

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.

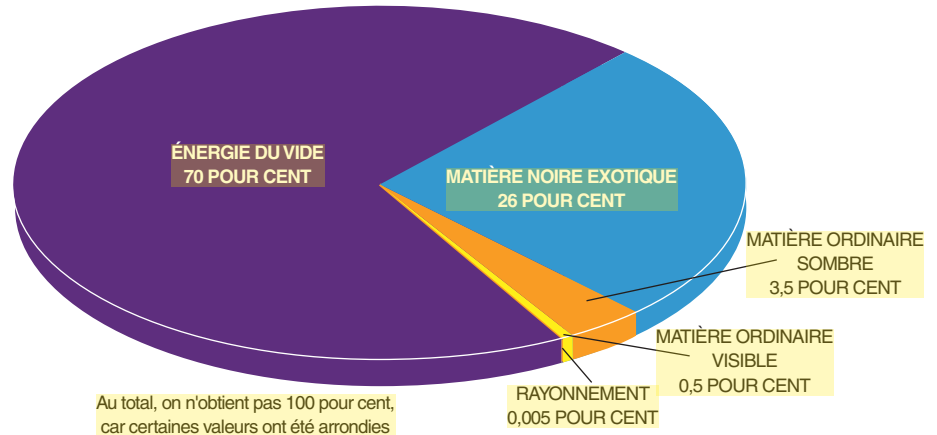
Ce raisonnement supposait que la répulsion gravitationnelle devait accélérer l'expansion de l'Univers... ce que l'on n'avait pas encore observé. Puis, en 1998, grâce à des mesures faites sur des supernovae éloignées, deux groupes d'astrophysiciens ont détecté un changement du taux d'expansion. Ils ont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

drair 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