

La réalité virtuelle

Si les particules virtuelles changent les propriétés des atomes, modifient-elles aussi l'expansion de l'Univers? En 1967, l'astrophysicien soviétique Yakov Zeldovich a montré que l'énergie des particules virtuelles devait agir précisément comme l'énergie associée à la constante cosmologique. Toutefois, les calculs de mécanique quantique révélèrent une surprise : ils conduisaient à la prévision de l'existence d'un ensemble de particules virtuelles qui couvrent toutes les longueurs d'onde possibles ; lorsqu'on additionnait les effets de toutes ces particules, l'énergie totale devenait infinie. Même quand on négligeait les effets quantiques inférieurs à une certaine longueur d'onde, pour lesquels la combinaison du comportement gravitationnel et quantique est mal connue, l'énergie du vide calculée était 120 ordres de grandeur supérieure à celle de l'énergie contenue dans toute la matière de l'Univers!

Quel pourrait être l'effet d'une constante cosmologique aussi gigantesque? Nous pouvons facilement imposer une limite supérieure à sa valeur. Tendons le bras et regardons nos doigts. Si la constante cosmologique était aussi grande que le suggère naïvement la théorie quantique, l'espace entre nos yeux et notre main se dilaterait si vite que la lumière émise par la main n'atteindrait jamais les yeux. Le fait que nous puissions voir non seulement jusqu'au bout de notre bras, mais également jusqu'aux confins de l'Univers impose une limite supérieure à cette constante : environ 120 ordres de grandeur inférieure à l'estimation mentionnée! Cette incompatibilité entre la théorie et les observations est la plus grande et la plus troublante de toute la physique moderne (voir *Le mystère de la constante cosmologique*, par Larry Abbott, in *Pour la Science*, juillet 1988).

Pour remédier à cette difficulté, on suppose qu'une loi physique encore inconnue annule la constante cosmologique. Les théoriciens aimeraient bien se débarrasser de cette constante, mais diverses observations astronomiques – l'âge de l'Univers, la densité de matière et la nature des structures cosmiques – suggèrent indéniablement qu'elle pourrait n'être pas tout à fait nulle.

Quel est l'âge de l'Univers? Cette question est l'une des plus lancinantes de la cosmologie moderne. En mesurant les vitesses des galaxies, les astronomes calculent le temps qu'il leur a fallu pour atteindre leurs positions actuelles, en supposant qu'elles soient toutes issues du même endroit. Si l'Univers se dilate à vitesse constante (en première approximation, on peut ignorer le ralentissement dû à la gravité), l'âge de l'Univers serait le quotient de la distance intergalactique par la vitesse de séparation, c'est-à-dire l'inverse de la célèbre constante de Hubble.

Plus la valeur de la constante de Hubble est élevée, plus la vitesse d'expansion est rapide et plus l'Univers est jeune.

Hubble estimait que sa constante éponyme était égale à environ 500 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un mégaparsec correspond environ à trois millions d'années-lumière). Autrement dit, deux galaxies éloignées d'un mégaparsec s'écartent de 500 kilomètres par seconde. Cette estimation est manifestement fautive, car elle conduit à un âge de l'Univers de deux milliards d'années inférieur à l'âge de la Terre (environ quatre milliards

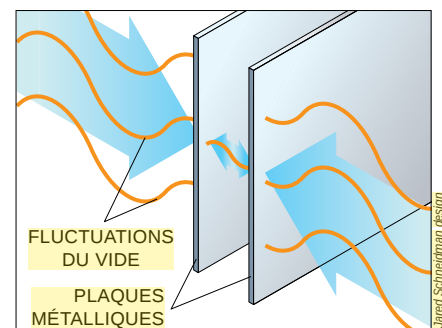


Einstein Archives, University of Zurich

3. CETTE LETTRE D'EINSTEIN au mathématicien allemand Hermann Weyl concède qu'un univers de taille constante serait instable et devrait se dilater ou se contracter : «Dans l'Univers de De Sitter, deux points fluides et instables se séparent à vitesse croissante. S'il n'y a pas de monde quasi statique, alors au diable le terme cosmologique.»



Steve K. Lamoreaux, Los Alamos National Laboratory



Jared Schneidman design

4. L'EFFET CASIMIR met en évidence que le vide est peuplé de «particules virtuelles». Cet effet correspond à une attraction entre des objets métalliques – par exemple, une force attractive entre deux plaques métalliques parallèles (en haut). L'espacement fini entre les plaques empêche la matérialisation dans l'interstice de particules virtuelles plus grandes qu'une certaine longueur d'onde. Comme il y a alors plus de particules à l'extérieur des plaques qu'entre elles, les plaques se rapprochent (à droite). L'effet Casimir dépend clairement de la forme des plaques, ce qui permet aux physiciens de l'isoler des autres forces de la nature.

d'années). Si l'on tient maintenant compte de l'attraction gravitationnelle de la matière, on calcule que les objets se déplaçaient plus vite dans le passé, et que leurs positions actuelles sont donc atteintes plus rapidement que si leur vitesse avait été constante. Cette nouvelle hypothèse réduit encore d'un tiers l'âge estimé, ce qui aggrave la contradiction.

Au cours des 70 dernières années, les astronomes ont affiné leur détermination de la vitesse d'expansion, mais ils n'ont pas réussi à éliminer la difficulté. Avec le lancement du télescope spatial *Hubble* et le développement de nouvelles techniques d'observation, les mesures de la constante de Hubble de ces dix dernières années (entre 50 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec) commencent finalement à converger. Selon l'une des dernières estimations, la valeur de la constante de Hubble serait comprise entre 65 et 81, avec une valeur la plus probable égale à 73 kilomètres par seconde et par mégaparsec (voir *L'expansion de l'Univers*, par Wendy Freedman, in *Pour la Science*, janvier 1993). Ces résultats placent la limite supérieure sur l'âge d'un univers plat à environ dix milliards d'années.

La crise de l'âge

Cette valeur résout-elle les conflits? Hélas non, car les astronomes observent des objets ayant plus de dix milliards d'années. Les amas globulaires sont parmi les objets les plus anciens de notre Galaxie. Ces groupes denses d'étoiles situés pour la plupart à sa périphérie se sont probablement formés avant le reste de la Voie lactée. En se fondant sur la vitesse à laquelle ces étoiles consomment du combustible nucléaire, on estime que leur âge est compris entre 15 et 20 milliards d'années. C'est plus que les dix milliards annoncés!

En 1995, afin de déterminer si ce conflit d'âge provenait de la cosmologie ou de la modélisation stellaire, nous avons réévalué l'âge des amas globulaires. Nous avons conclu que les amas les plus vieux avaient jusqu'à 12,5 milliards d'années, ce qui

Résumé des valeurs déduites de la densité de matière cosmique

Observation	$\Omega_{\text{matière}}$
Âge de l'Univers	< 1
Densité de protons et de neutrons	0,3-0,6
Amas de galaxies	0,3-0,5
Évolution des galaxies	0,3-0,5
Fond diffus cosmologique	≤ 1
Supernovae de type Ia	0,2-0,5

5. LES MESURES de la contribution matérielle à Ω sont à peu près concordantes (on note Ω le quotient de la densité mesurée et de la densité critique ; $\Omega = 1$ correspond à un univers plat). Bien que chaque type de mesures soit contestable, la plupart des astronomes acceptent aujourd'hui que la matière seule ne rende pas Ω égal à un. Toutefois, d'autres formes d'énergie, comme la constante cosmologique, pourraient y contribuer.

contredisait toujours l'âge d'un univers plat, dominé par la matière.

Voici deux ans, le satellite *Hipparcos* de l'Agence spatiale européenne mesura les positions précises de plus de 100 000 étoiles ; leurs distances, ainsi que celles des amas globulaires, furent réévaluées. Ces nouvelles mesures ont conduit à recalculer l'âge des étoiles, car les nouvelles luminosités absolues, déduites des distances, correspondent à des vitesses différentes de consommation du carburant nucléaire par les étoiles et, donc, à des durées de vie différentes de celles qui avaient été calculées. Compte tenu des erreurs d'observation, il semble maintenant que les amas globulaires pourraient avoir seulement dix milliards d'années, ce qui serait compatible avec les âges cosmologiques.

Toutefois, cet accord marginal est inconfortable, parce qu'il requiert que les déterminations soient chacune à l'extrémité de l'intervalle possible. Pourquoi, alors, ne pas admettre que nous ne vivons pas dans un Univers plat dominé par la matière? Si nous acceptons de vivre dans un Univers peu dense, ouvert, et dont la décélération serait moins rapide, les difficultés s'amenuiseraient. Toutefois, même ainsi, l'âge de l'Univers n'est supérieur à 12,5 milliards d'années que si l'Univers est dominé non pas par la matière, mais par une constante cosmologique : la force

répulsive résultante accélérerait l'expansion ; les galaxies s'éloigneraient plus lentement qu'aujourd'hui, mettant plus de temps pour atteindre leurs séparations actuelles, de sorte que l'Univers serait plus vieux.

Alors que les cosmologistes évoquaient ces idées, d'autres observations ont contribué à ébranler l'édifice théorique classique. Notamment, les astronomes ont sondé des régions toujours plus grandes du cosmos et mieux recensé la matière qui s'y trouvait. Il est aujourd'hui clair que la quantité totale de matière est insuffisante pour que l'Univers soit plat.

Pour obtenir un recensement précis de la matière de l'Univers, les astronomes doivent estimer la synthèse des éléments légers au cours du Big Bang. Les éléments légers

du cosmos – l'hydrogène, l'hélium et leurs isotopes plus rares, tel le deutérium – furent créés dans l'Univers primordial en quantités déterminées par le nombre de protons et de neutrons initialement présents. Ainsi, en comparant les proportions des divers isotopes, les astronomes déduisent la quantité totale de matière ordinaire produite peu après le Big Bang (il pourrait exister, bien sûr, une autre matière qui ne se composerait pas de protons et de neutrons).

Ces estimations progressèrent en 1996, lorsque David Tytler, Scott Burles et leurs collègues de l'Université de San Diego déterminèrent la quantité primordiale de deutérium en mesurant l'absorption de la lumière d'un quasar par des nuages d'hydrogène intergalactiques. Comme ces nuages n'ont jamais contenu d'étoiles, leur deutérium ne peut avoir été synthétisé que lors du Big Bang. L'étude de ce deutérium montre que la densité moyenne de matière ordinaire est seulement quatre à sept pour cent de la quantité totale nécessaire pour que l'Univers soit plat!

Les astronomes ont également évalué la densité de matière en étudiant les plus gros objets gravitationnellement liés de l'Univers : les amas de galaxies. Ces groupes de centaines de galaxies renferment l'essentiel de la matière visible. Ils sont principalement composés d'un gaz intergalactique