

Prospectives IN2P3 2020-2030 en physique des astroparticules

ASTROMEV : A la découverte du ciel en rayons gamma du MeV

Principal Author:

Name: TATISCHEFF Vincent

Institution: Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM)

Email: vincent.tatischeff@csnsm.in2p3.fr

Phone: 01 69 15 52 41

Co-authors: (names and institutions)

CSNSM: HAMADACHE Clarisse, KIENER Jürgen

IPNO: DE SEREVILLE Nicolas, HAMMACHE Faïrouz

APC: TERRIER Régis, LAURENT Philippe

LLR: BERNARD Denis, FEGAN Stephen

CENBG: REPOSEUR Thierry, LEMOINE-GOUMARD Marianne

LUPM: PIRON Frédéric, MARCOWITH Alexandre

Abstract:

A l'heure d'un développement spectaculaire de l'astronomie multi-messagers et multi-longueurs d'onde, le besoin d'un nouveau satellite d'astronomie gamma au MeV apparaît comme une évidence. Ce domaine de l'astronomie est crucial pour plusieurs thèmes des astroparticules : (i) origine des ondes gravitationnelles et des neutrinos cosmiques, (ii) physique du rayonnement cosmique et son impact sur les écosystèmes galactiques, (iii) origine et évolution des éléments dans l'Univers. Mais faute de sensibilité des instruments ayant couvert ce domaine d'énergie, le ciel gamma au MeV demeure largement inexploré : à ce jour, seules quelques dizaines de sources astrophysiques stationnaires sont connues entre 0,2 et 30 MeV. Pour participer pleinement à l'essor actuel des observations multi-longueurs d'onde et multi-messagers des phénomènes astrophysiques extrêmes, le prochain observatoire gamma spatial devra atteindre une sensibilité autour du MeV environ 50 à 100 fois meilleure que celle des instruments actuellement en opération sur le satellite *INTEGRAL*. En outre, pour prendre une part active aux analyses temporelles aux côtés d'observatoires comme CTA, SKA et LSST, l'instrument gamma devra bénéficier d'un grand champ de vue et pouvoir générer rapidement des alertes en cas de détection d'évènements transitoires. Fort de son expérience des multi-détecteurs pour la physique nucléaire et la physique des particules, et de son implication majeure dans les missions *INTEGRAL* et *Fermi*, l'IN2P3 pourrait jouer un rôle de premier plan dans le développement de cette nouvelle mission spatiale.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

L'astronomie gamma des moyennes énergies (0,1 – 100 MeV) offre un moyen privilégié d'étude des phénomènes énergétiques dans l'univers : explosions stellaires, interaction des rayons cosmiques avec les noyaux atomiques du milieu interstellaire, coalescence d'objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs) en systèmes binaires, éjection de matière de noyaux actifs de galaxie, annihilation d'antimatière, etc. L'énergie libérée dans les transitions nucléaires est rayonnée dans le domaine du MeV, qui joue ainsi un rôle aussi central pour l'étude des phénomènes d'astrophysique nucléaire que celui du visible pour les processus atomiques. Les objectifs scientifiques dans ce domaine de l'astronomie ont été récemment étudiés en détail et présentés dans un Livre Blanc dédié [1]. Trois thèmes majeurs se dégagent de cette étude.

- **Phénomènes astrophysiques extrêmes et origine des ondes gravitationnelles et des neutrinos cosmiques**

Les observations de noyaux actifs de galaxie (AGN) dans les gammes d'énergie des rayons X et des photons gamma du GeV-TeV ont montré que le domaine intermédiaire du MeV était crucial pour comprendre la transition entre les phénomènes liés à l'accrétion de matière par le trou noir supermassif et ceux associés à l'accélération de particules dans les jets. Dans de nombreux cas, la majeure partie de la puissance rayonnée apparaît dans la bande du MeV, qui est donc centrale pour comprendre la physique de ces objets et l'évolution de leur activité jusqu'à des redshifts $z \leq 7$. C'est également le cas pour les sursauts gamma (GRB), tant pour ceux résultant de la fusion de deux étoiles à neutrons que pour ceux dus à l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive. Les objectifs principaux d'un futur observatoire gamma spatial dans ce domaine sont (i) de comprendre la formation et l'évolution des trous noirs supermassifs et de leurs jets, (ii) d'identifier les processus d'accélération dans les jets et la composition (hadronique ou leptonique) du plasma éjecté (en lien avec l'origine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie), et (iii) de clarifier le rôle du champ magnétique dans l'alimentation des jets ultra-relativistes des sursauts gamma, en utilisant la spectroscopie et la polarimétrie résolues en temps (cf. Ref. [2]). Les récentes découvertes d'ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons et la localisation rapide de l'évènement en rayons gamma [3] ainsi que la détection d'un neutrino de haute énergie coïncidant avec une éruption d'AGN de type blazar [4] montrent que les observations gamma d'événements transitoires de haute énergie sont cruciales pour tirer le meilleur parti des observations multi-messagers [5].

- **Origine du rayonnement cosmique et son impact sur les écosystèmes galactiques**

L'astronomie gamma des moyennes énergies est indispensable pour progresser sur la question toujours en suspens de l'origine et de la propagation des rayons cosmiques de basse énergie qui influent sur l'évolution des galaxies. Elle permet d'identifier sans ambiguïté l'origine leptonique ou hadronique des émissions à haute énergie des sources des rayons cosmiques. Alors que les observatoires au TeV comme le futur « Cherenkov Telescope Array » (CTA) étudient principalement les mécanismes d'accélération de particules à très haute énergie, le domaine gamma des moyennes énergies permet de sonder les rayons cosmiques du MeV et du GeV qui concentrent l'essentiel de la densité d'énergie et de la pression des particules non thermiques dans le milieu interstellaire, et qui ont donc un impact maximum sur l'écosystème galactique. En mesurant la diffusion de ces rayons cosmiques dans les nuages interstellaires, un observatoire gamma sensible de 0,1 à 100 MeV déterminera le rôle de ces particules sur la dynamique et l'état thermodynamique du gaz, et donc sur la régulation du taux de formation d'étoiles ; il fournira également des diagnostics cruciaux sur les vents galactiques et leur impact à l'échelle de la Voie lactée (e.g. les bulles de Fermi). Un

autre objectif majeur sera la détection des raies nucléaires produites par les rayons cosmiques de basse énergie dans le milieu interstellaire. Cette émission constitue le moyen le plus direct d'étudier la composition et la distribution en énergie de ces particules à peine connues et pourtant essentielles pour le chauffage et l'ionisation des nuages moléculaires.

- **Nucléosynthèse stellaire, origine et évolution des éléments dans l'Univers**

L'astronomie gamma au MeV est également le meilleur moyen d'étude des supernovae et de la nucléosynthèse associée. La détection en rayons gamma de noyaux radioactifs synthétisés dans les supernovae de type Ia (^{56}Ni , ^{56}Co) nous renseigne directement sur la physique des explosions thermonucléaires (cf. Fig. 1), pour mieux les utiliser comme chandelles standard en cosmologie de précision. De même, l'astronomie au MeV apporte des informations uniques pour expliquer la diversité observée parmi les supernovae à effondrement de cœur et pour étudier la formation de l'objet compact – trou noir ou étoile à neutrons – qui en résulte. La cartographie du rayonnement gamma issu d'annihilation de positons et de la désintégration de radionucléides à vie longue (^{26}Al , ^{60}Fe) nous offre par ailleurs une vision dynamique unique du milieu interstellaire et de l'enrichissement progressif de la galaxie en éléments lourds.

Le Livre Blanc dédié à ce domaine de l'astronomie [1] passe en revue une multitude d'autres sujets de recherche de l'astrophysique contemporaine qui bénéficieraient des données d'un prochain observatoire gamma spatial : recherche indirecte de matière noire, test de modèles de baryogénèse, origine du fond diffus extragalactique, accélération de particules dans les vestiges de supernova et les vents stellaires, physique des magnétosphères de pulsars et des vents de pulsars, physique des systèmes binaires X et gamma, origine de l'émission gamma des éruptions solaires, des flashs de rayons gamma terrestres, etc.

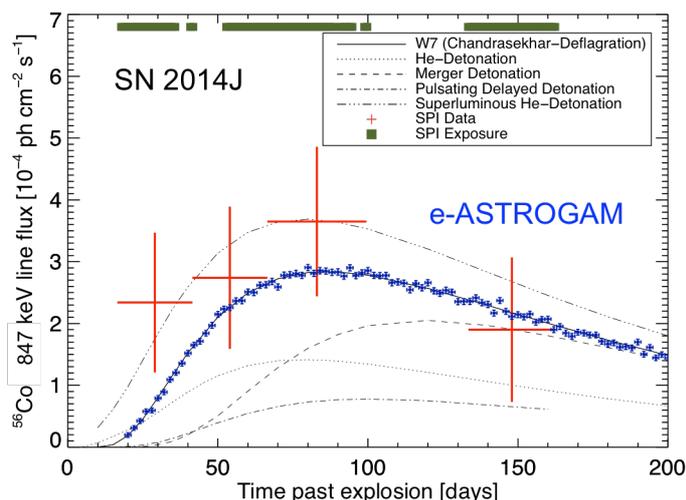


Figure 1 : Courbe de lumière de la raie à 847 keV du ^{56}Co détectée avec INTEGRAL/SPI (points de données en rouge) dans la supernova SN 2014J. Les points en bleu montrent la réponse simulée du projet d'observatoire e-ASTROGAM à une évolution temporelle de la raie à 847 keV suivant le modèle de supernova thermonucléaire W7.

Si le domaine de l'astronomie du MeV se caractérise par la richesse et l'importance de ses thèmes scientifiques, il s'illustre également par le manque de sensibilité des instruments ayant couvert ce domaine d'énergie (Fig. 2). A ce jour, seules quelques dizaines de sources astrophysiques stationnaires ont été détectées entre 0,2 et 30 MeV. En comparaison, le catalogue de l'instrument *Swift*-BAT comprend 1632 sources entre 14 et 195 keV¹, et le dernier catalogue de la collaboration *Fermi*-LAT répertorie 5065 sources détectées² à plus de 4σ au-dessus de 50 MeV.

¹ <https://swift.gsfc.nasa.gov/results/bs105mon/>

² https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8yr_catalog/

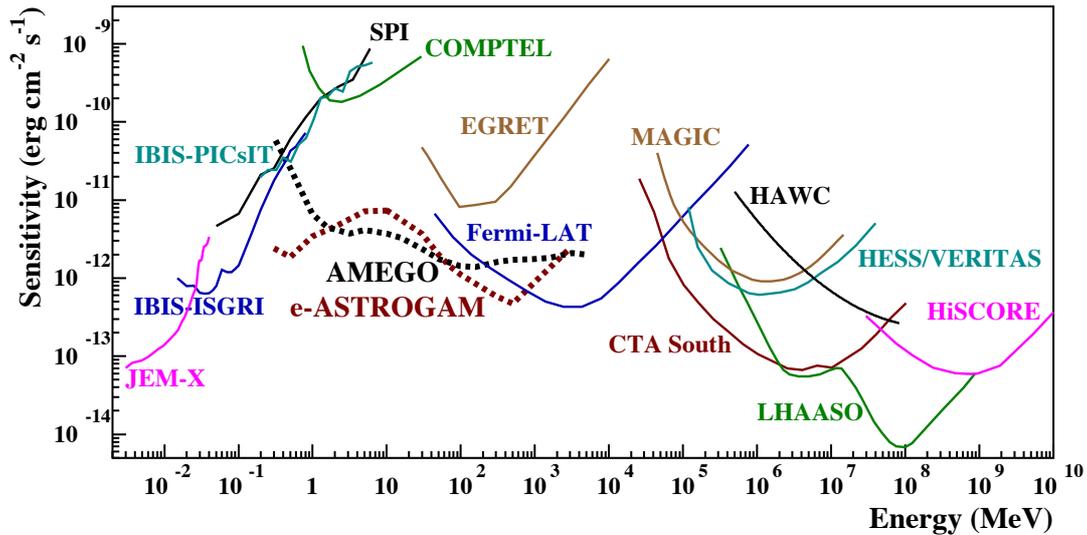


Figure 2 : Sensibilité différentielle de différents instruments X et gamma (voir Ref. [1]). A ce jour, les instruments opérant dans le domaine du MeV (*CGRO/COMPTEL*, *INTEGRAL/SPI*) ont atteint un niveau de sensibilité bien moindre que celui obtenu dans les domaines adjacents des rayons X et photons gamma du GeV. Les courbes en pointillé montrent les sensibilités prédites des projets de mission *e-ASTROGAM* (ESA) et *AMEGO* (NASA).

TECHNIQUE D'OBSERVATION ET INSTRUMENTATION EMBARQUEE

Le prochain observatoire gamma des moyennes énergies devra atteindre un niveau de sensibilité entre 0,2 et 30 MeV similaire à celui des instruments équipant le satellite *INTEGRAL* à plus basse énergie (JEM-X, IBIS-ISGRI) et ceux du télescope LAT de la mission *Fermi* à plus haute énergie (Fig. 2). En outre, pour participer pleinement à l'essor actuel des analyses temporelles aux côtés d'observatoires comme CTA, SKA et LSST, l'instrument gamma spatial devra bénéficier d'un grand champ de vue et pouvoir générer rapidement des alertes en cas de détection d'événements transitoires.

Si la communauté gamma a répondu en ordre dispersé aux premiers appels à mission de l'ESA pour le programme « Cosmic Vision », la situation a changé depuis 2014 avec la création en France de la fédération AstroMeV³, puis l'union de cette collaboration avec la communauté européenne des astronomes gamma du GeV. Ce regroupement a conduit à la proposition unifiée ASTROGAM pour la mission M4, puis *e-ASTROGAM* (« enhanced ASTROGAM ») pour M5. Plus récemment, la collaboration a proposé pour la mission « Fast » de l'ESA (lancement conjoint avec la mission *ARIEL* en L2) un moniteur gamma grand champ pour l'astronomie multi-messager [7]. Le Livre Blanc de la science au MeV [1] a été porté par une communauté encore plus vaste, incluant 29 pays. La communauté gamma internationale s'accorde sur le fait que le prochain grand instrument spatial devrait être un télescope de type Compton et à effet de paires couvrant plus de trois ordres de grandeur en énergie (d'environ 100 keV à plus de 100 MeV).

Le principe de fonctionnement d'un tel instrument est illustré sur la Figure 3. Il repose sur une mesure précise de la position (3D) et du dépôt d'énergie de toutes les interactions dans l'instrument. Dans le domaine de 100 keV à environ 10 MeV, il permet d'exploiter les diffusions Compton des photons gamma incidents. La mesure de la trace de l'électron de recul issu de la diffusion Compton permet en outre un gain significatif en rapport signal sur

³ <http://astromev.in2p3.fr/>

bruit au-dessus de quelques MeV (cf. Fig. 3 à *gauche*). Au-dessus de 10 MeV, le télescope fonctionne comme le LAT de *Fermi* par la reconstruction des traces de paires électron-positon issues de l'annihilation des photons gamma. L'instrument est composé de trois grands détecteurs : (i) un trajectographe constitué de couches minces de détecteurs en silicium double face à pistes, optimisé pour la diffusion Compton des photons gamma de basse énergie et la reconstruction des paires $e^+ - e^-$ produites à haute énergie, (ii) un calorimètre composé de cristaux scintillants inorganiques pour l'absorption des photons diffusés et des particules secondaires, et (iii) un système d'anti-coïncidence constitué de scintillateurs plastiques entourant l'instrument pour réduire le bruit de fond prompt induit par les particules chargées incidentes (rayons cosmiques). Dans la proposition ESA M5, l'instrument pèse une tonne (marges comprises) et le satellite (incluant la plateforme PROTEUS 800 de Thales Alenia Space) a une masse totale (masse « mouillée ») de 2,7 tonnes. Une description détaillée de l'instrument et de la mission proposés est donnée dans la référence [6].

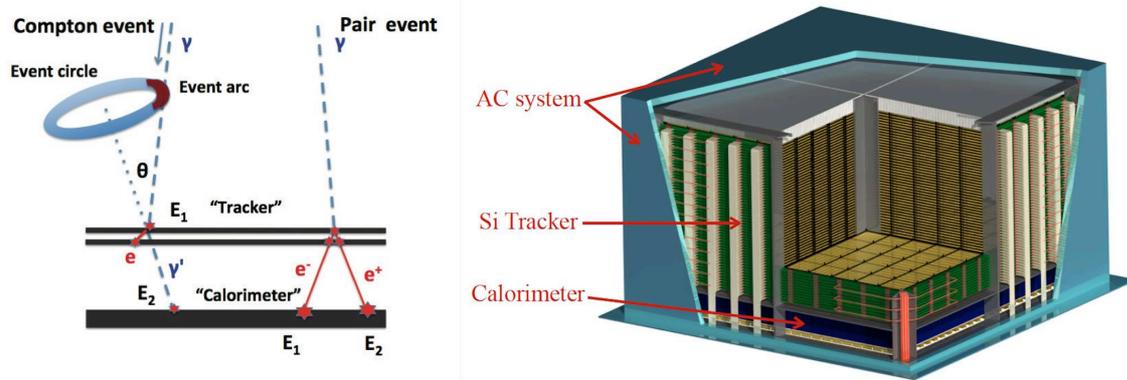


Figure 3 : (A *gauche*) Représentation d'un événement Compton et d'un événement à création de paire électron-positron dans un télescope de type ASTROMEV. (A *droite*) Vue d'ensemble de la charge utile de la proposition de mission e-ASTROGAM .

COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE FRANÇAISE IMPLIQUEE

La communauté scientifique française impliquée dans les missions *INTEGRAL* et *Fermi*, qui associe l'IN2P3, l'INSU et le CEA, joue un rôle moteur à l'échelle européenne et internationale pour promouvoir un nouvel observatoire spatial pour l'astronomie gamma des moyennes énergies. Elle bénéficie pour ce faire d'une excellente visibilité scientifique sur la plupart des thèmes de recherche de l'astronomie gamma des moyennes énergies : physique du rayonnement cosmique, physique des objets compacts, étude de la nucléosynthèse explosive, des sursauts gamma, du fond diffus extragalactique etc.⁴ L'IN2P3, en particulier,

⁴ On pourra consulter à titre d'exemple les six actualités et communiqués de presse du CNRS suivants :

- INTEGRAL détecte pour la première fois la polarisation d'un sursaut gamma, <http://archives.cnrs.fr/in2p3/article/288>
- Le cocon du Cygne, une étape dans le voyage tumultueux des rayons cosmiques, <http://archives.cnrs.fr/in2p3/article/196>
- Première mesure fine du « brouillard cosmique » dans l'Univers proche, <http://archives.cnrs.fr/in2p3/article/26>
- Émissions inattendues de rayonnements gammas par des novae classiques, <http://www.insu.cnrs.fr/node/4962>
- Découverte de l'émission des raies gamma du ^{56}Co d'une supernova de type Ia avec l'observatoire INTEGRAL, <http://www.insu.cnrs.fr/node/4973>
- Détection du premier pulsar gamma extragalactique, <http://archives.cnrs.fr/presse/article/4297>

est régulièrement sollicité pour un support à l'animation scientifique autour de ces thèmes de recherche.

Les laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans ce projet possèdent par ailleurs une expertise technique importante pour le développement d'un tel télescope gamma. Ainsi, ils pourraient prendre une responsabilité majeure dans la réalisation du calorimètre de l'instrument, bénéficiant de l'expérience acquise dans le développement du calorimètre de *Fermi-LAT*. L'IN2P3 devrait également être partie prenante du développement du trajectographe en silicium, fort de son expérience des multi-détecteurs silicium pour la physique nucléaire et la physique des particules. Enfin, l'institut pourrait jouer un rôle de premier plan dans le traitement des données à bord et au sol, grâce notamment à son implication actuelle dans l'analyse des données de *Fermi-LAT*.

CONTEXTE INTERNATIONAL

Les propositions (e-)ASTROGAM (missions M4 et M5), et All-Sky-ASTROGAM (mission F1) ont toutes passé avec succès la sélection de l'ESA pour les critères de faisabilité technique et programmatique, mais elles n'ont pas été retenues au final. L'Agence Spatiale a néanmoins reconnu l'importance du domaine du MeV dans le développement actuel de l'astronomie multi-longueurs d'onde et multi-messagers⁵.

La collaboration poursuit actuellement deux pistes. Elle a récemment entamé des discussions avec l'Académie des Sciences de la Fédération de Russie et l'Institut de Recherche Spatiale Russe (IKI), qui se montrent très intéressés par le projet. Ces discussions visent à établir un partenariat Russo-Européen pour la réalisation, le lancement et l'exploitation de la mission, similaire à celui mis en place pour le satellite INTEGRAL. Plusieurs chercheurs de l'IN2P3 sont par ailleurs fortement impliqués dans le projet AMEGO (All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory), qui vise à concevoir une mission de classe « Probe » pour la NASA. Ce projet, porté par le laboratoire GSFC de la NASA, est très similaire à la proposition e-ASTROGAM, tant pour les objectifs scientifiques visés que pour la conception et les performances du télescope gamma⁶. Une fusion du projet européen avec le projet américain pourrait conduire à une large et ambitieuse mission internationale, à la mesure des enjeux scientifiques de ce domaine de l'astronomie.

⁵ Voici la conclusion générale de l'évaluation de la proposition M5 par l'ESA : "e-ASTROGAM is a mission with good prospects for scientific advances on the timescale of M5. The line and continuum sensitivity in the 1 – 10 MeV range are a considerable improvement on previous missions, so that progress is very likely on the major science topics of (a) processes associated with extreme physical conditions, including in transient events; (b) the effects of high-energy particles on galaxies and galaxy evolution; and (c) the varieties of stellar nucleosynthesis at the ends of stellar lifetimes. There is discovery potential for new astrophysics and astro-particle physics phenomena".

⁶ Voir <https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/>

REFERENCES

- [1] De Angelis, A., Tatischeff, V., Grenier, I., and 248 co-authors, *Science with e-ASTROGAM: A space mission for MeV – GeV gamma-ray astrophysics*, Journal of High Energy Astrophysics, Volume **19**, pages 1-106 (2018)
- [2] Tatischeff, V., De Angelis, A., Gouiffès, C., Hanlon, L., Laurent, P., Madejski, G., Tavani, M., Ulyanov, *The e-ASTROGAM mission : a major step forward for gamma-ray polarimetry*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems **4**, id. 011003 (2018)
- [3] Goldstein, A., Veres, P., Burns, E., and 27 co-authors, *An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A*, The Astrophysical Journal Letters, Volume **848**, Issue 2, article id. L14, 14 pp. (2017)
- [4] Aartsen, M. G., Ackermann, M., Adams, J., et al. (IceCube Coll. And others), *Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A*, Science, Volume **361**, 6398, eaat1378 (2018)
- [5] Tatischeff, V., De Angelis, A., Tavani, M., and 74 co-authors, *The e-ASTROGAM gamma-ray space observatory for the multimessenger astronomy of the 2030s*, Proceedings of the SPIE, Volume **10699**, id. 106992J, 15 pp. (2018)
- [6] De Angelis, A., Tatischeff, V., Tavani, M., and 71 co-authors, *The e-ASTROGAM mission - Exploring the extreme Universe with gamma rays in the MeV - GeV range*, Experimental Astronomy **44**, 25 – 82 (2017)
- [7] Tatischeff, V., De Angelis, A., Tavani, M., and 33 co-authors, *All-Sky-ASTROGAM: The MeV Gamma-Ray Companion to Multimessenger Astronomy*, Proceedings of the 12th INTEGRAL Conference, Memorie della Societa Astronomica Italiana, sous presse, [arXiv:1905.07806](https://arxiv.org/abs/1905.07806)