



La question qui tue !

Combien pèse le vide ?

L'obscur clarté qui tombe des étoiles

L'étude du passé lointain de l'Univers durant le demi-siècle dernier s'est avérée très fructueuse. Non seulement les physiciens ont compris de nombreux aspects de son histoire, mais ils ont aussi trouvé dans la cosmologie primordiale – l'étude de son passé lointain – une fenêtre unique pour l'étude de la physique des très hautes énergies (et donc des très petites distances) au-delà du Modèle Standard des interactions élémentaires. Pour autant, les observations détaillées de l'Univers récent ne sont pas dénuées d'intérêt et ont, en fait, mis à jour des phénomènes inattendus.

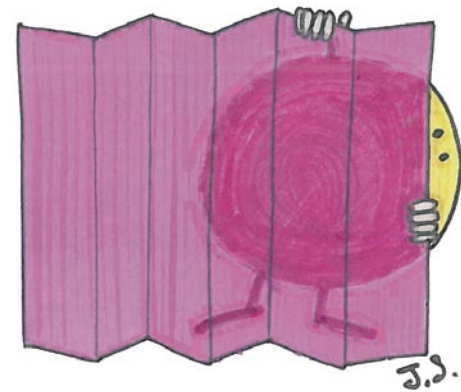
Par exemple, un « petit » détail : à force de scruter l'Univers, les physiciens ont découvert que seul 5% du contenu énergétique actuel de l'Univers observable – sa masse – est de nature connue ! Mais alors comment peuvent-ils affirmer avoir une bonne compréhension, non seulement qualitative, mais quantitative, de l'histoire de l'Univers ? En fait la proportion de « physique connue » a varié au cours du temps et était plus importante, et même dominante, dans l'Univers primordial. Bien, mais nous avons tout de même un problème sur les bras pour « expliquer » l'Univers actuel, un problème grave... et nous pesons nos mots !

Regardons les choses de plus près : toute masse, et plus généralement, d'après la théorie de la relativité générale, toute forme d'énergie, est source de gravitation, autrement dit... pèse. Mais tout ne gravite pas de la même façon. Une partie des 95% inconnus gravite comme la matière ordinaire, c'est-à-dire qu'elle donne lieu à une force de gravité attractive, subit l'effondrement gravitationnel – ce qui pour la matière ordinaire, donne lieu à la formation d'étoiles ou de galaxies, etc... On parle de « matière noire », qui constitue environ 23% de la masse de l'Univers. Il pourrait s'agir de **particules nouvelles**, prévues par certaines extensions théoriques du Modèle Standard des interactions élémentaires, suffisamment massives pour n'avoir encore jamais été observées dans les expériences étudiant les collisions effectuées par des accélérateurs de particules. Les 72% restant sont nettement plus mystérieux, donnant lieu, en particulier, à une force de gravité répulsive à grande distance, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers observée récemment. Nous traversons actuellement une nouvelle phase d'inflation (voir « Théorie ») ! Mais une expansion quand même nettement plus lente que l'inflation des premiers âges de l'Univers. Pour désigner ces 72% mystérieux, on parle « d'énergie noire ».

Les tentatives d'explication théorique de ce phénomène suivent essentiellement deux pistes : la première consiste à supposer que les lois de la gravitation décrites par la relativité générale d'Einstein ne sont plus valables à très grande distance et doivent être modifiées ; la seconde postule l'existence d'une nouvelle forme de « matière », génériquement appelée « quintessence », dont l'influence gravitationnelle est telle qu'elle donne lieu au phénomène observé. Les données observationnelles



Deux représentations graphiques du contenu en énergie de l'Univers, avec sa part directement observée... et le reste !

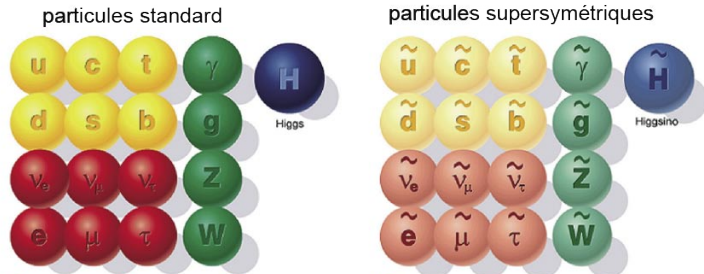




Combien pèse le vide ?

Particules nouvelles

La plupart des extensions du Modèle Standard des particules et interactions élémentaires (voir Élémentaire N°6), qui visent à unifier les interactions connues, ou à fournir des explications à des faits qui sont de simples hypothèses du Modèle Standard, prévoit l'existence de nouvelles particules et/ou interactions, activement recherchées par les physiciens. Certaines sont stables, d'autres interagissent très peu avec la matière ordinaire ou ont des temps de vie extrêmement longs, de l'ordre de l'âge de l'Univers et pourraient donc être présentes en quantité non négligeable aujourd'hui. En général, ces particules n'interagissent que très peu avec la matière ordinaire. Toutes, cependant, se comportent, d'un point de vue gravitationnel, comme cette dernière. Celles qui satisfont à ces critères sont autant de candidates possibles pour expliquer la matière noire. Parmi les nommées, nous trouvons les neutralinos, particules neutres et stables, prévues par les théories supersymétriques; ou encore le (ou les) neutrino(s) supermassif(s) prévu(s) par les extensions du Modèle Standard cherchant à expliquer la masse des neutrinos connus. Mais il y en a bien d'autres.



Dans les théories supersymétriques, chaque particule connue est associée à un partenaire, une particule de nature différente. Ces particules seraient très massives, de sorte qu'elles n'ont pas encore été observées dans les accélérateurs de particules. La particule supersymétrique la plus légère est un bon candidat pour la matière noire de l'Univers.

actuelles, si elles ne permettent pas de trancher, semblent légèrement favoriser la première hypothèse et, en particulier, la modification la plus simple possible de la théorie d'Einstein, modification introduite... par Einstein lui-même en 1917.

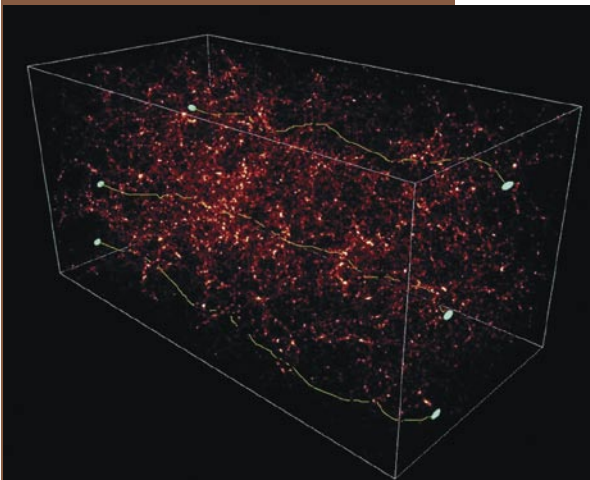
Une (grande) constante...

En effet, Einstein, appliquant sa toute nouvelle théorie de la relativité générale à l'Univers dans son ensemble, introduit un terme dans ses équations, baptisé « constante cosmologique », dont le rôle est de permettre l'existence de solutions statiques (sans expansion), qui lui semblent les seules satisfaisantes. Plus tard, il mentionnera cet épisode comme sa plus grande erreur. Toujours est-il qu'un tel terme est permis par les postulats de base de la relativité générale et n'a, a priori, aucune raison d'être nul. Selon son signe, il peut soit ralentir l'expansion (et même l'annuler, comme le souhaitait Einstein initialement), soit l'accélérer !

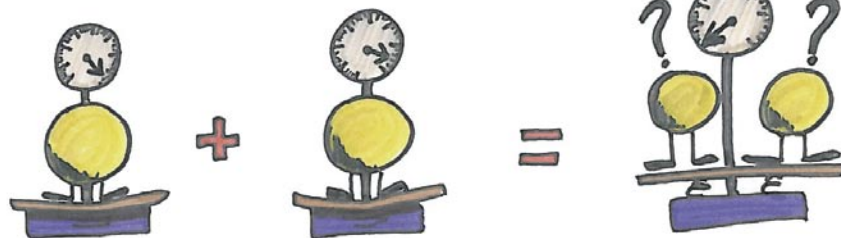
À lui seul, ce terme permet de rendre compte de l'accélération récente de l'Univers de manière très économique sans recourir à de nouveaux principes ou inventer de nouvelles formes exotiques de matière. Problème résolu ? Ce serait compter sans les principes de base de la mécanique quantique qui, s'ils ne permettent pas d'exclure cette solution, la rendent très insatisfaisante. Voyons cela de plus près.

... plus une (grande) constante...

La mécanique quantique implique l'existence d'une constante cosmologique. En effet, un système quantique ne peut jamais être véritablement « au repos » au sens classique du terme, c'est-à-dire avec une position donnée et une vitesse nulle. En vertu du principe de Heisenberg, position et vitesse ne peuvent avoir simultanément des valeurs parfaitement déterminées. Elles ont, au contraire, des valeurs qui fluctuent « inévitablement » : on parle de **fluctuations quantiques**. Il s'ensuit que tout système quantique, même dans son état de plus basse énergie, l'état « fondamental », a une énergie non nulle et, par conséquent, pèse ! C'est le cas, en particulier, de l'état fondamental d'un système de particules quantiques. On l'appelle aussi « vide » car il



Une simulation numérique de la répartition de matière noire dans un cube d'un milliard d'années-lumière de côté. Le trajet de rayons lumineux émis par des galaxies lointaines est représenté en jaune : selon la relativité générale, la présence de matière (noire) dévie ces rayons !



Combien pèse le vide ?

correspond à l'état vide de particules – ici les quantités qui fluctuent ne sont pas les positions et les vitesses (il n'y a aucune particule dans ce vide...), mais les **champs** associés aux différents types de particules connues, tels les champs électrique et magnétique associés au photon (voir Élémentaire N°6). Donc, le vide pèse et, tenez vous bien : l'effet gravitationnel des fluctuations quantiques du vide est strictement identique à celui d'une constante cosmologique ! Il semblerait que le problème de l'énergie noire soit en passe d'être résolu, avec la seule physique connue. Eh bien non !

... égal une (petite) constante ?

En effet, les estimations théoriques montrent que, dans le cadre du Modèle Standard, la contribution des fluctuations quantiques du vide à la constante cosmologique (le « poids du vide ») est beaucoup trop importante par rapport à la valeur mesurée, et ce de plusieurs dizaines d'ordres de grandeur (un ordre de grandeur correspondant à un facteur 10) ! Mais non contente d'être incompatible avec la valeur mesurée, cette contribution qui, rappelons-le, provient de la seule « physique connue », est incompatible avec notre existence, avec l'existence même de notre Univers. En effet, une telle valeur de la constante cosmologique aurait donné lieu à une expansion exponentielle de l'univers dans ses tous premiers instants, ne permettant pas la formation des premiers noyaux, atomes, l'allumage des premières étoiles etc... Courrons-nous à la catastrophe !? Pas complètement.

La constante introduite par Einstein qui, comme nous l'avons dit plus haut, est a priori non nulle, fournit une autre contribution, classique celle-là, à la constante cosmologique. La valeur mesurée est donc une valeur effective, somme des contributions classique et quantique. Il suffit d'ajuster la contribution classique pour que la somme des deux soit compatible avec la valeur observée. Nous voilà sauvés ?

L'insoutenable légèreté du vide

Cette solution, tout à fait cohérente, est pourtant loin d'être satisfaisante pour les (esprits retards des) physiciens. En effet, il faut viser juste ! La constante classique d'Einstein doit être ajustée avec une précision extrême, sur plusieurs dizaines de décimales. Ceci signifie que pour une raison obscure, notre Univers, loin de correspondre à une solution générique des équations de la Physique, en est, au contraire, une solution très particulière, très

Fluctuations quantiques

En mécanique classique, l'état d'une particule ponctuelle est, à tout instant, complètement déterminé par la donnée de sa position et de sa vitesse : connaissant les valeurs de ces dernières à un moment donné, les lois de la mécanique classique permettent de prédire l'état de la particule (position et vitesse) à tout instant ultérieur (ou antérieur), c'est-à-dire la trajectoire de la particule. En particulier, on obtiendra invariablement le même résultat si on répète un grand nombre de fois la même expérience, en préparant notre particule invariablement et strictement dans le même état de départ, et en mesurant sa position et sa vitesse à un instant ultérieur (si on omet les incertitudes expérimentales dans la préparation et la mesure).

Les choses sont bien différentes en mécanique quantique. En général, on ne peut pas prédire avec une assurance parfaite le résultat de la mesure d'une quantité (observable). On peut seulement prédire la probabilité que la mesure d'une observable aboutisse à telle ou telle valeur. En d'autres termes, si on répète un grand nombre de fois une même mesure, on n'obtient en général pas le même résultat : on dit que l'observable en question « fluctue ». Si ces fluctuations quantiques sont petites (en particulier devant les inévitables incertitudes expérimentales relatives à la préparation de l'expérience et à la mesure), la mécanique classique fournit une description approximativement correcte.

Champs

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui combine relativité restreinte et mécanique quantique, les particules ne sont plus l'objet central de la description mathématique. Elles sont les excitations élémentaires d'un objet plus fondamental : le champ. Ce dernier est une fonction prenant des valeurs différentes en différents points de l'espace-temps. En guise d'illustration, on peut imaginer un « champ » qui mesure la hauteur de l'eau sur l'océan par rapport à un certain niveau de référence. Ce champ prend des valeurs différentes à différents endroits. Les excitations élémentaires de ce champ sont des vagues qui se propagent sur l'océan. En mécanique quantique, la hauteur des vagues ne peut prendre que certaines valeurs précises (on dit qu'elles sont « quantifiées ») et ces « vagues élémentaires » ne sont autres que les particules. Il existe un type de champ pour chaque type de particule. Une conséquence remarquable de la théorie des champs est qu'elle permet d'expliquer pourquoi toutes les particules d'un même type (par exemple, tous les électrons de l'Univers) ont exactement les mêmes caractéristiques (masse, charge, etc.) : elles sont les excitations d'un seul et même champ (tout comme une vague sur l'Océan Indien n'est pas intrinsèquement différente d'une vague sur la Méditerranée).



La question qui tue!

Combien pèse le vide ?

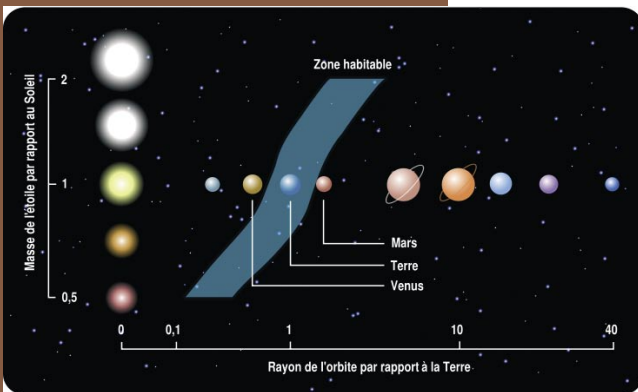


peu naturelle. On parle d'un problème d'ajustement fin ou de « fine tuning » en anglais. Une erreur minime dans cet ajustement donne lieu à des conséquences désastreuses quant à l'évolution de l'univers qui en résulte (absence de formation de galaxies etc).

On peut adopter deux attitudes face à une telle situation. La première est de penser qu'il s'agit d'une coïncidence, d'un hasard. Après tout, contrairement aux autres domaines de la physique, nous n'avons qu'un seul Univers sous la main, c'est-à-dire qu'une seule solution des équations. Il n'y a pas de raison de s'attendre à ce qu'il corresponde à une solution générique. Il y a d'autres exemples de telles situations en physique. Le rayon de l'orbite sur laquelle s'est formée la Terre doit être très finement ajusté pour permettre l'apparition de la vie telle que nous la connaissons. Notre planète n'est donc pas un cas générique. Pour les planètes, on peut

le vérifier car on connaît de nombreux autres cas où la vie ne s'est pas développée. On parle de principe « anthropique » : les paramètres décrivant notre Univers doivent être compatibles avec l'apparition de l'espèce humaine (laquelle peut être prise comme un fait expérimental)... et peu importe si ce choix nous semble peu naturel !

À l'inverse, on peut penser que le problème d'ajustement fin de la constante cosmologique signale que quelque chose de plus profond nous échappe. L'ajustement fin ne serait pas un hasard, mais la conséquence d'une nouvelle loi de la physique encore à découvrir. Ou encore, il se peut que notre compréhension limitée des effets de gravité quantique soit à l'origine du problème.



Un exemple d'ajustement fin lié au principe anthropique : pour voir apparaître la vie sur Terre, basée sur la présence d'eau liquide et de molécules carbonées, il faut que notre planète ne soit ni trop chaude ni trop froide. Des situations différentes en ce qui concerne la position de la Terre et la masse du Soleil n'auraient pas permis à l'être humain d'apparaître... et de s'interroger sur les problèmes d'ajustement fin dans notre Univers.

Ce problème, soulevé par l'observation de l'Univers récent, est une des grandes questions de la cosmologie actuelle. Sa résolution ouvrira peut-être les portes de mondes inconnus dans le domaine de la physique des très hautes énergies, jusqu'ici chasse gardée de la cosmologie primordiale.

