

La masse vint... et la lumière fut

Un nouveau paradigme des origines

Michel Spiro (michel.spiro@cea.fr)

Directeur de recherche émérite au CEA, Président de la Société Française de Physique

Dans l'histoire de l'Univers primordial, le photon sans masse, et donc la lumière, est apparu, ou plus précisément s'est distingué, au moment où les autres particules ont acquis une masse et où l'interaction électrofaible s'est brisée. Ceci s'est produit quelques picosecondes après le Big Bang. La lumière s'est alors propagée dans un milieu très opaque, un peu comme se propage à l'intérieur du Soleil la lumière qui est produite en son cœur.

Il faudra attendre 380 000 ans pour que l'Univers se transforme d'une soupe opaque de particules (un plasma) en une soupe transparente d'atomes neutres électriquement, libérant ainsi la lumière comme à la surface du Soleil. C'est le rayonnement fossile, qu'on peut observer aujourd'hui.

Cet article, écrit dans un langage « classique », essaie de retracer cette brève histoire de la lumière dans un Univers primordial, qui n'était guère « classique ».

Le modèle standard de la physique des particules et de la cosmologie nous permet de reconstituer l'histoire de l'Univers. Il nous indique que, juste après le Big Bang qui reste l'objet de controverses scientifiques, tout l'Univers observable aujourd'hui était une soupe extrêmement chaude (de température supérieure à plusieurs TeV, soit quelques 10^{16} K au moins) de particules sans masse et donc beaucoup moins différenciées qu'aujourd'hui.

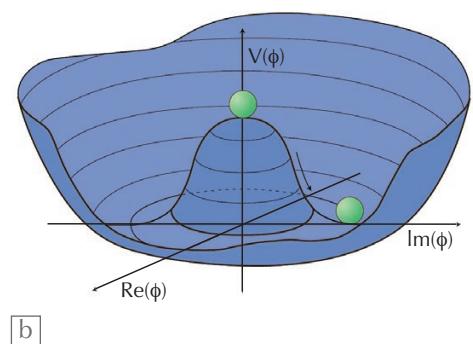
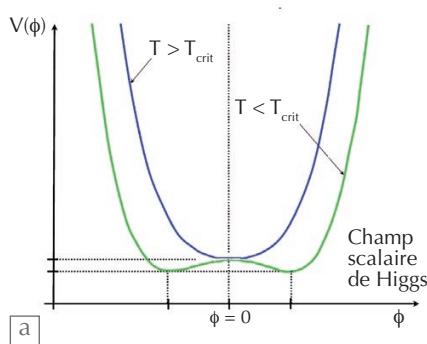
Après le Big Bang : naissance de la masse... et de la lumière

En particulier, les bosons intermédiaires W et Z , médiateurs de l'interaction faible et connus aujourd'hui pour avoir une masse de l'ordre de cent fois celle du proton, rendant l'interaction faible d'extrême courte portée, étaient alors sans masse. Les interactions faible et électromagnétique étaient unifiées, et donc indifférenciables. Il n'y avait pas de différence de masse entre les électrons et les neutrinos, entre les photons et les bosons intermédiaires. La lumière (au

sens du photon que nous connaissons aujourd'hui) n'existe pas, tout n'était que radiation largement mélangée. Cela veut-il dire que l'Univers, sans masse existante, était vide ?

Non, car il était rempli d'énergie. Le vide, c'est autre chose, c'est l'état sous-jacent à ce qui existe. Le vide quantique n'est pas « vide ». C'est un état particulier, qui ne contient pas de particules réelles mais est rempli de particules virtuelles créées puis annihilées par les fluctuations quantiques du vide. Ce bain de particules virtuelles est en équilibre avec le rayonnement de l'Univers. Le vide quantique ressent donc la température de l'Univers.

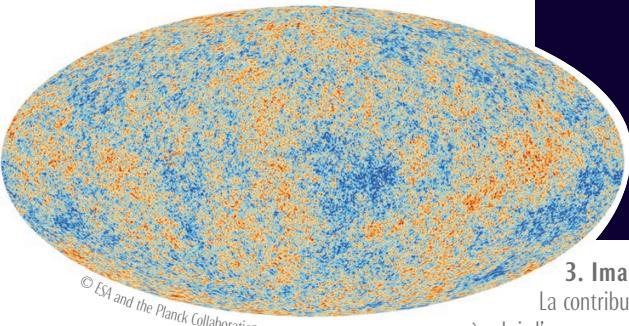
Puis l'Univers se refroidit. Après quelques picosecondes, la température va passer sous les 100 GeV ($\sim 10^{15}$ K) : la densité d'énergie de l'Univers va donc décroître. L'Univers ou, plus précisément, le vide dans l'Univers va connaître une transition de phase. Cette transition est liée au boson de Higgs, plus précisément au champ de Higgs qui remplit tout l'Univers et plus précisément encore au mécanisme de Brout, Englert et Higgs.



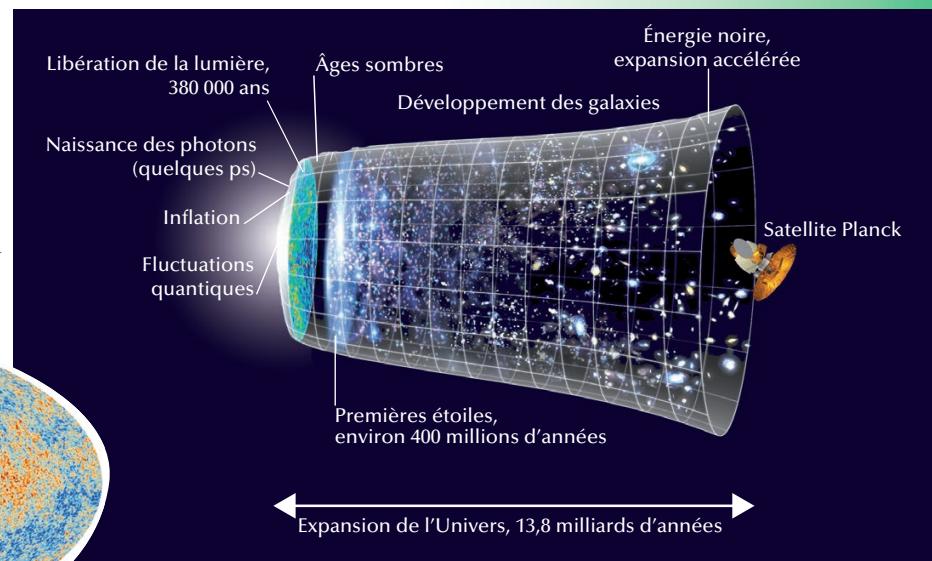
1. L'énergie $V(\phi)$ du champ de Higgs dans le vide en fonction de sa valeur moyenne ϕ dans le vide.

(a) Evolution d'une forme parabolique à haute température (courbe bleue) à une forme de chapeau mexicain en dessous de la température critique (courbe verte).

(b) Représentation 2D du potentiel $V(\phi)$ en forme de chapeau mexicain.



2. Frise chronologique de l'évolution de l'Univers observable, du Big Bang jusqu'à maintenant (de la gauche vers la droite). Version modifiée de l'image originale (NASA/WMAP Science Team).



3. Image du fond du ciel dans le domaine des micro-ondes, vu par le satellite Planck.
La contribution de notre galaxie (la Voie Lactée) a été soustraite. Ce rayonnement, presque isotrope, correspond à celui d'un corps noir de température 2,72 K, avec des fluctuations de l'ordre de 0,2 mK.

Ce mécanisme est quelque peu analogue à la transition ferromagnétique du fer lorsque la température passe en dessous du point de Curie : on assiste alors à une perte de symétrie (par rotation) en même temps que s'installe un nouvel ordre (alignement des *spins*). Pour le mécanisme de Brout, Englert et Higgs, la figure 1 montre l'évolution (la bille verte) de la représentation de l'état du vide au cours du temps (son « énergie » V en fonction de la valeur moyenne, un nombre complexe ϕ , du champ de Higgs dans le vide). Cet état, qui était stable lorsque la température était bien supérieure à des centaines de GeV (au fond d'un puits parabolique, courbe bleue sur la figure 1a), va évoluer sur une surface qui, partant du puits parabolique, a pris progressivement la forme d'un chapeau mexicain lorsque la température a baissé vers une centaine de GeV (fig. 1a, courbe verte). Il va passer du sommet du chapeau (état d'énergie symétrique par rotation autour de l'axe z des énergies) vers un point au fond de la rigole (état d'énergie minimale), brisant spontanément la symétrie (fig. 1b). Ceci va correspondre à une sorte de condensation du champ de Higgs dans le vide quantique, ce qui constitue la transition de phase. Les particules vont ressentir, chacune à leur manière, cette nouvelle « viscosité » du vide et acquérir une masse inertielle. (Pour en savoir plus, voir G. Cohen-Tannoudji et M. Spiro, *Le boson et le chapeau mexicain*, Gallimard, 2013.)

La masse n'est donc pas une propriété intrinsèque aux seules particules, c'est une propriété partagée avec le vide

quantique et le champ de Higgs. Selon leur « sensibilité » au champ de Higgs, les particules deviennent plus ou moins massives, de même que les bosons intermédiaires, mais pas le photon qui maintenant se distingue bien en restant sans masse. À cause de la nouvelle masse des bosons intermédiaires W et Z , l'interaction faible devient une interaction de courte portée. On peut dire que c'est au même instant dans l'histoire de notre Univers que la masse vint aux particules et que la lumière (qui n'a pas de masse) fut !

Si on en reste au modèle standard d'aujourd'hui, cette transition de phase (figure 1a et à gauche sur la figure 2) pourrait être du deuxième ordre ou continue. Mais s'il y a une physique au-delà du modèle standard, comme la Supersymétrie par exemple, cette transition pourrait être du premier ordre, donnant naissance à de la métastabilité (transition brutale) dans l'Univers et sans doute à l'émission spectaculaire d'ondes gravitationnelles (voir article p. 7). La compréhension de cette transition reste donc l'objet de controverses et d'études scientifiques. Elle pourrait être reliée à une meilleure compréhension de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers, et de la matière noire, voire de l'énergie noire (énergie du vide ou/et constante cosmologique). Ceci ne devrait cependant pas modifier beaucoup l'histoire de la naissance des photons et de l'apparition de la masse des particules. Une nouvelle physique au-delà du modèle standard, à des énergies supérieures au TeV, pourrait toutefois rendre cette transition plus complexe et plus riche.

Libération de la lumière

Après cette première transition, l'histoire de l'Univers observable (fig. 2) va manifester une deuxième transition de phase liée à la chromodynamique quantique. C'est le moment (une microseconde après la transition électrofaible) où le plasma de quarks et de gluons qui remplit l'Univers va pouvoir se transformer en protons et neutrons. Il ne reste alors dans l'Univers que bosons massifs, électrons, neutrinos et photons, ainsi que les « nouveaux » protons et neutrons. Les photons sont bien là, mais leur libre parcours moyen est très faible dans un plasma aussi dense. On dit que le milieu est opaque.

Ce n'est que 380 000 ans plus tard que les noyaux légers (p , D , He , Li , Be), se combinant avec les électrons pour former les premiers atomes, rendent l'Univers transparent aux photons.

Ce moment n'est pas la naissance de la lumière, c'est celui où les photons se libèrent d'un milieu opaque, un peu comme à la surface du Soleil. Ceux-ci peuvent ainsi voyager librement et nous parvenir depuis les confins de l'Univers observable. C'est ainsi que le satellite Planck a pu fournir une carte de température de ce rayonnement fossile de lumière de l'Univers lointain (fig. 3), tel qu'il était il y a 13,8 milliards d'années : une soupe d'atomes et de photons avec des grumeaux, à la fois germes des galaxies futures mais aussi traces des fluctuations quantiques du vide dans lesquelles ils trouvent sans doute leur origine. ■