$$T = \frac{m_e \cdot c^2}{k_b} \cdot \left(\frac{15 \cdot \beta^6 \cdot \alpha^{17}}{\pi^3} \right)^{1/4} \approx 2{,}736795(3)\ \text{°K} \qquad \textbf{(89)}$$

Selon le CODATA 2010 [8] :

- Constante de Boltzmann $k_B \approx 1{,}3806488(13)\times10^{-23}$ J/°K

Si la théorie du big bang est exacte, lorsque l'univers a commencé son expansion à partir d'un point de singularité, toute la matière devait alors être confinée en un point extrêmement petit. La pression était la plus énorme qui soit et ce, dans un volume extrêmement petit. Nous pouvons alors supposer que la température devait être à son maximum, c'est-à-dire la température de Planck qui correspond à la température limite dans l'échelle des températures :

$$T_p = \frac{m_p \cdot c^2}{k_b} = \frac{m_e \cdot c^2}{k_b} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^{21}}} \approx 1{,}4169\times10^{32}\ \text{°K} \qquad \textbf{(90)}$$

En partant de la température de Planck T_p, la température s'est mise à décroître au cours du temps pour s'approcher asymptotiquement de la température du zéro absolu. Tant que l'univers poursuivra son expansion, la température moyenne du fond diffus continuera à descendre de plus en plus lentement. Ce type de décroissance est de type exponentiel décroissant. Si nous savons que la température de départ est T_p et que la température actuelle est $T \approx 2{,}736795$ °K après un temps égal à l'âge apparent de l'univers $T_u = 1/H_0$, nous sommes en mesure d'établir une équation qui donne la température en fonction du temps.

$$T_p \cdot e^{-T_u/\tau} = T_p \cdot e^{-1/(H_0 \cdot \tau)} = T \tag{91}$$

Isolons la constante de temps τ qui sert à calculer la décroissance de la température moyenne du fond diffus T :

$$\tau = \frac{-1}{H_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_p}\right)} = \frac{-4 \cdot r_e}{c \cdot \alpha^{19} \cdot \beta^{1/2} \cdot \ln\left(\frac{15 \cdot \beta^4 \cdot \alpha^{59}}{\pi^3}\right)} \tag{92}$$

$$\tau \approx 5{,}861036698(37) \times 10^{15}\ \text{s} \approx 186\ \text{millions d'années} \tag{93}$$

Nous sommes maintenant en mesure de calculer la variation annuelle de la température moyenne du fond diffus de l'univers ΔT :

$$\Delta T = \frac{T_p \cdot e^{-\frac{1}{\tau}} \cdot (e^{\left(\frac{1}{H_0} - 31557600\,\text{s}\right)} - 1)}{\text{an}} \approx -1{,}5 \times 10^{-8}\ \text{°K/an} \tag{94}$$

Nous concluons qu'il est possible d'améliorer la précision de T dans l'équation **(89)** d'un facteur 200 environ. Après cela, nous constaterions une variation annuelle qui affecterait la précision des mesures.

2.24. Variation de la constante de Boltzmann k_b en fonction du temps

Selon le CODATA 2010 [8], la constante de Boltzmann est donnée par $k_b \approx 1{,}3806488(13) \times 10^{-23}$ J/°K.

Pour que le principe de conservation de l'énergie soit maintenu, l'énergie E donnée par l'équation suivante doit être constante :

$$E = k_b \cdot T = \text{Constante} \tag{95}$$

Lorsque la température moyenne du fond diffus de l'univers diminue au cours du temps, la constante de Boltzmann k_B est obligée d'augmenter pour conserver l'énergie E constante.

Par conséquent, pour que l'égalité de l'équation **(95)** soit maintenue, il faut que la variation annuelle de la constante de Boltzmann Δk_B augmente dans la même proportion que celle de la variation annuelle de la température moyenne du fond diffus de l'univers :

$$\left(k_b + \Delta k_b \cdot 1\,\text{an}\right) \cdot \left(T + \Delta T \cdot 1\,\text{an}\right) = k_b \cdot T \tag{96}$$

De cette équation, nous obtenons :

$$\Delta k_b = \frac{k_b}{1\,\text{an}} \cdot \left(\frac{T}{\left(T + \Delta T \cdot 1\,\text{an}\right)} - 1 \right) \approx 7{,}4 \times 10^{-32}\,\text{J/(°K} \cdot \text{an)} \tag{97}$$

Nous constatons qu'il serait théoriquement possible d'améliorer la précision de la constante de Boltzmann d'un facteur 70 environ. Après cela, nous constaterions une variation annuelle qui affecterait la précision des mesures.

2.25. Variation de la constante universelle des gaz parfaits $\Re$ en fonction du temps

La constante universelle des gaz parfaits $\Re$ est utilisée dans la loi des gaz parfaits :

$$P \cdot V = n \cdot \Re \cdot T \tag{98}$$

Dans cette équation, P est la pression à l'intérieur d'une enceinte de volume V. La température de l'enceinte est T et le nombre de molécules de gaz est n. La constante $\Re$ joue le rôle de constante de proportionnalité qui adapte les unités de mesure.

La constante universelle des gaz parfaits $\Re$ provient elle-même du produit de la constante de Boltzmann k_b par le nombre d'Avogadro N_A :

$$\Re = k_b \cdot N_A \approx 8{,}3144621(75)\,\text{J/(mol} \cdot \text{°K)} \tag{99}$$

Selon le CODATA 2010 [8], le nombre d'Avogadro est donné par $N_A \approx 6{,}02214129(27) \times 10^{23}$ mol^{-1}. Ce nombre ne peut pas changer dans le temps car il représente le nombre d'atomes par mol.

$$N_A = \text{constante} \approx 6{,}02214129(27) \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1} \tag{100}$$

La variation annuelle de la constante universelle des gaz parfaits $\Delta\Re$ est donné par :

$$\Delta\Re = \Delta k_b \cdot N_A \approx 4{,}5 \times 10^{-8}\,\text{J/(an} \cdot \text{mol} \cdot \text{°K)} \tag{101}$$

Nous constatons qu'il serait théoriquement possible d'améliorer la précision de la constante universelle des gaz parfaits $\Re$ d'un facteur 165 environ. Après cela, nous constaterions une variation annuelle qui affecterait la précision des mesures.

2.26. Variation de la constante de Stefan-Boltzmann σ en fonction du temps

La constante de Stefan-Boltzmann est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k_b^4}{15 \cdot h^3 \cdot c^2} \tag{102}$$

Selon le CODATA 2010 [8], la constante de Stefan-Boltzmann est donnée par $\sigma \approx 5{,}670373(21) \times 10^{-8}$ W/(m$^2\cdot$°K^4).

La variation annuelle de la constante de Stefan-Boltzmann $\Delta\sigma$ est donc :

$$\Delta\sigma = \frac{2 \cdot \pi^5}{15 \cdot 1\,\text{an}} \cdot \left[\frac{\left(k_b + \Delta k_b \cdot 1\,\text{an}\right)^4}{\left(h + \Delta h \cdot 1\,\text{an}\right)^3 \cdot \left(c + \Delta c \cdot 1\,\text{an}\right)^2} - \frac{k_b^4}{h^3 \cdot c^2} \right] \tag{103}$$

$$\Delta\sigma \approx 1{,}2 \times 10^{-15}\,\text{W/(m}^2 \cdot \text{°K}^4 \cdot \text{an)} \tag{104}$$

Nous constatons qu'il serait théoriquement possible d'améliorer la précision de la constante de Stefan-Boltzmann d'un facteur 175 environ. Après cela, nous constaterions une variation annuelle qui affecterait la précision des mesures.

2.27. Variation du rapport entre la masse de l'électron m_e et du proton m_{pr}

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, les rapports dont le numérateur et le dénominateur possèdent les mêmes unités aboutissent à des résultats sans unités qui ne varient pas dans le temps. Ainsi, le rapport entre la masse de l'électron et la masse du proton est intéressant car il est constant dans le temps.

La masse du proton qui est $m_{pr} \approx 1{,}672621777(74) \times 10^{-27}$ kg est environ 1836 fois plus grande que celle de l'électron qui est $m_e \approx 9{,}10938291(40) \times 10^{-31}$ kg. Il est donc plus facile de la mesurer. Cependant, malgré ce constat, le rapport m_e/m_{pr} est connu avec une meilleure précision que chacun des termes individuels composant le rapport (Selon la valeur inscrite dans le CODATA 2010 [8], $m_e/m_{pr} \approx 5{,}4461702178(22) \times 10^{-4}$). C'est normal, car le rapport ne change pas dans le temps puisque la variation annuelle du numérateur (sous forme de pourcentage) est compensée par la variation annuelle du dénominateur. Les variations se cancellent donc et le rapport résultant est constant.

$$\frac{m_e}{m_{pr}} = \text{constante} \tag{105}$$

3. CONCLUSION

Tout comme l'avait soupçonné Dirac [1], plusieurs "constantes" de physique varient au cours des années en raison de l'expansion de l'univers. Pour l'instant, ces variations sont inférieures ou à la limite des erreurs expérimentales de mesure. Par conséquent, avec les techniques et technologies utilisées, il est très difficile de faire l'observation de ces variations annuelles. Il n'est donc pas dans nos intentions de blâmer quiconque d'affubler à tort le titre de "constante" à certains paramètres de physique. Il faut comprendre qu'à l'échelle de temps d'un humain, certaines variations deviennent imperceptibles. Il est donc parfaitement légitime et même utile de considérer certains paramètres comme étant constants. Spécialement si nous sommes en mesure de décrire certains phénomènes à l'aide d'équations utilisant ces paramètres.

Tout comme ce qui a été mentionné dans notre introduction, nous rappelons ici que notre travail a été de calculer les variations des différentes constantes de physique **<u>dans le cas où nous acceptons le fait que la lumière accélère au cours du temps</u>**. En effet, tant et aussi longtemps que les constantes sont définies en fonction de la vitesse de la lumière *c*, il ne sera pas possible de détecter les variations de ces constantes dans le temps. En considérant la vitesse de la lumière fixe, nous ferons la découverte de phénomènes, tel que l'effet Pioneer, qui seront difficiles à expliquer.

Afin de nous munir d'étalons fiables et le plus reproductibles possible dans le temps, il peut sembler utile et indispensable (pour l'instant) de supposer la vitesse de la lumière dans le vide *c* constante. Mais cet artifice ne doit pas nous aveugler sur le fait qu'il est aussi indispensable de tenir compte de la variation de la vitesse de la lumière dans le temps pour expliquer les phénomènes qui nous entourent. Les phénomènes physiques se décrivent par des lois qui sont, entre autres, ce qu'elles sont en raison du fait que notre univers est en expansion.

Comprendre le mécanisme de variation des différents paramètres de physique est essentiel pour connaître les limites admissibles des marges d'erreur dans les mesures. En effet, il peut sembler futile d'écrire dans une table un nombre qui devra de toute manière être réajusté l'année d'après. Habituellement, il est préférable de connaître la partie du nombre qui sera stable sur une période de temps considérée appréciable à notre échelle de temps. Si cela ne peut être fait, il est alors préférable de créer une équation qui donne l'état du paramètre de physique en fonction du temps de telle sorte à pouvoir garder une certaine validité des chiffres significatifs mesurés.

Dans cet article, nous avons commencé par essayer de mettre en évidence les constantes réelles de physique, celles qui étaient indépendantes du mécanisme d'expansion de l'univers. Lorsque les constantes provenaient de résultats géométriques (tels que β et k), leur constance était indiscutable. Lorsqu'elles étaient le résultat de rapports de deux constantes possédant les mêmes unités (tels que N et α), les variations annuelles s'annulent automatiquement et créent de véritables constantes de physique.

En partant de ces réelles constantes et en utilisant différentes équations connues, il nous a été possible d'établir systématiquement les variations annuelles des autres paramètres couramment utilisés en physique (que l'on nomme à tort "constantes de physique").

Notre étude permet de connaître les différents mécanismes de variation en jeu. Nous résumons les résultats de ces calculs dans un tableau, en annexe, en mettant en évidence les variations annuelles des différents paramètres de physique.

Peut-être que ce document pourrait servir à établir quels sont les paramètres de l'univers à favoriser pour devenir des étalons dans le système de mesure international. Comme nous l'avons constaté, certains varient moins que d'autres.

4. RÉFÉRENCES

[1] Dirac, P. A. M., "Cosmological Constants", *Nature*, 1937, v. 139, no. 3512, pp. 323.

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

[3] 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/

[4] Mercier, Claude, "Hypothèse sur les grands nombres de Dirac menant à la constante de Hubble et à la température du fond diffus de l'univers", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 4 février 2013, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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/

[8] "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

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

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

[11] Mercier, Claude, "Solution à la mystérieuse équation de Weinberg", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 2 avril 2013, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

[12] 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/

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

[14] Wang, Xiaofeng et al., "Determination of the Hubble Constant, the Intrinsic Scatter of Luminosities of Type Ia SNe, and Evidence for Non-Standard Dust in Other Galaxies", mars 2011, pp. 1-40, arXiv:astro-ph/0603392v3

[15] Vargas, J. G. et D.G. Torr, "Gravitation and Cosmology: From the Hubble Radius to the Planck Scale", *Springer*, v. 126, 2003, pp. 10.

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

[17] 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.

[18] Teller, Edward, "On the Change of Physical Constants", *Physical Review*, avril 1948, v. 73, no. 7, pp. 801-802.

[19] Berman, Marcelo Samuel, "Cosmological Models with Variable Gravitational and Cosmological 'Constants' ", *General Relativity and Gravitation,* avril 1991, v. 23, no. 4, pp. 465-469.

[20] Jordan, Pascual et C. Müller, "Field Equations with a Variable 'Constant' of Gravitation", Zeitschrift für Naturforschung, janvier 1947, v. 2a, pp. 1-2.

[21] Narlikar, J. V., "Cosmologies with Variable Gravitational Constant", *Foundation of Physics*, v. 13, no 3, mars 1983, pp. 311-323.

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

[23] Sidharth, B. G., "The Thermodynamic Universe ", *World Scientific Publishing Co.*, New Jersey, USA , 2008, p. 212.

[24] Josephson, Brian David, "Possible New Effects in Superconductive Tunneling", Physics Letters, juillet 1962, v. 1, pp. 251–253.

[25] Mercier, Claude, "Décalage des longueurs d'onde du spectre électromagnétique au cours du temps", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 25 décembre 2013, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

TABLEAU SYNTHÈSE DES VARIATIONS ANNUELLES DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE PHYSIQUE DUES À L'EXPANSION DE L'UNIVERS

Description de la constante	Valeur et (précision)	Source	Équation	Variation /an
1- Constante de structure fine	$\alpha \approx 7{,}2973525698(24) \times 10^{-3}$	[8]	mesurée	$\Delta\alpha$ = Constante
2- Nombre maximal de photons de longueur d'onde $2\pi{\cdot}R_u$	$N \approx 6{,}30341951(12) \times 10^{121}$	[7]	**(4)**	ΔN = Constante
3- Rapport vitesse expansion univers matériel / vitesse c	$\beta \approx 0{,}7639320225$	[3]	**(8)**	$\Delta\beta$ = Constante
4- Vitesse limite de la lumière lorsque $R_u \to \infty$	$k \approx 6{,}17024151 \times 10^{8}$ m/s	[3]	**(9)**	Δk = Constante
5- Perméabilité du vide	$\mu_0 \approx 4{\cdot}\pi \times 10^{-7}$ N/A^2	[8]	défini	$\Delta\mu_0$ = Constante
6- Nombre d'Avogadro	$N_A \approx 6{,}02214129(27) \times 10^{23}$ mol^{-1}	[8]	mesurée	ΔN_A = Constante
7- Permittivité du vide	$\varepsilon_0 \approx 8{,}854187817 \times 10^{-12}$ F/m	[8]	mesurée	$\Delta\varepsilon_0 \approx -1{,}3{\times}10^{-21}$ s^4/(kg·m^3·an)
8- Rapport entre la masse de l'électron et celle du proton	$m_e/m_{pr} \approx 5{,}4461702178(22) \times 10^{-4}$	[8]	mesurée	$\Delta m_e/m_{pr}$ = Constante
9- Constante de Planck	$h \approx 6{,}62606957(29) \times 10^{-34}$ J·s	[8]	mesurée	$\Delta h \approx -5{,}3{\times}10^{-64}$ J·s/an ≈ Constante
10- Vitesse de la lumière dans le vide	$c \approx 299792458$ m/s	[8]	mesurée	$\Delta c \approx 0{,}022$ m/(s·an)
11- Impédance du vide	$Z_0 \approx 376{,}730313\ \Omega$	[8]	**(31)**	$\Delta Z_0 \approx 2{,}8 \times 10^{-8}$ Ω/an
12- Constante de gravitation universelle	$G \approx 6{,}67323036(30) \times 10^{-11}$ m^3/(kg·s^2·an)	[7]	**(44)**	$\Delta G \approx 2{,}5 \times 10^{-20}$ m^3/(kg·s^2·an)
13- Constante de Hubble	$H_0 \approx 72{,}09548632(46)$ km/(s·MParsec)	[7]	**(7)**	$\Delta H_0 \approx -5{,}3 \times 10^{-9}$ km/(s·MParsec·an)
14- Fréquence de Planck	$f_p \approx 2{,}9523360(28) \times 10^{42}$ Hz	Ce document	**(62)**	$\Delta f_p \approx -2{,}2 \times 10^{32}$ Hz/an
15- Temps de Planck	$t_p \approx 5{,}3908142(52) \times 10^{-44}$ s	Ce document	**(59)**	$\Delta t_p \approx 4{,}0 \times 10^{-54}$ s/an
16- Longueur de Planck	$l_p \approx 1{,}616125436(53) \times 10^{-35}$ m	Ce document	**(54)**	$\Delta l_p \approx 1{,}2 \times 10^{-45}$ m/an
17- Masse de Planck	$m_p \approx 2{,}17660867(10) \times 10^{-8}$ kg	Ce document	**(46)**	$\Delta m_p \approx -3{,}2 \times 10^{-18}$ kg/an
18- Masse apparente de l'univers	$m_u \approx 1{,}72809823(8) \times 10^{53}$ kg	[7]	**(36)**	$\Delta m_u \approx -2{,}5 \times 10^{43}$ kg/an
19- Rayon de courbure apparent de l'univers lumineux	$R_u \approx 1{,}2831078806(68){\times}10^{26}$ m	[9]	**(14)**	$\Delta R_u \approx 9{,}5 \times 10^{15}$ m/an
20- Rayon de courbure apparent de l'univers matériel	$r_u \approx 9{,}802071983(52) \times 10^{25}$ m	[9]	**(17)**	$\Delta r_u \approx 7{,}2 \times 10^{15}$ m/an
21- Masse associée au photon de longueur d'onde $2\pi{\cdot}R_u$	$m_{ph} \approx 2{,}741525(12) \times 10^{-69}$ kg	Ce document	**(41)**	$\Delta m_{ph} \approx -4{,}0 \times 10^{-79}$ kg/an
22- Masse de l'électron	$m_e \approx 9{,}10938291(40) \times 10^{-31}$ kg	[8]	mesurée	$\Delta m_e \approx -1{,}3 \times 10^{-40}$ kg/an
23- Rayon classique de l'électron	$r_e \approx 2{,}817940326\ 7(27) \times 10^{-15}$ m	[8]	mesurée	$\Delta r_e \approx 2{,}1 \times 10^{-25}$ m/an
24- Charge de l'électron	$q_e \approx -1{,}602176565(35) \times 10^{-19}\ C$	[8]	mesurée	$\Delta q_e \approx +5{,}9 \times 10^{-30}$ C/an
25- Charge du positron	$q_{e+} \approx +1{,}602176565(35) \times 10^{-19}\ C$	[8]	mesurée	$\Delta q_{e+} \approx -5{,}9 \times 10^{-30}$ C/an
26- Constante de Rydberg	$R_\infty \approx 10973731{,}568539(55)$ m^{-1}	[8]	mesurée	$\Delta R_\infty \approx -8{,} \times 10^{-4}$ m-1/an
27- Température moyenne du fond diffus de l'univers	$T \approx 2{,}736795(3)$ °K	Ce document	**(89)**	$\Delta T \approx -1{,}5 \times 10\text{-}8$ °K/an
28- Constante de Boltzman	$k_b \approx 1{,}3806488(13) \times 10^{-23}$ J/°K	[8]	mesurée	$\Delta k_b \approx 7{,}4 \times 10\text{-}32$ J/(°K·an)
29- Constante de Stefan-Boltzman	$\sigma \approx 5{,}670373(21) \times 10^{-8}$ W/(m^2·°K)	[8]	**(102)**	$\Delta\sigma \approx 1{,}2 \times 10^{-15}$ W/(m^2·°K·an)
30- Constante de Von Klitzing	$R_k \approx 25812{,}8074434(84)\ \Omega$	[8]	**(84)**	$\Delta R_k \approx 1{,}9 \times 10^{-6}$ Ω/an
31- Constante de l'effet Josephson	$k_j \approx -483597{,}870(11) \times 10^{9}$ Hz/Volt	[8]	**(86)**	$\Delta k_j \approx -1{,}8 \times 10^{4}$ Hz/(Volt·an)
32- Constante universelle des gaz parfaits	$\mathfrak{R} \approx 8{,}3144621(75)$ J/(mol·°K)	[8]	mesurée	$\Delta\mathfrak{R} \approx 4{,}5 \times 10^{-8}$ J/(mol·°K·an)