

intéressantes à des questions encore ouvertes dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, comme celle de la matière noire.

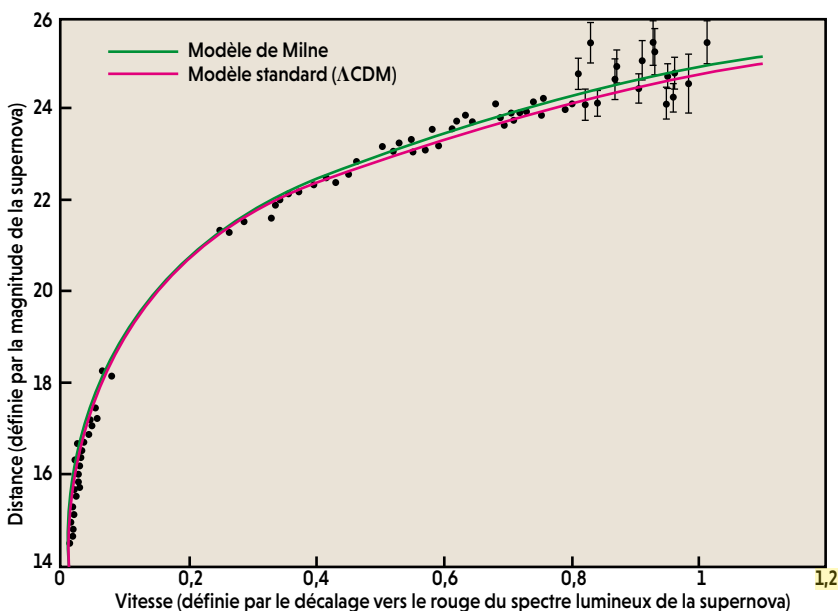
Celle-ci n'est pas tout: elle représente près de 25% du contenu de l'Univers, et s'y ajoutent 5% de matière ordinaire et environ 70% d'énergie noire (responsable de l'expansion accélérée de l'Univers). La nature de cette dernière reste à éclaircir et il en est de même de l'inflation, une phase d'expansion exponentielle subie par l'Univers dans ses premiers instants, que le modèle standard doit inclure pour expliquer certaines caractéristiques de l'Univers comme son homogénéité à grande échelle.

L'un des problèmes du modèle initial du Big Bang, jusqu'à la fin des années 1970, était que certaines régions distantes n'étaient pas causalement connectées, c'est-à-dire qu'elles n'avaient pas eu le temps d'interagir depuis la naissance de l'Univers. Or d'après les observations, ces régions ont presque exactement la même température, ce qui est difficile à expliquer si elles n'ont pas été en contact. L'inflation primordiale constitue une solution à ce problème. Elle assure que toutes les régions observées ont été causalement en contact. Mais aucune théorie fondamentale précise ne permet de comprendre comment on peut entrer dans cette dynamique inflationnaire, ni surtout comment en sortir.

NI MATIÈRE NOIRE, NI ÉNERGIE NOIRE, NI INFLATION

Il serait donc intéressant de voir si d'autres modèles cosmologiques sont capables de satisfaire les contraintes observationnelles actuelles en faisant l'économie d'hypothèses telles que la matière noire, l'énergie noire et l'inflation. Par exemple, en 2016, Subir Sarkar, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont analysé vingt ans de données obtenues à partir des supernovæ sur

Les supernovæ de type Ia sont des « chandelles standard » : il est possible de déterminer leur distance et de mesurer la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous. Ce qui permet d'étudier la dynamique d'expansion de l'Univers au cours du temps. En comparant les données sur les supernovæ et des courbes de modèles théoriques, il est difficile aujourd'hui de distinguer le scénario standard du modèle de Milne.



la dynamique d'expansion de l'Univers. Ils ont remarqué qu'elles ne permettent toujours pas de distinguer de façon indiscutable le scénario d'expansion du cosmos tel qu'il est décrit par le modèle standard et un autre, l'univers gravitationnellement vide proposé dans les années 1930 par le Britannique Edward Arthur Milne (voir la figure ci-dessous). Distinguer les deux modèles de façon probante avec les supernovæ nécessiterait d'observer des explosions de ce type bien plus lointaines, ce qui sera possible avec le futur télescope spatial *James-Webb* censé être lancé en 2022, ou les grands programmes de relevés galactiques comme *LSST*, qui démarrera en 2023.

Le modèle de Milne est une solution cosmologique des équations de la relativité générale pour un univers où la densité d'énergie est nulle. Cet univers apparaît alors gravitationnellement vide. Sa dynamique ne présente ni accélération de l'expansion cosmique ni décélération. Un tel univers reste dans une phase d'expansion que l'on pourrait caractériser d'inflation minimale. Ce comportement constant et simple est à comparer au modèle standard, qui suppose une phase d'inflation initiale suivie d'une phase d'expansion d'abord décélérée, puis accélérée.

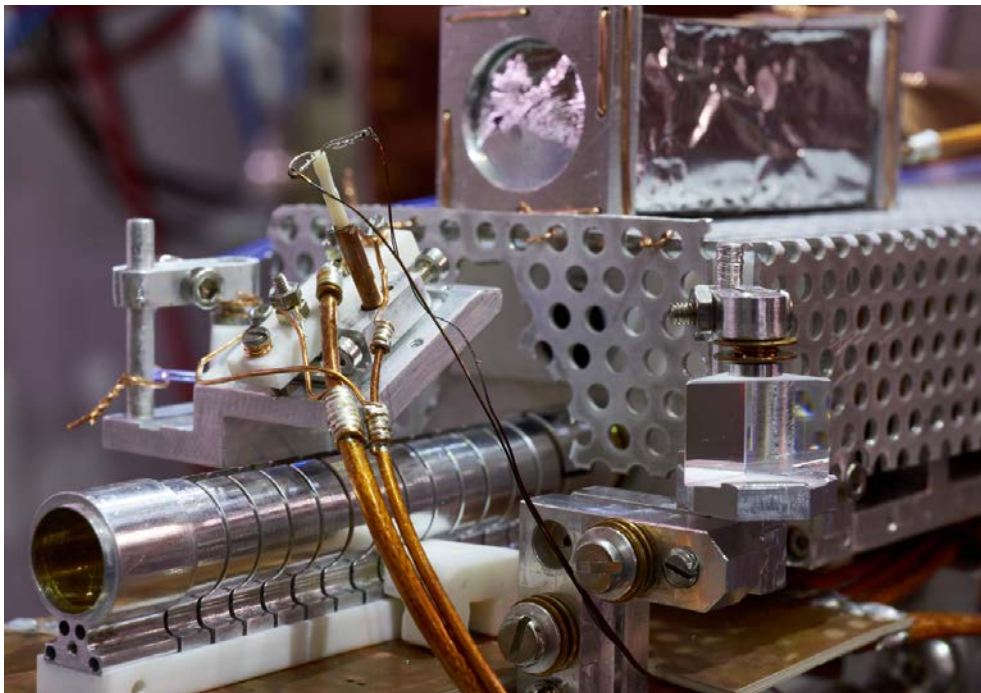
La dynamique particulière du modèle d'univers de Milne implique que toutes les régions observables du cosmos sont causalement connectées. L'Univers est alors naturellement uniforme à grande échelle, sans avoir besoin de faire appel au mécanisme d'une brève phase d'inflation initiale.

L'idée est intéressante. Cependant, la condition d'un univers de Milne gravitationnellement vide semble incompatible avec le fait que l'Univers où nous vivons contient de la matière. Mais elle serait satisfaite à grande échelle si le cosmos contient autant de matière de masse positive que d'antimatière de masse négative. C'est ce que nous avons nommé, avec Aurélien Benoît-Lévy, le modèle d'univers de Dirac-Milne. Il serait alors possible de se passer de l'énergie noire et de l'inflation... ainsi que de la matière noire, grâce à la polarisation du vide dans un champ gravitationnel.

DIRAC-MILNE À L'ÉPREUVE DES OBSERVATIONS

Il faut cependant souligner qu'une des forces du modèle standard est qu'il est en accord avec de nombreuses observations. Qu'en est-il du modèle de Dirac-Milne?

Premier pilier observationnel du modèle standard: la nucléosynthèse primordiale. Elle décrit, en accord raisonnable avec les observations, la production des éléments légers (hydrogène, hélium, deutérium, lithium) dans les premières minutes de l'Univers après le Big Bang. Ces éléments ont été produits en moins de vingt minutes, puis l'Univers est devenu trop froid et ➤



L'expérience AEGIS, au Cern, est conçue pour mesurer l'influence du champ gravitationnel sur des atomes d'antihydrogène. Le tube (à gauche) est un piège magnétique pour des antiprotons qui sont ensuite associés à des positrons arrivant par le haut. Les physiciens produisent alors un faisceau horizontal d'atomes d'antihydrogène qui traverse un détecteur (un déflectomètre de moiré), qui mesurera la déviation du faisceau sous l'influence du champ gravitationnel. La précision de l'expérience sera de l'ordre de 1%.

> dilué pour que les réactions se poursuivent. Dans l'univers de Dirac-Milne, la température a baissé plus lentement. La durée de la nucléosynthèse a donc été beaucoup plus longue: plus de 30 ans! Pourtant, en dépit de cette différence énorme – un facteur de cinq millions –, l'univers de Dirac-Milne produit l'hélium 4, le lithium et le deutérium avec un aussi bon accord observationnel que le modèle standard.

Le seul élément où les prédictions diffèrent notablement est l'hélium 3, avec un excès d'un facteur 5 à 10 dans le modèle de Dirac-Milne. Cependant, cela ne permet pas de conclure lequel des deux modèles décrit le mieux la nucléosynthèse primordiale. En effet, l'hélium 3 est fragile. Il est produit et détruit au sein des étoiles ou dans leur voisinage pendant toute l'histoire de l'Univers, d'où la difficulté d'en déterminer la production primordiale à partir des mesures observationnelles.

Un autre pilier du modèle standard est la formation des grandes structures (galaxies, amas de galaxies et autres superstructures). En 2018, avec Giovanni Manfredi, de l'université de Strasbourg, et ses collègues, j'ai étudié la formation des grandes structures dans le contexte de l'univers de Dirac-Milne. Nous voulions voir si les simulations numériques reproduisaient correctement la distribution statistique observée. Nous avons développé une simulation prenant en compte notamment des effets non linéaires, qui apparaissent dans les régions où la densité devient forte par rapport à la densité moyenne.

Ces simulations constituent un test important, car l'univers de Dirac-Milne ne comporte aucun paramètre libre. La formation des

structures y démarre beaucoup plus tôt que dans le modèle cosmologique standard: les premiers objets massifs se constituent quelques dizaines de millions d'années seulement après le Big Bang. La structuration se poursuit par effondrements successifs, en partant de nuages de gaz qui ont typiquement une masse de quelques masses solaires. Résultat: notre simulation est en bon accord avec les observations des grands relevés récents comme SDSS (*Sloane Digital Sky Survey*).

LE DÉFI DU FOND DIFFUS

L'un des grands succès de la cosmologie de ces dernières décennies est l'observation du fond diffus cosmologique. Ce rayonnement a été émis environ 380 000 ans après le Big Bang. À cette époque, la température est devenue assez faible pour que les particules électriquement chargées (électrons et noyaux atomiques) du plasma cosmique se combinent pour former des atomes neutres. La lumière, qui était jusque-là piégée dans le plasma par des interactions multiples, a commencé à se propager librement. La prédiction de la température observée aujourd'hui pour les vestiges de ce rayonnement a été l'un des arguments qui a permis au modèle standard de s'imposer.

Une autre prédiction concernant le fond diffus cosmologique était l'existence de fluctuations de l'ordre de 10^{-5} kelvin dans ce rayonnement. Cela a été confirmé en 1992 par le satellite *Cobe*, puis par les satellites WMAP et Planck. La mesure toujours plus précise de ces fluctuations a permis d'établir leur distribution spatiale et statistique (nommée spectre d'anisotropies du fond diffus cosmologique). Cette