

L'idée d'un comportement dynamique de l'Univers (avec des accélérations ou des décélérations) associé à la quintessence séduit les cosmologistes. La principale difficulté inhérente à toute théorie de la quintessence tient à la quantité d'énergie du vide présente dans l'Univers : excessive, elle aurait entravé la formation des étoiles et des galaxies dans l'Univers primitif ; insuffisante, ses effets seraient imperceptibles aujourd'hui. Au sens d'Einstein, l'énergie du vide est complètement inerte, et sa densité n'évolue pas dans le temps. Si nous supposons que la densité d'énergie du vide n'a jamais varié, comment expliquer les effets répulsifs découverts récemment ? La seule solution est d'admettre que la valeur de la constante cosmologique (de l'énergie inhérente au vide) a été ajustée une fois pour toutes au moment de la création de l'Univers. Une autre solution existe si tout ou partie de l'énergie du vide est due à la quintessence. Cette dernière interagit avec la matière et évolue dans le temps ; elle se serait naturellement ajustée pour atteindre la valeur observée aujourd'hui.

L'énergie manquante

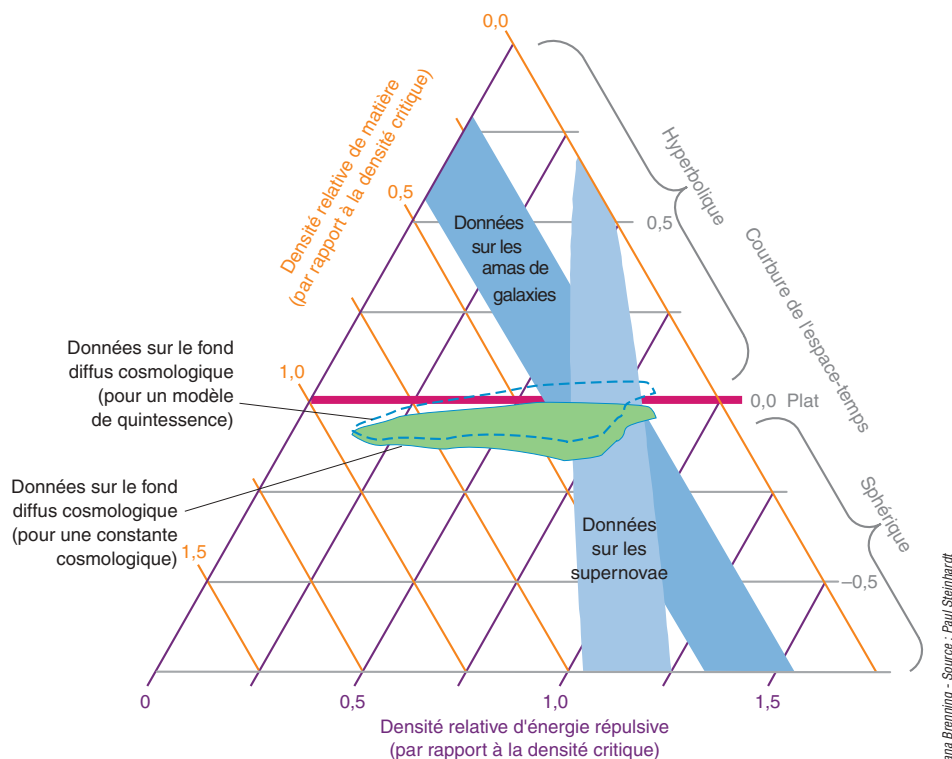
Quelle est la bonne option ? Jusqu'à présent, les physiciens des particules se sont servi de puissants accélérateurs pour découvrir de nouvelles formes d'interaction et de matière, et voilà que les observations faites dans le Cosmos mettent en évidence un nouveau type d'énergie. Cette énergie semble impossible à étudier par les méthodes classiques de la physique des particules, car elle interagit très peu avec la matière. Selon qu'elle sera inerte ou dynamique, son rôle dans la théorie unifiée de la nature dont rêvent les physiciens des particules sera différent. Eux qui ne scrutent d'ordinaire que l'infiniment petit dans leurs accélérateurs découvrent un nouveau et gigantesque laboratoire : l'Univers observé par les astrophysiciens.

L'hypothèse qu'il existe (dans le vide) une énergie aux effets répulsifs s'est petit à petit étayée au cours des dix dernières années. Un premier pas fut franchi lors de la réalisation d'un recensement le plus complet possible des galaxies et des amas de galaxies.

Diverses méthodes furent employées : observations dans le visible, dans le domaine des ondes radio et dans celui des rayons X. Cette étude confirma que la masse totale des éléments chimiques et de la matière noire ne peut expliquer que le tiers environ de la valeur de la densité d'énergie de l'Univers prévue par les théoriciens. Nommée densité critique, cette valeur est celle pour laquelle l'Univers est plat (rappelons que la courbure de l'Univers dépend de la quantité d'énergie qu'il contient).

Constatant un écart entre la valeur observée et la densité critique, de nombreux cosmologistes ont conclu que les théoriciens s'étaient trompés. La densité d'énergie observée par recensement de la matière impliquait un Univers hyperbolique et en incassante expansion. Toutefois, de nouvelles observations ont balayé cette possibilité. La répartition des zones chaudes et froides dans le fond diffus cosmologique – un rayonnement micro-onde uniformément réparti dans tout l'espace, censé être un vestige de l'explosion primordiale – a confirmé que l'espace est bien plat, et donc que la densité d'énergie moyenne de l'Univers est égale à la densité critique prévue par les théoriciens. Un simple calcul arithmétique montre alors que l'origine de deux tiers de l'énergie de l'Univers n'est pas identifiée.

Quelle que soit sa nature, cette composante n'absorbe aucune lumière et n'en émet pas, sinon elle aurait été détectée depuis longtemps. Elle ressemble donc à la matière noire, sauf en un point : les forces gravitationnelles qu'elle produit sont répulsives. Si ce n'était pas le cas, elle serait attirée par les galaxies et par les amas, où elle perturberait le mouvement de la matière visible. Or, rien de semblable ne se produit. Un autre aspect milite en faveur de l'existence d'une énergie du vide aux effets répulsifs. Son existence pourrait expliquer le « paradoxe des âges », qui gêne les cosmologistes depuis le début des années 1990. Quand on calcule l'âge de l'Univers à partir de la vitesse d'expansion cosmique actuelle, en supposant qu'elle diminue, on trouve que l'Univers aurait 12 milliards d'années. Or, on déduit de diverses mesures que certains objets célestes ont 15 milliards d'années. Toutefois, s'il existe des forces répulsives, l'expansion cosmique



2. LES VALEURS POSSIBLES des trois caractéristiques clés de l'Univers sont représentées sur ce graphe. Si l'Univers est plat, comme le suggère la théorie de l'inflation (l'expansion explosive de l'Univers à ses débuts), les différentes observations (les surfaces en couleur) et la ligne (en rouge) représentant un univers à courbure nulle doivent se recouvrir. C'est le cas ! Notons que les données sur les anisotropies du fond diffus cosmologique donne un meilleur recouvrement dans l'hypothèse où l'énergie du vide suit un modèle de quintessence (contour en pointillés) plutôt que celui de la constante cosmologique (zone verte).

Jana Brenning - Source : Paul Steinhardt

a pu s'accélérer, et l'Univers pourrait avoir plus de 12 milliards d'années. Les physiciens auraient ainsi une explication de l'âge apparent de l'Univers, dicté par celui des objets célestes les plus anciens.

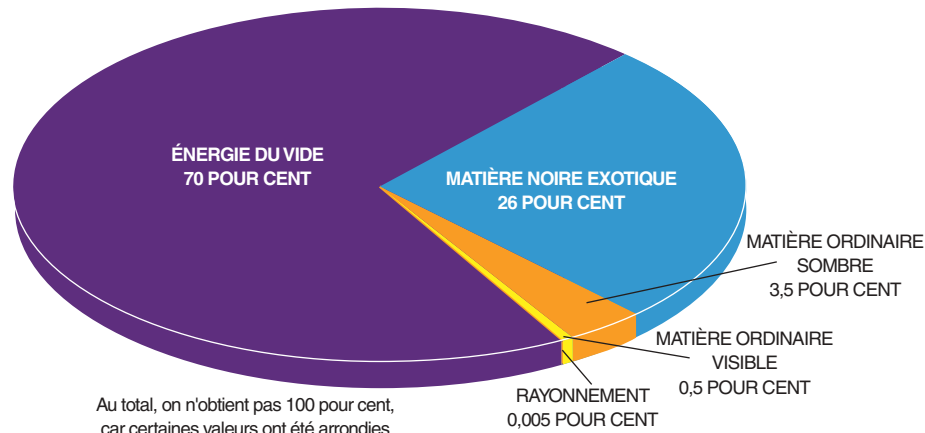
Ce raisonnement supposait que la répulsion gravitationnelle devait accélérer l'expansion de l'Univers... ce que l'on n'avait pas encore observé. Puis, en 1998, grâce à des mesures faites sur des supernovae éloignées, deux groupes d'astrophysiciens ont détecté un changement du taux d'expansion. Ils ont établi une accélération de l'Univers, et ce, exactement au rythme prédit par les partisans de l'hypothèse d'une importante énergie dans le vide.

En résumé, les arguments en faveur de l'existence d'une importante énergie du vide se résument à trois données : la densité moyenne de matière (visible et noire), la densité moyenne d'énergie du vide et la courbure de l'espace. Selon les équations de la relativité générale, la valeur de chacune de ces grandeurs doit être compatible avec un Univers à la densité critique. Les différentes combinaisons possibles sont représentées sur un graphe triangulaire (voir la figure 2). Les trois ensembles d'observations (la matière visible, le fond diffus cosmologique micro-ondes et les supernovae) correspondent à trois zones qui se recouvrent justement sur la ligne de courbure nulle. Un scénario comportant une forte énergie du vide semble donc incontournable !

De l'implosion à l'explosion

Étant donné que notre vécu quotidien nous confronte à une matière «ordinaire» qui attire, il nous est difficile de nous représenter comment le vide peut être répulsif et avoir une pression négative. Dans la loi de gravitation de Newton, la pression ne joue aucun rôle ; la gravitation dépend uniquement de la masse. Dans la loi de gravitation d'Einstein, l'intensité des forces gravitationnelles dépend de la masse, mais également de toutes les formes d'énergie, de la pression.

Le signe de la force gravitationnelle est déterminé par une combinaison de la densité d'énergie totale et de la pression. Si la pression est positive, comme dans le cas d'un rayonnement, celui de la matière visible et celui de la matière noire, alors le résul-



3. L'UNIVERS est essentiellement constitué d'énergie «répulsive», qui représente 70 pour cent de sa masse. Elle trouve son origine dans la densité d'énergie constante du vide (représentée par la constante cosmologique), ou dans celle d'un champ quantique, nommé quintessence. Les autres constituants sont la matière noire, dont on pense qu'elle est composée de particules élémentaires exotiques, et finalement la matière ordinaire (visible ou invisible) et un peu de rayonnement.

tat est positif et la gravitation est attractive. Si, au contraire, la pression est suffisamment négative pour que la résultante soit négative, la gravitation est répulsive. Les cosmologistes utilisent d'ordinaire le rapport de la pression sur la densité d'énergie, qu'ils appellent équation d'état, et qu'ils notent w . Pour un gaz ordinaire, w est positif et proportionnel à la température. Toutefois, il existe des systèmes où w est négatif. Quand sa valeur est inférieure à $-1/3$, la gravitation devient répulsive.

Dès qu'il possède une densité d'énergie non nulle, le vide est un système de ce type. Dans le vide, la loi de la conservation de l'énergie impose que la vitesse de variation de la densité d'énergie (sa dérivée par rapport au temps) soit proportionnelle à $w + 1$. Or, par définition, la densité d'énergie du vide ne varie pas, ce qui implique que la quantité $w + 1$ s'annule ; cela n'est possible que si $w = -1$. Puisque cette valeur est inférieure à $-1/3$, la pression du vide est négative.

Que signifie une pression négative ? La pression des gaz chauds est positive, c'est-à-dire que les atomes et le rayonnement exercent une poussée sur les parois du récipient, dirigée vers l'extérieur (l'effet d'une pression positive s'oppose à celui des forces gravitationnelles). Une pression négative ferait le contraire : elle attirerait les parois du récipient. Imaginons qu'une interaction entre atomes s'oppose à l'énergie cinétique et provoque l'implosion du gaz. Un tel «gaz implosif» aurait une pression négative, et le récipient qui le contien-

drait s'effondrerait sur lui-même : la pression qui s'exercerait sur la face externe des parois serait supérieure à celle qui s'exercerait sur la face interne de ces parois. Curieusement, en relativité générale, une pression négative s'oppose aux forces gravitationnelles répulsives qui lui donnent naissance.

Dans un ballon, l'effet gravitationnel d'un gaz implosif serait infime. Imaginez maintenant que l'on remplisse l'espace entier d'un tel gaz. Il n'y aurait alors plus de surface frontière ni de pression externe. Le gaz n'aurait rien à repousser, de sorte que sa pression négative n'aurait aucun effet direct. Son seul effet serait gravitationnel : il serait répulsif. Il étirerait l'espace, accroîtrait son volume et, de ce fait, la quantité d'énergie du vide. La tendance à l'expansion de l'espace-temps se renforcerait, ce qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers constatée. L'augmentation de l'énergie du vide se ferait aux dépens du champ gravitationnel.

Ces concepts peuvent sembler étranges, et Einstein lui-même les trouvait difficiles à admettre. Il considérerait l'idée d'un Univers statique, qui impose l'existence d'une énergie statique du vide (ou constante cosmologique), comme une erreur regrettable à réparer au plus vite. Las ! Les choses ne se passèrent pas ainsi. Une fois introduite, la constante cosmologique n'allait plus disparaître. Les théoriciens réalisèrent vite que les champs quantiques impliquent l'existence d'une densité d'énergie finie dans le vide, la manifestation de l'existence de