

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.

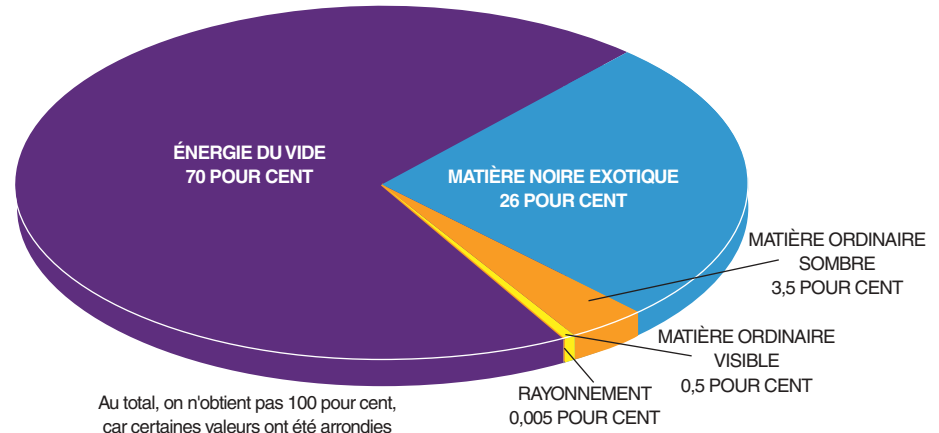
Ce raisonnement supposait que la répulsion gravitationnelle devait accélérer l'expansion de l'Univers... ce que l'on n'avait pas encore observé. Puis, en 1998, grâce à des mesures faites sur des supernovae éloignées, deux groupes d'astrophysiciens ont détecté un changement du taux d'expansion. Ils ont 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

fluctuations quantiques à la faveur desquelles se créent des paires de particules «virtuelles» dans le vide. Quand on estime l'énergie du vide produite par tous les champs connus, on obtient une valeur énorme : elle serait de 120 ordres de grandeur supérieure à la densité d'énergie due à la matière. Bien qu'il soit difficile de se représenter une telle valeur, cela signifie que les particules virtuelles évanescences produisent une densité d'énergie constante et positive, associée à une pression négative. Toutefois, si cette estimation est correcte, l'expansion serait telle que les galaxies, voire les atomes, seraient désagrégés. À l'évidence, cette estimation de l'énergie du vide était erronée.

Une improbable précision

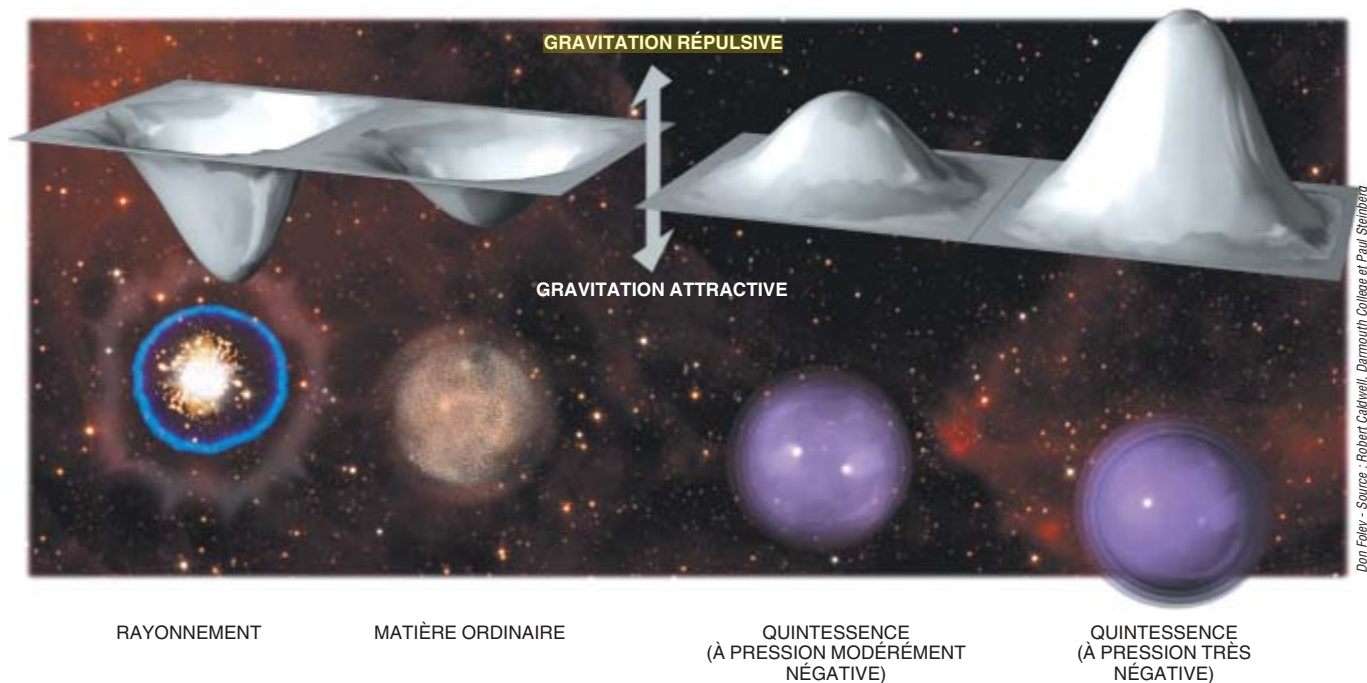
Encore fallait-il expliquer pourquoi. Selon l'une des hypothèses envisagées, une symétrie de la physique fondamentale, encore inconnue, annule des effets de grande ampleur, réduisant ainsi à l'extrême l'énergie du vide. Ainsi, les fluctuations quantiques associées à la création de paires de particules virtuelles dont le spin est un demi-entier (les quarks et les électrons, par exemple) auraient une contribution positive à l'énergie et celles associées à la création de paires de

particules à spin entier (les photons, par exemple) auraient une contribution négative à l'énergie. Les deux contributions se compenseraient. Dans la théorie dominante en physique des particules, le modèle standard, une telle compensation n'a pas lieu. Toutefois, les physiciens des particules explorent des extensions de leur modèle standard où cette compensation se produit : ces extensions sont dites supersymétriques. Seule difficulté : la supersymétrie est respectée aux très hautes énergies, mais pas aux basses énergies. C'est pourquoi les théoriciens recherchent des mécanismes susceptibles d'expliquer que la compensation subsiste à basse énergie.

Une autre approche consiste à accepter l'idée que l'énergie du vide n'est pas nulle, c'est-à-dire que le mécanisme de compensation ne serait pas parfait. Les fluctuations quantiques à l'origine de l'énergie du vide ne s'annuleraient pas parfaitement, mais laisseraient un résidu de 120 ordres de grandeur plus petit que la valeur prévue par les physiciens des particules à partir de tous les champs connus. Dans ce cas, l'énergie du vide pourrait effectivement représenter les deux tiers manquants de l'énergie de l'Univers. Quel mécanisme pourrait réduire à ce point l'énergie du vide avec une telle précision ? Bien que l'énergie du vide

soit l'équivalent d'une énorme masse, elle est répartie dans un si vaste espace que, localement, elle représente une densité d'énergie inférieure à quatre électronvolts par millimètre cube. Pour un physicien des particules, cette valeur infime est difficilement concevable : la plus faible des forces connues dans la nature met en jeu une densité d'énergie 10^{50} fois supérieure !

Si l'on extrapole dans le passé, l'existence d'une énergie du vide conduit à une situation encore plus paradoxale. Aujourd'hui, la matière et l'énergie du vide ont des densités moyennes comparables, mais, il y a des milliards d'années, quand elles sont apparues, l'Univers avait la taille d'un pamplemousse : la matière était plus dense d'une centaine d'ordres de grandeur. En revanche, l'énergie statique du vide, c'est-à-dire la constante cosmologique, avait la même valeur qu'aujourd'hui. En d'autres termes, les phénomènes physiques qui sont à l'origine du déploiement de l'Univers auraient créé une partie d'énergie du vide pour 10^{100} parties de matière. Si ce genre de proportion est envisageable dans le cadre d'une idéalisation mathématique, il est invraisemblable en physique. Les physiciens n'admettent pas la possibilité d'un ajustage aussi fin et cherchent pour cette raison à s'affranchir de la constante cosmologique.



4. SELON LA PRESSION qui règne, une quantité donnée d'énergie dans l'espace exerce une force gravitationnelle attractive ou répulsive. Quand cette pression est positive ou nulle, comme dans le cas d'un rayonnement et de la matière ordinaire, la gravitation est attractive (les creux, à gauche, représentent les puits

d'énergie potentielle associés à cette situation). La pression qui règne au sein de la quintessence est négative, de sorte que les forces gravitationnelles qu'elle engendre sont répulsives (les bosses, à droite, représentent les énergies potentielles associées à cette situation).