Calcul de la masse associée au photon au repos

Claude Mercier ing., 22 mars, 2017 claude.mercier@gctda.com
Rév. 25 juin 2017

La dualité onde-énergie nous permet d'associer une masse à un photon. En utilisant l'équation d'énergie de la relativité restreinte d'Einstein [11] *associée à la masse et l'équation d'énergie de Planck* [12] *associée à une onde, il est possible d'associer une masse à un photon d'une certaine longueur d'onde. Dans cet article, nous montrerons qu'il est aussi possible d'associer une masse à un photon au repos.*

En 1905, Einstein a montré que la masse en mouvement relativement à un observateur au repos augmente selon l'inverse du facteur de Lorentz [11]*. Même une masse infiniment petite peut devenir importante lorsqu'elle approche la vitesse de la lumière.*

Au cours des siècles, les physiciens (tel qu'Einstein) ont pris conscience qu'il y avait une vitesse limite grâce à la lumière. Cependant, rien n'implique que ce soit la lumière qui soit véritablement la vitesse limite. En fait, selon nos recherches, cette limite semble être légèrement au-dessus de celle de la lumière. La différence entre cette limite de vitesse et la vitesse de la lumière est tellement petite que ces deux vitesses semblent indissociables.

Selon nos recherches, la masse apparente de l'univers (environ $1,73\times10^{53}$*kg) est due à l'énergie cinétique des photons qui constituent notre univers. Sans leur vitesse, qui est celle de la lumière dans le vide, la masse apparente totale de l'univers serait en fait limitée à la masse de Planck (environ* $2,1766\times10^{-8}$*kg), soit la masse d'un petit grain de sable.*

MOTS CLÉS : Masse du photon, masse de Planck, énergie, Einstein, quantum de vitesse, vitesse limite

1. INTRODUCTION

Dans le modèle standard, le photon possède une masse nulle. Il est cependant possible de lui associer une masse équivalente à son énergie ondulatoire grâce aux équations d'Einstein [11] et de Planck [12]. Cette masse est petite et non mesurable.

Bien qu'il soit entièrement hypothétique de concevoir un photon au repos, nous désirons calculer sa masse au repos pour en connaître les conséquences.

2. DÉVELOPPEMENT

2.1. Valeur des paramètres physiques utilisés

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

- Vitesse de la lumière dans le vide $c \approx 299792458$ m/s
- Constante gravitationnelle universelle $G \approx 6{,}67408(31) \times 10^{-11}$ m^3/(kg·s^2)
- Longueur de Planck $L_p \approx 1{,}616229(38) \times 10^{-35}$ m
- Masse de Planck $m_p \approx 2{,}176470(51) \times 10^{-8}$ kg

2.2. Postulats sur la vitesse maximale des objets

Grâce à ses équations de la relativité restreinte de 1905 [11], Einstein a pu nous montrer qu'il est impossible, pour un objet quelconque, d'atteindre la vitesse de la lumière dans le vide qui est représentée par la constante *c*. Si un objet de masse m_0 au repos est accéléré à une vitesse v, il sera perçu comme ayant une masse m' par un observateur au repos.

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

Nous constatons que pour une vitesse v qui tend vers c, la masse m' tendra vers l'infini. Du même coup, une telle masse aurait une énergie infinie, ce qui est impossible. Par conséquent, Einstein en a conclu qu'il était impossible pour un objet matériel de voyager à la vitesse de la lumière.

En fait, il est impossible de prendre un quelconque objet de l'univers et de l'accélérer à une vitesse telle que la masse de l'objet aurait une masse supérieure à la masse apparente de l'univers. En quelque sorte, si au niveau de l'énergie, rien ne se perd et rien ne se crée, mais tout se transforme, il est facile d'accepter qu'on ne peut pas donner à un objet plus d'énergie que l'énergie contenue dans l'univers lui-même.

Fort de ces évidences, nous émettons les postulats suivants :

Postulat 1 : Il est impossible pour une masse m_0 composée de plusieurs particules au repos (par rapport à un observateur au repos) d'être accélérée à une vitesse v qui lui donnerait une masse apparente m' (toujours pour l'observateur au repos) supérieure à celle de la masse apparente de l'univers m_u.

Postulat 2 : Il est impossible pour une particule élémentaire au repos (par rapport à un observateur au repos) d'être accélérée à une vitesse v qui lui donnerait une masse apparente m' (toujours pour l'observateur au repos) supérieure à celle de la masse de Plank m_p.

2.3. La masse de Planck est le plus haut niveau d'énergie d'une particule élémentaire

Afin d'utiliser ce constat plus tard, nous désirons montrer que la masse de Planck représente le plus haut niveau d'énergie pour une particule élémentaire.

Pour preuve, supposons une particule élémentaire de masse m. Son énergie peut être représentée de deux manière; par une masse ou par une onde.

L'énergie contenue dans une masse m est donnée par l'équation d'Einstein [11] :

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

L'énergie contenue dans l'onde de longueur $\lambda = c/f$ (où f est la fréquence de l'onde électromagnétique) qui lui est associée est donnée par l'équation de Planck [12] :

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad \textbf{(3)}$$

L'onde a un rayon r et la surface circulaire décrite par le rayon r avance linéairement et perpendiculairement à la surface en décrivant la forme d'un ressort circulaire. Vue de côté, la forme du ressort est perçue comme étant une onde sinusoïdale. Vue de face, c'est un vecteur de rayon r qui tourne sur la circonférence d'un cercle avec une vitesse angulaire égale à $\lambda = 2\pi{\cdot}r$.

Dans l'équation **(3)**, le niveau d'énergie E le plus élevé sera atteint par la plus petite valeur de λ possible. Ça sera le cas pour un $r = L_p$ où L_p est la longueur de Planck (la plus petite unité de longueur qui soit).

En sachant que $\lambda = 2\pi \cdot r$, faisons égaler les équations **(2)** et **(3)** :

$$m \cdot c^2 = \frac{h \cdot c}{2\pi \cdot r} \tag{4}$$

Pour $r = L_p$:

$$m \cdot c^2 = \frac{h \cdot c}{2\pi \cdot L_p} \tag{5}$$

De manière standard, la longueur de Planck L_p est donnée par l'équation suivante :

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

En utilisant l'équation **(6)** dans l'équation **(5)** et en isolant m, nous obtenons :

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot c}{2\pi \cdot G}} = m_p \tag{7}$$

Nous constatons que la masse m ainsi obtenue est exactement la définition de la masse de Planck m_p. Nous venons donc de montrer, tel que mentionné plus tôt, que la masse de Planck représente le plus haut niveau d'énergie pour une particule élémentaire.

2.4. Le quantum de vitesse

Dans des travaux antérieurs, nous avons déjà montré qu'il existe un quantum de vitesse que nous avons baptisé ε_v. Ce quantum de vitesse est la plus petite unité de vitesse insécable qui existe.

Selon un postulat de la relativité restreinte d'Einstein, la constante c représente la vitesse limite et infranchissable de la lumière dans le vide. Là où nous faisons une légère modification au postulat d'Einstein, c'est que nous affirmons que même la lumière ne peut atteindre véritablement c et qu'il y a une légère différence entre la véritable vitesse de la lumière et la vitesse limite c.

Pour simplifier notre langage, baptisons la véritable vitesse de la lumière v_L pour la distinguer de c qui est la vitesse limite. Bien sûr, $v_L \approx c$. Pour la plupart des équations et applications faisant intervenir la relativité restreinte, cette assertion est vraie et justifiée. Mais voyons les cas où ce n'est pas le cas et où il est important de faire la différence entre v_L et c.

Tel que montré en **(4)**, il est possible d'associer une masse à une onde. Associons une masse m_{ph} au photon de plus faible énergie qui soit (qui possède une longueur d'onde égale à la circonférence apparente de l'univers $\lambda = 2\pi \cdot R_u$) :

$$m_{ph} = \frac{h}{2\pi \cdot R_u \cdot c} \approx 2{,}72 \times 10^{-69}\,\text{kg} \tag{8}$$

Le rayon apparent de l'univers lumineux R_u est donné par [5,6,7][1]:

$$R_u = \frac{c}{H_0} \approx 1{,}28 \times 10^{26}\,\text{m} \tag{9}$$

H_0 représente la constante de Hubble [3]. Elle peut être approximée à environ 72,1 km/(s·MParsec) selon les travaux de Xiaofeng et de son équipe [4].[2]

Prenons maintenant une particule ayant la même masse que la masse m_{ph} associée au photon de plus faible énergie. Bien sûr, le photon va déjà à une vitesse extrêmement proche de c. Mais supposons que la particule choisie est au repos et possède la masse m_{ph} associée au photon. Voyons, à l'aide de l'équation **(1)** à quelle vitesse il est requis d'accélérer cette masse pour lui donner la masse de Planck m_p qui correspond au niveau d'énergie le plus élevé.

$$m_p = \frac{m_{ph}}{\sqrt{1 - \frac{v_L^2}{c^2}}} \tag{10}$$

Nous voyons bien que pour une vitesse de la lumière v_L égale à la vitesse limite c, nous obtiendrions, pour un observateur au repos, une masse perçue comme étant égale à l'infinie, ce qui est impossible. Bien sûr, d'un autre côté, nous pourrions dire que m_{ph} est nulle, mais encore une fois, il serait impossible d'obtenir une valeur finie de m_p. La seule manière de s'en sortir avec une telle équation est d'admettre que v_L est légèrement inférieure à c d'un facteur ε_v que nous baptisons « quantum de vitesse » [8] :

$$v_L = c - \varepsilon_v \tag{11}$$

[1] Le nom donné au rayon apparent de l'univers lumineux dans ces articles peut différer. Certains l'appelleront « rayon de Hubble », « rayon de l'univers » et « grosseur de l'univers ».

[2] Selon nos recherches, la valeur de $H_0 \approx 72{,}09548632(46)$ km/(s·MParsec). Voir le document « *Calcul de la constante de gravitation universelle G* » sur le site Internet www.pragtec.com/physique

Tout l'univers est en quelque sorte fait de photons. Ceux-ci sont soit en mouvement « rectiligne » uniforme ou confinés dans des particules. En effet, lorsque nous désintégrons parfaitement la matière, nous obtenons en final uniquement des photons. Bien sûr, cela suppose une réorganisation des particules subatomiques, mais l'idée ici est que nous pouvons associer des photons à tout ce qui existe dans l'univers.

Réécrivons l'équation **(10)** en utilisant l'équation **(11)** :

$$m_p = \frac{m_{ph}}{\sqrt{1 - \frac{\left(c - \varepsilon_v\right)^2}{c^2}}} \quad \textbf{(12)}$$

Ce qui donne aussi :

$$m_p = \frac{m_{ph}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_v}{c} - \frac{\varepsilon_v^2}{c^2}}} \quad \textbf{(13)}$$

Comme la valeur de ε_v est très petite, le carré de ε_v est négligeable :

$$\frac{2\varepsilon_v}{c} >> \frac{\varepsilon_v^2}{c^2} \quad \textbf{(14)}$$

Par conséquent, nous pouvons réécrire l'équation **(13)** en faisant l'approximation suivante :

$$m_p \approx \frac{m_{ph}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_v}{c}}} \quad \textbf{(15)}$$

Si nous isolons le quantum de vitesse ε_v, nous obtenons :

$$\varepsilon_v \approx \frac{c}{2} \cdot \frac{m_{ph}^2}{m_p^2} \quad \textbf{(16)}$$

Sachant que le nombre N est le nombre maximal de photons de plus faible énergie (possédant une longueur d'onde $\lambda = 2\pi{\cdot}R_u$) que peut contenir l'univers :

$$N = \frac{m_u}{m_{ph}} \approx 6{,}30 \times 10^{121} \quad \textbf{(17)}$$

Et sachant que la masse apparente de l'univers m_u est donnée par [2]:

$$m_u = \frac{c^3}{G \cdot H_0} \quad \textbf{(18)}$$

Il est possible de démontrer, à partir des équations **(7)**, **(8)**, **(9)**, **(17)** et **(18)** que :

$$N = \frac{m_p^2}{m_{ph}^2} \quad \textbf{(19)}$$

Par conséquent, l'équation **(16)** peut être réécrite comme suit pour donner le quantum de vitesse ε_v [8] :

$$\varepsilon_v \approx \frac{c}{2N} \approx 2{,}34 \times 10^{-114}\,\mathrm{m/s} \quad \textbf{(20)}$$

Nous constatons bien que dans l'équation **(11)**, la vitesse v_L est réellement très proche de c sans pour autant être identique.

2.5. La masse m_0 du photon de plus faible énergie au repos

Essayons ici de déterminer la masse m_0 qui peut être associée à un photon au repos. C'est bien sûr un concept hypothétique, car personne n'a réussi à mettre un photon au repos. Pour percevoir une telle masse, un observateur devrait être en déplacement parallèlement et à la vitesse du photon, ce qui représente une autre impossibilité...

Supposons maintenant que nous associons une masse m_{ph} à un photon en mouvement et que la masse associée au photon au repos est m_0.

$$m_{ph} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_L^2}{c^2}}} \quad \textbf{(21)}$$

Remplaçons v_L par l'équation **(11)** et isolons la valeur de la masse du photon au repos m_0 :

$$m_0 = m_{ph} \cdot \sqrt{1 - \frac{(c - \varepsilon_v)^2}{c^2}} \qquad \textbf{(22)}$$

Par un processus d'approximation similaire à ce qui a été fait pour obtenir le quantum de vitesse ε_v , nous obtenons :

$$m_0 \approx m_{ph} \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon_v}{c}} \approx \frac{m_{ph}}{\sqrt{N}} \approx 3{,}45 \times 10^{-130}\,\text{kg} \qquad \textbf{(23)}$$

C'est une masse tellement petite qu'il est totalement impossible de la mesurer.

Ce qui est encore plus intéressant, c'est que si nous la multiplions par le nombre maximal de photons de plus basse énergie dans l'univers, nous obtenons exactement la masse de Planck m_p :

$$m_0 \cdot N \approx \frac{m_{ph}}{\sqrt{N}} \cdot N = m_{ph} \cdot \sqrt{N} = m_p \qquad \textbf{(24)}$$

Par conséquent, si aucune énergie cinétique n'avait été insufflée d'une quelconque manière dans l'univers de départ lors du big bang, l'univers aurait eu la masse de Planck m_p, c'est-à-dire la masse d'un petit grain de sable. Ce sont les effets relativistes dus à l'incroyable vitesse des photons qui fait en sorte que l'univers a maintenant la masse impressionnante que nous lui connaissons.

L'équation **(24)** est d'autant plus intéressante lorsque nous savons 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 m_{ph} de plus faible énergie (possédant une longueur d'onde $\lambda = 2\pi \cdot R_u$). Il est possible de démontrer cette équation à partir des équations **(7)**, **(8)**, **(9)** et **(17)** :

$$m_p = \sqrt{m_u \cdot m_{ph}} \qquad \textbf{(25)}$$

C'est donc dire que la masse de Planck m_p joue différents rôles :

- C'est la masse d'une particule qui a le plus haut niveau d'énergie.
- C'est la masse correspondant à la moyenne géométrique entre la masse associée à un photon et la masse apparente de l'univers.
- C'est la masse totale de tous les photons au repos de l'univers.

3. CONCLUSION

L'intérêt de cet article est de montrer qu'il est possible d'associer une masse à un photon au repos. Nous pouvons alors constater que la masse apparente de l'univers est un effet relativiste dû à la vitesse des photons.

Le quantum de vitesse ε_v permet de limiter « l'augmentation » de la masse d'une particule, par effet relativiste dû à la vitesse, à une masse égale à la masse de Planck.

4. RÉFÉRENCES

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

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

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

[4] 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

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

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

[7] 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] Mercier, Claude, "Calcul du quantum de vitesse et de la vitesse limite des objets", *Pragtec*, Baie-Comeau, Québec, Canada, 14 janvier 2013, article disponible sur Internet à : www.pragtec.com/physique/

[9] Binney, James et Michael Merrifield, "Galactic astronomy", *Princeton University Press*, 1998, p. 733, de l'équation A2.

[10] Maneghetti, 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>

[11] 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.

[12] Planck, Max, "On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum", Annalen der Physik, 1901, vol. 4, p. 553 ff.