

Energie noire : quelles stratégies pour la communauté française ?

Programme National de Cosmologie, Groupe de travail "énergie noire"

avril 2007

Le fait d'observer une expansion accélérée de l'univers montre à lui seul que notre compréhension de la physique des hautes énergies et de la gravité est soit incomplète soit erronée¹. Voilà qui donne l'ampleur de l'enjeu des recherches observationnelles ou théoriques sur l'énergie noire !

1 L'expansion de l'univers est accélérée

Au cours de ces dernières années se sont en effet accumulées de nombreuses indications observationnelles en faveur d'une accélération récente de l'expansion de l'univers. Précisons un peu les choses. L'ensemble des observations dont on dispose aujourd'hui sont compatibles avec l'hypothèse qu'il existe une densité d'énergie constante et uniforme associée au vide cosmologique et que cette densité représente aujourd'hui environ 70% de la densité d'énergie totale de l'univers. Cette nouvelle composante de l'univers aurait la particularité de contrebalancer l'attraction universelle en induisant une force répulsive. L'existence même d'un tel phénomène ne peut évidemment se concevoir en gravité classique Newtonienne. La relativité générale offre cependant un cadre conceptuel dans lequel en rendre compte. Classiquement on peut l'attribuer à l'existence d'une nouvelle constante de la nature, la constante cosmologique. Il reste que la nature d'un tel objet est fondamentalement inconnue; cette tension est particulièrement manifeste si l'on adopte un point de vue de physique des hautes énergies. Les constructions théoriques actuelles s'accommodent en effet mal de l'existence d'une constante cosmologique et c'est la nature du vide quantique, dans une théorie qui incorporerait la théorie quantique des champs et la relativité générale, que pose en filigrane l'accélération de l'univers.

Comment alors rendre plus précisément compte des observations ? Quelles sont les théories avancées pour expliquer l'accélération de l'univers ?

¹Comme il est souligné dans le document du Dark Energy Task Force, préparé à l'intention de la NASA et du DEO, <http://www.nsf.gov/mps/ast/detf.jsp>

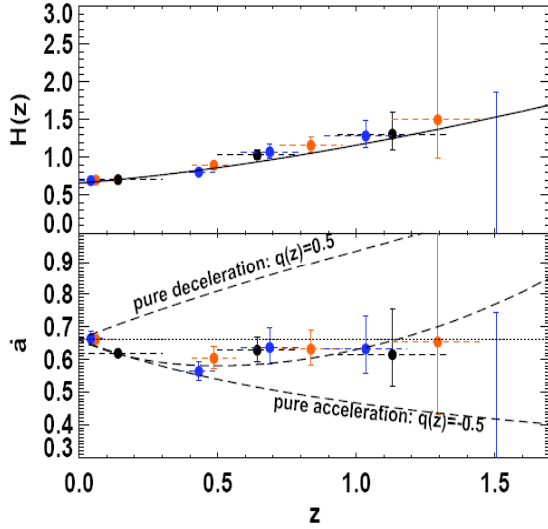


FIG. 1 – Mesure du comportement de la constante de Hubble et de la vitesse d’expansion à partir d’un échantillon composite de SN1a. La pente de la courbe $a(z)$ permet d’apprécier le signe de la variation de la vitesse d’expansion. L’expansion est accélérée pour $z < 0.5$. Figure tirée de Riess et al. 2006.

- Une simple constante cosmologique. Les observations actuelles sont parfaitement compatibles avec ce qu’une simple constante cosmologique induirait. Les problèmes posés par cette hypothèse sont au moins de deux natures. Pourquoi la constante cosmologique est telle que c’est aujourd’hui qu’elle prend le pas sur la densité d’énergie de la matière ordinaire - c’est le problème de la coïncidence - et comment expliquer que l’échelle d’énergie qui lui est associée soit incomparablement plus petite que l’échelle d’énergie de Planck? Si on devait partir d’une théorie fondamentale la gravité quantique on voit mal en effet comment on pourrait arriver à un tel résultat.
- Un nouveau fluide homogène d’équation d’état dynamique, e.g. qui vient d’un processus d’évolution dynamique. On pense ici à l’émergence d’une phase inflationnaire tardive due à l’existence de nouveaux degrés de liberté a priori scalaires. On est là dans une situation un peu plus confortable d’un point de vue de physique des hautes énergies¹ même si pour l’instant de telles constructions sont parfaitement ad’ hoc. Les modèles évoqués sont ici la quintessence, le gaz de Chaplygin, etc.
- Une modification de la gravité : Il est encore possible de rendre compte de l’accélération apparente de l’univers en invoquant non pas l’existence d’un nouveau fluide mais une modification de la gravité à grande échelle. Une telle hypothèse bouleverse notre cadre conceptuel ; il reste que de telles constructions théoriques sont a priori légitimes. Notons tout de même qu’aucun modèle complet et cohérent n’a été construit qui puisse rendre compte des observations de cette manière.
- Autre chose : une hypothèse impossible à exclure aujourd’hui!

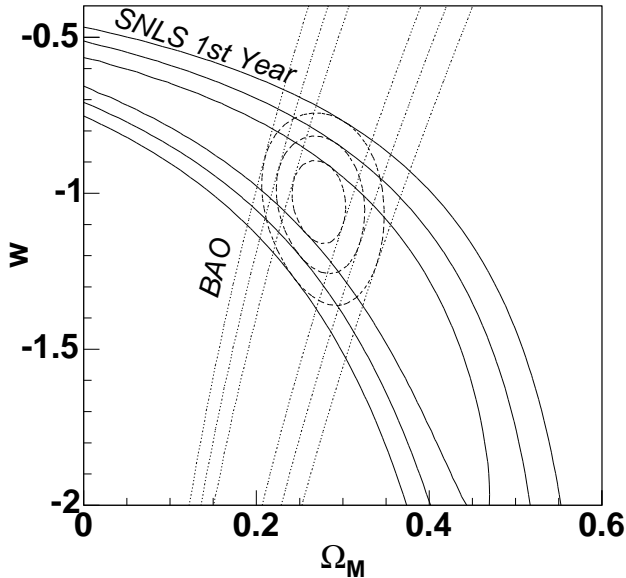


FIG. 2 – Contraintes actuelles sur le paramètre d'équation d'état de l'énergie noire obtenues à partir du relevé SNLS. On fait l'hypothèse ici que le paramètre d'équation d'état est constant et que l'univers est plat. Figure tirée de Astier et al. 2006.

2 Quelles observations ?

Les prochaines générations de mesure auront alors à répondre à un certain nombre de questions pressantes. Celles-ci sont guidées par l'éventail des possibilités théoriques.

1. Peut-on rendre compte des observations avec un fluide d'équation d'état $P/\rho = -1$?
2. Les observations sont-elles compatibles avec une nouvelle composante dans le fluide cosmologique dans un cadre de relativité générale ?
3. Qu'elle serait alors l'équation d'état du fluide ?

Pour répondre à ces questions on dispose d'un certain nombre de moyens d'investigation. Ils sont fondamentalement de deux natures : géométriques - avec la mesure de l'évolution de distance ou de volume - et dynamiques à travers la mesure du taux de formation des grandes structures de l'univers.

Précisons que ces deux grandes familles s'appuient sur des postulats théoriques différents. La mesure des distances angulaires ne fait que préciser les éléments de géométrie de la métrique de Friedman-Robertson-Walker - sans préjuger du comportement de la densité d'énergie de l'univers. La mesure du comportement de la distance angulaire permet en effet d'accéder au comportement de $H(t)$, et donc à l'accélération de l'univers, à travers,

$$d_A = \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \quad (1)$$

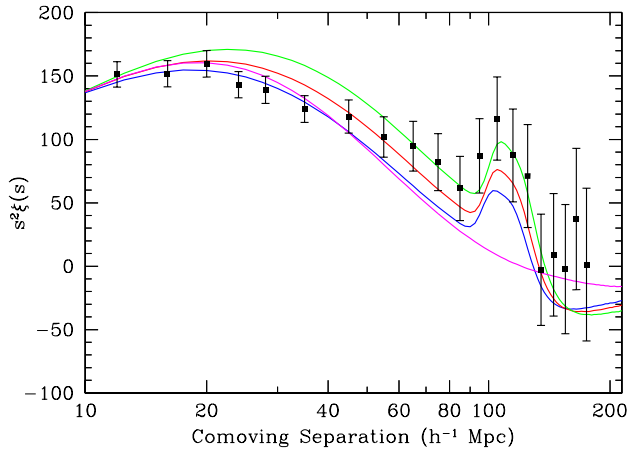


FIG. 3 – Observation des oscillations baryoniques dans le spectre de puissance d’un catalogue de galaxies rouges. Figure tirée de Eisenstein et al. 2005.

Parmi les méthodes observationnelles visant à une telle mesure, la recherche de supernovae lointaines s’est imposée comme la plus efficace. La recherche des oscillations baryoniques acoustiques dans les spectres de fluctuations relève aussi de cette famille. Notons enfin que le comptage des amas est lui aussi sensible à des effets géométriques mais aussi à des effets dynamiques.

Les effets dynamiques reposent sur la détermination du comportement du taux de croissance linéaire $D_+(t)$ des fluctuations de densité. Celui-ci est solution de

$$\frac{d^2}{dt^2}D_+(t) + 2H(t)\frac{d}{dt}D_+(t) = \frac{3}{2}\Omega_{\text{matière}}(t)H^2(t)D_+(t), \quad (2)$$

où $\Omega_{\text{matière}}(t)$ donne l’évolution de la fraction d’énergie de l’univers dans le fluide de matière. Ici cependant, le lien avec l’énergie noire est plus indirecte. Il faut en effet supposer que les équations de Friedmann sont correctes ainsi que l’équation de Poisson relativiste. La méthode par excellence pour accéder à ce type d’observables est la mesure des effets de lentilles faibles induits par les grandes structures de l’univers.

3 Méthodes de mesures, avantages et inconvénients

Nous passons ici en revue les différentes méthodes observationnelles pour mesurer l’énergie noire en tentant de dégager les atouts et les faiblesses propres à chacune.

3.1 Oscillations acoustiques

L’observation des oscillations acoustiques baryoniques ne peut se faire qu’à partir d’un relevé de très grande taille puisqu’il consiste à rechercher la signature des oscillations baryoniques, le pendant de ce qui est observé dans le spectre des anisotropies de température

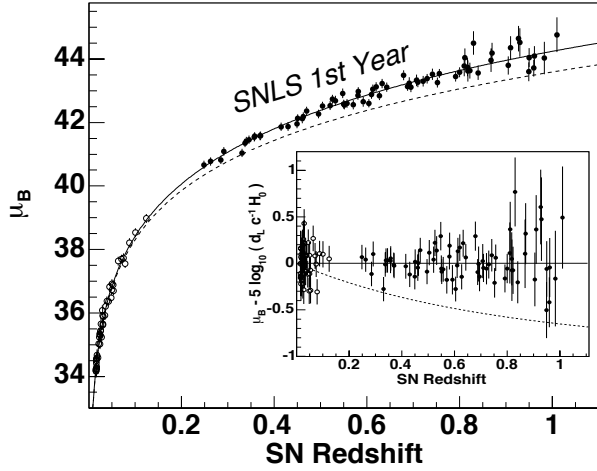


FIG. 4 – Le diagramme de Hubble d’un ensemble de Supernovae détectées lors de la première année de prise de donnée du relevé SNLS. Les pointillés correspondent à un univers Einstein de Sitter sans constante cosmologique ; la ligne continue au modèle concordant. Figure tirée de Astier et al. 2006.

du CMB, dans les spectres de densité à l’échelle de plus de 100 Mpc. Cette approche a au moins deux avantages,

- c’est une sonde directe de la distance angulaire ;
- elle s’appuie sur un phénomène physique simple et bien compris. Son principal désavantage est qu’elle a un potentiel de discrimination faible compte tenu du faible nombre de modes accessibles pour faire une telle mesure et des erreurs statistiques qui en découlent. Notons aussi qu’à terme il faudra sans doute tenir compte d’effets fins comme
- l’évolution non linéaire du spectre ;
- les effets de biais des galaxies (e.g. le fait que les galaxies ne soient pas des traceurs fiables du champ de densité sous-jacent).

Le projet SKA est celui qui dans le long terme pourrait exploiter au mieux cette technique.

3.2 Amas de galaxies

Le comptage des amas de galaxies permet de sonder l’énergie noire à travers des effets conjoints de géométrie et de dynamique. Si cette approche est théoriquement très séduisante, la difficulté principale de cette méthode est la calibration des masses. L’avantage cependant est que cette calibration pourrait se faire en principe de multiples façons : émission X, effet SZ et encore effets de lentilles faibles.

3.3 Recherche de SN1a

La mesure du taux de décroissance de la luminosité des supernovae lointaines avec le redshift permet d’accéder directement au comportement de la distance lumineuse. Cette

méthode a été utilisée avec succès depuis la fin des années 90 et a permis pour la première fois de montrer explicitement l'expansion de l'univers.

L'utilisation de cette méthode de manière systématique pour répondre aux questions évoquées plus avant pose inévitablement le problème de savoir si les supernovae sont bien des chandelles standards. Les projets futurs devront donc être en mesure de proposer des tests de consistance vis à vis de cette possibilité. Notons aussi qu'une difficulté dans la mise en œuvre de cette méthode réside dans la calibration de la photométrie pour des objets lointains de redshift variable. La calibration des redshifts est aussi un besoin dont l'importance ne devra pas être négligée.

3.4 Astigmatisme cosmique

Cette méthode est très séduisante parce que la physique sous jacente aux mesures est bien comprise (voir revue de Y. Mellier par exemple) : il s'agit de la dynamique gravitationnelle d'une matière noire non collisionnelle. C'est aussi la méthode qui est potentiellement la plus puissante (voir le document DETF).

Il reste qu'en pratique on veut pouvoir exploiter les données dans un régime proche du régime non linéaire ce qui pose un certain nombre de difficultés théoriques : validité des formules actuelles pour calculer le spectre non linéaire, effets des baryons sur cette forme, etc. Les principales difficultés liées à la mise en œuvre de cette méthode portent sur la nécessité de mesurer des paramètres de forme avec une très grande précision. Cela conduit à devoir faire des corrections de PSF (à partir de sources ponctuelles que sont les étoiles) ce qui limite intrinsèquement la méthode.

Notons enfin un certain nombre de questions qui restent largement ouvertes :

- Effets de corrélation artificielles de type **GI** ou **II** (**I**= intrinsèque, **G**=gravité) dus aux effets de marée (voir Hirata et al. 2007 par exemple.) ;
- Amélioration ou non des capacités de contrainte de tels relevés avec l'utilisation de corrélations de plus grands ordres et plus généralement des effets de non-Gaussianité ?
- Pour ces méthodes, quels seraient les besoins en redshifts photométriques ?
- Enfin, la quantification du gain en performance entre le sol et l'espace est toujours une question largement ouverte.

4 Enjeux

Les enjeux pour la communauté française dans cette thématique sont importants. Avec les relevés SNLS et CFHTLS celle-ci est actuellement leader dans deux des grands moyens d'investigation pour l'énergie noire. Compte tenu de l'intérêt de la communauté internationale pour ce domaine de recherche la communauté française a donc beaucoup d'atout à faire falloir. Encore faut-il identifier d'une stratégie, des projets, qui permettent de mener à bien les objectifs scientifiques qui ont été identifiés.

La communauté française s'est d'ores et déjà investies dans deux projets de satellite majeurs, SNAP et DUNE. Cependant il faut se garder de faire comparaison des mérites de chacune des méthodes ou de chacun des projets. Nous n'avons pas la maîtrise de la programmation de tels projets. La réussite de ceux-ci passe de toute façon par des intermédiaires auxquelles nous devons aussi participer dans la mesure du possible.

Les recommandations formulées dans la suite s'attachent à proposer des solutions qui permettent de construire une telle stratégie gagnante.

Références

- [1] Astier, P., et al. 2006, *Astr. & Astrophys.*, 447, 31
- [2] Eisenstein, D. J., et al. 2005, *Astrophys. J.* , 633, 560
- [3] Hirata, C. M., Mandelbaum, R., Ishak, M., Seljak, U., Nichol, R., Pimbblet, K. A., Ross, N. P., & Wake, D. 2007, ArXiv Astrophysics e-prints, arXiv :astro-ph/0701671
- [4] Mellier, Y. 1999, *Annual Review of Astr. & Astrophys.* , 37, 127
- [5] Riess, A. G., et al. 2007, *Astrophys. J.* , 659, 98
- [6] Semboloni, E., et al. 2006, *Astr. & Astrophys.*, 452, 51