Les caprices de l'expan

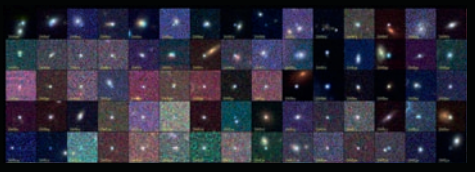
L'Univers est en expansion, mais cette expansion n'a jamais été un long fleuve tranquille ! Démesurée aux tout premiers instants, ralentie ensuite, puis de nouveau accélérée, elle a toujours échappé aux cosmologistes au moment même où ils pensaient l'avoir comprise. Il y dix ans, un jeune chercheur et son équipe découvraient que l'expansion s'accélère. Aujourd'hui, après cinq années d'observations soignées pour confirmer cet étonnant résultat, les cosmologistes s'interrogent toujours sur le moteur de l'expansion cosmique. Mais qu'est-ce qui fait enfler l'Univers ?

Space Channel/C&E Photos

sion

Dossier réalisé par David Fossé

Quatre-vingts ans après sa découverte, l'expansion cosmique se révèle de plus en plus complexe. Comprendra-t-on un jour ce qui l'alimente ?



500 supernovae pour voir grandir l'Univers

page 40

Brève histoire de l'expansion

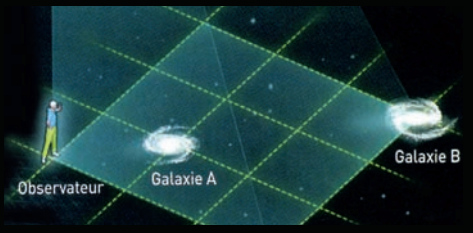
page 41

Courtesy of A.Riess

Adam Riess, découvreur de l'accélération cosmique

"Nous pensions que l'Univers ralentissait"

page 43



Les 10 questions que vous vous posez

page 44

ÉCOUTER AUSSI

→ "L'expansion de l'Univers s'accélère", avec Vanina Ruhlmann-Kleider sur **cieletespaceradio.fr**

500 supernovae pour voir grandir l'Univers

Les astrophysiciens l'ont compris il y a dix ans : l'expansion de l'Univers s'accélère. Mais quel est le moteur de cette accélération ? Au télescope CFHT d'Hawaï, un marathon cosmologique de cinq ans vient de s'achever, avec l'objectif de lever un coin du voile…

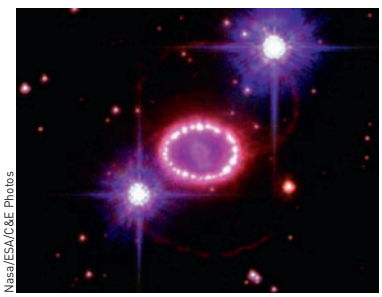
DEUX CENT DEUX nuits d'observation, 7 télescopes mobilisés, plus de 30 chercheurs sur le pont, 500 supernovae épinglées… C'est un véritable marathon cosmologique qui s'est achevé en juin au télescope CFHT à Hawaï. Cinq années durant, dans le cadre du Supernova Legacy Survey (SNLS), le télescope de 3,60 m a inspecté scrupuleusement les quatre mêmes zones du ciel, à la recherche de supernovae ayant explosé dans les huit derniers milliards d'années de la vie de l'Univers. Objectif ? Mesurer la vitesse et la distance du plus grand nombre possible de Supernovae de type Ia (SNIa), ces supernovae particulières qui, en 1998, ont révélé aux astronomes que l'expansion de l'Univers, loin de ralentir, s'accélérait (lire l'encadré ci-dessous).

"Lorsque nous avons proposé le SNLS, les preuves de l'accélération cosmique ne reposaient que sur quelques dizaines de supernovae, observées avec des instruments différents, se souvient Stéphane Basa, du Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *Avec 10 fois plus d'objets, systématiquement suivis par le même télescope, nous espérions consolider la découverte, et surtout mieux comprendre le moteur de l'accélération, la mystérieuse énergie noire."* Son influence avait-elle évolué avec le temps ou pas ? Sa nature était-elle liée à une étrange quintessence (Zoom) ou à une constante cosmologique introduite

→ Zoom
La quintessence est une forme hypothétique d'énergie noire, répulsive comme la constante cosmologique mais, contrairement à elle, variable au cours du temps.

Les supernovae de type Ia prisées pour leur éclat

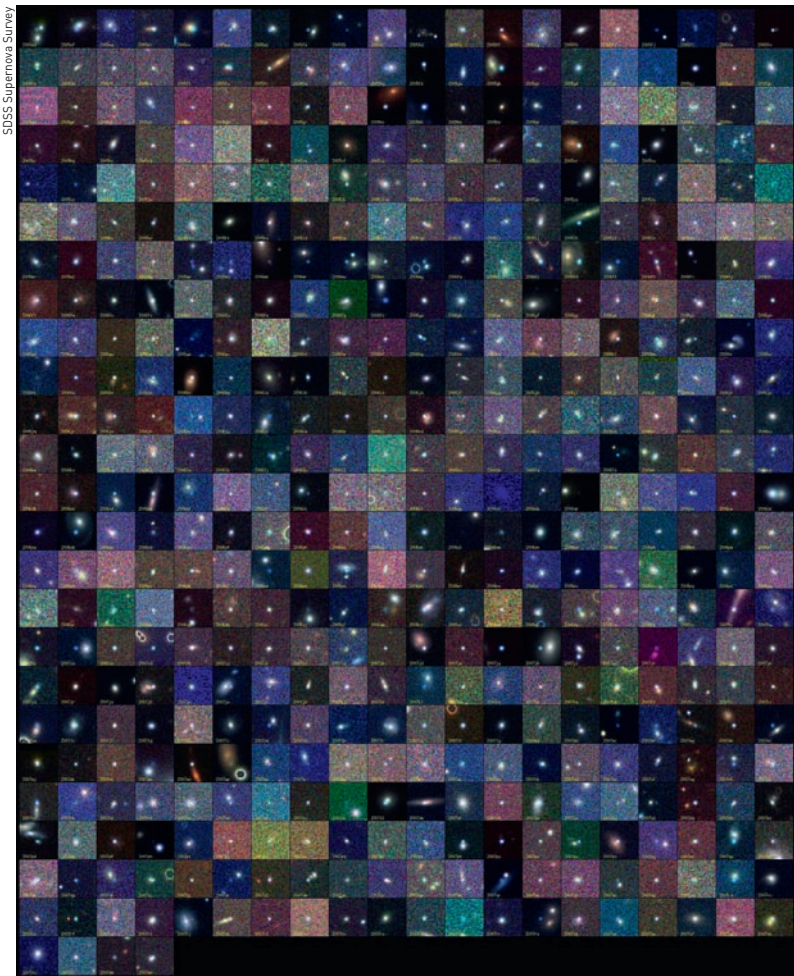
↘ Les cosmologistes ne jurent plus que par elles. Produites par l'explosion de naines blanches qui, absorbant la matière d'une étoile compagne, dépassent la "limite de Chandrasekhar" (1,44 masse solaire), les supernovae de type Ia (SN Ia) sont de parfaites chandelles : à un facteur correctif près, elles atteignent toutes la même luminosité absolue (celle de 5 milliards de soleils). Comparer celle-ci à leur éclat apparent permet donc d'estimer très précisément leur distance ou celle des galaxies qui les hébergent. En 1998, deux équipes américaines se sont rendu compte que les SN Ia lointaines étaient moins brillantes et donc plus éloignées que ne le prédisait la théorie cosmologique. Ils venaient de découvrir que l'expansion de l'Univers était en train de s'accélérer !



Nasa/ESA/C&E Photos

← L'éclat standard des supernovae de type Ia en font d'excellentes alliées pour les astrophysiciens qui sondent l'Univers.

→ Le tableau de chasse du programme SNLS mené au télescope de 3,60 m de Hawaï : près de 500 supernovae découvertes dans des galaxies lointaines, vues telles qu'elles étaient il y a 1 à 8 milliards d'années-lumière.



SDSS Supernova Survey

J.C. Cuillandre/CFHT/C&E Photos

Le télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) trône au sommet du volcan Maunea Kea, à Hawaï. Pendant cinq ans, il a consacré 25 % de son temps d'observation à la recherche de supernovae lointaines.

par Einstein dans ses équations, donc dans celles de la cosmologie, en 1917 ? Pour faire le tri entre ces différentes hypothèses, des données très précises étaient nécessaires.

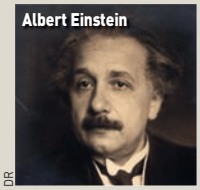
"Aujourd'hui, nous penchons nettement pour la deuxième option", explique Pierre Astier, l'un des responsables du SNLS. La standardisation des observations — leur répétition sur les quatre mêmes zones du ciel tous les trois jours, dans différentes longueurs d'onde, avec la même caméra — a en effet permis de réduire l'incertitude sur l'éclat des supernovae à moins de 1 %. Le débat qui a agité les cosmologistes au début des années 2000 paraît du coup bien caduc. S'ils n'arrivaient pas à s'accorder sur l'éclat standard des SN Ia, et finalement sur leur qualité ou non d'étalon de distance, c'est parce que leurs télescopes n'étaient pas tous rigoureusement calibrés à l'identique ! Les supernovae, elles, sont d'un éclat très précis. Et apparemment, elles ont choisi Einstein : depuis sept milliards d'années qu'a débuté l'accélération de l'expansion, celle-ci semble gouvernée par une constante cosmologique…

"Cela dit, nous comprenons si peu ce que pourrait être cette fameuse constante que ce n'est pas forcément une bonne nouvelle !" reprend Pierre Astier. Les cosmologistes la voient comme une énergie du vide, ce qu'il reste d'énergie à l'espace lorsque toute la matière a été ôtée. Mais lorsque les spécialistes de physique quantique tentent de calculer sa valeur, ils tombent sur un chiffre… 10^{120} fois plus grand [(1)] que celui qu'implique l'accélération •••

Depuis ses débuts voici 7 milliards d'années, l'expansion semble gouvernée par la constante cosmologique d'Einstein

Une brève histoire de l'expansion

De la relativité générale au satellite Cobe, plus de quatre-vingts ans de tatônnements, de recherches et de théories sur l'évolution de notre Univers…



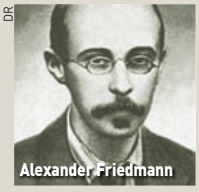
DR

Albert Einstein

1916 **Albert Einstein** publie sa théorie de la relativité générale. Le cadre théorique dans lequel s'ébattent encore les cosmologistes est posé.

1917 Le physicien hollandais **William de Sitter** découvre une étonnante solution des équations d'Einstein : si l'espace-temps était totalement privé de matière, il serait nécessairement en expansion. Einstein trouve que cela n'a *"aucun sens"*.

1917 En Arizona, l'astronome **Vesto Slipher** poursuit ses observations de "nébuleuses spirales", commencées en 1912. Sur 25 objets, 21 semblent s'éloigner de nous. Bizarre…



DR

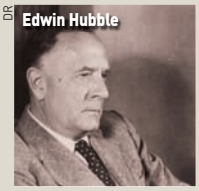
Alexander Friedmann

1922 **Alexander Friedmann** découvre les solutions des équations d'Einstein pour un Univers homogène et isotrope. Elles impliquent que celui-ci est en expansion, mais cela n'intéresse personne.

DR

Georges Lemaître

1927 Dans un article publié en français dans les *Annales de Société Scientifique de Bruxelles*, qui passe donc inaperçu, le physicien et abbé **Georges Lemaître** est le premier à évoquer *"un Univers de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques."* Il va même jusqu'à écrire la loi… de Hubble !



DR

Edwin Hubble

1929 Avec son assistant **Milton Humason**, ancien conducteur de mules sur les pentes du mont Wilson, l'ancien boxeur **Edwin Hubble** montre de façon convaincante que plus une galaxie est lointaine plus elle s'éloigne vite de nous. C'est la loi implacable d'un Univers en expansion ! Albert Einstein lui-même s'y soumet (mais curieusement, Hubble rechigne…).

1931 **Lemaître** introduit l'idée d'un "atome primitif" : *"L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer."* Déjà le big bang !

Suite page 42 →

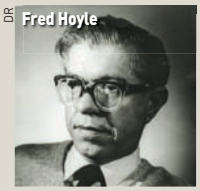
Une brève histoire de l'expansion (suite)

DR

George Gamow

1948 **George Gamow** estime que si l'Univers est en expansion il était nécessairement plus dense et plus chaud dans le passé. Il en tire une prédiction : considérablement refroidie, la lumière "fossile" de cette époque doit encore baigner l'Univers.

DR



Fred Hoyle

1950 À la radio, l'astrophysicien **Fred Hoyle** ridiculise l'idée d'un Univers né dans un "grand boum". Mais comme il est anglais, il dit "big bang". On en parle encore...

DR

Arno Penzias et Robert Wilson

1965 Aux États-Unis, **Arno Penzias** et **Robert Wilson** tentent d'observer le rayonnement micro-onde de la Voie lactée, mais un bruit parasite les gêne. Serait-il dû aux fientes de pigeons qui ont adopté leur radiotélescope ? Non. Après piégeage des volatiles et nettoyage de l'antenne, une conclusion s'impose : c'est le rayonnement prévu par Gamow qu'ils sont en train d'observer. Tant pis pour Hoyle.

DR

Allan Sandage

1976 À quelle vitesse s'étend l'Univers ? Les astrophysiciens n'arrivent pas à s'accorder sur une valeur de la constante de Hubble, qui lie la vitesse et la distance des galaxies. **Allan Sandage**, disciple du maître, défend un chiffre d'environ 50 km/s/Mpc. Mais le Franco-Américain **Gérard de Vaucouleurs** publie une valeur double ! C'est le début d'une longue controverse...

1979 **Stirling Colgate** est le premier à suggérer d'utiliser les supernovae pour sonder l'Univers lointain et mesurer la décélération de son expansion. Il s'y connaît en explosions : quelques années plus tôt, il a participé à la mise au point de la bombe H.

C. Lebedinsky/C&E Photos

George Smoot

1992 Le 23 avril, **George Smoot** annonce que le satellite Cobe a vu les embryons des galaxies dans la carte du rayonnement fossile. L'expansion de l'Univers est définitivement admise. On pense toujours qu'elle décélère.

1998 Deux équipes, qui cherchent à mesurer la décélération de l'Univers, tombent sur un os. En réalité, l'expansion de l'Univers s'accélère ! Seule explication : le cosmos est constitué aux trois quarts d'une forme d'énergie dont personne n'a aucune idée. Si Einstein avait su ça...

R.Gendler/C&E Photos

Lorsqu'elles explosent, les supernovae émettent presque autant de lumière que toute la galaxie qui les héberge (ici M 100). Cette propriété permet de les détecter jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de distance.

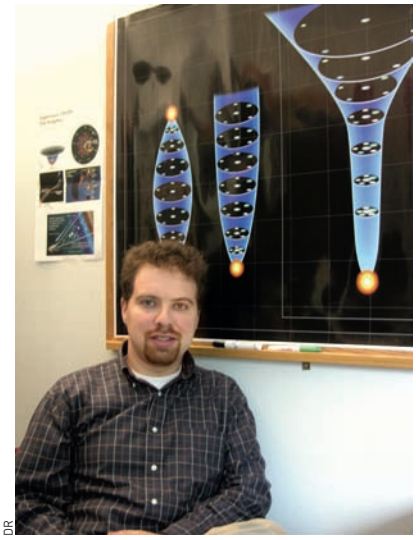
••• cosmique. Incompréhensible. *"Si on m'avait demandé de voter pour une variété d'énergie noire, je n'aurais pas choisi celle-là..."* ironise l'astrophysicien.

Le renfort de nouvelles observations pourrait-il renverser la tendance ? Pas s'il s'agit de supernovae datées de moins de huit milliards d'années — celles auxquelles s'intéresse le SNLS. *"Ce qui nous limite aujourd'hui, ce n'est pas le nombre de supernovae mais l'étalonnage de notre échelle de distance"*, précise Pierre Astier. Pour l'améliorer, il faudrait d'une part affiner encore la mesure de l'éclat apparent des supernovae — en installant par exemple une lumière artificielle de référence au CFHT — et, d'autre part, préciser leur luminosité absolue — en mesurant l'éclat de SN Ia suffisamment proches pour que leur distance puisse être obtenue par d'autres méthodes. *"Nous savons que nos collègues du SDSS* [2] *ont 400 supernovae proches dans leurs données,* explique Pierre Astier. *Nous attendons qu'ils publient leurs résultats pour achever notre propre analyse."* L'Univers existe depuis 13,7 milliards d'années, son expansion s'accélère depuis sept milliards d'années, et cela fait cinq ans que le CFHT observe tout cela… On n'est plus à six mois près. ●

(1) 1 suivi de 120 zéros !

(2) Le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) est un ambitieux relevé d'un quart du ciel avec un télescope de 2,5 m.

Adam Riess, découvreur de l'accélération cosmique


DR

"Nous pensions que l'Univers ralentissait"

Fin 1997. Un jeune universitaire américain de 28 ans, chargé de l'analyse d'un programme d'observation de supernovae lointaines, découvre que l'expansion cosmique s'accélère ! Adam Riess revient pour nous sur cet épisode qui a changé sa vie, et la cosmologie.

Quel était le but de votre recherche de supernovae à grand redshift ?
A.R. : Avec l'équipe du High-z supernova search team, nous cherchions à mesurer la décélération de l'Univers, c'est-à-dire le taux auquel l'expansion cosmique ralentissait. À l'époque, nous pensions que l'attraction de toute la masse contenue dans l'Univers le freinait. En mesurant le taux de ralentissement, nous espérions déduire la masse totale de l'Univers, et donc son destin ultime : soit une expansion ralentie mais éternelle, soit une contraction générale, un big bang à l'envers.

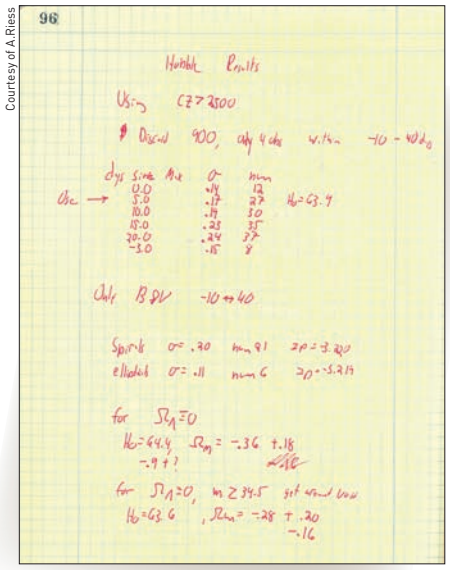
Vous étiez donc loin d'imaginer une accélération cosmique. Quand avez-vous réalisé que vos données impliquaient l'inverse de ce que vous cherchiez ?
A.R. : Fin 1997, j'ai fait un calcul préliminaire dont le résultat a été un choc. Si j'en croyais nos observations de supernovae lointaines, la densité de matière de l'Univers était négative ! Comme cela est impossible, c'est que mes hypothèses de base étaient fausses : au lieu de ralentir, l'expansion de l'Univers semblait au contraire accélérer… Au début, je n'en ai parlé à personne. C'était tellement incroyable que j'avais dû faire une erreur. Et puis, à force de vérifications, j'ai commencé à y croire. J'en ai parlé à mes collègues de l'équipe.

Comment ont-ils réagi ?
A.R. : Par la même incrédulité. Fallait-il publier ou pas ? Certains pensaient que si nous avions fait une erreur ce serait très embarrassant pour la suite… D'un autre côté, je savais qu'une autre équipe travaillait sur le sujet. Elle pouvait très bien arriver aux mêmes conclusions et nous prendre de vitesse ! Finalement, nous avons décidé de publier. Je me souviens très bien de ce que m'a écrit Nick Suntzeff, un membre de l'équipe expert en supernovae : *"Si tu es vraiment sûr de ce que tu avances, mon Dieu, publie-le ! De toute ta carrière, tu n'auras probablement jamais plus de résultat scientifique aussi excitant."* Pour la petite histoire, toutes ces discussions par mail ont eu lieu pendant mon voyage de noces à Hawaï…

Vos résultats ont-ils été facilement acceptés par les cosmologistes ?
A.R. : Oui, car Saul Perlmutter et son équipe, engagés dans la même recherche que nous, sont très vite arrivés au même résultat. Nous ne pouvions pas nous être tous trompés. Fin 1998, le résultat de nos deux équipes a été qualifié de *"percée scientifique de l'année"* par le magazine *Science*.

Désormais, quels sont vos projets ?
A.R. : Je suis impliqué dans Pan-STARRS [1], un télescope de 1,8 m dédié à la surveillance du ciel, et dont les observations doivent débuter cette année. Comme il observera la totalité de la voûte céleste plusieurs fois par mois, il devrait détecter 10 000 supernovae. Je fais aussi partie de l'équipe d'Adept [2], un télescope spatial infrarouge de 1,1 m dont l'étude de conception est en cours. Il devrait découvrir un millier de supernovae lointaines et nous permettre de mieux comprendre l'histoire de l'accélération cosmique. Dans l'étude de l'énergie noire, tout commence vraiment maintenant ! ●

(1) Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System.
(2) Advanced Dark Energy Physics Telescope.


Courtesy of A.Riess

Cette page, extraite du cahier de notes d'Adam Riess, montre les premiers calculs du chercheur sur la fiabilité des supernovae découvertes par son équipe. Plutôt qu'un ralentissement, elles impliquaient en effet une accélération cosmique !

Les 10 questions que vous vous posez sur l'expansion de l'Univers

Vous vous êtes interrogé un jour sur le destin de l'Univers ? Alors vous y avez sans doute perdu votre latin… Dans quoi le cosmos s'étend-il ? Son expansion est-elle infinie ou s'arrêtera-t-elle un jour ? Qu'est-ce qui l'alimente ? Pour tenter d'y voir plus clair, réponses aux questions que l'on se pose le plus souvent.

Nasa/ESA/C&E Photos

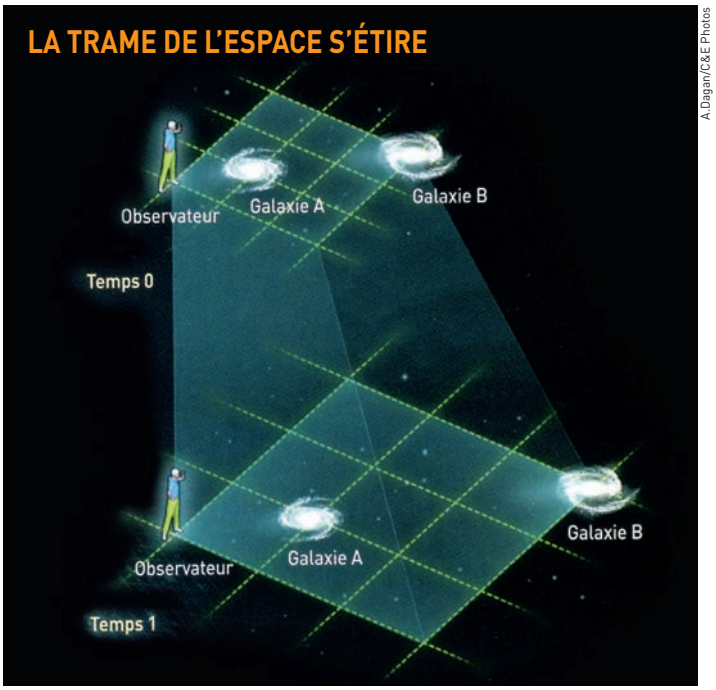
L'Univers tel que nous le voyons n'a pas toujours existé, et il évolue sans cesse. Chaque seconde qui passe éloigne les galaxies lointaines les unes des autres. Et les cosmologistes sont bien en peine de pouvoir dire comment tout cela finira.

1 Dans quoi l'Univers se dilate-t-il ?

Dans rien ! Contrairement à l'intuition commune — et à ce que suggère parfois la représentation de notre Univers comme un ballon de baudruche qui se gonfle —, le cosmos ne se dilate pas dans un espace plus vaste, qui serait, lui, figé et absolu. Nos trois dimensions ne possèdent donc pas de bords progressant à grande vitesse… C'est tout à fait contraire à notre expérience quotidienne, et pourtant, depuis les travaux de Carl Friedrich Gauss au début du XIXe siècle, les mathématiciens savent qu'un espace quelconque n'a pas besoin d'un espace plus vaste pour exister. L'Univers ne fait pas exception à cette règle. De plus, et toujours en contradiction avec notre intuition, *"l'espace, à grande échelle, ne peut pas être statique"* souligne Alain Riazuelo. Les équations d'Einstein, qui lient la géométrie de l'Univers à son contenu en énergie, montrent que l'équilibre parfait est impossible. L'espace est un lieu où deux objets immobiles, qui ne sont pas liés par une force quelconque, sont condamnés à s'éloigner l'un de l'autre, comme emportés par deux tapis roulants tournant en sens inverse. ○

2 La Terre s'éloigne-t-elle du Soleil sous l'effet de l'expansion cosmique ?

Absolument pas, car la force gravitationnelle qui lie les planètes au Soleil est largement suffisante pour contrer l'expansion universelle. Pour que celle-ci prenne le dessus, il faudrait que la Terre ne soit plus soumise qu'à l'attraction d'un Soleil éloigné de… plusieurs centaines d'années-lumière ! L'expansion de l'Univers est si faible qu'elle est incapable de faire enfler les amas de galaxies, d'éloigner les étoiles les unes des autres ou de dilater les systèmes planétaires… *"Si l'on considère que l'Univers est une toile élastique qui s'étire, alors les galaxies sont des pièces de monnaie collées dessus : elles sont emportées par la toile, mais elles sont bien trop rigides pour être déformées"* explique Alain Riazuelo. Bien entendu, ce qui est vrai pour de vastes ensembles liés par la gravitation l'est encore plus pour les objets soutenus par les forces électromagnétique (la Terre, les humains) ou nucléaire (les atomes). Nous ne sommes pas en expansion ! ○



A.Dagan/C&E Photos

Mêmes si elles étaient parfaitement fixes dans l'Univers, deux galaxies suffisamment éloignées s'écarteraient l'une de l'autre sous l'effet de l'expansion cosmique. Car, à la manière d'une toile élastique, c'est l'espace lui-même qui s'étire.

3 Les galaxies emportées par l'expansion peuvent-elles s'éloigner plus vite que la lumière ?

Oui, mais cela n'a rien de choquant : la vitesse de récession des galaxies n'est pas liée à un mouvement dans l'espace, mais à l'expansion de l'espace lui-même ! Il ne s'agit donc pas d'une véritable vitesse. En réalité, les astronomes n'ont aucun moyen de mesurer directement la vitesse d'une galaxie lointaine. Seul le décalage vers le rouge de la lumière qu'elle émet (appelé "redshift") leur est accessible. Ensuite, tout est affaire d'interprétation… En 1929, lorsque Hubble met en évidence une relation de proportionnalité entre la distance des galaxies et leur décalage vers le rouge, il ne fait aucun doute pour lui que ce dernier est provoqué par un effet Doppler. De même que le ton d'une sirène qui s'éloigne devient plus grave, c'est parce que les galaxies foncent à travers l'Univers qu'elles rougissent. Hubble pense alors que l'Univers est statique et que les galaxies sont réellement animées d'un mouvement à travers un espace figé. Mais comme ce mouvement est d'autant plus rapide que la galaxie est éloignée, il se heurte •••

Nasa/C&E Photos

Contrairement à une idée fausse trop répandue, la Terre ne s'éloigne pas et ne s'est jamais éloignée du Soleil sous l'effet de l'expansion cosmique.

Les galaxies peuvent fort bien s'éloigner de nous à la vitesse de la lumière tout en faisant du sur-place

••• immédiatement à un grave problème : comment éviter qu'au-delà d'une certaine distance, la vitesse de récession d'une galaxie ne dépasse pas la sacro-sainte vitesse de la lumière ? Cette question ne se pose pas aux cosmologistes, qui voient dans le redshift des galaxies lointaines la preuve d'une expansion de l'Univers. Puisque c'est la trame de l'Univers qui s'étire, les galaxies peuvent fort bien s'éloigner de nous tout en faisant du sur-place ! Le décalage de la lumière vers le rouge est alors interprété comme un effet de l'expansion de l'espace : pendant leur long trajet jusqu'à nous, la longueur d'onde des photons s'étire du bleu (courte longueur d'onde) vers le rouge (grande longueur d'onde). Dans les faits, tous les objets dont le redshift dépasse 1,5 sont emportés plus vite que la lumière. ○

4 Toutes les galaxies s'éloignent-elles de nous ?

Eh bien… non ! L'expansion a beau être identique partout, certaines galaxies se rapprochent de nous, à commencer par notre majestueuse voisine, la galaxie d'Andromède, avec laquelle nous fusionnerons peut-être dans quelques milliards d'années. L'explication de ce paradoxe ? Les mouvements intrinsèques dont les galaxies sont animées, sous l'emprise gravitationnelle de leurs voisines. D'une valeur typique de quelques centaines de kilomètres par seconde, ces vitesses ne deviennent négligeables face à l'expansion que pour des galaxies séparées de quelques dizaines de millions d'années-lumière. ○

5 L'expansion est-elle infinie ou s'arrêtera-t-elle un jour ?

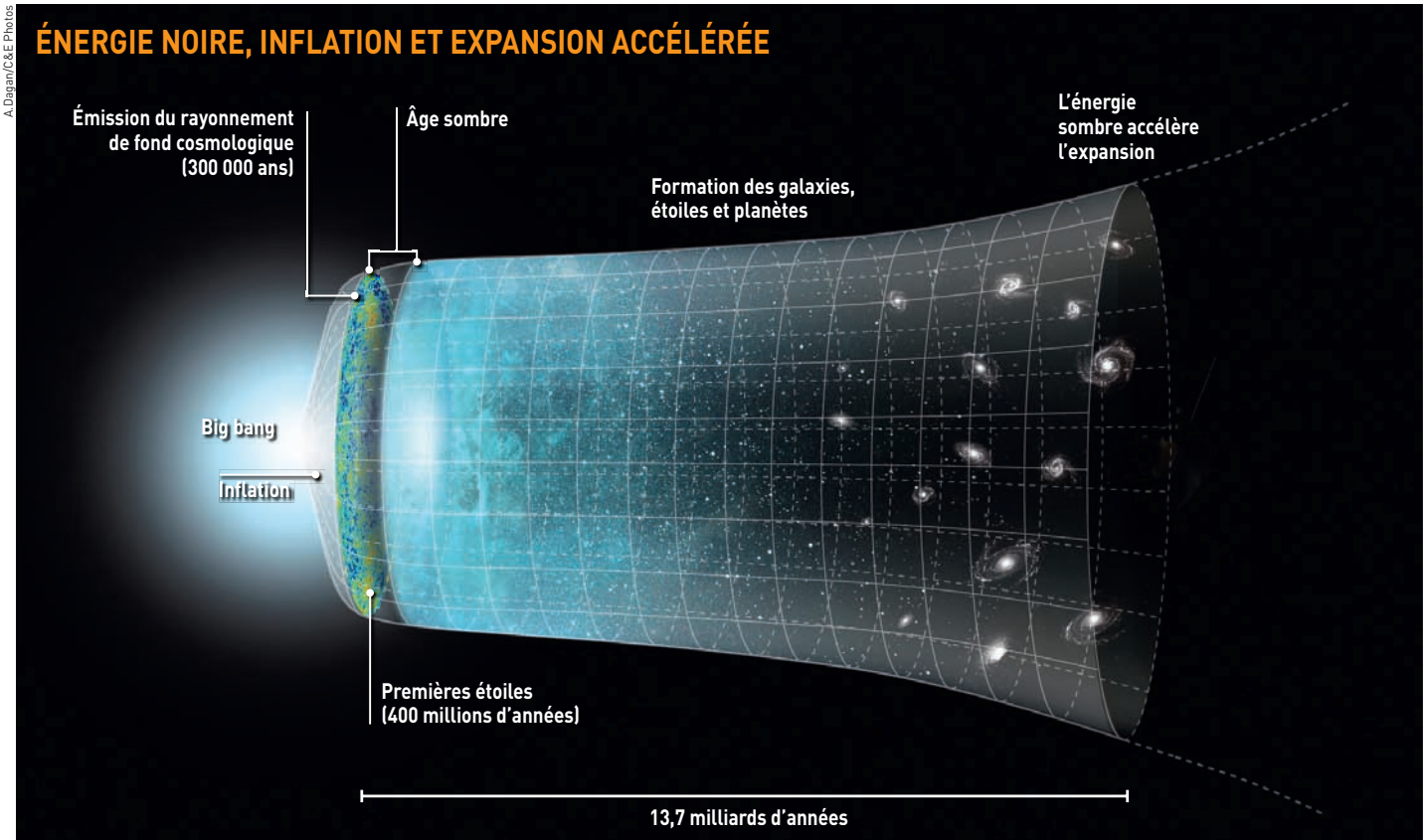
Voici une dizaine d'années, la réponse à cette question était très simple : tout dépend de la densité de matière de l'Univers. Les astrophysiciens pensaient qu'au-delà d'une certaine valeur, baptisée "densité critique", l'attraction de la matière sur elle-même pouvait contrecarrer l'expansion cosmique, l'inverser finalement, et conduire à un "big crunch" (un big bang à l'envers). Dans un tel Univers, l'espace à très grande échelle obéissait aux lois de la géométrie hyperbolique. En deçà de la densité critique, l'Univers devait au contraire, tout en ralentissant, s'étendre indéfiniment, sa géométrie étant alors sphérique. Dans le cas intermédiaire d'un Univers "critique", subordonné aux lois de la géométrie plane qui nous

D. De Martin/C&E Photos

La galaxie d'Andromède, la plus proche des grandes spirales, est en interaction gravitationnelle avec la Voie lactée, et ne s'écarte pas de nous. Dans quelques milliards d'années, elle pourrait même fusionner avec la Voie lactée.

A. Dagan/C&E Photos

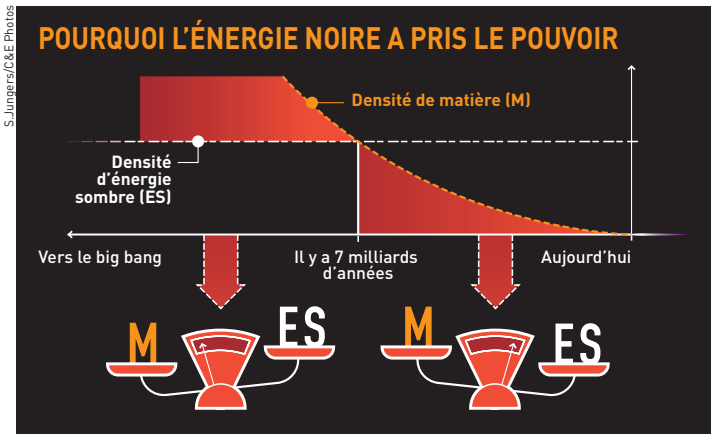
ÉNERGIE NOIRE, INFLATION ET EXPANSION ACCÉLÉRÉE



Ce schéma représente l'expansion de l'Univers. Lors des premières fractions de seconde après le big bang, celle-ci a subi un "coup d'accélérateur" brutal appelé inflation. Ensuite, elle s'est poursuivie à un rythme à peu près constant, voire en ralentissant. Aujourd'hui, elle s'accélère à nouveau, mais infiniment moins vite qu'au cours de l'inflation. Ces deux épisodes ont-ils une cause commune ? Mystère.

S. Jungers/C&E Photos

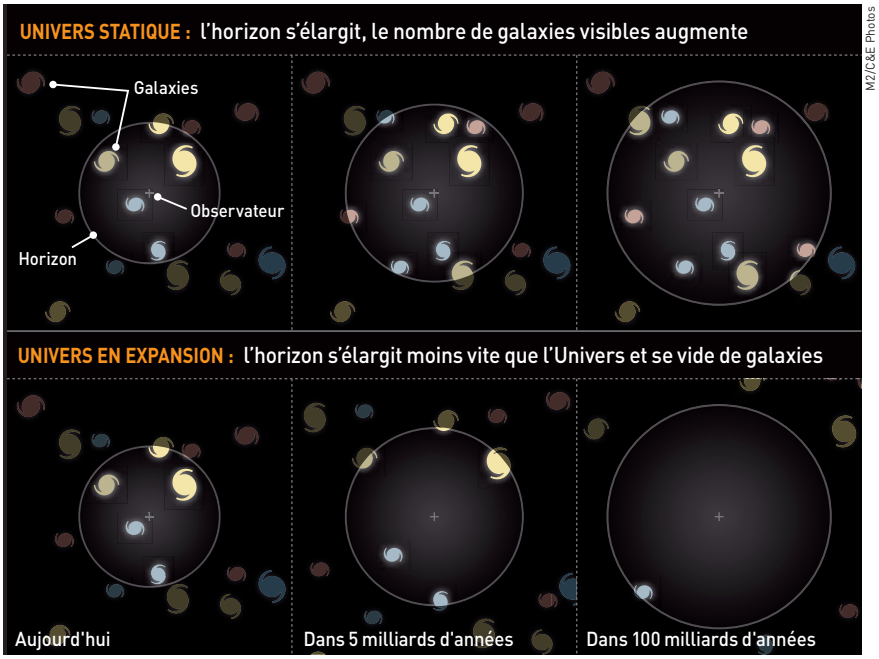
POURQUOI L'ÉNERGIE NOIRE A PRIS LE POUVOIR



L'énergie noire, répulsive, semble avoir eu une densité constante au cours du temps. La matière, au pouvoir d'attractif, s'est au contraire diluée dans l'Univers en expansion et ne cesse de perdre du terrain depuis 7 milliards d'années. Résultat : l'expansion s'accélère.

est familière, l'expansion devait s'arrêter au bout d'un temps... infini. Mais depuis 1998 et la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, les choses se sont compliquées… Les cosmologistes ont réalisé qu'en plus de la matière, une autre forme d'énergie[1] pesait lourdement sur le destin du cosmos. Une forme d'énergie inconnue — et donc qualifiée de "noire" — qui, elle, serait répulsive ! *"Aujourd'hui, le destin de l'Univers n'est plus uniquement dicté par la quantité de matière qu'il renferme"* explique Alain Riazuelo. Non seulement la notion de densité critique s'applique désormais à la densité totale d'énergie cosmique (matière + énergie noire), mais en outre, pour une densité totale donnée, il faut savoir de combien l'énergie noire est répulsive pour pouvoir prédire le comportement de l'expansion ! *"Actuellement, les observations indiquent que l'Univers a tout juste la densité critique,* signale Alain Riazuelo. *Sa géométrie est plane. Il semble aussi que l'énergie noire, contrairement à la matière, ne se dilue pas dans l'Univers à mesure qu'il s'étend."* Puisque chaque seconde qui passe renforce l'avantage de cette énergie inconnue sur la matière, l'expansion accélérée devrait donc perdurer à jamais. Jusqu'à disloquer les amas de galaxies, arracher les planètes à leurs étoiles et finalement faire éclater les atomes, dans un grand déchirement que les cosmologistes appellent le "big rip" ? *"Seulement si la répulsion augmente extrêmement vite avec le volume de l'Univers",* répond le cosmologiste. Apparemment, ça ne s'est pas passé comme ça dans les sept derniers milliards d'années, mais pour pouvoir prédire quoi que ce soit, il faudrait connaître la nature de l'énergie noire ! C'est aujourd'hui la plus importante question de la cosmologie. ○

(1) En vertu de la célèbre équation $E=mc^2$, due à Einstein, la matière est une forme d'énergie.



M2/C&E Photos

La vitesse finie de la lumière et l'expansion de l'Univers ont d'étonnantes conséquences. Par exemple, celle de rétrécir le champ d'Univers qui est accessible à notre regard. Nous sommes condamnés à la solitude !

6 Y-a-t-il un lien entre l'accélération de l'expansion et l'épisode d'inflation du tout début de l'Univers ?

Rien n'est moins sûr ! Même si l'inflation est en effet une phase d'expansion accélérée, qui a agrandi l'Univers d'un facteur au moins égal à 10^{26} (un 1 suivi de 26 zéros), elle a commencé 10^{35} secondes (0,00000000000000000000000000000000001 s) après le big bang et a duré une infime fraction de seconde. L'accélération actuelle, elle, dure depuis sept à huit milliards d'années et a seulement décuplé le volume de l'Univers. Pour Alain Riazuelo, *"il est très difficile de leur trouver une cause commune, d'autant qu'entre ces deux phases l'expansion a été décélérée !"*.

7 Que signifie la constante de Hubble, qui vaut 71 km/s/Mpc ?

La constante de Hubble, notée H^0, est une mesure du taux d'expansion actuel. Elle signifie que, chaque seconde, la distance entre deux points de l'espace éloignés d'un mégaparsec (Mpc) (1) s'accroît de 71 km. Elle peut aussi être interprétée ainsi : la vitesse de récession d'une galaxie éloignée de 1 Mpc vaut 71 km/s. Mais attention : en réalité, les effets de l'expansion ne se font sentir que sur des distances bien supérieures au mégaparsec. À cette échelle, ils sont généralement contrés par l'attraction gravitationnelle.

(1) 1 million de parsecs, soit plus de 3 millions d'années-lumière.

8 Pourra-t-on un jour voir tout l'Univers ?

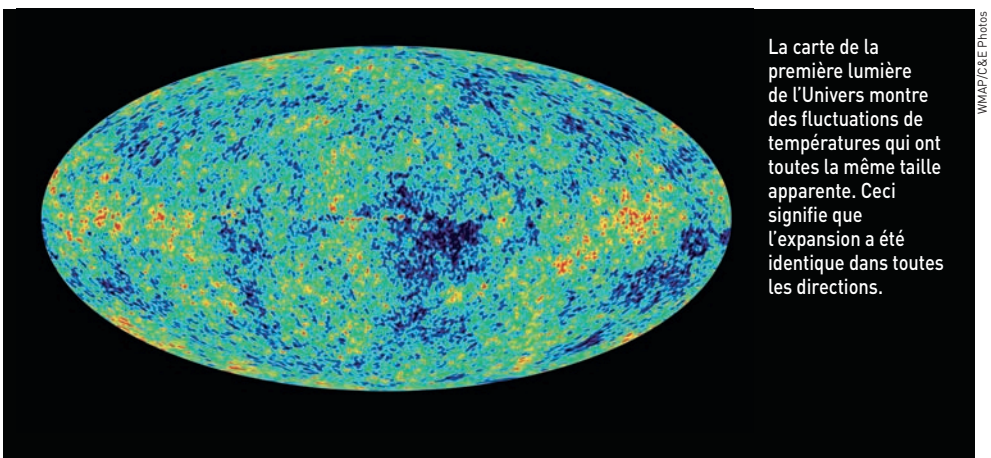
C'est mal parti... Puisque la lumière voyage à une vitesse finie (300 000 km/s), nous n'avons accès qu'à une portion finie de l'Univers, celle dont la lumière a eu le temps de nous parvenir. Bien sûr, cet "horizon cosmologique" grandit avec le temps : si l'Univers était statique, nous pourrions voir des galaxies de plus en plus lointaines à mesure que le temps passe. Et peut-être tout l'Univers, s'il n'était pas infini ! Mais l'Univers est en expansion accélérée... Notre horizon a beau s'agrandir, il le fait moins vite que le cosmos ne se dilate. Résultat : la portion d'Univers accessible à nos télescopes diminue avec le temps. Dans 100 milliards d'années, si nos descendants observent encore le ciel, ils n'y verront plus aucune galaxie...

9 Quel est le moteur de l'expansion de l'Univers ?

Une pichenette ! Ou, plus scientifiquement, l'impulsion initiale donnée au moment du big bang. Aujourd'hui, sa nature demeure totalement mystérieuse car les astrophysiciens ne possèdent pas une bonne théorie pour l'étudier. Ils sont un peu comme ces médecins des siècles passés qui, sachant parfaitement décrire la croissance d'un être humain, butaient sur le mystère de la naissance. De même que les lois de la biologie moléculaire, qui gouvernent l'ADN, n'ont rien à voir avec celles de la croissance, c'est sans doute un processus fort différent de l'expansion cosmique qui explique son impulsion initiale.

10 L'expansion est-elle identique dans toutes les directions ?

Heureusement pour les cosmologistes ! Si l'expansion n'était pas identique partout, les équations décrivant l'évolution de l'Univers deviendraient vite inextricables... Aujourd'hui, l'étude du cosmos repose sur le principe cosmologique selon lequel l'Univers à grande échelle est homogène et isotrope. En particulier, il doit s'étendre partout de la même manière. *"La preuve la plus convaincante que l'expansion est isotrope nous vient de l'étude du fond diffus cosmologique"*, explique Alain Riazuelo. En effet, sur la carte de la plus vieille lumière de l'Univers, les "grumeaux" de matière ont partout la même taille. *"Si l'expansion avait été plus lente ou plus rapide dans une direction, ils nous apparaîtraient plus gros ou plus petits."*



WMAP/C&E Photos

La carte de la première lumière de l'Univers montre des fluctuations de températures qui ont toutes la même taille apparente. Ceci signifie que l'expansion a été identique dans toutes les directions.