Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Détecteurs et instrumentation associée

Unité de détection UV et visible ultra-sensible et versatile

Auteur principal

Nom : Guillaume Prévôt

Affiliation : APC IN2P3

Email et coordonnées : prevot@apc.in2p3.fr

Co-auteurs (inclure aussi les collaborateurs internationaux si existants)

Sylvie Blin (OMEGA IN2P3)

Alexandre Creusot (APC IN2P3)

Etienne Parizot (APC IN2P3)

Jacek Szabelski (NCBJ Poland)

*Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT08-COPIL-L@IN2P3.FR avant le **1er novembre 2019***

1. Informations générales

Titre : Unité de détection UV et visible ultra-sensible et versatile

Acronyme : *(optionnel)*

Résumé

Les détecteurs ultra-sensibles et versatiles présentés ici sont optimisés pour détecter des signaux lumineux de très faible intensité se développant en traînées rectilignes sur des échelles de temps variées.

Ils ont été développés dans le cadre d'activités soutenues par l'IN2P3 et le CNES. Ils peuvent opérer dans l'UV et le visible, ils sont utilisés en mode « comptage de photon unique » ; ils sont multicanaux (256 pixels), rapides (1 µs avec une résolution en comptage de 6 ns), légers (255 g), basse consommation (350 mW), compacts (55x55x55 mm), juxtaposables, étalonnés et spatialisables.

Préciser le domaine technologique *(plusieurs choix possibles)*

- o Photo-détecteurs (Multianode Photomultiplier tube MAPMT)
- o Micro-électronique, Electronique Front End (ASIC dédié)
- o Mécanique, intégration (assemblage et enrobage)

Préciser la motivation principale de recherche visée par la contribution :

- o R&D Rayons Cosmiques
- o *Autre R&D spécifique :* phénomènes atmosphériques de haute énergie, météores, débris spatiaux, …

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

Une intense activité de R&D se développe à l'échelle internationale dans le domaine de la photodétection, afin de répondre aux nombreux besoins exprimés par les équipes scientifiques œuvrant dans le domaine des astroparticules, avec des caractéristiques de sensibilité, de compacité et de consommation particulièrement exigeantes.

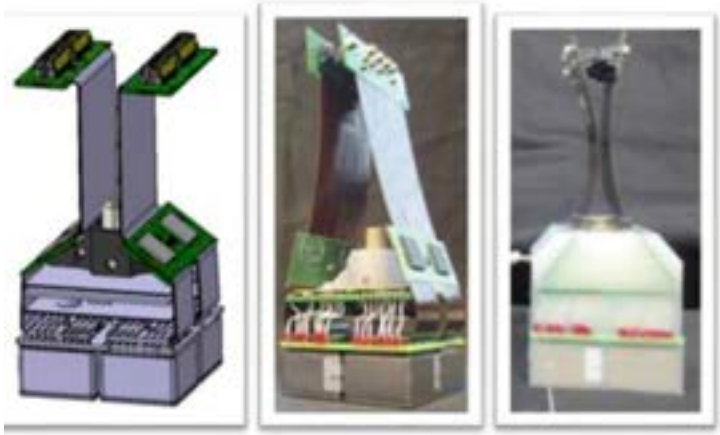
Des travaux novateurs ont été menés dans ce domaine par les équipes françaises de l'IN2P3 dans le cadre de la collaboration internationale JEM-EUSO (Observatoire Spatiale de l'Univers Extrême) pour la détection spatiale des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Les deux premières générations de détecteurs ont été développées dans le cadre des missions EUSO-Ballon (mission CNES sous ballon stratosphérique, en 2014) et EUSO-SPB (mission NASA sous ballon pressurisé, en 2017). La troisième génération d'unités de détection est d'ores et déjà réalisée et fonctionnelle ; ces détecteurs opèreront dans le cadre des futures missions de la collaboration JEM-EUSO (notamment EUSO-SPB2, mission sous ballon pressurisé de la NASA en 2022, et les missions de grande envergure K-EUSO, sous l'égide de RosCosmos pour un vol en 2023, et POEMMA, sous l'égide de la NASA pour un vol à l'horizon 2028 – 2030).

Ces travaux (centrés sur la photodétection, l'électronique de front-end, avec la réalisation d'un ASIC dédié, et la calibration de précision) ont été soutenus à deux reprises par le programme « DEFI-Instrumentation aux limites », et ont permis d'aboutir à une unité de détection unique en son genre, dont les caractéristiques instrumentales se révèlent hautement valorisables, dans le domaine des astroparticules et au-delà. Ainsi, des versions intermédiaires des unités de détection ont été mise en œuvre dans le cadre de la mission spatiale pluridisciplinaire MINI-EUSO, dans l'ISS, qui vient d'être lancée avec succès le 22 août 2019 et dans le cadre d'une mission microsatellite russe pluridisciplinaire (Universat Socrate 2020). L'identification d'opportunités concrètes de valorisation et d'applications de l'unité de détection à d'autres domaines (nucléaire, médical) se poursuit.

L'accroissement des performances de cette unité de détection, en améliorant les capteurs MAPMTs pour nos applications (en lien direct avec Hamamatsu Japon), en étudiant et en testant l'alternative des SiPM au sein de notre détecteur, en faisant évoluer notre ASIC pour accéder à différentes échelles de temps, est déjà à l'étude.

De plus, une étude pour rendre ces détecteurs plus versatiles est en cours, afin de tirer parti de ses caractéristiques et performances uniques dans divers domaines d'intérêt où la capacité à détecter des traînées lumineuses de faible intensité est particulièrement précieuse. C'est le cas notamment pour la détection des phénomènes atmosphériques de haute énergie, dans les régions orageuses (TEBs, etc.), pour l'observation des météores, ou encore pour la détection de débris spatiaux de petite taille, qui échappent aux radars mais représentent un enjeu majeur pour le spatial.

3. Livrables associés, calendrier et budget indicatifs



Unités de détection de troisième génération : CAO (à gauche), prototype nu (au milieu), unité enrobée (à droite)

Nous avons réalisé en 2018 – 2019 l'étude conceptuelle et mené à bien la réalisation de prototypes de troisième génération dans le cadre des missions EUSO-SPB2 et K-EUSO. Pour ces deux missions, nous réalisons la production de 40 unités de détection (voir photo ci-dessus) en synergie avec Matra Électronique et Hamamatsu Japon. Ces unités sont constituées de 4 MAPMTs 64 pixels (Hamamatsu R11265), un PCB de routage des dynodes, 4 PCB de routage des anodes liés via kapton aux cartes ASIC, 1 PCB de production des haute-tensions type Cockcroft-Walton, 2 PCB de cartes ASIC SPACIROC 3 dédié (packagé en BGA 12x12mm) et deux PCB connecteurs liés via kaptons. L'unité finale comporte 256 pixels produisant un million de cartes de lumière par secondes (en comptage de photons). L'équipe APC (IN2P3) interagit avec Hamamatsu Japon pour adapter les capteurs MAPMTs utilisés. L'équipe OMEGA (IN2P3) est responsable du développement des ASIC et des cartes ASIC en lien avec l'APC. L'équipe polonaise (NCBJ Lodz) est responsable des circuits haute-tensions en lien avec l'APC. L'APC sous-traite à l'entreprise MATRA Électronique (depuis 2010) l'assemblage et l'enrobage des unités en production.

Afin d'accroitre encore les performances de ces détecteurs, de bénéficier des importantes avancées récentes de la technologie, et de développer la polyvalence de ces détecteurs, nous avons répondu à l'appel d'offre R&T du CNES, demandant une enveloppe de 62k€ en 2020 – 2021.

4. Impact *(1/2 page max.) (optionnel)*

Un domaine dans lequel ces unités de détection s'avèrent très prometteuses est le domaine des débris spatiaux. Un débit spatial, même de petite taille (de 1 à 10 cm), réfléchit suffisamment de lumière lunaire (ou solaire, à l'aube ou au crépuscule) pour être détecté jusqu'à ~100 km sous forme d'une traînée lumineuse s'il passe dans le champ de vue de nos instruments. C'est l'origine d'une idée nouvelle pour s'attaquer à la problématique des débris. Cette idée, qui a retenu l'attention de la communauté concernée, fait suite à un article de 2015 (*Ebisuzaki et al., Acta astronautica, 112, 102*) co-signé notamment par le porteur de la présente demande de R&T et Gérard Mourou (Prix Nobel de Physique 2018), proposant d'associer le savoir-faire des équipes EUSO dans le domaine de la photodétection au savoir-faire de Gérard Mourou et de son équipe dans le domaine des lasers. Il s'agit de bénéficier conjointement des performances uniques de l'unité de détection visée par le présent projet, et des progrès considérables effectués sur les lasers de très haute puissance et très courte impulsion. Diverses actions sont à l'étude pour mettre en œuvre un projet concret de démonstration et de désorbitation de débris spatiaux de tailles comprises entre 1 et 10 cm. L'idée est de détecter les débris par une caméra de type EUSO, de reconstruire leur trajectoire selon le schéma habituel mis en œuvre dans ce cadre, puis de venir focaliser un laser sur le débris pour provoquer une vaporisation locale (ablation) conduisant, par réaction, à ralentir le débris, et ainsi le désorbiter pour qu'il se volatilise dans l'atmosphère. Le concept a été présenté à diverses reprises aux conférences sur les débris spatiaux organisées au CNES. Nos cosignataires et partenaires japonais ont également obtenu en 2018 un financement de grande ampleur (équivalent à 20 M€ sur 5 ans), dont l'un des volets concerne la « proof of concept » de cette technique. À ce jour, les unités de détection proposées par les japonais sont celles que nous avons développées, et nous espérons que les travaux menés dans le cadre de futures R&D permettront de consolider notre avance technologique dans ce domaine.

Ces unités de détection pourraient également avoir des applications dans des domaines tels que le nucléaire et le médical.

5. Références

Pour une présentation plus large d'un volet important du contexte scientifique, voir le document de prospective (GT 04) présenté par E. Parizot et al., intitulé : « Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie : la voie spatiale. »

Voici par ailleurs une sélection de références relatives aux développements de la technologie EUSO, aux missions mentionnées dans le présent document et à leurs résultats.

Articles de rang A :

- The JEM-EUSO Mission: 15 articles: Special Issue of Experimental Astronomy: vol. 40, Nov. 2015

- On-line and off-line data analysis for the EUSO-TA experiment: Piotrowski et al., NIM A 773, 164 (2015)

- The EUSO-Balloon pathfinder: Adams, J. et al. (The JEM-EUSO Collaboration), Exp. Astron., DOI 10.1007/s10686-015-9467-9, (2015)

- Ebisuzaki et al., Acta astronautica, 112, 102

- Design and implementation of the Photo-Detector electronics for the EUSO-Balloon: Jung, A., Journal of Instrumentation, Volume 10, Issue 08, C08014 (2015).

- The readout electronic of EUSO-Balloon experiment: Ahmad, S.; Barrillon, P.; Blaksley, et al, Journal of Instrumentation, Volume 9, Issue 03, C03050 (2014).

- The data processor of the EUSO-Balloon experiment: Scotti, V.; Osteria, G., Journal of Instrumentation, Volume 9, Issue 03, C03034 (2014).

- A balloon-borne prototype for demonstrating the concept of JEM-EUSO: von Ballmoos, Peter, Adv. Space Res., Volume 53, Issue 10, Pages 1544–1550 (2014)

- A setup for the precision measurement of multianode photomultiplier efficiency: Blaksley, C., Gorodetzky, P., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 764, 198-205. (2014)

- Meteor studies in the framework of the JEM-EUSO program: G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), Planetary and Space Science 143 (2017) 245–255

- Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger: G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), NIM A 866 (2017) 150–163

- First observations of speed of light tracks by a fluorescence detector looking down on the atmosphere: G. Abdellaoui et al. (JEM-EUSO Collaboration), JINST 13 (2018) P05023

Proceedings avec comité de lecture :

- The EUSO-BALLOON mission: P. von Ballmoos et al., Proc. of Science (ICRC2015) 322 (2015)

- Preliminary results from the first EUSO-Balloon flight: M. Bertaina et al., Proc. of Science (ICRC2015) 358 (2015)

- Search for significant background fluctuations in the EUSO-Balloon data: A. Jung, E. Parizot, G. Suino, M. Bertaina, P. Gorodetzky and P. Barrillon, Proc. of Science (ICRC2015) 373 (2015)

- The Calibration of EUSO Balloon using airborne light sources mounted to a Helicopter: J. Adams, M. Mustafa, M. Rodencal, et al., Proc. of Science (ICRC2015) 580 (2015) 14/15

- EUSO-Balloon trigger efficiency in preparation of a long duration flight: S. Bacholle, F. Fenu, E. Parizot and M. Bertaina, Proc. of Science (ICRC2015) 608 (2015)

- The Simulation of cosmic rays in EUSO–Balloon: performances of the direction and energy reconstruction: F. Fenu et al., Proc. of Science (ICRC2015) 609 (2015)

- Performance of the EUSO-BALLOON optics: C. Catalano, P. Von Ballmoos, B. Mot, G. Roudil, C. Smith, G. Durando, Y. Takizawa. N. Sakaki et al., Proc. of Science (ICRC2015) 622 (2015)

- EUSO-Balloon mission to record extensive air showers from near space: L. Wiencke et al., Proc. of Science (ICRC2015) 631 (2015)

- EUSO-Balloon: Observation and Measurement of Tracks from a Laser in a Helicopter: J. Eser, J. Adams, R. Attallah, et al., Proc. of Science (ICRC2015) 638 (2015)

- The WRF model contribution to the Cloud Top Height retrieval in EUSO-Balloon experiment: I. Tabone et al., Proc. of Science (ICRC2015) 642 (2015)

- Tests of JEM-EUSO First Level Trigger using EUSO-Balloon data: G. Suino et al., Proc. of Science (ICRC2015) 645 (2015)

- Absolute calibration of the photon detector module of the EUSO-Balloon experiment and improvements for future missions: C. Moretto, for the JEM-EUSO Collaboration, Proc. of Science (ICRC2015) 655 (2015)

- The Data Processor System of EUSO-Balloon: in flight performance: G. Osteria, V. Scotti, J. Bayer and C. Fornaro, Proc. of Science (ICRC2015) 659 (2015)

- Analysis of EUSO-Balloon data with Offline: B. Panico et al., Proc. of Science (ICRC2015) 667 (2015)

- Night time measurement of the UV background by EUSO-Balloon: S. Mackovjak, A. Neronov, P. Bobík, et al., Proc. of Science (ICRC2015) 685 (2015)

- Determination of the sensitivity and the detection performances of the UV camera pixels of the EUSO-Balloon instrument: S. Dagoret, for the JEM-EUSO Collaboration, Proc. of Science (ICRC2015) 697 (2015)

- First results from the EUSO-Balloon campaign: Eser, J.; Adams, J.; Christl, et al., APS April Meeting 2015, abstract #K14.001 (2015)