Projets spatiaux pour l'exploration
de la matière noire et de l'énergie noire

Claire JURAMY

LPNHE, Paris

Résumé

Dans le cadre des recherches sur les paramètres fondamentaux qui déterminent l'évolution de l'univers, les expériences utilisant les supernovae de type Ia et les expériences de cisaillement gravitationnel apportent chacunes des éléments de réponse complémentaires. Considérant la nécessité de voir plus, plus large, plus loin, l'idée d'un projet spatial commun, un imageur à grand champ, fait son chemin. Il reste à travailler sur les défis technologiques uniques que présente le plan focal d'un tel téléscope. Après une présentation générale des différents types de caméras, j'essayerai de montrer par l'exemple comment les contraintes pour réussir un tel projet nous obligent à tester de manière poussée les performances des différents composants.

1.1 Introduction : mesures des paramètres cosmologiques

Depuis les mesures historiques (1998) de l'accélération de l'expansion de l'univers à partir d'observations de supernovae de type Ia, l'idée de faire de la *cosmologie observationnelle* a inspiré en partie ou entièrement un certain nombre d'expériences.

1.1.1 Les paramètres cosmologiques sans se poser de questions

Les résultats de ces différentes expériences sont exprimés souvent sous la forme de valeurs attribuées à un ou plusieurs 'paramètres cosmologiques'. Ces paramètres trouvent leur sens dans le 'modèle standard' de la cosmologie, qui découle de l''hypothèse cosmologique' (un univers homogène et isotrope) et de la métrique de la relativité générale. L'expansion de l'univers et son évolution sont alors liées au contenu en matière et en énergie de l'univers, ainsi qu'à sa courbure éventuelle, par les équations de Friedman.

Les termes dominants de cette équation seraient une composante de matière beaucoup plus abondante que la matière connue mais invisible (du moins directement), d'où son nom de matière noire, et une composante d'énergie, qui serait le moteur de l'accélération de l'expansion, et de nature complètement inconnue, d'où son nom d'énergie noire.

1.1.2 Supernovae de type Ia

Sans se laisser perturber par le fait que ce modèle attribue environ 95% du contenu actuel de l'univers en matière et en énergie à des éléments encore indéterminés, nous essayons de retracer l'histoire de l'expansion de l'univers, pour mettre des contraintes sur la foison de modèles théoriques qui essayent d'expliquer ce problème. Les expériences actuelles utilisant la détection de supernovae lointaines sont décrites dans d'autres contributions (N. Blanc, S. Gilles, V. Lusset).

1.1.3 Cisaillement gravitationnel

D'autres expériences s'intéressent à la répartition de la matière dans l'univers, qui est nécessairement liée à l'expansion. Par définition, la matière noire est indétectable par des rayonnements qu'elle émettrait ou absorberait. Par contre, comme la matière connue, elle crée des champs gravitationnels, donc sa présence dévie les rayons lumineux. L'objectif des mesures de cisaillement gravitationnel [1] ('weak lensing' ou 'cosmic shear') est d'établir une cartographie de l'ensemble de la matière, y compris la matière noire, en détectant les déformations que les inhomogénéités de la matière présente sur le trajet de la lumière induit sur les images de galaxies lointaines (jusqu'à $z = 1$ environ).

1.2 Défis pour un télescope spatial à grand champ

Les deux types d'expériences ont des besoins en commun : des décalages spectraux élevés, et un téléscope à grand champ, pour la recherche de supernovae d'un côté et pour explorer le cisaillement sur de grands angles de l'autre.

1.2.1 Avantages d'une expérience spatiale

L'exploration à grand décalage vers le rouge se heurte à plusieurs difficultés : diminution de la quantité de lumière qui parvient au téléscope, présence d'eau dans l'atmosphère, qui absorbe et réémet certaines longueurs d'onde au-dessus de 800 nm, créant des 'raies de ciel' qui masquent complètement le spectre des objets à ces longueurs d'onde, et dégradation de la résolution angulaire par diffusion. De plus, l'anisotropie et la variabilité de l'atmosphère créent des distorsions délicates à corriger qui gênent particulièrement les mesures de cisaillement gravitationnel.

Un projet spatial dédié permettrait de se soustraire aux problèmes posés par l'atmosphère. Cela permettrait également de suivre les supernovae indépendamment des phases de la Lune, et d'explorer un champ très large pour le cisaillement gravitationnel.

1.2.2 Paramètres de la mission

L'idée d'une mission spatiale pour les mesures avec les supernovae de type Ia remonte à 1999, avec le premier concept pour le projet SNAP (SuperNova / Acceleration Probe), qui reste actuellement le projet le plus étudié [3]. Cependant, les développements politiques ont fait que les divers projets d'imageur spatial à grand champ en sont toujours à l'étape de définition du projet et des paramètres de la mission.

Le programme scientifique minimal est connu : suivi d'au moins 2 000 supernovae de type Ia jusqu'à $z = 1,7$, et un champ d'au moins 300 deg^2 pour le cisaillement. Bien sûr, un tel téléscope intéressera d'autres expériences, en particulier les mesures des 'oscillations baryoniques du spectre des galaxies', qui nécessitent de faire un comptage exhaustif des galaxies dans un champ de profondeur déterminée.

En dehors de cela, les différentes propositions varient sur la place relative à accorder aux différentes expériences, sur la stratégie d'observation, sur les spécifications et le budget prévu du téléscope, sur la méthode à employer pour faire de la spectroscopie, et sur la couverture spectrale.

1.2.3 Défis technologiques

Pour donner un élément de comparaison, le téléscope spatial Hubble (HST) est doté d'un miroir de 2,4 m de diamètre, et le projet de nouvelle génération (James Webb Space Telescope) comporte un miroir de 6,5 m [2]. Les projets d'imageur à grand champ, qui se limitent à des miroirs de moins de 2 m de diamètre, peuvent donc se baser sur les expériences précédentes pour ce qui est de la conception d'un téléscope spatial.

Par contre, la différence entre les tailles des champs a des conséquences au niveau du plan focal : alors que par exemple le champ de NIRCam [2] (un des instruments de JWST) est limité à 10 arcmin^2, un 'grand champ' correspond à 0,5 ou 1 deg^2. Pour que la taille des pixels des caméras soit raisonnablement inférieure à résolution angulaire, il faut donc beaucoup plus de pixels dans le plan focal du téléscope à grand champ : 700 millions de pixels dans le plan focal 'Gigapixel' de SNAP contre une seule caméra de 2000 par 2000 pixels pour une voie de NIRCam.

Les défis liés à un plan focal contenant des dizaines de caméras visibles et infra-rouge sont multiples, à commencer par l'alignement mécanique des éléments (à 5 μm près), la question de la température de fonctionnement, et celle de l'alimentation électrique des caméras et des circuits d'amplification.

1.3 Imagerie visible et infra-rouge

L'objectif de ce paragraphe est de présenter rapidement des capteurs qui permettent de faire de l'imagerie dans le domaine visible et proche infra-rouge. Dans les deux cas, ils sont basés sur un substrat semi-conducteur dont le gap donne la limite haute en longueur d'onde : autour de 1000 nm pour un substrat en silicium, 1700 nm pour un substrat HgCdTe par exemple. Les électrons créés dans le substrat par effet photo-électrique dérivent sous l'influence de la différence de potentiel appliquée entre les deux faces jusqu'à la surface qui est divisée en une matrice de pixels.

1.3.1 Charge Coupled Device

Un CCD classique est couvert de trois 'peignes' d'électrodes parallèles juxtaposés, de potentiel commandable : un pixel donné comporte une électrode de chaque ensemble. Une fois l'exposition terminée, un système d'horloges permet de décaler l'ensemble des lignes simultanément avec une très grande efficacité, en déplaçant progressivement les puits de potentiel (voir figure 1.1 pour le mécanisme). Chaque ligne arrive ainsi à son tour au registre à décalage, où les colonnes sont déplacées par le même mécanisme pour envoyer successivement chaque pixel sur le registre de lecture ('summing well'sur la figure 1.2). La charge du pixel est transférée sur une capacité très faible pour être lue sous forme de tension : typiquement, un gain de 4 μV par électron est obtenu avec une capacité de lecture de 40 femtoFarad. Un interrupteur permet de se remettre au niveau de référence entre chaque pixel. Enfin, un amplificateur 'suiveur' fait le lien entre la capacité de lecture et le reste du circuit électronique.

Le 'bruit en kTC' du CCD vient du fait que l'ouverture de l'interrupteur après la remise à niveau fait apparaître une charge aléatoire d'écart-type $\sqrt{k_B TC}$ aux bornes du condensateur, ce qui correspond à un bruit d'environ 320 μV (80 e^-) sur le niveau de référence.

Le rôle de la chaîne de lecture est d'amplifier et de numériser le signal qui sort du CCD. Les différentes

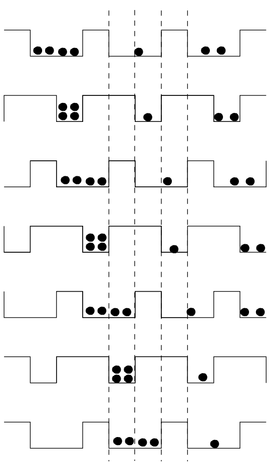

FIG. 1.1 – Représentation schématique du système de décalage à trois séries d'électrodes.

stratégies de lecture ('Clamp and Sample', 'Correlated Double Sampling', ou 'Dual Slope Integrator') permettent aussi d'éliminer le bruit de remise à la référence, moyennant un certain coût en bruit électronique.

1.3.2 Active Pixel Sensor

Contrairement aux CCD, un APS possède un amplificateur de mesure de la charge individuel sur chaque pixel. Ce système peut aussi bien être utilisé dans le visible ('capteur CMOS') que dans l'infra-rouge. Le système de lecture doit comprendre un multiplexeur qui permet de sélectionner le pixel ou l'ensemble de pixels qu'on veut lire. Le principal avantage de l'APS est la possibilité de lire plusieurs fois le même pixel ('multiread'), puisque la charge accumulée sur le pixel n'est pas nécessairement remise à zéro après une lecture.

1.4 Etude d'un circuit intégré de lecture des capteurs

L'utilisation d'un circuit intégré conçu spécifiquement (ASIC) permet de résoudre en partie certains problèmes qui se posent pour le plan focal 'Gigapixel', par sa compacité, sa résistance aux basses températures et aux radiations, et sa faible consommation électrique. Il faut cependant vérifier ces différents points, et tester les performances de ce circuit en terme de bruit.

1.4.1 Présentation de l'ASIC double gain

Le double gain permet de couvrir toute la gamme dynamique de sortie CCD, de 2 électrons (quantité minimale à mesurer) à environ 250 000 électrons (saturation

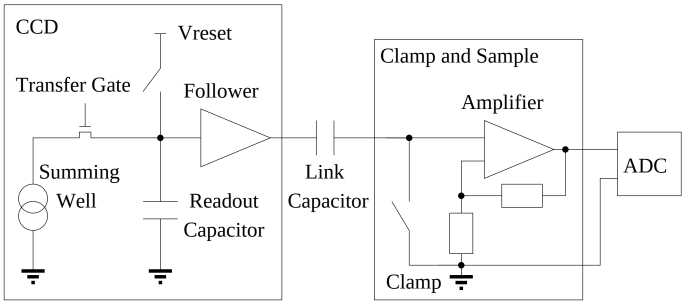

FIG. 1.2 – Sortie du CCD et chaîne de lecture de type MEGACAM.

d'un pixel CCD), tout en restant dans les contraintes de la technologie submicronique de circuits intégrés utilisée, qui limite les tensions à quelques volts. Le grand gain permet d'amplifier assez les faibles valeurs pour les lire avec un convertisseur analogue-digital (ADC en bon anglais) de 12 bits, et le petit gain prend le relai pour les valeurs supérieures. La méthode de lecture est appelée 'Clamp and Sample' : le niveau de référence du CCD, qui varie aléatoirement d'un pixel à l'autre à cause du bruit de kTC, est amené à zéro par l'interrupteur de 'clamp' de l'ASIC avant chaque lecture de pixel. Cette remise à zéro produit le même type de bruit en $\sqrt{kT/C_p}$ que celle sur le CCD, mais avec une capacité C_p beaucoup plus grande (42 pF d'après nos mesures), donc le bruit en tension est beaucoup plus faible.

1.4.2 Bancs de test pour études à bas bruit

Trois bancs de test ont été utilisés pour l'étude de cet ASIC : un ensemble purement électronique pour l'étude de linéarité et de bruit à température ambiante, le banc destiné à l'étude ultérieure du capteur infrarouge Rockwell pour le refroidissement, et le banc CCD pour insérer l'ASIC dans la chaîne de lecture. Dans le cas du CCD et de l'infra-rouge, le banc de test est organisé autour du cryostat, qui permet d'atteindre un vide secondaire ($<10^{-6}$ mbar) et de refroidir le capteur par un circuit à l'azote liquide. Un programme Labview permet de suivre en continu la pression du cryostat et la température en différents points judicieusement choisis, donc de maîtriser le comportement du système et de contrôler les conditions des expériences, en particulier la température du capteur, qui est un facteur clé dans les mesures de bruit.

Ces mesures sont faites avec un oscilloscope numérique commandé par un autre programme Labview. La difficulté est que pour mesurer des bruits moyens de l'ordre de l'électron (en gardant l'hypothèse $4\mu V/e^-$), il faut avoir un niveau de bruit sur la mesure suffisamment inférieur à ce chiffre. Cela exige des précau-

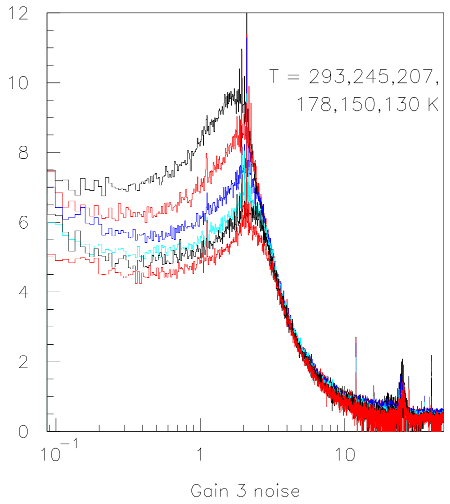

FIG. 1.3 – Evolution du spectre de bruit de la voie bas gain de l'ASIC en fonction de la température. Le bruit total (intégrale) diminue quand la température diminue.

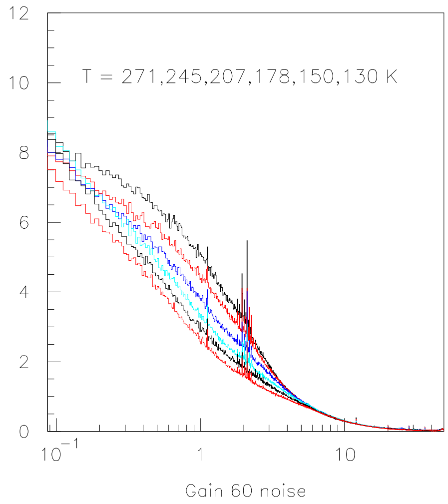

FIG. 1.4 – Evolution du spectre de bruit de la voie haut gain de l'ASIC en fonction de la température.

tions comme le blindage des boîtiers et des connections contre les bruits haute fréquence, la mise en place d'un système de déclenchement pour éliminer l'influence des bruits basse fréquence, un traitement soigneux des lignes de masse, et enfin des traitements numériques (moyenne des spectres de bruit sur un grand nombre de prises de données, soustraction du bruit d'acquisition).

1.4.3 Quelques résultats

L'ensemble des résultats est consigné dans un rapport [4]. Parmi les faits les plus marquants, l'erreur de conception (due à un défaut du programme de simulation) qui a fait apparaître des résistances parasites qu'il a fallu dépister. Mais aussi la bonne linéarité des amplificateurs (déviation inférieure à $2/1000$), et l'ensemble des résultats sur le bruit : absence de couplage entre les deux voies, niveau total raisonnable (l'équivalent de $0,29\,e^-$ en entrée pour le grand gain et de $0,45\,e^-$ pour le petit, avec une dispersion de $0,029\,e^-$ sur la mesure, pour un temps de mesure de 80 μs), observation du 'coin de bruit' qui détermine l'évolution du bruit en fonction du temps d'intégration, abscence de 'bruit en 1/f' jusqu'à des temps de lecture relativement longs, et évolution logique en fonction de la température (voir figures 1.3 et 1.4).

1.5 Conclusion

Le programme des tests futurs est chargé : il faudra faire des images avec la chaîne CCD+ASIC, vérifier que les performances d'un ASIC irradié ne sont pas dégradées, étudier le bruit du capteur infra-rouge et l'efficacité du système de 'multiread' pour le diminuer, et tester la nouvelle génération d'ASIC qui inclura la conversion numérique. Tout cela avec pour objectif une meilleure maîtrise des problèmes qui se posent dans le plan focal d'un imageur spatial à grand champ.

Remerciements

Merci aux coordinateurs de la session, Esther et Julien, qui ont réussi à me motiver assez pour me faire rendre cette contribution trois jours avant la date butoir qu'ils ont fixé !

Références

[1] L. Van Waerbeke, Y. Mellier, *Gravitationnal Lensing by Large Scale Structures : A Review*, `astro-ph/0305089`

[2] `http://www.jwst.nasa.gov`, `http://ircamera.as.arizona.edu/nircam/`

[3] SNAP collaboration, `astro-ph/0405232`

[4] E. Barrelet, C. Juramy, H. Lebbolo, R. Sefri, *Dual Gain Clamp and Sample ASIC*, rapport interne LPNHE 2004-11