Théorie des constantes universelles

Version numérique

Khalid Jerrari

Théorie des constantes universelles

Démonstration de la constance

des unités de Planck et des constantes universelles

Expression des unités de Planck, des constantes universelles et des variables thermodynamiques de l'Univers en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers

Éditions Deux Plumes

© Éditions Deux Plumes
2, allée Saint John Perse, 95120 Ermont
ISBN : 979-10-96350-08-7
Ermont, août 2022

Table des matières

Avant propos

Cet ouvrage s'adresse principalement à des scientifiques, et tout particulièrement à ceux qui possèdent des connaissances dans les disciplines de la physique fondamentale. Pour saisir pleinement ce livre, il est nécessaire d'être suffisamment à l'aise avec les concepts mathématiques, tels que les différentielles et les opérations algébriques de variables exprimées sous forme d'indice. Bien que mes recherches ne soient pas réalisées dans un cadre académique ou professionnel, elles s'appuient en partie sur ma formation dans le domaine des sciences physiques sanctionnée par un diplôme d'études approfondies, ce dernier est l'équivalent aujourd'hui d'un master de recherche. Par ailleurs, aucune relecture et correction de fond de mes travaux n'ont été réalisées par d'autres scientifiques que moi-même.

Dans ce manuscrit, je propose une démonstration de la constance des unités de Planck et celle des constantes universelles parmi lesquelles figurent, entre autres, la constante de Newton notée « G », celle d'Einstein « c », de Planck « h » et de Boltzmann « k_B ». Une partie de mes recherches s'inspire de mon livre *Les mystères de l'espace : la création et le fonctionnement de l'Univers expliqués sous un autre angle* publié en 2015. Vous pouvez le télécharger gratuitement sur mon site internet *www.theorie-spatiale.fr*.

Le modèle théorique que je développe dans ce livre vise principalement à partager mes idées et mes réflexions sur les constantes fondamentales. J'espère que certains chercheurs y trouveront une source d'inspiration, mais loin de moi la prétention d'affirmer qu'il correspond à la réalité. Tout d'abord, parce que celui-ci repose sur des hypothèses qu'il conviendrait de vérifier expérimentalement. Et d'autre part, de sorte à développer une théorie accessible, j'ai émis des suppositions simplistes, mais rien n'empêche quiconque dans un second temps de les modifier afin d'obtenir des résultats les plus proches de l'observation. Je tenais également à hiérarchiser mes hypothèses en trois niveaux de fiabilité. Le premier niveau concerne les lois empiriques. Purement spéculatives, leur fragilité rend leur remise en cause fortement probable. Le deuxième niveau repose sur un modèle simplifié de notre Univers. Bien que plus solide que le précédent, il fera probablement l'objet d'affinement au fur et à mesure des observations cosmologiques. En revanche, placés au troisième niveau des hypothèses, les principes fondamentaux plus généraux et robustes ne devraient pas *a priori* évoluer.

Il est à noter que cette théorie est en cours de construction et nécessitera inéluctablement des améliorations dans les prochaines années. Considérez cet essai comme un premier jet, une base de travail, sur lequel s'appuyer pour étudier les constantes universelles.

Passons désormais au vif du sujet.

Introduction

Dans les lois fondamentales de la physique figurent des paramètres numériques figés appelés « *constantes universelles* ». Ces grandeurs, déterminées expérimentalement et supposées ne pas varier ni dans le temps ni dans l'espace, restent l'un des plus grands mystères des sciences. Nos connaissances actuelles ne nous permettent ni de comprendre leur origine ni de les déterminer de manière théorique. Dans cet ouvrage, je m'intéresse principalement à ces éléments.

Ma démarche vise à construire un cadre théorique qui pourrait expliquer la source de ces constantes dans nos lois de la physique et à proposer une méthode qui permettrait non seulement de toutes les prévoir mais également les définir.

Pour ce faire, je commencerai par introduire les hypothèses sur lesquelles je me fonde pour modéliser ma théorie. Puis dans une première partie, j'exprimerai les constantes universelles, les unités de Planck et les grandeurs thermodynamiques de l'Univers en fonction des variables caractéristiques de celui-ci, telles que sa masse et son rayon. Enfin, dans une deuxième partie, je démontrerai la constance des unités de Planck ainsi que celle des constantes universelles et je proposerai un cadre théorique général pour les déterminer.

Pour des raisons de cohérence en matière de terminologie, les constantes universelles pour lesquelles j'ai démontré la constance seront désignées par le terme *« constante »* dès le début de cet ouvrage, tandis que celles pour lesquelles j'ai des doutes sur leur constance seront dénommées *« paramètre »*. C'est le cas à titre d'exemple du paramètre de structure fine qui ne franchit pas à ce jour le statut honorifique de constante à mes yeux.

Hypothèses

1. Hypothèses sur notre Univers

Tout d'abord, je suppose que notre Univers tridimensionnel spatial est de forme sphérique. Je noterai « R_U » son rayon et « M_U » sa masse « *ordinaire* ». Pour éviter toute forme de confusion, il est important de bien préciser que cette masse ne comprend pas celle de l'hypothétique *« matière noire »,* mais uniquement celle qui est visible.

De plus, nous savons que notre Univers est en expansion depuis un certain temps, noté « t_U ». Ce qui me mène à penser qu'il est plutôt dynamique que statique. En effet, il semblerait que toutes les grandeurs caractéristiques de l'Univers varient dans le temps, à l'instar de sa taille et de sa température. On pourrait tout à fait imaginer que sa masse évolue aussi. Il n'y a aucune raison, *a priori*, que celle-ci soit constante. Certains d'entre vous évoqueraient spontanément la violation de la loi de conservation d'énergie pour rejeter cette hypothèse. Vous auriez tout à fait raison de soulever cette remarque pertinente, mais rien ne nous permet d'affirmer ou d'infirmer que l'Univers est un système isolé. Ce dernier pourrait très bien communiquer avec d'autres structures, des multivers par exemple, bien que cette supposition ne soit pas l'argument que je retiendrai pour justifier mon choix. Bien au contraire, pour déterminer les variables thermodynamiques appliquées à notre Univers, je le considérerai comme un système isolé. Toutefois, je veillerai à respecter scrupuleusement la loi de conservation d'énergie sur laquelle je m'appuierai pour exprimer l'entropie de l'Univers et la quantité de chaleur échangée au sein du système pour générer le travail nécessaire à son expansion.

Quoi qu'il en soit, nous admettrons pour modéliser notre Univers que sa masse n'est pas constante. Alors de quelle manière évolue-t-elle ? J'émettrai des hypothèses de travail simples de sorte à élaborer une première théorie moins complexe d'approche. Au risque de me répéter, rien n'empêchera dans un deuxième temps quiconque de les modifier afin d'obtenir des résultats théoriques davantage proches de l'observation.

L'hypothèse la plus simple est d'admettre que cette masse augmente de manière linéaire au cours du temps, avec un coefficient de proportionnalité « *constant* » que je noterai « d_m ». Remarquez que ce postulat intègre intrinsèquement le phénomène de constance. Ainsi la masse de l'Univers, « M_U », s'exprime par la relation $M_U = d_m t_U$. Pour rappel, la variable « t_U » est la durée d'expansion de l'Univers. Je n'utilise pas la désignation « *d'âge de l'Univers* » qui, à mon sens, est un abus de langage dans la mesure où rien ne nous permet d'affirmer aujourd'hui que l'Univers n'existait pas avant le « *Big Bang* ». D'autres théories suggèrent notamment qu'il aurait toujours existé. Vous constaterez que le coefficient « d_m » correspond à un débit massique, c'est-à-dire à une quantité de masse rapportée à une unité de temps. J'appellerai cette grandeur, le débit massique de l'Univers. Admettons désormais que la durée d'expansion « t_U » est égale à l'inverse de la « *constante* » d'Hubble « H_0», à savoir $t_U = \frac{1}{H_0}$. Bien que cette dernière soit invariante dans l'espace, elle évolue dans le temps. À ce titre la définir par « *constante* » pourrait prêter à confusion pour les lecteurs, pour cette raison je la nommerai par la suite « *coefficient* » d'Hubble. Ainsi, le débit massique de l'Univers est $d_m = M_U H_0$.

Pourrions-nous formuler ce débit d'une autre manière, par exemple à l'aide des unités de Planck ? Celles-ci constituent un système de mesure dans lequel sont exprimés une masse, une distance, un temps, une température et une charge électrique de manière à ce que les constantes universelles prennent la valeur de « *un* » pour toutes les lois de la physique exprimées dans ce système. Nous pouvons remarquer que le débit massique de Planck, calculé par le rapport entre la masse « m_P » et le temps de Planck « t_P », nous donne le même ordre de grandeur que le débit massique de l'Univers. Tout me mène à penser que le débit massique de Planck correspond précisément à celui de l'Univers. Je reteindrai cette relation empirique pour modéliser mon Univers simplifié. Cette hypothèse est purement spéculative et pourrait être remise en question.

Nous avons non seulement supposé que le débit massique de l'Univers était constant, mais également qu'il se déduisait à partir des unités de Planck. Ces deux postulats auront des conséquences à la fois sur la constance des unités de Planck et sur les variables de l'Univers telles que sa masse et son rayon. Nous devons constamment avoir à l'esprit que le résultat d'une démonstration est structurellement compris dans les hypothèses que nous formulons. Toutefois certaines d'entre elles ne sont que transitoires dans l'attente de développer une théorie plus large avec des suppositions moins directes et plus générales.

Exprimons à présent ce débit massique en fonction de la constante d'Einstein « c », de celle de Newton « G » et de Planck « h ». Le rapport entre la masse de Planck $m_{pl} = \sqrt{\frac{hc}{2\pi G}}$ et le temps de Planck $t_{pl} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^5}}$ nous donne le débit massique $d_m = \frac{c^3}{G}$. Puisque nous avons supposé dans notre modèle que « d_m» est constant, *de facto* le rapport $\frac{c^3}{G}$ l'est également.

Par ailleurs, selon la loi d'Hubble, la vitesse « v_U » d'expansion à l'extrémité de notre Univers par rapport à son centre est donnée par la relation $v_U = H_0 R_U$. Les grandeurs « R_U » et « H_0 » sont respectivement le rayon de l'Univers et le coefficient d'Hubble. La variable H_0 est égale à $\frac{1}{t_U}$, donc la vitesse $v_U = \frac{R_U}{t_U}$. Pour rappel, les hypothèses de notre Univers sont reprises de la *théorie spatiale* que j'ai exposée dans mon livre *Les mystères de l'espace : la création et le fonctionnement de l'Univers expliqués sous un autre angle*. Dans celui-ci, je démontre entre autres que la vitesse d'expansion de l'Univers est $v_U = \frac{dR_U}{dt_U}$ et que $c = \frac{R_U}{t_U}$, ce qui nous permet d'obtenir la relation $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U} = c$.

Vous noterez que la relation $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U}$ implique que le rapport $\frac{R_U}{t_U}$ soit constant. Puisque $c = \frac{R_U}{t_U}$, alors la constante d'Einstein « c » est bien constante. Afin d'établir cette conclusion, je me suis appuyé uniquement sur les résultats tirés de la *théorie spatiale*. La théorie des constantes universelles exposées dans cet ouvrage n'est en fait que le développement du chapitre 4 « Relation entre grandeurs et constantes universelles, de la partie II - Aspect scientifique de la théorie spatiale » du livre *Les mystères de l'espace.*

Nous venons de démontrer que la constante d'Einstein « c » est constante et savons que la grandeur $\frac{c^3}{G}$ l'est aussi, ce qui entraîne que la constante de Newton « G » est également une constante universelle.

Je vais à présent établir une relation de la masse de l'Univers similaire à celle obtenue précédemment pour son rayon ($\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U} = c$). Pour ce faire, appliquons la différentielle de l'expression de la masse $M_U = d_m t_U$, nous obtenons $dM_U = d_m . dt_U$ car le débit massique de Planck « d_m » ne varie pas. Ces deux relations permettent de déterminer l'égalité $d_m = \frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U}$. Or l'expression du débit massique est $d_m = \frac{c^3}{G}$, nous en déduisons que $\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U} = \frac{c^3}{G}$.

Après avoir exprimé la variation de la masse et du rayon de l'Univers en fonction du temps, nous allons déterminer celle de la masse par rapport au rayon. Divisons alors terme à terme la relation $\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U} = \frac{c^3}{G}$ par celle de $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U} = c$, nous obtenons la relation $\frac{dM_U}{dR_U} = \frac{M_U}{R_U} = \frac{c^2}{G}$.

Nous pouvons également formuler des rapports entre les unités de Planck en fonction des constantes « G » et « c ». Soient la masse $m_{pl} = \sqrt{\frac{hc}{2\pi G}}$, la longueur $l_{pl} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}}$ et le temps de Planck $t_{pl} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^5}}$. La masse divisée par la longueur de Planck nous donne $\frac{m_{pl}}{l_{pl}} = \frac{c^2}{G}$, de la même façon $\frac{l_{pl}}{t_{pl}} = c$.

Je récapitule ci-dessous les résultats principaux établis dans ce chapitre :

$$\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U} = \frac{m_{pl}}{t_{pl}} = \frac{c^3}{G}$$

$$\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U} = \frac{l_{pl}}{t_{pl}} = c$$

$$\frac{dM_U}{dR_U} = \frac{M_U}{R_U} = \frac{m_{pl}}{l_{pl}} = \frac{c^2}{G}$$

Après avoir présenté les hypothèses structurelles de notre Univers, énonçons les principes fondamentaux sur lesquels nous allons nous baser pour développer notre théorie des constantes universelles.

2. Principe des constantes universelles

Afin d'introduire le principe des constantes universelles, il me paraît pertinent de rappeler, un principe plus large sur les constantes qui est le suivant : « *Toutes les valeurs numériques qui apparaissent dans une équation de la physique peuvent s'exprimer à l'aide de grandeurs physiques unitaires, notamment de distance, de masse et de temps* ». C'est le cas en particulier des constantes universelles.

Il est à préciser que certaines valeurs numériques qui figurent dans une loi de la nature, telles que par exemples « 2π », « 4π » ou « $\frac{4}{3}\pi$ » pourraient provenir d'une expression qui dépend d'une forme géométrique (un cercle, une sphère ou une boule).

a) Énoncé du principe des constantes universelles

Le principe des constantes universelles, qui est un corolaire du principe plus général exposé ci-dessus, s'énonce comme suit : « *Toutes les constantes universelles d'une loi de la physique peuvent s'exprimer par des grandeurs physiques unitaires, à savoir la quantité d'éléments, le temps, la distance, la masse, la charge électrique et la température. Ces grandeurs caractérisent et structurent l'Univers aussi bien au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique.* » Nous pouvons citer à titre d'exemples la masse, le rayon ou bien la température de l'Univers ainsi que la masse, le rayon ou la charge de l'électron. Je qualifierai par la suite ces grandeurs par le terme de « *caractéristique* » (exemples : masse caractéristique, température caractéristique, longueur d'onde caractéristique). Il est à noter que si l'observation montrait l'existence de multivers radicalement différents du notre pour lesquels les constantes universelles seraient identiques, alors celles-ci dépendraient de variables qui caractérisent l'ensemble des multivers, et pas uniquement de celles de notre Univers.

Je vais désormais formuler mathématiquement la relation qui exprime une constante universelle en fonction des grandeurs caractéristiques. Ce formalisme n'est pas nécessaire pour comprendre la suite du livre, il a uniquement pour objet d'écrire le phénomène physique de manière rigoureuse.

Soient « K_U » une constante universelle et « U_i » une grandeur unitaire caractéristique d'indice « i », alors le principe des constantes universelles peut s'écrire de la façon suivante :

$K_U = \prod_{i=1}^{k} U_i^{n_i}$ telle que $\{i, k\} \in N\ et\ k \geq 2$, $n_i\ \in Z\ et\ U_i \in \{t, d, m, T, q, \alpha\}$

L'opérateur produit symbolisé par l'expression $\prod_{i=1}^{k} U_i^{n_i}$ est égal à $U_1^{n_1}.U_2^{n_2} \dots U_{k-1}^{n_{k-1}}.U_k^{n_k}$.

La variable $U_i \in \{t, d, m, T, q, \alpha\}$ signifie que la grandeur caractéristique a pour unité de mesure exclusivement un temps « t » (exemple la durée d'expansion de l'Univers), une distance « d » (le rayon de l'Univers), une masse « m » (la masse de l'Univers), une température « T » (température de l'Univers), une charge électrique « q », ou bien est une quantité d'éléments « α » (le nombre de particules fondamentales dans l'Univers).

Vous noterez que les exposants des grandeurs caractéristiques « n_i » sont des nombres entiers relatifs. Cette hypothèse qui paraît au premier abord infondée repose sur un principe personnel qu'une « *loi est d'autant vraie qu'elle est simple* ». Prenons de la hauteur vis-à-vis de celle-ci, vous conviendrez que si un paramètre est constant alors celui-ci élevé à une puissance quelconque reste constant. Imaginons que vous obteniez une relation d'une constante universelle dont les exposants des grandeurs caractéristiques sont des nombres rationnels. Rien ne vous empêche d'élever cette relation à une puissance qui permet de réduire l'exposant de chaque grandeur caractéristique à un entier relatif. Finalement, cette hypothèse ne serait pas si abusive, mais bien commode pour simplifier l'expression de nos constantes.

Pour illustrer notre principe des constantes universelles, nous allons citer quelques exemples concrets ci-dessous.

b) Exemples

Prenons la constante de Newton « G ». Elle possède comme unité de mesure une distance au cube rapportée au produit à la fois de la masse et du temps au carré. Écrit autrement, son unité est $\left[\frac{d^3}{m.t^2}\right]$ avec « d » une distance, « m » une masse et « t » un temps. L'expression de l'unité de mesure de « G » peut également s'écrire sous forme de produit : $[\mathrm{d}^3.\mathrm{m}^{-1}.\mathrm{t}^{-2}]$. De la même façon, la constante d'Einstein « c » est une distance rapportée au temps qui peut s'exprimer par $[\mathrm{d}.\mathrm{t}^{-1}]$. Pour la constante de Planck « h », son unité est $[\mathrm{m}.\mathrm{d}^2.\mathrm{t}^{-1}]$.

Revenons à la constante gravitationnelle « G » pour illustrer l'énoncé du principe des constantes universelles. Parmi tant de possibilités, celle-ci pourrait s'exprimer en fonction de trois distances différentes, d'une masse et d'un temps au carré. Cette masse pourrait être celle de l'Univers ou de l'électron, ce temps la durée d'expansion et cette distance le rayon de l'Univers ou bien celui de l'électron. Par exemple, « G » pourrait être égale au produit à la fois du rayon de l'électron, du proton et de l'Univers rapporté au produit de la durée d'expansion de l'Univers au carré et de la masse de l'électron. Quoi qu'il en soit notre principe nous certifie que la constante « G » s'exprime en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, mais celui-ci ne nous fournit pas son expression. N'importe quelles combinaisons des grandeurs caractéristiques pourraient convenir dès lors que la dimension de la constante de Newton est respectée.

Nous démontrerons par la suite que « G » dépend uniquement de la masse, du rayon et de la durée d'expansion de l'Univers.

Partie I : Expression des constantes universelles, des unités de Planck et des grandeurs thermodynamiques en fonction des variables caractéristiques de l'Univers

1. Expression des constantes universelles

Comme je l'ai expliqué ci-dessus, le principe des constantes universelles garantit seulement l'existence d'une expression qui dépend des grandeurs caractéristiques de l'Univers, mais il ne permet pas d'exprimer cette relation. L'objet de cette partie est justement de trouver leurs expressions. Je rappelle que « R_U » est le rayon de l'Univers, « M_U » sa masse et « t_U » sa durée d'expansion.

Dans un premier temps, j'exprimerai de manière succincte la constante d'Einstein et celle de Newton en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, puis je déterminerai les constantes de Planck et de Boltzmann qui nécessitent quant à eux une démonstration plus longue et complexe.

a) Constantes de Newton « G » et d'Einstein « c »

Nous avons déjà exprimé la constante d'Einstein en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, à savoir $c = \frac{R_U}{t_U}$. Nous avons également établi une relation qui la lie à la constante de Newton, à savoir $\frac{c^2}{G} = \frac{M_U}{R_U}$. Combinée à l'équation précédente, nous obtenons l'expression $G = \frac{{R_U}^3}{M_U {t_U}^2}$.

Ainsi, les constantes d'Einstein et de Newton ne dépendent que de la masse, du rayon et de la durée d'expansion de l'Univers. Pour définir les constantes de Planck et de Boltzmann, nous allons dans un premier établir une expression qui les lie avec les grandeurs caractéristique de l'Univers.

b) Relation entre la constante de Planck « h » et de Boltzmann « k_B »

Le principe des constantes universelles nous garantit que les constantes de Planck et de Boltzmann ne dépendent que des grandeurs universelles. Mais comment trouver leurs expressions ? Ce principe nous donne néanmoins une piste à ce sujet. En effet, la constante de Boltzmann fait intervenir une température caractéristique qui est *a fortiori* celle de l'Univers. Quant à la constante de Planck, elle dépend d'une fréquence ou d'une longueur d'onde caractéristique qui est probablement en lien avec le fond diffus cosmologique. Pour définir ces deux constantes, je vais par conséquent m'appuyer sur les lois que nous connaissons déjà. Et il y a en une particulièrement intéressante, celle de Planck. Elle fournit une expression qui relie la luminance d'un corps noir à son spectre de fréquences. Celle-ci permet en particulier de déterminer la longueur d'onde pour laquelle la luminance est maximale. À partir de cette relation, nous en déduisons la loi de Wien qui exprime les paramètres « k_B » et « h » en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers telles que la température et la longueur d'onde qui maximise la luminance, à savoir $\lambda_{CMB} = \frac{hc}{\alpha_{CN} k_B T_U}$. La variable « T_U » correspond à la température de l'Univers, « α_{CN} » à la valeur numérique fixe qui est la solution de l'équation $e^{-x} + 0{,}2x - 1 = 0$ et dont la valeur est approximativement « 4,96 ». Durant mes travaux de recherche, ce coefficient m'était inconfortable pour définir les constantes. Je l'ai dans un premier temps intégré dans la constante de Boltzmann puis finalement je l'ai basculé dans la longueur d'onde du fond diffus « λ_{CMB} ». Par la suite, nous poserons comme longueur d'onde caractéristique de l'Univers $\lambda_U = \alpha_{CN}\lambda_{CMB}$. Nous pouvons alors réécrire la loi de Wien sous la forme $E_U = k_B T_U = \frac{hc}{\lambda_U}$ avec « E_U » l'énergie d'un photon de longueur d'onde « λ_U ». Afin d'exprimer les constantes de Planck et de Boltzmann en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, nous avons besoin d'une autre relation. Pour ce faire, je vais introduire une nouvelle équation de l'énergie de manière arbitraire sans en considérer le sens physique pour le moment. En effet, nous pouvons définir une grandeur de même dimension qu'une masse que je noterai « m_{ve} » telle que $E_U = m_{ve}c^2 = k_B T_U = \frac{hc}{\lambda_U}$. À ce stade de notre réflexion, peu importe que cette masse *ad hoc* ait un sens physique ou bien qu'elle soit juste un artifice calculatoire pour simplifier notre problème, quoi qu'il en soit elle existe. Dans le cas où « m_{ve} » ait un sens physique, elle semblerait être une particule élémentaire abondante qui caractérise l'Univers au niveau microscopique. Cet artéfact nous permettra d'exprimer les constantes de Boltzmann et de Planck en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers.

c) Constante de Planck « h »

Compte tenu de la dimension de la constante de Planck, celle-ci devrait également s'exprimer par une masse caractéristique. Il y a fort à parier que cette dernière soit celle d'une particule fondamentale puisque « h » est une grandeur clé de la mécanique quantique. Au début de ma réflexion, je m'étais orienté vers celle de l'électron qui ne semblait pas convenir à la hauteur de mes espérances. Je me suis alors dirigé vers un autre constituant fondamental qui soit abondant dans l'Univers et de la même famille que l'électron, le neutrino-électronique. Il pourrait être un candidat sérieux mais cette intuition reste hypothétique et spéculative. Lorsque nous serons en mesure de déterminer précisément la masse et la vitesse de cette particule, nous pourrons infirmer ou confirmer cette hypothèse.

En tout état de cause, la relation qui définit la constante de Planck est donnée par l'équation que nous avons établie précédemment, $m_{ve}c^2 = \frac{hc}{\lambda_U}$. Ainsi, nous pouvons la formuler en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, à savoir $h = m_{ve}.\lambda_U.\frac{R_U}{t_U}$. La longueur d'onde $\lambda_U = \alpha_{CN}\lambda_{CMB}$ est définie telle que « λ_{CMB} » corresponde à celle de la luminance spectrale maximale du fond cosmologique diffus à l'instant « t_U ». Quant à la masse caractéristique « m_{ve} », elle pourrait être celle d'une particule fondamentale connue à confirmer ou le cas contraire à découvrir. À ce stade du livre, cette masse est un outil artificiel utile pour faire des calculs intermédiaires sans pour autant lui attribuer un sens physique. Par ailleurs son expression dépend de la température de l'Univers suivant la relation $m_{ve} = \frac{k_B}{c^2}T_U$. Si la constante de Boltzmann est constante, alors la masse « m_{ve} » évolue avec la température. Comme la température de l'Univers décroît, la masse de cette particule hypothétique diminue également dans le temps, ce qui mène à penser que celle-ci pourrait être une masse relativiste définie par l'agitation thermique de l'Univers.

Il est à noter que les grandeurs caractéristiques qui définissent la constante de Planck que j'ai choisies sont des variables qui me semblent les plus appropriées, mais il pourrait très bien en exister d'autres qui conviennent mieux.

Comme précisé précédemment, je m'étais orienté au début de mes recherches vers une expression de « h » qui dépend des caractéristiques de l'électron. Voyons pour quelle raison, j'ai du renoncer à cette idée. Notons « α » le paramètre de structure fine, « m_e » et « R_e », respectivement la masse et le rayon de l'électron. Je rappelle que « m_{pl} » et « l_{pl} » sont respectivement la masse et le temps de Planck. Les deux relations $h = 2\pi m_{pl}l_{pl}c$ et $\alpha = \frac{m_eR_e}{m_{pl}l_{pl}}$ nous permettent d'exprimer la constante de Planck en fonction des caractéristiques de l'électron. Ainsi, j'obtiens $h = \frac{2\pi}{\alpha}m_eR_e\frac{R_U}{t_U}$. Or selon le principe des constantes universelles, cette expression n'est pas fondamentale puisque dans celle-ci figure le paramètre de structure fine. Néanmoins, ces différentes relations permettent de formuler la masse « m_{ve} » en fonction de la masse de Planck ou de l'électron, à savoir $m_{ve}.\lambda_U = 2\pi m_{pl}l_{pl} = \frac{2\pi}{\alpha}m_eR_e$.

La constante de Planck peut s'écrire en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers sous différentes formes. Cependant, l'expression fondamentale de celle-ci est celle pour laquelle aucun paramètre numérique n'apparaît. Les autres formes sont des relations dérivées qui ne reflètent pas l'origine de la constante de Planck, mais qui en sont finalement que des conséquences. Par ailleurs, celle-ci est intiment liée à la constante de Boltzmann que nous définirons ci-dessous.

d) Constante de Boltzmann « k_B »

Le modèle des corps noirs nous fournit une relation qui lie « k_B » à « h », à savoir $k_B T_U = \frac{hc}{\lambda_U} = \frac{hR_U}{\lambda_U t_U}$. Je rappelle que « T_U » et « λ_U » sont respectivement la température et la longueur d'onde caractéristique de l'Univers. Il suffit alors de connaître l'expression d'une constante pour pouvoir déterminer l'autre. Il se trouve que nous avons exprimé précédemment la constante de Planck en fonction des grandeurs universelles, $h = m_{ve}.\lambda_{CMB}.\frac{R_U}{t_U}$. Ces deux expression nous permettent de définir la constante de Boltzmann telle que $k_B = \frac{m_{ve}\left(\frac{R_U}{t_U}\right)^2}{T_U}$.

J'ouvre une parenthèse, concernant la relation $k_B T_U = m_{ve} c^2$, qui fera sens lorsque nous établirons une théorie plus générale des constantes universelles. Vous noterez que celle-ci implique une équivalence entre la masse et la température caractéristique de l'Univers. C'est-à-dire que la masse peut se transformer en température et vice-versa. Nous verrons à la fin de cet ouvrage que toutes les grandeurs unitaires (masse, longueur, temps, température, fréquence et charge électrique) sont équivalentes les unes aux autres. Il est légitime de nous interroger sur le sens physique de cette relation. Lorsque la température de l'Univers baisse, la masse de la particule élémentaire caractéristique « m_{ve} » décroît également. Je vais vous livrer quelques pistes de réflexion non exhaustives que je développerai dans mon prochain livre. Admettons que ce phénomène touche l'ensemble des particules matérielles, alors chaque corps présent dans l'Univers verrait sa masse diminuer. Si tel était le cas, pourquoi ne pas l'avoir observé ? Ce n'est pas si évident car cette manifestation serait indétectable si par exemple la masse de tous les corps baissait de manière proportionnelle.

Ceci dit, nous pouvons également nous orienter vers une autre interprétation qui consisterait à considérer « m_{ve} » comme la masse relativiste d'une particule élémentaire.

e) Hypothèse relativiste de la masse caractéristique

Dans le cas où la variable « m_{ve} » ne se réduit pas un artefact calculatoire, mais correspond à la masse d'une particule élémentaire qui emplit l'Univers, alors son agitation thermique détermine son énergie cinétique, et donc sa vitesse. Son énergie thermique est donnée par la relation $E_T = d_l k_B T_U$ et cinétique par l'expression $E_c = \frac{\alpha^2}{1+\alpha} m_0 {v_{ve}}^2 = (\alpha - 1) m_0 c^2$. Le paramètre « d_l » correspond au degré de liberté, « m_0 » et « v_{ve} » sont respectivement la masse caractéristique au repos et la vitesse de la particule. Quant au coefficient $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v_{ve}}{c}\right)^2}}$, c'est le facteur de Lorentz avec « c » la constante d'Einstein.

L'énergie cinétique d'une particule étant égale à son énergie thermique, nous obtenons $k_B T_U = \frac{1}{d_l}(\alpha - 1) m_0 \mathrm{c}^2$. Dans le terme de droite, contrairement à la masse « m_0 », seul « $\alpha - 1$ » évolue dans le temps. Nous retrouvons notre relation de départ $E_U = k_B T_U = m_{v_e} c^2$ en posant $m_{ve} = \frac{1}{d_l}(\alpha - 1) m_0$. Cette expression montre que c'est n'est pas la baisse de la masse au repos de la particule qui justifie celle de « m_{v_e} », mais celle de sa vitesse.

Les différentes approches de la masse « m_{v_e} » ne changent pas la nature du problème à résoudre, mais uniquement l'interprétation physique que nous lui attribuons. Si nous ne connaissons ni la masse au repos de cette éventuelle particule ni sa vitesse, alors il est commode de conserver la variable « m_{ve} » dans nos équations.

Nous pouvons reproduire la même démarche que celle utilisée ci-dessus avec l'énergie cinétique pour la quantité de mouvement « p ». Nous obtenons ainsi $p = m_0 \alpha v_{ve}$. Exprimée avec la variable « m'_{ve} », la quantité de mouvement devient alors $p = m'_{v_e} c$ avec $m'_{v_e} = m_0 \alpha \frac{v_{ve}}{c}$.

Les masses élémentaires caractéristiques obtenues par l'énergie cinétique « m_{v_e} » et par la quantité de mouvement « m'_{v_e} » sont différentes. Néanmoins, le degré de liberté d'une particule en mouvement rectiligne est égal à la valeur « *un* », et pour une vitesse proche de celle de la lumière, l'expression « $\alpha - 1$ » tend vers la variable « α ». Dans ce cas, nous avons une convergence entre la masse dynamique « m_{ve} » de l'énergie cinétique et celle de la quantité de mouvement « m'_{ve} » qui n'est rien d'autre que la masse relativiste de la particule fondamentale caractéristique. Ainsi, nous allons considérer par la suite que l'énergie cinétique de la particule caractéristique de l'Univers est donnée par la relation $E_U = k_B T_U = m_{v_e} c^2$ et que sa quantité de mouvement est $p = m_{v_e} c$ avec, pour ces deux relations, la même masse relativiste $m_{v_e} = m_0 \alpha$.

Même s'il me semble raisonnable pour la suite de cet ouvrage d'admettre que la vitesse de la particule fondamentale est proche de celle de la lumière et que son degré de liberté est égal à « un », il nous faudra confronter ces hypothèses avec les observations.

Nous allons à présent exprimer le paramètre de structure fine et la constante de Coulomb.

2. Expression des autres constantes universelles

a) Paramètre de structure fine « α »

Le paramètre de structure fine est donné par la relation $\alpha = \frac{m_e}{m_{pl}} \frac{R_e}{l_{pl}}$. Contrairement à « c », « G », « h » et « k_B », nous remarquons qu'il est différent de la valeur « un » lorsque celui-ci est exprimé avec les unités de Planck. Cette différence ne me semble pas être anecdotique, elle est probablement révélatrice d'une fracture entre les constantes universelles et le paramètre de structure fine.

À titre de rappel, « m_e » et « R_e » sont respectivement la masse et le rayon de l'électron, « m_{pl} » et « l_{pl} » la masse et la longueur de Planck. En élevant au carré l'expression de ce paramètre, nous obtenons $\alpha^2 = \frac{{m_e}^2}{{m_{pl}}^2} \frac{{R_e}^2}{{l_{pl}}^2}$. De plus, nous verrons dans la partie « expression des unités de Planck » que ${l_{pl}}^2 = \frac{m_{ve}.\lambda_U.R_U}{2\pi M_U}$ et ${m_{pl}}^2 = \frac{m_{ve}.\lambda_U.M_U}{2\pi R_U}$. Ces trois relations nous donnent le paramètre de structure fine en fonction des caractéristiques de notre Univers, $\alpha = 2\pi \frac{m_e}{m_{ve}} \frac{R_e}{\lambda_U}$. Nous pouvons constater qu'un coefficient numérique apparaît dans cette équation. Or le principe des constantes universelles stipule qu'aucune valeur ne doit apparaitre dans l'expression d'une constante universelle. Toutefois, nous pourrions remédier à cette anomalie en considérant le périmètre d'un cercle de rayon R_e, à savoir $P_e = 2\pi R_e$. Ainsi la relation deviendrait $\alpha = \frac{m_e}{m_{ve}} \frac{P_e}{\lambda_U}$. Quoi qu'il en soit, il semblerait que le paramètre de structure fine ne soit pas constant, ce qui pourrait impliquer au passage que le produit « $m_e R_e$ » ne le soit pas non plus.

Qu'en est-il alors de la constante de Coulomb qui dépend aussi des grandeurs caractéristiques de l'électron ?

b) Constante de Coulomb « k_c »

Soit « k_c » la constante de Coulomb et « e » la charge de l'électron. Les deux relations $k_c = \frac{R_e m_e}{e^2} c^2$ et $c = \frac{R_U}{t_U}$ permettent d'exprimer la constante de Coulomb en fonction des grandeurs caractéristiques, c'est-à-dire $k_c = \frac{R_e m_e}{e^2} \frac{{R_U}^2}{{t_U}^2}$.

Pour que cette expression soit constante, il faudrait que le terme $\frac{R_e m_e}{e^2}$ le soit aussi. Nous répondrons à cette interrogation dans la deuxième partie du livre. Pour le moment, intéressons nous aux unités de Planck.

3. Expression des unités de Planck

À première vue, il n'est pas aisé d'attribuer un sens physique aux unités de Planck. Toutefois, ces paramètres créés artificiellement semblent être des synthétiseurs des caractéristiques de notre Univers. Pour le vérifier et mieux les cerner, nous allons les exprimer en fonction de leurs grandeurs caractéristiques.

a) Longueur de Planck « l_{pl} »

Commençons par définir la longueur de Planck « l_{pl} ».

Le carré de la longueur de Planck $l_{pl} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}}$ nous permet d'établir la relation ${l_{pl}}^2 = \frac{h}{2\pi}\frac{G}{c^3}$. Nous savons également que $\frac{c^3}{G} = \frac{M_U}{t_U}$ et $h = m_{\nu_e}\lambda_U\frac{R_U}{t_U}$. Ces trois relations nous donnent l'expression $l_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{ve}}{M_U}\lambda_U R_U}$.

b) Temps de Planck « t_{pl} »

Intéressons-nous désormais au temps de Planck « t_{pl} ». Les relations $\frac{l_{pl}}{t_{pl}} = \frac{R_U}{t_U}$ et $l_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{ve}}{M_U}\lambda_U R_U}$ permettent d'exprimer le temps de Planck en fonction des caractéristiques de l'Univers. Ainsi, $t_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{m_{ve}}{M_U}\right)\left(\frac{\lambda_U}{R_U}\right)}\, t_U$.

c) Masse de Planck « m_{pl} »

Passons à la masse de Planck « m_{pl} ».

En injectant l'expression de la longueur de Planck $l_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{ve}}{M_U}\lambda_U R_U}$ dans la relation $m_{pl} = \frac{M_U}{R_U}l_{pl}$, nous obtenons la masse de Planck en fonction des grandeurs caractéristiques de l'Univers, à savoir $m_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{\lambda_U}{R_U}m_{ve}M_U}$

d) Température de Planck « T_{pl} »

Exprimons à présent la température de Planck (T_{pl}). Commençons par exprimer le produit $l_{pl}T_{pl}$ en fonction des constantes « h », « G » et « c ». Nous savons que $l_{pl} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}}$ et

$T_{pl} = \sqrt{\frac{hc^5}{2\pi G{k_B}^2}}$, donc $l_{pl}T_{pl} = \frac{hc}{2\pi k_B}$. De plus, les deux relations $k_B = \frac{m_{v_e}c^2}{T_U}$ et $h = m_{v_e}\lambda_U c$ nous permettent d'établir l'expression $\frac{hc}{k_B} = \lambda_U T_U$. Les deux équations établies ci-dessus nous donnent la relation $T_{pl} = \frac{1}{2\pi}\frac{\lambda_U T_U}{l_{pl}}$. Comme $l_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{v_e}}{M_U}\lambda_U R_U}$, j'en déduis que $T_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\frac{M_U}{m_{v_e}}\right)\left(\frac{\lambda_U}{R_U}\right)}\,T_U$.

e) Charge de Planck « Q_{pl} »

Nous finissons par la charge de Planck « Q_{pl} ».

Je rappelle que « e » est la charge électrique d'un électron, « α » le paramètre de structure fine et « ε_0 » la permittivité diélectrique du vide. Les deux relations $Q_{pl} = \sqrt{2ch\varepsilon_0}$, et $\varepsilon_0 = \frac{e^2}{2\alpha ch}$ permettent d'établir la relation ${Q_{pl}}^2 = \frac{e^2}{\alpha}$.

Remplaçons le paramètre de structure fine de cette relation par les grandeurs de l'Univers à l'aide de l'expression $\alpha = 2\pi\frac{m_e}{m_{v_e}}\frac{R_e}{\lambda_U}$, nous obtenons alors $Q_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{ve}\lambda_U}{m_e R_e}}\,e$.

Certaines constantes universelles ainsi que les unités de Planck sont exprimées à l'aide de la masse caractéristique de l'Univers « m_{ve} », mais cette variable floue reste à définir. C'est ce que nous allons tacher de faire ci-après.

4. Expression de la masse caractéristique élémentaire, de la longueur d'onde et de la température de l'Univers

La relation $l_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{ve}}{M_U}\lambda_U R_U}$ établie dans le chapitre précédent nous permet d'exprimer le rapport entre le rayon de l'Univers et la longueur de Planck, à savoir $\frac{R_U}{l_{pl}} = \sqrt{2\pi\frac{M_U}{m_{ve}}\frac{R_U}{\lambda_U}}$. Pour le moment, vous ne voyez pas l'intérêt de cette expression mais prenons le temps de l'analyser. Si les unités de Planck sont constantes, et en particulier la longueur de Planck, alors le rapport $\frac{R_U}{l_{pl}}$ évolue dans le temps puisque le rayon de l'Univers tel que nous l'avons défini augmente dans le temps. Ceci implique que le produit $\frac{M_U}{m_{ve}}\frac{R_U}{\lambda_U}$ augmente également. Par conséquent les rapports $\frac{M_U}{m_{ve}}$ et $\frac{R_U}{\lambda_U}$ ne pourraient pas être simultanément constants. Or la masse « M_U » augmente et « m_{ve} » décroît avec la température de l'Univers, ce qui entraine que le rapport $\frac{M_U}{m_{ve}}$ est une fonction croissante du temps. Par conséquent, seul le rapport $\frac{R_U}{\lambda_U}$ pourrait être constant. Si c'est le cas, la relation $t_U T_U \frac{k_B}{h}$, égale à $\frac{R_U}{\lambda_U}$, le serait également. Or l'observation montre que le produit $t_U T_U$ n'est pas constant, ce qui entraine que le rapport $\frac{k_B}{h}$ évoluerait dans le temps. *A priori*, nous nous attendons à ce que le rapport $\frac{R_U}{\lambda_U}$ ne soit pas non plus constant si les grandeurs « h » et « k_B » sont bien constantes. En effet, la température de l'Univers est inversement proportionnelle à la racine carrée du temps, donc l'expression $t_U T_U \frac{k_B}{h}$ est proportionnelle à la racine carré de la durée d'expansion « t_U ». Ainsi la relation $\frac{R_U}{\lambda_U}$ est également proportionnelle à la racine carré de « t_U », et donc à la racine carrée du rayon de l'Univers « R_U ». Comme la longueur de Planck « l_{pl} » est supposée constante, le rapport $\frac{R_U}{\lambda_U}$ est proportionnel à $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}$. De plus, le carré de notre expression mentionnée au début de ce chapitre, $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^2 = 2\pi\left(\frac{M_U}{m_{ve}}\right)\left(\frac{R_U}{\lambda_U}\right)$, impliquerait que le rapport $\frac{M_U}{m_{ve}}$ soit proportionnel à $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$.

Nos différentes réflexions exposées ci-dessus nous mènent à penser que $\frac{R_U}{\lambda_U}$ et $\frac{M_U}{m_{ve}}$ sont des fonctions du rapport $\frac{R_U}{l_{pl}}$. Il est à noter qu'il est toujours possible mathématiquement de trouver ce type de relation sans pour autant revêtir une réalité physique. C'est pour cette raison qu'une démarche telle que faite précédemment confrontée à l'observation est indispensable pour éviter de prendre une mauvaise direction.

a) Masse et longueur d'onde caractéristique en fonction du rayon l'Univers

Dans les débuts de me recherches, j'avais intégré le coefficient de la loi de Wien « α_{CN} » dans la constante de Boltzmann que j'avais définie telle que $k_{BN} = \alpha_{CN} k_B$. Pour des raisons de cohérence avec la pression dans l'Univers, j'ai du injecter « α_{CN} » dans la longueur d'onde caractéristique de l'Univers. Cette modification a lourdement compliqué la démarche que j'avais initialement adoptée pour démontrer les résultats ci-après. C'est pour cette raison que dans ce chapitre, je vais exposer la manière dont j'ai établi les relations avant ce changement. À ce titre, je vais introduire une masse dynamique transitoire $m'_{ve} = \alpha_{CN} m_{ve}$ et une longueur d'onde transitoire $\lambda_{CMB} = \frac{\lambda_U}{\alpha_{CN}}$. Ainsi la masse caractéristique de la particule fondamentale utilisée dans ce chapitre devient $m'_{ve} = \frac{k_{BN}}{c^2} T_U$ et la nouvelle longueur d'onde caractéristique de l'Univers est $\lambda_{CMB} = \frac{\lambda_U}{\alpha_{CN}} = \frac{hc}{k_{BN} T_U}$. Maintenant que j'ai éclairci ce point, nous allons pouvoir passer à la démonstration.

Je commencerai par formuler de manière plus rigoureuse mon intuition. Soient « x », « y », « α » et « β » appartenant à l'ensemble des réels. Notre système d'équations à résoudre se traduit alors par : $x \frac{M_U}{m'_{ve}} = \left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\alpha}$ et $y \frac{R_U}{\lambda_{CMB}} = \left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\beta}$. Nous commencerons par chercher les valeurs « α » et « β » qui vérifient le produit de ces deux relations, à savoir $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\alpha+\beta} = xy \frac{M_U}{m'_{ve}} \frac{R_U}{\lambda_{CMB}}$. Par analogie avec notre expression $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^2 = 2\pi \frac{M_U}{m'_{ve}} \frac{R_U}{\lambda_{CMB}}$, nous obtenons $\alpha + \beta = 2$ et $xy = 2\pi$. Pour déterminer « α » et « β », il nous faut une autre équation qui lie « α » et « β ».

Pour ce faire, déterminons le rapport $\frac{\left(x \frac{M_U}{m'_{ve}}\right)}{\left(y \frac{R_U}{\lambda_{CMB}}\right)}$, nous obtenons $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\alpha-\beta}$. Le logarithme de cette relation nous donne $ln\left(\frac{x}{y} \frac{\frac{M_U}{m'_{ve}}}{\frac{R_U}{\lambda_{CMB}}}\right) = ln\left(\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\alpha-\beta}\right)$. Ainsi, nous avons une nouvelle relation qui lie « α » et « β », à savoir $\alpha - \beta = \frac{ln\left(\frac{x}{y}\right) + ln\left(\frac{M_U}{m'_{ve}}\right) - ln\left(\frac{R_U}{\lambda_{CMB}}\right)}{ln\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)}$.

Comme les variables « x » et « y » sont inconnues, je vais me restreindre au rapport $\frac{ln\left(\frac{\mathrm{M_U}}{m'_{ve}}\right)-ln\left(\frac{\mathrm{R_U}}{\lambda_{CMB}}\right)}{ln\left(\frac{\mathrm{R_U}}{\mathrm{l_{pl}}}\right)}$, dont la valeur numérique est proche de « un », en supposant que le terme $ln\left(\frac{x}{y}\right)$ est « relativement » négligeable par rapport à « $ln\left(\frac{M_U}{m'_{ve}}\right) - ln\left(\frac{R_U}{\lambda_{CMB}}\right)$ ». Il est à préciser que cette hypothèse est d'ordre empirique. Même si c'est le niveau le moins fiable de mes suppositions, c'est davantage sur la précision du calcul des exposants qu'une remise en cause pourrait avoir lieu à l'avenir. N'oublions pas que toutes les théories sont amenées à être reformées. Il me semble sain, dans l'intérêt de la recherche scientifique, que l'auteur d'une théorie présente les éléments qui pourraient selon lui évoluer.

Nous obtenons alors un système à deux équations et à deux inconnues $\alpha + \beta = 2$ et $\alpha - \beta = 1$. Sa résolution nous donne $\alpha = \frac{3}{2}$ et $\beta = \frac{1}{2}$. Après vérification, nous constatons bien une valeur proche de « un » pour l'expression $\frac{ln\left(\frac{x}{y}\right)+ln\left(\frac{M_U}{m'_{ve}}\right)-ln\left(\frac{R_U}{\lambda_{CMB}}\right)}{ln\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)}$, ce qui valide notre hypothèse. Vous remarquerez que ce résultat est cohérent avec le raisonnement du début de ce chapitre dans lequel nous avons obtenu que les rapports $\frac{M_U}{m_{ve}}$ et $\frac{R_U}{\lambda_U}$ étaient respectivement proportionnels à $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$ et à $\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}$.

Déterminons à présent les valeurs de « x » et « y ». Nous avons les trois équations ci-dessous :

$$x\,\frac{M_U}{m'_{ve}} = \left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$y\,\frac{\mathrm{R_U}}{\lambda_{CMB}} = \left(\frac{\mathrm{R_U}}{\mathrm{l_{pl}}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$xy = 2\pi$$

Pour déterminer les valeurs de « x » et « y », je vais m'appuyer sur leurs valeurs numériques de $x = \frac{\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{M_U}{m'_{ve}}}$ et $y = \frac{\left(\frac{R_U}{l_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{R_U}{\lambda_{CMB}}}$. En réitérant l'intuition précédente, je vais supposer, à un coefficient près, que l'expression de « x » est une fonction puissance de « 2π ». Cela implique que c'est également le cas pour l'autre inconnue « y». Je m'oriente vers une relation du type $x = \frac{(2\pi)^a}{c}$ et $y = c(2\pi)^b$, avec « a », « b » des nombres rationnels et « c » un réel. Face un tel système d'équations, il nous faudrait une autre relation de manière à le contraindre à une solution unique. Or en faisant le calcul, nous pouvons constater que x^4y est proche de la valeur de 0,125. Encore une fois, j'ai émis une hypothèse empirique pour laquelle la précision est contestable. Celle-ci, tout particulièrement, pourrait à juste titre être remise en cause.

Posons alors $x^4y = \frac{1}{8}$, nous obtenons un système à deux équations et à deux inconnues, $x^4y = \frac{1}{8}$ et $xy = 2\pi$. La résolution de celui-ci nous donne $x = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2}$ et $y = 2(2\pi)^{\frac{4}{3}}$.

Finalement nous avons les expressions suivantes :

$$\frac{m'_{ve}}{M_U} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2}\left(\frac{l_{pl}}{R_U}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{ou} \quad m'_{ve} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2}\left(\frac{{m_{pl}}^3}{M_U}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\lambda_{CMB}}{R_U} = 2(2\pi)^{\frac{4}{3}}\left(\frac{l_{pl}}{R_U}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad \lambda_{CMB} = 2(2\pi)^{\frac{4}{3}}\left(R_U l_{pl}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Ces résultats font suite à des approximations numériques, notamment pour déterminer les coefficients des exposants de ces expressions. Nous pourrions certainement élaborer des relations plus précises à l'avenir.

Pour revenir à notre modèle, nous avions $m'_{ve} = \alpha_{CN} m_{ve}$ et $\lambda_{CMB} = \frac{\lambda_U}{\alpha_{CN}}$

Les variables « m'_{ve} » et « λ_{CMB} » ont été définies de manière transitoire pour des raisons pédagogiques. En basculant aux grandeurs caractéristiques définitives, les relations deviennent :

$$\frac{m_{ve}}{M_U} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}}\left(\frac{l_{pl}}{R_U}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{ou} \quad m_{ve} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}}\left(\frac{{m_{pl}}^3}{M_U}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\lambda_U}{R_U} = 2\alpha_{CN}(2\pi)^{\frac{4}{3}}\left(\frac{l_{pl}}{R_U}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad \lambda_U = 2\alpha_{CN}(2\pi)^{\frac{4}{3}}\left(R_U l_{pl}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Les expressions obtenues pour $\frac{m_{ve}}{M_U}$ et $\frac{\lambda_U}{R_U}$ sont fidèles à ce que nous avions prévues au début de ce chapitre. Celles-ci nous ont permis de définir la masse « m_{ve} » et la longueur d'onde « λ_U » selon la masse ou le rayon de l'Univers. Nous allons à présent les exprimer en fonction du temps.

b) Masse et de longueur d'onde caractéristique de l'Univers en fonction du temps

Afin d'exprimer la masse « m_{ve} » en fonction du temps, remplaçons celle de l'Univers $M_U = \frac{m_{pl}}{t_{pl}} t_U$ dans l'expression définie précédemment, $m_{ve} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{{m_{pl}}^3}{M_U}\right)^{\frac{1}{2}}$. Ainsi, nous obtenons $\frac{m_{ve}}{m_{pl}} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}}$. Nous pouvons constater que la masse caractéristique « m_{ve} » décroit suivant l'inverse de la racine carrée de la durée d'expansion « t_U », comme pour la température de l'Univers.

Passons à présent à la longueur d'onde caractéristique. Les deux expressions suivantes $\lambda_U = 2\alpha_{CN}(2\pi)^{\frac{4}{3}}\left(R_U l_{pl}\right)^{\frac{1}{2}}$ et $R_U = t_U \frac{l_{pl}}{t_{pl}}$ nous donnent $\frac{\lambda_U}{l_{pl}} = 2\alpha_{CN}(2\pi)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}$.

Cette relation va nous permettre ci-après d'exprimer la température de l'Univers en fonction du temps.

c) Température de l'Univers en fonction du temps

À partir des trois relations $\frac{\lambda_U}{l_{pl}} = 2\alpha_{CN}(2\pi)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}$, $\lambda_U = \frac{hc}{k_B T_U}$ et $\frac{hc}{k_B} = 2\pi\, l_{pl} T_{pl}$, nous obtenons l'équation suivante qui lie le temps et la température de l'Univers : $t_U {T_U}^2 = \frac{(2\pi)^{-\frac{2}{3}}}{4{\alpha_{CN}}^2} t_{pl} {T_{pl}}^2$.

Cette expression permet de mettre à l'épreuve notre modèle théorique et de vérifier qu'il est en cohérence avec les observations cosmologiques, et tout particulièrement avec la durée d'expansion de l'Univers « t_U » et le coefficient d'Hubble « H_0 ». Quelles valeurs obtenons-nous pour ces grandeurs selon notre modèle ?

Tout d'abord, la température de l'Univers est connue de manière précise, $T_U = 2{,}72548\ K$. De plus, selon les données 2018 de la CODATA[1], les valeurs numériques

[1] https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt

du temps et de la température de Planck sont $t_{pl} = 5{,}391247.10^{-44}\ s$ et $T_{pl} = 1{,}416784.10^{32}\ K$. Le calcul numérique avec $\alpha_{CN} = 4{,}965114$ nous donne une durée d'expansion de l'Univers $t_U = 4{,}338825.10^{17} s$, soit un coefficient d'Hubble $H_0 = 71{,}12\ km.s^{-1}.Mpc^{-1}$.

Les valeurs calculées sont proches de celles observées, ce qui est encourageant pour notre modèle. Toutefois, cette cohérence est loin d'être suffisante pour le valider. C'est avec le temps, qu'une théorie est éprouvée, d'autant plus que celui-ci nécessitera un ajustement des coefficients $x = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2}$ et $y = 2(2\pi)^{\frac{4}{3}}$ déterminés dans la partie « *a) Expression de la masse et de la longueur d'onde caractéristique en fonction du rayon l'Univers* ».

Nous avons défini théoriquement une des variables thermodynamiques de l'Univers, sa température. Il paraît intéressant de déterminer les autres grandeurs telles que sa pression et son entropie. Pour ce faire, nous nous appuierons sur le bilan énergétique de l'Univers.

5. Expression des variables thermodynamiques de l'Univers

Le modèle du « *Big Bang* » n'explique pas l'origine de l'énergie contenue dans notre Univers. De plus, d'après les lois de conservation, celle-ci ne pourrait pas se créer ex nihilo. Alors d'où provient-elle ? Une des possibilités séduisante pour réconcilier le modèle de notre Univers avec le principe de conservation de l'énergie est de considérer que l'énergie totale de l'Univers est nulle. Alors comment expliquer l'énergie présente dans notre Univers ? Pour résoudre ce « *faux* » paradoxe, nous devons admettre que l'énergie est compensée par la même quantité mais de signe opposé. Dans mon livre « *Les mystères de l'espace* », je démontre notamment que l'énergie du volume de l'espace, de signe négatif, est identique à celle de la matière qui est positive.

a) Bilan énergétique de l'Univers

Un système thermodynamique possède une énergie interne « $E_{interne}$ ». Celui-ci peut échanger avec son environnement extérieur de l'énergie sous forme de chaleur « $Q_{extérieur}$ » et de travail « $W_{extérieur}$ ». Pour être complet, il faut ajouter à notre système l'énergie de la matière qu'il contient « $E_{matière}$ » et celle de son volume d'espace « E_{espace} ». Ainsi, le bilan d'énergie peut se résumer par la relation :

$$E_{système} = E_{interne} + W_{extérieur} + Q_{extérieur} + E_{matière} + E_{espace}$$

L'énergie de la matière et de l'espace ont été traitées dans *Les mystères de l'espace*. Nous y avions démontré qu'un corps de masse « m » possède une énergie $E_{matière} = mc^2$ et que celui-ci était associé et indissociable du volume de son espace propre dont l'énergie est $E_{espace} = -mc^2$, ainsi $E_{matière} + E_{espace} = 0$. Le bilan d'énergie de notre système devient :

$$E_{système} = E_{interne} + W_{extérieur} + Q_{extérieur}$$

Nous allons désormais appliquer ce bilan à notre système d'étude qui est l'Univers. L'énergie interne « $E_{interne}$ », au sens de la thermodynamique, sera notée « U_U ». Le travail « $W_{extérieur}$ » et la chaleur « $Q_{extérieur}$ » échangés avec l'extérieur, quant à eux, sont de signe positif si une quantité d'énergie est fournie au système ou négatif si c'est l'Univers qui en cède une part à son environnement extérieur, mais ces variables n'ont pas de sens pour un Univers isolé. Cependant, l'énergie interne peut fournir de la chaleur en contrepartie d'un travail exercé depuis l'intérieur du système lui-même. Ainsi, le bilan énergétique de l'Univers devient $E_U = U_U - W_{syst} - Q_{syst}$. Dans notre système, « U_U » représente l'énergie cinétique résultant du mouvement de l'ensemble des particules élémentaires caractéristiques de l'Univers, « W_{syst} » le travail nécessaire à l'expansion de l'Univers trouvant son essence depuis l'intérieur du système et « Q_{syst} » la quantité de chaleur transformée par l'Univers sous forme d'énergie mécanique utilisée comme « *carburant* » à son expansion. Quant au rayonnement, son énergie est intégrée dans celle de la masse $M_U c^2$. En effet, l'énergie rayonnée par un corps matériel est équivalente à celle de sa masse perdue. Je considère également que l'influence du rayonnement sur l'agitation thermique des corps est déjà prise en compte dans la température de l'Univers, et par conséquent dans l'énergie interne de notre système. Enfin, de manière à être en accord avec la loi de conservation, l'énergie totale de l'Univers est nulle ($E_U = 0$). Notre bilan énergétique se réduit par conséquent à la loi suivante : $U_U = W_{syst} + Q_{syst}$. L'Univers est système thermodynamique singulier qui nécessite d'être traité de manière particulière.

Pour définir complètement notre système thermodynamique, il nous faut déterminer la pression, le nombre de particules élémentaires caractéristiques ainsi que les quantités d'énergie échangées sous forme de chaleur et de travail.

b) Pression et nombre de particules caractéristiques dans l'Univers

Dans la *théorie spatiale*, nous avions déterminé une force universelle qui s'exerce à la surface de l'Univers, nommée « tension spatiale de l'Univers ». Pour ne pas la confondre avec la température, je la noterai « F_U ». Celle-ci nous permet de déterminer la pression de l'Univers : $P_U = \frac{F_U}{S_U}$. De plus, la tension « F_U » est identique à la force de Planck « F_{pl} ». Ainsi, nous obtenons $P_U = \frac{F_{pl}}{4\pi R_U{}^2} = \frac{\rho_U c^2}{3}$. Entre parenthèses, il est intéressant de préciser qu'un gaz relativiste se comporte comme un gaz de photons dont la pression est donnée par l'équation d'état $P = \frac{\rho c^2}{3}$.

Nous pouvons également exprimer la pression de l'Univers à l'aide de la loi des gaz parfaits $P_U = \rho_U r_U T_U$. La variable « r_U » est donnée par relation $r_U = k_B \frac{N_U}{M_U}$, avec « M_U » et « N_U » respectivement la masse totale et le nombre total des particules caractéristiques dans l'Univers. Cela signifie que nous donnons une autre orientation à la masse « M_U » qui ne correspondrait plus à la masse « ordinaire » de l'ensemble des corps présents dans l'Univers et serait restreinte à celle d'une particule particulière. Pour rappel, nous avions évoqué au début de ce livre un candidat potentiel purement spéculatif, le neutrino.

En injectant la masse volumique de l'Univers $\rho_U = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi G t_U{}^2}$ et la durée d'expansion $t_U = \frac{R_U}{c}$ dans l'expression de la pression, nous obtenons $P_U = \frac{k_B\, c^2}{\frac{4}{3}\pi G} \frac{N_U}{M_U} \frac{T_U}{R_U{}^2}$.

De plus, les deux équations $T_U = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}} T_{pl}$ et $m_{ve} = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}} m_{pl}$ permettent d'établir la relation suivante : $\frac{T_U}{T_{pl}} = \frac{m_{ve}}{m_{pl}}$. (*Celle-ci est fondamentale car elle traduit une équivalence parfaite entre la température et la masse caractéristique de l'Univers. En effet, lorsque celles-ci sont exprimées dans le système d'unités de Planck, l'équation devient* $T_U = m_{ve}$).

En remplaçant cette expression de la température dans l'équation de la pression de l'Univers précédente et en utilisant la relation $k_B T_{pl} = m_{pl} c^2$, nous obtenons une nouvelle forme de la pression, $P_U = 3 m_{ve} \frac{N_U}{M_U} \left(\frac{F_{pl}}{4\pi R_U{}^2}\right)$. Or nous savons que la pression de l'Univers est également donnée par l'équation $P_U = \frac{F_{pl}}{4\pi R_U{}^2}$, ce qui implique que $N_U = \frac{M_U}{3 m_{ve}}$.

Vous remarquerez qu'aucune interprétation de la masse caractéristique « m_{ve} » n'a été nécessaire pour toutes les démonstrations effectuées jusqu'à maintenant, ce qui ne va pas être le cas dans la suite. En effet, le modèle des gaz parfaits appliqué à l'Univers pourrait être considéré comme un système qui contient « N_{ve} » particules caractéristiques de masse « m_{ve} » et dont la masse dynamique totale est égale au tiers de celle de l'Univers. Ainsi, $N_{ve} = \frac{M_U}{3 m_{ve}} = \frac{2(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3} \alpha_{CN} \left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$.

Exprimons dans la suite l'énergie interne de notre système.

c) Énergie interne de l'Univers

L'énergie microscopique de notre système correspond à la somme des énergies cinétiques de chacune des particules élémentaires caractéristiques. Cette énergie peut s'écrire sous la forme suivante $E_c = N_{ve} m_{ve} c^2 = \frac{1}{3} M_U c^2$ car $N_{ve} = \frac{M_U}{3 m_{ve}}$. Par ailleurs, $M_U c^2 = F_U R_U = F_{pl} R_U$, donc $E_c = \frac{1}{3} F_{pl} R_U$. De plus $m_{ve} c^2 = k_B T_U$, ce qui implique que $E_c = N_{ve} m_{ve} c^2 = N_{ve} k_B T_U$. Ainsi, l'énergie microscopique de l'Univers peut s'écrire sous plusieurs formes énumérées ci-après : $E_c = N_{ve} m_{ve} c^2 = \frac{1}{3} M_U c^2 = \frac{1}{3} F_{pl} R_U = N_{ve} k_B T_U$.

Cette énergie n'est rien d'autre que l'énergie interne de l'Univers, dont l'équation est $U_U = N_{ve} k_B T_U$.

Par ailleurs le produit de la pression et du volume de l'Univers est $P_U V_U = \left(\frac{F_{pl}}{4\pi {R_U}^2}\right)\left(\frac{4}{3}\pi {R_U}^3\right) = \frac{1}{3} F_{pl} R_U$.

Ainsi, l'énergie interne de l'Univers, nous est donnée par les relations suivantes : $U_U = P_U V_U = N_{ve} k_B T_U = \frac{1}{3} F_{pl} R_U$.

Passons désormais au travail de notre système.

d) Travail de notre système

Je vous propose de déterminer le travail de notre système à l'aide de la variation de l'énergie interne qui se décompose en deux parties, à savoir l'énergie macroscopique « δW_{syst} » et microscopique « δQ_{syst} ». Commençons par la différentielle de l'expression $U_U = N_{ve} k_B T_U$, nous obtenons $dU_U = N_{ve} k_B dT_U + N_{ve} T_U dk_B + k_B T_U dN_{ve}$. Or $dU_U = \delta W_{syst} + \delta Q_{syst}$. Je rappelle que « W_{syst} » correspond à l'énergie utilisée par notre système comme moteur de l'expansion de l'Univers. Dans l'expression de la différentielle de l'énergie interne précisée ci-dessus, le seul terme qui peut s'identifier à l'énergie mécanique est $k_B T_U dN_{ve}$. (C'est une supposition qui reste à vérifier). J'admettrai donc que l'expansion de l'Univers est une conséquence de la variation de la quantité de matière de notre système, définie par $\delta W_{syst} = k_B T_U dN_{ve}$. Exprimons à présent cette énergie. Les trois relations $\delta W_{syst} = k_B T_U dN_{ve}$, $N_{ve} = \frac{2(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3} \alpha_{CN} \left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$ et $T_U = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}} T_{pl}$ nous donnent le travail élémentaire $\delta W_{syst} = \frac{1}{2} k_B \frac{T_{pl}}{t_{pl}} dt_U$. Par conséquent, $\delta W_{syst} = \frac{1}{2} F_{pl} dR_U$. Le travail est de signe positif, ce qui était prévisible puisque la taille de l'Univers augmente. Ainsi, le travail infinitésimal nécessaire à l'expansion de l'Univers est proportionnel à la variation de son rayon.

Il nous reste à déterminer la quantité de chaleur échangée par le système.

e) Chaleur échangée dans notre système

Le bilan d'énergie interne nous donne l'expression de la chaleur échangée $\delta Q_{syst} = dU_U - \delta W_{syst}$. De plus $dU_U = \frac{1}{3} F_{pl} dR_U$ et $\delta W_{syst} = \frac{1}{2} F_{pl} dR_U$. Ainsi, $\delta Q_{syst} =$

$-\frac{1}{6}F_{pl}dR_U$. Contrairement au travail, la quantité de chaleur du système diminue. Ceci s'explique par le fait que l'énergie calorifique sert de carburant à l'expansion de l'Univers.

Nous allons par la suite exprimer une autre variable un peu plus complexe à cerner, l'entropie de l'Univers.

f) Entropie de l'Univers

A priori, nous devrions nous attendre à ce que l'entropie de l'Univers augmente dans le temps. Or si nous considérons notre système comme isolé, ce qui est loin d'être une évidence, celui-ci ne peut pas recevoir d'entropie de l'extérieur. Ainsi l'entropie ne peut croître que par celle créée par l'Univers lui-même. Par ailleurs, l'entropie d'un système réversible reste constante. C'est pourquoi nous allons considérer notre Univers comme un système irréversible. Dans ce cas, son entropie croît jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre. Bien que l'Univers soit un système isolé, son énergie interne contribue à générer du travail nécessaire à l'expansion de celui-ci en échange de la quantité de chaleur cédée par le système lui-même. En effet, pour produire du travail depuis l'intérieur du système, celui-ci puise de l'énergie interne en diminuant sa quantité de chaleur. Nous pouvons alors définir une entropie qui est liée à l'expansion de l'Univers à partir de la chaleur reçue à cet effet $-\delta Q_{syst}$. L'entropie s'écrit donc $dS = -\frac{\delta Q_{syst}}{T_U}$. Or nous avons démontré précédemment que $\delta Q_{syst} = -\frac{1}{6}F_{pl}dR_U$. Par conséquent, $dS = \frac{1}{6}\frac{F_{pl}dR_U}{T_U}$. En remplaçant la température de l'Univers par l'expression $T_U = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}}\left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}}T_{pl}$ et son rayon par $R_U = \frac{l_{pl}}{t_{pl}}t_U$, l'entropie devient $dS = \frac{(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3}\alpha_{CN}\frac{F_{pl}l_{pl}}{T_{pl}t_{pl}}\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{1}{2}}\mathrm{dt_U}$. Intégrons cette différentielle de « t_0 » à « t_U » et remplaçons $\frac{F_{pl}l_{pl}}{T_{pl}} = k_B$, nous obtenons $S(t_U) - S(t_0) = \frac{2}{9}(2\pi)^{\frac{1}{3}}\alpha_{CN}k_B\left(\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{t_0}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}\right)$. Si nous considérons qu'à l'instant zéro de son expansion, l'Univers n'existait pas alors son entropie à $t_0 = 0$ est nulle. Dans ce cas, son expression en fonction du temps est donnée par la relation $S = \frac{2}{9}(2\pi)^{\frac{1}{3}}\alpha_{CN}k_B\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$. Il est à noter que celle-ci est une fonction croissante du temps. En utilisant $N_{ve} = \frac{2}{3}(2\pi)^{\frac{1}{3}}\alpha_{CN}\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$, nous obtenons une entropie en fonction du nombre de particules caractéristiques, soit

$S = \frac{1}{3} N_{ve} k_B$. L'entropie liée à l'expansion de l'Univers est actuellement de l'ordre de 10^{91} k_B.

Ces variables thermodynamiques vont nous permettre de démontrer que les unités de Planck sont constantes.

Partie II : Démonstration de la constance des unités de Planck et des constantes universelles. Modèle théorique général des constantes universelles

1. Démonstration de la constance des unités de Planck

Pour démontrer la constance du temps de Planck, nous nous appuierons sur la force universelle formalisée à partir de la quantité de mouvement.

a) Temps de Planck

Je vais vous présenter, uniquement à titre d'illustration, un des scénarios possible simplifié. Imaginons que des particules élémentaires se créent à la surface de la paroi « limite » de l'Univers, la percutent et rebondissent suivant la même direction dans le sens opposé. Nous pouvons modéliser ces chocs élastiques en utilisant la conservation de la quantité de mouvement. Je désigne par « dN » la quantité élémentaire du nombre de particules qui frappent la paroi pendant l'intervalle de temps « dt », alors la relation $F = 2p\frac{dN}{dt}$ nous donne la force que subit la paroi lors des chocs. La grandeur « p » est la quantité de mouvement d'une particule de masse et de vitesse homogènes. Appliquons cette relation à notre système composé de « N_{ve} » particules de masse caractéristique élémentaire « m_{ve} ». Nous avons vu dans le chapitre « *e) Hypothèse relativiste de la masse caractéristique* » que $p = m_{ve}c$, par conséquent $F_U = 2m_{ve}c\frac{dN_{ve}}{dt_U}$.

Calculons la dérivée de $N_{ve} = \frac{2(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3}\alpha_{CN}\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$ par rapport au temps, nous obtenons $\frac{dN_{ve}}{dt_U} = \frac{d}{dt_U}\left(\frac{2(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3}\alpha_{CN}\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}\right)$. À ce stade de la démonstration, nous ignorons si le temps de Planck dépend du temps ou pas. Ainsi, $\frac{dN_{ve}}{dt_U} = (2\pi)^{\frac{1}{3}}\alpha_{CN}\left(\frac{t_U^{\frac{1}{2}}}{t_{pl}^{\frac{3}{2}}} - \frac{t_U^{\frac{3}{2}}}{t_{pl}^{\frac{5}{2}}}\frac{dt_{pl}}{dt_U}\right)$. Multiplions cette dérivée par l'expression $2m_{ve}c = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{\alpha_{CN}}m_{pl}\left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}}c$, nous obtenons $F_U = 2m_{ve}c\frac{dN_{ve}}{dt_U} = \frac{m_{pl}}{t_{pl}}c(1 - \frac{t_U}{t_{pl}}\frac{dt_{pl}}{dt})$. Nous avons de plus la relation $F_{pl} = \frac{m_{pl}}{t_{pl}}c$, donc $F_U = F_{pl}(1 - \frac{t_U}{t_{pl}}\frac{dt_{pl}}{dt})$. Par ailleurs, nous avons la relation $F_U = F_{pl}$, ce qui implique $\frac{dt_{pl}}{dt_U} = 0$.

La dérivée du temps de Planck par rapport au temps est nulle, par conséquent le temps de Planck est constant.

Passons désormais aux autres unités de Planck.

b) Masse et longueur de Planck

La longueur et la masse de Planck s'expriment respectivement par les relations $l_{pl} = ct_{pl}$ et $m_{pl} = \frac{c^3}{G} t_{pl}$. Comme les grandeurs « c », « G » et « t_{pl} » sont constantes, alors la masse et la longueur de Planck le sont également.

Il est important de noter que nous avions depuis le début de cet ouvrage supposé que le débit massique $d_{pl} = \frac{m_{pl}}{t_{pl}}$ était constant. Il suffit donc de démontrer la constance d'une unité de Planck, parmi sa masse ou son temps, pour que l'autre le soit.

c) Température de Planck

La constance de la température de Planck demande davantage de réflexion pour être établie. Pour ce faire, nous allons confronter deux expressions différentes de la chaleur.

Tout d'abord, la chaleur transmise à un système peut être formulée par la variation de la température de celui-ci. Dans le cas de l'Univers, la quantité élémentaire de la chaleur est par définition $\delta Q_{déf\ chaleur} = N_{ve} k_B dT_U$. Je rappelle que le nombre de particules caractéristiques contenues dans l'Univers s'exprime par la relation $N_{ve} = \frac{2(2\pi)^{\frac{1}{3}}}{3} \alpha_{CN} \left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right)^{\frac{3}{2}}$ et sa température par $T_U = \frac{(2\pi)^{-\frac{1}{3}}}{2\alpha_{CN}} \left(\frac{t_{pl}}{t_U}\right)^{\frac{1}{2}} T_{pl}$. Ces trois relations établissent notre première expression de la quantité élémentaire de chaleur : $\delta Q_{déf\ chaleur} = -\frac{1}{6} k_B \frac{T_{pl}}{t_{pl}} dt_U + \frac{1}{3} k_B \frac{t_U}{t_{pl}} dT_{pl}$.

Regardons de plus près le premier terme de cette équation $-\frac{1}{6} k_B \frac{T_{pl}}{t_{pl}} dt_U$. Celui-ci est égal à $-\frac{1}{6} \frac{m_{pl} c^2}{l_{pl}} dR_U$ qui lui-même est égal à $F_{pl} dR_U$. Ainsi la nouvelle forme de cette quantité de chaleur élémentaire échangée dans l'Univers est $\delta Q_{déf\ chaleur} = -\frac{1}{6} F_{pl} dR_U + \frac{1}{3} k_B \frac{t_U}{t_{pl}} dT_{pl}$. L'autre relation de la chaleur, obtenue par un bilan d'énergie de notre système, est $\delta Q_{bilan\ énergie} = -\frac{1}{6} F_{pl} dR_U$. Egalons alors ces deux termes, à savoir $\delta Q_{bilan\ énergie} = Q_{déf\ chaleur}$. Nous obtenons $-\frac{1}{6} F_{pl} dR_U = -\frac{1}{6} F_{pl} dR_U + \frac{1}{3} k_B \frac{t_U}{t_{pl}} dT_{pl}$, ce qui implique que $\frac{1}{3} k_B \frac{t_U}{t_{pl}} dT_{pl} = 0$, et donc $dT_{pl} = 0$. Par conséquent, la température de Planck est constante.

Nous avons démontré que le temps, la masse, la longueur et la température de Planck sont constants, il ne nous manque plus qu'à vérifier la constance de la charge de Planck.

d) Charge de Planck

La masse, la longueur et le temps de Planck sont constants, ce qui implique que la constante de Planck l'est également. Par ailleurs, je démontrerai dans le chapitre suivant la constance de la permittivité du vide « ε_0 ». Par conséquent, la charge de Planck $Q_{pl} = \sqrt{2ch\varepsilon_0}$ est constante.

2. Les constantes universelles sont-elles vraiment constantes ?

La démonstration de la constance des constantes d'Einstein « c » et de Newton « G », effectuée au début du livre, s'appuie sur les résultats de la *théorie spatiale*. Dans cette partie, je souhaite vous proposer une autre approche qui se base sur un calcul différentiel, mais surtout qui repose uniquement sur le *« principe de linéarité de l'Univers »*. Ce dernier s'énonce comme suit : « les grandeurs primaires de l'Univers (masse et rayon) sont une fonction linéaire du temps ». Si nous considérons que les conditions aux limites, telles que le rayon « R_U » et la masse « M_U », sont nulles au début de la phase d'expansion de l'Univers, à savoir $R_U = M_U = 0$ à $t_U = 0$, alors ce principe implique les relations suivantes $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U}$ et $\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U}$. Vous remarquerez que c'est celles que nous avions obtenues au début de cet ouvrage.

a) Constance de la constante d'Einstein « c »

Commençons par appliquer une différentielle de la constante d'Einstein ($c = \frac{R_U}{t_U}$) par rapport à la durée d'expansion de l'Univers, nous obtenons $\frac{dc}{dt_U} = \frac{1}{t_U}\frac{dR_U}{dt_U} + R_U\frac{d\left(\frac{1}{t_U}\right)}{dt_U}$. Remplaçons $\frac{dR_U}{dt_U}$ par $\frac{R_U}{t_U}$ dans cette relation. Celle-ci devient $\frac{dc}{dt_U} = \frac{1}{t_U}\left(\frac{R_U}{t_U}\right) - R_U\left(\frac{1}{{t_U}^2}\right) = 0$, ce qui signifie que la constante d'Einstein « c » n'a pas varié durant la phase d'expansion de l'Univers. Nous aurions pu faire la démonstration de manière plus simple et plus directe. En effet, la relation $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U}$ implique que le rapport $\frac{R_U}{t_U}$ soit constant et que $c = \frac{R_U}{t_U}$ le soit également. J'ai opté dès ce chapitre pour une démonstration par différentielle car dans celui de « Généralisation des constantes universelles », je vais énoncer une théorie plus large en utilisant cette méthode.

b) Constance de la constante de Newton « G »

Je rappelle que les grandeurs « M_U » et « R_U » sont respectivement la masse et le rayon de l'Univers. De la même manière que pour la constante d'Einstein, nous allons démontrer que la constante de Newton est bien constante par la différentielle de l'expression $G = \frac{R_U^3}{M_U t_U^2}$. Ainsi, nous obtenons $\frac{dG}{dt_U} = \frac{1}{M_U t_U^2} 3R_U^2 \frac{dR_U}{dt_U} - \frac{R_U^3}{t_U^2}\frac{1}{M_U^2}\frac{dM_U}{dt_U} - 2\frac{R_U^3}{M_U}\frac{1}{t_U^3}$. Combinée aux deux équations $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U}$ et $\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U}$, notre différentielle devient

$\frac{dG}{dt_U} = 3\frac{R_U^3}{M_U t_U^3} - \frac{R_U^3}{M_U t_U^3} - 2\frac{R_U^3}{M_U t_U^3} = 0$. Par conséquent, la constante gravitationnelle « G» n'a pas varié depuis le début de la phase d'expansion de l'Univers jusqu'à maintenant.

Comme pour la constante d'Einstein, nous aurions pu faire la démonstration de manière plus simple. En effet, les deux relations $\frac{dR_U}{dt_U} = \frac{R_U}{t_U}$ et $\frac{dM_U}{dt_U} = \frac{M_U}{t_U}$ impliquent respectivement que les rapports $\frac{R_U}{t_U}$ et $\frac{M_U}{t_U}$ soient constants. En réécrivant l'expression de la constante de Newton en fonction de ces rapports, nous obtenons $G = \left(\frac{R_U}{t_U}\right)^3 \left(\frac{t_U}{M_U}\right)$. Ainsi, nous montrons que la grandeur « G » est constante puisque les rapports $\frac{R_U}{t_U}$ et $\frac{t_U}{M_U}$ le sont également.

c) Constance de la constante de Planck « h »

La masse, la longueur et le temps de Planck sont constantes. Par conséquent, la constante de Planck $h = 2\pi \frac{m_{pl} {l_{pl}}^2}{t_{pl}}$ l'est aussi.

d) Constance de la constante de Boltzmann « k_B »

La constante de Boltzmann peut s'écrire exclusivement en fonction des unités de Planck, à savoir $k_B = \frac{m_{pl}\left(\frac{l_{pl}}{t_{pl}}\right)^2}{T_{pl}}$. Ces unités étant constantes, cela implique que la constante de Boltzmann ne varie pas en fonction du temps.

e) Constance de la permittivité du vide « ε_0 » et de la constante de Coulomb « k_c »

Nous savons que la permittivité du vide s'écrit en fonction de la perméabilité magnétique du vide « μ_0 » et de la constante d'Einstein, à savoir $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$. Or « μ_0 » et « c » sont constantes, donc « ε_0 » l'est aussi.

Par ailleurs, la constante de Coulomb est donnée par la relation $k_c = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, par conséquent « k_c » est également une constante fondamentale.

Nous venons de démontrer que « G », « c », « h », « k_B », « ε_0 » et « k_c » sont constantes. Qu'en est-il des autres constantes universelles ?

3. Les constantes universelles sont-elles toutes constantes ?

a) Le paramètre de structure fine ne serait pas constant

Lorsqu'un scientifique tente de démontrer un résultat non tranché et qu'il n'y parvient pas, alors il commence à douter de la véracité de sa proposition. C'est ce sentiment que j'ai éprouvé en étudiant le paramètre de structure fine, au point d'être convaincu que celui-ci varie dans le temps. N'ayant pas de piste sérieuse pour établir une démonstration solide, je me suis orienté vers une démarche « *expérimentale* ».

J'ai alors déterminé une relation empirique qui me mène à penser que le paramètre de structure fine « α » n'est pas constant. Cette loi, $\frac{M_U}{m_{pl}} = \alpha_{CN}{}^2 e^{\frac{1}{\alpha}}$, est purement spéculative et fera sans doute l'objet de modification à l'avenir, concernant particulièrement le paramètre numérique $\alpha_{CN}{}^2$. Je rappelle que « M_U », « m_{pl} » sont respectivement la masse de l'Univers et de Planck, et « α_{CN} » le coefficient des corps noirs.

En composant notre loi empirique par une fonction logarithme, nous obtenons $\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{1}{\alpha_{CN}{}^2}\frac{M_U}{m_{pl}}\right)}$. Puisque $\frac{M_U}{m_{pl}} = \frac{t_U}{t_{pl}}$, nous pouvons exprimer le paramètre de structure fine en fonction du temps, à savoir $\alpha = \frac{1}{ln\left(\frac{1}{\alpha_{CN}{}^2}\frac{t_U}{t_{pl}}\right)} = \frac{1}{ln\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right) - 2ln(\alpha_{CN})}$. Nous constatons que ce paramètre diminue dans le temps.

Afin de calculer « α », nous allons utiliser les mêmes valeurs que celles de l'application numérique du coefficient d'Hubble, à savoir $t_{pl} = 5{,}391247.10^{-44}\ s$, $\alpha_{CN} = 4{,}965114$ et $t_U = 4{,}338825.10^{17} s$. Nous obtenons la valeur $\alpha = 7{,}297371.10^{-3}$.

Je pose à présent arbitrairement « N_{pl} » le nombre de particules de Planck de masse « m_{pl} », tel que $N_{pl} = \frac{M_U}{m_{pl}}$. Cette variable représente alors le nombre de particules que contiendrait l'Univers s'il était exclusivement composé de celles-ci. Ainsi, le paramètre de structure fine devient $\alpha = \frac{1}{ln\left(\frac{1}{\alpha_{CN}{}^2}N_{pl}\right)}$.

Passons désormais à la charge de l'électron.

b) La charge de l'électron « e » ne serait pas constante

Nous savons que la charge de Planck « Q_{pl} » est constante. Si le paramètre de structure fine varie dans le temps, alors la charge électrique « e » ne peut pas être constante puisque $e^2 = \alpha Q_{pl}{}^2$. Par ailleurs, $e = Q_{pl}\left(ln\left(\frac{1}{\alpha_{CN}{}^2}\frac{t_U}{t_{pl}}\right)\right)^{-\frac{1}{2}}$

Qu'en est-il de la masse ou du rayon de l'électron ?

c) Le produit de la masse et du rayon de l'électron ne serait pas constant

Le paramètre de structure fine « α » s'exprime en fonction de la masse « m_e » et du rayon « R_e » de l'électron selon la relation $= \frac{m_e}{m_{pl}}\frac{R_e}{l_{pl}}$, soit $m_e R_e = \alpha m_{pl} l_{pl}$. Dans la mesure où les unités de Planck sont constantes et que le paramètre de structure fine semble varier dans le temps, le produit $m_e R_e$ ne devrait pas être constant. Ce résultat implique qu'au moins une de ces deux variables dépend du temps. Il est vraisemblable que si l'une d'entre elles varie alors l'autre varie également.

L'expression du produit de la masse de l'électron par son rayon en fonction du paramètre de structure fine nous permet d'établir la relation suivante : $m_e R_e = \frac{m_{pl} l_{pl}}{ln\left(\frac{t_U}{t_{pl}}\right) - 2ln(\alpha_{CN})}$. Il est à noter que le terme $m_e R_e$ est de signe positif si seulement si $\frac{t_U}{t_{pl}} > \alpha_{CN}{}^2$.

Ces résultats amènent *a priori* à penser que toutes les grandeurs caractéristiques de l'Univers évoluent dans le temps. Est-il alors possible d'observer ce phénomène ? Intéressons nous à la variation relative dans le temps de ce produit. Dans le cas où notre loi empirique serait correcte, nous devrions nous attendre à observer une variation au cours du temps de ce terme suivant la relation $\frac{d(m_e R_e)}{m_e R_e} = -\frac{1}{ln\left(\frac{1}{\alpha_{CN}{}^2}\frac{t_U}{t_{pl}}\right) t_U} dt$. Pour percevoir une variation mesurable, il faudrait réaliser une observation loin dans l'Univers et si possible dans les débuts de sa phase d'expansion. Toutefois, cette démarche reposerait sur une hypothèse qui reste à vérifier. En effet, lorsque nous recevons une information lointaine, la grandeur mesurée pourrait évoluer durant son trajet jusqu'à atteindre la même valeur que celle de notre époque. Dans ce cas, il serait impossible de constater la moindre variation.

Par ailleurs, la relation que nous avons conjecturée peut être fausse. Mon intuition de départ m'orientait vers des grandeurs qui variaient de manière proportionnelle, un phénomène qui rendait également inobservable toute variation puisque l'étalon de mesure évoluerait également de manière proportionnelle.

Ce sujet mériterait davantage de réflexion et que nous nous attardions un peu plus pour le développer. Je vais désormais proposer une théorie plus large qui vise à généraliser ma théorie des constantes universelles.

4. Généralisation des constantes universelles

Pour le moment, nous avons exprimé des constantes universelles connues en fonction des grandeurs caractéristiques de notre Univers. Dans cette partie, je proposerai une méthode qui vise à prévoir une infinité de candidats aux constantes universelles.

a) Théorie de constance universelle

Soit « R_U », « M_U » et « t_U » respectivement le rayon, la masse et la durée d'expansion de l'Univers. On pose $G_U = R_U^a M_U^b t_U^c$ avec « a », « b » et « c » des nombres réels. Dérivons cette grandeur par rapport à « t_U », $\frac{dG_U}{dt_U} = \frac{d(R_U^a M_U^b t_U^c)}{dt_U}$. Cette expression devient : $\frac{dG_U}{dt_U} = R_U^a M_U^b t_U^{c-1}(a+b+c)$. Si la grandeur « G_U » n'a pas évolué durant la phase d'expansion de l'Univers, alors $\frac{dG_U}{dt_U} = 0$, ce qui impliquerait que $R_U^a M_U^b t_U^{c-1}(a+b+c) = 0$ et par conséquent que *a+b+c=0*. En résumé, la grandeur « G_U est constante » si et seulement si « $a+b+c=0$ ». Autrement dit, tous les paramètres numériques d'une loi de la nature qui s'écrivent sous la forme $G_U = R_U^a M_U^b t_U^c$, dont la somme des exposants *a+b+c=0*, sont des constantes universelles.

Nous pouvons également faire ce raisonnement avec une grandeur qui s'exprime par les unités de Planck. Je rappelle que « l_{pl} », « m_{pl} » et « t_{pl} » sont respectivement la longueur, la masse et le temps de Planck. À ce stade de ma démonstration, il n'est pas nécessaire de les considérer comme constantes. Soit une grandeur « G_{pl} » qui dépend des unités de Planck (temps, masse et longueur) telle que $G_{pl} = l_{pl}^{\alpha} m_{pl}^{\beta} t_{pl}^{\gamma}$ avec « α », « β » et « γ » des nombres réels. On applique la différentielle de cette grandeur par rapport au temps, nous trouvons $\frac{dG_{pl}}{dt} = G_{pl}(\frac{\gamma}{t_{pl}}\frac{dt_{pl}}{dt} + \frac{\beta}{m_{pl}}\frac{dm_{pl}}{dt} + \frac{\alpha}{l_{pl}}\frac{dl_{pl}}{dt})$. Si « G_{pl} » est constante, alors sa variation par rapport au temps est nulle, ce qui implique que la relation $\frac{\gamma}{t_{pl}}\frac{dt_{pl}}{dt} + \frac{\beta}{m_{pl}}\frac{dm_{pl}}{dt} + \frac{\alpha}{l_{pl}}\frac{dl_{pl}}{dt} = 0$. En multipliant cette expression par la quantité infinitésimale « dt », nous obtenons la relation simplifiée $\gamma\frac{dt_{pl}}{t_{pl}} + \beta\frac{dm_{pl}}{m_{pl}} + \alpha\frac{dl_{pl}}{l_{pl}} = 0$. Or nous savons que $m_{pl} = \frac{M_U}{t_U}t_{pl}$, et par conséquent $dm_{pl} = \frac{M_U}{t_U}dt_{pl}$. Ainsi, $\frac{dm_{pl}}{m_{pl}} = \frac{dt_{pl}}{t_{pl}}$. De la même manière $\frac{dl_{pl}}{l_{pl}} = \frac{dt_{pl}}{t_{pl}}$. Injectons ces deux dernières expressions dans la relation que j'ai établie précédemment $\gamma\frac{dt_{pl}}{t_{pl}} + \beta\frac{dm_{pl}}{m_{pl}} + \alpha\frac{dl_{pl}}{l_{pl}} = 0$. Nous obtenons l'équation suivante :

$\gamma \frac{dt_{pl}}{t_{pl}} + \beta \frac{dt_{pl}}{t_{pl}} + \alpha \frac{dt_{pl}}{t_{pl}} = 0$, soit $(\gamma + \beta + \alpha) dt_{pl} = 0$. La grandeur « G_{pl} » est constante si le temps de Planck « t_{pl} » l'est aussi ou bien si la relation $\gamma + \beta + \alpha = 0$.

Dans le cas où le temps de Planck serait constant, alors la masse $m_{pl} = \frac{M_U}{t_U} t_{pl}$ et la longueur $l_{pl} = \frac{R_U}{t_U} t_{pl}$ le seraient car les rapports $\frac{M_U}{t_U}$ et $\frac{R_U}{t_U}$ le sont aussi. Par conséquent, la constante de Planck $h = 2\pi \frac{m_{pl} l_{pl}^2}{t_{pl}}$ serait également constante quelles que soient les valeurs de « γ », « β » et « α ».

Par contre, dans le cas où le temps de Planck ne serait pas constant, alors pour que la grandeur « G_{pl} » le soit, il faudrait que $\gamma + \beta + \alpha = 0$. Comme cette somme n'est pas nulle pour les exposants de $h = 2\pi \frac{m_{pl} l_{pl}^2}{t_{pl}}$, la constante de Planck ne pourrait pas être constante. Ainsi, la seule possibilité pour que « h » soit constante est que l'une des unités de Planck (masse, temps ou longueur) le soit également.

Toutefois, nous avons démontré précédemment que les unités de Planck « l_{pl} », « m_{pl} » et « t_{pl} » étaient bien constantes. Par conséquent « toutes les grandeurs qui s'expriment sous la forme $l_{pl}^{\alpha} m_{pl}^{\beta} t_{pl}^{\gamma}$ sont constantes quelles que soient les valeurs de ses exposants « γ », « β » et « α ».

En conclusion, pour construire une constante universelle, il suffit que le paramètre qui figure dans la loi de la physique soit égal à $l_{pl}^{\alpha} m_{pl}^{\beta} t_{pl}^{\gamma}$ quelles que soient les valeurs de « γ », « β » et « α » ou bien à $R_U^a M_U^b t_U^c$ avec $a + b + c = 0$. Compte tenu des constantes connues actuellement, nous pourrions ajouter une condition plus restrictive en imposant que les exposants « a », « b » et « c » soient des entiers relatifs.

Nous avons désormais un cadre théorique qui nous permet de vérifier si un paramètre qui figure dans une loi de la physique est constant ou pas. Pour cela, nous devons tout de même avoir connaissance de l'expression de celle-ci. Puis, une fois ce paramètre mesuré expérimentalement, nous pouvons alors vérifier si c'est une constante universelle en appliquant la théorie de constance universelle que nous venons d'exposer ci-dessus. Mais il faut tout de même être en mesure de l'exprimer en fonction des grandeurs physiques, ce qui n'est pas aisé. Par ailleurs, il est à rappeler que cette théorie de constance est suffisante mais pas nécessaire. En clair, un paramètre d'une loi de la physique pourrait être constant alors qu'il ne vérifie pas la théorie des constantes universelles. C'est le cas par exemple d'un paramètre qui ne s'exprime pas exclusivement en fonction de la masse, du rayon et de la période d'expansion de l'Univers ou bien des unités de Planck. Mais dans le cas contraire, notre théorie devient non seulement suffisante, mais également nécessaire.

Quoi qu'il en soit, afin de pouvoir définir toutes les constantes universelles, il nous faut un cadre théorique plus large qui nous permettrait de prévoir toutes les lois fondamentales de la physique. Ce que nous allons tâcher de faire dans la suite de cet ouvrage.

b) Prévision de nouvelles constantes

Nous avons vu précédemment qu'une grandeur qui s'exprime en fonction du rayon, de la masse et de la durée d'expansion de l'Univers telle que $G_U = R_U^a M_U^b t_U^c$ est constante uniquement si la somme des exposants $a + b + c = 0$. Combien de constantes universelles de cette forme contient la nature et pourrait-on toutes les déterminer ? Pour mener notre réflexion, nous allons nous appuyer sur des équations simples dans lesquelles apparaissent des constantes universelles que nous connaissons déjà.

Observons, à titre d'exemple, la loi d'Einstein $E = mc^2$qui traduit une équivalence entre la masse et l'énergie. Nous pourrions généraliser ce que certains appellent de manière abusive les « constantes de conversion » à l'instar de la grandeur « c^2 » qui figure dans la relation ci-dessus. Cette dernière s'exprimerait de manière plus générale par la relation $E = K_{me}.m$ avec $K_{me} = c^2$. Je nommerai par la suite ce type de relation « une loi de transformation ». À ce titre le coefficient « K_{me} » sera qualifié de constante de transformation de masse en énergie et « K_{em} » celle d'énergie en masse. Pour passer de l'une à l'autre, nous utiliserons la relation suivante $K_{em} = \frac{1}{K_{me}}$.

Nous avons également la constante de Planck qui transforme une fréquence d'un photon en une énergie. Mon intuition de départ me mène à penser que cinq unités fondamentales sont équivalentes à une énergie, parmi laquelle figure la température qui est transformée en énergie par la constante de Boltzmann. Nous pourrions également imaginer une constante qui transforme un volume d'espace en une énergie, voir même une quantité de temps en une énergie.

Comment déterminer ces relations de transformation ? Si nous observons à la fois la loi d'Einstein et celle de Planck, nous pouvons constater qu'elles sont toutes les deux de la forme $Q = KU$. Avec « Q» une énergie, « K» une constante universelle et « U» une grandeur unitaire telle que la masse (m), la fréquence (ν), la température (T), la distance (r) et le temps (t).

Pour définir la relation complètement, il faudrait avoir connaissance de la constante « K ». D'après notre principe de constance universelle, celle-ci ne dépend que des caractéristiques de notre Univers. Ainsi $= \frac{Q_U}{U_U}$, avec « Q_U » l'énergie caractéristique de l'Univers et « U_U » sa grandeur unitaire associée. Pour l'énergie, nous pouvons utiliser la relation d'Einstein $Q_U = m_U c^2$, avec « m_U » la masse caractéristique de l'Univers. Cependant, nous avons défini deux masses caractéristiques de l'Univers différentes : la masse de l'Univers « M_U » et la masse de la particule caractéristique « m_{ve} ». Deux relations sont alors possibles pour exprimer la constante « K », soit avec la constante macroscopique $K = \frac{M_U c^2}{U_U}$ ou bien la constante microscopique $k = \frac{m_{ve} c^2}{U_U}$.

C'est pour cette raison, que dans la suite de mon exposé, je distinguerai deux types de relation de transformation : les lois de transformation macroscopique définies par « M_U » et microscopique définies par « m_{ve} ». La loi d'équilibre universelle stipule que toute grandeur physique tend vers la valeur des grandeurs caractéristiques de l'Univers, que celles-ci soient macroscopiques ou microscopiques. Au niveau macroscopique, toutes les grandeurs vont chercher à atteindre celles de l'Univers, telles que sa masse, son rayon et sa température. Au niveau microscopique, elles vont avoir tendance à se rapprocher de sa particule élémentaire caractéristique. À titre d'exemple, les constantes de Planck et de Boltzmann font partie des lois de transformation microscopique, et celle d'Einstein et de Newton des lois de transformation macroscopique.

5. Lois de transformation macroscopique

Les lois de transformation macroscopique sont de la forme $Q = KU$, telles que la constante universelle $K = \frac{M_U c^2}{U_U}$. Je rappelle que « Q » est une énergie et « U » une grandeur unitaire (la température, la fréquence, la masse, la distance et le temps).

a) Loi de transformation macroscopique spatiale

La loi de transformation d'une boule d'espace de rayon « r » en énergie peut être conjecturée par la relation suivante : $Q = K_{re}.r$, avec comme coefficient de transformation espace-énergie $K_{re} = \frac{M_U c^2}{R_U} = M_U R_U t_U^{-2}$. De plus, la somme des exposants des grandeurs unitaires de cette expression est nulle ($a + b + c = 0$). J'en conclu que « K_{re} » est bien une constante universelle. Il est à noter que $K_{re} = \frac{c^4}{G} = \frac{8\pi}{\text{К}}$ avec $\text{К} = \frac{8\pi G}{c^4}$ qui est la constante gravitationnelle de couplage d'Einstein.

Par ailleurs, si j'avais considéré la loi $Q = K'_{re}.r^3$, le coefficient de transformation « K'_{re} » ne serait pas une constante fondamentale. C'est pour raison que j'ai choisi $Q = K_{re}.r$.

Nous pouvons faire le même type de raisonnement avec la température et l'onde caractéristique de l'Univers.

b) Loi de transformation macroscopique thermique

La loi de transformation thermique s'écrit sous la forme $Q = K_{Te}.T$ avec le coefficient de transformation température-énergie $K_{Te} = \frac{M_U}{T_U}c^2 = M_U R_U^2 t_U^{-2} T_U^{-1}$. Pour que « K_{Te} » soit une constante universelle, il faudrait que $\frac{M_U}{T_U}$ le soit aussi.

Supposons que cela soit le cas. Dans notre modèle d'Univers la masse « M_U » augmente dans le temps, notre hypothèse ci-dessus impliquerait que la température « T_U » augmente également au cours du temps. Or l'observation montre le contraire. Par conséquent, $\frac{M_U}{T_U}$ ne peut pas être constant.

J'en conclus non seulement que le coefficient « K_{Te} » n'est pas une constante universelle mais que cette loi de transformation doit s'écrire autrement.

c) Loi de transformation macroscopique de pulsation

Posons cette fois-ci $Q = K_{\nu e}.\nu$ avec le coefficient de transformation fréquence-énergie $K_{\nu e} = M_U R_U^2 t_U^{-2} \nu_U^{-1} = \frac{M_U}{\nu_U} c^2$. Pour que le coefficient « $K_{\nu e}$ » soit constant, il faudrait cette fois-ci que $\frac{M_U}{\nu_U}$ soit constant.

Utilisons la relation $M_U = \frac{c^3}{G} t_U$ pour exprimer le rapport de la masse par la fréquence caractéristique de l'Univers. Nous obtenons $\frac{M_U}{\nu_U} = \frac{c^3}{G} \frac{t_U}{\nu_U}$. Si $\frac{M_U}{\nu_U}$ était constante, le produit $\frac{t_U}{\nu_U}$ le serait aussi. Ceci entrainerait que la fréquence « ν_U » augmente au cours du temps. Or l'observation montre, qu'au contraire, « ν_U » diminue avec le temps. Par conséquent $\frac{M_U}{\nu_U}$ n'est pas une constante. Ainsi, « $K_{\nu e}$ » n'est pas constante.

J'en conclus que le coefficient « $K_{\nu e}$ » n'est pas une constante universelle et que cette loi n'est pas la loi de transformation de pulsation.

d) Loi de transformation macroscopique temporelle

Une relation particulière concerne la transformation du temps en énergie $Q = K_{te}.t$ avec « t » le temps et $K_{te} = M_U R_U^2 t_U^{-3}$ le coefficient de transformation temps-énergie. Selon le principe des constantes universelles, « K_{te} » est une constante universelle puisque la somme des exposants des grandeurs caractéristiques de cette expression est nulle. D'ailleurs, ce coefficient de transformation est égal à $\frac{c^5}{G}$.

Nous avons exploré les lois de transformation macroscopique, nous allons à présent étudier les lois de transformation microscopique.

6. Lois de transformation microscopique

Les lois de transformation microscopique sont de la forme $Q = kU$, telle que la constante universelle $k = \frac{m_{ve}c^2}{U_U}$. Je rappelle que « Q » est une énergie et « U » une grandeur unitaire. Appliquons la même démarche que précédemment mais à la place d'utiliser la masse macroscopique « M_U », nous utiliserons la masse microscopique « m_{ve} ».

a) Loi de transformation microscopique thermique

Cette loi de transformation est définie telle que $Q_{Te} = k_{Te}.T$ avec $k_{Te} = m_{ve}R_U^2 t_U^{-2} T_U^{-1}$. Le coefficient de transformation « k_{Te} » n'est rien d'autre que la constante de Boltzmann. Pour que ce coefficient soit constant, il faudrait que le rapport $\frac{m_{ve}}{T_U}$ le soit aussi. Comme la température moyenne de l'Univers « T_U » diminue, cela impliquerait que la masse de la particule fondamentale « m_{ve} » diminue également au cours du temps.

b) Loi de transformation microscopique de pulsation

La loi de transformation microscopique de pulsation est $Q_{ve} = k_{ve}.v$ avec $k_{ve} = m_{ve}R_U^2 t_U^{-2} v_U^{-1}$ le coefficient de transformation énergie-fréquence. Ce coefficient « k_{ve} » n'est rien d'autre que la constante de Planck. Pour qu'il soit constant, il faudrait que le rapport $\frac{m_{ve}}{v_U}$ soit constant. Comme « v_U » diminue dans le temps, la masse de la particule fondamentale « m_{ve} » décroît également.

Vous noterez que je n'ai pas utilisé les résultats démontrés dans cet ouvrage, tels que les constantes de Boltzmann et de Planck sont constantes. En effet, cette partie vise à proposer un cadre théorique plus large. Nous explorerons la constance de ces coefficients et celui de la pulsation présentée ci-dessous lorsque nous traiterons les lois de transformation microscopique spatiale et temporelle.

c) Loi de transformation microscopique spatiale et temporelle

Soit « Q_{re} » et « Q_{te} » respectivement la loi de transformation microscopique spatiale et temporelle. Alors $Q_{re} = k_{re}.r$ avec $k_{re} = m_{ve}R_U t_U^{-2} = \frac{m_{ve}}{t_U}c$ et $Q_{te} = k_{te}.t$ avec $k_{te} = m_{ve}R_U^2 t_U^{-3} = \frac{m_{ve}}{t_U}c^2$.

Pour que « k_{te} » et « k_{re} » soient constants, il faudrait que le rapport $\frac{m_{ve}}{t_U}$ le soit également. Supposons que cette hypothèse soit vraie. Or nous avons vu dans la loi de transformation thermique que le rapport $\frac{m_{ve}}{T_U}$ devait être constant pour que les constantes de Planck et de Boltzmann le soient également. Si cela est le cas, alors le rapport $\frac{T_U}{t_U}$, égal à $\frac{\frac{m_{ve}}{t_U}}{\frac{m_{ve}}{T_U}}$, le serait également. Cette relation impliquerait que la température « T_U » augmente si « t_U » augmentait, ce qui est contraire à l'observation.

En résumé, soit « k_{te} » et « k_{re} » sont constants ou bien « k_{ve} » et « k_{Te} » le sont. Il est davantage probable que ce soient les constantes de Planck et de Boltzmann qui ne varient pas dans le temps. Ainsi, les coefficients « k_{te} » et « k_{re} » ne seraient donc pas constants.

Nous allons voir ci-dessous une loi de transformation particulière qui est à la fois microscopique et macroscopique, celle de la charge électrique.

d) Loi de transformation de charge électrique

La loi de transformation de charge électrique, à la différence des lois de transformation macroscopique et microscopique, dépend également des caractéristiques de l'électron. Contrairement aux autres lois de transformation, dans le cas où la charge caractéristique serait celle de l'électron, le coefficient de transformation de charge ne pourrait pas être constant quelle que soit la masse caractéristique choisie. Dans la mesure où les grandeurs caractéristiques de l'Univers peuvent s'écrire à l'aide des unités de Planck, les lois de transformation peuvent également s'exprimer avec celles-ci. Nous nous orienterons alors vers la charge de Planck. Toutefois pour que le coefficient de transformation soit constant, l'énergie considérée ne peut ni être égale à $M_U c^2$ ni à $m_{ve} c^2$. Pour que cela soit le cas, nous devons prendre une nouvelle masse caractéristique qui soit constante et la seule possibilité qui s'offre à nous est la masse de Planck.

Ainsi la loi de transformation de la charge électrique s'écrit sous la forme suivante : $Q_{qe} = k_{qe.}q$ avec $k_{qe} = m_{pl} c^2 Q_{pl}^{-1}$.

Par ailleurs, nous savons que $Q_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{v_e}\lambda_U}{m_e R_e}}e$ et $m_{pl} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{m_{v_e}\lambda_U M_U}{R_U}}$. Par conséquent $k_{qe} = \frac{1}{e}\sqrt{\frac{m_e R_e M_U}{R_U}}c^2$. En remplaçant la vitesse $c = \frac{R_U}{t_U}$, nous obtenons $k_{qe} = \frac{1}{e.t_U^2}\sqrt{m_e R_e M_U R_U^3}$. Nous constatons que ce coefficient dépend non seulement des grandeurs macroscopiques de l'Univers mais également des caractéristiques de l'électron telles que sa masse, son rayon et sa charge électrique.

Nous allons à présent exprimer ce coefficient uniquement en fonction des constantes universelles. Pour ce faire, nous utilisons les trois expressions suivantes : $\frac{m_e R_e}{e^2} = \frac{k_c}{c^2}$, $M_U = \frac{c^2}{G} R_U$ et $c = \frac{R_U}{t_U}$. Ainsi, nous obtenons $k_{qe} = c^2 \sqrt{\frac{k_c}{G}}$. Vous remarquerez que ce coefficient fait apparaître le rapport entre la constante de Coulomb et celle de Newton.

Nous avons établi une loi de transformation unique pour chacune des unités fondamentales. Dressons ci-après le bilan de ces lois.

7. Bilan des lois de transformation

Dans le chapitre précédent, nous avons déterminé une série de six coefficients de transformation qui sont également des constantes universelles. Or une combinaison de constantes universelles reste une constante, mais est-elle fondamentale ?

Pour trancher cette question, il faut bien distinguer deux aspects, l'un concerne la constance de la grandeur et l'autre sa nature fondamentale ou pas. Concernant la constance, nous avons dans cet ouvrage fourni un cadre théorique qui me semble assez solide pour la définir. Quant à l'autre aspect, seuls les coefficients de transformation seront considérés comme des constantes fondamentales. Toutes les autres constantes sont des constantes universelles secondaires qui dérivent de ces coefficients.

a) Constantes fondamentales primaires

Au bilan, il reste six lois pour lesquelles les coefficients de transformation sont des constantes fondamentales :

$Q_{me} = K_{me}.m$ avec $K_{me} = R_U^2 t_U^{-2} = c^2$

$Q_{re} = K_{re}.r$ avec $K_{re} = M_U R_U t_U^{-2} = \frac{c^4}{G}$

$Q_{te} = K_{te}.t$ avec $K_{te} = M_U R_U^2 t_U^{-3} = \frac{c^5}{G}$

$Q_{Te} = k_{Te}.T$ avec $k_{Te} = m_{ve} R_U^2 t_U^{-2} T_U^{-1} = k_B$

$Q_{ve} = k_{ve.}v$ avec $k_{ve} = m_{ve} R_U^2 t_U^{-2} v_U^{-1} = h$

$Q_{qe} = k_{qe.}q$ avec $k_{qe} = \frac{1}{et_U^2}\sqrt{m_e R_e M_U R_U^3} = c^2\sqrt{\frac{k_C}{G}}$

Non seulement toutes les unités de mesure sont équivalentes à une énergie mais chacune d'entre elles le sont aussi les unes envers les autres. À ce titre, nous pouvons transformer une masse en énergie, qui elle se transformera en une autre unité. Prenons le cas à titre d'exemple de l'équivalence entre la masse et le temps : $m = k_{mt}t$ avec $k_{mt} = \frac{M_U}{t_U}$. Finalement, seule une unité de mesure est suffisante pour décrire toutes les lois de la physique et l'Univers.

Les constantes universelles fondamentales ne sont que la conséquence de l'équivalence d'une grandeur unitaire avec son énergie associée. Il semble y avoir autant de constantes fondamentales que d'unités : pas plus, pas moins. Ainsi, toutes les lois fondamentales de l'Univers dépendent uniquement de six constantes fondamentales.

Toutes les autres constantes ne sont que des constantes dérivées des coefficients de transformation.

b) Constantes universelles dérivées

Exprimons alors les constantes universelles dérivées en fonction des constantes fondamentales primaires.

$$c = \sqrt{K_{me}} = \frac{K_{te}}{k_{re}}$$

$$G = \frac{{K_{me}}^2}{K_{re}} = \frac{{K_{te}}^4}{{K_{re}}^5}$$

$$k_B = k_{Te}$$

$$h = k_{ve}$$

$$k_C = \frac{{k_{qe}}^2}{K_{re}}$$

Pour obtenir le statut de constante universelle, il est nécessaire que la grandeur soit une combinaison des coefficients de transformation. Le cas contraire, elle ne peut pas être constante. Or le paramètre de structure fine ne s'exprime pas exclusivement avec ces coefficients, et par conséquent il n'est pas constant.

Conclusion

Prenons de la hauteur sur le concept de « théorie ». Comprenons que les résultats d'une démonstration théorique sont en réalité déjà inclus dans l'ensemble des hypothèses nécessaires à son élaboration. Ces dernières ne se restreignent pas uniquement à celles posés dans le cadre de la théorie en question, mais elles concernent toutes les suppositions posées pour construire l'ensemble de nos théories pour lesquelles chacune d'entre elles peut se baser sur une partie des autres théories. Si nous devions énumérer la liste des hypothèses utilisées pour démontrer une seule loi de la physique, elle serait relativement longue, et elle le serait d'autant plus si nous y ajoutions tous les concepts mathématiques y afférents. Une théorie n'est en réalité que le fruit de successions, de combinaisons et d'imbrications de mécanismes tautologiques.

Si nous acceptons le principe de causalité, une conséquence est *a fortiori* précédée d'une cause. Ainsi, aucun résultat théorique ne peut apparaître ex nihilo, ou d'aucun cadre ou d'aucun principe. Alors comment naissent les hypothèses qui fondent une théorie ? Bien souvent celles-ci prennent vie spontanément, grandissent et évoluent vers une forme de maturité naturelle. Elles deviennent plus solides, plus stables pour tenter d'être imperturbables et de traverser le temps et l'espace sans embuche. Elles finissent par se rassembler pour cohabiter et ne former qu'une, car l'union fait la force tandis que l'individualisme rend faible. Qui dit hypothèse, dit théorie. La construction d'une « *bonne* » théorie doit alors se penser de sorte à éviter de multiplier des postulats « *faibles* » qui se télescopent et qui pourraient être regroupés en une unique hypothèse « *forte* ». Une telle démarche optimise la théorie de manière à la simplifier au maximum. C'est une des raisons qui motive les scientifiques à élaborer une théorie ultime et unique.

Par ailleurs, il est important de préciser que certaines observations se fondent sur des modèles théoriques au point de s'y confondre. Les résultats expérimentaux sont non seulement conditionnés par la validité de ces théories mais contiennent de surcroît un biais qui se noie dans l'ensemble des hypothèses formulées par ces théories. Une vigilance particulière est à observer pour ne pas prendre une mauvaise direction.

Pour quelles raisons ai-je conclu de manière non conventionnelle par ce passage éclair de philosophie des sciences ? Tout simplement pour que vous compreniez la démarche scientifique que je souhaiterai adopter pour améliorer la théorie des constantes universelles dans les années à venir. Les démonstrations que j'ai réalisées jusqu'à maintenant s'appuient sur trop d'hypothèses à mon goût. L'objectif des prochains travaux est de proposer une théorie plus générale qui nécessite beaucoup moins de suppositions. Pour ce faire, il est nécessaire de s'appuyer sur des principes larges et puissants.

À bientôt pour de nouvelles aventures afin de construire ensemble la théorie ultime de la physique.

Première édition
Version numérique

Éditions Deux Plumes
2, allée Saint-John Perse, 95120 Ermont