

Réponse à l'appel de l'ESA Voyage 2050 Concept de mission GAUSS

Principal IN2P3 author :

Name: RENAULT Cécile
Institution: LPSC, Grenoble
Email: rcecile@in2p3.fr
Phone: 04 76 28 40 13

ESA contact scientist

Name: BLANCHARD Alain
Institution: IRAP, Toulouse

Co-auteurs :

AUBOURG Éric, APC, Paris, IN2P3
BLANCHARD Alain, IRAP, Toulouse, INSU
BOUTIGNY Dominique, LAPP, Annecy, IN2P3
COPIN Yannick, IPNL, Lyon, IN2P3
ESCOFFIER Stéphanie, CPPM, Marseille, IN2P3
GANGLER Emmanuel, LPC, Clermont-Ferrand, IN2P3
JULLO Éric, LAM, Marseille, INSU
NEVEU Jérémy, LAL, Orsay, IN2P3
PUY Denis, LUPM, Montpellier, IN2P3
PETTORINO Valeria, CosmoStat, Saclay, CEA
PIERRE Marguerite, SAp, Saclay, CEA
ROUCELLE Cécile, APC, Paris, IN2P3
SANCHEZ Norma, LERMA, Paris, INSU

Soutiens :

CAMPAGNE Jean-Éric, LAL, Orsay, IN2P3
COURTOIS Hélène, IPNL, Lyon, IN2P3
GIRAUD-HÉRAUD Yannick, APC, Paris, IN2P3
LACASA Fabien, IAS, Orsay, INSU
NUSS Éric, LUPM, Montpellier, IN2P3
PELTON Julien, LAL, Orsay, IN2P3
RASERA Yann, LUTH, Meudon, INSU

Abstract

L'ESA a lancé un appel à idées concernant les sujets scientifiques qui seront pertinents sur la période 2035-2050. La présente proposition concerne la réponse issue de l'action Dark Energy et portée par Alain Blanchard.

Cette proposition de cosmologie observationnelle se place dans l'ère de l'après-LSST/Euclid/DESI. Le concept de mission GAUSS est de réaliser, par une unique mission, la cartographie de "toute" la toile cosmique reliant les évolutions primordiales et récentes, et leurs différentes échelles d'énergies, afin de départager les dégénérescences cruciales entre la matière noire et l'inflation, l'énergie noire, la croissance des structures et la gravitation à grande échelle, et afin de séparer les effets de gravité modifiée de ceux de la masse des neutrinos. Ces effets pouvant être similaires, la distinction risque d'être difficile pour Euclid et LSST si la signature n'est pas claire mais accessible à une mission comme GAUSS. Les effets non-linéaires de l'énergie noire ou encore les effets de non-gaussianité des fluctuations primordiales seront également détectables.

Le travail à effectuer au sein de l'IN2P3 durant la période 2020-2030 concerne la participation active à la préparation de la réponse aux futurs appels de l'ESA, ou éventuellement dans un autre cadre programmatique. Des simulations bien plus complètes que les estimations réalisées pour répondre à cet appel à idées seront indispensables, ainsi que la conception détaillée du spectro-imageur, le chiffrage et l'organisation du projet et naturellement la recherche de partenaires internationaux.

1. Introduction

Aujourd'hui, en particulier grâce aux résultats de la mission Planck dans laquelle l'IN2P3 s'est largement investi, le modèle cosmologique de concordance est précis et apparaît comme le plus robuste. Il décrit l'évolution de la matière, essentiellement noire, depuis les fluctuations primordiales quelque 10^{-30} seconde après le Big-Bang jusqu'aux galaxies et amas de galaxies 13,8 milliards d'années plus tard. Il décrit également l'évolution de l'expansion de l'espace avec un ralentissement du rythme à la fin de l'ère de domination de la matière, il y a quelques milliards d'années, suivi par une accélération produite par la place croissante de l'énergie noire dans le bilan énergétique de l'univers.

Cependant les piliers de ce modèle, à savoir l'inflation, la matière noire et l'énergie noire, restent très mal connus et compris. Ces questions fondamentales requièrent une observation détaillée de tout l'univers observable afin d'obtenir la sensibilité à toutes les échelles, spatiales et temporelles, indispensable pour discriminer entre les propriétés du contenu (matière noire et neutrinos), les conditions initiales (non-gaussianités) et les équations qui régissent l'évolution de l'espace-temps (gravitation et énergie noire).

Conçue pour atteindre ces objectifs, la mission provisoirement nommée GAUSS, pour Gravitation And the Universe from large-Scale Structures, entend cartographier toute la toile cosmique accessible. Le projet déposé à l'ESA étant [disponible](#)¹, seules les grandes lignes sont résumées ici. Le groupe de travail et l'implication souhaitée de l'IN2P3 sont ensuite présentés.

2. Questions scientifiques

En accord avec l'ensemble des observations aujourd'hui disponibles, l'explication la plus directe concernant l'origine de l'énergie noire est la constante cosmologique. Cependant sa valeur associée à l'énergie du vide nécessite un ajustement tel entre les états de vide de l'univers primordial et de l'univers contemporain que cette solution est très difficile à justifier d'un point de vue théorique (c'est le "problème de la constante cosmologique").

Une alternative est une modification de la théorie de la gravitation décrite aujourd'hui par la Relativité Générale. On peut ajouter des degrés de liberté de type scalaire, vectoriel ou tensoriel. Les observations actuelles, en particulier celle de la coalescence de deux étoiles à neutrons vue en ondes gravitationnelles et en ondes électromagnétiques, ont déjà éliminé de nombreuses extensions. Il reste cependant de multiples possibilités. Elles sont distinguables les unes des autres par des évolutions différentes du taux d'expansion de l'espace et/ou une histoire différente de la croissance des structures.

1

https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/3219248/BlanchardA_Gauss-final.pdf/4ca3bde5-c7f8-166c-4943-ad6135cf62df?t=1565184623055

Caractériser finement la distribution de matière depuis les plus grandes échelles jusqu'aux échelles non-linéaires permet aussi la mesure de la masse des neutrinos. Si leur masse totale est très proche du seuil de 0.06 eV, la génération LSST-Euclid-S4 ne peut espérer qu'une estimation à 3 sigmas. Une détection à 5 sigmas nécessite une couverture plus profonde et plus précise de la toile cosmique. En effet l'impact majeur des neutrinos massifs est la suppression de la croissance des structures aux petites échelles. Des neutrinos de quelques dixièmes d'EV sont encore relativistes au moment du découplage et une large couverture en redshift est indispensable pour être capable d'une véritable détection.

Un niveau, faible mais non-nul, de non-gaussianités est prédit par les modèles d'inflation. Jusqu'à présent, les différents ensembles de données cosmologiques robustes et indépendantes favorisent clairement les modèles d'inflation minimaux pour lesquels la quantité de non-gaussianités indiquée par le paramètre f_{NL} est très faible ([Boyanovsky et al. 2006](#), [Boyanovsky et al. 2009](#)). Les données les plus récentes fournissent une contrainte de $f_{NL} < 6$ ([Planck collaboration, 2018 IV](#)). Les modèles à un seul champ d'inflaton non minimaux ainsi que les modèles à champs multiples produisent un niveau de non-gaussianité $f_{NL} > \sim 1$ ([de Putter et al. 2017](#)), ce qui peut être considéré comme le seuil à détecter et à contraindre. Il est a priori accessible à un relevé couvrant un volume d'univers suffisant.

Il est important de garder à l'esprit que dans les phases très primordiales de l'Univers, avant l'échelle d'énergie de Grande Unification et l'inflation (vers 10^{-32} sec.), il y a de la place pour des échelles d'énergie plus élevées à des temps antérieurs, de l'ordre de l'échelle fondamentale de Planck de 10^{19} GeV à 10^{-44} sec. et au-delà, c'est-à-dire dans le régime dit trans-planckien. Cette phase quantique primordiale et ses empreintes à des étapes postérieures constituent un domaine d'étude ciblé dans les théories d'unification quantique, la gravitation et la cosmologie. La compréhension de l'énergie noire, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur d'une description du modèle de concordance (à savoir l'énergie du vide cosmologique, le problème de la constante cosmologique, ou les énergies sombres dynamiques, par exemple), est au centre de ces études. Les écarts par rapport à la description classique du modèle Lambda-CDM, s'ils étaient mesurés par le taux d'expansion et/ou la croissance des structures, auraient donc un impact sur la communauté cosmologique et, de façon plus large, sur toute la communauté de la physique fondamentale, y compris la théorie des cordes.

3. Observables

Dans le domaine visible, la distribution de matière est tracée par les galaxies et par la matière noire à travers les effets de lentille gravitationnelle. Une sonde majeure, souvent nommée 3x2pt, combine la corrélation entre les galaxies, entre les structures de matière noire ainsi que la corrélation galaxies-matière noire. Cette combinaison est puissante pour séparer les caractéristiques de l'expansion cosmique et le taux de croissance des structures. Selon que l'on se place dans le cadre de la Relativité Générale ou d'une gravité modifiée, les évolutions relatives du spectre de puissance de la matière et de la distribution de matière noire par effet de lentille gravitationnelle diffèrent. Un accès précis aux grandes et aux petites échelles, dans

le temps et dans l'espace, permettra de briser les dégénérescences qui affecteront DESI, LSST et Euclid.

Si le 3x2pt et le spectre de puissance de la matière à 3 dimensions sont les sondes les plus prometteuses, le relevé associé donnera naturellement accès aux amas de galaxies, aux quasars et au lentillage fort qui sont autant de sondes pertinentes et complémentaires.

D'autres variables statistiques peuvent fournir de l'information. Ainsi la recherche de pics dans les cartes de convergence ou la mesure de la corrélation à 3 points permettent de contraindre le niveau de non-gaussianité. Une autre observable, le facteur E_g , a récemment été défini pour permettre la séparation entre des effets liés à la croissance des structures et à l'expansion de l'espace ; il combine le paramètre de Hubble et les spectres de puissance croisés position-vitesse des galaxies et position-effet de lentille gravitationnelle.

4. Concept de mission GAUSS

L'objectif est de cartographier "toute" la toile cosmique. Un spectro-imageur est nécessaire pour mesurer le redshift et la forme d'au moins 10 milliards de galaxies jusqu'à un redshift de 5. Un satellite permet l'accès à tout le ciel, donc aux plus grandes échelles spatiales, et à toutes les fréquences, donc aux galaxies redshiftées jusque dans l'infrarouge. L'absence d'atmosphère limite fortement l'effet de confusion et ainsi permet une forte densité d'objets résolus. Pour aller au-delà d'Euclid, il faut faire mieux en termes de densité de galaxies, de profondeur maximale mais aussi être autonome en ce qui concerne la mesure des redshifts.

Les principales caractéristiques techniques envisagées sont rassemblées dans le tableau ci-dessous. Bien que futuriste, le projet est raisonnablement réaliste car il se place "logiquement" dans le diagramme Nombre de redshifts en fonction de l'année réalisé pour un autre projet en réponse à l'appel du Decadal survey Astro2020 aux États-Unis avec 1 milliard de redshifts spectroscopiques en 2040.

télescope	Diamètre 3-4 m, monture hors-axe
caméra	4 degrés-carré, 10^{10} pixels, diamètre ~ 70 cm
spectroscopie	Digital micro-mirror devices, pixels de 10 microns, de 0.5 à 5 microns
photométrie	Pixels de 5 microns, 8 bandes de 0.5 à 5 microns, filtres au niveau des px

5. Groupe de travail

Ce travail a été initié au sein de l'action Dark Energy, structure actuellement informelle qui regroupe la communauté française concernée par l'énergie noire d'un point de vue théorique ou observationnel - essentiellement à travers les projets Euclid et LSST.

La liste des proposants de cette proposition pour la prospective IN2P3 diffère en partie de la liste des membres du Core team de la proposition envoyée à l'ESA car :

- Le nombre de membres du Core team ESA était limité à 30, incluant nos collègues INSU, INP et CEA français ainsi que nos collègues européens. Nous avons donc limité le nombre de représentants par laboratoire.
- La proposition ESA étant à rendre pour le 5 août, il n'a pas été possible de joindre tout le monde, et donc certains laboratoires de l'IN2P3 ne sont pas représentés, bien que très impliqués en cosmologie observationnelle et motivés par ce projet.

Si l'on ne peut présager de l'issue de l'appel à idées de l'ESA, il est raisonnable de considérer que l'énergie noire, la matière noire, l'inflation et la gravitation feront partie d'une façon ou d'une autre des grandes questions à étudier.

Même si, en termes d'efforts sur la période 2020-2030, l'investissement dans GAUSS sera léger comparé à celui indispensable à l'analyse des données de LSST et Euclid, il sera nécessaire d'accorder un peu de temps à la préparation de la génération suivante. Un projet de satellite se mûrit scientifiquement, doit définir son instrumentation avec soin et construire une collaboration solide. Cet effort devra se faire en s'appuyant sur l'expertise acquise et s'ajuster en fonction des premiers résultats de DESI, LSST et Euclid mais aussi toutes les avancées dans ce domaine. Des simulations poussées dédiées devront être conduites.

On peut noter que l'action Dark Energy, qui rassemble théoriciens et membres de ces projets est le cadre naturel pour une telle préparation. Si elle dispose d'un soutien pérenne, ce projet sera naturellement l'une de ses actions de coordination et d'animation scientifique.