

structure des atomes à l'origine de la masse, mais restent perplexes quand il s'agit de la quintessence. Les théories des particules élémentaires font intervenir de nombreuses sortes de champs, dont les comportements semblent adéquats, mais dont on connaît si mal l'énergie cinétique et l'énergie potentielle que l'on ignore lequel de ces champs, s'il y en a un, pourrait produire une pression négative.

L'une des théories exotiques les plus récentes stipule que la quintessence naît de la physique d'un Univers qui aurait des dimensions supplémentaires. L'idée semble d'autant plus intéressante que la théorie des cordes en prévoit. Depuis plusieurs années, les physiciens étudient cette théorie qui combine la relativité générale et la mécanique quantique, au sein d'un édifice théorique unifié des interactions fondamentales. La théorie des cordes prévoit l'existence de dix dimensions, dont quatre nous sont familières : les trois dimensions spatiales et le temps. Les six autres dimensions sont cachées, enroulées sur elles-mêmes, formant de minuscules sphères dont le « rayon » est trop petit pour être détecté (du moins avec les instruments à notre disposition aujourd'hui). Dans la théorie dite *M*, une version récente de la théorie des cordes, une 11^e dimension vient s'ajouter. La matière ordinaire serait confinée sur

deux « surfaces » à trois dimensions : des « branes » (pour membranes), séparées par une distance infime dans la onzième dimension.

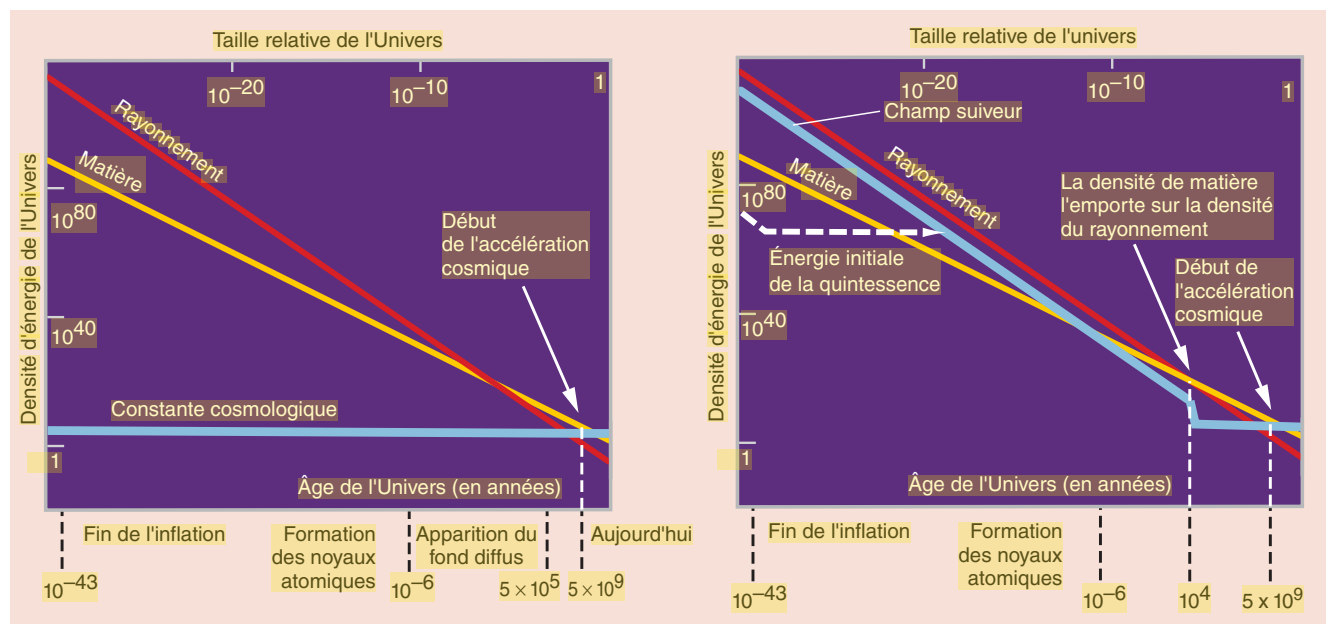
Nous ne voyons pas ces dimensions supplémentaires, mais, si elles existent, nous devrions les percevoir indirectement. En fait, la présence de dimensions enroulées ou de branes proches aurait le même effet qu'un champ. La valeur que prend le champ en chaque point de l'espace correspondrait au rayon des branes ou à leur distance. Or, sous l'effet d'un champ de quintessence, des branes devraient précisément évoluer avec l'expansion de l'Univers.

Quelle coïncidence !

Quelle que soit l'origine de la quintessence, elle a une propriété qui peut résoudre l'épineux problème de l'ajustement fin évoqué plus haut : elle est dynamique. Une façon d'envisager le problème est de se demander pourquoi l'accélération cosmique a commencé à un moment particulier de l'histoire de l'Univers. Créée quand l'Univers n'avait que 10^{-35} seconde, l'énergie du vide, qui engendre les effets gravitationnels répulsifs, a dû rester dans l'ombre pendant près de dix milliards d'années, soit pendant une durée 10^{50} fois supérieure à celle qui a précédé sa naissance ! C'est seu-

lement à ce moment-là que son effet gravitationnel aurait dépassé celui de la matière et que l'accélération de l'expansion de l'Univers se serait enclenchée. Est-ce une coïncidence que l'expansion de l'Univers accélère au moment même où des créatures pensantes apparaissent, c'est-à-dire nous ? Pourquoi l'évolution de la matière (vivante) et celle de l'énergie du vide semblent-elles liées ?

Si c'est la nouvelle forme d'énergie observée par les cosmologistes qui détermine la constante cosmologique, la coïncidence est presque inexplicable. Certains proposent une explication centrée sur l'homme : peut-être notre Univers n'est-il qu'un univers parmi une multitude d'autres, et la densité d'énergie du vide aurait des valeurs différentes, mais fixes dans chacun d'eux. Les Univers dont la densité d'énergie est très supérieure à quatre électronvolts par millimètre cube sont peut-être fréquents, mais ils subissent une expansion trop rapide pour former des étoiles et des planètes, ou favoriser la vie. Les Univers dont la densité d'énergie du vide est beaucoup plus faible semblent rares et improbables. Par hasard ou parce que c'est le nôtre, notre Univers aurait la densité d'énergie optimale. Ce n'est que dans ce « meilleur des mondes possibles » que des créatures intelligentes, capables de méditer sur la



Jana Breining - Source : Iht Mar et Ram Brustein, Ben-Gurion University

6. SI L'ÉNERGIE DU VIDE EST STATIQUE (c'est l'hypothèse de la constante cosmologique), la densité d'énergie du vide doit être ajustée de façon ultrafine pour reproduire le fait qu'elle a récemment dépassé la densité d'énergie de la matière (à gauche). En revanche, si la quintessence est constituée d'un « champ suiveur » (à droite), sa

densité converge vers une même ligne (en bleu), quelle que soit sa valeur au début de l'Univers. La courbe de la densité du champ suiveur suit celle de la densité de rayonnement jusqu'à ce que la densité de la matière prenne le dessus. Cela a pour effet de geler l'évolution du champ suiveur et de déclencher l'accélération cosmique.

nature de l'Univers, existeraient. Un argument conçu pour expliquer la présence de l'homme dans l'Univers est-il toutefois acceptable?

Les champs dits «suiveurs», une autre forme de quintessence, fournissent une solution plus plausible. Les équations qui les décrivent correspondent à un comportement classique d'attracteur, tels ceux que l'on rencontre dans certains systèmes chaotiques. Un champ suiveur évolue d'une façon dynamique et converge toujours vers la même solu-

tion quelles que soient les conditions initiales. Par analogie, une bille lancée dans une baignoire vide finit toujours par tomber dans le trou d'évacuation de l'eau, quel que soit son point de départ. Son comportement est à la fois chaotique et fixé dans certaines limites.

De même, la densité d'énergie d'un champ suiveur n'a pas besoin d'être fixée dès l'origine, car le champ suiveur s'ajuste vite de lui-même à cette valeur. Il se retrouve sur une trajectoire, où sa densité d'énergie reste

un rapport quasi constant de la densité de rayonnement et de matière. En ce sens, la quintessence imite la matière et le rayonnement, bien que sa composition soit totalement différente. Ce phénomène de mimétisme se produit parce que la densité de rayonnement et de matière détermine le taux d'expansion cosmique qui, à son tour, impose les variations de la densité de quintessence. En y regardant de plus près, on s'aperçoit que ce rapport croît lentement. Ce n'est qu'au bout de plusieurs millions, voire

La quintessence en physique des particules

Pour les physiciens des hautes énergies, l'existence d'une constante cosmologique non nulle est un problème déconcertant. De leur point de vue, en effet, la constante cosmologique est la densité d'énergie du vide. Cependant le vide quantique, même en l'absence de matière, contient les fluctuations quantiques de tous les champs de matière virtuellement présents dans l'Univers. Une simple estimation de la densité d'énergie qui en résulte, fondée sur les échelles de masse des particules connues, montre que la constante cosmologique (l'énergie du vide) devrait être plus de 100 ordres de grandeur supérieure à celle qui est observée!

Jusqu'à présent, les physiciens des hautes énergies s'accommodaient de cette situation en supposant l'existence d'un mécanisme de compensation, non élucidé, qui annulerait exactement les contributions quantiques des divers champs connus. Les observations décrites dans l'article de Jeremiah Ostriker et de Paul Steinhardt remettent tout en question. Que la constante cosmologique soit strictement nulle est une idée, qu'elle soit non nulle et incomparablement plus petite que toutes les formes d'énergie qui se rencontrent dans la nature en est une autre! C'est la structure du vide, au sens de la théorie quantique des champs, qui doit être revue.

La «quintessence» représente une tentative de réconcilier les observations cosmologiques et la physique des hautes énergies. En effet, si une forme de quintessence existe, la den-

sité d'énergie du vide est bien strictement nulle, mais l'état d'énergie minimale de l'Univers n'aurait pas encore été atteint. Le champ de quintessence serait encore en train d'évoluer vers un minimum d'énergie. Autrement dit, en plus de la matière ordinaire, des photons, des neutrinos et de la très énigmatique matière noire, l'Univers serait rempli d'un «condensat» de particules en train de s'évaporer; il jouerait le rôle d'une constante cosmologique, c'est-à-dire d'une énergie du vide constante. Malheureusement, un tel mécanisme n'est pas possible dans le cadre du modèle standard de la physique des particules.

En revanche, dans le cadre plus élaboré des théories de super-gravité ou plus généralement des super-cordes, ce mécanisme est plausible. Dans ces théories, tentatives de description de la physique des hautes énergies au-delà du modèle standard, on rencontre de nombreux champs sans manifestations concrètes (en laboratoire), mais dont la valeur dans le vide n'est pas fixée. Pierre Binétruy, de l'Université d'Orsay, a étudié cette situation et montré que les «condensats de fermions» (les fermions sont l'un des deux grands types de particules) produisent, dans certaines conditions, un potentiel semblable à un champ de quintessence.

Parions que toute l'activité que suscite la quintessence ne sera pas sans «retombées» en physique des particules. Ceci n'a pas échappé aux physiciens théoriciens et aux astrophysiciens qui se sont lancés dans

une étude exhaustive de l'Univers avec quintessence. S'il existe, le champ de quintessence ne se manifeste pas seulement par son effet sur l'accélération de l'Univers mais comme l'ont souligné Philippe Brax, Jérôme Martin et Alain Riazuelo, du Centre d'Étude de Saclay et de l'Observatoire de Meudon, il aurait aussi un effet notable sur la vitesse de croissance des grandes structures du Cosmos.

Il est vraisemblable que l'étude indirecte du vide cosmologique nous renseignera sur sa nature. Nul doute que les grands projets d'observation du fond de rayonnement cosmologique, tels que *MAP* ou *Planck* y contribueront. Toutefois, c'est peut-être *DESCart* qui aura le fin mot de l'histoire.

Ce projet vise à cartographier les grandes structures de l'Univers afin d'y traquer les distorsions gravitationnelles. Lorsqu'une grande masse s'interpose entre nous et une source cosmique, le rayonnement qu'elle nous envoie en est modifié quel que soit le domaine de longueurs d'onde. Les astrophysiciens parlent d'effets de «lentille gravitationnelle». Or, l'intensité de tels effets dus à des objets très massifs, tels que des amas de galaxies ou des galaxies lointaines, reflète les propriétés géométriques globales de l'Univers. S'il existe une forme de quintessence, son existence ne devrait pas échapper aux observateurs du projet *DESCart*.

Francis BERNARDEAU,
Service de physique théorique,
CEA de Saclay