

COSMOLOGIE ET PHYSIQUE DES PARTICULES

(N°SPECIAL SCIENCE&VIE ASTROPHYSIQUE)

Alain Bouquet

(Chargé de Recherche au C.N.R.S.)

Les particules sont les plus petits objets connus de la nature, et on voit mal leur lien avec la cosmologie, science de l'univers dans son ensemble. Et pourtant les deux disciplines sont en fait étroitement imbriquées. Les objets macroscopiques, étoiles ou galaxies, sont formés de particules et leur naissance, leur évolution, et leur mort dépendent en dernier ressort des mécanismes microscopiques. Mais ce n'est pas le plus important. Le vrai point de rencontre de la cosmologie avec la physique des particules, c'est le Big-Bang. Peu après le Big-Bang, l'univers fut extrêmement dense et chaud, et les conditions physiques voisines de celles qui règnent au cœur d'un accélérateur de particules : on y recrée en quelque sorte un Big-Bang miniature et la physique des particules permet ainsi de mieux comprendre la cosmologie. Inversement, plus près encore du Big-Bang, les densité et température de l'univers primitif étaient très supérieures à ce qui est réalisable sur Terre, et on s'appuie sur la cosmologie pour explorer la *terra incognita* de la physique des particules à très haute énergie. De plus l'expansion de l'univers a pour corollaire son extrême petitesse à ses débuts : il fut un temps où tout l'univers visible n'était pas plus grand qu'une particule élémentaire, et il semble donc pertinent d'utiliser les enseignements de la physique des particules pour le décrire à cette époque. Les questions à résoudre sont : pourquoi y a-t-il un univers, pourquoi est-il si simple, pourquoi a-t-il quatre dimensions, de quoi est-il fait ? Bien entendu, nous sommes encore loin des réponses à ces questions, dont certains estiment qu'elles relèvent plus de la métaphysique que de la physique.

Cosmologie quantique

La première rencontre de la cosmologie avec la physique des particules a lieu au moment de la naissance de notre univers. La cosmologie classique est fondée sur la relativité générale d'Einstein, qui décrit très bien la gravitation à l'échelle macroscopique. Mais près du Big-Bang, cet instrument se révèle inadéquat car les effets quantiques deviennent considérables. Une cosmologie quantique est donc indispensable, mais les difficultés en sont immenses. Pourquoi?

La première difficulté rencontrée est que la théorie classique de la gravitation (la relativité générale d'Einstein) donne des résultats infinis quand on la quantifie selon les règles. Les autres interactions (électromagnétisme, interactions nucléaires) donnent aussi des résultats infinis, mais il est en ce cas possible d'extraire de ces infinis des valeurs que l'on peut comparer aux observations (on dit que ces théories sont renormalisables). Mais la gravitation n'est pas renormalisable. Les infinis de la gravitation viennent de son comportement à très courte distance, aussi a-t-on essayé bien des modifications de la théorie. Si les particules ne sont pas ponctuelles (source des infinis) mais étendues comme des petites cordes (toutes petites, de l'ordre de 10^{-36}m !), la théorie devient non seulement renormalisable mais donne même des résultats finis. Le prix à payer est une théorie beaucoup plus compliquée que la relativité générale, avec laquelle on ne sait pas encore calculer grand-chose.

La seconde difficulté rencontrée est qu'il ne suffit pas de disposer d'une théorie quantique renormalisable. On peut toujours postuler l'existence d'une

fonction d'onde de l'univers, c'est à dire d'une fonction indiquant l'état d'un univers et de tout ce qu'il contient, et permettant de tout calculer à son sujet (précisons qu'il n'y a pas unanimité sur ce point). On sait même écrire l'équation qui régit son évolution au cours du temps (l'équation de Wheeler-DeWitt, similaire à l'équation de Schrödinger), mais on ne sait pas résoudre cette équation. De plus, comme elle décrit l'évolution de la fonction d'onde au cours du temps, la solution complète n'est obtenue que si on précise la valeur de cette fonction d'onde à un instant arbitraire. Cette valeur "aux limites" est évidemment une donnée inaccessible, aussi Hawking a-t-il proposé de choisir comme condition aux limites... qu'il n'y ait pas de limite, c'est à dire que l'espace-temps soit l'analogue à quatre dimensions d'un cercle ou d'une sphère. Il a ainsi résolu l'équation de Wheeler-DeWitt, dans des cas extrêmement simplifiés (un univers vide par exemple).

Kaluza-Klein et théories de grande unification

La cosmologie set aussi souvent de "banc d'essai" aux théories nouvelles de physique des particules, en particulier quand les prédictions n'en sont pas vérifiables en laboratoire. Les physiciens s'efforcent depuis longtemps d'unifier les différentes interactions : gravitation, électromagnétisme, interactions nucléaires. Kaluza remarqua en 1920 que s'il écrivait la relativité générale dans un espace-temps à cinq dimensions au lieu de quatre, mais ne s'intéressait qu'à ses effets sur un sous-espace à quatre dimensions, il obtenait non seulement la relativité générale à quatre dimensions (la gravitation) mais aussi l'électromagnétisme! Klein eut en 1926 l'idée que la cinquième dimension pouvait être repliée sur elle-même et nous rester invisible, rendant ainsi viable la théorie

de Kaluza. De l'intensité comparée de la gravitation et de l'électromagnétisme, il déduisit le rayon de courbure de la cinquième dimension : 10^{-36} m! Nulle surprise que cette dimension soit inobservable sinon précisément par l'existence de l'électromagnétisme.

Les interactions nucléaires (qui furent alors découvertes) semblèrent trop différentes de la gravitation et de l'électromagnétisme pour que la théorie de Kaluza-Klein leur soit étendue, et celle-ci sombra dans l'oubli. Mais depuis que l'on a su reformuler ces interactions dans le même schéma que l'électromagnétisme (les théories de jauge), la théorie de Kaluza-Klein est revenue à la mode, mais il faut plus de dimensions pour y incorporer les interactions nucléaires (10 ou 11 selon les variantes). Par ailleurs, les théories de cordes mentionnées précédemment ne sont mathématiquement cohérentes que si l'espace-temps a dix dimensions. Il est malheureusement quasiment impossible de confronter ces modèles d'unification à l'expérience, car les échelles de temps, de distance ou d'énergie mises en jeu diffèrent de plusieurs ordres de grandeur de ce qui est accessible auprès des accélérateurs, mais les conséquences cosmologiques en ont été attentivement étudiées. Plusieurs variantes ont pu être rejetées en raison de prédictions erronées. Le point obscur est le mécanisme qui rend (ou conserve) petites certaines dimensions et pas d'autres.

Inflation

Certaines découvertes en physique des particules ont parfois des conséquences cosmologiques extrêmement riches. Ainsi certains modèles de

physique des particules impliquent que l'univers ait traversé une période d'expansion beaucoup plus rapide qu'on ne l'admet communément, l'inflation. En ce cas, la reconstruction du passé très ancien de l'univers est différente, et certains paradoxes du modèle standard du Big-Bang disparaissent. La partie de l'univers que nous voyons provient d'une toute petite région considérablement dilatée par l'inflation, ce qui explique que sa courbure spatiale soit très faible (comme un énorme ballon gonflé apparaît localement plat). Cette région était également assez petite pour que les processus physiques des premières fractions de seconde aient pu l'homogénéiser (ce qui n'est pas possible sans inflation).

A contrario, les conditions physiques peuvent être très différentes dans d'autres régions de l'univers, et ce que nous voyons autour de nous n'est peut-être pas transposable globalement à l'univers. Par exemple, si l'espace-temps a réellement dix dimensions, comme dans les théories de cordes ou celles de Kaluza-Klein, mais que quatre dimensions seulement sur dix subissent une inflation, pour une raison inconnue, les six restantes ont pu conserver un rayon de courbure très petit (de l'ordre de 10^{-36}m) et nous rester invisibles. Ailleurs, le nombre de dimensions (apparentes) de l'espace-temps est peut-être de sept ou de deux !

Il n'est en fait pas si facile de construire un modèle de physique des particules conduisant à une phase d'inflation assez longue pour résoudre les paradoxes habituels sans introduire d'autres difficultés. Dans l'inflation "chaotique" de Linde, une inflation extrêmement rapide se déclenche là où se produit une fluctuation de densité importante (d'origine quantique, et donc semi-aléatoire), et pas ailleurs. Les zones bénéficiant de cette inflation auraient alors eu le temps d'enfler énormément avant le retour à une expansion normale (ce serait le cas de notre région d'univers), et pas les autres.

Mieux encore : dans l'univers, l'énergie potentielle de gravitation est exactement égale à l'énergie totale (masse et énergie cinétique) de la matière, mais de signe contraire. L'énergie totale de l'univers est donc zéro, et rien n'empêche que l'univers soit lui-même une fluctuation née du “vide”. Pour éviter toute dérive mystique, précisons immédiatement que ce “vide” n'est pas le néant : une corde de violon au repos est une bonne image du “vide” au sens des physiciens des particules, la même corde vibrant correspond à ce qu'ils appellent un “état excité”. Normalement, le “vide” est l'état d'énergie minimale et les états excités possèdent des énergies supérieures, mais la gravitation a la particularité d'autoriser des états excités (comme un univers plein) de même énergie qu'un univers vide. On peut donc imaginer des fluctuations du vide, d'énergie nulle, dont certaines retournent immédiatement au vide (en un temps moyen de 10^{-44} s) tandis que d'autres ont la bonne fortune de traverser une période d'inflation qui leur accorde un sursis quasiment illimité.

Faisons alors un pas de plus : rien n'interdit qu'une fluctuation ne naisse quelque part dans notre univers et traverse une période d'inflation : un nouvel univers naîtrait ainsi au sein du nôtre, branche nouvelle jaillissant du vieux tronc. Mais notre univers ne serait-il pas lui-même une branche d'un autre univers plus ancien, et ainsi de suite à l'infini ? L'image qui se dégage est celle d'un univers globalement éternel et infini, un univers ramifié dont certaines branches disparaissent sitôt créées, mais dont d'autres survivent assez longtemps pour y permettre des spéculations aussi hasardeuses que celle-ci...

L'idée d'inflation n'est pas seulement une hypothèse académique : outre une façon élégante d'expliquer la remarquable homogénéité de l'univers observé à grande échelle, elle prédit que l'univers visible doit être spatialement plat, c'est-à-dire que sa géométrie est euclidienne. Cette prédiction implique une relation

précise entre la vitesse d'expansion (mesurée par la constante de Hubble) et la densité moyenne de l'univers (mesurée en comptant les galaxies et en estimant leur masse). Cette relation est actuellement bien vérifiée, compte tenu des incertitudes importantes (la constante de Hubble n'est connue qu'à un facteur 2 près, et la densité moyenne à un facteur 10 près). Comme les mesures devraient s'améliorer sensiblement au cours des prochaines années, l'idée d'inflation sera soumise à l'observation et pourra être rejetée si elle échoue à ce test.

Asymétrie matière-antimatière

La physique des particules conduit parfois à des paradoxes cosmologiques : par exemple, il devrait y avoir dans l'univers autant d'antimatière que de matière. En effet, à chaque particule élémentaire correspond une antiparticule (parfois confondue avec elle, comme dans le cas du photon), et les lois physiques les traitent de façon identique (à une exception près que nous allons voir). Pourtant tout notre environnement (Terre, système solaire, et même notre galaxie) est formé de matière, quasiment sans trace d'antimatière. Mais il y *avait* de l'antimatière au début : en ce temps là, la densité d'énergie était assez grande pour produire en grand nombre des paires de particules et d'antiparticules (en laboratoire, on produit toujours des *paires* à partir d'énergie). Si l'univers avait commencé avec autant de particules que d'antiparticules, on calcule qu'elles se seraient pratiquement toutes annihilées par paires en photons aujourd'hui. Comme on observe en fait à peu près un proton pour un milliard de photons, et il devait y avoir une asymétrie initiale : à peu près un milliard *et une* particules pour chaque milliard d'antiparticules. Après annihilation réciproque en photons, reste la particule en surnombre, une sur un milliard.

Rien n'interdit de postuler cette asymétrie, mais il est plus satisfaisant de la calculer. Les conditions que doit remplir une théorie pour permettre ce calcul ont été posées en 1967 par Sakharov (oui, Andréi Sakharov), et remplies douze ans plus tard par les théories de grande unification dans lesquelles est effectivement présente une très légère différence entre particules et antiparticules. La diversité de ces théories ne les rend pas très prédictives, mais il est au moins possible d'obtenir une asymétrie du bon ordre de grandeur sans torturer excessivement le modèle. Incidemment, la génération de cette asymétrie doit avoir lieu après une période éventuelle d'inflation, faute de quoi cet excédent est dilué dans l'expansion. Inversement, toute asymétrie éventuelle lors du Big-Bang étant diluée par l'inflation, celle que l'on observe aujourd'hui résulte des mécanismes physiques au cours de l'expansion (et est donc calculable, une fois connue la bonne théorie de grande unification) et non des conditions initiales.

Plus récemment, on s'est aperçu qu'il était possible qu'une asymétrie matière-antimatière apparaisse dans le “modèle standard” de physique des particules, sans grande unification. Le modèle lui-même traite symétriquement matière et antimatière, mais il serait possible que certaines configurations des champs de particules conduisent à une asymétrie. Les calculs sont extrêmement délicats, et il n'y a pas accord général des experts.

Particules hypothétiques, matière noire

La matière noire est un dernier point de rencontre entre cosmologie et physique des particules. Les observations astronomiques semblent indiquer qu'une part importante de la matière dans l'univers n'est pas visible : elle est

sombre, ou noire (voir l'article de Jean Audouze à ce sujet). L'inflation conduit à une densité moyenne de l'univers très supérieure à celle que l'on observe sous forme d'étoiles, et implique aussi une fraction importante de matière sombre. Enfin, les scénarios de formation des galaxies sont en meilleur accord avec les observations si une part importante de la matière n'est pas sous forme de nucléons (protons et neutrons).

D'autre part, les modèles de physique des particules qui vont au-delà du “modèle standard” prévoient en général l'existence de nouvelles particules (bien sûr inobservées). C'est le cas des modèles de grande unification, des cordes, et de bien d'autres encore. La plupart de ces particules hypothétiques sont instables et se seraient depuis longtemps désintégrées dans d'autres particules, plus classiques (car observées). Mais ce n'est pas toujours le cas, et il existe tout un “zoo” de particules stables prévues par tel ou tel modèle. De telles particules pourraient constituer la matière sombre de l'univers, dans la mesure où elles sont massives et ne rayonnent pas ou peu de lumière.

Le premier exemple est un neutrino léger. Son existence est connue, il est bien observé, mais on ne connaît pour le moment qu'une limite supérieure sur sa masse. C'est une étonnante coïncidence que si le neutrino avait précisément cette masse, il donnerait à l'univers la densité moyenne prédite par l'inflation. L'hypothèse d'un neutrino léger est un peu tombée en défaveur, car d'une part la limite sur sa masse diminue au fur et à mesure que s'améliorent les expériences, et d'autre part un neutrino léger pose des problèmes dans les scénarios usuels de formation des galaxies.

Un autre candidat plausible serait une particule environ dix fois plus lourde qu'un proton, et interagissant faiblement, prévue dans diverses extensions

du “modèle standard”. Beaucoup d'études y sont consacrées, car une telle particule conduit naturellement à une densité moyenne de l'univers en accord avec l'inflation, et de plus elle pourrait être détectée avec les moyens techniques actuels, donc dans un avenir proche. Il est aussi possible qu'elle modifie suffisamment l'évolution des étoiles pour que sa présence soit ainsi manifestée.

En conclusion, physique des particules et cosmologie fusionnent dans une description quantique du Big-Bang, mais aussi dans les modèles d'inflation, dans une explication de la prépondérance actuelle de la matière, dans les scénarios de formation des galaxies et jusque dans les modèles d'évolution stellaire.