

Comment s'en débarrasser

ou

La douloureuse histoire de la constante cosmologique (1917 - ?)

Née pour résoudre un problème en fait inexistant, la constante cosmologique lui survécut et devint elle même une difficulté majeure du mariage entre gravitation et théorie quantique : sa valeur théorique est 10^{12} fois trop grande ! Comment s'en débarrasser est aujourd'hui le souci commun de la physique théorique et de l'astronomie.

1 - Naissance de la constante cosmologique

La constante cosmologique est un enfant d'Albert Einstein. En 1915, il venait d'achever la théorie de la Relativité Générale, qui est essentiellement une théorie de la gravitation incorporant et dépassant celle d'Isaac Newton. Il voulut alors l'appliquer à l'univers tout entier, et ce fut une catastrophe : ses équations lui disaient que l'univers n'est pas statique. Autrement dit, étoiles et galaxies ne peuvent rester à leur place parce que la gravitation est universellement attractive, et que rien ne les empêche de se rapprocher sans cesse *. C'était une catastrophe, parce que tout le monde pensait alors que l'univers à grande échelle était statique (à petite échelle, évidemment, les planètes se déplacent bien autour des étoiles, et celles-ci à l'intérieur des galaxies). Pour contrebalancer l'attraction gravitationnelle, Einstein eut alors l'idée en 1917 d'ajouter une force répulsive qui augmenterait avec la distance. En la choisissant assez faible pour être totalement négligeable à l'échelle du système solaire, il n'y aurait pas de difficulté avec les observations astronomiques qui n'en montraient aucune trace. Mais elle deviendrait dominante à très grande distance (la taille des amas de galaxies par exemple) et cette répulsion pouvait alors empêcher l'effondrement gravitationnel

* Le problème s'était déjà posé au temps de Newton, qui s'en était tiré par une pirouette en affirmant que, dans un univers illimité, les étoiles n'auraient aucune raison d'aller plutôt dans une direction que dans une autre, et qu'elles resteraient donc immobiles

prévu par la théorie. Ce terme répulsif augmentant avec la distance est la constante cosmologique.

Mais pourquoi l'appelle-t-on "constante" ? Revenons à la Relativité générale. Elle affirme que la gravitation n'est pas réellement une force mais seulement une déformation de la géométrie de l'espace et du temps, déformation proportionnelle à la quantité d'énergie présente. Cette énergie est le plus souvent sous forme de masse, mais peut aussi bien être sous forme de rayonnement. L'équation peut s'écrire (très) symboliquement :

$$\text{Déformation de la géométrie} = \text{Energie (matière + rayonnement)} \quad (1)$$

Qu'a fait Einstein? Il a remarqué qu'il pouvait généraliser un peu l'équation en écrivant :

$$\text{Déformation de la géométrie} - \mathbf{Constante} = \text{Energie (matière + rayonnement)} \quad (2)$$

où la constante était arbitraire du point de vue mathématique. Le terme "Géométrie" donnait la force attractive classique, décroissant avec la distance, et la "Constante" le terme répulsif augmentant avec la distance. D'où le nom de "constante cosmologique". Il obtenait ainsi un univers statique, mais courbé (l'équivalent à trois dimensions de la surface d'une sphère), pour une valeur de la constante très précisément liée à la valeur moyenne de la densité d'énergie. En bon disciple d'Ernst Mach, Einstein était d'ailleurs très heureux de ce lien entre géométrie de l'univers et densité d'énergie.

2 - Une enfance triste

Tout allait bien, quand trois malheurs survinrent l'un après l'autre. D'abord, Willem de Sitter montra dès 1917 que, même en l'absence d'énergie, il existait des solutions apparemment statiques * de l'équation (2) et que le lien entre géométrie de l'univers et densité d'énergie n'était pas si solide qu'Einstein l'avait espéré.

Le second malheur est que l'univers statique d'Einstein est instable. Pour une valeur donnée de la constante cosmologique, il n'est statique que pour une valeur

* En fait, localement, les conditions physiques ne changent pas au cours du temps dans l'univers de de Sitter, mais les distances croissent exponentiellement. Cet univers, fort peu statique en réalité, est très à la mode en ce moment, car les astronomes spéculent sur la possibilité que notre univers ait brièvement traversé une phase de de Sitter en sa prime jeunesse (ce que l'on appelle l'inflation de l'univers).

précise de la densité d'énergie. Un petit excès d'énergie, même local, et l'attraction l'emporte sur la répulsion, ce qui augmente encore la densité d'énergie. Le processus s'accélère et conduit à un effondrement. Un petit manque d'énergie, et c'est la répulsion qui l'emporte et diminue la densité. Le processus s'accélère et conduit cette fois à une dilution illimitée. Comme on ne voit pas pourquoi la densité moyenne d'énergie aurait exactement la bonne valeur, et que de toute façon cette densité fluctue d'un endroit à l'autre (elle est en particulier beaucoup plus grande dans une galaxie qu'en dehors!), la présence d'une constante cosmologique ne permet pas vraiment un univers statique.

Le troisième malheur est aussi le plus grand : Howard Robertson et Edwin Hubble montrèrent en 1928 que l'univers est en expansion. Il échappe à l'effondrement, au moins temporairement, en se dilatant. La constante cosmologique n'était plus indispensable : le problème qu'elle devait résoudre, comment assurer un univers statique dans une théorie de la gravitation, avait disparu.

Si Einstein n'était pas parti de l'idée préconçue que l'univers était statique, il aurait probablement prédit l'expansion de l'univers avant sa découverte observationnelle. On dit qu'il se référait à l'invention de la constante cosmologique comme à la plus grosse erreur de sa vie. Il est intéressant de noter qu'Alexandre Friedmann avait obtenu dès 1922 des solutions de l'équation d'Einstein décrivant un univers en expansion, mais son travail n'a pas été immédiatement reconnu.

3 - Les années d'oubli

Comme le génie de la légende, la constante cosmologique ne voulut pas disparaître quand on n'en eut plus besoin. En effet, même si elle était désormais inutile, rien n'interdisait son existence et il était nécessaire d'examiner toutes les conséquences cosmologiques qui pouvaient découler de sa présence. Georges Lemaître explora vers 1927-1930 toute une série de modèles, généralisant les modèles de Friedmann et tenant compte de la présence d'une constante cosmologique.

Elle se manifeste en accélérant ou en ralentissant (selon son signe) l'expansion de l'univers. Sa valeur est donc expérimentalement limitée par les mesures de la vitesse d'expansion comparée aux mesures de la densité moyenne d'énergie dans l'univers. La constante cosmologique n'est pas un nombre pur, mais le carré de l'inverse d'une longueur, et cette longueur est précisément la distance à laquelle l'effet répulsif devient important. Comme on ne voit aucune trace de cet effet dans les observations des galaxies les plus éloignées, cette longueur est plus grande que la distance de ces galaxies, soit à peu près dix milliards d'années-lumière ou 10^{26} m.

L'expansion dilue la matière de l'univers, qui était donc beaucoup plus dense autrefois. Par conséquent, la constante cosmologique était encore plus négligeable que maintenant, et elle n'a pu jouer qu'un rôle mineur tout au long du big-bang. Les astrophysiciens cessèrent donc de s'y intéresser.

4 - Un retour non désiré

La constante cosmologique réapparut sur le devant de la scène dans les années 70, quand les physiciens des particules commencèrent à se préoccuper des conséquences cosmologiques de leurs modèles unifiant les interactions nucléaires et électromagnétique. On réalisa alors que la mécanique quantique permet de calculer la valeur de certaines contributions à la constante cosmologique. Malheureusement, l'accord n'est pas très bon : le résultat obtenu est 10^{112} fois trop grand!

Que se passe-t-il ? La constante cosmologique modifie la vitesse d'expansion, et se comporte donc un peu comme une forme (très particulière) d'énergie. L'analogie peut en fait être poussée beaucoup plus loin, car l'équation (2) peut se réécrire :

Déformation de la géométrie = Energie (matière + rayonnement) + Constante (3)

Un pas de plus, et on interprète la constante cosmologique comme la densité d'énergie d'un lieu sans matière ni rayonnement, c'est-à dire comme l'énergie du vide, et on obtient :

Déformation de la géométrie = Energie (matière + rayonnement + **vide**) (4)

Mais comment le vide, le néant, peut-il avoir une énergie? C'est là qu'intervient la mécanique quantique. Pour elle, le vide n'est *jamais* réellement vide mais, à cause des célèbres inégalités de Heisenberg (ou relations d'incertitude), il est toujours rempli de particules dites "virtuelles" car leur existence est d'autant plus brève qu'elles possèdent plus d'énergie. Ces particules virtuelles ne sont pas directement détectables, mais leurs effets indirects le sont bel et bien : par exemple, si elles portent une charge électrique, cette charge modifie de façon mesurable les propriétés électriques de l'espace. Tout cet océan de particules virtuelles, que l'on appelle le "vide", possède une énergie qui s'ajoute à celle des particules "réelles", et entre donc nécessairement dans les bilans d'énergie. Mais l'énergie du vide n'intervient pratiquement jamais en physique, car en général seules les variations d'énergie sont mesurées et l'énergie (constante) du vide disparaît dans le calcul de ces variations. L'exception est la gravitation : toutes les formes d'énergie sont source de gravitation, et l'énergie du vide comme les autres!

Bon d'accord, la mécanique quantique rend inévitable la présence d'une constante cosmologique, *alias* énergie du vide. Où est le problème ? Le problème est dans la valeur calculée. D'abord, dans de nombreux modèles de physique des particules, elle est infinie. Cela ne permet d'ailleurs pas de "tuer" ces modèles, car il existe des techniques raffinées pour compenser ces infinis par d'autres infinis, et obtenir un résultat fini et raisonnable. Mais surtout, il existe dans ces modèles des échelles naturelles de longueur. Et la contribution de chaque type de particule à l'énergie du vide conduit naturellement à une constante cosmologique égale au carré de l'inverse de cette longueur caractéristique du modèle. Mais ces longueurs sont bien sûr microscopiques ! Elles sont reliées à la taille des particules élémentaires comme le proton ou le neutron (10^{-15}m) par exemple, ou à l'énergie à laquelle les forces nucléaires et électromagnétique deviennent unifiées (10^{-17}m). Les plus ambitieuses de ces théories tentent de construire une théorie quantique de la gravitation, et l'échelle de longueur à laquelle se ferait ce mariage est la "longueur de Planck" (10^{-35}m).

Dans tous les cas, on est très loin des longueurs "astronomiques" qu'indique la non-observation d'un quelconque effet attribuable à la présence d'une constante cosmologique. L'écart entre la borne expérimentale astrophysique (le carré de l'inverse de la taille de l'univers visible) et la valeur théorique (le carré de l'inverse de la longueur de Planck) est de $(10^{26}\text{m}/10^{-35}\text{m})^2 = 10^{112}$. C'est certainement le plus mauvais accord jamais réalisé entre théorie et expérience !

5 - Comment s'en débarrasser ?

Que faire devant ce désastre théorique ? Il y a différentes possibilités, dont aucune n'est bien convaincante. D'abord, les contributions individuelles des nombreux types de particules se compensent peut-être. Une compensation accidentelle d'un grand nombre de termes, dont la somme serait 10^{112} fois plus faible que chacun pris séparément est hautement improbable. Par conséquent, une telle solution suppose l'existence d'une symétrie entre les particules. Cela peut marcher, dans la mesure où certaines particules ont des contributions positives (les "bosons", comme le photon) et d'autres ont des contributions négatives (les "fermions", comme le proton, le neutron ou l'électron). Une telle symétrie entre bosons et fermions est très à la mode en ce moment chez les physiciens des particules, sous le nom de supersymétrie, mais elle ne peut être qu'une symétrie approchée car on n'a jamais vu de fermion ayant les propriétés du photon, ni de boson ayant les propriétés de l'électron (masse, charge électrique, etc.). Dans ce cas, les contributions des bosons et des fermions ne se

compensent pas exactement, il reste un écart du même ordre que la différence entre les échelles caractéristiques des uns et des autres, soit dans le meilleur des cas entre 10^{-15}m et 10^{-17}m . L'écart entre théorie et expérience s'améliore : il n'y a plus qu'un facteur $(10^{26}\text{m}/10^{-15}\text{m})^2 = 10^{82}$!

Une autre possibilité serait de modifier la théorie de la gravitation d'Einstein. Les efforts en ce sens visent en général à empêcher que la constante cosmologique reçoivent des contributions des particules, mais les résultats ne sont pas très satisfaisants. De toute façon, cela n'expliquerait pas pourquoi elle est si petite, mais lui permettrait simplement d'être petite.

Une possibilité très séduisante, et intensivement étudiée en ce moment, est de soutenir qu'il faut tenir compte de tous les effets quantiques, y compris ceux de la gravitation elle-même. La difficulté est qu'il n'existe pas encore de théorie quantique de la gravitation... Les efforts actuels consistent donc à deviner intuitivement les conséquences probables de cette théorie. Stephen Hawking a défendu un moment l'idée que la constante cosmologique a vraiment une valeur énorme à très courte distance, ce qui déformerait considérablement l'univers en le rendant très courbé sur des distances de l'ordre de 10^{-35}m , mais que sur des distances beaucoup plus grandes ces fluctuations se moyennent à zéro (un peu comme un bain de mousse, plat vu de loin, et très chaotique vu de près). Mais pourquoi à zéro ? Dans un univers quantique, la constante cosmologique n'a pas en principe une valeur précise, mais une distribution de probabilité dans la quelle certaines valeurs sont plus probables que d'autres. On essaie donc de construire des modèles dans lesquels la valeur zéro aurait une probabilité quasiment égale à 1. Mais le sujet est très difficile, et il va sans dire que la matière est sujette à de nombreuses controverses entre experts!

Il existe une approche complètement différente : si la constante cosmologique était vraiment aussi grande, il n'y aurait personne pour se poser la question car il n'y aurait ni Terre, ni Soleil, ni galaxies. Une grande constante positive accélérerait tellement l'expansion qu'étoiles et galaxies n'auraient pas eu le temps de se former avant que la densité de l'univers devienne trop ténue. Une grande constante négative conduirait à une recontraction si rapide que la vie n'aurait pas eu le temps de se développer sur Terre. Donc notre existence même interdit une valeur trop élevée (c'est une application du "principe anthropique" *). Cela suppose que la valeur de la

* Il existe plusieurs versions de ce "principe", dont la plus acceptable explique que si nous occupons cette partie de l'univers et pas une autre, c'est parce que les conditions physiques y favorisent notre forme de vie. Une version extrême affirme que les lois de la nature nécessitent la présence d'observateurs conscients à un certain moment.

constante cosmologique puisse varier de place en place, et que nous habitons un lieu particulier où elle est assez faible pour avoir permis notre existence.

6 - Epilogue provisoire

Le problème de la constante cosmologique est certainement un des points de rencontre entre microcosme et macrocosme les plus spectaculaires, et peut-être le plus prometteur pour le développement futur de la physique des particules et de la cosmologie. Steven Weinberg note que les grandes crises du passé en physique ont permis les progrès les plus spectaculaires, généralement au prix de réajustements majeurs de nos modes de pensée. En sera-t-il de même cette fois encore ?