Changement de rythme dans l'expansion de l'Univers

Un premier rôle pour le côté obscur

Nathalie Palanque-Delabrouille (nathalie.palanque-delabrouille@cea.fr) et Christophe Yèche
Service de physique des particules, Irfu, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

L'évolution et la composition de l'Univers sont deux caractéristiques apparemment indépendantes et pourtant intrinsèquement liées.

La première nous apprend que l'Univers est en expansion à un rythme variable, la seconde qu'il est constitué majoritairement de composantes non lumineuses et de nature inconnue, baptisées « matière noire » et « énergie noire ».

Afin d'apporter de nouvelles pierres à l'édifice cosmologique, les chercheurs s'attachent à mieux comprendre comment évolue l'expansion de notre Univers au moyen d'expériences de plus en plus ambitieuses. Tirant profit de la dualité entre géométrie et contenu de l'Univers, ils quantifient ainsi toujours plus précisément le rôle joué par les composantes sombres, espérant en dévoiler un jour la nature.

Un Univers en expansion accélérée

Si l'on exclut Einstein qui avait en son temps suggéré l'hypothèse d'une constante cosmologique pour de mauvaises raisons (il cherchait à rendre l'Univers statique), les chercheurs se sont longtemps accordés à dire que les observations de notre cosmos pouvaient toutes être interprétées en ne faisant appel qu'à de la matière et à une faible quantité de rayonnement. L'expansion de notre Univers était connue depuis 1929, lorsque l'astronome Edwin Hubble constata que les galaxies s'éloignent toutes les unes des autres. Sous l'effet attractif de la gravité, cette expansion de l'espace semblait ne pouvoir que ralentir. Cette conviction est brusquement ébranlée en 1998, quand deux équipes indépendantes étudient des supernovae lointaines précisément dans le but de mesurer ce ralentissement et démontrent, sans ambiguïté, que l'expansion de notre Univers allait au contraire en s'accéléralant.

Tentons de comprendre ce dont il s'agit. Les supernovae thermonucléaires ou SNIa (par opposition aux supernovae gravitationnelles ou SNII, plus fréquentes, issues d'étoiles massives s'effondrant sur elles-mêmes), trouvent leurs précurseurs dans les systèmes stellaires constitués d'une étoile peu dense, telle une géante rouge, et d'une naine blanche, petit astre ayant achevé sa phase de combustion nucléaire. La supernova résulte de l'explosion cataclysmique de la naine blanche lorsque sa masse devient trop importante, suite à l'accrétion de la matière provenant de l'étoile compagnon, pour que l'équilibre gravité-pression soit maintenu. L'explosion se produisant à une masse prédéfinie de 1,4 fois la masse du Soleil, la luminosité émise est rigoureusement déterminée et la

mesure de la luminosité observée est donc un indicateur direct de la distance de l'objet (d'après la loi de décroissance du flux comme l'inverse du carré de la distance). Par ailleurs, des observations spectroscopiques permettent de déterminer le décalage spectral $z = (\lambda_{\text{reçu}} - \lambda_{\text{émis}}) / \lambda_{\text{émis}}$ entre les longueurs d'onde λ reçues et émises, communément appelé "redshift" de la supernova. En effet, conséquence directe de l'expansion de l'Univers, les raies d'absorption caractéristiques des éléments chimiques qui composent étoiles et galaxies apparaissent à des longueurs d'onde décalées vers le rouge par rapport à celles qu'on leur connaît en laboratoire, de façon analogue à l'effet Doppler pour le son lors du déplacement relatif entre émetteur et récepteur. Pour les supernovae les plus proches, on retrouve la fameuse loi de Hubble, relation linéaire entre *redshift* et distance d d'un astre, $z = H_0 d/c$, où H_0 est la constante de Hubble et c la vitesse de la lumière. Par conséquent, plus un objet est éloigné de nous, plus son *redshift* est grand et plus la lumière qui nous en parvient a été émise tôt dans l'histoire de l'Univers. À plus grande distance, cette relation n'est plus linéaire, et l'écart à la linéarité est dicté par le contenu énergétique de l'Univers (matière, rayonnement...). Le paramètre $H(z)$ qui décrit le taux d'expansion de l'Univers n'est plus constant mais dépend du *redshift* ; $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$ est la valeur qu'il prend aujourd'hui. Conformément à l'intuition, un Univers composé exclusivement de matière, freiné par la gravitation, verrait son taux d'expansion décroître avec le temps. Contre toute attente, les observations de supernovae ont toutefois indiqué une **accéléralion** et non une décéléralion de cette expansion, impliquant une révision en profondeur de notre compréhension du cosmos.

Le télescope de 2,5 m de diamètre du SDSS à Apache Point, au Nouveau-Mexique, vu au crépuscule.

Énergie noire

En cosmologie, c'est la révolution, et trois prix Nobel (Brian Schmidt et Adam Riess pour le projet High-z Supernova Search Team, et Saul Perlmutter pour le Supernova Cosmology Project [1]) viennent immédiatement couronner cette surprenante découverte. Mais tout reste encore à comprendre. Faut-il développer une nouvelle théorie de la gravité qui ne se réduirait à la relativité générale que dans certaines limites particulières, ou considérer une forme d'énergie nouvelle, baptisée « énergie noire », de pression négative et agissant sur l'espace comme on pourrait imaginer que le ferait une gravité répulsive ? Cette énergie noire est-elle de densité constante pendant toute l'histoire de l'Univers, à l'instar de la constante cosmologique qu'Einstein avait introduite dans ses équations, ou est-ce une forme plus complexe d'énergie ? À elle seule, l'énergie noire est aujourd'hui invoquée pour représenter 73% du contenu énergétique de notre Univers (fig. 1), soit plus que la matière (qu'il s'agisse de matière baryonique ou d'une matière noire non identifiée à ce jour mais répondant à la gravitation de façon identique à la matière habituelle [2])

ou que le rayonnement (tels les photons), dont les densités diminuent (par dilution) avec l'expansion de l'Univers contrairement à celle de l'énergie noire. Pourtant, l'énergie noire n'en demeure pas moins étonnamment furtive et n'est incluse que depuis peu dans le panorama des composantes du cosmos.

Afin d'en cerner les caractéristiques, de nombreuses expériences étudient l'histoire

de l'expansion de l'Univers et de son contenu énergétique. Parmi elles, le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) qui, depuis l'observatoire d'Apache Point au Nouveau-Mexique, cartographie la répartition en 3D de plus d'un million de galaxies et de près de deux cent mille quasars, afin d'y déceler l'empreinte de l'Univers primordial et d'y découvrir les secrets de sa composition.

>>>

1. Répartition de la densité d'énergie de l'Univers après la découverte de l'accélération de son expansion, grâce à l'étude des supernovae lointaines. L'énergie noire en est aujourd'hui la composante majoritaire. La matière visible (étoiles, planètes...) n'en représente que 0,4%.

Structures de l'Univers sous le regard inquisiteur de SDSS

Depuis une quinzaine d'années, le télescope de 2,5 m de diamètre du SDSS au Nouveau-Mexique scrute un quart de la voûte céleste, autrement dit quasiment tout le ciel extragalactique non obstrué par la Voie lactée, observable depuis un point quelconque de la Terre. Après plusieurs années consacrées à l'obtention des images qui permettent de connaître la luminosité de l'ensemble des sources détectables compte tenu des limites techniques du télescope (en termes de flux, de qualité optique et de temps d'exposition en accord avec les objectifs du projet), l'instrument est à présent métamorphosé en spectrographe. Il permet l'obtention simultanée des spectres électromagnétiques de mille objets préalablement sélectionnés grâce aux observations photométriques. De ces spectres sont extraits les *redshifts* des sources, eux-mêmes liés à leur distance grâce à la loi de Hubble, ou plus précisément à son extrapolation aux objets lointains. De quelle façon un tel relevé va-t-il nous aider à améliorer notre connaissance de l'Univers ?

D'après les modèles cosmologiques actuels, la répartition de toute la matière de l'Univers – galaxies, amas de galaxies, mais aussi filaments ou nuages d'hydrogène – est héritée de l'Univers primordial. Le moteur de l'évolution de ces structures dans le temps est la gravitation, dont l'action est différente sur la matière (qu'elle soit lumineuse ou sombre) et sur l'énergie noire. Inversement, il est donc possible, en étudiant la répartition de la matière, d'en déduire des propriétés de l'Univers comme, par exemple, sa composition ou son taux d'expansion.

L'information cosmologique la plus précise se trouverait dans l'étude de la répartition de la matière noire, puisque celle-ci est bien plus abondante que la matière baryonique. Étant cependant, par définition, non lumineuse (c'est bien pour cela qu'elle est ainsi dénommée), on ne peut la cartographier directement. Une approche indirecte consiste à reconstruire les contours de densité de la matière noire à partir des déformations gravitationnelles qu'elle engendre sur des galaxies en arrière-plan : c'est le principe des lentilles gravitationnelles que nous ne détaillerons pas ici [2].

Une autre approche est de se focaliser sur les astres visibles. Comme le confirment

les simulations numériques de notre Univers, matière baryonique et matière noire sont distribuées de façon comparable. On peut donc étudier l'une pour comprendre l'autre. Les chercheurs choisissent dans un premier temps de se concentrer sur des galaxies anciennes, rouges et particulièrement lumineuses, les LRG (pour "luminous red galaxies"). Ces LRG se trouvent au cœur des amas de galaxies et présentent l'intérêt d'être de bons marqueurs de la densité de matière. Leur *redshift*, indicateur de distance comme nous l'avons vu plus haut, est déterminé à partir de leur spectre lumineux. La lumière qui nous en parvient a été émise il y a près de quatre milliards d'années pour les galaxies sélectionnées dans les premières études (*redshift* moyen de 0,35) et jusqu'à six milliards d'années pour celles de la phase la plus récente du projet (*redshift* de 0,57), soit près de la moitié de l'âge de l'Univers (estimé à 13,8 milliards d'années). Le *redshift* vient compléter les deux coordonnées transverses données par la position de la LRG sur la voûte céleste. La carte en 3D peut ainsi être dressée au fil des observations.

En 2005, lors des premiers pas dans cette quête, la carte obtenue à partir de cinquante mille galaxies a conduit à la première indication d'une distance de séparation privilégiée de l'ordre de 150 megaparsecs (1 parsec, ou pc, équivaut à 3,3 années-lumière) dans la répartition des galaxies (fig. 2a). L'excès était à peine perceptible [3] (d'une signification statistique de $2,5\sigma$ seulement, soit une probabilité de 98,9% de fiabilité,

alors que l'on considère qu'il faut au moins 5σ , soit une probabilité d'erreur inférieure à un millionième pour permettre l'annonce d'une découverte). Aujourd'hui, avec plus d'un million et demi de LRG, ce n'est plus une simple indication, c'est un signal indubitable. D'où vient cette distance privilégiée ? Pourquoi les galaxies ne se forment-elles pas aléatoirement dans l'Univers ? Que nous apprend ce résultat sur la matière et l'énergie noires ?

Des ondes sonores qui font vibrer les baryons (ou BAO, pour Baryon Acoustic Oscillations)

Dans le plasma chaud et dense de l'Univers primordial, l'attraction gravitationnelle des régions les plus denses est compensée par la pression radiative du gaz ionisé. Cette pression est si importante que les pics de surdensité, que l'on pense issus de fluctuations quantiques dans les premières secondes de l'Univers, se propagent en oscillant telles des ondes sonores au lieu de croître sous l'effet de la gravité. En raison de son expansion, l'Univers se refroidit au fil du temps et à l'âge de 380 000 ans, sa température chute en dessous du seuil minimal pour le maintenir à l'état de plasma ionisé : les électrons s'associent aux protons pour former des atomes d'hydrogène, et le plasma initial se mue brutalement en un milieu neutre. La lumière qui diffusait inlassablement sur les électrons est à présent libre de se propager. Détectée par le satellite Planck, elle nous apporte

2. Mise en évidence expérimentale d'une distance caractéristique imprimée sur la trame cosmique de l'Univers.

(a) Fonction de corrélation $\xi(r)$ de la répartition des galaxies rouges de l'Univers, correspondant à l'histogramme des distances r entre une galaxie quelconque et les autres galaxies du relevé.

(b) Idem pour l'hydrogène intergalactique repéré par les absorptions de la forêt Lyman- α (voir la section « Les quasars traquent l'expansion de l'Univers »).

Les ondes acoustiques qui se sont propagées dans l'Univers primordial engendrent un pic à 150 Mpc (soit à 105 Mpc/h sur la figure, où h , valeur actuelle de la constante de Hubble en unité de 100 km/s/Mpc, est égal à 0,7 environ).

3. Vue d'artiste de l'empreinte des BAO (Baryon Acoustic Oscillations, sphères grises) sur la répartition des galaxies (points blancs) dans l'Univers. Au centre de chaque sphère se trouve le pic initial de surdensité, essentiellement composé de matière noire. La ligne blanche donne la taille des sphères.

l'image des fluctuations de température que les oscillations du plasma ont engendrées. La distance sur laquelle les ondes acoustiques ont eu le temps de s'étendre avant de se retrouver figées est déterminée par le produit de la vitesse du son dans le plasma (vitesse de la lumière divisée par racine carrée de 3) par l'âge de l'Univers à ce moment-là (380 000 ans), soit une distance d'environ 150 Mpc aujourd'hui, compte tenu de l'expansion de l'Univers. Ainsi, autour de chaque pic initial de surdensité essentiellement composé de matière noire, donc qui ne se propage pas, se trouve un petit excès concentrique causé par l'onde de photons et de matière baryonique qui en est issue. Par la suite, chacune de ces surdensités est plus à même d'attirer gravitationnellement la matière environnante, si bien qu'aujourd'hui ces régions sont celles dans lesquelles il est plus probable de trouver des galaxies (fig. 3). L'effet des oscillations du plasma, ou BAO, est donc aujourd'hui observable dans la distribution des structures de l'Univers. C'est pourquoi les physiciens recherchaient son empreinte dans la distribution des LRG notamment. Pour la repérer, ils ont répertorié la distance séparant chaque galaxie de

toutes les autres. Dans l'histogramme ainsi obtenu, une séparation privilégiée, à la position attendue de 150 Mpc, est clairement visible (fig. 2a), avec une signification statistique excédant 7σ .

Cette distance caractéristique imprimée sur la trame cosmique est un *Graal* pour les chercheurs. À l'instar d'un motif imprimé sur un tissu extensible, la mesure de cette distance étalon à différentes époques est un marqueur de l'étirement subi par le tissu, autrement dit de l'expansion de l'Univers, dont le taux dépend de la quantité et de la nature de ses diverses composantes et notamment de la part relative de matière et d'énergie noire. Pour les LRG, par exemple, 10% d'énergie noire en plus diminuerait de 6% le taux d'expansion de l'Univers $H(z)$ au *redshift* de 0,57 où ces galaxies sont observées, et augmenterait de 4% la taille de la distance BAO. Obtenue aujourd'hui avec une précision de l'ordre du pourcent, la mesure des BAO permet de contraindre fortement la quantité d'énergie noire dans l'Univers.

Le projet SDSS s'est à présent diversifié. Les chercheurs ont décidé de mesurer l'évolution du cosmos, non seulement dans la répartition de galaxies rouges et

vieilles, mais également dans celle de galaxies jeunes en pleine activité stellaire, de quasars ultra-lumineux, voire même dans la répartition des nuages ténus d'hydrogène. Depuis 2009, à travers les projets BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) puis eBOSS (extended-BOSS), les chercheurs explorent l'Univers de plus en plus lointain et de plus en plus jeune. Nous avons dit que la longueur de notre règle étalon portait l'empreinte de l'expansion de l'Univers. L'historique de sa taille apparente est donc un remarquable indicateur de l'évolution des composantes de notre cosmos. C'est pourquoi le SDSS étend son domaine d'étude à des astres permettant de sonder toujours plus loin dans le passé.

Les quasars traquent l'expansion de l'Univers

L'histoire de l'expansion de l'Univers ne se résume pas à l'accélération récente découverte grâce aux supernovae et aux mesures des ondes baryoniques acoustiques. La phase d'accélération ne remonte en effet qu'aux six derniers milliards d'années environ, alors que durant les premiers huit milliards d'années ou presque, l'expansion,

4. Transmission de la lumière d'un quasar (en haut à gauche) au télescope SDSS (en bas, à droite). La lumière du quasar distant (les points rouges à gauche) est partiellement absorbée lorsqu'elle traverse des nuages d'hydrogène intergalactique (au centre). Ce phénomène crée une « forêt » de raies d'absorption visible, sur le spectre en encart, dans la région à gauche du pic intense provenant de l'émission du quasar lui-même, et qui permet de dresser une carte 3D du gaz intergalactique.

>>>

freinée par la gravitation, devait ralentir comme prévu dans un Univers alors majoritairement composé de matière. La mesure précise de l'évolution de l'expansion de l'Univers avec le temps étant un formidable outil pour traquer la contribution de l'énergie noire et déterminer l'époque à laquelle elle devient dominante, le SDSS étudie les BAO à diverses époques. Bien que très brillantes, les LRG ne sont toutefois visibles que sur les derniers six milliards d'années-lumière environ. Quels astres vont nous permettre d'explorer l'Univers plus jeune ?

Une avancée considérable a été accomplie en faisant appel à des quasars, objets parmi les plus lumineux de l'Univers : il s'agit de galaxies abritant en leur cœur un trou noir de plusieurs millions, voire plusieurs milliards de fois la masse du Soleil. Le disque d'accrétion qui gravite autour du trou noir central est chauffé à des températures telles que la lumière émise, excédant celles

des galaxies les plus brillantes, est visible à travers tout l'Univers. Le flux perçu en provenance du quasar est encore détectable par SDSS, même après s'être répandu dans l'Univers pendant plus de douze milliards d'années. À cette époque reculée, les quasars sont insuffisamment nombreux pour être utilisés en tant que marqueurs de la matière, comme cela avait été fait pour les LRG. Cependant, jouant le rôle de puissants phares cosmiques, les quasars vont illuminer le milieu intergalactique, et notamment les nuages ténus d'hydrogène gazeux qui s'y trouvent. De densité extrêmement faible, typiquement un million de fois plus petite que celle d'une galaxie (on trouve environ 0,25 atome d'hydrogène par mètre cube aujourd'hui, ce qui, l'Univers étant plus dense par le passé, correspond à quelques atomes par mètre cube à l'époque ici concernée), ce brouillard d'hydrogène n'en est pas moins la forme la plus fréquente sous laquelle se trouve la matière baryonique.

Porte-t-il lui aussi l'empreinte des ondes acoustiques de l'Univers primitif, ou ce signe distinctif est-il réservé aux structures les plus massives ?

Ce sont de nouveaux les spectres mesurés par SDSS qui vont nous apporter la réponse. La lumière émise par le quasar est plus ou moins absorbée selon la densité d'hydrogène neutre intergalactique qui se trouve sur sa trajectoire. L'absorption se produit localement à la longueur d'onde λ caractéristique de la transition électronique la plus courante de l'hydrogène (appelée transition Lyman- α , pour laquelle $\lambda = 121,6$ nm), mais le *redshift* associé au site où cette absorption a lieu imprime le spectre à une longueur d'onde d'autant plus grande que le nuage est lointain. Le spectre du quasar, quand il est finalement observé sur Terre, comporte ainsi une succession de pics d'absorption, nommée « forêt Lyman- α » qui retrace les variations de densité rencontrées sur la ligne de visée

(fig. 4). Le projet SDSS a mesuré les spectres de plus de 170 000 quasars. L'analyse de ces absorptions a permis de réaliser une carte 3D de l'hydrogène dans l'Univers tel qu'il était un à trois milliards d'années après le *Big Bang*. Malgré la faiblesse du signal dans cet Univers si jeune et dans un milieu aussi dilué que le milieu intergalactique, une équipe internationale, emmenée par des chercheurs français du CEA (Saclay) et du CNRS, a réussi à mettre en évidence dans cette carte la même empreinte de la règle étalon (fig. 2b) que celle identifiée avec les LRG [4]. Comme illustré sur la figure 5, les résultats confirment pour la première fois que l'Univers a bien d'abord connu une époque de décélération, lorsque la matière était bien plus abondante que l'énergie noire, suivie de la phase d'accélération récente. Alors que le cosmos a débuté dans un bain de rayonnement et de matière, nous vivons aujourd'hui dans un Univers essentiellement composé d'énergie noire !

Regards vers le futur

La précision de ces résultats est remarquable, quelques pourcents sur la mesure du taux d'expansion de l'Univers à diverses époques. L'histoire de l'expansion qui en découle est en accord avec les modèles actuels de la cosmologie, et n'indique aucun écart significatif à l'hypothèse la plus simple de la constante cosmologique introduite par Einstein au siècle précédent. Pour progresser sur le dossier de l'énergie noire, il va falloir faire appel à une autre génération de projets, au sol (avec DESI ou LSST) ou dans l'espace (avec Euclid).

Doté cette fois d'un télescope de 4 m de diamètre installé au Kitt Peak, en Arizona aux USA, et d'un tout nouveau spectrographe capable de mesurer simultanément les spectres de 5000 objets, le projet DESI est l'ultime traque de l'énergie noire depuis un observatoire terrestre. Équipé de plus d'un robot pour positionner automatiquement les fibres optiques au plan focal du télescope, DESI peut obtenir une nouvelle série de spectres toutes les 20 minutes. Les premières observations débuteront au cours de l'année 2019. Et c'est au total plus de vingt millions de galaxies et de quasars que les chercheurs auront à leur disposition après cinq années de fonctionnement, pour retracer l'histoire de l'énergie noire et de la matière au cours des douze derniers milliards d'années de

5. Vitesse relative de l'expansion de l'Univers, $H(z)/(1+z)$, en fonction du redshift. Le long de l'axe horizontal, le temps croît vers la gauche (*redshifts* décroissants). Les mesures obtenues à partir de la répartition 3D des galaxies LRG sont représentées en bleu ou vert à gauche sur le graphique. L'Univers passe d'un régime dominé par la matière à un régime dominé par l'énergie noire à un âge d'environ six milliards d'années. La mesure effectuée à partir des « forêts » Lyman- α correspond au carré rouge et au rond bleu à droite de la figure (deux analyses), sondant la structure de l'Univers à une époque où son expansion était encore en train de ralentir, soit il y a environ onze milliards d'années. La courbe est une prédiction tenant compte des densités de matière et d'énergie noires observées par le satellite Planck. Le léger désaccord entre cette mesure et la courbe montre qu'il faut continuer à observer de nouveaux quasars pour savoir si c'est réel, et donc annonciateur d'une révolution en cosmologie, ou une simple fluctuation statistique.

l'Univers. Pour la première fois, l'époque à laquelle l'énergie noire prend le dessus sur la matière, lorsque l'Univers était âgé d'environ sept milliards d'années, pourra être étudiée avec précision (fig. 5).

Depuis l'espace, le spectrographe infrarouge du satellite Euclid (programme de l'agence spatiale européenne ESA), dont le lancement est prévu en 2020, poussera encore plus loin les limites des grands relevés 3D de galaxies. Euclid observera plus de 30 millions de galaxies, jusqu'à la lisière où les forêts Lyman- α des quasars observés par DESI prendront la relève.

Enfin, le LSST, un nouveau télescope de 8 m de diamètre, installé sur le Cerro Pachón au Chili, sera pleinement opérationnel à partir de 2022. Il étudiera les oscillations baryoniques par une méthode différente. Le *redshift* sera obtenu à partir du flux de lumière mesuré dans six filtres allant de l'UV à l'infrarouge proche. La moins bonne détermination du *redshift* par cette

approche est compensée par un bien plus grand nombre de galaxies observées, soit plusieurs dizaines de milliards à la fin du projet.

Ces trois projets internationaux vont aborder de façon complémentaire notre étude sur l'énergie noire. Mais au-delà de cette quête, les chercheurs espèrent que ces observations permettront de répondre aux grandes questions qui se posent aujourd'hui sur la relativité générale, clef de voûte de tout l'édifice actuel de la cosmologie. ■

Références

- 1• S. Perlmutter *et al.*, *Astrophys. J.* **517** (1999) 565 et A. Riess *et al.* *Astron. J.* **116** (1998) 1990.
- 2• F. Combes, ce numéro, p. 4.
- 3• D. Eisenstein *et al.*, *Astrophys. J.* **633** (2005) 560.
- 4• N. Busca *et al.*, *A&A* **552** (2013) A96 et Y. Delubac *et al.*, *A&A* **574** (2015) A59.