



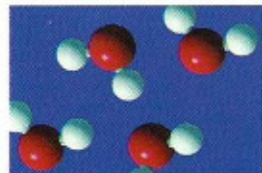
Les constantes universelles

LA MATIÈRE, L'ESPACE ET LE TEMPS

Tout le monde est familier avec la notion de constante que l'on trouve dans la vie courante : cela évoque l'immuabilité. C'est également dans ce même sens que les physiciens emploient ce terme. Cependant, en physique, ce terme se charge de certaines subtilités, notamment par le fait que les constantes peuvent éventuellement varier. Cela fait actuellement l'objet de débats et d'expériences. La notion de constante est intimement liée à celle d'unité et donc de métrologie, un domaine assez difficile et subtil de la science. Il existe en physique beaucoup de constantes, mais toutes n'ont pas le même statut : certaines sont plus fondamentales que d'autres, un peu comme dans le cas des unités où l'on a les unités de base et les unités dérivées. Les constantes les plus fondamentales sont parfois désignées par constantes universelles. Dans la mesure où le monde physique qui nous entoure n'est semble-t-il rien d'autre que matière, espace et temps, il n'est sans doute pas étonnant qu'au niveau le plus fondamental, nous ayons affaire à trois constantes universelles. À cela, certains rétorquent qu'outre la matière, l'espace et le temps, il y a l'information que l'on peut aussi désigner par ordre ou entropie, ce qui porte à quatre le nombre de constantes universelles.

QU'EST-CE QU'UNE CONSTANTE ?

Les équations qui décrivent un système en physique comportent différents types de paramètres. Certains sont imposés par l'extérieur, d'autres sont intrinsèques. Par exemple, s'il s'agit d'un écoulement d'eau, la quantité d'eau, sa pression, sa vitesse, sa température, etc. constituent les paramètres extérieurs. En revanche, sa viscosité lui est propre ; c'est une donnée que l'on peut d'ailleurs trouver en consultant une table. Peut-on pour autant dire qu'il s'agit d'une constante ? Cela ne serait pas absurde, mais il se trouve que l'emploi du terme « constante », surtout s'il s'agit de constante fondamentale, est réservé à des entités plus fondamentales. En effet, cette viscosité elle-même dépend



des interactions entre les molécules d'eau, donc des atomes, et en fin de

compte des nuages électroniques et de la mécanique quantique. Ce qui est fondamental à ce niveau est d'une part la charge de l'électron e , qui caractérise la matière, d'autre part la constante de Planck h issue de la physique pure, la mécanique quantique, indépendamment du fait qu'il s'agisse d'eau, d'huile ou de big-bang. De manière générale, les paramètres intrinsèques à la matière et aux lois qui gouvernent son évolution sont les constantes fondamentales.

COMBIEN Y A-T-IL DE CONSTANTES FONDAMENTALES ?

Il faut noter ici qu'avant la découverte des quanta ou de l'électron, la physique pratiquée par les physiciens ignorait e et h . Cela permet de comprendre que le nombre de constantes dépend de l'état des connaissances en physique. À l'époque d'Archimède,



la densité de l'eau aurait pu être considérée comme une constante fondamentale... L'objectif du physicien est de réduire au maximum le nombre des constantes fondamentales. À combien en sommes nous aujourd'hui ? Il n'est pas facile de répondre à cette question, car au niveau ultime, plusieurs théories concurrentes tentent de décrire notre univers et ce nombre varie... Malgré tout, nous allons donner une idée de ce nombre en dressant une liste de constantes, certaines liées à la matière, comme par exemple la charge de l'électron e , d'autres comme h liées aux « lois » qui la gouvernent.

LISTE DES CONSTANTES

Cette liste va comprendre la masse des particules les plus élémentaires : 6 quarks, 3 neutrinos, 3 leptons chargés (électron, muon, tau), les bosons W et Z , le boson de Higgs, le graviton, le photon ; cela fait déjà 17 constantes, à quoi il faut ajouter la charge électrique élémentaire, la constante de gravitation G , la constante de Planck, la vitesse de la lumière, la constante cosmologique... On aboutit ainsi à près de 30 constantes fondamentales.

UNITÉS ET CONSTANTES

Il n'est pas possible de parler de constantes fondamentales sans parler d'unités. De même que nous avons tenté de dresser une liste de constantes, nous pouvons nous demander de combien d'unités la physique a besoin pour décrire le monde.



En 1832, Carl Friedrich Gauss

(1777-1855) arrive à la conclusion que trois unités suffisent. C'est ainsi que le système cgs (centimètre, gramme, seconde) voit le jour en 1874. Attirons ici l'attention du lecteur sur le fait que ce n'est pas par hasard que ces trois unités sont relatives à la matière, à l'espace et au temps. En effet, qu'y a-t-il d'autre à l'échelle la plus fondamentale ? Le système cgs a été abandonné par la suite au profit du Système International SI qui met en jeu sept unités (mètre, kilogramme, seconde, ampère, candela, kelvin, mole). Signalons que sur les sept, seules trois sont vraiment fondamentales : mètre, kilogramme, seconde, des unités relatives respectivement à une dimension spatiale de longueur L , à une dimension temporelle T , et à une dimension de quantité de matière M . Les quatre autres peuvent en être dérivées. Cependant, dans la pratique, cela ne serait pas commode, d'où l'adoption de sept unités de base. Cela peut a priori paraître surprenant qu'il soit possible d'exprimer l'ampère en fonction des unités de longueur, de masse et de temps. Nous allons donc éclaircir ce point.

AMPÈRE N'EST PAS UNE UNITÉ FONDAMENTALE

Un ampère correspond au passage d'un coulomb de charges électriques par seconde, soit un peu plus de six milliards de milliards de charges. L'ampère correspond donc à un nombre de charges par seconde. Bien que la charge électrique soit donnée en Coulomb, il serait possible de définir l'unité de charge e en MKS. En effet, il suffit de faire un choix judicieux d'unités de sorte que la force F entre deux charges électriques e et e espacées de r devienne égale à e^2/r^2 (au lieu de $K e^2/r^2$ comme l'apprennent les écoliers). Dans ces conditions, on le voit, la dimension de e^2 devient homogène à celle d'une force multipliée par une surface. Comme une force est homogène à une masse multipliée par une

accélération soit Masse x Longueur x Temps² ou MLT^{-2} en abrégé, e^2 devient homogène à MLT^{-1} ; l'ampère (e / temps) devient donc homogène à $M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}$.

TROP DE CONSTANTES, PEU D'UNITÉS

Il y a clairement près de dix fois plus de constantes fondamentales qu'il n'y a d'unités fondamentales, elles sont au nombre de trois seulement. Aussi, les physiciens ont été séduits par l'idée suivante : constituer deux catégories de constantes, la première formée de trois constantes dites dimensionnées (c'est-à-dire avec des unités), la seconde formée de constantes sans dimension (c'est-à-dire de nombres purs sans unité). Par exemple, si l'une des trois constantes fondamentales dimensionnées est la masse de l'électron m_e , toutes les autres masses des particules seront exprimées comme des multiples ou sous multiples de cette masse de référence : la constante de masse du proton vaudra 1838 car le proton est 1838 fois plus massif que l'électron. En somme, la masse de l'électron dans cet exemple devient l'unité de masse.

CONSTANTES UNIVERSELLES

En choisissant trois constantes fondamentales dimensionnées à partir desquelles toutes les autres constantes seront exprimées, le physicien établit un système d'unités défini par ces trois constantes fondamentales. Clairement, le choix de ces trois constantes dimensionnées doit être effectué judicieusement afin que leurs combinaisons permettent de définir une masse, une longueur et un temps. Ces trois constantes sont alors appelées constantes universelles. Plusieurs choix sont possibles. Historiquement, le physicien Stoney fait le choix suivant : e , c , G , soit respectivement la charge de l'électron, la vitesse de la lumière dans le vide et la



constante de gravitation. Après lui, Planck choisit h , c et G ; il remplace e par h , la constante de Planck. La combinaison de h , c et G permet de définir les unités de Planck : la longueur de Planck, la masse de Planck, le temps de Planck. Longueur de Planck $(\hbar/c)^{1/2} = 4,13 \cdot 10^{-18}$ m Masse de Planck $(\hbar c/G)^{1/2} = 5,56 \cdot 10^8$ kg Temps de Planck $(\hbar/c^3)^{1/2} = 1,38 \cdot 10^{-43}$ s

Bien entendu, on pourrait employer la longueur, la masse et le temps de Planck comme unités de base au lieu du système MKS, mais ce ne serait pas pratique dans la vie courante. Quoi qu'il en soit, aujourd'hui, les physiciens considèrent h , c et G comme les trois constantes universelles de la physique.

c, G ET h... ET AUSSI k

Ce sont des raisons théoriques profondes qui ont fixé le choix des physiciens sur h , c et G comme les trois constantes universelles. En effet, chacun joue un rôle déterminant dans la théorie et dans notre rapport à la matière et à l'univers. Tandis que G et c interviennent dans notre rapport à l'univers plutôt à grande échelle, h est indispensable dès qu'il s'agit d'étudier la matière à l'échelle atomique.

c, LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

La physique du xx^e siècle doit beaucoup à Einstein et notamment à sa remise en cause des visions galiléenne et newtonienne du monde. En effet, selon Galilée, toute vitesse est relative et la loi galiléenne d'addition des vitesses autorise n'importe quelle valeur de vitesse. Dans sa théorie de la relativité restreinte, Einstein montre que la vitesse de la lumière est un absolu et que la loi galiléenne d'addition des vitesses n'est qu'une approximation acceptable - lorsque les vitesses sont faibles devant celle de la lumière - d'une loi plus générale d'addition des vitesses. De plus, la vitesse de la lumière, une constante, est infranchissable. Elle lie en fait l'espace au temps et crée une structure quadri-dimensionnelle. À ce titre, c joue un rôle fondamental en physique. Il apparaît donc naturel de fixer c comme l'une des trois constantes universelles.



La loi galiléenne d'addition des vitesses n'est qu'une approximation acceptable - lorsque les vitesses sont faibles devant celle de la lumière - d'une loi plus générale d'addition des vitesses. De plus, la vitesse de la lumière, une constante, est infranchissable. Elle lie en fait l'espace au temps et crée une structure quadri-dimensionnelle. À ce titre, c joue un rôle fondamental en physique. Il apparaît donc naturel de fixer c comme l'une des trois constantes universelles.

G, LA CONSTANTE DE GRAVITATION

Dans sa théorie de la relativité générale, Einstein revivait la théorie de la gravitation de Newton. Selon Einstein, si l'on admet que l'écoulement du temps dépend du lieu (temps courbé) et varie en fonction de la distance à une masse selon une loi qu'il établit, alors on obtient une théorie équivalente à celle de l'attraction universelle de Newton. La nouvelle théorie rend compte du mouvement des

L'importance d'être constant

Près de 30 il existe près de 30 constantes fondamentales en physique.

3

h , c et G sont les trois constantes universelles.

3

Le mètre, le kilogramme et la seconde sont les trois unités de base.

1983

Date à laquelle le mètre est défini à partir de c

h

h , la constante de Planck, délimite la frontière le classique et le quantique.

c

c délimite la frontière relativiste Galilée - Einstein.

G

G délimite la frontière entre la relativité restreinte et la relativité générale.

299 792 458

$m \cdot s^{-1}$

C'est la vitesse invariable de la lumière.

planètes de manière identique à la théorie de Newton, à cela près que son interprétation est différente : au lieu de faire appel à une force gravitationnelle, la théorie fait appel à une courbure du temps. La théorie d'Einstein s'écarte ensuite de celle de Newton, car il apparaît qu'une masse courbe aussi l'espace (en plus du temps) : la longueur change d'un endroit à un autre en fonction de la distance à une masse. Cette courbure spatiale amène de nouveaux effets inconnus de la théorie newtonienne. La théorie de la relativité restreinte apparaît alors comme une limite de la relativité générale où l'on peut négliger G (ou considérer c comme infini). On le voit, en liant la matière à l'espace, G joue un rôle fondamental dans la théorie. C'est à ce titre qu'il est naturel de le fixer comme l'une des trois constantes universelles.

h, LA CONSTANTE DE PLANCK

La constante de Planck h a les dimensions d'une action, une grandeur homogène à une énergie multipliée par un temps. Cette constante indique que tout événement met en jeu une quantité d'action au moins égale à la constante de Planck : c'est l'action minimale ou quantum élémentaire d'action. Aussi, h joue un rôle fondamental en physique atomique, et marque une frontière entre la physique classique et la physique quantique. En effet, si l'événement met en jeu une action très grande devant h , alors les effets quantiques sont négligeables et la physique classique peut apporter une excellente réponse. En revanche, si l'événement met en jeu une action dont la valeur est voisine de h , alors la physique qui décrit correctement le phénomène est la physique quantique. Là encore, on le voit, h joue un rôle fondamental en physique. On comprend que cette constante soit érigée en constante universelle.

k, LA CONSTANTE DE BOLZMANN

Certains physiciens pensent qu'il serait préférable d'inclure la constante de



Boltzmann, que l'on retrouve en thermodynamique, parmi les constantes universelles. Au couple G, c adapté au monde macroscopique à l'échelle de

l'univers, ils opposent le couple h, k se rapportant au monde microscopique à l'échelle atomique et subatomique. De même que h est un quantum élémentaire d'action, k apparaît comme le quantum élémentaire de l'information, la quantité d'information maximale que l'on peut extraire d'un système en dépensant un seul quantum d'action.

LE CUBE DES THÉORIES PHYSIQUES

Le rôle des constantes c, G, h appelées parfois « constantes structurantes de la physique » peut être illustré à l'aide d'un graphique où l'on a 3 axes perpendiculaires sur lesquels on porte $1/c, h$ et G . Les valeurs que ces trois grandeurs peuvent prendre sont 0 ou 1. Le point (0,0,0) représente la

mécanique newtonienne hors gravitation : c infinie, h nulle, G nulle. Le point (0,0,1) représente la gravitation newtonienne. La mécanique quantique est située en (0,1,0), la relativité restreinte en (1,0,0) et la relativité générale en (1,0,1). En (1,1,0) se trouve la théorie quantique des champs, c'est-à-dire la théorie quantique relativiste. Les points (0,1,1), ou gravitation quantique newtonienne, et (1,1,1), ou théorie unifiée de toutes les interactions ou encore la théorie de gravitation quantique relativiste, ne sont pour le moment pas au point, mais les recherches continuent. Beaucoup espèrent que la théorie des cordes (où les particules ne sont pas des objets ponctuels mais similaires à des cordes à une dimension) occupera le point (1,1,1).

ÉTALONS ET CONSTANTE UNIVERSELLE

L'exemple ci-dessous permettra d'établir le lien entre étalon d'unité et constante universelle à travers l'exemple du mètre.

LA MARCHÉ VERS LE MÈTRE

Avant l'adoption d'une définition universelle du mètre, il existait - rien qu'en France - des milliers d'unités de mesure de longueur. En effet, presque chaque village possédait la sienne. Cela n'était évidemment pas commode en cas de communication et d'échange. De l'esprit égalitaire de la Révolution, germe l'idée d'égaliser, d'unifier toutes ces unités. On adopte alors une définition commune du mètre, définition qui s'appuya d'abord sur la longueur d'un méridien, puis sur le mètre étalon jusqu'en 1960. Ce dernier, comme tout **étalon**, présente

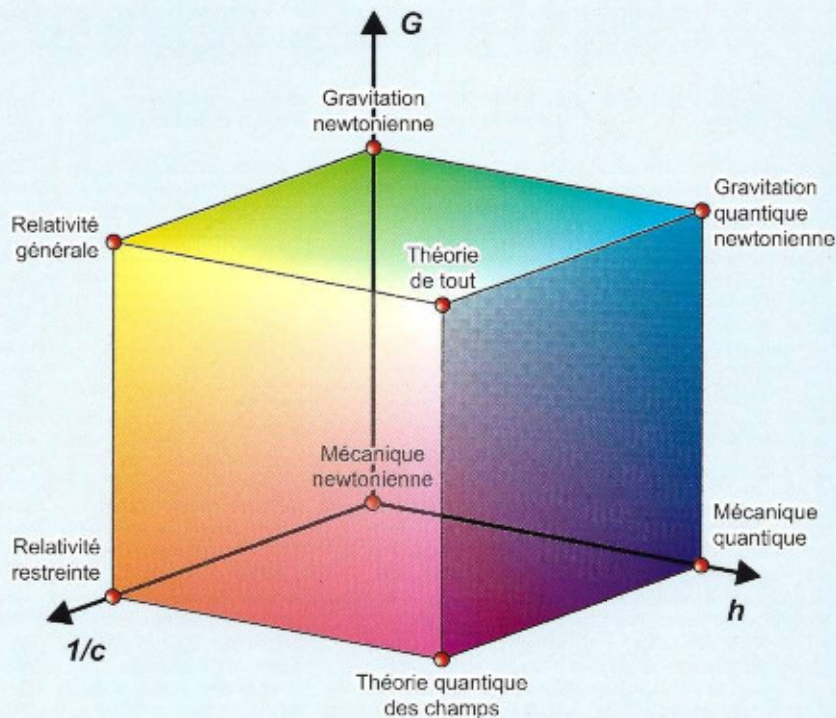


l'inconvénient qu'il n'existe qu'en un seul exemplaire. Bien sûr, il est possible d'en faire des copies, mais qui dit copies dit imperfections de reproduction. Par ailleurs, usure, température, hygrométrie, etc. modifient légèrement la longueur de l'étalon. Enfin, l'étalon étant localisé en un lieu précis, deux personnes ne peuvent s'entendre sur sa définition qu'en se présentant toutes deux sur le lieu de sa conservation.

VERS UN MÈTRE ROBUSTE

Aussi, pour palier ces inconvénients, il est nécessaire de trouver une référence plus répandue, plus universelle et de surcroît peu susceptible de modification. La matière est une chose que l'on trouve partout. En supposant que la matière « platine » par exemple est partout pareil, ce métal peut devenir une bonne référence pour fixer une unité de longueur. Par exemple, nous pourrions définir l'unité de longueur comme suit : c'est le diamètre de la

Le cube des théories physiques



sphère de platine qui pèse un kilogramme. Grâce à cette définition de l'unité de longueur, les inconvénients inhérents à l'étalon s'évanouissent. Mais ici, l'unité de longueur devient dépendant de l'unité de masse, ce qui est gênant. Par ailleurs, cette nouvelle définition du mètre est comme la précédente : elle est susceptible de changement en fonction des conditions météorologiques.

LE MÈTRE EN 1960

Nous pourrions alors adopter une autre définition, s'appuyant sur la taille d'un atome, mettons de platine. L'unité de longueur serait le diamètre d'un atome ou d'un nombre déterminé d'atomes mis à la queue leu leu. Cette référence semble parfaite et c'est effectivement une définition similaire qui fut adoptée en 1960, à cela près qu'au lieu de prendre le diamètre d'un atome, les physiciens décidèrent de faire reposer la référence sur la longueur d'onde d'une certaine raie spectrale précise du **krypton**. Bien



entendu là aussi, en fonction des conditions expérimentales, il est possible de trouver des valeurs différentes. Cependant, l'expérience montre qu'il s'agit d'une définition du

mètre plus stable et fiable que les précédentes.

LE MÈTRE EN 1983

En 1983, on décida d'adopter une nouvelle définition, expérimentalement plus robuste encore : c'est la distance que parcourt la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ seconde ; la seconde étant elle-même définie à partir d'une transition spectrale précise de l'atome de césium. L'intérêt de cette définition est que le mètre est lié à une constante de la physique : la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458$ m/s.

LE MÈTRE BASÉ SUR C

La vitesse de la lumière dans le vide est un absolu et ne dépend donc pas de l'observateur. C'est en ce sens qu'il s'agit d'une constante. Bien entendu, ce qui nous intéresse ici est la constance de cette grandeur, non sa valeur, qui elle, dépend des unités. Autrement dit, il se trouve que pour des raisons historiques les unités de longueur et de seconde sont telles que la distance parcourue par la lumière en une seconde est très grande devant l'unité de longueur et prend numériquement la valeur de $299\,792\,458$ unités de vitesse. Dans un autre système d'unité, cette constante prendra une autre valeur numérique mais demeurera néanmoins constante.

LE KILOGRAMME

Actuellement, le kilogramme est la seule unité qui s'appuie encore sur un étalon objet. Comme dans le cas du mètre, il serait préférable de fixer la

référence du kg sur une définition qui s'appuie sur les constantes fondamentales. Des études sont en cours à ce sujet. D'ici peu, la définition du kilogramme ne reposera plus sur le kilogramme étalon du bureau des poids et mesures, mais sur une définition universelle.

DES CONSTANTES VARIABLES

Une des premières personnes à questionner la constance des constantes fondamentales (ou



universelles) a été **Paul Dirac** en 1937. En effet, rien théoriquement n'interdit aux constantes de voir leurs valeurs changer au cours du temps. C'est par commodité

que les physiciens les considèrent comme fixes. Cependant, certaines expériences cherchent à vérifier la constance des constantes. La constante que l'on a le plus souvent soupçonné de varier est la constante de gravitation, constante dont la valeur est la moins bien connue de toutes les constantes. On peut aussi se demander si la masse du proton a toujours été 1838 fois supérieure à celle de l'électron ou si le rapport des deux masses avait une autre valeur dans un passé lointain... Il s'agit là de questions ouvertes auxquelles il n'y a pour le moment pas de réponse, bien qu'il semblerait que les constantes soient vraiment constantes.