

Contribution « Prospectives 2020 » - GT 04

Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie : la voie spatiale

Auteur principal :

Nom: Parizot Etienne

Institution: APC

Email: parizot@apc.in2p3.fr

Téléphone: 06 75 93 92 41

Co-auteurs: (noms et institutions)

Allard Denis (APC)

Blin Sylvie (OMEGA)

Creusot Alexandre (APC)

De La Taille Christophe (OMEGA)

Martineau Olivier (LPNHE)

Neronov Andrii (APC)

Prévôt Guillaume (APC)

Semikoz Dmitry (APC)

Abstract :

Dans cette contribution, nous présentons les enjeux scientifiques associés au domaine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, et décrivons les opportunités offertes par la voie d'exploration depuis l'espace, qui atteint sa maturité sur le plan expérimental à travers le développement du programme international JEM-EUSO, au sein duquel les équipes françaises sont stratégiquement positionnées. Des percées significatives sont attendues dans les années à venir, qui requièrent le maintien d'un équilibre judicieux entre les volets théorique, phénoménologique, instrumental et expérimental.

1) Enjeux et atouts de la communauté française

L'élucidation de l'origine des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (UHECR), de leur nature et de leurs mécanismes d'accélération est reconnue à l'échelle internationale comme l'un des enjeux majeurs du domaine des « astroparticules », en liaison étroite avec l'ensemble de l'astrophysique des hautes énergies, notamment à travers la compréhension physique et la description astrophysique des sources les plus puissantes de l'univers connu. Les UHECRs constituent par ailleurs l'un des quatre piliers de la stratégie globale dite « multi-messagers » pour l'étude de l'univers, avec les photons, les neutrinos et les ondes gravitationnelles. Dans ces deux derniers domaines, des progrès décisifs ont été accomplis ces dernières années, avec l'ouverture historique d'une astronomie non-photonique dont le développement marquera les décennies à venir. Dans le domaine des UHECRs, les résultats de l'Observatoire Pierre Auger (Auger) et du *Telescope Array* (TA) ont fait progresser de manière considérable nos connaissances sur la partie la plus extrême du spectre d'énergie des rayons cosmiques, et stimulé de très nombreuses études à travers le monde.

La France, particulièrement à travers l'IN2P3, a largement contribué au succès d'Auger sur le plan expérimental et observationnel, ainsi qu'au profond renouvellement du domaine au niveau théorique et phénoménologique. Ce sont notamment les chercheurs français qui ont initié, dès avant les résultats d'Auger relatifs à la composition des UHECRs, les nouvelles études phénoménologiques prenant en compte les noyaux d'ultra-haute énergie et non plus seulement les protons (en s'appuyant d'ailleurs sur des modèles de Physique nucléaire développés au sein de l'institut), avec des conséquences majeures sur les modèles d'accélération et de propagation. Ce sont eux également, qui ont mis en lumière l'importance de l'étude de la transition Galactique/extragalactique pour le rayonnement cosmique (au niveau du spectre d'énergie, de la composition et des anisotropies), reconnaissant la richesse des contraintes qui peuvent en être tirées, tant pour la phénoménologie des UHECRs que pour les modèles de sources Galactiques. Enfin la prise en compte détaillée des déflexions des rayons cosmiques par les champs magnétiques a ouvert un vaste champ d'études à l'interface entre théorie, phénoménologie et observations. Nous sommes aujourd'hui capables de simuler des cartes du ciel réalistes, pour une grande variété de modèles astrophysiques (incluant des modèles d'accélération, pour des sources de divers types, transitoires ou non, de densités, de distributions spatiales et d'évolutions cosmologiques variées), de les contraindre à l'aide des observations présentes, et de comparer leurs prédictions pour les *datasets* plus larges et/ou plus riches et/ou plus uniformes que fourniront les observatoires de prochaine génération. En outre, les modèles de propagation détaillés permettent de calculer les flux de particules secondaires, photons et neutrinos, produites par interaction des UHECRs primaires avec le fonds diffus cosmologique (CMB) et autres fonds de photons intergalactiques (notamment infra-rouges). Ceci permet d'établir de manière explicite un lien entre les différents messagers, et de tirer parti des contraintes offertes par l'étude des divers rayonnements diffus sur les modèles de sources. Cet élément, potentiellement très précieux, constitue une part encore trop peu exploitée de l'astronomie multi-messagers, qui, en se concentrant trop exclusivement sur l'observation simultanée des sources à travers différents canaux, laisse de côté les rayons cosmiques chargés qui parviennent sur Terre avec un délai trop important, et prive cette astronomie nouvelle d'une partie de son potentiel.

Le message central que nous souhaitons promouvoir dans le cadre de ce travail de prospective est la nécessité de maintenir une forte capacité de recherche et d'innovation au sein de ce domaine majeur pour les astroparticules, en conservant une position équilibrée entre les versants théorique, instrumental et d'analyse des données, héritage d'une longue histoire nationale remontant à Pierre Auger lui-même. Comme l'on sait, ce domaine des astroparticules est en plein essor au niveau international, et la France y jouit d'une position tout à fait privilégiée, avec d'une part un investissement institutionnel important dès les premières étapes de cet essor (cf. la création, à un moment crucial, de la « Section 47 » du CNRS, la

forte participation à l'APPEC, la création de l'APC, etc.), d'autre part un savoir-faire expérimental renforcé par une participation très importante à Auger, avec le soutien décisif de l'IN2P3, et enfin une grande reconnaissance de ses chercheurs au sein de la communauté internationale. À ces atouts doit être ajouté le rôle majeur joué par la communauté française dans la mise en œuvre des nouvelles voies de développement du domaine, avec notamment la détection radio des gerbes atmosphériques géantes et la transposition dans le domaine spatial de la technique dite de fluorescence. Ces travaux s'inscrivent dans une vision stratégique à moyen terme, qui a été portée par les équipes et assumée très en amont. Il convient à présent d'en tirer les bénéfices et d'en récolter les fruits scientifiques, ce qui sera l'un des enjeux de la décennie qui s'ouvre dans le domaine des UHECRs, afin de poursuivre le développement du versant « rayons cosmiques » de la stratégie multi-messagers.

S'il est clair, sur le plan théorique, que ce développement impliquera l'approfondissement coordonné de nombreux domaines de l'astrophysique et des astroparticules, la direction à suivre sur le plan observationnel est encore partiellement incertaine, et il est probable qu'elle devra s'appuyer sur la complémentarité de plusieurs approches.

2) Les nouveaux besoins observationnels

Si l'on se base sur les attentes de la communauté des UHECRs formulées il y a plus d'une vingtaine d'années, l'absence de détection de sources ponctuelles par les observatoires Auger et TA peut sembler décevante. Elle ne doit toutefois pas être vue comme un échec : bien au contraire, puisque les données recueillies se sont avérées d'une très grande qualité (notamment celles de l'Observatoire Pierre Auger, qui permettent d'ailleurs d'ouvrir également des questions potentiellement très importantes sur la Physique des gerbes), qu'elles ont conduit à modifier très largement notre compréhension du phénomène des UHECRs, et qu'elles portent en elles la raison même de cette absence de détection, à savoir la présence apparemment dominante, aux plus hautes énergies, de noyaux plus lourds que les protons, et donc davantage défléchis par les champs magnétiques (notamment dans la Galaxie).

D'une manière générale, les données d'Auger et de TA plaident fortement pour la mise en place de moyens d'observation accrus à l'extrême limite du spectre d'énergie, au-delà de $5 \cdot 10^{19}$ eV. L'un des enjeux de ce domaine d'énergie est d'exploiter l'effet d'horizon GZK, dû à l'interaction des UHECRs avec le fond diffus cosmologique (CMB et infrarouge), afin de réduire considérablement (jusqu'à moins d'une dizaine, voire quelques unités) le nombre de sources potentielles contribuant significativement au flux observé, et de surmonter la confusion angulaire des sources, même en présence de déflexions non négligeables.

Les récentes données fournies par les observatoires au sol montrent que l'entreprise n'est pas vaine, puisque les premières anisotropies significatives, aux moyennes et grandes échelles angulaires, ont pu être établies. Toutefois, leur amplitude reste relativement faible, et ne permettent pas de trancher quant à l'origine des UHECRs, et *a fortiori* leur mode d'accélération. Il est clair qu'un accroissement du rapport signal-sur-bruit de ces anisotropies sera l'un des enjeux majeurs des futurs développements. L'une des options, suivie par *Auger Prime*, vise en quelque sorte, à défaut d'accroître le signal, à réduire le bruit, en obtenant une résolution en masse des gerbes cosmiques telle qu'il serait possible d'isoler, dans la carte du ciel, les UHECRs les plus légers, et donc les moins défléchis par le champ magnétique. En éliminant ainsi le « bruit » (plus) isotrope fourni par les noyaux plus lourds, et sous l'hypothèse que la composante de protons ne chute pas trop rapidement à haute énergie, un signal d'anisotropie devrait pouvoir apparaître de manière plus significative, probablement à des échelles angulaires plus petites, ce qui représenterait un pas significatif.

Une autre option, particulièrement intéressante aux énergies extrêmes, consiste à accroître le signal en augmentant notablement la statistique. Une telle approche ne peut être suivie avec les moyens traditionnels, car multiplier par dix la surface de détection d'Auger ($3\,000 \text{ km}^2$) est aujourd'hui jugé inaccessible. Une option possible pourrait être le recours à la technique de détection radio : c'est l'approche suivie notamment par le projet GRAND. Une autre approche, particulièrement avantageuse sur le plan conceptuel et le plan logistique, consiste à conserver la technique éprouvée de détection et de reconstruction

des gerbes cosmiques à partir du signal de fluorescence, mais à la porter dans l'espace. Un instrument unique, observant depuis une orbite basse (comme celle de l'ISS) avec un champ de vue de $\pm 30^\circ$ couvre en effet à lui seul environ $200\,000\text{ km}^2$. En outre, l'observation depuis une orbite spatiale permet d'observer, avec le même instrument, l'ensemble du ciel avec une couverture proche de l'uniformité.

Enfin, les développements récents ont fait apparaître un avantage supplémentaire de l'option spatiale dans la perspective multi-messagers, avec la possibilité d'orienter l'instrument vers le limbe de la Terre, afin d'observer des gerbes de neutrinos montantes (conversion d'un neutrino tau en particule tau dans la croûte terrestre, puis décroissance du tau initiant une gerbe observable par la lumière Cherenkov directe reçue par l'instrument). Le seuil en énergie pour un tel processus est nettement plus bas, autour de 10^{17} eV , ce qui permet de détecter les neutrinos cosmogéniques (produits en vol par les UHECRs) dont la mesure du flux et du spectre en énergie est un enjeu extrêmement important. En effet, ces neutrinos donnent également accès à des sources de rayons cosmiques situées au-delà de l'horizon GZK, et donc à l'histoire cosmologique des sources. Par exemple, l'absence possible de sources de protons visibles aux énergies extrêmes n'empêche pas qu'il en existe quelques-unes derrière l'horizon (situé à seulement quelques dizaines de Mpc), ou que de telles sources aient été plus actives ou aient accéléré à plus haute énergie par le passé. L'effet GZK n'affectant pas les neutrinos, eux seuls seraient capables de donner accès à de telles informations. Cette technique d'observation de la lumière Cherenkov en provenance du limbe, initialement pensée dans un contexte de vols ballon, a été reprise au sein de la Collaboration JEM-EUSO comme une composante importante de la mission POEMMA (cf. ci-dessous).

3) La voie spatiale : le programme JEM-EUSO

Comme évoqué ci-dessus, le développement de la voie spatiale pour l'étude des UHECRs présente le double avantage de permettre un accroissement considérable de la statistique, et d'assurer une couverture complète du ciel avec un seul et même instrument. Ceci permet, d'une part, d'éclairer le conflit actuel entre les données recueillies dans l'hémisphère nord (TA) et dans l'hémisphère sud (Auger), notamment en ce qui concerne le spectre d'énergie au-delà de $5\,10^{19}\text{ eV}$, irréconciliables sous l'hypothèse d'un flux globalement isotrope. Un instrument spatial permettra de déterminer si ces différences doivent être attribuées à des erreurs systématiques différentes dans les mesures effectuées, ou si elles sont réelles, c'est-à-dire d'origine astrophysique, ce qui fournirait des indications extrêmement précieuses et des contraintes très fortes sur les modèles de sources. D'autre part, une couverture complète du ciel donne accès à une caractérisation plus précise (même à statistique égale) des anisotropies à grande échelle, ainsi qu'à une étude exhaustive des points chauds dans le ciel vu en UHECR. Enfin, elle permet d'accroître la significativité des études de corrélation entre les directions d'arrivée des UHECRs et différents types de sources, ainsi que leur pouvoir discriminant.

Ces caractéristiques, et la perspective d'une augmentation majeure de la statistique, ont conduit une large communauté internationale à s'engager pleinement dans le développement de cette voie spatiale pour les UHECRs, dont la pleine maturité sera atteinte dans les toutes prochaines années. Il s'agit de la collaboration internationale JEM-EUSO (16 pays, 350 chercheurs), qui vise à installer en orbite basse un télescope UV observant l'atmosphère terrestre afin d'y détecter la lumière de fluorescence des gerbes atmosphériques géantes induites par les UHECRs.

La mise en œuvre dans un environnement spatial de la technique « de fluorescence », aujourd'hui bien maîtrisée au sol, requiert des développements instrumentaux importants, qui ont justifié la mise en place, par la collaboration JEM-EUSO, d'une série d'expériences et de missions intermédiaires, permettant de valider les différents aspects du protocole et leur intégration, et de les mettre en œuvre au sein de missions scientifiques opérationnelles. Ces missions ont eu pour but non seulement de caractériser le détecteur et de valider ses performances, notamment pour la reconstruction des gerbes atmosphériques, mais aussi de recueillir des données scientifiques précieuses concernant l'émissivité du ciel en UV, de déterminer les seuils de détection et de définir les paramètres d'observation optimaux pour une mission de grande envergure. En outre, elles permettent de recueillir des données inédites sur les petits corps du système

solaires via l'observation des météores avec un seuil en luminosité très bas (comptage de photons uniques), d'accroître de plusieurs ordres de grandeur la capacité de détection des *strangelets* ou *q-balls*, ou encore d'aborder de façon innovante la problématique des débris spatiaux de petite taille et de leur désorbitation. Cette opportunité fait d'ailleurs l'objet d'une collaboration prometteuse entre les équipes de JEM-EUSO et l'équipe de Gérard Mourou (Prix Nobel de Physique 2018).

La stratégie d'EUSO s'est ainsi déployée via une série de missions ballons et spatiales : EUSO-Balloon (CNES, 2014), EUSO-TA (au sol, depuis 2015), EUSO-SPB (NASA, 2017), Mini-EUSO (ASI et Roscosmos, 2019) et EUSO-SPB2 (NASA, 2022), avec en vue la mission K-EUSO, inscrite dans le « long term program » de l'agence RosCosmos (> 2022), et la *Probe mission* POEMMA, avec des objectifs scientifiques étendus aux neutrinos, sélectionnée en tant que « Probe study » par la NASA en mars 2017, et actuellement en cours d'étude pour le prochain *Decadal Survey*.

Comme le démontrent ces activités, le programme JEM-EUSO s'est considérablement développé au niveau international, avec le soutien continu des principales agences spatiales (CNES, ESA, ASI, NASA, JAXA, ROSCOSMOS), ainsi que des instituts nationaux des 16 pays participants.

Dans le cadre de ce travail de prospective, il est important de noter que les équipes françaises impliquées ont acquis une position centrale au sein de la Collaboration JEM-EUSO, grâce à leur expertise scientifique (responsabilité du *science case*), en photo-détection (responsabilité de la surface focale), et en électronique de front-end (ASIC original : SPACIROC), mais aussi dans une très large mesure grâce au soutien et au financement par le CNES de la mission EUSO-Balloon. Cette mission CNES sous ballon stratosphérique, qui a volé de façon nominale en août 2014, a offert à la Collaboration internationale la possibilité cruciale de démontrer le principe et les performances du concept expérimental, ainsi que sa capacité collective à développer l'instrumentation requise. Cette mission a marqué la première étape du déploiement international de la stratégie EUSO, qui se poursuit depuis avec la mission EUSO-SPB de la NASA ("super-pressure-balloon"), qui a volé en avril/mai 2017, la mission Mini-EUSO (désormais à bord de l'ISS, depuis la fin août 2019 : cf. le Communiqué de presse de l'IN2P3), et la mission K-EUSO, qui vient de passer avec succès la revue de *Conceptual Design* (phase A) en avril 2019.

Grâce à cet investissement inaugural du CNES et au soutien de l'IN2P3 à travers ses ressources humaines, la composante française de la collaboration JEM-EUSO jouit aujourd'hui d'un rayonnement scientifique et technique de premier plan. Le PI français est par ailleurs Coordonnateur européen et responsable de la Topical Team de l'ESA récemment renouvelée. En outre, grâce à l'expertise acquise en photodétection et en électronique, l'unité de détection développée en France a rendu naturelle la participation de ses équipes aux missions présentes et futures de la collaboration.

C'est cette position privilégiée que nous souhaitons faire valoir dans le cadre du présent travail de prospective de l'IN2P3. Les efforts consentis au cours des dix dernières années ont permis de porter l'option spatiale pour l'étude des UHECRs à un niveau de maturité telle qu'elle offre désormais une voie de développement crédible et particulièrement prometteuse pour faire franchir à ce domaine scientifique un pas décisif, et lui permettre de se joindre pleinement au développement à l'échelle internationale des astroparticules et de l'astronomie multi-messagers. Et c'est parce qu'elle est en mesure, en outre, de garantir une participation effective et centrale des équipes françaises, non seulement au programme scientifique, mais encore à l'instrumentation proprement dite, que nous pensons judicieux d'appuyer, au niveau national, le développement de ce programme scientifique et expérimental, capable en effet d'assurer l'équilibre évoqué plus haut entre théorie, phénoménologie, expérimentation et instrumentation.