

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

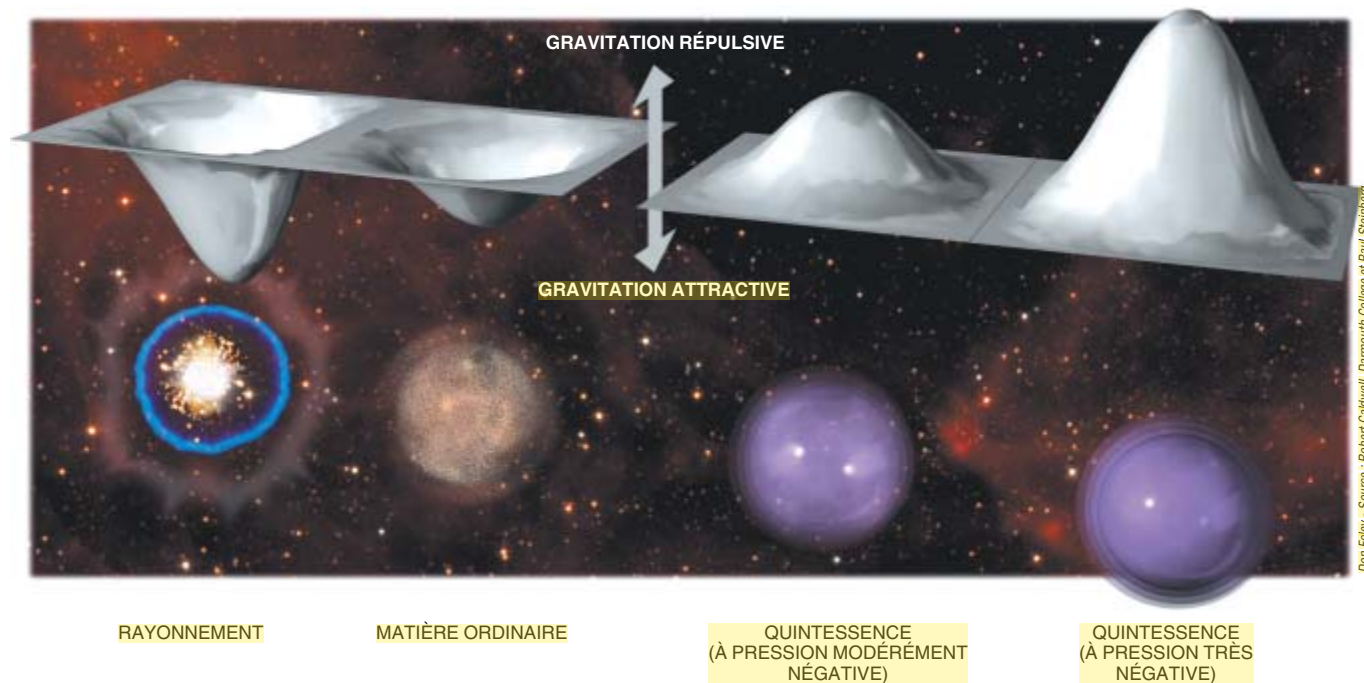
Encore fallait-il expliquer pourquoi. Selon l'une des hypothèses envisagées, une symétrie de la physique fondamentale, encore inconnue, annule des effets de grande ampleur, réduisant ainsi à l'extrême l'énergie du vide. Ainsi, les fluctuations quantiques associées à la création de paires de particules 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.



Don Foley - Source : Robert Caldwell, Darmouth College et Paul Steinberg

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).

Travaux des champs

Heureusement, l'existence d'une énergie statique dans le vide n'est pas la seule cause qui expliquerait une pression négative. Une autre serait une forme d'énergie qui, contrairement à l'énergie statique du vide, varierait dans le temps et dans l'espace. Toutes les possibilités envisageables dans ce cadre sont regroupées sous le terme général de «quintessence». Quelle que soit la nature de la quintessence envisagée, le premier terme de l'équation d'état w n'a pas une valeur définie, mais il doit être inférieur à $-1/3$ pour que la gravité soit répulsive.

La quintessence peut prendre des formes variées. Dans le modèle le plus simple, l'énergie du champ quantique varie si lentement qu'elle ressemble, au premier abord, à une énergie statique du vide (constante cosmologique). Cette idée provient de la cosmologie inflationniste, où un champ cosmique – nommé inflaton – aurait été le moteur de l'expansion dans l'Univers primordial. Toutefois, la quintessence est bien moins forte que l'inflaton. Cette hypothèse fut étudiée pour la première fois, il y a une dizaine d'années, par trois chercheurs : Christof Wetterich, de l'Université de Heidelberg, Bharat Ratra, à l'Université du Kansas, et James Peebles, à l'Université de Princeton.

Dans la théorie quantique, les mécanismes physiques sont décrits soit en termes de champs, soit en termes de particules. Quelles seraient les caractéristiques d'une particule, dans la théorie de la quintessence ? La quintessence a une densité d'énergie si faible et évolue si lentement qu'une particule ayant la taille d'un superamas de galaxies aurait une masse quasi nulle ! C'est pourquoi la description de la quintessence en termes de champs est plus appropriée. Un champ est une distribution continue d'énergie qui associe à chaque point de l'espace une valeur numérique : l'intensité du champ en ce point. L'énergie correspondant à ce champ a une composante cinétique, qui dépend de la variation dans le temps de l'intensité du champ, et une composante potentielle, qui dépend seulement de cette intensité. Quand le champ évolue, l'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle est modifié.

Rappelons que, dans l'hypothèse d'une énergie du vide constante, les pressions négatives résultaient de la

conservation de l'énergie, selon laquelle toute variation de la densité d'énergie est proportionnelle à la somme de la densité d'énergie (positive) et de la pression. Dans le cas de la densité statique du vide, cette somme est nulle, de sorte que la pression doit être négative. Dans le cas de la quintessence, l'énergie du vide évolue dans le temps, mais suffisamment lentement pour que la pression qui règne dans le vide reste négative. Dans ces conditions, le champ associé à la quintessence a une énergie potentielle supérieure à son énergie cinétique.

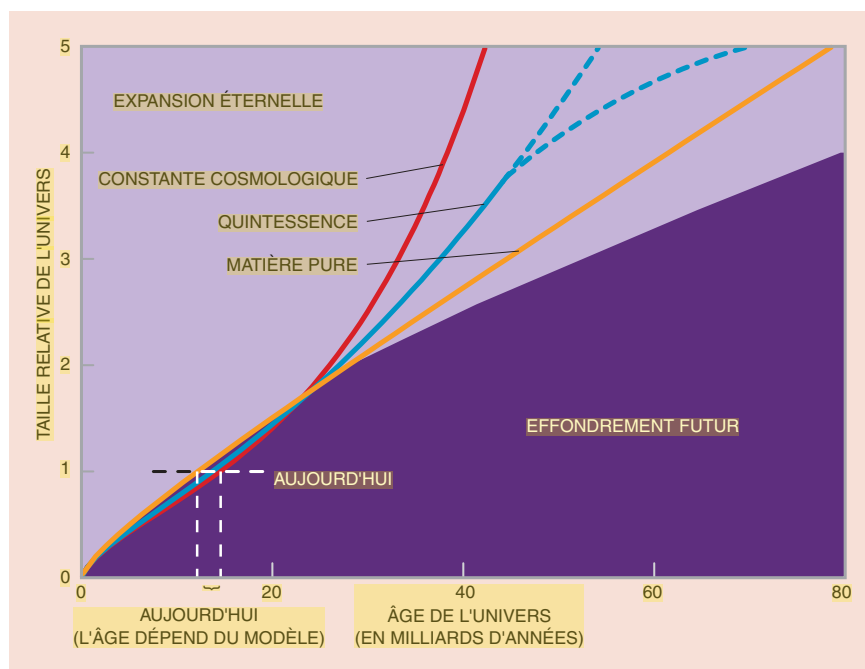
Puisque la pression associée à la quintessence est moins négative que celle associée à une densité statique du vide, l'expansion qui en découle est moins rapide. C'est grâce aux observations que l'on tranchera entre quintessence et densité statique du vide. Aujourd'hui on constate que la quintessence s'accorde mieux avec les données disponibles, mais la différence n'est pas significative. Les deux théories diffèrent aussi par le fait que, contrairement à un vide statique, le champ de quintessence subit diverses évolutions complexes. Ainsi, la valeur du rapport w peut être tour à tour positive, puis négative, puis à nouveau

positive... Elle peut aussi varier d'un endroit de l'Univers à l'autre. Ces variations sont certainement infimes, mais l'étude du fond diffus cosmologique devrait les révéler.

De surcroît, le champ de quintessence peut aussi être perturbé. Des ondes s'y propagent exactement comme les ondes sonores dans l'air. Les cosmologistes traduisent cette idée dans leur jargon en parlant de la «mollesse» de la quintessence, par opposition à la rigidité de la constante cosmologique d'Einstein. Notons que toutes les formes d'énergies connues sont plus ou moins «molles», et tolèrent la propagation d'ondes. Sans doute la densité d'énergie constante (rigide) du vide n'est-elle qu'un cas idéal, qui n'existe pas dans la nature. Un Univers où la quintessence aurait un rapport w proche de -1 représente peut-être l'approximation la plus raisonnable.

La quintessence et les «branes»

Présenter la quintessence comme un champ est une première étape, mais quelle serait l'origine de ce champ ? Les physiciens des particules expliquent divers phénomènes, de la



Jana Brenning - Sources : Robert Caldwell, Darrouin Collé et Paul Steinhardt

5. L'EXPANSION DE L'UNIVERS suit un rythme différent selon la forme d'énergie qui prédomine. Si la matière domine, l'expansion de l'Univers se ralentit (courbe en orange). Si c'est une forme d'énergie constante dans le vide (la constante cosmologique) qui domine, l'expansion de l'Univers accélère (courbe en rouge). La quintessence est un cas intermédiaire : quand elle domine, l'expansion de l'Univers s'accélère, mais moins que dans le cas de la constante cosmologique (courbe en pointillés). Selon les conditions, l'accélération se poursuit ou non (courbes en pointillés).