

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.

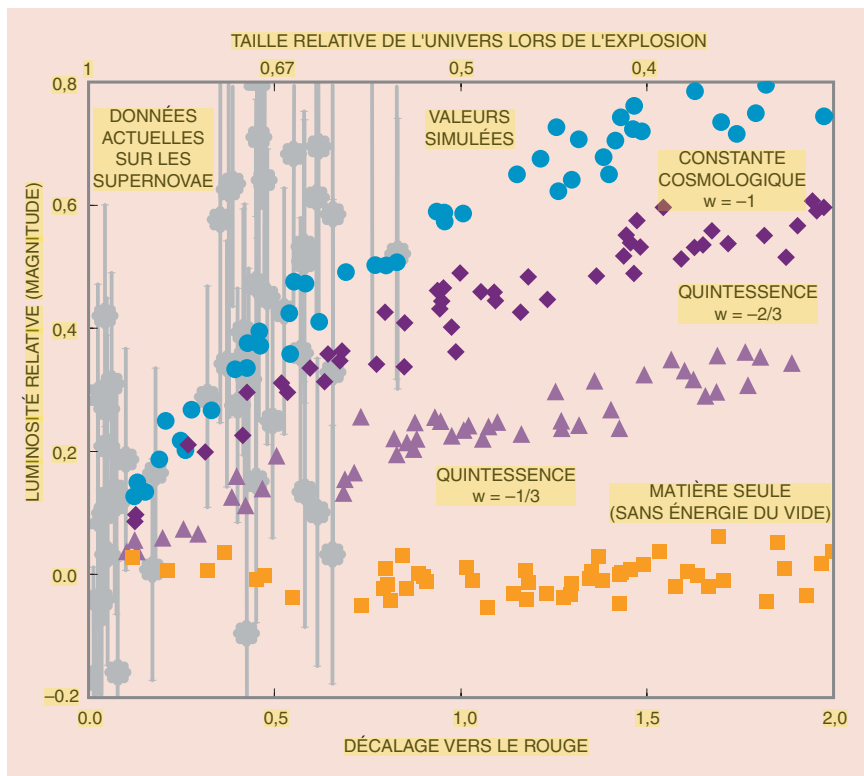
Parions que toute l'activité que suscite la quintessence ne sera pas sans «retombées» en physique des particules. Ceci n'a pas échappé aux physiciens théoriciens et aux astrophysiciens qui se sont lancés dans

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



7. L'OBSERVATION DES SUPERNOVAE devrait permettre aux cosmologistes de trancher entre l'hypothèse de la quintessence et celle d'une énergie statique du vide. En effet, l'expansion cosmique accélère plus, dans cette dernière hypothèse, que si la quintessence existe. Plus l'expansion cosmique est rapide, plus les supernovae s'éloignent vite et plus leur luminosité est faible. Leur luminosité apparente est inférieure si la quintessence existe (les points violets) et supérieure si la densité d'énergie est constante dans l'espace (les points bleus). Aujourd'hui, les télescopes classiques ne suffisent pas à distinguer les différences de magnitude observées (en gris), mais une nouvelle sonde, *Super Nova Acceleration Probe*, devrait le permettre.

de milliards d'années, que la quintessence finit par s'imposer.

Pourquoi s'impose-t-elle précisément aujourd'hui? Le début de l'accélération cosmique, qui aurait pu commencer dans un passé ancien ou, au contraire, dans l'avenir lointain, dépend du choix de certains paramètres dans la théorie des champs suiveurs. Cette constatation soulève à nouveau le problème de la coïncidence évoquée plus haut : pourquoi la présence d'une forte énergie dans le vide s'est-elle brusquement manifestée il y a peu de temps? Un événement cosmique récent a-t-il déclenché l'accélération de l'expansion de l'Univers? Certains astrophysiciens postulent qu'une transition se serait produite : le rayonnement diffus aurait cessé de représenter l'essentiel de l'énergie dans l'Univers, la matière prenant le dessus.

Selon la théorie du Big Bang, l'énergie de l'Univers se trouvait essentiellement sous forme de rayonnement. Puis, à mesure que

l'Univers s'est refroidi, le rayonnement a perdu son énergie plus vite que la matière. Lorsque l'Univers a atteint un âge de quelques dizaines de milliers d'années (il était encore très jeune), son équilibre énergétique s'est inversé en faveur de la matière. Ce changement a marqué le début de la domination de la matière, qui nous est favorable aujourd'hui. C'est alors que la gravitation a commencé à rassembler la matière pour former des galaxies et des structures à grande échelle. Au même moment, le taux d'expansion de l'Univers a changé.

Dans une variante du modèle des champs suiveurs, ce sont les événements déclenchés par cette inversion qui ont conduit à l'accélération cosmique actuelle. Pendant la majeure partie de l'histoire de l'Univers, la quintessence (le champ suiveur) est restée une composante insignifiante du Cosmos. Puis, quand la matière est devenue dominante, le taux d'expansion de l'Univers a augmenté, et la quintessence aurait cessé de se com-

porter ainsi. La pression de quintessence serait alors devenue négative. Sa densité n'aurait guère changé, mais aurait fini par dépasser celle de la matière qui diminue à mesure que l'Univers s'étend. Dans ce modèle, l'accélération de l'expansion de l'Univers coïnciderait avec l'apparition d'êtres intelligents, et ce ne serait pas un simple hasard. La formation des étoiles et des planètes nécessaires à la vie et la domination de la matière sur le rayonnement qui en aurait résulté aurait déclenché la transformation de la quintessence en une composante de l'Univers à pression négative.

Quel avenir pour l'Univers?

À court terme, les cosmologistes vont tout mettre en œuvre pour détecter la quintessence, qui, si elle existe, doit avoir des effets observables. Parce que la valeur du rapport w (pression/densité d'énergie) diffère de celle qu'implique l'hypothèse de la constante cosmologique, elle produit un taux d'accélération cosmique légèrement différent. De nouvelles mesures des supernovae lointaines devraient nous permettre de distinguer les deux cas. Pour ce faire, les astronomes ont proposé deux campagnes d'observation : l'une, la sonde de mesure de l'accélération des supernovae (SNAP), sera embarquée à bord d'un satellite, tandis que l'autre, le télescope LASST (*Large-Aperture Synoptic Survey Telescope*) restera au sol. La quintessence aurait aussi un effet sur le rayonnement cosmologique diffus, que les satellites MAP (*Microwave Anisotropy Probe*) et Planck devraient détecter.

D'autres expériences devront mesurer la variation du nombre de galaxies en fonction de leur éloignement, c'est-à-dire, en termes d'astrophysiciens, de leur décalage vers le rouge. On déterminera ainsi comment le taux d'expansion de l'Univers a varié avec le temps. Une campagne de mesure au sol (DEEP pour *Deep Extragalactic Evolutionary Probe*) est prévue.

À long terme, il nous reste à faire le point sur les conséquences de ces étonnantes découvertes. Elles conduisent à une nouvelle interprétation de notre place dans le Cosmos, et celle-ci est pour le moins dégrisante!