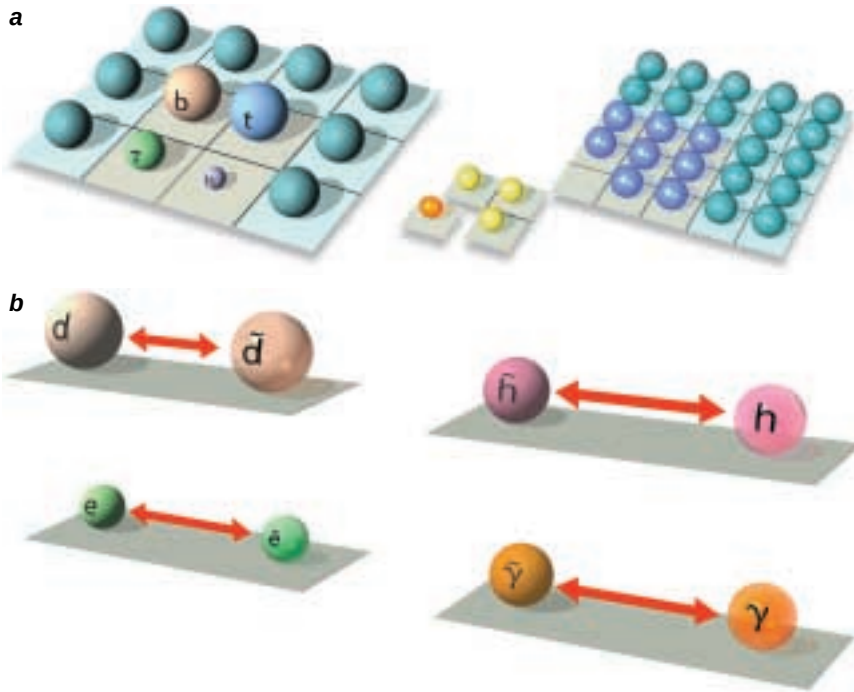




Slim Films

7. QUE RESTE-T-IL À DÉCOUVRIR? Le Modèle standard pourrait être remplacé par plusieurs types de théories. Les théories technicolor (a) introduisent de nouvelles interactions, analogues aux trois interactions de couleurs qui lient les quarks. Des «générations» de particules encore inconnues accompagnent les interactions. La supersymétrie (b) relie les fermions aux bosons et fait correspondre des partenaires supersymétriques à chaque particule du Modèle standard. La théorie M (c) et les théories des cordes considèrent des entités nouvelles, telles de petites cordes, boucles ou membranes, qui se comportent comme des particules aux faibles énergies.

présence sont suffisamment faibles. Parfois des théories qui considèrent des interactions extrêmement fortes sont équivalentes à d'autres théories qui incluent des interactions extrêmement faibles : elles se prêtent donc à un traitement par perturbations. Une telle équivalence semble vérifiée pour certains couples de l'ensemble des cinq théories de cordes à dix dimensions et de la théorie de champ à onze dimensions précédemment mentionnés. Malheureusement, les interactions de la théorie fondamentale ne sont probablement ni très fortes ni très faibles, ce qui exclut tout recours à un traitement perturbatif.

On ignore quand ces problèmes seront résolus. Ils le seront peut-être demain, dans un article publié par un jeune théoricien. Ou peut-être ne le seront-ils pas avant 2050, voire 2150. Cependant une fois les solutions en main, nous n'aurons aucune difficulté pour identifier la bonne théorie de l'unification fondamentale : il suffira de regarder si la théorie proposée rend compte des valeurs mesurées pour les constantes physiques du Modèle standard, ainsi que d'autres effets, inexpliqués par le Modèle standard, que l'on aura alors éventuellement découverts.

Quand nous comprendrons enfin le comportement des particules et des interactions à des énergies atteignant 10^{18} GeV, nous rencontrerons peut-être de nouvelles énigmes, qui éloigneront à nouveau l'unification finale. Personnellement, j'en doute. Rien n'indique qu'il existe une échelle fondamentale d'énergie au-delà de 10^{18} GeV, et la théorie des cordes indique même que les énergies supérieures à cette valeur n'ont aucune signification physique.

La découverte d'une théorie unifiée décrivant la nature à toutes les énergies nous permettra de répondre aux questions les plus profondes de la cosmologie : l'expansion du nuage de galaxies que nous appelons Big Bang a-t-elle commencé à un instant précis dans le passé? Notre Big Bang n'est-il qu'un événement parmi d'autres, dans l'histoire d'un Univers bien plus vaste et où, de tous temps, se produisent de telles explosions primordiales, grandes et petites? Si oui, ce que nous appelons les constantes naturelles, voire les lois naturelles, varient-elles d'une explosion à une autre?

L'étude de ces questions ne marquera pas la fin de la physique. Elle

n'aidera même pas, probablement, à résoudre certains problèmes auxquels se heurte la physique actuelle, telle la compréhension de la turbulence ou de la supraconduction à haute température. En revanche, elle marquera la fin d'un certain type de physique, à savoir d'une physique à la recherche d'une théorie unifiée dont découlent tous les autres phénomènes de la nature.

Steven WEINBERG dirige le groupe de physique théorique de l'Université d'Austin.

Steven WEINBERG, *Unified Theories of Elementary-Particle Interaction*, in *Scientific American*, vol. 231, n° 1, pp. 50-59, juillet 1974.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

Edward WITTEN, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward WITTEN, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.

Brian GREENE, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.

L'exploration de l'Univers

MARTIN REES

Au XXI^e siècle, les cosmologistes dévoileront le mystère de la naissance de l'Univers. Prouveront-ils aussi l'existence d'autres univers ?

La cosmologie est enfant du XX^e siècle. Dans les années 1920, les astronomes ont compris que la Voie lactée, avec ses 100 milliards d'étoiles, n'était qu'une galaxie parmi des millions d'autres. Depuis, notre connaissance de l'Univers a considérablement progressé. Aujourd'hui, les astronomes affinent l'histoire du Système solaire et l'histoire de l'Univers, jusqu'aux premiers instants après le Big Bang, lorsque l'Univers était dense et chaud. L'intérêt pour le monde qui nous a forgés serait peut-être notre seul point commun avec d'éventuelles intelligences extraterrestres.

Grâce aux observatoires terrestres et spatiaux, les astronomes observent le passé et analysent l'évolution de l'Univers. Les images des grands télescopes montrent des galaxies telles qu'elles étaient aux époques reculées : des boules de gaz diffus où étincellent de jeunes étoiles bleues, à la combustion rapide. Ces étoiles ont transformé l'hydrogène primordial en des atomes plus lourds. En mourant, elles enrichissent leurs galaxies en éléments chimiques simples, à partir desquels se sont formées les planètes et la vie : le carbone, l'oxygène, le fer, etc. Aucun dieu ne s'est préoccupé de créer les divers éléments du Tableau périodique, car les galaxies sont d'immenses écosystèmes qui forgent les éléments et recyclent le gaz, de génération d'étoiles en génération d'étoiles. L'espèce humaine – et tout ce qui nous entoure – est ainsi composée de poussières d'étoiles, c'est-à-dire des déchets nucléaires des étoiles.

Les astronomes connaissent également mieux l'ère prégalactique grâce à l'étude du rayonnement micro-onde

qui baigne l'Univers. Ce rayonnement fossile montre que l'Univers entier a un jour été plus chaud que le centre des étoiles. En utilisant les données de la physique nucléaire, les physiciens calculent le déroulement des réactions de fusion nucléaire au cours des premières minutes après le Big Bang. En comparant les proportions prédites d'hydrogène, de deutérium et d'hélium avec les proportions observées, ils ont ainsi corroboré la théorie du Big Bang.

Est-il présomptueux et prématuré de vouloir comprendre pleinement l'Univers, même en cette fin de XX^e siècle ? Apparemment pas. De fait, les cosmologistes ont beaucoup progressé ces dernières années, parce que les difficultés ne résultent pas de la taille des objets envisagés, mais de leur complexité : une étoile est plus simple qu'un insecte, car la température élevée à l'intérieur de l'étoile, comme dans l'Univers primordial a dissocié la matière en ses constituants les plus simples.

La nature de l'Univers

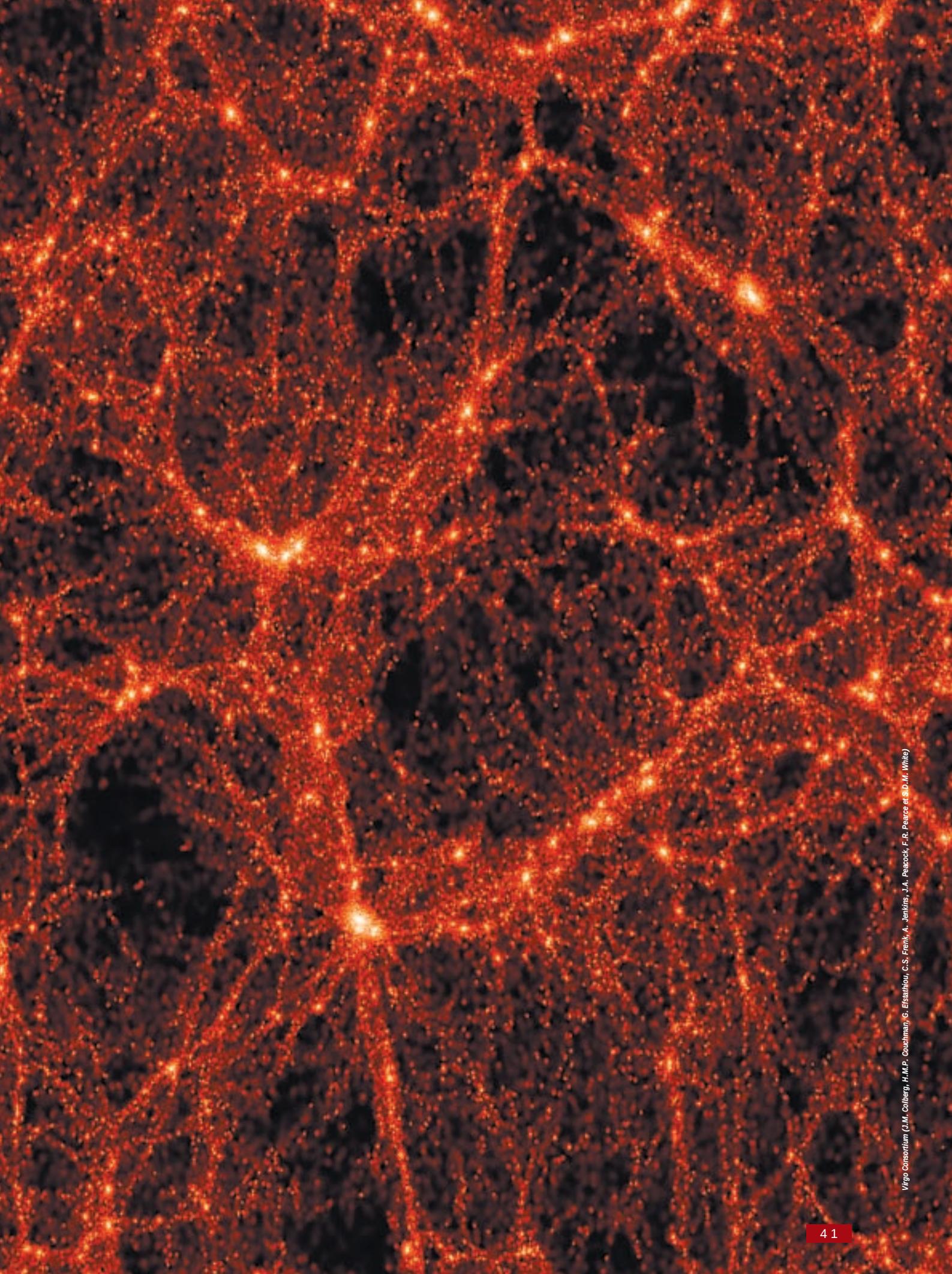
Les progrès de la cosmologie ont suscité de nouveaux mystères, qui donneront du fil à retordre aux cosmologistes du siècle prochain. Un problème embarrassant, par exemple : les astronomes ne savent toujours pas de quoi est fait notre Univers. Les objets qui émettent des rayonnements observables, tels les étoiles, les quasars et les galaxies, ne constituent qu'une petite partie de la matière de l'Univers. Une grande partie de la matière est sombre, inobservable. La plupart des cosmologistes supposent aujourd'hui que la matière sombre est composée de particules issues

du Big Bang qui interagissent faiblement, mais elle pourrait être bien plus exotique. Quoi qu'il en soit, les étoiles et les planètes ne sont que l'écume d'un Univers dont la nature reste inconnue. La recherche de la matière sombre, qui s'effectue aujourd'hui grâce à des détecteurs souterrains, révélera de quoi est faite la majeure partie de l'Univers ; on espère qu'elle révélera aussi, au passage, quelques espèces de particules totalement nouvelles.

Les astronomes ignorent combien l'Univers contient de matière sombre. Or, le destin ultime de notre Univers (expansion continue ou contraction) dépend de cette quantité et des forces de gravitation qu'elle exerce. Apparemment, l'Univers ne contient que 30 pour cent de la matière nécessaire pour arrêter son expansion. Fin 1998, de nouvelles observations ont fait penser que l'expansion ne s'arrêterait jamais : l'analyse de supernovae lointaines indiquerait que l'expansion de l'Univers s'accélère. Certains y voient la preuve qu'une force supplémentaire répulsive (la constante cosmologique) domine la gravitation à l'échelle cosmique.

Les cosmologistes examineront aussi l'évolution de la structure à grande échelle de l'Univers. Depuis le Big Bang, la gravitation a amplifié les hétérogénéités de l'espace, bâtissant les structures et augmentant les contrastes de températures. Les astronomes étudient cette évolution de plus de dix milliards d'années en recréant des « univers virtuels » sur leurs ordinateurs. Dans les

1. LA STRUCTURE ET L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS sont étudiées à l'aide de superordinateurs. Sur cette simulation, chaque point représente une galaxie.



2. SELON LA THÉORIE DU BIG BANG, l'Univers a commencé par grossir très rapidement lors de l'«inflation». Après environ trois minutes, le plasma de particules et de rayonnement qui composait l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que des noyaux simples se forment. Puis, après 300 000 ans, les atomes d'hydrogène et d'hélium se sont assemblés. Les premières étoiles et galaxies seraient apparues un milliard d'années plus tard. Le destin ultime de l'Univers – se dilatera-t-il à jamais ou finira-t-il par s'effondrer? – n'est toujours pas connu avec certitude.

prochaines années, ils simuleront l'histoire de l'Univers, afin de comparer leurs calculs avec les observations.

Les questions de structure ne sont pas nouvelles : en 1704, Isaac Newton s'interrogeait déjà sur la structure du Système solaire. Il écrivait : «Une destinée aveugle ne pourrait jamais faire tourner les planètes dans le même sens, sur des orbites concentriques.» Il attribuait à la divine providence cette uniformité de notre système planétaire. Aujourd'hui, les astronomes savent que les planètes sont dans le même plan parce qu'elles se sont formées par accrétion de gaz et de poussières, au début du Système solaire.

Les astronomes et les cosmologistes connaissent l'histoire de l'Univers jusqu'à la toute première seconde après le Big Bang. Cependant, conceptuellement, nous ne sommes pas en meilleure posture que l'était Newton, car nous sommes bloqués : que s'est-il passé dans la première milliseconde après le Big Bang, lorsque l'Univers était extraordinairement petit, chaud et dense? Les lois de la physique actuelle ne décrivent pas cette période critique.

Pour progresser, les physiciens devront unifier la théorie de la relativité générale, qui gouverne les interactions à grandes distances, avec la théorie quantique, qui s'applique aux très courtes distances (voir *L'unification de la physique*, par Steven Weinberg, page 32).

Avant 1965, la cosmologie était ouverte à toutes sortes de spéculations. Aujourd'hui, comme en astronomie, l'observation s'est imposée. La réponse à la plupart des vieilles questions cosmologiques proviendront des nouveaux télescopes, tel le VLT, le gigantesque télescope que l'Europe

BIG BANG

10^{-43} SECONDE
ÈRE
DE LA GRAVITÉ
QUANTIQUE

10^{-36} SECONDE
ÈRE DE L'INFLATION

10^{-5} SECONDE
FORMATION DES
NEUTRONS ET DES
PROTONS À PARTIR
DES QUARKS

3 MINUTES
SYNTHÈSE
DES NOYAUX
ATOMIQUES

300 000 ANS
LES PREMIERS ATOMES
SE FORMENT

construit dans le Nord du Chili. La prochaine génération de télescopes spatiaux permettra de sonder l'Univers visible bien plus profondément que ce que le télescope spatial *Hubble* est capable de faire. Dans le domaine des ondes radio et X, de nouveaux télescopes sont également en construction.

La cosmologie, guidée par l'observation

Avant 2050, on pourrait assister à la construction d'observatoires géants dans l'espace ou sur la face cachée de la Lune. La sensibilité et la résolution de ces télescopes surpasseront de beaucoup ceux de n'importe quel instrument actuel : les nouveaux télescopes traqueront les trous noirs et les planètes d'autres systèmes stellaires. Ils fourniront aussi des clichés de toutes les ères cosmologiques, depuis l'époque où les premières étoiles (ou peut-être les quasars) se sont condensées, après l'expansion des débris du Big Bang. Certains de ces observatoires détecteront même les ondes gravitationnelles, montrant ainsi les vibrations dans la structure de l'espace-temps.

Tous ces instruments donneront tant d'informations que l'on devra automatiser l'analyse. Les astronomes s'attacheront à l'analyse statistique de chaque population d'objets étudiés, afin de découvrir les meilleurs candidats parmi les planètes extrasolaires

analogues à la Terre, par exemple. Les physiciens exploreront les objets «extrêmes», clés de mécanismes physiques encore incompris, tels les sursauts gamma : par quel mécanisme les sursauts gamma émettent-ils, pendant quelques secondes, autant d'énergie que des milliards de galaxies? Le ciel deviendra un laboratoire pour l'étude des phénomènes qui ne peuvent être simulés sur la Terre.

Simultanément, grâce aux données stockées, l'accès aux données astronomiques, jusqu'ici réservées à quelques privilégiés, s'élargira. Des cartes détaillées du ciel seront téléchargeables sur le réseau Internet. Les passionnés du monde entier pourront vérifier leur propre intuition, chercher de nouvelles structures et découvrir de nouveaux objets.

Les cosmologistes considèrent l'Univers comme une sorte de tapisserie qui s'est modifiée à partir des conditions initiales fixées une microseconde après le Big Bang. À partir de lois physiques simples, des structures et des phénomènes complexes sont apparus. Les lois simples n'ont pas toujours des conséquences complexes. Examinons l'ensemble fractal de Mandelbrot : c'est un motif avec une structure de complexité infinie engendrée par un algorithme simple. En revanche, d'autres algorithmes simples et d'apparence similaire donnent des motifs ennuyeux.

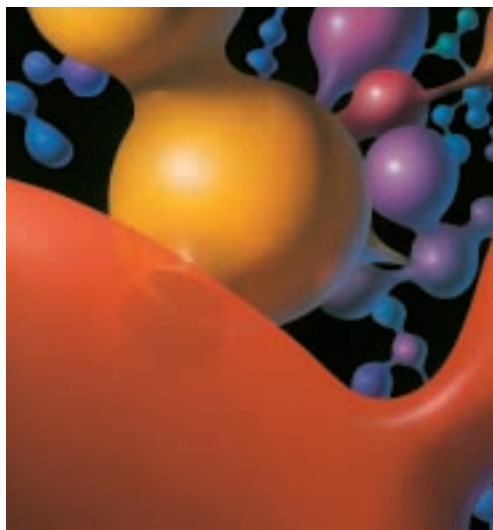


Le réglage de l'Univers

L'Univers ne serait pas structuré comme aujourd'hui s'il n'avait eu une vitesse d'expansion particulière. Si le Big Bang avait produit moins de fluctuations de densité, l'Univers serait encore sombre, sans étoiles et sans galaxies. Si l'Univers avait plus de trois dimensions spatiales, les planètes ne resteraient pas en orbite autour des étoiles. Si la gravitation était supérieure, elle écraserait les organismes vivants de taille humaine, les étoiles seraient minuscules et leur durée de vie serait courte. Si les forces nucléaires étaient de quelques pour cent plus faibles, seul l'hydrogène serait stable : il n'y aurait pas d'autres éléments chimiques, pas de chimie, pas de vie. À l'inverse, si les forces nucléaires avaient été un tout petit peu plus fortes, l'hydrogène lui-même n'existerait pas.

Certains pensent que le providentiel réglage de l'Univers n'a rien d'étonnant, sinon nous ne serions pas là pour en discuter. D'autres supposent que plusieurs univers existent simultanément, mais que quelques-uns seulement permettent l'apparition de la vie et de créatures telles que nous ; manifestement, nous serions dans l'un de ces univers.

Peut-être aussi le Big Bang envisagé n'est-il pas le seul. L'histoire entière de notre Univers ne serait-elle qu'un épisode, une simple facette d'un Univers ayant une infinité d'aspects ? Certains univers pourraient ressembler au nôtre, mais la plupart seraient « mort-nés », s'effondrant après une brève existence, car les lois qui le régiraient ne permettraient pas l'apparition de la complexité.



3. SELON CERTAINS COSMOLOGISTES, une multitude d'univers sont formés en permanence. Chaque univers est ici représenté comme une boule reliée à son univers «parent». Les différentes couleurs représentent des lois physiques différentes d'un univers.

Ces discussions peuvent sembler ésotériques, mais le statut des idées sur la multiplicité des univers influencera les futures controverses cosmologiques. De nombreux théoriciens favorisent une image du cosmos simple, avec une densité de l'Univers égale à la densité critique : l'Univers est juste assez dense pour freiner son expansion. Ils ne croient ni aux observations qui indiquent que l'Univers ne serait pas tout à fait aussi dense, ni à la constante cosmologique.

L'histoire est-elle un guide dans les études cosmologiques ? Tous les astronomes de l'Antiquité et du Moyen Âge supposaient *a priori* que les orbites étaient des cercles ou des combinaisons de cercle, forme parfaite par excellence. Pour rendre compte des observations du mouvement elliptique des planètes, on ajoutait de petits cercles, des épicycles. Au début du XVII^e siècle, Johannes Kepler rompit enfin avec le cercle et montra que les orbites des planètes sont des ellipses, forme imparfaite. Il fallut les travaux d'Isaac Newton pour expliquer ces ellipses en termes d'une loi de la gravitation simple et universelle.

De même, si nous hésitons à croire que l'Univers a une faible densité et qu'une constante cosmologique agit,



Pat Rawlings

4. AU SIÈCLE PROCHAIN, LES OBSERVATOIRES LUNAIRES seront les outils de la cosmologie. La face cachée de la Lune est un lieu idéal pour les télescopes en raison de l'absence d'atmosphère, donc de

turbulences atmosphériques, et parce qu'elle est à l'abri des rayonnements terrestres. Les minéraux lunaires pourraient être utilisés pour la fabrication d'instruments *in situ*.

c'est peut-être que notre vision est limitée. Tout comme la Terre parcourt l'une des quelques orbites elliptiques autour du Soleil qui lui permette d'être habitable, notre Univers pourrait n'être qu'un exemple habitable d'un ensemble plus vaste.

Les voies du nouveau millénaire

Des cosmologistes étudient également la topologie de l'Univers. L'Univers pourrait être beaucoup plus petit que ce que nous voyons, un peu comme si nous étions situés à l'intérieur d'un cube dont les parois sont des miroirs. La plupart des objets du ciel seraient alors des images fantômes, reflétées plusieurs fois. Des tests statistiques sur la répartition des galaxies et des structures particulières dans le fond diffus cosmologique testeront cette hypothèse.

À l'approche du XXI^e siècle, les scientifiques repoussent les frontières de la connaissance dans trois grands

domaines : le très grand, le très petit et le très complexe. La cosmologie participe de tous ces domaines. Dans les prochaines années, les cosmologistes établiront probablement la densité de l'Univers et découvriront la nature de la matière sombre. Ces découvertes seront-elles compatibles avec les théories actuelles ? Déterminerons-nous la proportion relative des atomes ordinaires et de la matière sombre dans l'Univers, et aussi la valeur de la constante cosmologique et les fluctuations de densité primordiales ? Dans cette hypothèse, nous prendrons la pleine mesure de notre Univers, de la même manière que, ces derniers siècles, nous avons appris la taille et la forme de la Terre et du Soleil. Inversement, notre Univers pourrait se révéler plus complexe que nous ne le pensons aujourd'hui. Préférez-vous habiter un univers classique ou un univers plus complexe... et plus passionnant ?

La cosmologie n'est pas seulement une science fondamentale, c'est aussi

la plus grande des sciences de l'environnement. Comment une boule de feu uniforme évolue-t-elle, en 15 milliards d'années, en un cosmos rempli de galaxies, d'étoiles et de planètes ? Comment les atomes s'assemblent-ils – ici sur Terre et peut-être dans d'autres mondes – pour former des êtres vivants assez élaborés pour réfléchir à leurs origines ? La réponse à ces questions est une quête peut-être vaine, mais passionnante.

Martin REES, professeur à l'Université de Cambridge, est astronome royal.

Marc LACHÈZE-REY, *Connaissance du cosmos*, Éditions Albin Michel, 1987.

Hubert REEVES, *Dernières nouvelles du cosmos*, Éditions du Seuil, 1995.

Craig J. HOGAN, *The Little Book of the Big Bang : A Cosmic Primer*, Copernicus, 1998.

Martin REES, *Before the Beginning*, Perseus Books, 1998.

Martin REES, *Just Six Numbers*, Basic Books, 1999.
