

**Joseph
Silk**

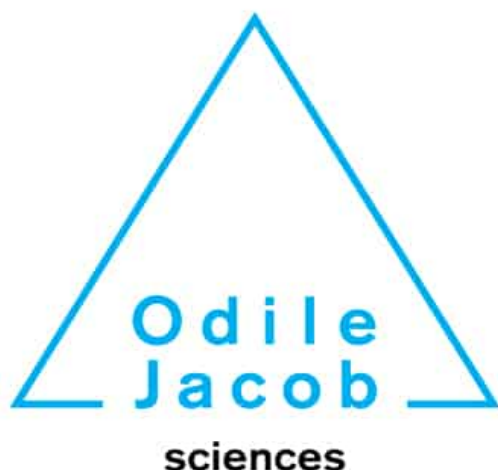


https://t.me/livres_2020

Le Futur du cosmos

Matière noire et énergie sombre

préface de Hubert Reeves



Joseph Silk

Le Futur du cosmos

Matière noire et énergie sombre

préface de **Hubert Reeves**

Joseph Silk est célèbre pour avoir fait le lien entre les minuscules fluctuations qui ont résulté du Big Bang et les majestueuses galaxies qui peuplent aujourd'hui notre ciel.

Car, bien avant que les satellites *COBE*, *Planck* ou *WMAP* ne cartographient le fond de rayonnement cosmique et ne donnent un instantané de l'Univers juste après le Big Bang, la cosmologie théorique dut aller de spéculations hasardeuses en observations plus ou moins fiables pour construire le scénario aujourd'hui admis.

Il est donc question ici de la naissance de l'Univers et de sa structure à grande échelle, mais aussi de la notion d'univers multiples, du principe anthropique, de l'apparition de la conscience et de la possibilité du voyage dans le temps.

Plus crucialement encore, la cosmologie relie la question de l'avenir de l'Univers à celle de la quantité de matière qu'il contient. Les mystérieuses « matière noire » et « énergie sombre » décideront ainsi, entre effondrement et expansion éternelle, du destin de notre Univers.

Joseph Silk est chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris et au CEA de Saclay. Il enseigne également à l'Université Johns-Hopkins et, en tant que professeur émérite, à l'Université d'Oxford. Prix Balzan international en 2011, il est l'auteur de nombreux livres de vulgarisation, dont *Le Big Bang* et *L'Univers et l'Infini*.

Joseph Silk

LE FUTUR DU COSMOS

Matière noire et énergie sombre

Préface de Hubert Reeves

*Traduit de l'anglais
par Nicolas Witkowski*



Pour la traduction française :

© ODILE JACOB, MAI 2015

15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

ISBN 978-2-7381-6626-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite », (art. L.122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Dans la communauté des astrophysiciens, Joseph Silk est un nom connu et très apprécié. Ses compétences encyclopédiques touchent aussi bien à la cosmologie du Big Bang qu'au processus de formation des galaxies et des étoiles, et à bien d'autres sujets encore. Son nom reste attaché à un concept important dans l'évolution des toutes premières années de l'expansion de l'Univers.

Dans ce livre, l'auteur relate les principales péripéties qui ont scandé l'évolution du cosmos à partir d'une infime fraction de seconde après le Big Bang (le temps de Planck : 10^{-43} seconde) jusqu'au moment de l'émission du rayonnement fossile quand l'Univers a près de 400 000 ans.

Silk nous présente les passionnantes étapes de cette recherche. Un premier chapitre porte sur les efforts, accomplis sur plusieurs décennies, pour détecter la présence des germes des galaxies dans le rayonnement fossile primordial, domaine où il a joué un rôle important.

Les premiers documents sur le rayonnement fossile présentaient une image à faible résolution du ciel des origines. La théorie du Big Bang – développée dans les années 1930 par Alexandre Friedmann et Georges Lemaître – imposait l'existence, dans l'Univers primordial, de condensations de matière qui, évoluant sous l'effet de la gravité, allaient donner naissance aux grandioses galaxies. On s'attendait à trouver des signes de leur présence dans le rayonnement fossile. Une absence de détection aurait pu mettre en cause la théorie. Et d'ailleurs, les premières images n'en montraient aucune trace !... Par la suite, le rayonnement fossile fut plusieurs fois cartographié, avec des résolutions de plus en plus fines mais

toujours sans donner les résultats attendus. Inquiétude et tensions chez les partisans de la théorie ! Finalement, en 1992, les fluctuations furent découvertes par le satellite *COBE*, au niveau prévu par les modèles cosmologiques, apportant ainsi une confirmation de plus à la théorie du Big Bang.

Des enquêtes analogues se poursuivent depuis de nombreuses années sur d'autres sujets tout aussi importants. Il s'agit en particulier de déterminer la nature de la matière noire, de l'énergie noire et de la mystérieuse constante cosmologique. Silk nous décrit les efforts titanesques entrepris pour résoudre ces problèmes, sans que le moindre succès ait encore été enregistré.

Avec Joseph Silk, on aborde ensuite le principe anthropique. Il s'agit de la découverte que les valeurs numériques, mesurées au laboratoire, de nombreuses « constantes » qui caractérisent les lois de la physique (constante de Newton pour la gravité, constante de structure fine pour l'électromagnétisme, constante de Fermi pour les interactions faibles, etc.) paraissent être exactement celles qu'il faut (on les dit « finement ajustées ») pour donner naissance à la complexité dans l'Univers (atomes, molécules, cellules vivantes, organismes) et à la vie. Si ces constantes avaient été un tant soit peu différentes, l'Univers aurait évolué quand même mais serait resté stérile. Ces lois peuvent donc être qualifiées de « lois fertiles ».

Silk décrit les différentes interprétations que les astrophysiciens donnent de cette fascinante découverte. La plus populaire est celle du « multivers ». Selon cette interprétation, il existerait dans le cosmos un grand nombre d'univers gouvernés par des lois différentes. Nous aurions simplement eu la « chance » de naître dans un univers doté de lois fertiles. L'ennui est que nous n'avons aucune preuve de l'existence de ces autres univers. Et que cette interprétation s'appuie lourdement sur une théorie non confirmée par l'expérimentation : la théorie des cordes. Cela fait beaucoup de points faibles.

Une autre solution, qui plaît à Silk, c'est la possibilité que l'Univers soit éternel. Là, tout ce qui peut arriver doit arriver tôt ou tard. On a le temps ! Certains modèles cosmologiques dits d'« inflation éternelle » rempliraient ainsi les conditions requises pour rendre compte des valeurs finement ajustées. Mais là encore, les hypothèses nécessaires pour rendre ce scénario crédible sont nombreuses.

Je profite de l'occasion pour présenter mes propres réflexions sur ce sujet. Revenons à l'ensemble de ces nombres qui caractérisent les lois fertiles : comment ont-ils été « sélectionnés » dans l'ensemble infini de tous les nombres possibles ? Et pourquoi ceux-là plutôt que d'autres ?

Plusieurs hypothèses se présentent :

1) C'est le résultat du pur hasard. Cet énoncé est populaire chez un bon nombre de chercheurs. Pour moi, c'est une solution de facilité.

2) Dans le contexte du multivers ou de l'Univers éternel, tous les nombres possibles sont représentés quelque part. Notre choix de l'ensemble des nombres fertiles correspond au fait que c'est le seul qui « explique » notre présence.

3) Ils ont été choisis par une instance supérieure (mais laquelle ?). Cette solution plaît aux esprits religieux. C'est une affaire personnelle. Mais ici nous quittons le domaine de la science qui ne peut plus rien dire. Nous sommes en dehors de sa sphère d'efficacité.

4) Ce choix de nombres est imposé par une physique encore à découvrir, et qui permettrait de le justifier scientifiquement. Cela se produira-t-il ? Affaire à suivre...

Pourtant, dans ce cas, il convient de s'étonner du fait que ce projet, s'il réussit un jour, montrerait que des arguments relevant de la seule physique auraient « choisi » l'ensemble de nombres que sont précisément les nombres fertiles ! Contrairement à Jacques Monod dans *Le Hasard et la*

Nécessité, il faudrait alors admettre que la matière est « grosse » de la vie ? Cette idée me plaît assez...

En guise de conclusion ou, plus exactement, en guise de non-conclusion, il convient, me semble-t-il, de laisser cette question ouverte tant qu'on n'aura pas trouvé une réponse satisfaisante. Autrement, on risque de fermer une porte vers la connaissance d'un inconnu vraisemblablement intéressant.

Ce serait dommage...

Hubert REEVES

L'âge des ténèbres

La question de l'origine du monde a de très anciennes racines. Elle apparut certainement dès qu'*Homo sapiens* leva les yeux vers le ciel. Plus près de nous, le Livre de Job, écrit il y a quelque 2 500 ans, pose deux questions : « Où est le chemin qui conduit au séjour de la lumière ? Et les ténèbres, où ont-elles leur demeure ? »

Aujourd'hui, nous disposons de télescopes géants qui sont des machines à remonter le temps. Car voir dans le passé, c'est voir loin, très loin. Jusqu'où peut-on voir ? Le Soleil, tout près de nous, est à 9 minutes-lumière de distance. L'étoile la plus proche est à 4 années-lumière. Le centre de notre Galaxie est à 24 000 années-lumière, et notre plus proche voisine, la galaxie d'Andromède, visible à l'œil nu, est à 2 millions d'années-lumière.

La galaxie la plus lointaine actuellement connue a été trouvée grâce à la conjonction des deux plus grands télescopes du monde, au Chili et à Hawaï. Elle est à 12 milliards d'années-lumière. Ces télescopes ont des miroirs de 8 à 10 mètres de diamètre. Ce sont des machines géantes et très sophistiquées, dont la dimension permet de collecter la faible lumière des objets les plus lointains.

En reculant les frontières de notre exploration de l'Univers, on peut replacer notre propre planète dans l'échelle des plus grands objets de l'Univers. On sait par exemple que la Terre s'est formée il y a 4,6 milliards d'années. On utilise les roches les plus anciennes pour dater la Terre, et les météorites pour dater le Système solaire. Notre Galaxie, la Voie lactée, s'est formée il y a 10 milliards d'années, ce qui correspond à l'âge des plus vieilles étoiles. Les abondances des éléments

chimiques dans ces étoiles sont très primitives par rapport à celles de notre Soleil ; ce sont des fossiles qui nous permettent de dater la Voie lactée elle-même.

On peut remonter le temps bien plus loin encore. Nous avons découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies s'éloignent de nous, d'autant plus vite qu'elles sont plus loin. Nous savons aussi que notre étoile, le Soleil, et même notre Galaxie, la Voie lactée, ne sont pas au centre du monde. Imaginons un point quelconque à la surface d'un ballon qui se gonfle. Ce point, comme tous les autres, est au centre d'une surface courbe en expansion. Quand la Terre s'est formée, l'Univers avait les deux tiers de sa taille actuelle. Quand notre Galaxie s'est formée, elle avait environ le tiers de sa taille actuelle. Et la lumière des galaxies les plus lointaines a été émise quand l'Univers avait le dixième de sa taille actuelle. Les galaxies étaient alors 10 fois plus proches qu'elles ne le sont aujourd'hui. La nuit, le ciel était plein de galaxies.

Mais cette remontée dans le temps a des limites, que l'on a comprises bien avant l'époque des grands télescopes : on voit de moins en moins de galaxies brillantes quand on regarde de plus en plus loin. Et quand l'observation fait défaut, il reste à se tourner vers la théorie.

La théorie nous dit que les galaxies doivent nécessairement se raréfier à mesure que l'on remonte le temps. Sinon, le ciel nocturne serait aussi brillant que le ciel diurne. C'est le « paradoxe d'Olbers », attribué à l'astronome allemand Heinrich Wilhelm Olbers en 1823. Ce paradoxe était même connu dès 1610 de Johannes Kepler, et il fut décrit au XVIII^e siècle par deux astronomes, l'Anglais Edmond Halley et le Suisse Jean-Philippe Loys de Chéseaux.

L'écrivain et poète Edgar Allan Poe s'intéressa aussi au paradoxe d'Olbers, dont il donna la solution moderne :

Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait

absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile. Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous¹.

Nous en déduisons que les galaxies, toutes les galaxies y compris celles que nous n'avons pas encore vues, ont un âge fini. Aussi, quand nous remontons le temps, nous devons parvenir aux âges obscurs, avant l'apparition des étoiles. Mais même les âges obscurs n'étaient pas des ténèbres absolues. Un faible rayonnement micro-onde émane de cette époque. Pour le voir, allumez votre télévision et réglez-la sur un canal inoccupé. 1 % du « bruit » désordonné que vous voyez sur l'écran est la lumière fossile du Big Bang. Et ce rayonnement datant de l'origine de l'Univers est une des plus grandes découvertes scientifiques qui soient.

Naissance de la cosmologie moderne

Dans le lointain passé, l'Univers était aussi dense que le Soleil. Avant la Seconde Guerre mondiale, la grande intuition du physicien russo-américain George Gamow fut de prédire que l'Univers a dû être aussi chaud que le Soleil pour que s'y produisent les réactions thermonucléaires qui ont engendré les éléments chimiques les plus légers : l'hélium, par exemple, qui constitue plus du tiers de la masse de la matière de l'Univers, et qui fut essentiellement produit lors du Big Bang. La lumière résiduelle du Big Bang fut découverte par hasard un an avant la mort de Gamow, alors que sa théorie était depuis longtemps oubliée. C'est souvent ainsi que la science avance – par interaction des faits et de la théorie, même quand la théorie est durablement mise de côté.

La théorie de Gamow fut confirmée par les Américains Arno Penzias et Robert Wilson, qui ignoraient tout de ses idées. Ces

radioastronomes avaient décidé de cartographier la Voie lactée en utilisant un vieux radiotélescope autrefois employé pour les communications avec les satellites. Ils découvrirent un rayonnement micro-onde émanant de toutes les régions du ciel. Il n'était pas d'origine locale (ils soupçonnèrent un moment les pigeons qui avaient fait leur nid dans l'antenne), ni terrestre, ni solaire, ni galactique. En procédant par élimination, ils en déduisirent que ce rayonnement provenait des profondeurs de l'Univers.

On l'identifia vite comme la lumière fossile du fabuleux Big Bang. À l'époque, l'Univers avait le millième de sa taille actuelle. C'est à ce moment que le rayonnement devint visible, 300 000 ans après le début de l'expansion. L'Univers devint transparent. Avant cela, il était obscurci par un dense brouillard de rayonnement.

Une fois établie la réalité du « fond diffus cosmologique », ou « rayonnement cosmique », par la découverte de Penzias et Wilson de 1964, une nouvelle quête commença afin de trouver et de mesurer d'éventuelles fluctuations dans ce rayonnement. Il devait nécessairement y en avoir pour rendre compte de la grande inhomogénéité de notre Univers actuel. Les scientifiques voulaient utiliser le fond diffus de rayonnement pour développer et préciser la théorie de la formation des galaxies. C'est alors que commence ma propre histoire, un mélange de débats, de théories et de tests observationnels. La théorisation avait commencé en 1946, mais elle fut complètement abandonnée jusqu'aux années 1960. Elle impliqua ensuite trois décennies d'un pénible travail de détective qui se traduisit finalement par l'une des plus grandes découvertes du XX^e siècle.

Le principal obstacle à notre compréhension de la formation des galaxies était le manque de données sur les conditions initiales de l'Univers primordial. Sans cela, les astronomes en étaient réduits à tâtonner dans le noir. Comme le Big Bang à ses débuts était une intense époque radiative, la gravité avait beaucoup de mal à amplifier d'éventuels grumeaux de matière.

Le rayonnement supplantait la gravité. Or il est intrinsèquement expansif alors que la gravité a tendance à contracter les amas de matière les plus denses.

Le phénomène qui permet à la gravité d'engendrer des inhomogénéités de matière est appelé instabilité gravitationnelle. Cette tendance à concentrer la matière fut totalement contrariée pendant les premiers 10 000 ans du Big Bang. Le rayonnement dominait alors la matière.

Des structures ne purent apparaître que lorsque l'Univers se refroidit. Avec le temps, la matière finit par dominer à son tour le rayonnement. Les fluctuations de densité, qui étaient présentes dès le début, purent enfin, sous l'effet des forces gravitationnelles, s'amplifier et constituer les germes des futures structures de l'Univers. Une question cependant : en avaient-elles la force ?

Depuis 1967, une théorie s'intéresse à ce problème. Elle affirme que le fond diffus de rayonnement doit présenter la même granularité que la matière car c'est la gravité qui a couplé le rayonnement à la matière. De fait, on observe depuis longtemps cette inhomogénéité dans l'Univers, mais hors de toute base théorique.

D'abord, rien n'impliquait l'existence de structures, du moins aux échelles supérieures à celles des amas de galaxies. La présence de structures à grande échelle, cependant, impliquait à son tour celle de fluctuations de grande ampleur dans le fond diffus cosmologique. Une première estimation des années 1970 donnait 10 %, mais cela fut vite considéré comme exagéré ; le fond diffus était beaucoup plus lisse que cela. Mais en quoi cette question concernait-elle les théoriciens ? À l'époque, les cartes de distribution à grande échelle des galaxies étaient trop vagues pour que les cosmologistes en tirent des conclusions claires.

Les physiciens étudiaient le couplage et la croissance des irrégularités primordiales de densité, et commençaient à prédire des amplitudes de fluctuation. Mais le raisonnement

qui consiste à imaginer des « bosses » dans la distribution à grande échelle des galaxies me paraissait bien vague. En 1967, alors que j'étudiais à Harvard, les rares observations à de telles distances, de l'ordre de la centaine de millions d'années-lumière, ne donnaient que des indications de structure purement qualitatives. On avait bien identifié les amas de galaxies mais au-delà, on était dans le domaine de la conjecture.

Il parut cette année-là un article pionnier, signé Arthur Wolfe et Rainer Sachs de l'Université du Texas à Austin, affirmant que rien ne s'opposait à l'existence, à très grande échelle, de fluctuations de densité. Cette échelle incluait la plus grande distance parcourue par la lumière depuis l'émergence du rayonnement cosmique. Sachs et Wolfe pensaient que les fluctuations de densité de 10 % des galaxies, à l'échelle de 1 000 mégaparsecs, devaient y laisser une empreinte, sous forme de petites fluctuations de température.

La course aux origines

Je ne pouvais tout simplement pas admettre ce raisonnement. Il n'y avait aucune preuve de telles fluctuations géantes. Tout jeune doctorant à l'époque, je fus encouragé par mon directeur de thèse. David Layzer, professeur d'astronomie à Harvard, était un des rares iconoclastes dans ce domaine. Il s'était forgé une grande réputation en cosmologie. Il était le héros scientifique que j'étais venu révéler à Harvard.

Les encouragements de Layzer m'aidèrent à ignorer le discours dominant en cosmologie et à suivre mon propre chemin. Comment pouvais-je démontrer que les fluctuations du rayonnement fossile n'étaient pas une hypothèse, mais tout simplement inévitables ? Si j'y parvenais, cela ouvrirait la voie à une nouvelle génération de télescopes micro-ondes capables d'explorer ces fluctuations.

En 1967, une question toute bête m'obsédait : nous sommes dans une galaxie, la Voie lactée, qui s'est formée au début de

l'Univers. Mais à partir de quoi ? J'étais, moi aussi, persuadé que les galaxies s'étaient formées à partir d'infimes inhomogénéités de la densité de matière. Mais cela aurait-il des conséquences observables ?

La solution vint d'une direction complètement inattendue. Las de piétiner dans ma recherche, je m'inscrivis à une école d'été à Woods Hole, délicieux village du cap Cod dans le Massachusetts, et institut d'océanographie mondialement célèbre. L'usage y était d'organiser chaque été, pour les thésards des universités voisines, une série de conférences données par les meilleurs esprits. En 1967, le sujet était la dynamique des fluides en astrophysique. Cela concernait les mêmes équations que celles qui gouvernent les marées et le débit des rivières, mais appliquées à la vie et à la mort des étoiles et des galaxies. Après tout, une étoile n'est-elle pas une énorme boule fluide, et l'Univers un ensemble de milliards de milliards d'étoiles ?

Un des conférenciers était George Field, alors astronome à Princeton, qui devait peu après diriger le département d'astronomie de Berkeley. Je fus fasciné lorsqu'il présenta l'histoire de l'Univers comme la dynamique d'un fluide en expansion, et la formation des galaxies comme l'effondrement et la fragmentation en étoiles d'énormes nuages de gaz.

À chaque étudiant fut attribué un projet. Le mien consistait à trouver un lien entre la formation des galaxies et le rayonnement cosmique. Il devait y avoir une connexion, quelque part dans l'obscur passé du Big Bang. Sous la houlette de Field, je commençai mes calculs. Les galaxies étaient nées dans une mer de rayonnement. De fait, si l'on remonte très loin dans le temps, le rayonnement domine tout, et l'effondrement d'un nuage de gaz est inenvisageable. Cela imposait une limite, de quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang, au-delà de laquelle les premières structures ont pu se former.

Cet été-là, j'ai travaillé très tard dans les nuits étoilées du cap Cod. J'étais passionné, travaillant toute la journée et une bonne partie de la nuit. Puis une inspiration m'est venue : il a dû se produire de petites rides dans le rayonnement cosmique, et ces rides doivent se manifester comme d'infimes fluctuations de température d'un point du ciel à l'autre. Si ce n'était pas le cas, les galaxies n'auraient pu se former. J'en déduisis que l'on devait observer des fluctuations de température de 0,03 % à des échelles allant jusqu'à quelques minutes d'arc (il y a 60 minutes d'arc dans un angle de 1 degré).

À plus petite échelle, on ne devait pas observer de fluctuations. La « viscosité » du rayonnement avait dû les effacer. Il y avait donc un créneau, entre des angles de quelques degrés correspondant à la taille des premières fluctuations de l'Univers à l'époque du rayonnement, et quelques fractions de degré, quand le frottement entre le rayonnement et la matière a effacé les fluctuations. Dès lors, on devrait observer des fluctuations de température de l'ordre de quelques parties pour 10 000, soit quelque six millièmes de degré.

Même cette estimation s'avéra très optimiste. Mon excuse est qu'un autre composant de l'Univers, découvert des années plus tard, avait considérablement amplifié les fluctuations. J'étais trop optimiste d'un ordre de grandeur. Les fluctuations de température se révélèrent 10 fois plus faibles que prévu. C'est la présence et la prédominance de la matière noire qui mena ainsi à minimiser les estimations.

Quand j'étais encore étudiant, j'ai rencontré le grand George Gamow. C'était dans un cocktail lors d'un colloque sur les dernières découvertes à propos du rayonnement fossile. Gamow, qui buvait beaucoup, était un peu saoul mais il a parlé, avec sa voix haut perchée, de sa prédiction dans les années 1940 du rayonnement fossile, travail complètement oublié par la suite. C'était un homme modeste, toujours prêt à donner la priorité à ses collègues. Je me souviens qu'il a dit :

« Si je perds une pièce dans la rue et que quelqu'un trouve une pièce, est-ce que je peux dire : c'est ma pièce ? » Non, en effet, mais en l'occurrence il ne s'agissait pas d'une simple pièce, mais d'un bijou unique !

Quelle que soit l'intensité des fluctuations, on connaissait la densité nécessaire pour contrer les effets du champ de rayonnement avant que toute croissance ne commence et que des structures se développent. Les fluctuations disparaissent car le rayonnement tend à diluer tout excès local de matière. Seules les plus grandes résistent à cette dilution. Ainsi, en toute logique, il doit exister une échelle minimale à partir de laquelle les fluctuations de densité échappent au rayonnement. Cela implique une échelle angulaire minimale en dessous de laquelle les fluctuations de température doivent être invisibles.

En suivant ce raisonnement, les cosmologistes avaient enfin un moyen de trouver l'échelle des fluctuations initiales. L'identification de ces fluctuations de température fut le chaînon manquant qui permit de relier les conditions initiales à la formation des galaxies. Encore fallait-il l'observer pour la comparer aux calculs théoriques. Si l'on ne voyait pas ces fluctuations, c'est toute la théorie du Big Bang qui serait remise en cause.

Comment tester la théorie ?

Comment pouvait-on tester cette théorie avant l'ère des très grands télescopes terrestres et des télescopes spatiaux ? Plusieurs générations d'expériences sur le fond diffus de rayonnement micro-onde se succédèrent cependant. Les limites expérimentales furent d'abord bien supérieures à celles requises par la théorie. Et chaque fois que se produisit une avancée expérimentale, la théorie abaissait encore le seuil de détection.

Les raffinements théoriques montrèrent l'importance de la matière noire dans l'amplitude des fluctuations de densité. La matière noire est censée être froide, car sinon elle empêcherait

la croissance de ces fluctuations. Cette matière noire et froide faisant croître les fluctuations, celles-ci pouvaient être initialement très faibles. Telle est la prédiction que je fis en 1984, à partir de la notion de matière noire, alors peu répandue mais qui commençait à se révéler omniprésente dans les galaxies et les amas de galaxies.

À cette époque, j'avais fait la connaissance d'un jeune astrophysicien italien originaire de Rome, Nicola Vittorio. Il me rendit visite à Berkeley où il resta deux ans. Nous eûmes tout le temps de partager moult expressos au café près du campus. Nous avons passé de longues matinées à la terrasse du bien nommé Café Roma, dont nous avons couvert les nappes de schémas compliqués. Régulièrement, vers midi, Nicola annonçait que ça n'allait pas. En fait, j'interprétais son « *I am hungry* » comme « *I am angry* ». Il me fallut du temps pour interpréter correctement son fort accent italien et comprendre qu'il n'exprimait pas son mécontentement quant à l'avancée de nos calculs, mais simplement le fait qu'il avait faim. Il disait aussi me rendre visite à Berkeley parce que cela lui permettait d'échapper à ses blasphèmes (*curses*)... Il voulait dire : échapper à ses cours (*courses*) ! Nicola et moi avons travaillé sans relâche sur la question des fluctuations. Nous savions qu'il y avait une meilleure façon de faire les calculs. Et nous savions qu'un ingrédient essentiel avait été jusque-là oublié : la matière noire.

La matière noire est nécessairement constituée de particules interagissant faiblement avec leur environnement. Cela permet de comprendre son abondance dans les parties externes des galaxies, et son absence dans les étoiles. Cette matière s'est découplée du rayonnement à une époque très ancienne. Elle agit aujourd'hui comme un gaz très froid de particules interagissant très rarement et très faiblement entre elles ou avec la matière ordinaire. Il s'agit typiquement d'un plasma de baryons, qui se comporte comme un gaz (ionisé) électriquement chargé, étroitement couplé au champ de rayonnement. Toute croissance des fluctuations est « effacée »

par le rayonnement, un peu comme si l'on nageait dans de la mélasse. Cependant, une fois que l'Univers a été dominé par la matière, les particules de la matière noire ont pu se mouvoir librement au sein du rayonnement, sous l'effet de la force de gravité attractive qui amplifia les fluctuations.

[1.](#) Traduction de Charles Baudelaire, 1838.

Des ténèbres à la lumière

Il se passa un quart de siècle avant que mes prédictions soient discutées. Une véritable traversée du désert. Bien peu me prirent au sérieux. Avec quelques autres théoriciens, je faisais partie de la « brigade fossile », ainsi nommée par Geoffrey Burbidge, grand sceptique du Big Bang et ami de Fred Hoyle. Il n'était pas hostile à la cosmologie, mais adorait la controverse.

Retour en 1968. Alors que je finissais ma thèse, mon directeur, David Layzer, m'appela de sa fenêtre alors que je traversais la cour du Harvard College Observatory : « J'ai Burbidge au téléphone, il aide Fred Hoyle à recruter quelqu'un pour son nouvel institut à Cambridge, tu veux le poste ? »

C'est comme ça, à l'époque, que l'on recrutait les postdocs. Pas de publications de postes *urbi et orbi*, pas de piles de formulaires à remplir, rien que quelques mots. Il est vrai que la bourse était d'un an seulement, comme c'était alors la norme. Et l'on pouvait apprendre beaucoup en un an. Je suis donc passé de Cambridge, Massachusetts, à Cambridge en Angleterre. J'eus pour professeur le plus grand sceptique du Big Bang qui soit, et cela ne fit que raffermir mon projet de trouver les fluctuations. Si on ne les trouvait pas, tout le château de cartes de la théorie du Big Bang devait s'effondrer.

Je fis ensuite un autre stage postdoctoral d'un an à Princeton, chez Lyman Spitzer, autre géant de l'astronomie, avant que mon précédent mentor à Woods Hole, George Field, ne me propose de le rejoindre dans son nouveau fief, le département d'astronomie de l'Université de Californie à Berkeley.

La cosmologie n'était pas alors très bien considérée par les physiciens, qui la voyaient comme très spéculative. Les faits étaient rares et sans liens évidents, les étoiles étant la seule certitude observationnelle. D'ailleurs, je ne fus engagé à Berkeley que parce qu'un professeur d'astronomie stellaire mourut d'une crise cardiaque, et que Field parvint à persuader ses collègues que l'avenir était à l'exploration des débuts de l'Univers et pas seulement de l'étude des étoiles. Les années passant, je raffinaï peu à peu mes prédictions initiales des fluctuations du rayonnement cosmique à l'intention de mes collègues observateurs. Cela allait être une très longue quête.

Moyennant des analyses supplémentaires, mes prédictions sur l'amplitude des fluctuations arrivèrent au dixième des prédictions initiales. Le but, désormais, était de rechercher des différences de température d'environ un centième de pourcent, à une échelle angulaire d'un demi-degré. Les fluctuations sont considérablement plus faibles à des échelles inférieures à cause de l'amortissement. Et il ne fallut pas longtemps pour que ces prédictions nouvelles aient un impact décisif sur la géométrie de l'Univers et la constante cosmologique.

Aventures spatiales

Pendant de longues années, cependant, on ne disposa d'aucune donnée, rien que de limites supérieures bien moins fiables. D'une certaine façon, on avait l'impression de construire des châteaux sur des sables mouvants. Puis, en 1992, une grande nouveauté apparut. Un satellite lancé deux ans plus tôt, le *Cosmic Background Explorer* (connu sous l'acronyme de *COBE*), vérifia que des fluctuations de température d'environ 30 parties par million étaient présentes sur une échelle angulaire de plus de 7 degrés.

C'est George Smoot qui était à l'origine du projet de télescope spatial *COBE*. Comme il le raconte dans sa conférence Nobel de 1993, il était jeune étudiant en physique au MIT, en 1967, quand il prit la peine de traverser la ville à

pied jusqu'à Harvard pour assister à mon cours. Je parlais bien sûr de l'inévitable présence de fluctuations dans le fond de rayonnement cosmique.

Parti à Berkeley, en Californie, Smoot travailla sur les rayons cosmiques dans une autre quête frustrante, celle de traces d'antimatière, qui se révélèrent plus insaisissables encore que les fluctuations de température. Il n'en trouva pas. Hélas pour eux, Smoot et son mentor ès rayons cosmiques, le prix Nobel Louis Alvarez, étaient en avance sur leur temps de plusieurs décennies.

Smoot n'oublia jamais mon cours. Il finit par succomber au charme de la cosmologie et, dix ans plus tard, il prit part à la course aux fluctuations de température. Il fallut presque quinze ans de dur travail pour que la NASA accepte de lancer *COBE* en 1989, ce qui fut un remarquable succès. Avec son faisceau de 7 degrés, soit 7 fois la taille de la pleine Lune, il découvrit des fluctuations à très grande échelle. Pour autant, il était très loin de l'échelle (quelques minutes d'arc) attendue pour les fluctuations précurseurs des amas de galaxies, les plus grands objets de l'Univers.

COBE avait découvert des fluctuations primordiales qui devaient en cacher d'autres. Mais sa vision était trouble, et il fallait des analyses d'image sophistiquées pour entr'apercevoir les plus grandes fluctuations de température avec le faisceau de *COBE*. C'est comme si l'on apercevait au loin une chaîne de montagnes : il restait à en discerner les sommets.

Il fallut encore une dizaine d'années pour confirmer les prédictions sur des anisotropies à plus petite échelle. Elles devaient se manifester comme de minuscules variations de la température du fond du ciel. Des expériences basées au sol et d'autres à partir de ballons en donnèrent les premières confirmations. Mais il fallut attendre les télescopes spatiaux pour obtenir les cartes définitives à très faible résolution angulaire correspondant à la naissance des grandes structures de l'Univers.

Deux télescopes spatiaux révélèrent ces mystérieuses rides de température. D'abord le satellite *WMAP* de la NASA, puis le satellite *Planck* de l'ESA, lancé en 2011. La première carte détaillée du cosmos faite par l'homme révélait les grumeaux primordiaux à partir desquels s'étaient développées toutes les structures de l'Univers.

En fait, le progrès ne dépendait pas des seuls télescopes spatiaux, dont le lancement coûte très cher et implique un gros travail de persuasion auprès des comités de la NASA aux États-Unis, ou de l'ESA en Europe. Il était donc sage de faire des expériences préliminaires à haute altitude, en montagne ou à bord de ballons stratosphériques.

Il s'agissait de placer des télescopes micro-ondes dans des lieux d'altitude afin de diminuer l'opacité de l'atmosphère à ces rayonnements. Si l'on est assez haut et qu'il fait assez froid, l'humidité est suffisamment faible pour que l'atmosphère devienne transparente aux micro-ondes cosmiques. Le pôle Sud, et le désert d'Atacama au Chili, à 5 000 mètres d'altitude, sont de bons lieux d'observation. Les ballons sont aussi très utiles, surtout s'ils restent en vol durant plusieurs semaines autour du pôle Sud.

La course a commencé dans les années 1980, avec des télescopes micro-ondes embarqués sur des ballons ou installés dans des sites de haute altitude. Le plus triste de l'histoire concerne le véritable pionnier des satellites *WMAP* et *Planck* qui allaient confirmer, dix ans plus tard, les premières découvertes. Andrew Lange travaillait à Berkeley sous la direction du spécialiste des ballons de haute altitude, Paul Richards, puis en tant que directeur de recherches au California Institute of Technology (CalTech) de Pasadena. C'est lui qui vit le premier ce qui allait se passer.

Il décida de lancer le projet *Boomerang*, un télescope embarqué destiné à cartographier les fluctuations du rayonnement micro-onde à des échelles complétant celles observées par *COBE*. Lange arriva au CalTech en 1993 et

commença aussitôt à lever des fonds pour son télescope. Il travaillait en liaison étroite avec l'astronome italien Paolo de Bernardis, de l'Université de Rome, expert en technologies de l'hélium liquide, le fluide employé pour refroidir les détecteurs placés au foyer du télescope.

Après un vol d'essai en 1997, le télescope fut embarqué pour l'Antarctique afin de réaliser un vol circumpolaire. *Boomerang* vola à 42 kilomètres d'altitude, resta deux semaines en orbite autour du pôle Sud et atterrit non loin de son point de départ, ainsi que son nom le laissait prévoir. Ses résultats furent une révélation. On avait certes de premiers indices provenant d'expériences au sol, comme celle de Lyman Page à Princeton, mais *Boomerang* découvrit le premier pic de fluctuation de température. Ce pic fut trouvé à une échelle angulaire d'un degré. Couplé à mes propres calculs et à leur perfectionnement par d'autres chercheurs, cela militait fortement en faveur d'un univers euclidien, c'est-à-dire plat. La géométrie enseignée dans les écoles était finalement bien celle de l'Univers. Depuis, d'autres pics ont été trouvés grâce à des télescopes à plus haute résolution, ainsi que le prédisait la théorie.

La découverte du premier pic fut un résultat extraordinaire, confirmé par toutes les observations satellites subséquentes. Mais Lange n'eut pas la joie de voir ses observations confirmées. Souffrant d'un trouble bipolaire, une forme grave de dépression, il se suicida en 2010.

Les résultats définitifs sur les fluctuations de température viennent donc de l'espace, seul lieu où l'on s'affranchit définitivement des perturbations atmosphériques. Comment, en observant à une température au sol de 300 degrés Kelvin (environ 20 degrés Celsius), pourrait-on observer des fluctuations d'un dix millième de degré dans un rayonnement de 3 degrés ? Seul l'espace est assez froid pour éliminer les erreurs systématiques des expériences au sol ou en ballon.

Après le succès de *COBE*, il devint évident qu'il fallait désormais un nouveau télescope satellisé pour mesurer le rayonnement cosmique avec une meilleure précision. Avec son angle de 7 degrés, *COBE* avait juste entr'aperçu ce qu'il restait à découvrir. C'était un peu comme regarder une carte du ciel floue. Les expériences en ballon améliorèrent la vision, mais elles duraient tout au plus quelques heures, si tout allait bien, et l'on ne pouvait observer que des angles de quelques degrés.

Le satellite *MAP* (*Microwave Anisotropy Probe*, cartographie des anisotropies micro-ondes) fut proposé en 1995 à la NASA par Charles Bennett de l'Université John Hopkins, en lien étroit avec David Wilkinson, astronome de Princeton. Il se trouve que j'ai assisté au processus de sélection, qui s'est révélé être un étrange bras de fer politique. En fait, les délibérations du comité de la NASA virent s'affronter les scientifiques de la côte Est et ceux de la côte Ouest.

D'un côté il y avait Charles Bennett, soutenu par le Goddard Center de la NASA et Princeton, et une technologie robuste d'ondes radio basse fréquence, de l'autre il y avait Andrew Lange, soutenu par le Jet Propulsion Laboratory de la NASA et le CalTech, avec une technologie innovante et non testée, utilisant des hautes fréquences micro-ondes, à même d'éliminer la contamination par les poussières. Lange employait pour cela des bolomètres refroidis à 2 degrés Kelvin.

Les détecteurs de Bennett, des radiomètres plus conventionnels, fonctionnaient à la température de l'espace, et étaient bien adaptés pour enlever le bruit synchrotron à basse fréquence, dû aux électrons des rayons cosmiques piégés par le champ magnétique interstellaire de notre Galaxie. Le comité devait faire un choix, mais il ne parvint pas à se décider après de longues heures de débat. Devait-il favoriser la technologie nouvelle, faisant appel à des dispositifs cryogéniques très incertains à cette époque, ou s'en tenir à une stratégie moins hasardeuse ?

En désespoir de cause, on appela un éminent membre du comité qui se remettait d'une crise cardiaque. On ne sait plus ce qu'il répondit exactement, mais le comité opta finalement pour la technologie la plus éprouvée. La côte Est triompha. Wilkinson mourut d'un cancer l'année suivant le lancement, en 2001, et le télescope embarqué fut rebaptisé en sa mémoire *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, ou *WMAP*, en 2003.

L'Europe dans la course

Puis les Européens s'engouffrèrent dans la brèche. En 2006, l'ESA envisagea deux détecteurs, à haute et basse fréquences, qu'elle fonda en un seul projet, baptisé *Planck*. Ses concepteurs comprirent qu'il y avait une fréquence sensible, entre 100 et 200 GHz, où les sources de contamination par le bruit étaient minimales, juste à l'intersection des deux instruments embarqués, le radiomètre et le bolomètre, ce qui s'avéra extrêmement précieux pour vérifier les données.

Les cartes définitives furent le résultat du travail de Romains d'une collaboration de quelque 500 chercheurs européens, américains et canadiens. Il fallut soigneusement nettoyer les données brutes de *Planck* : imaginez que vous conduisiez une voiture avec un pare-brise sale, et le soleil en face. Il faut utiliser des essuie-glaces et réduire l'éblouissement pour voir clairement la route.

Les concepteurs du satellite *Planck* sont le radioastronome Nazzareno Mandalese, de Bologne, et le cosmologiste Jean-Loup Puget, de Paris. Il s'est agi d'une véritable collaboration franco-italienne, impliquant la fusion de deux instruments distincts. Les Italiens se sont concentrés sur les basses fréquences, essentielles pour prendre en compte le bruit de fond radio (le rayonnement synchrotron émis par les pulsars et supernovæ), et les Français sur les hautes fréquences, seules capables de percer le brouillard de la poussière interstellaire.

Il a donc fallu marier deux technologies différentes, celle des radiomètres et celle des bolomètres. Les premiers mesurent

des ondes radio, les seconds mesurent la chaleur, et tous deux furent placés au foyer du télescope. Au début, cela était considéré à l'Agence spatiale européenne (ESA) comme une bonne façon de faire des économies. À l'usage, ce mariage se révéla coûteux et générateur de nombreux retards. La principale difficulté venait de ce que le détecteur italien fonctionnait à température ambiante alors que l'instrument français opérait à très basse température, dans l'hélium liquide. Les assembler en un même point s'est avéré technologiquement très difficile et, les coupes budgétaires s'accumulant, l'ESA insista pour que *Planck* soit lancé en même temps que le télescope *Herschel*, destiné à cartographier l'Univers dans l'infrarouge lointain.

Il fallut donc attendre que les deux télescopes soient prêts. Ils furent finalement lancés en 2009 par une fusée Ariane depuis la Guyane française, sur une orbite à un million et demi de kilomètres de la Terre, choisie pour réduire la brillance de la Lune.

Le ciel vu par *Planck* contient des bruits indésirables venant de notre Voie lactée, dus aux émissions de gaz ionisés diffus, de rayons cosmiques spiralant autour des lignes du champ magnétique interstellaire, et de la poussière interstellaire. Pour compliquer les choses, il faut ajouter des sources discrètes d'émissions extragalactiques diffuses. Tous ces fonds durent être enlevés l'un après l'autre pour faire apparaître l'infime signal cosmique recherché. Ce nettoyage du ciel micro-onde fut accompli en 2013, et le résultat est une pure merveille, même pour le non-cosmologiste.

Les cartes du ciel qui en résultent montrent les infinitésimales fluctuations dont ont émergé toutes les structures de l'Univers. Des plus petites galaxies aux gigantesques amas, les germes sont visibles comme de petites empreintes, de minuscules zones plus chaudes que le fond du ciel. Même les plus grands vides de l'espace sont détectables dans les régions les plus froides.

L'étude des fluctuations de température du ciel a donné une vision entièrement nouvelle des débuts de l'Univers, qui sera décrite dans les chapitres suivants. Mais le plus remarquable de tout cela est peut-être qu'en étudiant le ciel, on peut en déduire la géométrie de l'Univers. Il se trouve que l'espace est celui qu'Euclide préférait, c'est-à-dire un espace plat, tel que la somme des angles d'un triangle y vaut 180 degrés. Einstein pensait que l'espace était courbe, et il avait bien sûr raison à l'échelle des objets individuels, comme les galaxies et les étoiles, et plus encore à proximité des objets de gravité extrême, tels les trous noirs.

La gravité courbe l'espace, et c'est même comme cela que l'on mesure et décèle la présence de la matière noire qui serait autrement invisible. Mais il se produit, à plus grande échelle, un remarquable effet d'aplatissement : les effets gravitationnels de toute la matière, dont la plus grande partie est noire, sont compensés par un étrange champ de force qui agit comme une antigravité. On l'appelle énergie sombre, et elle sera le sujet d'un prochain chapitre. Cette compensation fait que la géométrie de l'Univers correspond, à deux dimensions, à celle d'une feuille de papier plane. L'Univers est donc « plat ». Quant à savoir pourquoi, c'est une grave question sur laquelle nous aurons aussi l'occasion de revenir.

Mon grand voyage

J'ai grandi dans une banlieue ouvrière de Londres. Bien connue pour son équipe de football, Tottenham m'offrait pratiquement toutes les possibilités, sauf celle d'accéder aux tours d'ivoire de l'université anglaise. J'eus cependant la chance d'être distingué par mon professeur de mathématiques de lycée comme un élève prometteur. J'étais en fait assez paresseux, avec des éclairs d'activité. Je fus probablement le premier élève à passer du lycée de Tottenham à l'Université de Cambridge, et le premier en tout cas de ma famille, installée en Grande-Bretagne depuis deux générations, à entrer à l'université.

La notion de survie s'est imposée à moi dès ma plus tendre enfance. Et cela est venu du football. Le stade de l'équipe locale, les Tottenham Hotspurs, était à moins d'un kilomètre de la maison, et pouvait accueillir 40 000 spectateurs, dont seuls quelques-uns étaient assis. Les autres restaient debout sur des tribunes spéciales pour voir le match. Je vous laisse imaginer la densité de la foule par les jours de grands derbys contre des voisins rivaux, comme Arsenal.

Pour éviter les accidents chez les jeunes, les Spurs ouvrirent une tribune réservée aux moins de 12 ans. Là, on pouvait apprendre impunément à pousser et à bousculer, et surtout à faire la ola dans les moments de grande excitation. Et nous étions en avance sur notre temps : la première ola eut lieu lors de la Coupe du monde 1986 dans un stade bondé. Ainsi, j'étais si bien entraîné que, à 12 ans, j'eus le droit d'intégrer les tribunes des grands, dont les bousculades musclées me parurent supportables.

Je n'oublierai jamais M. Miller, mon prof de maths. Sa patience était infinie. Il entretenait ma passion pour les cassette mathématiques, et me consacrait des heures supplémentaires d'algèbre et de géométrie, tout particulièrement dans ces arcanes mathématiques si prisés des examinateurs de Cambridge depuis des siècles. Heureusement, on dispose du contenu de tous ces examens. C'est ainsi que je passai l'examen avec un an d'avance et que l'on m'offrit d'entrer à Clare College, l'un des plus vieux collèges de Cambridge, fondé en 1326.

Cela même était inattendu. J'appris ensuite que le principal de Clare, Sir Eric Ashby, souhaitait élargir son recrutement. Pendant des siècles (six, pour être précis), Clare n'accueillit que l'élite des lycées anglais, mais cela changea en 1960. Et il fallut attendre dix ans encore pour que Cambridge – en l'occurrence Clare – admette des filles. Aujourd'hui encore, la moitié des étudiants de Cambridge et d'Oxford viennent de l'élite des lycées, mais à mon époque, je faisais figure de bête curieuse.

À Cambridge

J'étudiais les mathématiques pendant trois ans à Cambridge mais, comme je n'oubliais pas de profiter de la vie, mes résultats en souffrirent. Je sortis avec un diplôme de « deuxième classe », tout juste de quoi rester à l'université et m'inscrire en thèse. Se posa alors la grande question : faire une thèse, mais dans quel domaine ? J'essayais d'abord un stage professionnel, pendant les vacances de Pâques, dans une compagnie d'assurances londonienne. Je m'ennuyais à mourir et compris que je ne deviendrais jamais un bon actuaire.

Puis je passais un week-end d'entretien pour un poste de gestion dans une grande entreprise de savons – le leader mondial des détergents. Nous étions une poignée d'étudiants hébergés dans un magnifique hôtel du nord de l'Angleterre, avec accès libre au bar. Cela permit aux examinateurs de se

faire rapidement une idée de ceux qui avaient un avenir dans la gestion. Je ne me rappelle même plus si l'un de nous passa l'épreuve avec succès...

Les mathématiques que j'avais étudiées ne m'avaient pas enthousiasmé. Je terminais la deuxième partie des célèbres *Tripes*, ainsi nommés, me dit-on, car dans l'ancien temps les candidats étaient assis sur un tabouret à trois pieds. Ayant un peu de temps libre, peut-être parce qu'un cours avait été annulé, je tombais sur le cours de Dennis Sciama. Je l'entendis parler des origines de la théorie de la relativité générale d'Einstein, et de la façon dont le principe de Mach avait inspiré Einstein.

C'était d'une grande difficulté et cependant, assis au fond de l'amphi, je tombai sous le charme. Sciama était éloquent et racontait son histoire avec de grands gestes. Ernst Mach était un physicien et philosophe viennois du XIX^e siècle, dont les idées eurent un grand impact sur Albert Einstein. Mach pensait que l'« essence » de la masse et de l'inertie était intimement connectée aux étoiles lointaines. Selon lui, tout était unifié : sans les étoiles distantes, il n'y aurait pas de masse.

Il appliquait cela à la rotation : nous savons que la Terre tourne car nous voyons les planètes et les étoiles nous tourner autour en 24 heures, l'axe de rotation pointant dans la direction de l'étoile polaire. Mais par rapport à quoi se fait cette rotation ?, demandait Mach. Sa solution était que la Terre tourne par rapport à un repère défini par les étoiles lointaines. Les étoiles semblent tourner autour de la Terre alors que c'est la Terre qui tourne par rapport aux étoiles, mais il n'y a pas de rotation absolue. Prenez un seau d'eau, suggérait Mach (comme Newton l'avait fait avant lui), et faites-le tourner sur lui-même. La surface de l'eau devient concave, car la rotation se fait par rapport aux masses distantes de l'Univers.

Quand Einstein conçut une nouvelle théorie de la gravitation, en 1915, la théorie de la relativité générale, il y intégra les idées de Mach, en remplaçant la notion de gravité par celle de

courbure de l'espace. Tout effet local de la gravité est relié, *via* la courbure locale de l'espace, à l'Univers lointain. Nous vivons tous dans un continuum d'espace-temps.

L'Univers n'a peut-être pas tourné ce jour-là de 1963, mais ma tête, elle, fut toute retournée par les perspectives que cela ouvrait. En écoutant Sciama raconter l'histoire du seau en rotation par rapport aux étoiles fixes, j'étais captivé. Je serais cosmologiste.

Pourtant, le chemin était hérissé d'obstacles. Mes médiocres résultats ne me permettaient pas d'étudier à Cambridge avec Sciama. Avec le recul, je m'aperçois que ce fut une chance. Cambridge, dans le sillage de Sir Arthur Eddington et de ses études sur les étoiles, était un centre d'astronomie théorique. Mais le monde de l'astronomie était en train de changer. Le vieil observatoire royal de Greenwich avait été transféré dans le Sussex à Herstmonceaux Castle, le plus vieux château anglais en briques, juste après la Seconde Guerre mondiale. Son directeur et astronome royal, Sir Richard Woolley, inaugura en 1967 le télescope Isaac Newton de 2,5 mètres, censé concurrencer les grands télescopes californiens. Quand il apparut que les brumes et la pollution du Sussex n'étaient pas propices à l'astronomie, le télescope fut déplacé à La Palma aux Canaries, où il reprit du service en 1984.

Quant à moi, je n'avais guère le choix. La Californie, avec ses ciels clairs et ses grands télescopes, était le paradis de l'astronomie. C'est là que la cosmologie avait ses racines et de là qu'elle irradiait dans le monde entier. Je rêvais donc de Californie, mais cela semblait totalement utopique. Sciama était un iconoclaste, qui choisissait les tout meilleurs étudiants. À cette époque, il militait en faveur de la théorie de l'Univers stationnaire, une théorie qui niait le Big Bang et postulait la création continue de nouvelles étoiles et galaxies pour remplacer celles qui disparaissaient avec l'expansion de l'Univers.

Sciama était têtue. Il n'abandonna cette théorie que des dizaines d'années plus tard, quand les preuves s'accumulèrent contre elle. D'autres, comme son initiateur Fred Hoyle, ne l'abandonnèrent jamais. Avec ces vues hérétiques, Sciama et Hoyle étaient les seuls cosmologistes de Cambridge à une époque où le domaine n'avait pas encore acquis sa respectabilité. Pour autant, malgré les convictions de leur maître, les étudiants de Sciama étaient encouragés à outrepasser la théorie de l'Univers stationnaire. Parmi eux se trouvait un certain Stephen Hawking.

En route pour Harvard

Je ne fis pas partie de ce groupe car, rejeté par Cambridge à cause de mon médiocre diplôme, je partis à Manchester pour suivre un cours d'astrophysique, dans l'espoir que cela m'ouvre le monde de la cosmologie. J'eus la chance de travailler avec un expérimentateur qui testait le principe de Mach en laboratoire. Roger Jennison, fameux radioastronome, savait tout sur le fonctionnement et la construction des radio-interféromètres, machines combinant les observations de nombreux radiotélescopes disséminés sur une grande surface. Ce nouveau principe allait révolutionner la radioastronomie en ajoutant à une excellente sensibilité une remarquable résolution angulaire.

Jennison, comme beaucoup des meilleurs astrophysiciens que j'ai rencontrés lors de mes études, était obsédé par un défi bien éloigné de sa spécialité, la radioastronomie : il construisait une gigantesque platine tournante pour tester le principe de Mach. Même pour moi, tout jeune théoricien, l'expérience était étrange. En fait, elle ne menait nulle part, mais je ne pouvais pas le savoir.

J'étais censé développer la théorie nécessaire pour expliquer le résultat qu'il espérait obtenir. J'ai fait de mon mieux, mais cela ne donna aucun article publiable. Jennison fut cependant impressionné ; convaincu de mon potentiel en tant que

cosmologiste théoricien, il me fit franchir une nouvelle étape en me faisant attribuer une bourse pour étudier aux États-Unis.

À la bibliothèque de l'université, je feuilletais distraitemment l'*Astrophysical Journal*, dont l'article de tête touchait invariablement à la cosmologie, et l'un d'eux m'intéressa tout particulièrement. Il concernait l'application du théorème du viriel, relatif à l'équilibre gravitationnel des étoiles et des galaxies, malgré le fait que ces objets fassent partie d'un Univers en expansion.

L'auteur était un cosmologiste de Harvard. Je demandai aussitôt ma bourse à ce qui était le prédécesseur de l'Agence spatiale européenne, et débarquai à Harvard en 1964 pour travailler avec ma nouvelle idole, David Layzer. À ma grande surprise, je découvris qu'il était partisan du « Big Bang froid ». Un Univers froid, intrinsèquement instable, a tendance à se craqueler et se fissurer, puis à se fragmenter. Il ne devient chaud que lorsque se forment les étoiles. À l'époque, cette théorie présentait l'avantage d'expliquer la formation des grandes structures.

Layzer accepta de superviser ma recherche sur la formation des galaxies dans un Univers en expansion. Il ne me fallut pas longtemps pour examiner la formation des galaxies dans un Univers froid et, tout comme Layzer, trouver que cela marchait très bien. Mais il se passa, cette année-là, une chose qui allait tout changer. Arno Penzias et Robert Wilson, des laboratoires Bell dans le New Jersey, détectèrent le rayonnement fossile émanant du commencement de l'Univers. Le problème était que ce rayonnement cosmique micro-onde militait fortement en faveur d'un Big Bang chaud, et non d'un Univers froid... Comme c'est souvent le cas en science, l'idée mit beaucoup de temps à être acceptée et il fallut près de cinq ans pour passer de l'Univers froid à l'Univers chaud. Quant à moi, je bouillais d'impatience.

Une des raisons de l'aversion de Layzer à l'égard du Big Bang venait de la vieille rivalité entre Harvard et Princeton,

dont le groupe de cosmologie était en faveur d'un Univers chaud. Quoi qu'il en soit, je me trouvais dans le bon pays, sur la bonne côte et au cœur de l'action, qu'elle soit chaude ou froide. Et je ne l'ai jamais regretté.

Je travaillais sous la direction d'un rebelle iconoclaste, et il s'avéra que c'était exactement ce dont j'avais besoin. Layzer continuait imperturbablement à creuser son hypothèse d'un Big Bang froid, persuadé par le grand cosmologiste russe Iakov Zeldovich qu'un Univers froid, fondamentalement instable, formait naturellement des galaxies. En subissant une expansion, et passant d'un état froid et superdense à un état cristallin, il devait se fissurer. Et ces fissures, en accréant la matière, pouvaient devenir des germes de galaxies.

Quand le rayonnement fossile du Big Bang fut découvert en 1964, Zeldovich quitta aussitôt le navire, et devint un ardent avocat de l'Univers chaud. Mais Layzer, jamais ! Il bâtit de curieux modèles comportant des sortes d'aiguilles de fer disséminées dans l'espace intergalactique, qui absorbaient le rayonnement des étoiles et réémettaient un spectre thermique à 3 degrés Kelvin, celui du rayonnement cosmique. Malheureusement, son spectre ne fut jamais assez parfait, alors que, les données s'accumulant, celui du rayonnement cosmique s'approchait de plus en plus de la perfection.

Le modèle de l'Univers froid fut finalement écarté. Il n'est aujourd'hui mentionné qu'en note dans l'histoire de la cosmologie, comme d'ailleurs celui de l'Univers stationnaire. Mais Layzer me laissait totalement libre de mon choix, et je passai moi aussi du froid au chaud.

J'allai en décembre 1964 à Austin, au second Symposium sur l'astrophysique relativiste. Le Texas était devenu un grand centre de physique relativiste. La meilleure façon de tester la relativité générale d'Einstein était de faire de l'astronomie. C'est à cette époque, lors d'un colloque au Texas, que le célèbre John Archibald Wheeler forgea le terme de « trou noir ». Il se passait alors des choses passionnantes. Les

quasars, objets les plus lumineux de l'Univers et les plus lointains, comme certains le pensaient, venaient d'être découverts. Étaient-ils alimentés en énergie par des trous noirs supermassifs ? Les découvertes les plus récentes, comme la distance des quasars ou la nature du rayonnement cosmique, étaient chaudement débattues dans les rencontres texanes.

C'est là que je rencontrai George Gamow, un an avant sa mort à Boulder, Colorado, et que je fus frappé par son indifférence à la découverte par Penzias et Wilson du rayonnement cosmique. On avait alors complètement oublié ses propres prédictions, spécialement celles qu'il avait faites avec son étudiant Ralph Alpher sur le Big Bang, une quinzaine d'années auparavant.

Passer une thèse à cette époque impliquait bien plus que la maîtrise de son sujet. Harvard exigea par exemple que je passe un examen de langue vivante, consistant à traduire en anglais une page extraite d'un article allemand devant un modeste astronome russe qui devait sa célébrité à ce que sa femme, Cecilia Payne-Gaposhkin, fut la première femme professeur à Harvard. C'est d'elle que j'avais appris ce que je savais des étoiles, tandis qu'elle enchaînait cours sur cours sans jamais s'arrêter.

Je dois dire à son crédit que Layzer avait l'esprit très ouvert ; il m'encouragea à me tourner vers la théorie du Big Bang chaud quand je me pris à douter de ses tentatives de plus en plus baroques pour introduire le tout nouveau rayonnement cosmique dans son Univers froid.

Mon premier article concernait le principe de Mach vu sous un angle bien particulier. Revenant à mes racines cosmologiques, je posais le problème de la formation des galaxies dans l'Univers en rotation de Gödel. Mais cette direction de recherche n'était guère plus prometteuse que l'Univers froid. Le temps passait, mais je ne me plaignais pas. Pour un petit Londonien, la vie était belle à Cambridge, Massachusetts.

Je passai l'été de 1966 en tant qu'assistant de recherche à l'American Science and Engineering, une start-up du MIT dirigée par Bruno Rossi et Riccardo Giacconi. La société venait de lancer un satellite sensible aux rayons X pour étudier la fluorescence de la Lune. Comme cela arrive souvent en science, le satellite découvrit par sérendipité la première source cosmique X, Scorpio X-1, et le fond X diffus, ce qui fit totalement oublier le but initial de la recherche.

Mon travail d'été consistait à mettre sur pied une théorie du fond X diffus. Son isotropie sur tout le ciel impliquait une origine cosmique, extragalactique, et sa grande uniformité indiquait de nombreuses sources très lointaines. Spéculant librement à partir de l'unique source X connue, j'en vins à développer un goût certain pour les fonds diffus, thème qui allait jouer un rôle central dans ma carrière.

Je faillis, à ce moment, devenir un observateur. L'observatoire de Harvard demandait à ses jeunes théoriciens d'entreprendre un projet observationnel. Avec les coordonnées approximatives d'une des dernières sources X découvertes dans la constellation du Cygne, je passai de nombreuses nuits glacées à l'observatoire Agassiz, au télescope de 1,5 mètre, relique d'un passé glorieux alors utilisée pour entraîner les jeunes astronomes dans mon genre.

Ma mission consistait à photographier plusieurs fois par nuit le champ d'étoiles de Cygnus X-1. Je développais moi-même mes plaques, puis les étudiais dans l'ombre d'un comparateur à clignotements afin de déceler une éventuelle variabilité d'éclat à court terme. Comme l'éclat de Scorpius X-1 variait à l'échelle de la nuit, voire de quelques heures, je pensais qu'il en irait de même avec Cygnus X-1. La théorie voulait que l'on voie une étoile variable bleue de magnitude 15. L'argument était erroné, mais comment diable aurais-je pu le savoir ?

Ma mission échoua, et je fus coiffé au poteau par Alan Sandage et Jerry Kristian, astronomes au mont Palomar qui avaient l'avantage de disposer en permanence du télescope de

5 mètres et de nuits d'une grande clarté. Ils identifièrent vite la contrepartie optique de Cygnus X-1, hautement variable comme on s'y attendait, mais aussi beaucoup plus brillante que prévu. Cygnus X-1, et spécifiquement l'étoile HDE 226688, se révéla être l'étoile la plus brillante (magnitude 9) sur mes plaques. Elle était 100 fois plus brillante que prévu ! Fixé comme je l'étais sur les étoiles de faible éclat, je ne pouvais voir les variations de l'étoile la plus brillante. Surtout, mes photos floues ne pouvaient en aucun cas tenir la comparaison avec celles des professionnels du mont Palomar. C'est ainsi que je décidais de devenir théoricien.

Non que j'aie une nouvelle solution à l'énigme de l'origine des galaxies. J'essayai plusieurs idées sans grand succès jusqu'à cette école d'été de Woods Hole en 1967. Là, sous la direction de George Field, je tentais d'intégrer le fond de rayonnement cosmique à la théorie de la formation des galaxies.

J'écrivis en l'espace de quelques mois mon premier article, intitulé « Fluctuations dans la boule de feu primordiale ». Pour former les galaxies, les fluctuations de densité initiales agissaient comme des ondes sonores sous l'effet de la pression du rayonnement. Ces fluctuations vibraient comme une corde de violon, avec une amplitude finie, ce qui finissait par engendrer un léger excès de densité, germe d'une future galaxie. Sa contrepartie en termes de rayonnement devait se manifester sous forme d'infimes fluctuations de température dans le rayonnement cosmique. Cela devait être détectable à des échelles angulaires inférieures au degré. Galaxies et fluctuations de température étaient intimement connectées.

Il y eut un premier problème. Je me crus à nouveau « grillé » quand je vis l'article de Sachs et Wolfe qui parut peu après le mien. Mais tout alla mieux quand je compris que leurs fluctuations à grande échelle angulaire étaient basées sur une simple extrapolation des irrégularités à grande échelle de l'Univers, à propos desquelles on ne savait pratiquement rien à l'époque. Mes prédictions, au contraire, de fluctuations à petite

échelle angulaire, découlaient directement de la présence des galaxies. Et l'amplitude des petites fluctuations de densité responsables de leur formation pouvait être calculée avec la théorie pionnière publiée par le physicien russe Lev Landau en 1946. J'étais enfin parvenu à une prédiction essentielle à notre compréhension du Big Bang comme modèle cosmologique de l'Univers observable. Je publiais cela sous forme de lettre à la revue *Nature* en 1967.

À Berkeley

Après avoir passé ma thèse l'année suivante, m'être marié et avoir fait quelques détours par Cambridge et Princeton, je m'installais à Berkeley en 1970 comme benjamin des membres de la nouvelle faculté. On pouvait alors sentir le gaz lacrymogène jusqu'au cœur du campus, sur Telegraph Avenue, lieu légendaire de naissance du Free Speech Movement aux États-Unis.

L'année précédente, le gouverneur de Californie, Ronald Reagan, avait fait donner la police contre une grosse manifestation. Le Free Speech Movement commençait très fort, et les étudiants enthousiastes étaient pleins d'énergie. L'ambiance était bien différente en Angleterre où j'avais grandi, et même en Nouvelle-Angleterre où j'avais fait mes études. Non que la transition vers la modernité fût toujours facile : je fus convoqué à une réunion par le vice-président de l'Université de Californie, qui adressa sa lettre au département d'astrologie !

Mes étudiants étaient brillants, mais je ne peux pas en dire autant des étudiants de première année, qui venaient par centaines aux cours. Il n'était pas rare d'en voir lire leur journal en cours, même au premier rang. Mes étudiants de thèse, eux, venaient des meilleures écoles du pays. Ils passaient quatre à cinq ans sur leur thèse. Pour la plupart bons physiciens, ils s'intéressaient aux questions cosmologiques les plus ardues.

Le seul défaut du système américain est que les études sont payantes. Chacun devait donc lever des fonds dans les agences nationales, ce qui signifie que je passais la majeure partie de mon temps à remplir des demandes. À l'époque, le taux de succès était d'environ 30 %, mais cela me suffisait pour aider mes étudiants. Ces crédits sont aujourd'hui bien plus limités, en tout cas pour la recherche fondamentale, et le nombre d'étudiants sans emploi a plus que triplé. Le taux de succès a chuté à 10 % à la National Science Foundation ou à la NASA. La demande de fonds est devenue une véritable loterie.

On peut répartir les astronomes en trois catégories : observateurs, théoriciens et instrumentalistes. Les premiers collectent les données, que les seconds tentent d'expliquer, les troisièmes, plus rares car unissant de hautes compétences en informatique et ingénierie, construisent les télescopes. Ce travail est si spécialisé que bien peu d'astronomes observent et construisent à la fois. Et il y a peut-être deux astronomes dans le monde capables de faire les trois. Je ne suis pas l'un d'eux.

Je suis théoricien et le suis devenu sur le tas. Quand je suis arrivé à Berkeley, le chef du département, George Field, m'annonça qu'il avait réservé deux nuits au télescope de 3 mètres de l'observatoire Lick. Son assistant observateur, un postdoc hollandais, était retenu par des problèmes familiaux ; pouvais-je le remplacer au pied levé ? Le mont Hamilton, site de l'observatoire Lick, est à deux heures de voiture de Berkeley. Fondé en 1887 par l'entrepreneur James Lick, qui est enterré sous le télescope, il s'agit du premier observatoire d'altitude au monde à avoir été occupé en permanence. Le télescope fut achevé en 1959 ; c'était la réplique publique (financée avec de l'argent public, comme celui de l'Université de Californie) du télescope de 5 mètres du mont Palomar, construit sur fonds privés par le CalTech et les observatoires Carnegie.

L'observateur, moi en l'occurrence, était assis dans une nacelle surplombant le miroir géant placé au foyer du télescope. Il fallait orienter la machine, contrôler la caméra,

s'occuper des plaques photo et s'assurer de la résolution de l'image. J'avais une liste d'étoiles à observer, et il s'agissait d'étudier l'absorption de leur lumière par les gaz interstellaires. Je choisissais une étoile, la pointais au télescope, faisant tourner le dôme si nécessaire. Une fois l'étoile centrée, je lançais la photo, prélevais la plaque, en introduisais une nouvelle puis passais à l'étoile suivante.

Je travaillai comme un démon toute la nuit, puis développai mes plaques, ce qui mit plusieurs heures, avant de prendre un repos bien mérité et d'entamer ma seconde nuit. Je pus enfin rentrer à Berkeley avec mes quarante plaques bien emballées et rattraper mon sommeil perdu. Lorsque je voulus développer les plaques, une terrible déception m'attendait : toutes les émulsions étaient racornies... Personne ne m'avait dit qu'il fallait les sécher soigneusement avant de les transporter. L'humidité et la chaleur avaient tout rendu inutilisable. Je ne sais plus si mes collègues m'ont pardonné, mais je n'ai plus observé pendant plusieurs années.

C'était avant la révolution des matrices CCD, dans les années 1980. Aujourd'hui, plus aucun étudiant ne sait ce qu'est une plaque photographique. En ce qui me concerne, je revins à la théorie avec un plaisir extrême.

L'inflation à la rescousse

Dans le passé, il est arrivé que l'Univers soit si dense qu'aucune particule ne pouvait exister. C'était un milliardième de seconde après le Big Bang. Notre actuelle physique des particules est testée par un consortium de chercheurs rassemblés autour du LHC (Large Hadron Collider, grand collisionneur de hadrons²), le plus grand accélérateur de particules du monde. Cette gigantesque machine pourrait nous permettre d'étudier l'état de l'Univers quelques millièmes de milliardième de seconde après le Big Bang.

Mais la cosmologie ne s'arrête pas là. Quand nos machines atteignent leurs limites, il nous reste la théorie. Selon la théorie quantique, telle que l'utilise la cosmologie, l'Univers a commencé une infime fraction de seconde après le Big Bang. Plus précisément : un millième de milliardième de milliardième de milliardième de seconde. Avant cela, nous ne disposons d'aucune théorie correcte, ce qui ne nous empêche pas de spéculer sur les tout débuts. Aux fabuleuses énergies que cela implique, les forces fondamentales de la nature n'étaient pas encore distinctes. Les forces nucléaires, par exemple, n'étaient pas distinctes de la force électromagnétique comme c'est le cas aujourd'hui. Ce n'est qu'avec l'expansion de l'Univers, et son refroidissement, que ces forces se sont individuées.

Ce refroidissement et cette séparation des forces ont deux conséquences. La première est que les protons devraient aujourd'hui encore être légèrement instables. Le processus doit être très lent aux faibles énergies actuelles, mais il doit se produire, même si c'est rarissime. Si l'on rassemble

suffisamment de protons, l'un d'entre eux doit se désintégrer un jour. Reste à savoir combien de temps il faudrait attendre.

Chaque seconde, quelque part, un proton doit se désintégrer. Considérons notre propre corps : des protons peuvent-ils s'y désintégrer ? Notre corps contient environ 10^{29} protons. Supposons qu'il y ait environ 30 désintégrations radioactives par seconde. La désintégration du proton donnant des rayons gamma, une telle dose de radioactivité se traduirait vite par un cancer généralisé. Les estimations actuelles donnent une durée de vie du proton d'au moins 10 milliards de fois l'âge de l'Univers.

Jusqu'à maintenant, les grands théoriciens de notre Univers ont été les cosmologistes et les astronomes, des savants comme Alexander Friedmann, Georges Lemaître, Albert Einstein, Willem de Sitter et plus récemment Arthur Eddington. Tous ont travaillé durant les premières décennies du XX^e siècle, et sont immortalisés par les divers modèles d'univers auxquels ils ont donné leurs noms. La plupart de ces modèles n'ont plus aujourd'hui qu'un intérêt historique, depuis la mise au point de l'actuel modèle standard de la cosmologie.

Ce dont ont manqué les grands théoriciens du passé, c'est de données précises sur les conditions initiales de l'Univers, les premiers instants du Big Bang. Dans les années 1930, cette théorie était dans les limbes ; elle vint d'un groupe de chercheurs qui n'étaient pas des astronomes, mais des physiciens des particules. Ces outsiders, originaires de deux communautés distinctes de physiciens, bouleversèrent l'astronomie et firent remarquablement progresser la cosmologie.

L'arrivée de la physique des particules

L'apport de la physique nucléaire concerne l'étude de l'origine des éléments chimiques légers, en particulier l'hélium, apparus dans les premières minutes du Big Bang. On a vu comment George Gamow mena ces recherches dans les années 1940. Les mesures d'abondance des éléments légers fournirent des données de plus en plus précises sur les débuts de l'Univers. Cela nous a conduits à déterminer le nombre de baryons, les particules de matière ordinaire, dans l'Univers. Et c'est en comparant cette valeur avec celle déduite des mesures d'étoiles et de gaz que nous avons identifié la fameuse « masse manquante ». Même si elle n'est pas vraiment manquante, mais « noire ».

Peu de choses nouvelles au plan théorique sont apparues depuis cette avancée de l'astrophysique nucléaire, quand le champ de la cosmologie commença d'émerger, entre les années 1950 et 1980. Une autre communauté de physiciens comprit le potentiel de la théorie du Big Bang : les physiciens des particules, qui travaillaient sur les constituants des noyaux atomiques. Le zoo des constituants du noyau, quarks et muons, allait jouer un rôle fondamental en cosmologie.

Les physiciens des particules virent dans le Big Bang un accélérateur de particules extraordinairement puissant – celui qui avait atteint les plus hautes énergies concevables. Le cosmos avait subi une fabuleuse expérience il y a très longtemps, et il était possible d'en observer les conséquences aujourd'hui.

Pour faire de la physique des particules, il faut réfléchir d'une façon très particulière. Dans les années 1980, c'était totalement exotique. Sur Terre, on ne peut imaginer construire un accélérateur de plus d'une centaine de kilomètres de diamètre. Cette technologie atteint ses limites, et ses budgets aussi. Une machine qui atteindrait les énergies mises en jeu lors du Big Bang, par exemple, impliquerait un réseau d'aimants supraconducteurs plus long que la distance Terre-Lune. L'avantage de s'intéresser aux débuts de l'Univers était donc évident : il offre la possibilité d'étudier des interactions

de particules à des énergies jamais atteintes, et cela gratuitement, ou au moins pour un coût raisonnable.

Cela a mené au domaine de la cosmologie « inflationnaire » qui a émergé de la question : pourquoi l'Univers, malgré les structures irrégulières de ses débuts, est-il maintenant si parfaitement lisse, avec une géométrie plate au sens euclidien ? La réponse est que, au début de l'Univers, il a dû y avoir une inflation de l'espace d'une incroyable rapidité qui a intimement mélangé ses forces et ses particules avant de prendre le rythme d'expansion plus modéré que l'on observe aujourd'hui.

Les pionniers de la théorie étaient deux Russes et un Américain. Andrei Linde et Andrei Starobinsky ont eu l'intuition que le Big Bang avait provoqué une brève inflation qui avait donné à l'Univers sa taille gigantesque. Tous deux travaillaient à Moscou, mais Linde immigra plus tard à l'Université Stanford de Palo Alto. Alan Guth est un brillant physicien qui travaille aujourd'hui au MIT. Il parvint indépendamment au scénario de l'inflation. J'eus l'occasion de l'entendre lors d'un séminaire à Berkeley. Il parla pendant deux heures et demie (une conférence dure ordinairement cinquante minutes), totalement absorbé par son sujet, et ne vit pas que la salle se vidait. Mais beaucoup restèrent, fascinés par son enthousiasme et sa clarté.

Les deux physiciens russes ont des personnalités aussi différentes que possible. Starobinsky est calme, modeste, et parle avec un léger bégaiement. Sa contribution était peu connue en 1980 quand Linde et Guth publièrent leurs résultats. Linde est un sacré numéro. Je l'ai vu faire un tour de magie avec une supposée lanterne d'Aladin contenant une bougie allumée. La victime choisie au hasard devait, au-dessus de la lampe, dans le noir, se cacher les yeux et faire un vœu. Une fois la lumière revenue, son visage était noirci par la suie de la bougie... Linde a un bagout incroyable. À l'entendre, il mérite le Nobel à lui seul pour sa découverte de l'inflation. Or il a certes développé l'approche la plus rigoureuse, mais

Starobinsky a présenté bien avant lui une première forme de la théorie, et Guth est arrivé à l'inflation en même temps que lui.

Sans doute parce que la littérature scientifique russe a peu d'échos en Occident, peut-être aussi à cause de leurs présentations très mathématiques, concises et discrètes, les Russes n'emportèrent pas le morceau : c'est Guth qui se tailla la part du lion dans l'engouement pour l'inflation qui gagna le monde de la cosmologie en 1980.

Comment les physiciens Alan Guth, travaillant aux États-Unis, et Andrei Linde, en Russie, arrivèrent-ils indépendamment à cette théorie de l'inflation ? À très haute énergie règne une autre physique, basée sur le concept de symétrie : toutes les forces fondamentales ont la même intensité. Et ce n'est que lorsque l'Univers entre en expansion et se refroidit que cette symétrie est brisée.

On peut se faire une idée de la symétrie en imaginant une Rolls-Royce et une Volkswagen exposées à des températures extrêmes. Elles seraient d'abord bien différentes, puis commenceraient à fondre pour donner une soupe de composés chimiques inorganiques. Il y aurait sans doute encore des différences, mais en élevant encore la température, on en viendrait aux constituants chimiques élémentaires. Les voitures deviendraient alors totalement indiscernables – autant dire symétriques. Tel fut le début de l'Univers, paradis pour certains mais enfer pour les autres.

La symétrie brisée ou la perte de l'innocence

À l'opposé, la brisure de symétrie intéresse surtout la formation des galaxies. Quand la température de l'Univers a chuté, les forces physiques et chimiques se sont séparées car la force qui lie les noyaux atomiques s'est intensifiée, et s'est exercée à plus petite échelle que la force qui assure la cohésion des atomes.

Le refroidissement a d'abord permis l'apparition d'un mélange stable de protons, de neutrons et d'électrons, briques de base de tous les éléments chimiques. L'expansion continuant et la température chutant, les électrons ont été captés par les noyaux et se sont mis à tourner autour, engendrant un processus d'interaction électromagnétique qui est la clé de la chimie. Les atomes d'hydrogène, les plus simples de tous, se sont alors formés, et les étoiles ont suivi peu après.

Tout cela s'est produit sous l'effet de la brisure de la symétrie originelle entre les forces fondamentales. Reprenons au début pour bien suivre le processus. Aux plus hautes énergies accessibles à la physique, il n'y a ni noyaux, ni protons, ni neutrons, rien qu'une soupe de quarks et de gluons (un proton est constitué de quarks liés – comme par une glu – par des nuages de gluons). On appelle cela un plasma de quarks et de gluons, et ce fut l'état dominant de l'Univers environ un dixième de milliardième de seconde après le Big Bang.

Avant cela, il n'y avait pas de matière du type de celle qui peuple notre Univers de basse énergie. À très haute énergie, l'Univers est constitué de rayonnement et de particules sans masse comme les neutrinos. Au tout début, l'énergie était si élevée qu'il régnait une physique exotique, dite des supercordes, unissant la gravitation et la physique quantique. Nous en dirons davantage là-dessus, mais il suffit ici de préciser qu'il s'agit là de pure spéculation. Ce n'est qu'après ces moments incertains que la matière ordinaire se forme et que l'on retrouve un sol théorique plus ferme.

L'instant le plus ancien que l'on puisse décrire avec nos connaissances actuelles en physique des particules est appelé « ère de Grande Unification », car les forces étaient alors toutes unifiées. Ce moment se situe juste après le Big Bang, soit à 0,0000000000000001 seconde. Ce n'était pas pour autant l'unification complète, car la gravité s'était déjà séparée des autres forces. La véritable unification avait eu lieu plus tôt

encore, au « temps de Planck », nommé d'après le physicien allemand Max Planck. Cette époque « planckienne » étant mal connue, on doit laisser de côté ce mythique point symétrique originel.

La Grande Unification se brise, elle aussi, sous l'effet du refroidissement de l'Univers. La belle symétrie initiale est perdue. L'interaction nucléaire « forte » se sépare de l'interaction nucléaire « faible ». Cette cassure des forces fondamentales de la nature fait que la matière change d'état, comme quand la glace se change en eau. Les physiciens appellent cela une « transition de phase ».

Quand la glace fond, une certaine énergie est libérée. C'est ce qui fait que les poissons survivent dans les étangs gelés. Dans le cas de la cassure de la Grande Unification des forces, une grande quantité d'énergie a été injectée dans l'Univers – une énergie si grande qu'elle en a multiplié les dimensions en un clin d'œil.

Au cœur de la théorie de l'« inflation » se trouve l'idée que cet apport soudain d'énergie a été bref, mais suffisant pour tout changer au contenu énergétique de l'Univers. En particulier, cette énergie a contré l'action de la gravité. Elle a agi comme une force gravitationnelle répulsive, une antigravitation, ce qui a brusquement accéléré le taux d'expansion de l'Univers. L'antigravité est même si intense que l'expansion devient exponentielle. C'est cela qu'on appelle l'inflation – de fait, la plus grande inflation imaginable.

On peut imaginer cette transformation ayant lieu dans un minuscule coin de l'Univers. Cela peut être partout, mais ce fut nécessairement quelque part. Une fois que ce petit endroit s'est développé, son attraction gravitationnelle attractive se mue en violente répulsion gravitationnelle. Sous l'effet de cette transition énergétique, la région croît exponentiellement, et l'Univers entre en inflation. Ce tout petit morceau d'Univers est plus ou moins devenu l'Univers entier ! Et sous l'effet de

cette fulgurante croissance, l'Univers est quasiment homogène et uniforme.

Cela résout la mystérieuse question de l'uniformité de l'Univers. L'inflation implique un aplatissement de la géométrie. Il se peut que l'espace ait eu une géométrie non euclidienne, peut-être était-il courbe juste avant l'inflation, mais par la suite, il s'est aplati, du moins à l'échelle locale. Les petites rides d'espace-temps ont été aplanies, comme « repassées » par le fer cosmique. L'espace actuel n'est pas ridé, et il est bien plus grand que l'Univers observable. L'inflation en est la cause. L'Univers a pu être très inhomogène par le passé, a pu s'étendre plus vite dans une direction que dans une autre, menant à des géométries complexes. Mais l'inflation a effacé tout cela pour mener à une parfaite uniformité.

Tout cela s'est passé très peu de temps après le Big Bang. Pour mesurer la durée de cet événement, il faut imaginer un milliardième de milliardième de milliardième de milliardième de seconde, soit 10^{-36} seconde. Appelons cela un googolième de seconde ; au bout de 10 googolièmes, l'inflation s'arrête... et la transition de phase aussi. L'Univers est maintenant immense, mais très froid. Heureusement, il reste encore beaucoup d'énergie de l'époque inflationnaire, ce qui le réchauffe, tandis que la chaleur du Big Bang initial s'atténue lentement avec l'expansion.

La force nucléaire faible est encore liée à la force électromagnétique, et ne s'en détachera que quand la température aura encore chuté. Dès leur séparation, la force électromagnétique dirige les opérations atomiques, et fait tourner les électrons autour des noyaux. C'est le début de la chimie, avec l'apparition du premier atome d'hydrogène.

Nous sommes presque remontés au début de l'Univers, mais il existe une barrière temporelle absolue. Elle se situe bien avant l'inflation, un dix millionième de googolième de seconde après le Big Bang, alors que la gravitation était encore

couplée aux autres forces fondamentales. On appelle cela le temps de Planck.

Aucune théorie n'est capable de décrire cet état où la physique quantique rejoint la gravitation. Une éventuelle théorie de « gravité quantique » est le but ultime de la physique moderne. Peut-être cette théorie expliquera-t-elle les causes de l'inflation. Aujourd'hui, l'inflation est une bonne conjecture, qui a des conséquences prédictibles et vérifiables, mais pour nous, le plus important est l'émergence de la structure.

En 1980, les physiciens des particules Andrei Linde, alors à Moscou, et Alan Guth, au MIT, ont donné une théorie décrivant l'inflation. Ils n'étaient pas astronomes, mais avaient compris que le Big Bang était un merveilleux accélérateur de particules, le plus puissant imaginable, et qu'il offrait un fertile champ d'expériences à la physique des particules.

Par exemple, l'énergie lors du Big Bang était de 10^{16} GeV. On peut comparer cette énergie à celle du plus grand accélérateur actuel, le LHC, accélérateur de 26 kilomètres de circonférence situé sous la frontière franco-suisse. Il a été mis en œuvre en 2009 sous la supervision du CERN, laboratoire européen de physique des particules. Si grand soit-il, il ne génère pourtant que des énergies de quelques milliers de GeV. De l'ordre de 10 000 milliards de fois moins que le Big Bang...

Le grand collisionneur de hadrons (LHC) va certainement faire progresser nos connaissances sur l'Univers primitif. Mais vu son énergie, on ne peut en attendre grand-chose quant à la grande unification ou la transition de phase qui a déclenché l'inflation. Tout ce que l'on peut espérer, c'est observer des effets lointains de l'inflation. Or deux signatures distinctes, originaires de l'époque inflationnaire, permettent de départager les deux modèles de l'inflation actuellement en concurrence.

Vers l'origine du temps

Quel est le rayonnement originel que nous pouvons espérer détecter ? Ce sont des ondes gravitationnelles, qui interagissent si faiblement avec la matière ou le rayonnement que l'on doit aujourd'hui pouvoir observer celles qui furent émises à la fin de l'inflation, 10^{-36} seconde après le Big Bang.

Ces ondes auraient été produites en même temps que les fluctuations de densité qui ont engendré les grandes structures de l'Univers. La différence est que les ondes gravitationnelles n'engendrent rien du tout, aucune compression en tout cas, seulement une déformation de l'espace lors de leur passage. Pourtant, elles seraient bien une signature de l'inflation. Le problème consiste cependant à les détecter car elles sont très fortement décalées vers le rouge. Leur fréquence, aujourd'hui, devrait être de l'ordre du millième de hertz, sinon moins. Or le bruit de fond terrestre à cette fréquence – celui des marées océaniques par exemple – est omniprésent. Il faut donc des techniques très particulières pour espérer les capter.

Une bonne idée consiste à étudier les pulsars, ces astres qui tournent sur eux-mêmes à grande vitesse. Les pulsars milliseconde (qui émettent un flash de rayonnement tous les millièmes de seconde) sont les horloges les plus précises connues, mais ce sont des étoiles à neutrons distantes de milliers d'années-lumière. Les étoiles à neutrons sont les plus compactes de toutes les étoiles. Leur rayon ne dépasse pas 10 kilomètres et leurs champs magnétiques très intenses accélèrent violemment leurs électrons le long des lignes de champ, ce qui se traduit par l'émission de flashes d'ondes radio. Un peu comme des phares cosmiques, ces ondes balayent l'espace et nous permettent de mesurer la vitesse de rotation du pulsar. La régularité de leur mouvement leur donne une précision analogue à celle de nos meilleures horloges atomiques.

En étudiant simultanément des pulsars milliseconde dans diverses directions de l'espace, on peut utiliser leurs signaux

temporels pour rechercher les traces fossiles des ondes gravitationnelles issues de l'inflation. En effet, le passage de ces ondes perturbe le champ gravitationnel près des pulsars, ainsi que leur belle régularité chronométrique.

Une autre option consiste à placer dans l'espace proche des satellites séparés par des millions de kilomètres, mais reliés par des faisceaux laser. Quand une onde gravitationnelle passe, la distance entre les satellites varie de moins d'un centimètre, et cette mesure permet de remonter à la fréquence de l'onde. Cette expérience, baptisée LISA, est actuellement développée par l'Agence spatiale européenne (ESA), et devrait être lancée en 2034.

Une autre signature de l'inflation originelle est la distribution des fluctuations dans le fond diffus cosmologique à des échelles angulaires supérieures au degré. De nouvelles expériences vont étudier ces fluctuations et rechercher l'empreinte des ondes gravitationnelles associées à ces fluctuations. Un effet possible est une faible polarisation, mais pour l'observer, il faut atteindre une précision dans la mesure de la température d'un centième de millionième de degré, soit 100 fois moins que ce dont on est capable aujourd'hui. Il n'est cependant pas exclu que le satellite *Planck* ait la sensibilité nécessaire pour observer les effets associés aux fluctuations de grande ampleur.

La course aux ondes gravitationnelles primordiales s'est animée en 2014. Un télescope nommé BICEP2, après trois ans de fonctionnement au pôle Sud, a livré ses résultats. Il a mesuré la polarisation du fond diffus avec une précision inégalée.

Il existe deux types de polarisation. L'un, découvert il y a plusieurs années, est produit par la matière noire des halos de galaxies qui agissent comme des lentilles gravitationnelles polarisant les photons du fond micro-onde. Les ondes gravitationnelles agissent aussi, avec une intensité moindre, mais à des échelles angulaires plus grandes, sur ces photons.

Le type de polarisation est notre seul moyen de remonter le temps jusqu'à la fin de l'inflation. En effet, seule l'inflation prédit un fond d'ondes gravitationnelles.

Le fait que le signal ait une faible résolution angulaire signifie qu'un gros télescope à haute résolution n'est pas nécessaire. L'idéal est un ensemble de petits télescopes en réseau : BICEP2 a ainsi mesuré une polarisation à grande échelle d'ondes gravitationnelles, mais ses résultats ont aussitôt été discutés. Le problème est que la poussière interstellaire est partout dans l'espace, que ses particules sont alignées le long des champs magnétiques, et qu'elles génèrent une polarisation. De fait, les résultats de BICEP2 sont presque 10 fois plus grands que ce qu'on attendait.

Mettons ces résultats en perspective. Le fond cosmique micro-onde présente un rayonnement thermique de 2,7 degrés Kelvin. Les fluctuations cartographiées par *WMAP* et *Planck* sont typiquement de l'ordre de 30 millionièmes de Kelvin. Cela se traduit par des fluctuations de la densité primordiale de l'ordre d'une partie pour 100 000. La polarisation due à l'effet de lentille gravitationnelle de la matière noire est de quelques millionièmes de degré Kelvin. Mais pour atteindre le mode de polarisation induit par l'inflation, il faut faire 10 fois mieux, et passer du milliKelvin au nanoKelvin.

Le défi technique, redoutable, implique la multiplication des détecteurs, de quelques centaines dans le cas de *Planck* à plusieurs dizaines de milliers dans les expériences à venir, qui travailleront aussi à plusieurs fréquences, de façon à éliminer les bruits dus à la poussière interstellaire. BICEP2 opérait à une seule fréquence. C'est pourquoi ses résultats sont incertains. Il n'a fallu que six mois à la collaboration *Planck* pour démontrer que BICEP2 avait mesuré la polarisation de la poussière, et non la polarisation primordiale.

Plusieurs expériences nouvelles, pour la plupart américaines, sont en préparation. Certains télescopes seront installés sur le plateau d'Atacama au Chili, d'autres au pôle Sud, et d'autres

sur des ballons stratosphériques. Les sceptiques soulignent que l'inflation a raté son premier test observationnel ; les optimistes rétorquent que l'on va bientôt découvrir les ondes gravitationnelles.

En réalité, on pense que les expériences spatiales sont encore très loin d'avoir la sensibilité requise. C'est pourquoi de nombreuses expériences, au sol et en ballon, sont actuellement lancées pour étudier la polarisation plutôt que les ondes gravitationnelles, mais l'expérience décisive devra certainement être faite dans l'espace. Cela coûtera très cher et il y a fort à parier que rien ne se fera avant une dizaine d'années, le temps que les expériences au sol ou en ballon, bien moins chères, aient donné leurs résultats et montré leurs limites.

[2.](#) Un hadron est une particule lourde : proton, neutron, etc.

Des fluctuations aux galaxies

Pour mieux comprendre l'inflation, les cosmologistes ont tenté de mesurer les fluctuations de l'Univers. Leur idée était qu'elles sont corrélées au passé de l'Univers et à son expansion, et c'est exactement ce qu'ils ont trouvé. Pour faire comme eux, imaginez que vous mesuriez la densité moyenne de régions de plus en plus grandes de l'Univers en expansion. Cela est faisable en utilisant les images du ciel galactique profond réalisées au moyen de grands télescopes. Voilà ce que vous allez trouver : plus la région est grande, plus l'Univers est homogène. Et si l'on fait la moyenne de l'ensemble, on trouve un Univers complètement homogène, sans noyau dense ni zone vide ou raréfiée. Et pourtant, il est partout rempli de galaxies. À certains endroits, il y en a un peu plus qu'à d'autres, et ce sont ces variations, positives ou négatives, qui constituent les fluctuations de la densité moyenne de l'Univers.

En d'autres termes, quand on mesure l'amplitude de ces fluctuations, on trouve que l'excès de densité, ou le déficit, est d'autant plus petit que l'échelle est plus grande. Densité et échelle sont donc anticorrélées. Si l'on considère le champ de gravitation, il apparaît que toutes ses fluctuations ont la même amplitude : la profondeur du potentiel gravitationnel associé. Le potentiel est une sorte de creux ; plus il est profond et plus il faut d'énergie pour en escalader les parois. Mais pour la densité des fluctuations, on observe une indépendance totale entre leur amplitude et la distribution à grande échelle des galaxies. Et c'est bien ce que prédisent les théories les plus simples de l'inflation.

Un élément important dans la théorie de l'inflation est l'« horizon », qui définit le bord de l'Univers en expansion depuis le Big Bang. Son rayon est la distance parcourue par la lumière depuis le Big Bang. Le temps passant, l'horizon s'élargit avec la taille de l'Univers. Plus pratiquement, c'est la limite de la perception humaine, tributaire de la technologie astronomique, du bord de l'Univers en expansion.

Maintenant, imaginez le commencement. Quand l'inflation commence, l'horizon contient l'équivalent quantique d'une poignée d'atomes. En fait, c'est plus qu'une poignée puisque les physiciens parlent d'une « masse de Planck » d'un millionième de gramme. Telle est l'échelle à laquelle la théorie quantique rencontre la relativité générale, théorie einsteinienne de la gravitation.

Si l'horizon était plus petit, il contiendrait une matière plus dense et finirait inévitablement par donner un trou noir, à savoir un effondrement total de la matière. À cause de sa fabuleuse densité, rien ne peut échapper à la gravitation d'un trou noir, pas même un Univers en expansion. Cette contradiction institue d'ailleurs une autre limite pour nos spéculations théoriques, précisément à 10^{-43} seconde après le Big Bang.

Il est inutile de tenter d'extrapoler en deçà de cette limite. Ce dont on est certain, c'est qu'à cet instant, les fluctuations sont de grande amplitude. D'une certaine façon, c'est une manifestation macroscopique (à grande échelle) de l'incertitude quantique. L'inflation intervient plus tard, quand d'importantes fluctuations de densité sont encore présentes. Elle s'empare de ces fluctuations et les amplifie à grande échelle jusqu'à en faire, bien plus tard, les galaxies que nous voyons aujourd'hui.

Ce sont ainsi les fluctuations générées par l'inflation qui donnent les fluctuations de densité lesquelles, des milliards d'années plus tard, seront les germes des galaxies. Pendant les 10 000 premières

années après le Big Bang, ces fluctuations sont « gelées ». La transition ne se produit que lorsque l'Univers est davantage constitué de matière que de rayonnement. À partir de là, les fluctuations peuvent croître. Un tout petit excès de densité suffit à agglomérer la matière environnante, et un tout petit déficit, à la raréfier. Et cette instabilité gravitationnelle est d'autant plus forte que l'excès de densité est plus grand.

Des régions reliées entre elles peuvent croître par connexion causale. Comme la croissance ne peut se produire qu'à des échelles inférieures à celle de l'horizon, les petites échelles sont avantagées par rapport aux grandes. Ces dernières, arrivées plus tôt dans l'horizon, sont plus éloignées, les petites étant mieux placées pour former les premières structures.

Cependant, il existe un obstacle à la croissance à toutes les échelles. Ce retard dure pendant les 100 000 premières années de l'Univers car, auparavant, il est presque entièrement constitué de rayonnement. La croissance ne commence qu'après que la densité de rayonnement est tombée en dessous de celle de la matière.

Entre-temps, la gravité de la matière est incapable d'agir dans un fluide d'énergie d'une pression aussi considérable. La seule croissance qui puisse y avoir lieu est engendrée par la matière relativement noire et froide de l'Univers (nous reviendrons sur ce point). Pendant les 10 000 premières années, l'Univers est dominé par le rayonnement, et cela empêche, en attendant que la matière soit dominante, toute croissance à l'intérieur de l'horizon.

Quand des échelles de plus en plus grandes pénètrent dans l'horizon, elles commencent à croître. Les échelles galactiques (plus petites que les premiers amas) connaissent une croissance maximale car elles restent au sein de l'horizon pendant la majeure partie de leur phase de croissance. Comme les échelles précédentes ont été empêchées de croître par l'abondance du rayonnement, les fluctuations les plus fortes sont les fluctuations galactiques.

Un temps pour croître

Aux échelles supérieures, la croissance des fluctuations est toujours plus tardive à mesure que l'horizon s'élargit, de sorte qu'aujourd'hui l'amplitude de la fluctuation initiale après le Big Bang est toujours visible, mais seulement à la plus grande échelle, celle de l'horizon actuel. Les échelles plus petites, présentes plus tôt, ont grossi plus vite. Quant aux toutes petites échelles, bien en dessous de l'horizon correspondant au découplage de la matière et du rayonnement, toutes leurs fluctuations ont subi la même croissance dans une époque dominée par la matière. Le résultat est une distribution de fluctuations de plus grandes amplitudes à plus petite échelle. Les fluctuations continuent à s'amplifier par instabilité gravitationnelle à l'époque où domine la matière. Enfin, les galaxies se forment. Les petites avant les plus grandes, d'où une évolution ascendante, du bas vers le haut.

La matière noire, selon la théorie de la formation des galaxies, entre ici dans le tableau. On la dit « noire » parce qu'on ne peut la voir et qu'on ignore sa nature. Elle n'en est pas moins une source gravitationnelle majeure de notre Univers. Une de ses principales caractéristiques est qu'elle interagit très faiblement avec les autres particules. C'est même pour cela qu'elle est noire. On sait qu'elle était présente au début de l'expansion de l'Univers. Possédant une masse, et exerçant donc une force de gravité, la matière noire a contribué à amplifier la croissance des premières fluctuations, et a aidé à la formation des galaxies.

Pendant l'ère du rayonnement, avant que ne domine la matière, diverses forces agissaient sur les différentes particules. Il y avait alors compétition entre la gravité et la pression de rayonnement. Ces deux forces agissent sur les fluctuations, que l'on peut considérer comme des ondes sonores dans un fluide essentiellement constitué de particules de lumière, ou photons. Les mouvements, dans un tel gaz de photons, se font quasiment à la vitesse de la lumière. Mais

dans les fluctuations, la pression du rayonnement engendre des ondes se propageant à la vitesse du son, qui dans ces conditions extrêmes vaut environ 60 % de la vitesse de la lumière.

Deux autres particules sont présentes, les baryons (particules lourdes) et les particules de matière noire de faible interaction. Nous sommes essentiellement faits de baryons, tels les protons et les neutrons qui constituent nos molécules. Quand l'Univers a commencé à se refroidir, les baryons et les particules de matière noire ont cependant suivi des destins différents.

Les baryons sont voués à former des nuages denses. La matière noire non baryonique présente des fluctuations analogues à celles des baryons mais n'interagit pas avec le rayonnement. Quand l'Univers a été dominé par la matière, les fluctuations de matière noire se sont amplifiées. Au contraire, celles des baryons, toujours couplés aux photons, ont continué à osciller comme des ondes sonores. Les fluctuations de la matière noire ont désormais une signature particulière. Elles forment les halos sombres des galaxies. Ces halos sont de gigantesques nuages de matière noire au sein desquels se trouvent les galaxies visibles. Chaque galaxie possède son propre halo sombre.

La matière noire a amplifié les fluctuations dans l'Univers. Ce processus peut être compris en remontant à l'époque où l'Univers était un plasma. Ce plasma était constitué d'électrons libres et de protons, avec quelque 10 % de noyaux d'hélium, et des photons diffusés dans toutes les directions. Mais il se produisit quelque chose de spectaculaire lorsque la température du rayonnement tomba en dessous de 3 000 degrés Kelvin. Comme il n'y eut plus assez de photons énergétiques pour garder la matière sous forme ionisée, l'hydrogène se constitua en atomes.

Il resta très peu d'électrons libres. Les photons ne diffusèrent plus et le rayonnement se découpla de la matière. Les baryons tombèrent dans les puits du potentiel gravitationnel des

fluctuations de la matière noire, ce qui amplifia considérablement la croissance de leurs fluctuations.

Les débuts des galaxies

Toute cette activité était due à l'instabilité gravitationnelle, et le processus continua. De fait, le frein à l'instabilité gravitationnelle de la matière que représentait le rayonnement ayant disparu, des structures à très petites échelles se développèrent à la fois dans la matière noire et dans la matière baryonique.

Finalement, les fluctuations furent assez denses pour se détacher du champ de densité moyen. Il ne s'agissait plus de fluctuations, mais de rassemblements de matières noire et baryonique soumis à leur propre gravitation. Et ces structures devinrent de plus en plus grandes avec l'expansion de l'Univers. Les halos sombres des galaxies se formèrent ainsi.

Dès que les grumeaux de matière noire furent assez massifs pour que la température des baryons diminue, les étoiles et les galaxies commencèrent à se former. Ce refroidissement est nécessaire à la formation des étoiles. Le gaz qui les constitue doit être assez chaud pour que les collisions entre atomes émettent du rayonnement, ce qui implique des nuages ayant des températures de l'ordre de 1 000 degrés Kelvin, et des masses d'au moins 1 million de masses solaires. Les nuages plus légers ont une gravité plus faible et sont plus froids. Ils se condensent aussi avant les nuages plus massifs. Ce sont eux qui se condensèrent les premiers et formèrent les premières étoiles.

L'amplitude des fluctuations détermine leur effondrement en galaxies. Et la distribution des amplitudes de fluctuation détermine l'époque de formation des galaxies. On ne sait pas encore prédire cette date. En fait, la distribution des fluctuations est établie par l'observation de l'amplitude des fluctuations du fond diffus cosmologique. Les premières petites galaxies se sont formées quand l'Univers était 30 fois

plus petit qu'aujourd'hui. On dit que cela s'est produit à un décalage vers le rouge de 30. À cette époque, l'Univers était 30 000 fois plus dense qu'il ne l'est aujourd'hui.

Tandis que l'Univers est en expansion, des galaxies de plus en plus grandes se forment. Finalement, à un décalage de 5 (quand l'Univers était 100 fois plus dense qu'aujourd'hui), les galaxies massives, qui annoncent les galaxies actuelles, se forment. Ce ne sont au début que de grands nuages de matière noire, des halos de galaxies. Seulement 10 % de la masse de ces halos se trouvent sous forme de baryons.

La principale différence entre les baryons et la matière noire est que les baryons sont sensibles aux interactions nucléaires et électromagnétiques, qui jouent un rôle crucial dans la formation des galaxies. Les atomes et les molécules d'hydrogène se forment. Les collisions avec ces atomes se traduisent par une absorption d'énergie, puis leur désexcitation donne un rayonnement de photons, emportant l'énergie du choc initial. Cette libération d'énergie est essentielle à l'effondrement d'un nuage.

La libération d'énergie des baryons, leur énergie cinétique, est convertie en rayonnement qui s'échappe librement. Le nuage de baryons se contracte tandis que la matière, de plus faible densité, forme un halo diffus. Ne pouvant perdre d'énergie par rayonnement, elle ne peut se contracter. Il en résulte que les baryons se condensent en nuages denses environnés de halos sombres.

Toutes les galaxies tournent sur elles-mêmes, certaines plus vite que d'autres. Les plus rapides sont aplaties en forme de galettes, comme la Voie lactée ; les plus lentes sont plutôt sphéroïdales. L'origine de la rotation des galaxies est liée à la séparation des galaxies de l'expansion de l'Univers. Ce sont les halos des galaxies voisines qui exercent les forces responsables de cette rotation. Pour la Voie lactée, c'est probablement la galaxie d'Andromède, notre proche voisine,

qui a joué ce rôle. Elle tourne dans un sens, et la Voie lactée dans l'autre, de sorte que, globalement, rien ne tourne.

Les galaxies se contractent à partir de gigantesques nuages qui ne sont pas *a priori* sphériques. Les nuages voisins ont tendance à en étirer les parties les plus allongées en exerçant des forces de marée, ce qui induit un mouvement de rotation. Et quand le nuage se contracte, la rotation s'accélère. Les halos conservent la majeure partie de leur moment angulaire de rotation, cette force que l'on voit à l'œuvre lorsqu'une toupie en rotation refuse de tomber. Quand le gaz de baryons perd de l'énergie et se contracte, il tourne de plus en plus vite. Un disque se forme, qui est lui-même gravitationnellement instable, et finit par se fragmenter en nuages qui s'effondrent sur eux-mêmes pour donner des étoiles. Cela s'est produit à l'époque de la formation des galaxies, un milliard d'années après le Big Bang.

La grande époque de Cambridge

C'est Fred Hoyle qui comprit le premier, en 1955, que les forces de marée entre protogalaxies voisines pouvaient induire une rotation. Hoyle a fait bien d'autres contributions à la cosmologie et l'astrophysique, de la théorie de l'Univers stationnaire à la mort lente des étoiles de la masse du Soleil sous forme de « géantes rouges ». Il fut mon superviseur à Cambridge, en Angleterre. L'Institut d'astronomie théorique était un paradis pour nombre de collaborateurs américains de Hoyle, qui en appréciaient le côté bucolique et les déjeuners dans les pubs campagnards. Mais ces déjeuners étaient aussi le lieu de discussions scientifiques passionnées tentant de lier les derniers résultats d'observation avec les idées théoriques les plus avancées. Tous les postdocs présents gardent un souvenir ému de ces moments qui ont eu une grande influence sur leurs carrières.

J'y ai rencontré Willy Fowler, futur prix Nobel avec Fred Hoyle pour son travail sur la nucléosynthèse, Donald Clayton, Texan décontracté expert de l'origine des éléments chimiques, et Wallace Sargent, spécialiste des éléments lourds du milieu intergalactique. Sans oublier l'inénarrable Geoffrey Burbidge, spécialiste des quasars, et sa femme, Margaret, observatrice pionnière dans l'exploration de l'évolution chimique de l'Univers lointain.

Hoyle était professeur à Cambridge et directeur de l'Institut d'astronomie jusqu'à ce qu'il démissionne pour raisons politiques en 1973. On chercha un nouveau professeur et Hoyle avait espéré faire nommer un de ses amis californiens, mais c'est Donald Linden Bell qui fut choisi. Bell était célèbre pour avoir étudié la dynamique des étoiles vieilles de la Voie lactée, qui sont des fossiles de notre histoire cosmique. Il passa ensuite à l'étude du lien entre les trous noirs supermassifs et les quasars.

Les cours de Hoyle étaient bien particuliers. Ils avaient lieu à la cafétéria, en présence d'un invité prestigieux en séjour sabbatique. L'année où je suivais ces cours, le visiteur était Edwin Salpeter, autre géant de l'astrophysique bien connu pour ses travaux d'astrophysique nucléaire, à la frontière de la physique et de l'astronomie. En 1953, Salpeter, venant de Sydney, faisait un stage postdoctoral aux États-Unis et participait à une école d'été à Ann Harbor, Michigan. Le grand George Gamow parlait de cosmologie, et en vint au thème de l'origine des éléments lourds dans l'Univers. Il expliquait pourquoi les étoiles massives qui meurent en supernovæ explosives éjectant leur matière ne pouvaient rendre compte de la génération des éléments lourds. Simple question d'arithmétique : parmi les étoiles, il y en a trop peu de massives...

Salpeter, assis au fond de la salle, était incrédule. Pour lui, Gamow négligeait un fait crucial : le comptage des étoiles ne pouvait prendre en compte les étoiles de faible masse comme le Soleil. Mais il réalisa qu'il en allait différemment pour les

étoiles massives. Leur durée de vie était brève, entre 10 et 100 millions d'années. Elles brûlaient leur carburant bien plus rapidement que les étoiles plus modestes, qui vivaient des milliards d'années. Il fallait donc multiplier le nombre des étoiles massives par un facteur de l'ordre de 100 ou davantage.

Salpeter rentra en Australie et publia un article sur les nombres d'étoiles de différentes luminosités. La distribution corrigée pour l'âge des étoiles donnait une image globale de toutes les étoiles apparues dans une région donnée du ciel, image qui est toujours utilisée aujourd'hui pour calculer le nombre d'étoiles massives. Les calculs de Gamow étaient donc faux, et l'origine des éléments lourds s'explique bien par la mort des étoiles massives. L'incapacité du Big Bang à produire autre chose que les éléments les plus légers, fait prouvé par Gamow lui-même, n'était plus un problème pour les astronomes.

Présent à la conférence, Hoyle fut ravi, car cela s'accordait bien avec son scénario d'Univers stationnaire. Il pensait même que la majorité de l'hélium était produit dans les étoiles, idée aujourd'hui discréditée par l'observation. Mais Gamow avait un merveilleux sens de l'humour. Ed Spiegel, autre étudiant présent et maintenant astrophysicien à l'Université Columbia, raconte l'histoire suivante. Un soir, Gamow, qui buvait beaucoup, était dans un restaurant où Hoyle dînait seul dans un coin. Il demanda au serveur d'apporter une bouteille de vin à son intention, sur laquelle il écrivit : « *Don't pour Hoyle over troubled waters* », jeu de mots sur Hoyle (*oil*) : « Ne versez pas d'huile pour calmer la tempête. » On sait depuis Benjamin Franklin, qui en fit l'expérience, qu'un tout petit peu d'huile versée en mer apaise les vagues pendant un long moment.

Des conversations à l'Institut d'astronomie jaillissaient des intuitions et des idées nouvelles. On ne pouvait rêver d'un environnement plus stimulant pour élargir l'horizon scientifique d'un jeune étudiant enfermé comme dans un tunnel dans le sujet de sa thèse. L'adage « *Publish or perish* » (« Publie ou meurs ») incitait chacun à creuser son sujet

toujours plus profondément. Le physicien américain Freeman Dyson a bien décrit ce dilemme : les chercheurs ont le choix entre patauger dans la boue comme des grenouilles ou voler comme des aigles. Einstein et ses rares égaux étaient des aigles, la plupart d'entre nous étions des grenouilles. Mais Hoyle et Salpeter volaient haut et très loin, et ce fut un privilège de prendre part à leurs conversations.

Des rides aux très grandes structures

Nous venons de considérer la matière noire au niveau des galaxies ; dirigeons-nous maintenant vers les échelles supérieures. Les mesures précises de la densité globale de la matière noire viennent de l'étude de sa distribution à des échelles bien plus grandes que celle des amas de galaxies. Les mesures de décalage vers le rouge de près d'un million de galaxies permettent d'estimer la distribution de densité de l'Univers dans les trois dimensions de l'espace jusqu'à une distance de quelques millions d'années-lumière.

En se focalisant sur les vieilles galaxies, rouges et lumineuses, on peut même aller plus loin. L'étude « Sloan Digital Sky Survey » d'un échantillon de galaxies rouges a par exemple permis d'atteindre le milliard d'années-lumière. Pour mesurer la distance d'une galaxie, on utilise la loi de Hubble qui lie la distance au décalage vers le rouge. Cette loi d'expansion linéaire (la vitesse d'une galaxie, liée à son décalage vers le rouge, est proportionnelle à sa distance) est une bonne approximation – au moins pour l'Univers proche.

Pour autant, la carte de distribution des galaxies qui en résulte semble très distordue car les vitesses locales relatives à la loi de Hubble ne sont pas faciles à distinguer de la composante uniforme de l'expansion.

Ce qu'on mesure en réalité est un décalage vers le rouge, qui donne la vitesse *totale* d'une galaxie. Cela se traduit par une déformation de la carte pointant toujours vers l'observateur. Ces élongations dues aux amas individuels de galaxies ont été nommées « doigts de Dieu ».

En plus de la vitesse de récession commune à l'amas tout entier, une galaxie particulière peut avoir une composante locale de vitesse dirigée vers nous, ou en sens opposé. Dans le premier cas, cela réduit la distance inférée du décalage vers le rouge ; dans le second cas, cela l'augmente légèrement. Sur les cartes, cela se traduit par ces fameux doigts, pointant vers nous ou dans la direction opposée.

Ces distorsions de l'espace dues aux mesures de vitesse donnent une mesure directe de la densité de matière noire, puisque cette matière est responsable des vitesses locales. Pas toute la matière noire cependant, car sa distribution uniforme ne présenterait aucune direction privilégiée et ne laisserait donc aucune trace sur les cartes. Si elle était uniformément répartie, la matière noire n'aurait aucune influence sur les mesures de vitesse locales : elle « tirerait » également dans toutes les directions.

La densité de matière noire mesurée représente la valeur globale du rapport matière/lumière de la composante inhomogène. La densité totale qui en est déduite doit être corrigée d'un facteur supplémentaire car toute la matière noire n'est pas distribuée de la même façon que les galaxies. Pour obtenir une valeur correcte, il faut tenir compte d'un autre facteur, lié au rapport des fluctuations lumineuses à celles de la matière noire.

À une échelle suffisamment grande, cela n'est pas nécessaire : la lumière « suit » fidèlement la matière. Une mesure à très grande échelle, par exemple des fluctuations du fond diffus cosmologique, permet d'obtenir une bonne valeur de la densité de matière noire. À plus petite échelle, celle des galaxies par exemple, la matière lumineuse n'est pas un bon indice de la matière noire, car la densité baryonique est augmentée par le refroidissement. Et cela a des incidences sur la formation des galaxies.

Quand la distribution tridimensionnelle des galaxies est lissée statistiquement à l'échelle des plus grandes structures,

les amas de galaxies, la distribution moyenne de matière apparaît fluctuante. Les fluctuations de la distribution des galaxies suivent celles du rayonnement cosmologique, à toutes les échelles, une fois pris en compte les décalages vers le rouge différents des deux mesures. On détecte alors des oscillations « acoustiques » (car analogues à des ondes sonores), à la fois dans le rayonnement cosmologique et dans la distribution des galaxies.

L'harmonie de l'Univers

Ces oscillations sont la version moderne de l'antique musique des sphères. Selon la théorie de l'inflation, l'origine des fluctuations de densité, précurseurs des galaxies, s'est produite de manière coordonnée. Chaque échelle s'est formée au même instant. Et chaque échelle a connu son propre instant de création tandis que se développait le spectre des fluctuations de densité. Les grandes échelles apparurent un peu plus tard, puis diminuèrent en taille, ce qui généra la formation « de bas en haut » des structures cosmiques. Mais la synchronisation de chaque échelle implique une certaine régularité dans les motifs de distribution des galaxies.

Des fluctuations de densité aléatoires, dans l'air, produisent un bruit. L'harmonisation des bruits, comme celle obtenue en jouant d'un instrument de musique, produit de la musique. De même, quand on étudie les fluctuations de la distribution des galaxies, un motif « harmonique » devrait émerger quand l'échelle augmente.

Les fluctuations de densité ne sont pas aléatoires. Il y a dans le cosmos une fréquence (ou longueur d'onde) naturelle qui correspond à l'époque à laquelle les fluctuations de densité commencèrent à prendre de l'ampleur. Pour la première fois, la matière ordinaire commençait à dominer l'Univers. La longueur d'onde correspondante est liée à la dimension de l'horizon à cet instant, c'est-à-dire à la distance parcourue par la lumière depuis le Big Bang. Cette distance est de l'ordre

d'une centaine de mégaparsecs – l'échelle de base. Et il y a des harmoniques d'ordres supérieurs. Des fluctuations plus faibles sont obtenues à une échelle moitié.

Cela peut sembler étonnant, mais nous avons réussi à mesurer les fluctuations acoustiques du rayonnement cosmologique micro-onde. Sa température montre des petites rides, qui se sont formées quelque 300 000 ans après le Big Bang. Les fluctuations de matière doivent donc montrer une structure semblable. En étudiant les fluctuations de densité dans la distribution des galaxies lointaines, on remonte à l'époque de l'Univers où commençait à dominer l'énergie sombre. Leur longueur d'onde originelle est étirée sous l'effet de l'accélération, mais les oscillations baryoniques permettent d'en corriger les effets.

Cosmologie soviétique

L'étude de la distribution des galaxies a donné un résultat inattendu. Les galaxies forment un réseau cosmique, sous forme de filaments et de feuillets. Les filaments peuvent se recouper en donnant des amas géants de galaxies, et l'on observe de nombreux vides quasiment dénués de matière. Les plus petits font quelques millions d'années-lumière, les plus grands 100 fois plus. Ce réseau avait été entrevu par le cosmologiste russe Iakov Zeldovich qui, travaillant sur la bombe H avec Andrei Sakharov, n'avait pas le droit de quitter son pays. Travailler sur le Big Bang après la bombe H n'était finalement pas si éloigné. Une de ses grandes découvertes, faite avec son étudiant Rashid Sunyaev, fut que le gaz chaud des amas de galaxies déforme le spectre du rayonnement micro-onde, ce qui a mené à une nouvelle méthode de détection des amas.

J'ai rencontré Zeldovich pour la première fois à Prague en 1968, lors d'un colloque de l'Union astronomique internationale. À cette époque, les savants soviétiques étaient accompagnés de fantômes anonymes s'assurant qu'aucun

contact n'était noué avec les collègues de l'Ouest. Un mauvais rapport de leur part pouvait interdire tout voyage futur. Nous nous sommes rencontrés dans la plus grande piscine de Prague, où les fantômes ne portaient pas de maillots de bain. J'eus avec cet excellent nageur une grande conversation. Lors d'une pause, il reprocha à son étudiant Sunyaev de ne pas m'avoir raconté leur découverte de l'amortissement des fluctuations du rayonnement cosmique.

Pendant la décennie suivante, il n'eut même plus le droit d'aller en Pologne ou en Tchécoslovaquie ; seule l'Allemagne de l'Est lui était permise. En 1976, il ne fut pas autorisé à descendre du train Berlin Est-Moscou, et il donna un séminaire improvisé à quelques-uns de ses étudiants à la fenêtre de son compartiment, le train s'étant arrêté une demi-heure en gare de Varsovie. En 1963, il avait publié un article sur une structure qu'il nomma « crêpes cosmiques », qui anticipait la découverte du réseau de galaxies, structure à grande échelle de l'Univers.

Zeldovich raisonnait ainsi : une structure constituée de matière peu dense, interagissant faiblement, comme des galaxies ou ce qu'on appelle aujourd'hui la matière noire, s'effondrerait sur elle-même en donnant un objet de forme très irrégulière. Obtenir une sphère impliquerait en effet un effondrement simultané selon trois axes. Sur deux axes, cela donnerait des filaments, et sans aucune coordination entre les axes, cas le plus fréquent, cela donnerait des feuillets ressemblant à des crêpes. Les simulations récentes confirment pleinement son idée. La plupart des galaxies se regroupent sur des filaments et des feuillets. Des filaments apparaissent souvent à l'intersection des feuillets et les amas de galaxies se trouvent souvent à l'intersection des filaments.

L'amplitude (la hauteur) des rides du rayonnement cosmique micro-onde mesure la densité baryonique (de la matière faite d'atomes), mais leur séparation (leur longueur d'onde) mesure l'horizon des particules lors de la dernière diffusion. De fait,

cette échelle spécifie la courbure de l'Univers, qui se trouve être très proche de zéro.

La planéité de l'espace a été confirmée à la fois par les oscillations de la matière et celles du rayonnement. Pour que l'espace soit plat, l'Univers doit avoir la densité critique qui lui permet d'être en expansion perpétuelle. Cela donne d'ailleurs la meilleure preuve de l'universalité de la matière noire non baryonique. La matière lumineuse ne contribue en effet que pour 0,5 % à la densité critique, et la matière baryonique pour 5 %.

Cela dit, il reste encore une grande énigme, car les distorsions de l'espace des décalages vers le rouge ne mesurent que la densité totale de matière noire, qui est majoritairement non baryonique et contribue pour 25 % à la densité critique. Mais il y a pire. Le reste, qui contribue plus encore à la densité critique, est aussi uniforme que sombre. Il est sombre car on ne le voit pas, et homogène car il ne produit aucune distorsion supplémentaire.

La seule explication à ce déficit est un champ d'énergie sombre. Cette énergie a une pression, mais une pression très exotique, qui a mené à d'étranges prédictions. Nous verrons comment plus loin, mais cette énergie peut provoquer une accélération de l'Univers. Elle constitue l'essentiel de la densité critique – les deux tiers. Cette énergie a pu être mesurée par l'accélération des galaxies les plus lointaines. Mais revenons d'abord à la matière noire.

Cherche matière noire désespérément

La recherche de la matière noire est le plus grand défi actuel en cosmologie : 90 % de la matière de l'Univers est noire, mais on ne sait rien sur sa nature. Le principal candidat est une variété inconnue de particule élémentaire de très faible interaction, interaction qui doit être beaucoup plus faible que celle du proton, constituant de la matière ordinaire.

La découverte de l'abondance de la matière noire est attribuée à un trio d'astronomes. L'histoire commence avec Fritz Zwicky, Suisse naturalisé américain à qui l'on doit la cartographie et la classification de plusieurs milliers de galaxies. Une célèbre photo le montre assis à côté de la pile de ses catalogues de galaxies, le pouce et l'index joints dessinant un zéro. Certains prétendent qu'il s'agit d'une protestation à l'intention de ses collègues qui lui avaient interdit l'accès au télescope du mont Palomar. D'autres disent que le geste était destiné à un de ses rivaux du CalTech qu'il traitait d'imbécile sphérique, c'est-à-dire également imbécile dans toutes les directions.

Je n'ai jamais rencontré Zwicky mais je l'ai eu au téléphone, dans les années 1970. Venant d'arriver à Berkeley, je devais organiser un colloque, à l'occasion duquel je lui demandai de venir nous présenter ses travaux, moyennant le voyage payé et de petits honoraires de 100 dollars. Il me répondit qu'il serait heureux de venir, mais pour des honoraires de 2 000 dollars. Sa façon à lui de refuser...

En 1933, il avait beaucoup travaillé sur l'amas de Coma (dans la constellation de la Chevelure de Bérénice), qui se

trouve à 200 millions d'années-lumière. Il dressa la liste de centaines de galaxies de l'amas et mesura leurs décalages vers le rouge, c'est-à-dire leurs vitesses. Le résultat fut inattendu. Il estimait la masse des galaxies par rapport à celles des galaxies voisines, et conclut qu'il manquait de la masse – d'un facteur 10 – pour assurer l'équilibre gravitationnel de l'amas. Avec la masse calculée, Coma aurait dû se disperser en moins d'un milliard d'années, et ne devrait donc plus être là ! À moins que de la matière noire, 10 fois plus massive que la matière observable, soit présente.

Les mesures les plus récentes, impliquant les émissions X des gaz et l'effet de lentille gravitationnelle des galaxies cachées par l'amas, confirment pleinement les estimations de Zwicky. La seule différence est que les gaz chauds qui émettent des rayons X sont environ 3 fois plus lourds que la matière stellaire. Les deux tiers de la masse de l'amas restent donc inexpliqués.

Vingt ans passèrent avant que l'on ne montre que les galaxies possèdent des halos de matière noire 10 fois plus massifs que la matière des étoiles. Les pionniers de la matière noire galactique furent Vera Rubin et le radioastronome Morton Roberts. Rubin étudiait la rotation des galaxies proches à partir de la lumière émise par les lieux de formation des étoiles. Cela donnait des spectres décalés vers le rouge, et donc une composante de la vitesse dans l'axe de visée de la galaxie. Elle montra que les galaxies comme celle d'Andromède, la plus proche voisine de la Voie lactée, tournent comme un disque d'étoiles doit tourner... Mais lorsqu'elle pointa son télescope loin du centre galactique, vers des zones de plus faible densité, la vitesse de rotation calculée restait la même que dans les régions plus peuplées. Il semblait bien qu'une matière invisible, maintenant le taux de rotation, se trouvait à quelque 50 000 années-lumière du centre galactique.

Vera Rubin travailla beaucoup au mont Palomar à Pasadena. L'un des problèmes qu'elle rencontra est que, dans les années

1950, l'hôtel de montagne où résidaient ses collègues masculins n'accueillait pas les femmes ! Elle devait donc, après une nuit d'observation et le développement de ses photos au petit matin, redescendre dans la vallée puis revenir le soir. Mais elle tint bon et obtint les courbes de rotation de nombreuses galaxies. Toutes montraient qu'il manquait de la masse...

L'interprétation n'était pas encore bien claire. Il pouvait y avoir un biais observationnel, ou davantage d'étoiles légères à mesure que l'on s'éloignait, ce qui aurait augmenté la masse globale des étoiles sans modifier la quantité de lumière reçue.

Pour le vérifier, il fallait chercher un endroit quasiment dénué d'étoiles, et le résultat vint de la radioastronomie. Morton Roberts observait la frange externe des galaxies au moyen de la raie de 21 centimètres de l'hydrogène atomique. Les atomes d'hydrogène de l'espace interstellaire émettent une onde radio à 21 centimètres de longueur d'onde, soit à une fréquence de 1 420 MHz, lorsqu'ils entrent en collision avec leurs voisins. Les mesures de Roberts lui permettaient de mesurer la rotation galactique à de très grandes distances du centre – des centaines de milliers d'années-lumière. Il n'y avait là plus d'étoiles, rien que des nuages de gaz dont la vitesse était la même qu'à l'intérieur de la galaxie.

La combinaison des résultats optiques et radio mena à conclure à l'existence d'une matière noire dominante dans l'Univers, et interagissant plus faiblement que la matière ordinaire, de façon à expliquer sa plus grande dispersion dans l'espace. Cette faible interaction de la matière noire explique son comportement. Quand un nuage de matière noire et de matière ordinaire se contracte pour former une galaxie, par exemple, la matière ordinaire se fragmente en étoiles mais la matière noire reste intacte. À cause de sa faible interaction, elle ne perd pas d'énergie par rayonnement et reste donc invisible. Au cours de l'évolution cosmique, les particules noires se condensent en nuages noirs, mais pas en étoiles. Et cette matière est sujette à la seule gravité.

Nos observations actuelles montrent de la matière noire aussi bien à l'intérieur des galaxies qu'à l'extérieur. Dans notre Voie lactée par exemple, la concentration de matière noire est plus forte à l'intérieur, alors que c'est la matière ordinaire qui domine dans d'autres régions, tel notre Système solaire, où de la matière ordinaire tourne autour du Soleil. La matière noire se trouve aussi dans les régions externes des galaxies, là où les étoiles sont plus rares. Sa densité est alors dominante mais ces étoiles, quoique éloignées du centre galactique, gardent leur vitesse orbitale. Si la distribution de matière noire suivait celle des étoiles, cette vitesse devrait décroître puisque le champ de gravité est plus faible. La matière noire est bien moins concentrée que la matière lumineuse.

Matière noire et physique des particules

La matière noire est constituée de particules de faible interaction. On sait que toute particule existant selon les lois de la physique était déjà présente dans la fournaise du Big Bang. Toute particule possède une antiparticule de charge opposée. Aujourd'hui, les antiparticules sont extrêmement rares, mais dans les premiers instants du Big Bang, elles coexistaient avec leurs particules. La symétrie était complète, mais le refroidissement de l'Univers a changé la donne.

La fournaise initiale n'a laissé derrière elle que très peu d'antimatière. Heureusement pour nous : quand une particule rencontre son antiparticule, il se produit une annihilation et une disparition complète de la matière. Ce qu'il est resté d'antimatière ne dépend que de l'intensité de son interaction. Un antiproton interagissant fortement, il en est resté beaucoup. En effet, des paires proton-antiproton se créaient spontanément à partir du rayonnement, aux températures extrêmes des premières nanosecondes de l'Univers. À cette époque, l'Univers était dominé par ces paires. Puis cette création s'arrêta lorsque l'Univers entra en

expansion et se refroidit. La quasi-totalité des antiprotons s'annihilèrent avec les protons, les « quelques » protons restants étant ceux qui constituent notre Univers...

C'est cette grande annihilation qui a produit le fond diffus de rayonnement que nous mesurons aujourd'hui, c'est-à-dire le reste de chaleur de la boule de feu des débuts de l'Univers. La même chose s'est produite avec les particules de la matière noire. La plupart ont été annihilées, mais bien davantage ont survécu à cause de leurs plus faibles interactions.

Parvenus à ce point de notre exploration de la face cachée de l'Univers, nous découvrons une remarquable coïncidence dans le fonctionnement des forces de la nature. Ce type de découverte est très rassurant pour les cosmologistes. Les américains Ben Lee et le prix Nobel Steven Weinberg ont trouvé que ce qui restait de particules de faible interaction correspond précisément à la quantité de matière noire que l'on attendait. Rien ne laissait prévoir cette coïncidence, mais c'est ainsi : les particules de faible interaction rendent compte de la totalité de la matière noire si leur interaction est celle de la force nucléaire d'interaction faible. Et elles doivent, bien sûr, avoir une longue durée de vie et interagir autant que les neutrinos. C'est tout à fait ce qu'on attendait de ces particules.

L'explication de l'origine de la matière noire progressa elle aussi. Une théorie nouvelle, la supersymétrie, postule par exemple l'existence de centaines de candidats possibles pour la matière noire. Dans un lointain passé, la symétrie se réfère à ce moment où la température était si élevée que les particules élémentaires étaient indiscernables. Pour en revenir à notre exemple précédent, les fragments de la Rolls-Royce et de la Volkswagen, disséminés dans une casse de voitures, étaient indiscernables les uns des autres, leurs constituants chimiques étant les mêmes.

Dans la théorie de supersymétrie, tous les candidats à la matière noire doivent être de faible interaction. Mais un seul de ces candidats peut être le bon, et ce doit être la plus légère

des particules supersymétriques suffisamment stable, les autres ne vivant que quelques nanosecondes.

Collisions à haute énergie

La physique des particules progresse en construisant des collisionneurs de particules toujours plus grands, atteignant des énergies toujours plus élevées. Le principe est d'observer les résultats des annihilations obtenues lors de collisions à très haute énergie, c'est-à-dire les particules nouvelles qui se matérialisent à partir de l'énergie de la collision.

C'est sur cette piste que nous sommes aujourd'hui. Un des buts premiers du LHC est de rechercher des traces de la supersymétrie. Cela pourrait être des jets uniques dans les collisions à haute énergie proton-antiproton. Une telle collision libère une énergie qui se matérialise en une cascade de quarks et autres particules de courte durée de vie. Comme la quantité de mouvement doit être conservée durant la collision, un jet de particules émergeant dans une seule direction, et pas dans la direction opposée, serait un signe de supersymétrie.

Jusqu'à présent, on n'a rien observé de tel. Le LHC a cependant fait une grande découverte en 2012, celle du boson de Higgs, que l'on cherchait depuis des années avec les précédentes générations d'accélérateurs. Le Higgs est la particule qui manquait au modèle standard de la physique des particules, la théorie qui rend compte des particules élémentaires et de leurs masses. Son existence avait été prédite en 1964 par, entre autres, le physicien écossais Peter Higgs et le Belge François Englert. Il fallut cinquante ans pour que leur hypothèse soit confirmée.

Finalement, l'énergie du LHC s'est révélée suffisante pour atteindre le boson de Higgs et, en 2013, Englert et Higgs reçurent le prix Nobel pour leur prédiction. Le Higgs n'est pas une preuve de la matière noire ou de la supersymétrie, mais il donne de précieuses indications sur ce que la matière noire

peut, ou ne peut pas, être. Et il y a beaucoup de candidats pour la matière noire. Les plus populaires viennent de la théorie de supersymétrie. Si cette théorie est correcte, les particules de matière noire, ou leurs traces, doivent être observables dans les accélérateurs de particules. La particule supersymétrique la plus légère devrait être stable, et pourrait rendre compte de la densité de matière noire observée.

La supersymétrie est une théorie soutenue par un faisceau d'arguments convergents. L'un d'eux est la très lente variation avec le temps des constantes de couplage des forces fondamentales. Ces constantes sont aujourd'hui bien différentes, mais cela n'a pas toujours été le cas. Selon la théorie, il y a très longtemps et à très haute énergie, elles étaient égales. Nous vivons aujourd'hui dans un univers de basse énergie, mais à plus haute énergie, la force nucléaire faible se fait plus intense. Quand on extrapole les intensités des différentes forces mesurées à basse énergie (100 GeV), on voit qu'elles convergent vers 10^{15} GeV, énergie dite de Grande Unification, qui a préparé le terrain pour l'inflation, et l'a provoquée.

Mais revenons à la matière noire. Peut-être s'agit-il d'une relique de la supersymétrie. Le candidat supersymétrique, on l'a vu, doit être neutre et de faible interaction. On l'appelle neutralino, et c'est la contrepartie lourde du photon qui, lui, n'a pas de masse. Les neutralinos étaient en équilibre thermique aux très hautes températures de l'Univers primordial. Quand la température a commencé à décroître, une densité résiduelle de toutes les particules stables a survécu. La faible interaction des neutralinos s'est traduite par une grande densité résiduelle, au contraire des particules d'interaction forte. D'une façon remarquable, cette densité résiduelle donne une densité critique de matière noire analogue à celle des particules de faible interaction, tel le neutrino.

L'Univers a connu des énergies où la supersymétrie a pu régner, et a donc pu engendrer de la matière noire supersymétrique. De la matière et, bien sûr, de l'antimatière :

de la fournaise initiale sont sorties des paires de particules de faible interaction et de leurs antiparticules, pour lesquelles la théorie propose des candidats. Aucun n'a encore été observé, mais si l'un d'eux est stable et a survécu jusqu'à aujourd'hui, sa faible interaction fait qu'il doit en rester beaucoup, et ils pourraient constituer notre mystérieuse matière noire. Au moins nous comprendrions pourquoi il reste autant de particules de matière noire issues du Big Bang.

La grande ombre au tableau est que la supersymétrie, théorie favorite pour la matière noire, n'a pas encore été confirmée. Mais les physiciens des particules ont plus d'un tour dans leur sac, et plusieurs candidats pour la matière noire.

Comment voir la matière noire

Pour chercher les particules noires, on utilise d'énormes machines de très haute technologie comme le LHC. Mais une telle machine coûte environ 8 milliards d'euros, et aligne quelques milliers d'aimants supraconducteurs sur un cercle de 8 kilomètres de diamètre. Bien évidemment, ce genre de machines est tout près des limites que l'on ne pourra jamais dépasser sur Terre.

Heureusement pour les physiciens, l'Univers est lui-même un accélérateur de particules, où des annihilations et des émissions extraordinairement puissantes ne cessent de se produire. Nous sommes ainsi bombardés par des particules de matière noire venant du grand halo de notre Galaxie. Chaque seconde, on en dénombre 10 millions par mètre carré : l'Univers lui-même peut remplacer les supercollisionneurs pour trouver la matière noire.

La matière noire qui nous bombarde depuis l'espace est produite par annihilation de particules, comme cela se produirait dans un collisionneur. Comment cela se passe-t-il ? Au tout début de l'Univers, les particules de matière noire étaient bien plus nombreuses qu'aujourd'hui, et les

annihilations plus fréquentes. Mais les énergies étant élevées, et des paires particule-antiparticule ne cessant de se créer, il s'était établi un équilibre. L'Univers se refroidissant, l'énergie diminuait et les annihilations prédominèrent. Lorsqu'elles finirent par s'arrêter, la densité ayant diminué sous l'effet de l'expansion, il ne resta que les survivants stables, ceux qui constituent la matière noire actuelle que nous tentons de détecter.

Aujourd'hui, la densité est faible et les annihilations des particules de matière noire sont très rares. Pourtant, quoique rares, elles doivent donner des signaux détectables car le volume des halos galactiques est gigantesque. Notre meilleure stratégie, de fait, consiste à rechercher les débris des annihilations de particules. Les masses typiques de ces particules doivent être de l'ordre de l'échelle d'énergie supersymétrique, c'est-à-dire entre 100 et 1 000 fois la masse du proton. L'acronyme de ces particules massives de faible interaction (*Weakly Interacting Massive Particles*) est WIMP, ce qui, en argot américain, signifie aussi mauviette...

Quand des annihilations se produisent, elles donnent une pluie de particules élémentaires énergétiques dont la plupart se désintègrent aussitôt. Les produits stables sont des rayons gamma de haute énergie, des paires proton-antiproton, des neutrinos et des paires électron-positron. Tous sont *a priori* détectables dans les expériences à venir, à des abondances qui dépendent de la densité de la matière noire. On a calculé cette densité localement dans le Système solaire à partir de la vitesse de rotation de notre Galaxie. Elle vaut le tiers de la masse d'un proton par centimètre cube, et il en passe 10 millions par mètre carré et par seconde à travers la Terre. Rien ne vaut une détection directe, mais des techniques indirectes peuvent jouer un rôle : à cet énorme flux de particules s'oppose sa très faible probabilité d'interaction. Il faudra donc des expériences complémentaires pour s'assurer que l'on a bien affaire à de la matière noire. C'est le grand défi expérimental de demain.

Avec un tel flux de particules, une détection directe est envisageable. Malgré la très faible interaction, il n'est pas exclu qu'une collision avec un atome d'un détecteur spécialement sensible soit enregistrée. Mais un tel détecteur ne serait pas sensible à d'autres types d'annihilation de la matière noire, dans les halos galactiques par exemple, ce qui implique de mettre en œuvre parallèlement des détections indirectes.

Une annihilation produisant des rayons gamma et des particules énergétiques, on pourrait détecter des rayons gamma, photons plus énergétiques encore que les rayons X, en provenance des régions centrales de la Galaxie, là où se trouve la plus forte concentration de matière noire. Dans ce cas, il faudrait d'abord éliminer toutes les autres sources possibles de rayons gamma, comme les explosions d'étoiles. Ensuite, on se trouverait face à un possible nuage de matière noire. Ce ne serait donc qu'une confirmation indirecte.

Les deux types de détection sont utilisés pour résoudre le puzzle de la matière noire. Et c'est une fascinante aventure technologique. Voyons de plus près ces deux approches, en commençant par la détection directe.

La détection directe est évidemment irremplaçable. Le flux de particules de matière noire est considérable et même si les interactions sont très faibles, un détecteur de très grande masse devrait enregistrer quelques éjections de matière à la suite des collisions avec des particules de matière noire. Un tel phénomène peut échauffer et parfois ioniser des noyaux du détecteur. Cela pourrait se signaler par des traces d'électrons ou d'ions, ou par des vibrations du réseau atomique connues sous le nom de phonons. Mais on ne peut faire abstraction d'importants bruits de fond, notamment ceux générés par les rayons cosmiques heurtant le détecteur et produisant des neutrons. Pour percevoir le signal WIMP, il faut supprimer ce bruit de fond, et la seule méthode consiste à s'enterrer aussi profondément que possible. Des mines désaffectées ont été utilisées, telle celle de Sudbury au Canada, à 3 kilomètres de profondeur. Une autre en Chine atteint 5 kilomètres.

Jusqu'à ces derniers temps, les détecteurs des laboratoires souterrains étaient à l'échelle du kilogramme, avec des sensibilités à la matière noire effleurant à peine le niveau requis pour la détection. Les modèles supersymétriques donnent une bonne répartition de matière noire sur un large spectre d'interactions, bien en dessous du niveau des interactions impliquant des neutrinos. Mais la théorie a changé la donne et exige des expériences plus sensibles. La seule façon d'y parvenir est d'augmenter la masse des détecteurs, jusqu'à 1 tonne, voire 1 000 tonnes. Tel est le but de la nouvelle génération de détecteurs qui emploient des matériaux aussi divers que l'argon et le xénon liquides, ou des cristaux de germanium.

La matière noire n'est pas vraiment noire

On pratique aussi une détection indirecte de la matière noire en analysant les fragments éjectés par collision d'autres particules avec de la matière noire. Quand une particule lourde, de 100 à 1 000 fois la masse du proton, entre en collision avec la matière noire, l'annihilation produit des rayons gamma de haute énergie, des neutrinos, des positrons et des antiprotons. Tous ont des signatures distinctes et peuvent être extraits du bruit de fond. Les positrons, par exemple, sont spécialement utiles car ils sont très rares dans les rayons cosmiques galactiques. De plus, tous ces sous-produits diffèrent radicalement de fragments de matière noire, dont la masse ne peut excéder celle d'un WIMP. Ce contraste mène à une allure bien particulière de la distribution d'énergie attendue.

Il y a de nombreux candidats au titre de particule supersymétrique la plus légère, mais la seule chose que l'on connaisse avec une grande précision est sa « section efficace » (sa probabilité d'interaction). Les WIMP, en effet, doivent rendre compte de la densité de matière noire. Si la section

efficace est trop faible, il y a trop de WIMP. Si elle est trop forte, il y en a trop peu. Cette contrainte tient à ce que les annihilations dans l'Univers primordial ont fixé l'actuelle densité des WIMP, qui n'ont pas encore été détectés, et dont la masse est inconnue. Pour avoir une chance de les détecter, les expériences doivent couvrir un spectre de sensibilités aussi large que possible. Mais pour une sensibilité donnée, la détection est garantie si la particule supersymétrique la plus légère est le partenaire d'une des particules connues, lesquelles sont classées selon leur spin et leur masse en baryons (les protons par exemple) et en fermions (dont les électrons).

Les positrons sont très attendus car ils sont rares. Le flux de positrons est contrôlé par la densité locale de matière noire. Le flux de rayons gamma est aussi un signal intéressant. Le halo étant transparent aux rayons gamma, la concentration de matière noire au centre de la Galaxie doit se traduire par un excès de rayons gamma, qui peuvent être produits par interaction entre les rayons cosmiques et le gaz interstellaire. Il y a aussi des positrons dans les rayons cosmiques, mais le signal « matière noire » devrait être lisible. Ces positrons et rayons gamma ont une distribution d'énergie bien particulière, déterminée par la masse des particules qui s'annihilent. La détection au-dessus du bruit de fond de positrons et de rayons gamma serait une preuve de l'existence de la matière noire.

Les expériences terrestres à haute altitude menées jusqu'à présent recherchaient des positrons et des gammas. Mais la contamination par l'interaction entre les rayons cosmiques et l'atmosphère terrestre implique des expériences spatiales. Jusqu'à présent, on n'a aucun candidat sérieux au titre de la matière noire.

Cependant, il y a des indices de détections possibles dans les positrons des rayons cosmiques et dans les rayons gamma diffus. Une nouvelle expérience embarquée en 2011 sur la station spatiale, baptisée AMS02, collecte des données qui améliorent les mesures du flux de positrons. Son intensité est plus grande que celle prévue par les théories les plus simples.

Pour autant, il est toujours possible que la matière noire n'existe pas. Une explication alternative fait appel à un pulsar proche de la constellation des Gémeaux, baptisé Geminga (abréviation de *Gemini gamma ray source*, source de rayons gamma dans les Gémeaux), qui est une source de rayons gamma de très haute énergie. Il faudra bien d'autres données pour comprendre les résultats expérimentaux, et bien d'autres signatures complémentaires, la plus prometteuse venant des rayons cosmiques diffus.

Des rayons gamma provenant de l'espace ont aussi été détectés. La Voie lactée est une source intense de rayons gamma, produits par le passage des rayons cosmiques à travers les nuages de gaz interstellaires. Les collisions de haute énergie entre protons génèrent des rayons gamma. L'observatoire de rayons cosmiques *Fermi* (baptisé en hommage au physicien Enrico Fermi et lancé en 2008) a détecté un excès de rayons gamma diffus en provenance du centre de la Galaxie. Mais leurs énergies semblent plus fortes que celles du flux attendu. On explore aussi d'autres voies comme les protons du rayonnement cosmique.

C'est précisément ce que l'on attend des WIMP. Les désintégrations de neutralinos impliquent des quarks massifs, pesant jusqu'à 5 fois la masse du proton. Les rayons gamma qui résulteraient de la désintégration de ces quarks seraient plus énergétiques que ceux produits par collision proton-proton. Mais les mesures sont en attente de confirmation, et la désintégration des WIMP reste à l'état d'hypothèse.

La chasse à l'énergie sombre

L'Univers marche sur un fil. D'après les mesures réalisées, il est pratiquement plat. Sa masse le met à un point critique, entre un univers ouvert, pour toujours en expansion, et un univers fermé, courbe et qui se refermera un jour sur lui-même. Dans un univers fermé, la gravité finit par supplanter l'expansion, au contraire de ce qui se passe dans un univers ouvert.

L'Univers est donc précisément sur cette limite entre ouvert et fermé, même si, comme on l'a vu, son espace plat est en expansion accélérée. Il peut avoir une légère courbure, positive ou négative, ce qui deviendra un élément déterminant quand nous nous demanderons si l'Univers est infini. Mais en attendant, qu'est-ce qui maintient l'Univers dans cet équilibre si ténu entre planéité et expansion accélérée ? La réponse pourrait être l'énergie sombre.

D'abord, la matière détectée (y compris la matière noire) n'est que le tiers de ce qui est nécessaire pour assurer l'équilibre de l'Univers entre expansion et effondrement gravitationnel. En complément à sa première théorie de la relativité générale, Einstein a voulu remédier à ce déséquilibre en introduisant une constante cosmologique, une force destinée à contrer les effets de la gravité. C'est ce qu'il fallait pour parvenir à un univers statique, modèle qui est maintenant oublié. La solution était trop précaire, et la moindre perturbation aurait mené à l'effondrement de l'Univers. La découverte de l'expansion de l'Univers a mené à l'abandon de cette idée.

Mais la constante cosmologique ne quitta pas pour autant la scène. Les cosmologistes Georges Lemaître et Arthur

Eddington lui donnèrent une nouvelle jeunesse en en faisant la force répulsive expliquant l'origine de l'expansion. Puis les données modernes réintroduisirent une constante cosmologique avec la découverte de l'accélération cosmique.

La naissance du Big Bang

L'histoire commence en 1927 quand un jeune étudiant belge, par ailleurs prêtre jésuite, Georges Lemaître, présente sa thèse sur un projet lié à la relativité générale d'Einstein. Il a passé les années 1924 et 1925 à l'observatoire de Harvard sous la direction de Harlow Shapley, célèbre pour ses travaux sur les amas globulaires et les échelles de distance dans l'Univers. Il a aussi visité le CalTech de Pasadena, et y a discuté avec les astronomes locaux de la solution aux équations d'Einstein qu'il a trouvée, et qui implique un Univers en expansion.

Lemaître rassemble des données sur les décalages vers le rouge fournies par l'astronome Vesto Slipher, et rencontre sans doute Richard Tolman. Il n'est pas certain qu'il rencontre Hubble. En 1927, il publie « son » *Univers en expansion* en français, dans une obscure revue belge. Il ignore totalement les travaux d'Alexander Friedmann qui, à Saint-Petersbourg, venait de trouver la même solution aux équations d'Einstein. Il l'avait publiée en 1924, mais mourut l'année suivante de la fièvre typhoïde.

La chose essentielle que fit Lemaître en 1927 fut de trouver la loi linéaire liant les décalages vers le rouge et la distance des galaxies, loi qui est aujourd'hui connue comme la loi de Hubble. Ce dernier la publia deux ans plus tard, obtenant une « constante de Hubble » (le coefficient directeur de la droite) 10 fois trop grande. On sait aujourd'hui, grâce à Walter Baade et à d'autres, d'où vient l'erreur. Pour autant, la proportionnalité reste, qui indique une expansion de l'Univers. Hubble était un drôle d'individu. Dans son article de 1929, il ne citait ni Slipher, à qui il avait emprunté des données, ni Friedmann ni Lemaître, qui avaient avant lui,

indépendamment, découvert l'expansion de l'Univers. L'arrogance n'est pas rare chez les scientifiques.

Lors d'une visite à Cambridge en 1923, Lemaître rencontra Arthur Eddington, qui l'encouragea à poursuivre ses travaux. Eddington publia l'article de 1927 dans les *Notices* de la Royal Astronomical Society en 1931, ce qui rendit Lemaître aussitôt célèbre, ainsi que Friedmann, dans la communauté scientifique. Ce que l'on sait moins est que Lemaître refusa modestement de publier sa version de la loi d'expansion dans l'article de 1931, arguant, ainsi que l'a montré Mario Livio, qu'il n'y avait pas lieu de répéter l'article de Hubble de 1929. Mais cette version existe en français, et a été publiée deux ans avant celle de Hubble... avec la même valeur de la constante, ce qui n'est pas étonnant puisque tous deux utilisaient les données de Slipher.

Lemaître écrivait, en 1950 :

À propos de ma contribution de 1927, je ne veux pas discuter sur ma qualité d'astronome professionnel. J'étais membre de l'Union astronomique internationale (Cambridge, 1925), et j'avais étudié l'astronomie pendant deux ans ; un an avec Eddington et l'autre dans les observatoires américains. J'ai rendu visite à Slipher et à Hubble, que j'ai entendu à Washington en 1925, lors de sa mémorable conférence sur la distance de la nébuleuse d'Andromède. J'étais un peu en retard au plan mathématique, n'ayant pas eu connaissance des travaux de Friedmann, mais pas au plan astronomique. Je calculais la constante d'expansion (575 km/s/mégaparsec, 625 avec une correction statistique). Bien sûr, avant la découverte et l'étude des amas de nébuleuses, il n'y avait pas lieu d'établir la loi de Hubble, mais on pouvait calculer sa constante. Le titre de mon article ne laisse aucun doute sur mes intentions : « Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques. » Je m'excuse pour tous ces détails personnels, mais... cette histoire de compétition scientifique n'est pas sans intérêt.

Comme le nota bien plus tard l'astronome sud-africain David Block : « Lemaître ne voulait certes pas que le riche mélange de théorie et d'observation contenu dans son article de 1927 soit enterré dans les sables du temps. »

Dans cet article, Lemaître incluait les solutions à constante cosmologique, qu'Eddington développa dans la cosmologie dite de Lemaître-Eddington : un Univers en expansion subissant une accélération tardive. Mais cette solution fut considérée comme d'intérêt purement mathématique par la plupart des cosmologistes, sauf Lemaître lui-même. Pourquoi inclure une accélération ? Pourquoi compliquer les choses ?

La généralisation de Lemaître incluant une constante cosmologique n'était pas nécessaire pour interpréter les données vitesse/distance de la loi de Hubble. Pendant ce temps, Hubble, son assistant Milton Humason et son collègue Alan Sandage accumulaient des données de galaxies de plus en plus lointaines. Sandage avait l'avantage d'avoir accès au plus grand télescope du monde, le 5 mètres du mont Palomar. Il put atteindre des distances considérables et des vitesses de l'ordre de 90 % de la vitesse de la lumière.

La loi de Hubble atteignit une remarquable précision, mais il y eut une surprise un demi-siècle plus tard. Pour les galaxies les plus lointaines, elle ne marchait plus. Était-ce un signe que la constante cosmologique reprenait du service ?

Du nouveau

Notre modèle actuel est basé sur la théorie du Big Bang de Friedmann et Lemaître. L'interprétation moderne de la constante cosmologique en fait une énergie possédant une pression négative, c'est-à-dire exerçant une force répulsive. Une pression positive, au contraire, comme la gravité, exerce une force attractive qui contrarie l'expansion de l'Univers. La force répulsive exercée par une pression négative ressemble à la tension d'une ficelle. Elle agit comme une contribution constante, mais négative, à la densité d'énergie de l'Univers. Si l'énergie sombre représentait les deux tiers de la densité critique de l'Univers (que l'on ne trouve pas dans la matière elle-même), la planéité de l'Univers serait expliquée. La pression négative agit comme une antigravité, et provoque

l'accélération de l'Univers à grande échelle. Ce champ d'énergie est une excellente solution.

Cette théorie a une conséquence remarquable sur la façon dont nous nous représentons l'histoire de l'Univers. Toutes les densités d'énergie diminuent sauf une, celle de l'énergie noire, qui est la constante cosmologique. Au tout début, la densité d'énergie de la constante cosmologique était dominée par la densité de la matière ordinaire et du rayonnement. Son effet était négligeable. Par la suite, c'est l'énergie sombre qui en est venue à dominer. Quand sa densité est devenue supérieure à celle de la densité de matière décalée vers le rouge, l'Univers a connu une phase d'accélération. C'est cet effet qui vient d'être détecté, confirmant la dominance de l'énergie sombre.

Le diagramme de Hubble actuel montre un phénomène qui aurait stupéfié Edwin Hubble. Les supernovæ des galaxies les plus lointaines sont anormalement peu brillantes. La meilleure explication est que l'expansion de l'Univers s'accélère. Les supernovæ sont plus loin qu'elles ne le seraient dans un Univers non accéléré.

En l'an 2000, une grande nouveauté est apparue dans la façon de mesurer les distances au moyen des supernovæ. Jusque-là, les supernovæ étaient une méthode de choix, mais la précision des échelles de distance était insuffisante. La luminosité d'une supernova a une valeur intrinsèque, et une mauvaise compréhension de ce phénomène menait à une grande incertitude sur la distance. Puis on découvrit qu'une supernova a une courbe de luminosité bien particulière : plus brillante est la supernova, plus lente est la décroissance de sa luminosité. On disposait enfin d'une méthode empirique pour résoudre l'incertitude sur la distance. Du jour au lendemain, ou presque, les supernovæ sont devenues un instrument de haute précision pour mesurer la distance des galaxies lointaines.

Ce nouvel outil allait mener à une révolution en cosmologie, la première depuis l'époque de Hubble soixante ans plus tôt. Deux groupes rivaux se mirent au travail, l'un à Berkeley,

l'autre à l'Université Harvard de Cambridge, Massachusetts. Dans les années 1980, Richard Muller, physicien au Lawrence Berkeley National Laboratory, fut le premier à comprendre que les supernovæ étaient bien davantage qu'un outil commode pour mesurer les distances. L'outil traditionnel, jusque-là, était l'étoile variable RR de la Lyre. Par comparaison avec cette « chandelle standard », il était possible de trouver la distance d'une étoile située dans la Voie lactée ou une galaxie proche.

Muller tenta d'utiliser les supernovæ comme chandelles cosmiques. Ces explosions d'étoiles donnent en effet un pic de lumière très intense. Cela a été prouvé par Subrahmanian Chandrasekhar, qui a montré que la plupart des étoiles finissaient en naines blanches d'environ une masse solaire, et qui reçut pour cela le prix Nobel 1983. Les étoiles de masse supérieure finissent en supernovæ. L'ennui est qu'on en observe à peu près une par siècle dans notre Galaxie. L'idée de Muller consistait à observer des milliers de galaxies, ce qui permettrait de vérifier la loi de Hubble à très grande distance, malgré la faible durée du phénomène. Dans cette quête, la concurrence entre la côte Est et la côte Ouest des États-Unis se donna libre cours.

Muller s'était fait un nom en cosmologie en persuadant la NASA d'embarquer un petit télescope micro-onde à bord d'un avion espion U2. Avec George Smoot, futur Nobel pour son étude, grâce à *COBE*, des fluctuations du rayonnement cosmique, il s'attaqua en 1977 à une question fondamentale. La Terre tourne autour du Soleil, qui tourne autour du centre de la Voie lactée, laquelle tourne autour de la galaxie d'Andromède. Et notre groupe local de galaxies est lui-même attiré par l'amas de la Vierge. En toile de fond se trouve le rayonnement cosmique, qui doit du fait de ces mouvements montrer une légère anisotropie de température. Mach a dû se retourner dans sa tombe : son principe devenait vérifiable. L'anisotropie devait être très faible, de l'ordre d'une partie par millier, et elle fut bien mesurée par Muller et Smoot, ce qui

prouvait que le fond de rayonnement était bien directement relié au Big Bang et aux lieux les plus distants de l'Univers.

Avec son collègue Saul Perlmutter, Muller monta donc un vaste programme d'observation des supernovæ, dont la moisson fut hélas trop maigre pour mener à des conclusions intéressantes. Muller abandonna la partie, mais Perlmutter continua en raffinant la stratégie d'observation. Les fenêtres optimales étaient celles où le ciel était le plus noir, c'est-à-dire chaque mois, à la nouvelle Lune. L'équipe de Harvard, dirigée par Robert Kirshner, eut la même idée. Il est vrai que Kirshner, spécialiste des supernovæ, était membre du comité qui avait évalué les travaux de Muller. Au début des années 1990, les deux groupes arrivèrent à des conclusions divergentes, dues essentiellement aux imprécisions des mesures.

L'accélération confirmée

Il fallait une percée majeure, et elle se produisit. On découvrit que plus le pic de brillance de la supernova était intense, plus sa décroissance était rapide. Cela permit d'améliorer la précision des mesures. Ces chandelles cosmiques mieux calibrées donnaient des distances bien plus précises. Les télescopes du monde entier furent conviés à participer à cet effort observationnel. Il n'était pas rare qu'un astronome en plein travail reçoive un coup de téléphone lui demandant de tout laisser tomber pour observer une supernova. Il y eut de nombreuses fausses alertes, mais la courbe de lumière se précisa peu à peu, et les deux groupes publièrent leurs résultats en 1998.

Ce gain en précision a montré que les supernovæ les plus lointaines sont systématiquement moins lumineuses que les plus proches, et l'interprétation acceptée de tous est que l'expansion de l'Univers s'est accélérée. En conséquence, le diagramme de Hubble, qui montre la proportionnalité de la vitesse à la distance, doit être modifié. Il est correct localement, pour l'Univers proche, mais à grande distance la

vitesse est plus grande que ne le prédit la loi de Hubble. À cause de cette accélération, les supernovæ sont plus lointaines et donc moins lumineuses. Cela a des conséquences bizarres : l'accélération implique que le nombre de galaxies visibles doit décroître. Actuellement, on en voit quelque 10 milliards au sein de notre horizon. Dans un futur très lointain, notre Voie lactée se retrouvera seule...

Le prix Nobel de physique 2011 fut attribué à Saul Perlmutter de Berkeley, et à Adam Riess et Brian Schmidt de Harvard, pour la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers. L'énergie sombre n'était pas mentionnée par le jury Nobel, mais c'est Riess qui avait compris le premier qu'elle devait intervenir, *via* la constante cosmologique, dans l'accélération. Kirshner aurait aussi mérité la récompense. Dans une interview au *New York Times*, il déclara : « La plus grande force de l'Univers, ce n'est pas la gravité, c'est la jalousie. »

La chasse à l'énergie sombre va certainement déchaîner notre imagination et susciter de nouveaux types de télescopes géants, au sol comme dans l'espace. Les expériences proposées à court et à moyen terme visent à mesurer l'énergie sombre en utilisant plusieurs sondes indépendantes. Aucune technique unique ne conviendra à cause des inévitables erreurs systématiques. Certaines sont connues, mais d'autres sont encore à découvrir. Ce n'est qu'en combinant différentes techniques que l'on pourra réduire les erreurs et améliorer les mesures de l'énergie sombre.

Une déclaration de l'ancien secrétaire d'État américain à la Défense, Donald Rumsfeld, décrit assez bien la nature exotique du défi :

Nous savons qu'il y a des choses que nous savons ; il y a des choses dont nous savons que nous les connaissons. Nous savons aussi qu'il y a des choses que nous ne savons pas ; c'est-à-dire des choses dont nous savons que nous ne les connaissons pas. Mais il y a aussi des choses que nous ignorons ignorer – dont nous ne savons pas que nous les ignorons.

Heureusement, la mesure de l'énergie sombre ressemble davantage à notre compréhension du son musical. Dans la nouvelle génération d'expériences, les premières vont tenter d'améliorer les mesures d'oscillations de baryons.

Découvrir ce motif dans la distribution des galaxies implique de cartographier des milliers de degrés carrés du ciel pour obtenir les décalages vers le rouge de millions de galaxies. Ces décalages sont essentiels car ils permettent, *via* le diagramme de Hubble, d'obtenir les distances des galaxies, et de reconstituer une carte tridimensionnelle de l'Univers. On utilise pour cela la spectroscopie, clé de la mesure des décalages spectraux, et les très grands télescopes qui vont avec cette technique, de façon à récolter un maximum de lumière en provenance des galaxies les plus lointaines.

Un des projets implique l'emploi d'un spectrographe capable de mesurer simultanément des milliers de spectres galactiques avec un télescope de 8 mètres de diamètre. Le champ de vision du télescope japonais Subaru, qui a un tel diamètre, s'étend sur 1 degré dans le ciel, soit le double de la taille de la pleine Lune.

Un autre projet vise une longueur d'onde différente. Le « Square Kilometer Array », un grand réseau de radiotélescopes, implique la construction d'un réseau de centaines de petites antennes, l'ensemble déployant une surface d'un kilomètre carré. Un tel réseau pourrait cartographier simultanément des milliers de degrés carrés dans le ciel. Son potentiel de découvertes serait donc 1 000 fois celui d'un télescope ordinaire. Il tentera d'obtenir des mesures spectroscopiques de décalages avec la raie de 21 centimètres de l'hydrogène atomique, pour toutes les galaxies proches et riches en gaz de l'Univers observable. Son coût prévu est d'au moins 1 milliard de dollars.

Il est essentiel d'aller dans l'espace pour mesurer les émissions X, infrarouges et ultraviolettes des galaxies

lointaines. Le télescope spatial *Hubble* est un exemple de télescope qui fournit de telles données dans les domaines optique, ultraviolet et infrarouge. Son grand avantage par rapport aux télescopes terrestres est la précision de ses images, dont la résolution, pour les galaxies peu lumineuses, est jusqu'à 10 fois supérieure à celle des télescopes terrestres. Pour chasser l'énergie sombre, de nouveaux télescopes spatiaux de grande taille seront nécessaires, utilisant plusieurs des techniques de détection décrites plus haut. Parmi elles, l'observation des supernovæ, la cartographie de la matière noire et l'évaluation des oscillations baryoniques. L'un d'eux, baptisé *Euclid*, est en construction à l'Agence spatiale européenne (ESA). C'est un télescope de 2 mètres avec une optique capable d'étudier la totalité du ciel. Destiné à être lancé en 2018, il doit procéder à des tests d'une précision inégalée sur la nature de l'énergie sombre.

Neuf nombres pour décrire l'Univers

L'Univers paraît extraordinairement complexe, mais sa cosmologie est remarquablement simple. Il suffit de neuf nombres pour définir le modèle qui prend en compte toutes les données récentes, y compris sur le fond diffus de rayonnement et la distribution des galaxies.

L'idée de réduire l'Univers à quelques nombres vient de deux livres de vulgarisation publiés en 1999 par des astronomes. Dans l'un, Michael Rowan-Robinson propose 9 nombres ; dans l'autre, Martin Rees se contente de 6. Mais il en faut 3 de plus pour rendre compte de la vie.

Rowan-Robinson est le concepteur d'*IRAS*, le premier télescope spatial infrarouge, lancé en 1983 par la NASA. Ce projet, associant les États-Unis, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne, faisait appel à une technologie cryogénique : le satellite était refroidi par l'hélium liquide à 2 degrés Kelvin. Il réalisa une cartographie complète du ciel, observant 75 000 galaxies lointaines et révélant surtout les régions de formation d'étoiles.

Rees s'est quant à lui intéressé à l'accrétion des gaz par les trous noirs supermassifs, source probable de l'énergie des quasars, objets les plus lumineux de l'Univers. Très concerné aussi par les questions de survie de l'humanité, il a été nommé astronome royal, poste qui assure qu'aucun leader politique anglais ne consulte des astrologues, comme cela s'est vu aux États-Unis et en France.

Contrairement à ces auteurs, je vais maintenant montrer qu'il faut 9 nombres pour définir notre modèle cosmologique de

l'Univers. 6 sont empiriques, comme l'explique Rowan-Robinson, mais il en faut 3 autres pour décrire l'origine de l'Univers et de la vie.

Les neuf premiers... réduits à six

Le premier des 9 nombres est l'âge de l'Univers. On le connaît à quelques pourcents près en mesurant le taux d'expansion. Il est préférable d'exprimer cet âge à partir de celui d'une étoile massive. Pourquoi une étoile massive ? D'abord parce que son âge peut s'exprimer en fonction des constantes fondamentales de la nature. Ensuite parce que ces étoiles ont une courte durée de vie, quelques millions d'années avant qu'elles n'explorent en supernovæ. La plupart des supernovæ sont d'ailleurs des étoiles massives arrivant en fin de vie au bout d'environ 10 millions d'années. Et nous sommes faits des cendres de ces étoiles.

L'âge de l'Univers, que l'on définit comme le temps nécessaire pour qu'il double de taille, est 10 milliards d'années. Le temps écoulé depuis le Big Bang est un peu plus long : 14 milliards d'années. Pour en revenir à notre définition précédente, notre premier nombre est donc 1 000, soit l'âge de l'Univers exprimé en unités du temps qu'il a fallu pour produire les éléments chimiques dont nous sommes faits. Au bout de quelques milliers de générations d'étoiles massives, on obtient des atmosphères riches en oxygène et des noyaux planétaires riches en fer. 1 000 est donc un nombre fondamental.

Les 4 nombres suivants sont les densités des 4 plus importants constituants de l'Univers, l'énergie sombre, la matière noire, la matière baryonique ordinaire et le rayonnement. Pour convertir ces densités en nombres, on les exprime en termes de densité d'un Univers qui serait en expansion pour toujours, et dans lequel les effets de la gravité et de l'expansion s'équilibreraient exactement.

L'énergie sombre est dominante : 72 % de la masse-énergie de l'Univers. La matière noire intervient pour 24 % et la matière ordinaire pour seulement 4 %. Quant au rayonnement, il représente à peine un dix millième du total (0,0001), alors qu'il fut dominant dans un lointain passé, et reste à ce titre un élément essentiel. La raison de ce faible nombre est que contrairement à une particule stable comme le proton (matière ordinaire), les photons sont décalés vers le rouge par l'expansion de l'Univers, et perdent ainsi de l'énergie. Ceux du rayonnement cosmique ont aujourd'hui des énergies de l'ordre du millième d'électronvolt alors qu'aux premiers instants de l'Univers, c'étaient des rayons gamma atteignant le milliard d'électronvolts.

On peut mesurer directement les densités du rayonnement et de la matière ordinaire en explorant le ciel entier avec des télescopes pour produire des cartes de la distribution des galaxies et du fond diffus de rayonnement. À partir de ces cartes, on mesure les densités et leurs variations de lieu en lieu, ce qui permet de dessiner des cartes en trois dimensions. Ce qui nous échappe dans ces mesures : les baryons des gaz intergalactiques, mais on peut les mesurer aussi, grâce aux émissions X du plasma intergalactique.

On dispose de deux techniques pour mesurer les composantes « sombres » qui dominent la densité. La première utilise des déterminations précises de distances pour reconstituer la géométrie de l'Univers (ou, ce qui revient au même, la densité combinée de ses divers constituants). L'autre technique mesure le taux de croissance des fluctuations de densité. Comme l'énergie sombre est constante, et que la densité de matière noire diminue avec l'expansion de l'Univers, on peut en déduire leurs densités.

Nos deux prochains nombres contrôlent l'émergence des fluctuations de densité dont proviennent toutes les structures. Pour obtenir le premier, on mesure l'intensité des fluctuations de densité responsables de la formation des galaxies. C'est simplement le rapport de la densité d'un « grumeau » de

matière à la densité moyenne de l'Univers à cet instant. Ce nombre vaut 0,00001. On le mesure dans les minuscules fluctuations du fond diffus.

À cette valeur, il faut ajouter un dernier nombre important, celui qui décrit la distribution des fluctuations de densité. Plus précisément, il traduit le fait que les fluctuations sont plus intenses si l'échelle d'observation est plus petite, ce qui donne la structure hiérarchique mentionnée plus haut. Plus grande est la densité relative dans une fluctuation, plus intense est sa propre force de gravité. C'est cela qui lui permet de se « détacher » de l'expansion et de former une structure gravitationnelle, une galaxie par exemple. Et les petites structures précèdent les grandes à mesure que se poursuit l'expansion de l'Univers. Les structures ayant les plus fortes fluctuations de densité initiales s'effondrent les premières sous l'effet de leur gravité, et l'Univers devient de plus en plus concentré en masses disséminées. Ce nombre vaut 0,97 : c'est ce que les cosmologistes appellent l'index spectral de la distribution des fluctuations. Cela signifie que la masse totale des plus grandes fluctuations diminue quand la masse augmente. Les plus petites fluctuations sont donc plus grandes et se forment d'abord.

Voilà donc nos 7 premiers nombres : 1 000 ; 0,72 ; 0,24 ; 0,04 ; 0,0001 ; 0,00001 et 0,97.

Pour définir notre Univers observable, il faut encore ajouter 2 autres nombres : la constante de Hubble, qui donne le taux d'expansion de l'Univers, et l'opacité de l'Univers au rayonnement cosmique, due à la diffusion par les électrons de l'espace intergalactique quand l'Univers avait le dixième de sa taille actuelle. Le premier vaut 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec, et le second environ 9 %.

Mais en réalité, on n'a pas besoin de tous ces nombres car certains interviennent deux fois. L'âge, par exemple, est déterminé par la densité de l'Univers, ainsi que la constante de Hubble, tandis que l'abondance du rayonnement est tout à fait

négligeable. Gardons donc 6 nombres : 0,72 ; 0,24 ; 0,04 ; 0,0001 ; 0,97 et 0,09.

Grâce à ces 6 nombres, nous pouvons passer de la théorie de la gravitation d'Einstein à un modèle qui s'accorde (presque) parfaitement à tout ce que nous savons sur l'Univers. Bien sûr, moyennant quelques hypothèses, dont la plus notable est que l'Univers est homogène et isotrope (partout identique, et identique dans toutes les directions). Mais c'est un grand triomphe de la théorie que de faire « coller » autant de données dans un modèle aussi simple. Quand on songe qu'il y a des milliers de points de mesure indépendants des distributions de la matière et du rayonnement, et que 6 nombres suffisent !

Avec ce modèle à 6 paramètres, on peut prédire le futur probable de l'Univers. Et il semble bien que son accélération ne s'arrêtera jamais. C'est en tout cas ce que dit le modèle, c'est-

à-dire ce que l'on peut déduire des calculs. Il se peut qu'un jour, de nouvelles données mènent à un résultat différent, ou que la simplicité du modèle soit remise en cause. Un exemple : si l'énergie sombre était susceptible de se désintégrer, l'accélération finirait par s'arrêter. Mais aucune observation ne corrobore cette idée.

Force est pour l'instant d'accepter l'accélération continue de l'espace, ce qui signifie qu'au sein de notre horizon, aussi loin qu'on puisse voir avec nos plus grands télescopes, il y aura de moins en moins de galaxies. Aujourd'hui, les plus grands télescopes voient quelque 10 milliards de galaxies. Mais il viendra un jour, dans 1 000 milliards d'années, où notre horizon ne contiendra plus qu'une seule galaxie, la nôtre. L'avenir sera solitaire. Bien sûr, à cette époque, les seules étoiles restantes seront des naines à peine visibles. L'hydrogène qui assurait la combustion des étoiles sera complètement épuisé.

Cependant, il restera peut-être des éclats occasionnels provenant de destructions d'étoiles : les paires de naines

blanches tournant l'une autour de l'autre peuvent mettre très longtemps à fusionner de façon explosive en donnant une supernova.

Mais cela, c'est dans 1 000 milliards d'années. Après, plus aucune étoile ne pourra briller grâce à l'énergie nucléaire. Seule restera la faible lueur des naines blanches assombries, ultimes vestiges gravitationnels. L'Univers sera sombre, empli de reliques stellaires et de restes planétaires. Et il restera ainsi pendant très longtemps – quelque chose comme 10^{33} ans, un million de milliards de milliards de milliards d'années. C'est notre estimation actuelle de la durée de vie du proton. L'unification des forces fondamentales de la nature implique que les protons doivent se désintégrer par radioactivité sous l'effet de l'interaction faible. Ces désintégrations doivent être rarissimes mais si l'on attend suffisamment longtemps, elles sont inévitables. C'est du moins ce que prédisent les modèles d'unification les plus simples. Et si le proton se désintègre, il ne restera plus que des électrons, des neutrinos et des photons. Plus la moindre structure. Pas le moindre embryon de planète. Plus de vie du tout.

... et trois de plus

Nos 6 nombres oublient un fait essentiel : notre présence dans cet Univers. Nous inspirant du travail de Rees, nous devons ajouter 3 autres nombres essentiels à l'émergence de la complexité et à l'apparition de la vie. L'un est le nombre de dimensions de l'espace. La vie n'existerait pas à 1 dimension, ni à 2, et serait méconnaissable à 4, n'en déplaise aux scénaristes d'Hollywood. Le septième nombre est donc 3.

La vie est fondée sur la chimie, laquelle est contrôlée par les réactions nucléaires qui donnent naissance aux éléments comme le carbone, et par la force électromagnétique qui lie les atomes pour former les molécules. Les deux derniers nombres sont donc la constante de structure fine électromagnétique,

1/137, qui assure la stabilité des atomes et des molécules, et l'intensité de l'interaction faible.

L'interaction faible est responsable de la légère (0,7 %) différence de masse entre protons et neutrons, laquelle rend compte de l'énergie de la fusion thermonucléaire qui transforme 4 noyaux d'hydrogène (des protons) en un noyau d'hélium (2 protons et 2 neutrons). Elle contrôle aussi l'édification des noyaux lourds, poussière des étoiles dont nous sommes constitués. En tout, cela fait donc 9 nombres pour expliquer l'Univers et la vie.

D'ici à l'infini

Comment peut-on savoir si l'Univers est fini ou pas ? C'est là une très ancienne question, à propos de laquelle le naturaliste anglais Thomas Huxley écrivait : « Le connu est fini, l'inconnu est infini ; intellectuellement, nous sommes sur une petite île perdue dans l'océan de l'inexplicable. Le travail de chaque génération, c'est d'agrandir un peu notre île. »

Quand il s'agit d'un Univers infini, notre effort pour agrandir notre île pose des problèmes intéressants. Tout a pu se produire, et s'est produit. L'écrivain T. H. White dit simplement que ce qui n'a pas de limite peut toujours se produire : « Tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire. » Voilà qui ouvre des perspectives épatantes à notre Univers infini.

Mais d'abord, l'infini, c'est quoi ? C'est plus que vous pouvez imaginer ! Mais on ne peut jamais prouver que l'Univers est infini. Et s'il l'était, de bien étranges contradictions apparaîtraient. Il y aurait sur une lointaine planète un autre Londres et un autre New York avec des habitants semblables faisant des choses semblables. Mais le temps qu'il fait pourrait être différent. Au pire, il y aurait une infinité de Londres, mais on n'y aurait jamais accès s'ils se trouvaient au-delà de notre horizon. Il est plus plausible scientifiquement de se demander si l'on peut

prouver l'hypothèse opposée, selon laquelle l'Univers serait fini.

Comme il est vrai qu'un Univers infini est philosophiquement peu attractif, voire carrément ennuyeux, imaginons un Univers fini mais grand, et même très grand. C'est bien ce que nous croyons, et ce que nous mesurons. Comment en arrive-t-on à cette conclusion ?

Les cosmologistes pourraient trouver une signature de la finitude de l'Univers. Il y a une empreinte de finitude dans le fond diffus de rayonnement. Elle disparaît si l'Univers est trop grand, et elle pourrait un jour donner une mesure précise de cette finitude. Si la partie de l'Univers que nous observons n'a rien de spécial, alors les motifs des fluctuations que nous voyons dans le ciel doivent s'étendre à l'Univers entier, y compris à ce que nous ne pouvons voir.

Vous devez vous demander comment on fait pour mesurer ce qu'on ne voit pas. De fait, c'est impossible. Mais on peut au moins mesurer les éléments présents à l'intérieur de notre horizon. Imaginez que vous grimpez les marches d'un endroit appelé paradis. Bien sûr, vous ne pouvez pas voir ce paradis, ni même y aller avant de mourir, mais les marches sont là et bien là. Rien n'empêche, de même, de mesurer les petits bouts de fluctuations qui nous sont accessibles, même si l'ensemble nous échappe. Et l'absence de pièces du puzzle, dans un Univers fini, laisserait une signature caractéristique sur le fond diffus de rayonnement. Inutile de préciser que nous n'avons pas encore vu cette signature, seulement de curieux indices qui militent en faveur d'un Univers fini. Nous en saurons plus en mesurant plus finement les fluctuations de température du fond diffus.

Beaucoup de bruit dans le multivers

La cosmologie mène inévitablement à des considérations ayant des échos philosophiques et même théologiques. La théorie cosmologique se confronte en effet à la question de l'existence des hommes dans cet univers particulier, et de leur rôle en tant qu'observateurs. Après tout, si nous n'existions pas, qui s'en soucierait ? Les modèles physiques de l'Univers ont suffisamment de points faibles pour que ces questions philosophiques et métaphysiques s'y insinuent.

Pendant des siècles, la réponse traditionnelle à la question de l'existence humaine a été que nous ne sommes pas un accident dans l'Univers. Au cours des dernières décennies, on a appelé cela le principe anthropique, et cette idée plaît bien sûr beaucoup aux théologiens. L'approche anthropique s'est aussi révélée fascinante, sinon toujours convaincante, pour les philosophes. Pour les cosmologistes, cependant, c'est une idée troublante et délicate à manier.

En science, on doit s'en tenir aux données. On tente d'expliquer les origines physiques des choses selon des lois et des principes. Évidemment, on espère expliquer par les lois physiques et la théorie ce qui autrement relèverait d'« accidents » ou de coïncidences. Par exemple, l'apparition de l'homme sur une planète 14 milliards d'années après le Big Bang. Les galaxies, les étoiles et les planètes n'avaient aucune nécessité d'exister, et pourtant elles sont là, et ce sont elles qui ont rendu notre propre existence possible.

Le projet scientifique d'expliquer notre existence a déjà une longue histoire. De siècle en siècle on est passé d'un univers

géocentrique, révéral par les Grecs, à un univers héliocentrique, promu par Nicolas Copernic. Pour des raisons évidentes, on appelle principe copernicien cette idée que nous ne sommes pas au centre de l'Univers. Jusqu'à l'époque d'Einstein, la Voie lactée était supposée être l'Univers entier. Les mesures pionnières, par Hubble, des distances dans l'Univers bousculèrent cette conception étroite. Il devint évident que notre Voie lactée était une galaxie comme les autres. Ni grande ni petite, tout simplement de taille moyenne. Au niveau de l'Univers entier, le statut « normal » de notre environnement cosmique a été nommé principe de médiocrité. Notre vision changeante de la Voie lactée montre bien comment on en est arrivé à cette notion de notre normalité.

Normale ou pas, les cosmologistes s'interrogent toujours sur notre existence. Mais il faut pour cela définir plus précisément ce qu'est la normalité. Sinon, on pourrait proposer n'importe quelle sorte d'univers bizarre et tomber dans le domaine de la science-fiction. La meilleure façon de commencer est de garder les pieds sur terre et de s'interroger sur notre existence physique en relation avec les lois de la physique.

Qu'est-ce qui est normal ?

La plus petite personne au monde, un Indien nommé Gull Mohammed, mesurait 56 centimètres. Le géant le plus grand, l'Américain Robert Wallow, mesurait 2,72 mètres. La taille moyenne de la population mondiale est de 1,64 mètre. Mais la distribution des tailles humaines n'occupe qu'une petite partie de ce spectre. Pourquoi ? Où sont les Géants de la mythologie ? Et où sont les Lilliputiens ?

Nous connaissons la réponse : c'est la gravité qui rend la vie impossible au-delà d'une certaine taille, car nos os deviennent trop fragiles et cassent sous le poids du corps qu'ils ont à supporter. Quant aux nains, ils préfèrent se marier entre eux. Du point de vue de la brutale compétition pour la survie sur

cette planète, ils sont de fait destinés à l'extinction de par la taille de leur corps. C'est donc l'évolution, couplée à la gravité, qui rétrécit le spectre de la distribution de taille. Inutile d'en appeler au principe anthropique ou à l'intervention divine pour réconcilier l'observation et la théorie. La biologie et la physique suffisent. Mais nous ne parlons que de notre existence sur la Terre, qui est une poussière perdue dans le cosmos. La gravité et la biologie ne suffisent plus pour expliquer notre existence en relation avec l'Univers entier.

Quand les cosmologistes s'en remettent au principe anthropique pour expliquer notre existence, la plupart en utilisent une version faible, une petite minorité employant la version forte. La version faible est par exemple celle du cosmologiste Alex Vilenkin. Il avance que l'Univers est comme il est car nous sommes là pour l'observer. C'est une tautologie, un argument circulaire, mais cela peut avoir des vertus explicatives.

Vilenkin est un cosmologiste ukrainien qui vivait à Kharkov à l'époque soviétique. Inscrit sur la liste noire du KGB après ses études de physique, il dut se contenter de jobs subalternes, comme gardien de zoo. Terrible époque où l'on constatait la disparition des cygnes du zoo : la faim rôdait. Mais le poste ne dura qu'un mois, et Vilenkin fut renvoyé pour « surqualification ». Il émigra aux États-Unis en 1976 ; il dirige aujourd'hui l'Institut de cosmologie de l'Université Tufts à Medford, Massachusetts.

L'approche anthropique assume l'existence d'un soi-disant « multivers », dans lequel existent de nombreux univers incapables d'accueillir la vie. Il y aurait aussi d'autres univers plus habitables, que nous ne pouvons voir dans nos télescopes.

Les dernières théories de gravité quantique estiment à 10^{500} le nombre de ces univers possibles, tous différents puisque dans chacun, les constantes fondamentales de la nature varient.

D'un côté, vu le nombre effarant d'univers alternatifs dans le multivers, l'existence de notre propre univers devient

excessivement improbable. Et pourtant, il existe bien. Selon le principe anthropique faible, notre existence a tout simplement sélectionné le bon univers. Après tout, on ne peut qu'observer un univers d'une certaine taille, et assez vieux pour que des étoiles et des planètes s'y soient développées. Mais s'agit-il là de physique, ou de métaphysique ? Robert Dicke, cosmologiste de Princeton, a été jusqu'à dire qu'à cause du fait que nous existons, l'âge de l'Univers doit être assez grand pour que les étoiles aient eu le temps de synthétiser le carbone, base de la biologie. L'étape suivante, en toute logique, consiste à prétendre que les constantes fondamentales de la nature ont été ajustées de façon à permettre notre existence.

Une autre approche du principe anthropique faible, préférée par nombre de mes collègues, s'en tient au petit groupe des « univers-poches » du multivers, au sein desquels les galaxies peuvent se former et la vie se développer. À l'intérieur de ces univers-poches finis, la probabilité devient plus grande de trouver une valeur faible, mais non nulle, pour l'énergie sombre.

Le principe anthropique fort affirme que la vie intelligente est inévitable quelque part dans l'Univers. Mais l'argument est fragilisé par la possibilité que l'Univers ait un âge infini (ce qui se produirait s'il était soumis à une suite de contractions et d'expansions). Avec le temps, tout peut se produire dans un univers qui ne cesse de se renouveler sous l'effet d'une inflation éternelle.

Dans tous les arguments anthropiques, on tente de trouver un lien entre l'existence humaine et les constantes fondamentales de la nature. Certains cosmologistes éliminent la question en disant que le principe anthropique n'est pas scientifique. De fait, il n'y a aucun moyen de tester un univers qui serait différent du nôtre, et une hypothèse non testable n'est pas scientifique.

Il y a au moins trois hypothèses rivales pour expliquer les valeurs des constantes fondamentales. La première avance

qu'elles ont été déterminées par un Grand Architecte ; c'est la théorie de l'Intelligent Design, « dessein intelligent » qui réduit le problème à une question de croyance personnelle, échappant ainsi à la cosmologie.

La deuxième hypothèse fait appel à une physique mal connue. Par exemple, on a vu que la distribution de taille des êtres humains peut être expliquée par des lois connues. Peut-être ne connaissons-nous pas encore les lois du multivers, peut-être faut-il un temps infini pour peupler tous ces paysages. Si l'on descend la pente douce qui mène vers le faux vide d'Alex Vilenkin, nous n'avons aucune raison d'évoquer une quelconque probabilité d'apparition de notre Univers. Initialement, l'Univers était dans un état hautement symétrique, et c'est l'inflation qui a généré son état asymétrique actuel. Il en résulte qu'il faudrait un temps si long pour que le vide produise un univers particulier que cela ne se produirait qu'une fois. Il n'y aurait donc pas lieu de parler de probabilité.

La troisième hypothèse, selon moi la plus raisonnable, consiste à dire qu'il n'y a pas eu de sélection du tout. Nous sommes là parce que nous sommes là. Cela doit nécessairement se produire dans un multivers infini. Certaines versions de la théorie de gravité quantique évoquent la complexité des conditions initiales indispensables pour que le multivers présente une infinité de paysages et d'univers différents. Si c'était le cas, le jeu – et le mystère – est terminé. Les dés ont roulé, montrant que notre Univers était inévitable, quelque part dans le multivers. Et nous sommes là. Sommes-nous uniques ? C'est là une autre histoire, mais un multivers infini devrait donner un nombre infini d'univers comme le nôtre, de même qu'un univers infini donne une infinité d'étoiles, de planètes et de Terres.

Étrangement, il se trouve qu'on peut tester cette hypothèse. Des expériences à venir vont mesurer la courbure de l'espace avec une précision extrême. Si une courbure était décelable, si l'Univers n'était pas aussi plat que le serait un univers en

expansion perpétuelle, on en arriverait à une conclusion sans précédent dans l'histoire humaine. Un univers légèrement fermé impliquerait la finitude de l'espace ; légèrement ouvert, il impliquerait un espace infini, au moins du point de vue des cosmologies les plus classiques. Et si c'était le cas, il deviendrait inutile de parler de principe anthropique. Ce serait redondant.

L'inflation peut se répliquer. Elle peut se produire encore et encore. La théorie quantique nous dit que les événements les plus improbables peuvent se produire si l'on attend assez longtemps. De même, si l'Univers est assez grand, des événements improbables se produiront nécessairement quelque part. Dans un Univers assez grand, l'inflation peut donc se déclencher n'importe où et n'importe quand. C'est l'inflation éternelle. Elle impliquerait non seulement que nous ne nous trouvons pas dans un lieu particulier, mais aussi que notre Univers n'a rien de spécial. C'est la version ultime du principe copernicien.

Vous vous demandez peut-être si l'inflation éternelle a des conséquences. Un des grands paradoxes de la cosmologie est que l'Univers est dominé par l'énergie sombre. Tout ce que l'on sait, c'est que l'expansion de l'Univers s'accélère, et que l'énergie sombre en est responsable. (Rappelez-vous : c'est Einstein qui en eut l'idée le premier, pour empêcher l'effondrement de son Univers, avant que l'expansion ne soit découverte.) Mais il se trouve que l'énergie sombre est très faible. La gravité quantique, appliquée à la cosmologie, affirme que l'existence d'une force aussi faible est hautement improbable.

Une solution est qu'il existe quantité d'univers produits par des théories comme l'inflation éternelle, avec toutes les valeurs possibles de l'énergie sombre. Le nôtre est seulement celui dans lequel des galaxies et des étoiles ont pu se former. Si l'énergie sombre était plus grande, les étoiles n'auraient pu se former. La gravité attractive aurait été négligeable devant la

répulsion. Les autres univers étaient trop chauds ou trop froids, trop denses ou trop raréfiés.

La physique théorique est aux prises avec l'idée de multivers. Cet ensemble d'une infinité d'univers incluant le nôtre est un concept étrange. Est-il seulement du ressort de la physique de postuler la coexistence d'une multitude d'univers sans communication les uns avec les autres ?

Quel multivers ?

Il y a plusieurs théories de l'origine du multivers. Hélas, dans l'état de nos connaissances, aucune n'est plus convaincante que celle, souvent citée, évoquée par cette dame qui, lors d'une conférence sur la nature de l'Univers donnée par le philosophe américain William James, objecta que la Voie lactée était posée sur le dos d'une tortue géante, ce qui est en fait un très vieux mythe hindou. « Et sur quoi cette tortue est-elle posée ? », demanda le conférencier. « Mais il y a des tortues jusqu'en bas ! », répliqua la dame.

Plus sérieusement, nous sommes face à plusieurs possibilités. L'une est que l'Univers, notre Univers, est unique, et que nous n'avons pas encore trouvé la théorie pour en rendre compte. Une autre est qu'il y a un multivers, au sein duquel on trouve quantité d'univers qui coexistent sans communiquer. Il y a une infinité de choix possibles, mais presque tous sont en contradiction avec l'évolution du vivant : trop chauds, trop froids, trop hétérogènes, trop lisses, trop jeunes, trop vieux, etc. C'est ce que Paul Davies, physicien à l'Université d'Arizona et vulgarisateur, appelle l'énigme de Boucle d'or (on se souvient du conte de Boucle d'or et les trois ours : la soupe de papa ours est trop chaude, celle de maman ours trop froide, celle de bébé ours juste comme il faut...) : un seul Univers, juste comme il faut, est sélectionné par notre présence en tant qu'observateurs. Le philosophe Neil Manson estime que ces théories de multivers sont le dernier

recours des athées désespérés. Plus prosaïquement, la physique qui les sous-tend est incomplète : on ignore totalement si la multitude de paysages des multivers est peuplée par des univers-poches.

L'existence d'un univers *bio-friendly* est un événement si improbable qu'il semble réclamer une explication. Une solution consiste à faire appel à une autorité supérieure, un *intelligent design*, pour expliquer notre présence. Mais cela pose la question du Designer (qui l'a conçu ? et pourquoi ?). En outre, cela ne distingue pas le monothéisme du Valhalla fourmillant de dieux des mythologies nordiques. Cette solution est donc la parfaite douche froide pour interrompre les conversations entre scientifiques, mais il y a d'autres choix. Peut-être l'Univers est-il une grande entité gaïenne (Gaïa était la déesse grecque de la Nature), consciente de ses propres buts. Peut-être encore vivons-nous dans une simulation informatique du genre *Matrix*. Si c'était le cas, Hollywood serait plus près de la vérité que nos plus brillants théoriciens des supercordes (dont la théorie échoue à expliquer la gravité quantique). Et cela ne surprendrait personne.

Sommes-nous uniques ?

Alors, que nous disent les biologistes ? Le nombre de permutations possibles de l'ADN, composant crucial des protéines, peut s'estimer en prenant le nombre d'acides aminés et en les arrangeant en protéines, qui sont des chaînes de quelque 1 000 acides aminés. Il y a 20 acides aminés différents. Le nombre de permutations est donc de 4 à la puissance 1 000. Si une seule de ces structures mène à la vie, alors la vie est hautement improbable si l'Univers est fini.

Les ingrédients du vivant

Si l'Univers était infini, la vie serait inévitable. Elle se produirait tout le temps. Mais supposons qu'il y ait plusieurs univers. Combien ? Le nombre minimal nécessaire pour qu'un ribosome apparaisse par hasard est d'environ 10^{600} . Ce nombre est extraordinairement grand. La vie telle que nous la connaissons serait dès lors totalement improbable.

Étrangement, la théorie des cordes prédit l'existence d'un nombre aussi gigantesque d'univers, et ce même nombre apparaît aussi quand on dénombre les différents états du vide. Car la physique quantique permet de compter le nombre d'états du vide, chacun correspondant à un univers qui aurait pu exister. Tous pourraient abriter une vie intelligente, mais il suffit d'un seul. La théorie des cordes prédit qu'il y a 10^{500} à 10^{1000} univers différents. Existents-ils vraiment ? La réponse est oui si l'on veut comprendre pourquoi la densité du vide dans notre Univers est si faible.

Ce n'est que dans un sous-ensemble de ces univers que la physique pourrait permettre des conditions favorables à

l'apparition de l'ADN. Ces univers offrent des environnements acceptables et il pourrait y en avoir beaucoup. Les probabilités permettent à la physique et à la chimie de résoudre le dilemme de la vie. L'origine de la vie est rare mais pas exceptionnellement rare. Il est vrai que 10^{600} est un nombre gigantesque, mais c'est 10^{400} fois moins que 10^{1000} . Cela nous donne donc 10^{400} essais possibles, ce qui devrait suffire à créer de nombreux univers abritant la vie. Nous ne sommes pas seuls dans le « métavers ».

Que se passerait-il si les physiciens ajustaient leur pari et estimaient à 10^{500} le nombre d'univers possibles ? La vie apparaîtrait-elle ? Le sous-ensemble mentionné ci-dessus serait peut-être ridiculement petit, voire négligeable, auquel cas il faudrait chercher de l'aide au-delà des lois de la physique. Heureusement, les probabilités d'apparition de l'ADN sont aussi très extensibles. Si l'on prend une protéine faite de 500 acides aminés et non pas 1 000, on trouve encore un très grand nombre de permutations, de l'ordre de 10^{300} , ce qui est un grand nombre, mais beaucoup plus petit que le nombre d'univers.

L'ADN ne se trouve que dans une toute petite partie de tous les univers. Y en aura-t-il assez ? Il y aura des milliards de milliards d'univers avec des possibilités de vie. Avec disons 10^{200} ou 10^{400} univers, les probabilités sont assez favorables pour garantir l'apparition de quelques univers abritant la vie.

Il reste cependant un gros problème. Nous avons réduit les probabilités, mais 10^{200} est encore un très grand nombre d'univers. Cela dit, presque tous ces candidats potentiels sont soit trop vieux, trop jeunes, trop chaotiques ou, plus fréquemment, n'ont pas le nombre de dimensions requis pour ressembler à notre Univers. Tous pourraient abriter une forme de vie. L'existence de notre Univers particulier résulte donc d'un jet de dés, de même que les distances des planètes au Soleil sont aléatoires.

Sommes-nous dans un lieu particulier ?

Johannes Kepler pensait tout autrement. Au début du XVII^e siècle, il supposa que les cinq planètes connues correspondaient aux cinq polyèdres réguliers, ou solides platoniciens, dont l'emboîtement donnait les distances au Soleil, ce qui était une explication parfaitement farfelue. Cependant, même quand il découvrit les lois du mouvement des planètes, reprises plus tard et formalisées par Newton, il ne renia jamais son idée mystico-platonicienne.

La théorie de la gravitation de Newton rend compte des mouvements des planètes, mais pas de leurs distances au Soleil. En fait, même avec les lois de Newton, de nombreuses configurations planétaires sont possibles. Nous vivons dans l'une d'elles et nous ne pouvons calculer sa probabilité : nous sommes là, tout simplement ; c'est la configuration sur laquelle sont tombés les dés lors de la formation du Système solaire.

Ce point de vue contraste avec celui du principe anthropique, qui prétend que notre présence en tant qu'observateurs sélectionne notre Univers parmi tous les autres. Cela est redondant si la vie est aussi ubiquitaire que le suggère notre raisonnement sur le ribosome. Le fait qu'il puisse y avoir de la vie, éventuellement différente de la nôtre, dans de nombreux autres univers implique que la sélection par le choix du vivant ne peut pas être toute la réponse. En fait, beaucoup de physiciens pensent que le raisonnement anthropique ne donne aucune réponse en l'absence d'une théorie sous-jacente.

La question est de savoir ce que nous savons et ne savons pas. La théorie des cordes est arrivée après les premiers calculs indiquant de très faibles probabilités pour la vie. Elle a changé notre perspective en donnant un nouvel algorithme pour compter les environnements. Ce nouveau savoir s'oppose aux arguments du dessein intelligent. Un autre exemple a été le

rejet initial, à la fin du XIX^e siècle, de la cosmologie comme science capable de parler des origines de l'Univers, quand il est apparu que l'âge de la Terre était plus long que celui déduit de l'âge du Soleil. À cette époque, de grands physiciens comme Lord Kelvin pensaient que la source d'énergie du Soleil était la gravité, capable de jouer ce rôle pendant un million d'années tout au plus. L'idée d'un Soleil alimenté par une réaction thermonucléaire durable n'allait s'affirmer qu'un demi-siècle plus tard, et conduire à réviser à la hausse l'âge du Soleil. Ce fut en grande partie l'œuvre de Sir Arthur Eddington, de Cambridge, qui trouva un âge de 5 milliards d'années, supérieur aux 4,6 milliards de la Terre.

Plus important encore est l'intuition d'Eddington selon laquelle les étoiles doivent exister. Son raisonnement, qui précède la notion d'étoile-réaction thermonucléaire avancée par l'astronome américain Hans Bethe, est une superbe application des lois de la physique.

Imaginons un physicien vivant sur une planète couverte de nuages en permanence, et qui n'a donc jamais entendu parler des étoiles. Supposons que pour une série de globes gazeux 1, 2, 3... de tailles croissantes, pesant : 10g, 10²g, 10³g, etc., il calcule le rapport de la pression de rayonnement à la pression du gaz. Cette lutte entre l'éther (le rayonnement) et la matière (le confinement par la masse du gaz) n'est jamais en équilibre, sauf pour les sphères 33, 34 et 35, pour lesquelles on peut donc s'attendre à ce qu'il se passe quelque chose d'intéressant. Ce qui se passe s'appelle une étoile. Et si soudain disparaissent les nuages qui empêchaient le physicien de voir le ciel, il verra un milliard de globes gazeux de masses comprises entre 10³³ et 10³⁵g, c'est-à-dire entre 0,5 et 50 masses solaires.

Ainsi, l'Univers doit contenir des étoiles. Pourquoi pas des planètes ? Et pourquoi pas la vie ? Pour cela, il faut que l'Univers soit assez vieux et assez grand. Et c'est là que le multivers nous offre une solution, à moins que la physique, ayant trouvé un nouvel Einstein, ne montre que l'Univers doit être grand et très vieux.

De nouvelles découvertes en physique sont inévitables. Elles supplanteront sans doute la théorie des cordes, qui n'offre aucune prédiction vérifiable ni amorce de preuve. Il serait bien préférable que la physique sélectionne l'Univers qui est le nôtre. Malheureusement, on ne sait pas comment faire, mais une voie possible se dessine.

Par exemple, nous ne pourrions pas exister dans un univers qui ne prendrait pas en compte le modèle standard de la physique des particules, modèle dont découlent les protons, neutrons et électrons sans lesquels la matière ordinaire n'existerait pas.

Il apparaît que l'on peut trier les 10^{500} univers de la théorie des cordes grâce à un nombre mathématique qui décrit la topologie de l'Univers. Ce nombre compte les trous de l'espace. Très peu d'univers, dans la théorie des cordes, ont un faible nombre de trous ; ce sont les topologies les plus simples. Et certains assurent que les lois de la physique préfèrent la description la plus simple de la réalité.

Ces arguments négligent les lois de l'évolution darwinienne. Le processus de développement des protéines n'est pas aléatoire, mais optimisé par la survie des molécules les mieux adaptées à l'environnement. Comme l'a écrit le prix Nobel de chimie George Wald :

Le message génétique est sans cesse brouillé par les mutations, mais la sélection rétablit les séquences optimales... Tout code génétique moléculaire doit continuellement produire ces variations aléatoires qu'exige la sélection. Dans les organismes vivants, l'ordre n'est pas introduit d'emblée, selon un plan préconçu, mais après coup
– après les mutations aléatoires – par un processus de correction. Nous sommes les résultats d'un bricolage plus que d'une création.

Au fond, nous n'avons peut-être pas besoin de multivers. Cependant, si passer des protéines à la vie est envisageable dans un espace fini, cela ne résout pas le délicat problème de la conscience.

L'hypothèse Dieu

Une chose aussi complexe que la conscience peut-elle résulter d'arguments réductionnistes ? L'esprit est-il davantage qu'un programme informatique sophistiqué ? Si ce n'est pas le cas, on peut avancer l'hypothèse d'une intervention extraterrestre ou, plus localement, d'un Grand Architecte comme Dieu. Comment comparer scientifiquement ces hypothèses ? Pour l'instant, laissons de côté les facteurs personnels comme la foi. La vraie question est de savoir si la vie est davantage que de la science.

On peut comparer ces hypothèses rivales d'après les nombres de paramètres qu'elles impliquent. Cela marche en théologie : les mythologies grecque et hindoue sont moins économes en dieux que les monothéismes, qui les ont supplantées. Et cela marche en science : notre compréhension des sciences de la nature a évolué vers davantage de simplicité, de Ptolémée à Copernic, d'Aristote à Galilée et Newton, puis de Newton à Einstein.

Essayons de tester l'hypothèse Dieu en comparant son efficacité avec, disons, la théorie des cordes. Après tout, elles se veulent toutes deux des explications de l'origine de l'Univers. La théorie des cordes fait la prédiction précise qu'il y a 10^{500} univers différents. Il peut y en avoir bien plus dans les scénarios d'inflation éternelle, mais les univers supplémentaires ne sont que des copies. La théorie quantique limite le nombre d'univers différents.

Dans l'hypothèse Dieu, les prédictions sont plus opaques et les considérations plus subjectives que dans les sciences physiques. Mais les théologiens partagent la conclusion quasi universelle que Dieu a un nombre d'attributs infini. La plus

économiste des deux théories serait donc sans aucun doute la théorie des cordes.

Pour les croyants et les incroyants

On me demande souvent si la croyance au Big Bang est compatible avec la croyance en Dieu. Qu'est-ce que la Bible, au-delà des six jours de la Création, a à nous apprendre sur le sujet ?

Le pape François a déclaré en 2014 à l'Académie pontificale des sciences :

La théorie du Big Bang, qui est aujourd'hui proposée pour expliquer l'origine du monde, n'est pas en contradiction avec l'intervention d'un Créateur divin, mais elle en dépend. De même, l'évolution des espèces n'est pas en conflit avec la notion de Création, car l'évolution présuppose la création préalable des êtres vivants.

Cette position n'est pas nouvelle. En 1951, Pie XII était au courant de la théorie du Big Bang et affirmait que cela ne faisait que renforcer sa foi. Il fut certainement influencé par un de ses conseillers scientifiques, le cardinal Georges Lemaître, codécouvreur de l'expansion de l'Univers. Sa conclusion fut : « La Création a eu lieu dans le temps. Il y a donc eu un Créateur. Par conséquent, Dieu existe ! »

Remontons plus loin, jusqu'à Thomas d'Aquin, théologien du XIII^e siècle qui voyait dans l'évolution (telle qu'on la concevait à l'époque) une preuve de l'existence de Dieu, et jusqu'à saint Augustin (V^e siècle), qui pensait que l'espace, la matière et le temps avaient été créés en même temps. La théorie des cordes ne dit pas autre chose.

La plupart des scientifiques n'ont pas la foi et l'on trouve parmi eux de nombreux avocats de l'athéisme : Bertrand Russell, Francis Crick ou Stephen Hawking. Mais des non-

scientifiques leur emboîtent le pas, tel le critique littéraire américain Carl Van Doren en 1928 :

La croyance a mené les peuples anciens, par ignorance, à peupler les forêts de satyres et les mers de monstres. Les plus pessimistes ont inventé les sorcières et les diables, les plus optimistes les anges et les dieux. Tous se sont refusés à laisser la maison vide, l'encombrant avec les meubles de la croyance. Certains mythes et légendes sont très beaux, chacun le reconnaît, mais ils ne sont en aucun cas indiscutables. Les goûts des non-croyants sont peut-être plus austères, mais ils sont aussi plus modestes et ne s'en remettent pas à une divine providence par peur des dangers du hasard. Leur seul guide est la connaissance.

Il est assez rare de trouver des scientifiques s'en remettant à la foi et à la révélation dans l'exercice de leur recherche et, s'ils le font, ils ne le clament pas *urbi et orbi*. Cela laisse le champ libre aux athées militants, comme le biologiste anglais Richard Dawkins, mais ce n'est pas la meilleure façon d'initier le dialogue. La réaction du grand public est donc très bipolaire, oscillant entre des extrêmes assez néfastes, surtout quand ils touchent à l'éducation.

Quelle que soit la religion, la notion de Big Bang et d'évolution de l'Univers reste un grand défi. Il y a cependant des raisons d'espérer : dans un monde de plus en plus éduqué, on ira nécessairement des ténèbres de la superstition aux lumières de la science. Mais il faudra des siècles pour y parvenir... si l'humanité triomphe de ses vieux démons.

L'Agent volontaire de Newton

Revenons en arrière dans le temps. L'idée que les étoiles sont inévitables ne vient pas d'Eddington. C'est Isaac Newton qui, dans une lettre non publiée au théologien Richard Bentley en 1692, avançait que la formation des étoiles et des planètes impliquait un Univers de grande taille. Il pensait qu'une distribution de matière homogène pouvait se fragmenter et donner les astres que nous voyons :

Si la matière était également distribuée dans un espace infini, elle ne se rassemblerait pas en une masse unique, mais en plusieurs masses séparées, à grande distance l'une de l'autre dans cet espace infini. Ainsi ont pu se former le Soleil et les étoiles fixes, qui sont faits de matière lumineuse.

Newton était plus incertain sur les planètes, dont la matière n'est pas lumineuse. Incapable d'expliquer comment sa théorie de l'instabilité gravitationnelle pourrait à la fois donner naissance aux étoiles et aux planètes, il abandonna, s'en remettant à une autorité supérieure :

Si le Soleil était un corps opaque comme les planètes, ou les planètes des corps lumineux comme le Soleil, pourquoi lui seul deviendrait lumineux quand les autres resteraient opaques, ou les autres deviendraient opaques quand lui serait inchangé ? Cela n'étant pas explicable par des causes naturelles, je suis contraint de l'attribuer à l'art et à la sagesse d'un Agent volontaire.

Il fallut attendre deux siècles pour que James Jeans, astronome et vulgarisateur anglais, contredise en 1902 la conclusion « divine » de Newton. Son raisonnement était que, dans un astre, la force de gravitation s'oppose à la pression due à la chaleur. À grande échelle, la gravité gagne à tout coup ; à petite échelle, c'est la pression qui gagne. Cela permet de déterminer une « longueur de Jeans », taille à partir de laquelle une masse doit se fragmenter :

Nous avons prouvé ce que Newton avait conjecturé. [...] Tous les corps célestes sont générés par un processus de fragmentation des nébuleuses à partir du chaos, des étoiles à partir des nébuleuses, des planètes à partir des étoiles, et des satellites à partir des planètes. Si l'on examine sa création, il apparaît à l'évidence que le Grand Architecte de l'Univers est mathématicien.

*La vie est-elle davantage
que de l'efficacité ?*

Un appartement énergétiquement très efficace peut être très laid. Du point de vue de l'agrément de vie, l'efficacité n'est pas le seul critère. Au lieu d'une commode Louis XV dans mon salon et d'un Picasso sur mon mur, j'aurais une table moderne et une photo sans intérêt. Ma chambre ressemblerait à une chambre d'hôtel. L'efficacité ne s'embarrasse pas de la qualité de la vie.

Tentons de quantifier la différence. Le point crucial est la finitude. Je n'ai pas besoin de ressources infinies pour acquérir les raffinements de la vie. Une grosse somme d'argent suffit. Et puis la qualité de la vie existe à tous les niveaux de revenus ; une efficacité limitée, finie, doit donc suffire.

Mais il peut y avoir autre chose dans la qualité de la vie que ce qu'offre une galerie d'art, ou ce qui peut être réduit à quelques informations, disons à une série de nombres. Nous devons prendre en compte la conscience. Car ce que je considère comme améliorant la qualité de ma vie dépend de ma conscience, laquelle à son tour dépend de mon éducation et de mon environnement, c'est-à-dire de mon insertion dans la société.

Imaginez l'ordinateur superpuissant de demain. Pourrait-il développer une conscience semblable à la mienne ? On pourrait certes l'entraîner à simuler la conscience, mais pourrait-on alors distinguer l'homme de l'ordinateur ? Sinon, on ne pourrait non plus distinguer la vie de la physique ou des mathématiques.

L'Univers lui-même pourrait-il être une illusion, un produit des mathématiques ? Les ordinateurs du futur seront assez puissants pour recréer la totalité de l'Univers observable. Après tout, un univers n'est qu'un ensemble fini de données. Et cet Univers virtuel serait impossible à distinguer du nôtre.

Il y a une autre petite différence. L'inflation permet que, même si le nombre d'Univers est limité, beaucoup d'entre eux puissent être spatialement infinis. C'est une autre façon d'augmenter les chances de trouver quelque chose

d'intéressant. Mais la plupart de ces univers sont probablement inhabitables.

Il est une autre solution qui me plaît bien. Supposons que l'Univers soit infini. On ne peut rien dire dans ce cas-là puisqu'il est logiquement impossible de calculer la probabilité d'apparition de la vie dans un tel univers. Les événements les plus improbables finissant toujours par s'y produire, nous voilà dans notre univers de poche *bio-friendly*. Et le plus important pour un physicien est que cette solution apparemment métaphysique d'un Univers infini soit testable expérimentalement, au moins en principe. De tels tests impliquent l'étude des propriétés du fond diffus à très grande ouverture angulaire, et l'amélioration des mesures de la courbure de l'Univers.

Pourquoi les cosmologistes ne peuvent pas dormir la nuit

On sait que la Terre n'est pas plate car personne n'est jamais tombé du bord. La rotondité de la planète limite sa taille, imposant une frontière qui ne peut être franchie. On peut prendre une approche similaire avec le multivers, afin d'expliquer beaucoup des soi-disant coïncidences de la nature. Au-delà de certaines frontières naturelles, des changements radicaux se produisent. Beaucoup de ces changements pourraient être catastrophiques pour l'existence humaine en l'empêchant d'advenir, et ce sont ces changements auxquels s'intéresse cette approche. Les lois de la probabilité nous poussent vers le plus grand espace imaginable. Par exemple, nous devons comprendre pourquoi la masse du proton est un petit peu supérieure à celle du neutron. Cette différence de masse coïncide avec l'échelle de la théorie de l'interaction électrofaible. Si elle était un peu différente, les étoiles ne se seraient pas formées. C'est donc bien d'une frontière cruciale qu'il s'agit.

Poussons plus loin encore les lois de la probabilité, qui nous disent ce qui est possible et ce qui ne l'est pas. Les cosmologistes qui trouvent une frontière séparant différents domaines de valeurs des constantes fondamentales peuvent prétendre qu'une logique similaire sépare les univers. Au moins l'un d'eux contient des galaxies. Selon la vision habituelle, les galaxies se forment à partir de petites fluctuations qui s'amplifient par croissance gravitationnelle. Si la constante cosmologique est trop grande, cette croissance n'a plus lieu et les galaxies ne se forment pas. C'est du tout ou rien. Dans ces galaxies se trouvent des observateurs. La

catastrophe possible qu'il n'y ait ni étoiles ni galaxies, ajoutée à la pression du multivers, nous isole dans un coin du multivers où les conditions, comme dirait Boucle d'or, sont juste les bonnes. L'avantage de cette approche catastrophique, c'est qu'elle établit une frontière dans le superspace. Le nouveau problème avec cette vision, soulevé par Lawrence Hall de l'Université de Californie à Berkeley, est que la combinaison de la pression du multivers et des frontières catastrophiques peut expliquer nombre des réglages fins trouvés dans la nature.

Sommes-nous typiques ou exceptionnels ?

Voici une autre façon de résoudre le dilemme de Boucle d'or. Peut-être ne sommes-nous pas du tout des observateurs typiques dans notre Univers. La théorie quantique implique que nous soyons quelque part, ici par exemple, avec une forte probabilité. Mais le principe copernicien, selon lequel la Terre n'est pas au centre de l'Univers, revient pour se venger : notre existence même pourrait être un événement peu probable. Selon les physiciens américains James Hartle et Mark Srednicki :

Il est parfaitement possible (et pas nécessairement improbable) que nous vivions dans un univers dont nous ne serions pas des créatures typiques... Les modèles cosmologiques qui prédisent qu'au moins une copie de nos données existe (de façon certaine) quelque part dans l'espace-temps sont impossibles à distinguer l'un de l'autre, quel que soit le nombre d'autres copies exactes de ces données.

Cela a de remarquables implications. Les expériences de cosmologie pourraient devenir sans objet s'il n'y a pas de correspondance logique entre nous et l'aspect de l'Univers. Le cosmologiste canadien Don Page conclut que « les observations ne permettraient plus de discriminer entre les

théories, et [que] la cosmologie cesserait d'être une science observationnelle ».

Il y a une autre interprétation de la conjecture de Hartle-Srednicki. On ne pourrait plus utiliser les probabilités pour distinguer les univers. Quelle importance que notre Univers soit un parmi 10^{500} si l'on ne peut pas dire s'il était probable ou pas ? Il devait se produire, et c'est peut-être le nôtre qui s'est produit. Ce genre de raisonnement rejette toute application naïve du principe anthropique, qui tente d'expliquer notre place particulière dans l'Univers.

Le rôle de l'observateur anthropique peut aussi être mis en question plus radicalement. Peut-être n'y a-t-il pas d'observateurs du tout. Il se peut que la totalité des quelque 10^{500} vides qui peuplent le paysage, à part une petite poignée, soient dépourvus d'observateurs. La physique n'est d'aucune utilité puisque la théorie quantique implique la présence d'un observateur pour que le réel se manifeste. Ayez pitié du chat de Schrödinger, enrôlé dans l'expérience de pensée du physicien allemand Erwin Schrödinger. Ce chat est enfermé dans une boîte, et condamné à être à la fois mort et vivant, dans une existence virtuelle et duale, jusqu'à ce que quelqu'un ouvre la boîte, et observe ce qui s'y passe. Cela mène à l'un des plus célèbres paradoxes de la théorie quantique. Dans la boîte, une fiole de poison est cassée par une désintégration radioactive, phénomène probabiliste. Soit la désintégration se produit, soit elle ne se produit pas. Mais une fois que la boîte est ouverte, il n'y a plus aucune incertitude : le chat est soit mort, soit vivant. Les physiciens tentent d'expliquer cela en imaginant qu'il y a deux chats potentiels, l'un mort et l'autre vivant, et qu'un seul des deux se matérialise quand on ouvre la boîte.

C'est l'observateur qui nous met dans l'embarras. Enlevez-le, et l'état du chat n'a plus d'intérêt. Et il en va de même de tous nos univers superfétatoires. Supprimez leurs observateurs : en termes de physique, le champ descendant la pente de potentiel, qui change le vide en univers, roule si

lentement qu'il arrive tout juste à destination. Seuls les univers à très longue durée de vie seraient alors habités. L'un d'eux serait le nôtre, assez confortable pour être peuplé d'étoiles. Si un seul univers, le nôtre, parvenait à cet état, il serait plus facile d'expliquer notre existence. Aucun univers ne serait plus vieux que lui, et l'on éviterait ainsi le paradoxe dit de la jeunesse : pourquoi sommes-nous si jeunes alors qu'un nombre infini d'univers sont beaucoup plus vieux ?

Bien sûr, il y a d'autres alternatives, comme des univers ayant d'autres valeurs des constantes fondamentales. Ces univers ne produiraient même pas d'étoiles, mais au moins, ils seraient moins nombreux ! Et l'on peut espérer que la physique, un jour, donnera les valeurs des constantes fondamentales. Nous sommes en bonne compagnie ; c'est ce que pensait Eddington. Il a calculé la constante de structure fine avec plusieurs décimales, à partir des principes de base. Mais il se trouve qu'il n'obtient pas la bonne réponse.

Le grand défi

C'est l'énergie sombre qui empêche les cosmologistes de dormir. Pourquoi sa densité est-elle si faible alors que toutes les conjectures en physique des particules la calculent supérieure d'un facteur 10^{120} ? Et pourquoi ne fait-elle que commencer, *via* l'accélération, à dominer l'expansion de l'Univers ? Les physiciens détestent l'idée d'un réglage fin, ce qui est leur façon à eux de parler d'un événement extraordinairement improbable. C'est pourquoi ils en sont venus à ces spéculations sur le multivers. Ces relents de métaphysique et de science sont impossibles à vérifier, faute de progrès dignes de la science-fiction dans la technologie des voyages dans le temps. Ils sont même probablement irréfutables, sans expériences possibles.

Un argument touchant à la force de l'énergie sombre mérite cependant d'être considéré. Il vise à expliquer pourquoi

l'énergie sombre est nécessairement faible et pourquoi ses effets sont récents. Quand on mesure les inhomogénéités de densité dans l'Univers, on les cartographie comme des fluctuations de température dans le fond diffus de rayonnement. L'amplitude de ces fluctuations est infime, de l'ordre du millième de pourcent. Si la constante cosmologique d'Einstein, manifestation la plus simple de l'énergie sombre, était plus grande que la valeur mesurée, les galaxies n'auraient pas pu se former à partir de ces fluctuations. Pourtant, nous vivons dans une galaxie et nous ne serions pas là sans galaxies. Il y a donc un biais observationnel dans nos calculs. Notre présence requiert un faible niveau et une domination récente de l'énergie sombre.

Bien sûr, on peut se demander pourquoi il y a de l'énergie sombre. Les galaxies se porteraient très bien dans un univers sans énergie sombre. En fait, la nécessité d'une constante cosmologique, et d'une énergie sombre, vient de la théorie des cordes (cette théorie de gravité quantique tente d'expliquer comment les plus faibles et les plus intenses des forces de l'Univers, et donc toutes les interactions fondamentales, se sont trouvées unies dans des supercordes à plusieurs dimensions juste avant le Big Bang – 10 ou 20 dimensions pour être précis, alors qu'il n'en reste plus que 4, 3 d'espace et 1 de temps aujourd'hui). Il y a de nombreuses valeurs possibles pour l'énergie sombre. La plus probable est censée correspondre au nombre maximal d'options. C'est la plus grande valeur. Mais cette tendance à la hausse est contrecarrée par la nécessité d'observer de l'énergie sombre, et plus particulièrement de vivre dans une galaxie. Il en résulte que l'énergie sombre est inévitable, faible, et que sa domination est récente. Cet argument en faveur de la petitesse de l'énergie sombre a été forgé par le prix Nobel de physique Steven Weinberg.

Il y a au moins deux défauts dans cet argument. L'un est d'ordre statistique. Les arguments suivent toujours les préceptes du révérend Thomas Bayes (mieux connus sous le

nom de théorème de Bayes). Ce statisticien du XVIII^e siècle a inspiré une manière moderne de calculer la probabilité de survenue d'un événement, en prenant en compte tous les possibles. Plus il y a de possibilités, plus il est probable que l'une d'elles soit la bonne. Nous devons donc compter le nombre d'observateurs. Il apparaît que si l'on ne s'en tient pas au nombre actuel d'observateurs, mais à leur nombre futur dans n'importe quel univers, alors la probabilité change radicalement. L'infini gagne toujours. Quand on l'applique, la méthode de Bayes favorise les univers à énergie sombre quasi nulle. Il y a bien plus de galaxies par unité de volume dans les univers ayant une énergie sombre très faible ou nulle que dans ceux ayant une forte énergie sombre. La limite supérieure de l'énergie sombre persiste donc, mais pas sa prédictibilité. Il ne devrait pas y avoir d'énergie sombre du tout.

Nos tentatives pour calculer les quantités prédictibles d'énergie sombre sont encore pires. Même la limite supérieure de l'énergie sombre ne tient plus. Voici pourquoi. Les fluctuations ont pu être initialement de grande amplitude, et cela affaiblit la contrainte sur l'énergie sombre. L'argument usuel dit que s'ils sont assez grands, ce sont les trous noirs plutôt que les galaxies qui auraient dû se former les premiers dans l'Univers. Cet argument suppose que les fluctuations primordiales ont été générées par l'inflation, *via* un champ baptisé « inflaton », champ isotrope ne possédant aucune direction préférentielle. C'est ce que nous appelons un champ scalaire, par opposition aux champs vectoriels qui ont des directions privilégiées. Ce champ aurait apporté l'énergie qui a causé l'inflation, et engendré les fluctuations quantiques dont proviennent les galaxies et qui sont visibles dans le fond diffus. Les fluctuations sont des accroissements de la matière et du rayonnement. Si elles sont trop fortes, des trous noirs se forment et dominent l'Univers. Il se trouve que ce n'est pas le cas.

Tout raisonnement sur l'inflation contient des chausse-trapes. L'une est que l'inflation n'est pas engendrée par un

champ d'énergie unique. La théorie des cordes multiplie les champs scalaires. Il en résulte que les fluctuations primordiales « ordinaires » sont de deux types : l'une correspond à une compression de matière et de rayonnement, qui entraîne une légère courbure locale de l'espace. Einstein nous assure que c'est cet excès gravitationnel qui cause l'effondrement final des galaxies, une fois que l'Univers, refroidi, a été dominé par la matière ordinaire. Ce sont les fluctuations que l'on attendrait d'une inflation engendrée par un champ scalaire unique.

Mais ce n'est pas si simple. L'autre type de fluctuation est tel que l'excès de densité de la matière est exactement compensé par un déficit de densité du rayonnement. On se trouve du coup avec des fluctuations sans courbure spatiale. Le nom de « curvaton » a été donné à cette combinaison de champs qui donne des fluctuations de courbure nulle.

En outre, comme la densité de rayonnement est initialement gigantesque, il faut une quantité énorme de matière pour l'équilibrer. De très grandes fluctuations de matière deviennent possibles, mais le risque de création de trous noirs est tempéré par la pression de rayonnement.

Aux échelles des galaxies, les fluctuations pourraient même être plus grandes d'un facteur 10^{20} que la courbure ordinaire des fluctuations, et mener quand même à des rides acceptables dans le fond diffus de rayonnement. Les galaxies se formeraient tôt, dès qu'il y aurait de l'hydrogène atomique dans l'Univers, et le rayonnement serait arrêté par la diffusion par les électrons. Cela se serait produit un million d'années après le Big Bang, mais les nuages galactiques n'en auraient pas moins continué à évoluer et à fabriquer des étoiles. L'Univers résultant ne serait pas l'exacte réplique du nôtre, mais ce n'est pas très grave. Courbe, il contiendrait une multitude de galaxies, d'étoiles et de planètes. Il pourrait avoir plus d'énergie sombre que notre Univers observable. Il contiendrait nécessairement des observateurs. On ne peut donc

pas utiliser la formation des galaxies comme contrainte sur l'énergie sombre.

Un paradis pour mathématicien ?

Et si les mathématiques avaient le dernier mot pour trier parmi les univers possibles ? Et si certaines lois mathématiques opérant aux niveaux les plus profonds de la réalité avaient choisi l'Univers qui est le nôtre ? Si c'était le cas, leur résultat serait indiscutable. Le modèle standard de la physique des particules est un élément essentiel de la théorie des cordes qui, comme on l'a vu, est une théorie de la gravité quantique. Les particules y sont décrites comme des vibrations de cordes à une dimension dans un espace à plusieurs dimensions. Les supercordes vivent dans un hyperespace à 10 dimensions, et elles donnent une description mathématique de toutes les particules. Les masses des particules sont par exemple prévues par la théorie, comme elles le sont par la supersymétrie. La théorie est encore incomplète, mais elle donne la description la plus convaincante du commencement de l'Univers.

Grâce à la théorie des cordes, on peut trouver un nombre fini d'espaces géométriques, dont l'un pourrait se compacter pour donner notre Univers. Si l'on utilise la supersymétrie comme guide, il existe 10^{500} espaces de ce type. Les mathématiciens les appellent variétés de Calabi-Yau, et chacune est susceptible de donner un univers. Chacune tolère trois générations de particules. Toute la physique des particules connue peut donc être intégrée dans n'importe laquelle de ces variétés. Le prix à payer est que chacune a 6 dimensions, qui ont existé à l'instant de Planck, au début de l'Univers, quand la gravité était unie aux autres forces fondamentales. C'était l'époque de la gravité quantique.

Notre Univers a 4 dimensions, 3 d'espace et 1 de temps. Quand l'Univers est entré en expansion et s'est refroidi,

l'interaction gravitationnelle est devenue bien plus faible que les forces nucléaires. En même temps, les dimensions supplémentaires se sont compactées. Et l'une des variétés est devenue notre Univers. Il peut y avoir des traces de ces dimensions cachées à très petite échelle, traces qui se manifesteraient comme de petites déviations aux lois newtoniennes de la gravité. Les physiciens recherchent de tels effets mais ils n'en ont pas encore trouvé. Il peut aussi y avoir des traces à très grande échelle. La compactification n'a peut-être pas effacé toute la mémoire de l'Univers avant le Big Bang mais là encore, aucune anomalie gravitationnelle n'a été trouvée.

Comment classer la pléthore d'univers initiaux ? La conjecture mathématique est qu'un modèle viable doit posséder une sorte d'unité topologique. Le nombre d'Euler en est un exemple. Il compte le nombre de trous dans un hyperspace. À cause de sa poignée, une tasse a un nombre d'Euler de 1. L'espace le plus simple, non troué, a un nombre d'Euler de 0.

On aimerait croire que notre Univers est le plus simple. Mais si l'on choisit un univers au hasard parmi tous les possibles, cela serait très improbable : la plupart des espaces de Calabi-Yau ont de grands nombres d'Euler. Le mathématicien d'Oxford Philip Candelas a une idée pour réduire le nombre d'espaces possibles à seulement trois en sélectionnant ceux ayant les plus petits nombres d'Euler. Cette méthode géométrique est un bon départ pour limiter les possibilités en utilisant la simplicité comme critère.

Et après ?

Est-il raisonnable de faire de l'énergie sombre le but premier de la cosmologie ? Cette question en appelle une autre : aura-t-on un jour une théorie de l'énergie sombre ? Plus prosaïquement, puisque nous habitons une galaxie, aura-t-on un jour une théorie de la formation des galaxies ?

Alors que l'on trouve toujours des modèles inflationnaires pour rendre compte du phénomène à la mode, les prédictions génériques associées à la grande majorité des modèles d'inflation ont connu deux grands succès. L'un est la vérification de la planéité de l'espace. L'autre vient des résultats du satellite *Planck*, qui éliminent une des hypothèses concurrentes de l'inflation. Cette prédiction, émise indépendamment par Edward Harrison et Iakov Zeldovich, affirme que les fluctuations primordiales de densité doivent avoir toutes la même force à toutes les échelles. Les cosmologistes mesurent le spectre des fluctuations de puissance, qui peut être caractérisé par un nombre unique, l'index spectral, qui devrait être égal à 1.

Cela n'est hélas pas le cas. *Planck* montre que l'indice spectral est 0,97 et non 1, valeur définitivement exclue. Ce nombre implique que la force des fluctuations varie légèrement avec l'échelle, les échelles les plus petites étant les plus fortes. Cette conséquence de la durée finie de l'inflation avait été prédite. Des fluctuations de plus en plus petites devaient sortir de l'horizon de plus en plus tard, ce qui est un des grands résultats de la cosmologie moderne.

Aujourd'hui, la cosmologie paraît relativement peu excitante. Toutes les mesures convergent vers le modèle cosmologique standard avec sa matière noire et son énergie

sombre, qui sont toutes deux mal connues. Les expériences futures se concentrent sur la réduction des barres d'erreur, tout en guettant les indices d'une nouvelle physique. Se dire que l'on a la solution ultime serait immensément prétentieux, vu nos incertitudes sur les premiers instants du Big Bang. Mais la théorie cosmologique ultime intégrera sûrement notre modèle standard.

Voyage dans le temps

Est-il possible de prouver l'une de ces conjectures ? L'hypothèse multivers génère un grand nombre d'univers. Tous existent, et leur existence ne peut être vérifiée que par l'expérience. Nous devons y aller... Et la meilleure façon de faire est de construire une machine à voyager dans le temps même si, technologiquement, on en est très loin.

Le voyage dans le temps d'un univers à l'autre n'est pas pour demain. D'abord, il faudrait commencer par maîtriser le voyage dans le temps au sein de notre propre Univers, disons sur Terre. Aucune loi physique ne s'y oppose, c'est seulement une question de technologie. Et l'on n'a pas la moindre idée de ce à quoi pourrait ressembler un prototype. Mais laissons libre cours à notre imagination en nous inspirant de la théorie de la gravitation.

Le voyage dans le temps serait possible grâce à la technologie des trous de vers. De tels trous de vers existent, selon la relativité générale, la théorie de la gravitation d'Einstein. Ce sont des ponts reliant deux lieux de l'espace-temps, ou deux univers différents. Et ce n'est pas parce qu'on n'a jamais détecté de trous de vers qu'ils n'existent pas.

Le voyage dans le temps est la seule façon de tester l'hypothèse du multivers. Cela relève peut-être de la science-fiction, mais ce n'est pas exclu par les lois de la physique. Voyager loin dans l'espace implique de voyager dans le temps. L'espace-temps est le tissu de l'Univers, les deux concepts étant inséparables. Mais il se trouve que le voyage dans le

temps implique des contradictions qu'il faut bien regarder en face.

Ce ne serait pas une bonne idée de remonter le temps pour tuer son arrière-grand-mère. Il y aurait là une contradiction, puisque nous n'existerions pas nous-mêmes. On peut éviter ce paradoxe en invoquant l'incertitude quantique. Une expérience de pensée à l'échelle quantique permet de le démontrer. Imaginons que nous puissions creuser un long tunnel dans l'espace. Le matériau de soutènement devrait être extrêmement résistant pour empêcher le tunnel de s'effondrer sur lui-même sous la pression des champs de matière et d'énergie environnants. Mais ce matériau ne serait pas plus résistant que celui nécessaire pour construire un vaisseau spatial capable de pénétrer l'horizon d'un trou noir, ce qu'il faudra probablement faire pour trouver le trou de ver le plus proche.

Si l'on envoie une particule dans notre tunnel d'espace-temps, elle ressortira en un point intrinsèquement imprédictible de l'espace-temps. On ne sait pas si ce qui se fait avec une particule pourrait se faire avec un être humain macroscopique, mais ce n'est pas exclu. En tout cas, vous n'auriez aucune chance de tomber sur votre arrière-grand-mère. Elle serait cachée par l'incertitude quantique, bien mieux qu'une aiguille dans une meule de foin.

Nous aimerions tous que le voyage dans le temps soit possible. Ne regrettons-nous pas nos erreurs passées ? Que ne donnerions-nous pour avoir une autre chance, pour revivre cette brève rencontre avec cette personne qu'on n'a jamais revue, pour repasser cet examen crucial ? Ou encore, pour ceux qui sont lassés du tourisme moderne, participer à un safari au tyrannosaure ou visiter les Sept Merveilles du monde antique ? La physique dit que tout cela, et bien plus, est possible. Pas aujourd'hui, pas demain, mais un jour peut-être.

Voici la recette pour creuser le tunnel : construisez un trou de ver. Cet objet bizarre, prévu par la théorie d'Einstein, est un

tunnel à travers l'espace-temps. On n'y accède que par un trou noir, ce qui fait que le retour est interdit par les lois de la physique. Rien ne peut sortir d'un trou noir. La gravité quantique, saint Graal de la physique des particules actuelle, implique quant à elle l'existence de petits trous noirs et de trous de ver disséminés dans l'espace. Cependant, leur durée de vie est variable et beaucoup disparaissent avant qu'on puisse les détecter. On suppose que le vide fourmille de telles entités fugitives. Mais les trous de ver peuvent être captés sans violer les lois de la physique. Il faut simplement mettre au point un matériau très, très résistant.

Capter un trou de ver demanderait des forces inimaginables. En pénétrer un serait dangereux : il peut se refermer sur lui-même. L'idéal serait de trouver un trou noir massif tournant très rapidement sur lui-même. On connaît des centaines de trous noirs massifs, pour la plupart situés au cœur des galaxies. Même notre Voie lactée a le sien. La théorie astrophysique suggère que les trous noirs tournent sur eux-mêmes, car la plupart des étoiles massives, qui finissent en trous noirs, font de même. Certains trous noirs atteignent des masses considérables. Celui de notre Galaxie pèse 4 millions de masses solaires...

La rotation rapide du trou noir est essentielle pour trouver un trou de ver. L'horizon des événements du trou noir est en effet déformé par la rotation, alors qu'il empêche ordinairement l'accès à la singularité centrale. Un horizon des événements est impénétrable. Pour un observateur extérieur, le temps s'arrête à mesure qu'on en approche, mais grâce à la rotation, la singularité devient accessible. Elle peut même être « nue », sans horizon des événements. On pourrait dès lors y pénétrer et trouver la singularité centrale où un trou de ver pourrait attendre l'intrépide voyageur.

Le matériau du vaisseau spatial franchissant l'horizon d'un trou noir pose de gros problèmes technologiques. Il devrait résister aux fantastiques forces de marée qui réduiraient en pièces tous les matériaux existants. Mais rien n'interdit, en

principe, qu'un tel matériau puisse être mis au point. La matière d'une étoile à neutrons aurait par exemple la résistance requise pour survivre à un trou noir et accéder à un trou de ver. On voit mal comment en faire un vaisseau spatial, mais les livres de Jules Verne et de H. G. Wells montrent que les choses les plus improbables sont réalisables.

Un matériau plus exotique et résistant à la gravité existe sous forme diluée : l'énergie sombre, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Notre technologie temporelle pourrait maîtriser cette énergie, et l'utiliser pour ouvrir un trou de ver susceptible d'engloutir un voyageur. Si ce dernier survit au voyage, il émergera en un autre lieu de l'espace-temps, soit dans notre Univers, soit, plus vraisemblablement vu la quasi-infinité de destinations possibles, dans un autre univers. Le voyage dans le multivers serait ainsi possible, même si le retour pose de redoutables problèmes.

Un autre problème technique devrait cependant être résolu. La théorie affirme que dès qu'on ouvre un trou de ver, la matière s'y précipite immédiatement et le referme. C'est pourquoi il serait préférable d'utiliser un trou de ver existant, au centre d'un trou noir en rotation rapide.

Si l'on met de côté les questions techniques, ce type de voyage dans le temps est idéal pour explorer l'espace-temps. Malheureusement, la technologie avancée nécessaire est classée au niveau II par l'expert et universitaire américain Michio Kaku. Cela signifie qu'elle ne devrait pas être disponible avant un bon million d'années.

Indices inattendus

Pour imaginer le futur, la lecture des philosophes naturels de l'Antiquité peut être utile. Sénèque, par exemple, mort en l'an 65 de notre ère, écrivait au livre VII de ses *Questions naturelles* :

Le temps viendra où ce qui est mystère pour nous sera éclairci par le laps des ans et les études accumulées des siècles. Pour de si grandes recherches, la vie d'un homme ne suffit pas, fût-elle toute consacrée à l'inspection du ciel. [...] Ce n'est donc que successivement et à la longue que ces phénomènes seront dévoilés. Le temps viendra où nos descendants s'étonneront que nous ayons ignoré des choses si simples. [...] Combien d'autres, inconnus de nous, seront découverts par les races futures ! Que de conquêtes pour les âges à venir, quand notre mémoire même ne sera plus ! Que serait le monde, s'il n'enfermait cette grande énigme que le monde entier doit chercher ? [...] Ainsi, la nature ne se manifeste pas toute au premier abord³.

L'humanité possède une technologie, telle que nous la connaissons aujourd'hui, depuis moins d'un siècle. Les progrès ont été stupéfiants. Aux yeux des Anciens, nous sommes devenus des dieux. Nous avons maîtrisé les machines volantes et le voyage dans l'espace, établi des communications vidéo quasi immédiates à grande distance, et contrôlé des déchaînements d'énergie considérables. Imaginez ce que nous allons pouvoir faire dans un siècle, dans mille ans, dans un million d'années. Il ne serait pas très sérieux d'affirmer aujourd'hui que l'on ne construira jamais une machine à voyager dans le temps. Bien sûr, il y a toujours eu des savants pour faire des prédictions erronées :

« Faire voler un plus lourd que l'air est impossible », Lord Kelvin, président de la Royal Society, 1895.

« Si la théorie quantique est correcte, alors c'est la fin de la physique », Albert Einstein.

« Quiconque espère tirer une source d'énergie de l'atome croit au Père Noël », Lord Rutherford, 1935.

Dans ce domaine, les astronomes ne sont pas en reste :

« Les voyages spatiaux sont de la science-fiction ! », Richard Wooley, 1956.

« Le voyage spatial est une absurdité », Harold Spencer Jones, 1956.

Ces citations de deux astronomes royaux (poste créé par le roi Charles II en 1675) datent de 1956. Le lancement du premier *Spoutnik* date du 4 octobre 1957. Pour reprendre les mots du physicien Lev Landau : « Les cosmologistes ont souvent tort, mais ils ne doutent jamais. »

Qu'est-ce qui nous attend dans les décennies à venir ? Sans doute une nouvelle théorie en cosmologie. La plus grande partie de l'Univers connu est déjà bien expliquée. L'explication du monde physique s'est considérablement précisée depuis Newton. Pour autant, un élément que nous avons encore en commun avec Newton devrait nous faire douter de notre excellence en tant que physiciens. En conséquence de sa théorie de la gravitation, Newton a brillamment prédit qu'il devait y avoir un nombre quasi infini de corps célestes. La gravité, engendrant inévitablement une instabilité, devait créer des planètes et des étoiles. Mais Newton ne pouvait comprendre, avec la physique de son époque, pourquoi certains astres sont lumineux, comme les étoiles, et d'autres non, comme les planètes. Ce n'est que deux cent cinquante ans plus tard, avec la découverte des réactions thermonucléaires par Hans Bethe, que l'on comprit ce qui fait briller les étoiles.

La détection de la matière noire pose un problème urgent. Elle est partout, et confirmée par un grand nombre d'observations indépendantes, mais on n'en a pas encore détecté la moindre particule. Cette situation a conduit certains astronomes à remettre en cause les bases de la gravité. Si l'on modifiait ces lois, on pourrait se dispenser de la matière noire.

La détection de l'énergie sombre n'est guère plus avancée. Supposez que l'on mette de côté la preuve par les supernovæ de l'accélération de l'Univers. Après tout, notre modèle théorique des supernovæ est imparfait. Les utiliser comme méthode de mesure est donc pour le moins hasardeux, et de nombreux biais, la poussière galactique par exemple, pourraient affecter l'observation des supernovæ les plus lointaines. Dès lors, l'accélération n'aurait plus lieu d'être.

Nous savons que quelque chose domine la densité masse-énergie. Les deux tiers ne sont pas de la matière gravitationnelle qui définit la distribution à grande échelle des galaxies. Ce pourrait être quelque chose de totalement uniforme – un nouveau champ d'énergie par exemple. Mais une telle explication semble plus radicale que la constante cosmologique d'Einstein, qui « colle » avec toutes les données connues.

La théorie des cordes donnera-t-elle la clé de la théorie du Tout, et de l'énergie sombre en particulier ? La réponse n'est pas assurée. La théorie des cordes est une belle théorie mathématique, mais elle n'est pas physiquement testable. Un des pionniers de la théorie quantique, Freeman Dyson, écrivait en 2009 : « Je pense que dans cinquante ans à un siècle, une autre révolution va se produire en physique, avec des concepts dont nous n'avons pas la moindre idée, et qui donneront une nouvelle signification à la théorie des cordes, qui fera enfin des prédictions testables. »

Il faut donc être patient.

La situation n'est pas sans rappeler celle du multivers et du principe anthropique. Peut-être manquons-nous simplement de la théorie physique capable de rendre compte des premiers instants de l'Univers. Trop de questions se posent dans notre description actuelle de l'Univers. Et la future théorie pourrait bien se trouver, en germe, au sein de ces questions.

Heureusement, nous ne sommes pas pressés. Nous avons devant nous des milliards d'années d'exploration à condition, bien sûr, que l'humanité ne s'autodétruisse pas avant. Le Soleil va encore briller pendant 5 milliards d'années, et il a à peine atteint la moitié de son âge. À cette échelle de temps, tous les espoirs technologiques et théoriques sont permis. On découvrira de nouvelles planètes semblables à la Terre, dont certaines seront plus vieilles qu'elle. Avec un milliard d'années d'avance sur *Homo sapiens*, on peut se demander ce qu'une autre civilisation, dans une lointaine galaxie, a pu

réaliser. À condition bien sûr que l'évolution de la vie n'ait rien d'improbable dans un environnement adéquat, ce que nous sommes condamnés à ignorer en l'absence de preuve tangible.

Notre exploration de l'Univers n'est pas nécessairement limitée dans l'espace et dans le temps. On peut trouver un trou de ver assez proche ou une singularité nue, et les exploiter comme machines à voyager dans le temps. On peut développer une technologie nous donnant accès à d'autres univers. Nous comprendrons comment l'Univers a commencé ; et il ne fait aucun doute que nous comprendrons la nature de la matière noire et de l'énergie sombre, les deux grandes énigmes de notre temps.

[3](#). Traduction de M. Nisard, 1878.

Bibliographie

- Barrow J. D., Tipler F., *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986.
- Barrow J. D., Davies P. W. C., Harper C. L. (dir.), *Science and Ultimate Reality : Quantum Theory, Cosmology, and Complexity*, Cambridge University Press, 2004.
- Carr B., *Universe or Multiverse ?*, Cambridge University Press, 2007.
- Carroll S., *From Eternity to Here : The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Dutton, 2010.
- Carroll W. E., « Big Bang cosmology, quantum tunneling from nothing, and creation », *Laval théologique et philosophique*, 1988, 44 (1), p. 59-75.
- Carter B., *The Significance of Numerical Coincidences in Nature*, manuscrit non publié, 1967 (arXiv :0710.3543).
- Clayton P., *God and Contemporary Science*, Edinburgh University Press, 1997 ; tr. fr. *Les Origines de la liberté. L'émergence de l'esprit dans le monde naturel*, Salvator, 2012.
- Craig W. L., Smith Q., *Theism, Atheism and Big Bang Cosmology*, Clarendon Press, 1993.
- Davies P., *The Mind of God : Science and the Search for Ultimate Meaning*, Penguin, 1993 ; tr. fr. *L'Esprit de Dieu*, Hachette, 1998.
- Davies P., *The Goldilocks Enigma : Why Is the Universe Just Right for Life ?*, Penguin, 2007.
- Davies P., *How to Build a Time Machine*, Viking, 2002 ; tr. fr. *Comment construire une machine à explorer le temps*, EDP sciences, 2007.
- Deutsch D., *The Fabric of Reality*, Allen Lane, 1997.
- Hawking S. J., *The Universe in a Nutshell*, Bantam Books, 2001 ; tr. fr. *L'Univers dans une coquille de noix*, Odile Jacob, 2009.
- Hawking S. J., Mlodinov L., *The Grand Design*, Bantam, 2010.
- Heller M., *Questions to the Universe : Ten Lectures on the Foundations of Physics and Cosmology*, Pachart Publishing House, 1986.
- Heller M., « Cosmological singularity and the creation of the Universe », *Zygon*, 2000, 35 (3), p. 665-685.
- Hoyle F., Burbidge G., Narlikar J. V., *A Different Approach to Cosmology : From a Static Universe through the Big Bang towards Reality*, Cambridge University Press, 2005.

- Linde A., « The inflationary multiverse », in B. Carr (dir.), *Universe or Multiverse*, Cambridge University Press, 2007.
- Peacock, J. A., *Cosmological Physics*, Cambridge University Press, 1999.
- Poe E. A., *Eureka : A Prose Poem* (1848) ; tr. fr. de C. Baudelaire, *Eurêka*, 1864.
- Rees M., *Just Six Numbers : The Deep Forces that Shape the Universe*, Weidenfeld & Nicholson, 1999.
- Rees M., *Our Cosmic Habitat*, Princeton University Press, 2001.
- Ronan C. A., *Their Majesties' Astronomers*, Bodley Head, 1967.
- Rowan-Robinson M., *The Nine Numbers of the Cosmos*, Oxford University Press, 1999.
- Russell R. J., Murphy N., Isham C. J. (dir.), *Quantum Cosmology and the Laws of Nature : Scientific Perspectives on Divine Action*, Vatican Observatory, 1993.
- Russell R. J., Murphy N., Peacocke A. R. (dir.), *Chaos and Complexity : Scientific Perspectives on Divine Action*, Vatican Observatory, 1995 et Berkeley (CA), Center for Theology and the Natural Sciences, 2000.
- Russell R. J., Murphy N., William R., Stoeger W. R. (dir.), *Scientific Perspectives on Divine Action : Twenty Years of Challenge and Progress*, Vatican Observatory-Berkeley (CA), Center for Theology and the Natural Sciences, 2007.
- Saunders N., *Divine Action and Modern Science*, Cambridge University Press, 2002.
- Sénèque, *Questions naturelles*, cité in C. Sagan, *Cosmos*, Random House, 1980.
- Silk J., *The Big Bang*, W. H. Freeman & Co., 1989 ; tr. fr. *Le Big Bang*, Odile Jacob, 1997.
- Silk J., *A Short History of the Universe*, Cambridge University Press, 1997 ; tr. fr. *Une brève histoire de l'Univers*, Odile Jacob, 2003.
- Silk J., *On the Shores of the Unknown : A Short History of the Universe*, Cambridge University Press, 2004.
- Silk J., *The Infinite Cosmos : Questions from the Frontiers of Cosmology*, Oxford University Press, 2006.
- Smolin L., *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press, 1997.
- Smolin L., *Three Roads to Quantum Gravity*, Weidenfeld & Nicolson, 2000.
- Smolin L., *The Trouble with Physics*, Allen Lane, 2007 ; tr. fr. *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*, Dunod, 2007.
- Steinhardt P., Turok N., *The Endless universe : Beyond the Big Bang*, Weidenfeld & Nicolson, 2007.
- Susskind L., *The Cosmic Landscape : String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, Little, Brown, 2005 ; tr. fr. *Le Paysage cosmique. Notre univers en cacherait-il des millions d'autres ?*, Robert Laffont, 2007.

Tegmark M., *Notre univers mathématique. En quête de la nature ultime du réel*, Dunod, 2014.

Vilenkin A., *Many Worlds in One : The Search for Other Universes*, Hill & Wang, 2006.

Wheeler J. A., *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library, 1990.

Zee A., *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press, 2003.

DU MÊME AUTEUR

CHEZ ODILE JACOB

Le Big Bang, 1997.

Une brève histoire de l'Univers, 2003.

L'Univers et l'Infini, 2005.