

Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

François KAMAL YOUSSEF

Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie option physique
Session 2025

1 Parcours universitaire et scientifique

PARCOURS ACADÉMIQUE ET PROFESSIONNEL :

- 2024-2025** Préparation à l'agrégation de physique au centre de Montrouge, *École Normale Supérieure de Paris, Sorbonne Université* et *Université Paris-Saclay*.
- 2020-2024** **Thèse en Astroparticules** de l'*Université Paris Cité*, intitulée « *Le flux et la propagation des rayons cosmiques dans des nuages atomiques magnétisés* », sous la direction d'Isabelle GRENIER, soutenue le 15 décembre 2023 au laboratoire AIM du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) - Saclay
- 2018-2020** **Master de Recherche en Physique Subatomique** à l'*Université de Nantes* en partenariat avec IMT-Atlantique
- 2015-2018** **Licence de Physique Fondamentale** à l'*Université de Nantes*
- 2001-2015** **2 Diplômes de Musique Classique et théorie de la musique** du *Royal School ABRSM conservatory* à Londres et du *Conservatoire de musique d'Alexandrie* en Egypte

EXPÉRIENCES DE RECHERCHE :

- Oct 2020** **Doctorat** (3.5 ans) Interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire.
- Mars 2020** **Stage M2** (4 mois) Émissivité gamma et radio d'un nuage proche de forme filamentaire.
- Avr 2019** **Stage M1** (2 mois) Détermination des masses de mésons et des baryons en utilisant un modèle théorique de la chromodynamique quantique.
- Jan 2018** **Stage L3** (1 mois) Simulation des gerbes atmosphériques des rayons cosmiques.

EXPÉRIENCES D'ENSEIGNEMENT :

- 2020-2023** Monitorat de **64h/an** à l'*Université Paris Cité* :
- cours-TD de mathématiques appliquées (L1)
 - TD d'optique géométrique (L1)
 - TD de mécanique du point (parcours santé PASS)
- 2013-2015** Bénévolat (**40h/an**) de soutien scolaire pendant la première et la terminale, à l'école Saint-Marc à Alexandrie-Egypte, pour des élèves en CM1, CM2 et 6ème en difficulté

ANIMATION SCIENTIFIQUE :

- Oct 2022** **4 Visites guidées** d'une exposition "*Rencontre du Ciel et de l'Espace*" organisée par l'Association française d'astronomie à la Cité des sciences et de l'industrie, Paris
- Nov 2021** Participation au concours **Ma Thèse en 5 min** organisé par l'Association Française d'Astronomie et la revue "Ciel & Espace".

Introduction

Invisibles à l'œil nu, mais omniprésents dans la Voie Lactée, les rayons cosmiques sont des particules chargées, principalement des protons, qui voyagent à des vitesses proches de celle de la lumière. Issues des phénomènes les plus violents de l'Univers (explosions d'étoiles et noyaux actifs de galaxies), représentent une forme d'énergie non négligeable dans le milieu interstellaire.

Depuis plus d'un siècle, les scientifiques s'intéressent à ces particules, non seulement pour ce qu'elles nous apprennent sur leur origine, mais aussi pour leur rôle dans l'évolution globale de la Galaxie. Pourtant, un mystère persiste : comment se propagent-elles à travers la Galaxie ? Malgré les modèles théoriques et les nombreuses missions d'observation, les mécanismes précis de leur propagation restent mal compris.

Jusqu'à récemment, on pensait que leur flux était uniforme et isotrope autour du Système Solaire, avec des variations perceptibles seulement à grande échelle, au-delà de 1000 parsecs¹. Mais en 2018, une observation a tout bouleversé : une région paisible, sans explosion d'étoile ni perturbation magnétique connue, a révélé un déficit de 40 à 50% du flux de rayons cosmiques. Cette région, le nuage d'Eridu, est située à seulement quelques centaines de parsecs du Soleil.

Dans ma thèse, j'ai étudié cette région afin de comprendre la cause de ce déficit. Des progrès dans cette direction pourraient nous permettre de révéler des mécanismes fins de propagation des rayons cosmiques et nous éclairer sur leur rôle dans l'évolution des galaxies.

L'observation des rayons cosmiques repose essentiellement sur deux piliers : les photons gamma et le gaz neutre. Commençons donc par explorer le gaz du milieu interstellaire.

Le Milieu interstellaire

Le milieu interstellaire est une composante essentielle de notre Galaxie ; La Voie Lactée. Il est composé du gaz et de la poussière présents entre les étoiles. C'est également le milieu où baigne le champ magnétique galactique et où se propage les rayons cosmiques. Ce milieu joue un rôle important dans la naissance des étoiles, contribuant ainsi à l'évolution de la Galaxie.

Le gaz du milieu interstellaire est constitué essentiellement d'hydrogène sous différentes formes : ionique, neutre atomique ou moléculaire. La phase neutre atomique est majoritaire et occupe environ 78% du gaz du milieu interstellaire. Sa densité peut être directement déduite à partir de l'observation des raies à 21 cm (qui correspondent à une fréquence de 1420 MHz). Comme les différents nuages de gaz se déplacent à des vitesses variées, leur émission subit un décalage Doppler, ce qui permet d'observer la raie à des fréquences légèrement différentes selon le nuage. Ce phénomène rend possible la séparation spectrale des différents nuages situés sur une même ligne de visée (c'est-à-dire la trajectoire directe entre l'observateur et la source observée).

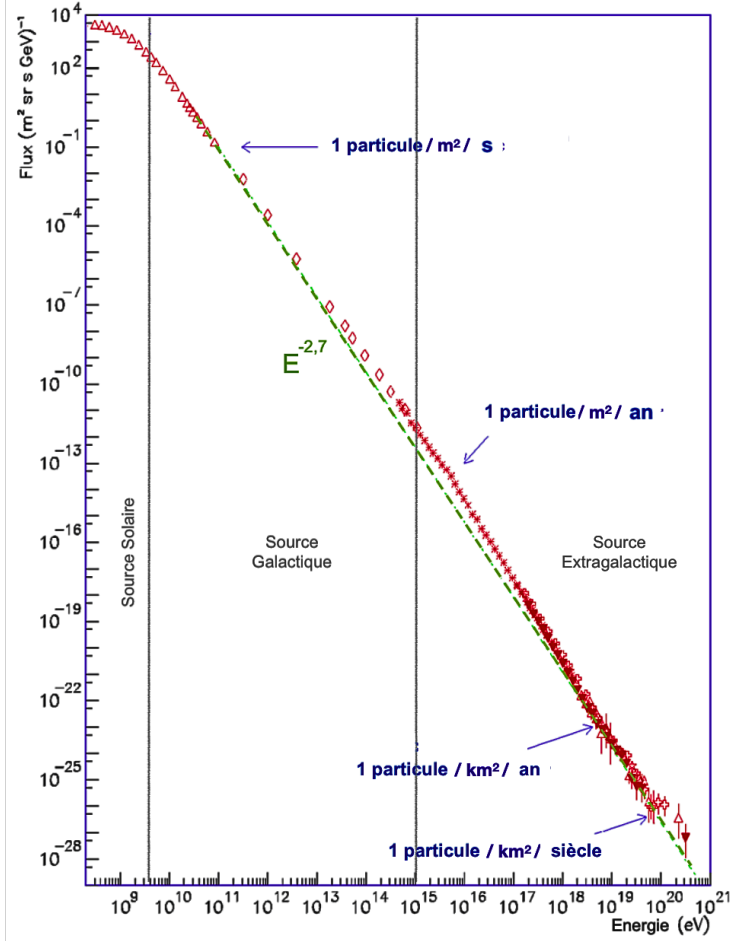
À part le gaz qui occupe 99% du milieu interstellaire, il y a les grains de poussière qui absorbent la lumière ultra-violet et visible des étoiles et la réémettent dans l'infrarouge. Ces grains de forme ovale s'alignent perpendiculairement aux lignes du champ magnétique ambiant. Par conséquent, regarder la polarisation du rayonnement qu'ils émettent nous permet de cartographier les champs magnétiques galactiques.

1. Le parsec pc est défini historiquement comme la distance à partir de laquelle on verrait la distance Terre-Soleil, sous un angle d'une seconde d'arc. La définition récente est $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ année lumière}$

Dans le milieu interstellaire, se propagent des particules relativistes appelées rayons cosmiques. Celles-ci sont composées d'environ 99% de noyaux et 1% d'électrons. Le constituant majoritaire est le proton (noyau d'hydrogène), qui représente 89% des noyaux, suivi des particules alpha (noyaux d'hélium) à hauteur de 10%. Le reste est formé de noyaux plus lourds, de particules neutres et d'antimatière. Leur énergie s'étend sur une vaste plage, allant d'environ 10^6 eV² jusqu'à au moins 10^{20} eV. Les particules d'origine galactique sont celles dont l'énergie est inférieure à 10^{15} eV. Ces particules seraient accélérées dans les restes de supernovae, à la suite de l'explosion d'étoiles dans notre galaxie.

Le nombre de particules $dN/(dS dt d\Omega dE)$ de rayons cosmiques par unité de surface dS , de temps dt , d'angle solide $d\Omega$, et d'énergie dE est simplement appelé flux. Ce flux atteint un maximum à une énergie proche du GeV et décroît rapidement avec l'énergie selon une loi de puissance approximative $E^{-2.7}$ (voir Fig.1).

FIGURE 1 – Le flux des rayons cosmiques de 10^9 à 10^{21} eV.



Dans notre galaxie, la dynamique du milieu interstellaire (l'équilibre des nuages, la structure des bras galactiques, ..) est principalement régie par la gravité et différentes formes d'énergie provenant du gaz, du champ magnétique et des rayons cosmiques. La densité d'énergie de ces derniers est comparable à celle des autres composantes surtout pour les particules d'énergie $10^9 - 10^{11}$ eV.

Durant ma thèse, pour étudier le gaz atomique neutre, j'ai utilisé les données radio à 21 cm du Galactic All-Sky Survey (GASS). Concernant l'émission des grains de poussière (et par suite l'orientation du champ magnétique), j'ai utilisé les données des satellites *Planck* et *IRAS*. Je me suis également intéressé plus particulièrement aux particules cosmiques d'origine galactique car elles représentent la part dominante de la densité d'énergie portée par les rayons cosmiques.

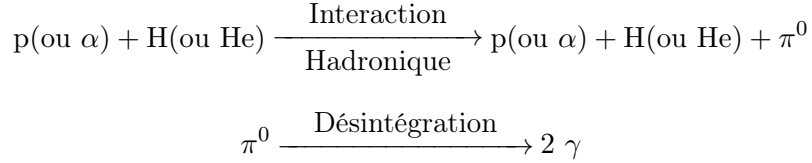
Maintenant que nous avons vu les méthodes d'exploration du gaz atomique et de l'orientation du champ magnétique dans le milieu interstellaire ainsi que l'importance des rayons cosmiques dans la Galaxie, il devient crucial de développer des techniques d'observation spécifiques à ces particules.

2. L'électron-Volt eV est la quantité d'énergie cinétique gagnée par un seul électron accéléré à travers une différence de potentiel électrique d'un volt dans le vide. Elle équivaut à $1,602 \times 10^{-19}$ joule

Comment les rayons cosmiques sont-ils détectés ?

Les rayons cosmiques peuvent être détectés de manière directe à l'aide de détecteurs de particules (au sol, enterrés, dans l'atmosphère, à bord de satellites en orbite autour de la Terre ou même installés sur la Station Spatiale Internationale (ISS)). La structure magnétique du vent solaire et de l'héliosphère limite l'entrée des rayons cosmiques galactiques d'énergie inférieure à 10^{10} eV dans le Système Solaire. C'est la raison pour laquelle les sondes spatiales Voyager 1 et 2 ont été équipées de détecteurs de particules.

Dans ma thèse, j'étudie les rayons cosmiques dans des nuages interstellaires loin du Système Solaire où les détecteurs de particules ne peuvent pas aller. On utilise donc une méthode d'observation indirecte via l'observation des photons gamma γ de haute énergie qui peuvent traverser toute la Galaxie sans être absorbés. Ils sont majoritairement émis par la désintégration des pions neutres π^0 eux-même formés par l'interaction entre les rayons cosmiques et le gaz des nuages interstellaires. Les principales interactions sont entre le proton p et l'alpha α cosmiques avec le gaz (qui est majoritairement l'hydrogène H et l'hélium He).



L'intensité des photons gamma est mesurée à l'aide du Large Area Telescope (LAT), situé à bord du satellite *Fermi*, capable de localiser avec précision les sources de rayonnement gamma dans la Galaxie. Le signal gamma observé provient majoritairement de l'interaction entre les rayons cosmiques et la phase atomique neutre du gaz interstellaire. Cette dernière est cartographiée grâce à la raie à 21 cm, qui permet d'estimer la densité en colonne de gaz le long d'une ligne de visée :

$$N_H = \int n_{\text{gaz}} dL_{\text{visée}}$$

exprimée en atomes par cm^2 . La relation entre l'intensité des photons gamma observée I_γ et la densité en colonne de gaz N_H est donnée par :

$$I_\gamma = q_\gamma N_H$$

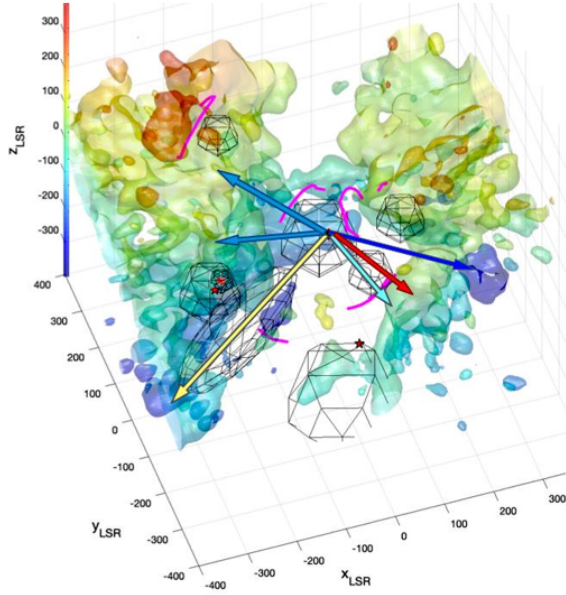
où q_γ est l'émissivité gamma par atome de gaz exprimée en $\gamma \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{eV}^{-1} \cdot (\text{atome})^{-1}$. Cette émissivité q_γ dépend directement de la densité moyenne de rayons cosmiques dans le nuage étudié : plus le flux de rayons cosmiques est élevé, plus les collisions produisant des photons gamma sont fréquentes.

Pour résumer, afin de détecter le flux de rayons cosmiques dans un nuage donné, il faut estimer la quantité de gaz N_H présente dans ce nuage (par la raie à 21 cm) et mesurer l'intensité gamma I_γ produite. Par ces données, nous pouvons mesurer l'émissivité gamma par atome de gaz q_γ qui reflète le flux moyen de rayons cosmiques dans le nuage.

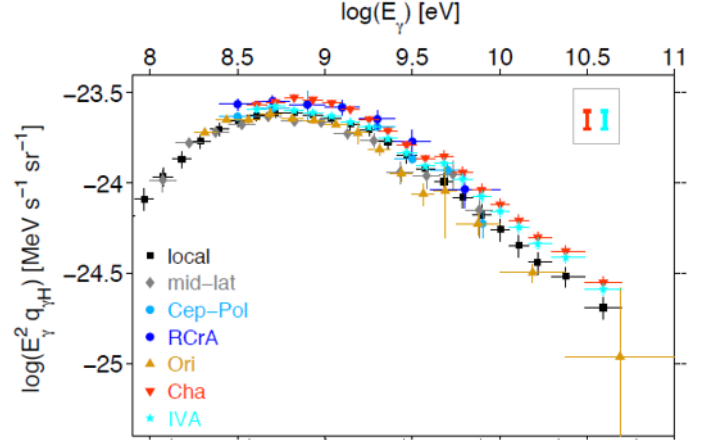
Le milieu local et le déficit d'Eridu

Le milieu interstellaire local s'étend sur environ 500 parsecs autour du Système Solaire. La Figure 2a montre la répartition des nuages de gaz dans ce milieu local, avec le Système Solaire représenté par un polygone au centre. Le plan $z = 0$ correspond au plan de la Galaxie, et les couleurs des nuages indiquent la hauteur des nuages par rapport à ce plan. Le Système Solaire se trouve dans une vallée de faible densité de gaz, bordée par deux parois de nuages. Cette vallée, mieux visible sous un autre angle dans la Figure 4, résulte de plusieurs explosions d'étoiles anciennes.

Depuis une trentaine d'années, plusieurs nuages du milieu local ont été observés en rayons γ dans différentes directions, dont quelques-unes indiquées par les flèches colorées dans la Figure 2a. En estimant les quantités de gaz dans ces nuages, les scientifiques ont pu déduire les émissivités gamma q_γ par nucléon de gaz



(a) Distribution 3D du gaz à quelques centaines de parsecs autour du Système Solaire. L'axe Oz coloré indique l'altitude relative au plan galactique. Les flèches colorées représentent les directions où des mesures d'émissivité γ ont été effectuées dans des nuages du milieu local.



(b) L'émissivité γ multipliée par le carré de l'énergie des photons γ . Les points colorés correspondent à différents nuages du milieu local. Les points noirs représentent l'émissivité moyenne des rayons γ , trouvée pour le gaz atomique entre 10° et 70° de latitude galactique.

FIGURE 2

selon l'équation 2.3. Les résultats sont illustrés dans la Figure 2b. On remarque que les spectres d'émissivité dans ces nuages ont la même forme et presque la même valeur. Ils ont donc pu calculer la moyenne des émissivités trouvées dans le gaz atomique entre 10° et 70° de latitude galactique. Ce spectre moyen est appelé le spectre interstellaire local et est représenté en noir dans la Figure 2b.

Ces observations permettent de conclure qu'il existe une uniformité spatiale et spectrale notable dans la distribution des noyaux de rayons cosmiques sur plusieurs milliers de parsecs du Système Solaire.

Deux ans avant le début de ma thèse, des observations en rayons γ à basse latitude galactique ont révélé une baisse significative de l'émissivité gamma - et donc de la densité de rayons cosmiques - dans un nuage appelé Eridu. Ce déficit de particules est de l'ordre de 40 à 50% par rapport à la moyenne locale. Le nuage Eridu, de forme allongée et filamenteuse, est proche du Soleil, à une distance de 300 ± 30 parsecs.

Ce résultat est surprenant, car les variations typiques de la densité des rayons cosmiques se manifestent plutôt sur des distances de l'ordre de 10^3 parsecs. De plus, dans le cas d'Eridu, ce déficit ne peut pas être expliqué par une mauvaise estimation de la densité de gaz N_H présente. Le spectre d'émissivité gamma de ce nuage est tracé en rouge dans la Figure 3 et le spectre moyen local est indiqué en vert.

Mon travail de thèse a consisté à étudier ce nuage afin de comprendre pourquoi une telle diminution de rayons cosmiques s'y produit. En analysant ce phénomène, on peut en apprendre davantage sur la manière dont les rayons cosmiques se propagent dans le milieu interstellaire, ainsi que sur leurs interactions avec le champ magnétique de la Galaxie.

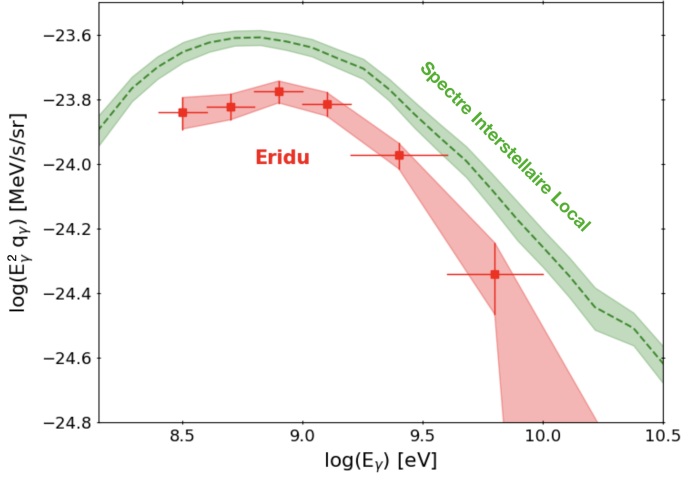


Figure 3 – Le spectre d’émissivité des rayons gamma multiplié par le carré de l’énergie des photons dans le nuage d’Eridu. La bande verte représente l’émissivité moyenne des rayons gamma, trouvée pour le gaz atomique entre 10° et 70° de latitude galactique.

Reticulum vs Eridu

La Figure 4 (gauche) est la même que la Figure 2a mais d’une autre perspective. La Figure 4 (droite) représente deux cartes déduites des données de la poussière. Les lignes noires représentent l’orientation des lignes du champ magnétique et les contours rouges délimitent les nuages d’étude.

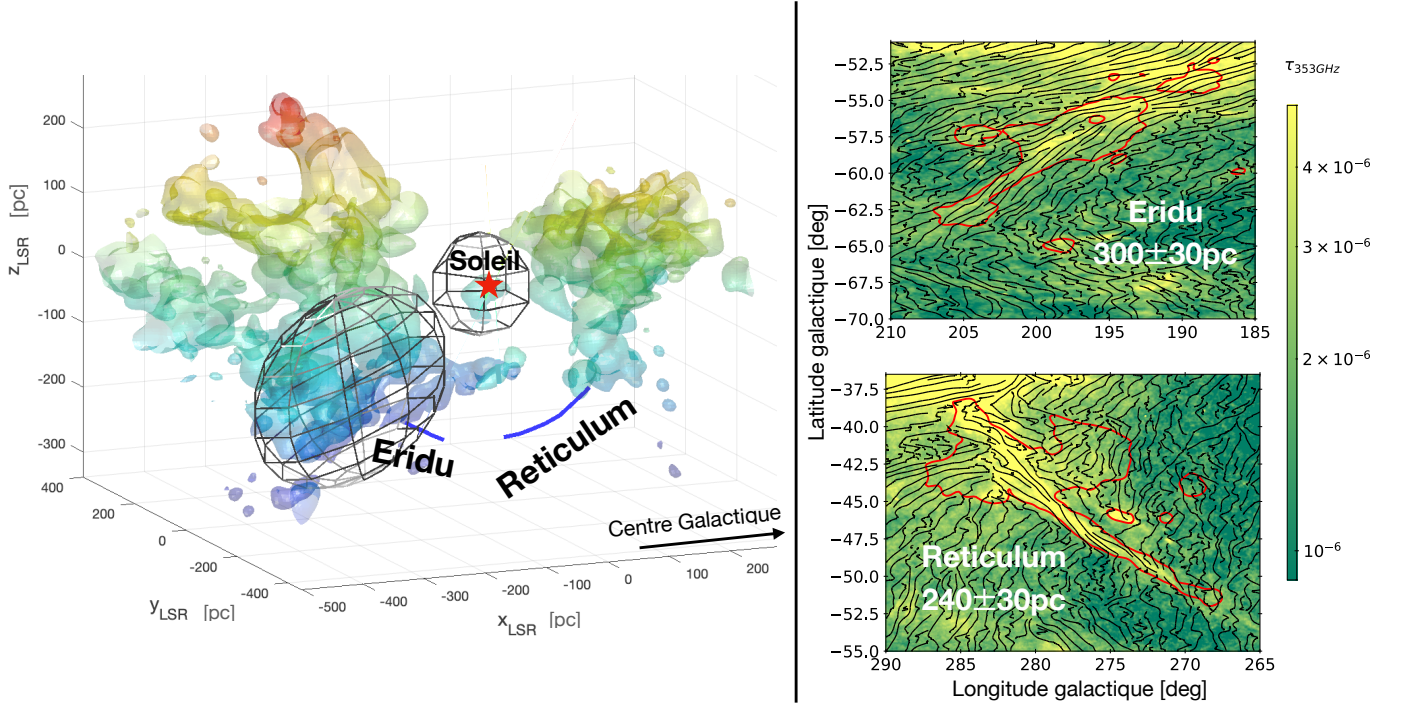


FIGURE 4 – La Figure de gauche est la même que la Figure 2a mais d’une autre perspective. Les 2 nuages d’intérêt sont représentés par les 2 traits bleus. La Figure de droite représente 2 cartes de poussière, où l’échelle de couleur correspond à l’opacité τ_{353} à 353 GHz reliée à la quantité de poussière le long de la ligne de visée. Les lignes noires indiquent l’orientation des lignes du champ magnétique. Les nuages d’intérêt sont délimités par les contours rouges.

Eridu est un nuage de gaz de forme filamentaire, situé dans la vallée locale caractérisée par la faible densité de gaz. Comme Eridu et le Système Solaire partagent le même environnement, il est raisonnable de penser qu’ils sont exposés à un flux similaire de rayons cosmiques. Si c’est le cas, alors la diminution du flux de particules observée dans Eridu pourrait être liée à la faible densité de gaz dans cette vallée locale.

Pour tester cette hypothèse, j’ai modélisé l’émission de photons gamma qui serait produite dans et autour du Système Solaire, et détectée par un satellite de rayons gamma situé en dehors de l’héliosphère. Pour cela, j’ai utilisé le spectre de rayons cosmiques mesuré directement dans le Système Solaire par divers détecteurs de particules, ainsi que les données des sondes Voyager 1 et 2, qui ont permis d’obtenir des données juste à la sortie de l’héliosphère. Afin de modéliser les interactions hadroniques entre les rayons cosmiques et le gaz du Système Solaire, il m’a fallu utiliser les sections efficaces d’interactions³. J’ai retenu les deux modèles de sections efficaces les plus précis disponibles dans la gamme d’énergie des photons gamma qui nous intéresse.

Les résultats obtenus sont surprenants. Selon le premier modèle de sections efficaces, Eridu et le Système Solaire ont la même densité de rayons cosmiques, ce qui impliquerait que les autres nuages du milieu local présentent un excès de rayons cosmiques par rapport au Système Solaire. En revanche, le second modèle indique que le Système Solaire et les autres nuages locaux partagent le même flux de rayons cosmiques, ce qui confirmerait que le déficit observé dans Eridu est réel. Cette divergence s’explique par une différence de 40% entre les deux modèles de sections efficaces — une différence non négligeable, d’autant plus que ces modèles sont utilisés couramment depuis près de vingt ans sans que cela ait été remis en question. Les sections efficaces disponibles, dans l’intervalle d’énergie du 10^9 à 10^{11} eV ne permettent pas d’avoir une conclusion sur le déficit de rayons cosmiques dans Eridu.

Une deuxième hypothèse est basée sur la structure magnétique du nuage. Par la Figure 4 (droite), on voit qu’Eridu est incliné par rapport au plan galactique en s’orientant vers le sud de la Galaxie. De plus il présente un champ magnétique très ordonné (comparé aux alentours) et globalement parallèle à l’axe du filament. Les lignes du champ magnétique de ce nuage filamentaire sont donc également inclinées par rapport au plan galactique. Étant donné que les particules chargées suivent les lignes du champ magnétique, une telle inclinaison magnétique pouvait favoriser l’évasion des rayons cosmiques hors du nuage. Pour examiner cette hypothèse, j’ai décidé d’étudier un autre nuage filamentaire, Reticulum, présentant les mêmes caractéristiques générales. Reticulum est également un nuage de forme filamentaire, incliné par rapport au plan galactique, son champ magnétique est ordonné et parallèle à son axe, et il se trouve à une distance comparable du Soleil qu’Eridu. Si on trouve le même déficit de rayons cosmiques dans les deux nuages, alors le flux et la propagation des particules cosmique sont influencés principalement par la structure magnétique du nuage.

Pour estimer le flux des rayons cosmiques dans Reticulum, j’ai analysé 14 ans de données de rayons gamma par *Fermi*-LAT et les raies à 21 cm par *GASS*. Par ces données, j’ai estimé l’intensité gamma I_γ et la densité de colonne de gaz N_H dans le nuage de Reticulum. Par l’équation $I_\gamma = q_\gamma N_H$, j’ai trouvé dans Reticulum un spectre d’émissivité gamma par atome de gaz entièrement compatible avec le spectre moyen local et plus élevé de (57 ± 9) % que dans le nuage d’Eridu (Fig.5).

Pour comprendre cette différence de flux de rayons cosmiques, j’ai étudié les propriétés de propagation des particules de quelques 10^9 eV dans les deux nuages. Je me suis focalisé sur la comparaison de paramètres du gaz et du champ magnétique qui peuvent influencer la vitesse de diffusion des particules comme la densité volumique du gaz, le niveau de turbulence dans le champ de vitesse du gaz, l’emmêlement des lignes du champ magnétique, l’amplitude du champ magnétique et autres paramètres. Tous les résultats n’ont montré aucune différence notable entre les deux nuages en ce qui concerne toutes ces propriétés.

La théorie d’auto-confinement des rayons cosmiques propose que ces particules chargées se propagent selon les lignes du champ magnétique global mais peuvent aussi produire des ondes d’Alfvén⁴ sur lesquelles elles se propagent. En supposant que cette théorie s’applique à nos nuages, j’ai trouvé des coefficients de diffusion similaires dans les deux nuages et surtout, remarquablement proches de la moyenne galactique $3 \times 10^{28} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. C’est la première fois qu’une valeur de coefficient de diffusion est obtenue dans un nuage interstellaire spécifique, et qu’elle soit du même ordre de grandeur que celle attendue à l’échelle galactique.

3. C’est une mesure de la probabilité qu’une particule hadronique entre en interaction avec une autre particule. On peut la voir comme une surface cible imaginaire autour d’une particule donc plus cette surface est grande, plus il y a de chances qu’une interaction se produise.

4. Les ondes d’Alfvén sont des ondes magnétohydrodynamiques essentiellement transversales, se propageant le long des lignes de champ magnétique dans un plasma

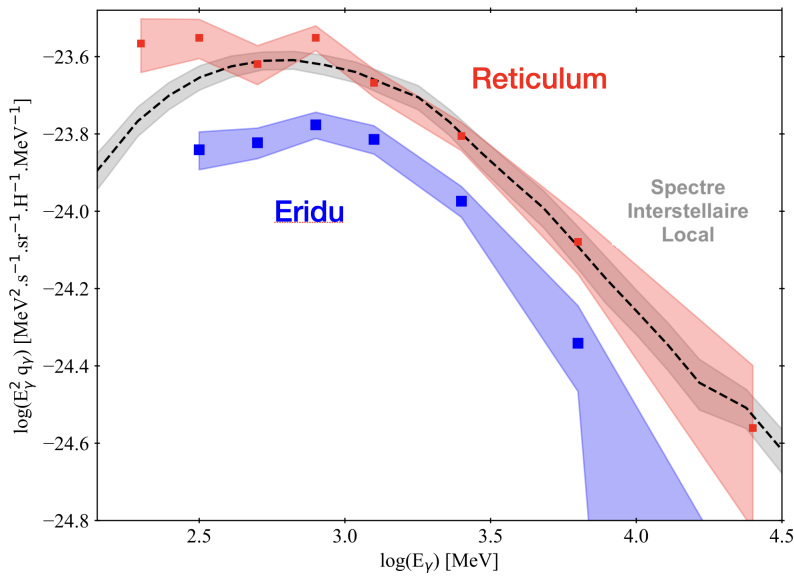


Figure 5 – Le spectre d’émissivité des rayons γ multiplié par le carré de l’énergie des photons dans les nuages Reticulum et Eridu. La bande grise représente l’émissivité moyenne des rayons γ , trouvée pour le gaz atomique entre 10° et 70° de latitude galactique.

Conclusion

Cette forte ressemblance entre les nuages de Reticulum et d’Eridu ne permet pas d’expliquer la perte de flux de rayons cosmiques dans ce dernier. Une nouvelle hypothèse (qui pourra être un sujet de recherche au futur) est liée à l’environnement des deux nuages surtout qu’Eridu se trouve proche d’une superbulle (voir Fig.4 (gauche)) qui est une vaste cavité de gaz peu dense formée par plusieurs explosions d’étoiles.

Bien que l’origine de la diminution du flux de rayons cosmiques dans le nuage d’Eridu demeure inexpliquée, ce travail met en évidence une différence significative entre deux nuages présentant des propriétés similaires en termes de gaz et de champ magnétique. Ces deux objets constituent désormais des cas tests pertinents pour affiner notre compréhension de la propagation des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire. Leur étude comparative ouvre également la voie à de futurs travaux, tant observationnels que par simulations numériques, visant à identifier les mécanismes responsables de ces variations locales de flux de rayons cosmiques.

3 Enseignement et animation scientifique

Pendant le lycée

En seconde, j’ai participé à la compétition internationale LSdreams, organisée par les universités La Salle en Europe pour les étudiants pré-universitaires âgés de 16 à 20 ans. Cette expérience m’a permis de présenter un premier travail de recherche scientifique tout en mettant en avant des valeurs éthiques et sociales.

L’année d’après, j’ai participé à l’organisation de la fête de la science dans mon lycée. Ce jour-là, un petit groupe d’élèves peu intéressés au départ a fini par revenir plusieurs fois, simplement parce qu’on avait pris le temps d’échanger avec eux et de relier la science à leur quotidien. Depuis, je suis convaincu que pour attirer les élèves vers les sciences, il faut d’abord les accrocher par la curiosité et leur montrer que la science peut leur parler directement.

Pendant mes années de première et terminale, j’ai fait du bénévolat en soutien scolaire pour trois élèves du 3e cycle (CM1, CM2, 6e), que j’accompagnais toute l’année. Ces élèves avaient du mal à se concentrer en classe, surtout dans des groupes à effectif élevé, et manquaient de confiance à cause de leurs difficultés scolaires. Pour les remotiver, je commençais chaque séance par de petits jeux autour des bases des maths et je m’appuyais souvent sur des exemples tirés de leur quotidien, ce qui les aidait à mieux comprendre l’intérêt des notions abordées et à développer une forme d’intuition. Cette expérience m’a appris que chaque élève apprend différemment, et qu’en classe, il est important de varier les approches : utiliser des supports visuels, proposer des activités concrètes, encourager l’échange en petits groupes. . . autant de méthodes qui permettent

de mieux capter l'attention et de s'adapter à des profils d'apprentissage variés.

Enseignement pendant le doctorat

Pendant les trois ans de mon doctorat, j'ai assuré 64 heures d'enseignement par an à l'UFR des Sciences Fondamentales et Biomédicales de l'Université Paris Cité. J'ai encadré des cours magistraux et des TD en mathématiques appliquées, mécanique du point et optique géométrique, pour des étudiants de première année de licence et du parcours de santé PASS (Parcours d'Accès Spécifique Santé).

Ces enseignements m'ont confronté à plusieurs défis, notamment en mathématiques. Lors de ma troisième année, j'ai eu à enseigner à la première promotion pour laquelle les mathématiques n'étaient plus obligatoires en première et en terminale. Un quiz diagnostique en début d'année a révélé que 85% des étudiants n'avaient pas choisi les mathématiques comme spécialité donc ils n'avaient pas acquis les bases attendues pour ce module universitaire. Après avoir constaté ce décalage de niveau, j'ai mis en place plusieurs méthodes pédagogiques qui seraient tout à fait adaptées à l'enseignement au lycée, où les profils d'élèves sont également très variés.

Tout d'abord, j'ai instauré des rappels réguliers en début de séance pour réintroduire les notions essentielles et consolider les acquis. Cette approche, facilement transposable au secondaire, permet de s'assurer que tous les élèves, quel que soit leur niveau initial, puissent suivre la progression du cours.

Ensuite pour le cours magistraux, j'utilisais des diaporamas pour gagner du temps sur la prise de notes et me concentrer sur les applications et la résolution de problèmes. Ce temps libéré est précieux pour approfondir certaines notions ou aider les élèves qui rencontrent des difficultés. Dans un contexte de lycée, je peux adapter cette approche en préparant des fiches de cours préréplies, comportant des espaces à compléter ensemble durant la séance. Cela permettra aux élèves d'avoir rapidement un support clair tout en renforçant leur mémorisation.

Pour les séances de TD, après avoir guidé la résolution des premiers exercices, je laissais un temps de travail en autonomie ou en petits groupes. Afin de répondre à l'hétérogénéité des niveaux, j'organisais les exercices de manière progressive : les élèves les plus avancés avaient accès à des extensions pour aller plus loin, tandis que je consacrais davantage de temps à accompagner individuellement ceux qui rencontraient des difficultés. J'encourageais également les étudiants à s'entraider au sein des groupes, renforçant ainsi une dynamique collaborative. Toutefois, j'ai constaté que laisser les groupes travailler seuls sans encadrement strict n'était pas toujours efficace : les écarts de niveau se creusaient et en plus, certains étudiants décrochaient et perdaient leur motivation. Pour éviter cela, j'ai appris à mieux structurer ces moments collaboratifs en fixant des objectifs précis, des temps d'échange réguliers, et en systématisant une correction collective participative en fin de séance, afin de maintenir l'implication de tous et de garantir une progression commune.

J'ai de plus expérimenté un format d'évaluation plus équitable : au lieu d'imposer trois exercices, j'en proposais cinq ou six, à choisir librement, en incluant un système de points bonus pour éviter de pénaliser les étudiants plus avancés.

Enfin, pour dynamiser les séances, j'ai mis en place deux dispositifs ludiques et efficaces : des quiz anonymes pour permettre à chacun de participer sans craindre de se tromper, et des compétitions par équipes sur des séries d'exercices. Un système de points permettait de suivre l'évolution de chaque équipe sur plusieurs séances, avec une récompense finale pour les vainqueurs. Cela renforçait l'engagement et créait une dynamique positive en classe. Ces approches ludiques seraient également très adaptées à des classes de lycée pour renforcer la motivation collective.

Toutes ces expériences m'ont aidé à construire ma façon d'enseigner : je m'adapte aux besoins des élèves, je reste à l'écoute, j'essaie toujours de faire le lien entre la théorie et des exemples concrets, et surtout, j'ai à cœur d'aider chaque élève à progresser, quel que soit son niveau.

Durant ma thèse, j'ai participé à plusieurs événements de médiation scientifique, notamment le concours "Ma Thèse en 5 minutes" organisé par l'AFA et la revue Ciel & Espace, ainsi qu'en tant que guide scientifique lors des expositions des Rencontres du Ciel et de l'Espace.

Ces expériences m'ont permis de rendre accessibles des concepts complexes à un public très varié, allant de lycéens à des passionnés sans formation scientifique. J'ai appris à simplifier mon discours, structurer mes explications, et adapter mon langage en fonction de l'âge, du niveau ou des centres d'intérêt de chacun. Ces compétences sont précieuses pour l'enseignement au lycée, où il est essentiel de rendre les notions abordables sans en trahir la rigueur, et de susciter l'intérêt en tenant compte de la diversité des élèves. J'ai aussi compris l'importance d'utiliser des analogies visuelles, des questions ouvertes et des anecdotes concrètes pour maintenir l'attention et favoriser l'interaction. Ces moments d'échange ont été particulièrement riches, notamment face aux lycéens : certaines de leurs questions, parfois très naïves en apparence, étaient en réalité profondes et m'ont poussé à interroger mes propres certitudes, voire à reconsidérer certains aspects de ma recherche.

Cela dit, tout n'a pas été simple. L'un des défis majeurs a été de trouver le bon équilibre entre rigueur scientifique et simplicité sans déformer le contenu. De plus, dans l'envie de tout expliquer, je me rendais compte que certaines parties devenaient trop denses ou techniques. Il m'a fallu apprendre à sacrifier certains détails, pour conserver la clarté globale du message. Lors des visites guidées, il arrivait que certains groupes soient plus passifs ou peu réactifs, ce qui demandait une capacité d'improvisation pour relancer l'attention ou adapter le niveau d'engagement en direct.

Ces expériences m'ont aidé à développer une capacité à communiquer avec clarté, à susciter la curiosité, et à donner le goût des sciences aux jeunes, compétences indispensables pour construire des cours accessibles et progressifs en lycée, tout en maintenant l'exigence intellectuelle.

4 Activités pédagogiques

Durant mon parcours en astrophysique et en physique fondamentale, j'ai appris à mobiliser plusieurs domaines de la physique pour comprendre un même phénomène, ce qui m'a inspiré la conception d'un projet interdisciplinaire. Les élèves ont souvent du mal à faire le lien entre les chapitres du programme or, dans la réalité scientifique, rare sont les phénomènes qui se limitent à un seul domaine. En choisissant un contexte concret et motivant comme l'exploration spatiale, je cherche à donner du sens aux notions vues en cours et à susciter leur intérêt par une application directe dans un cadre captivant.

Activité 1 : La guerre des énergies dans la Galaxie d'Andromède

Contexte scolaire : Cette activité s'inscrit dans le programme de deuxième année de CPGE, après l'étude du gaz parfait en thermodynamique, des bases de la mécanique des fluides et de l'énergie du champ électromagnétique.

Objectifs :

- Mobiliser des notions fondamentales de mécanique, thermodynamique et électromagnétisme dans un contexte réel.
- Renforcer les compétences numériques à travers une modélisation simple en Python.
- Développer l'autonomie et l'esprit critique en confrontant des résultats calculés à une interprétation physique globale.

Déroulement de l'activité : Cette activité est menée dans le cadre d'une séance de travaux pratiques en informatique, où les étudiants utilisent le langage Python. L'objectif est de comparer quatre formes d'énergie présentes dans un gaz atomique chaud situé dans la galaxie d'Andromède.

La galaxie d'Andromède, notre voisine la plus massive, est observable à l'œil nu par temps clair. C'est

une galaxie spirale très semblable à la Voie lactée : elle présente une structure comparable, notamment en ce qui concerne les nuages de gaz, les champs magnétiques diffus et le flux constant de rayons cosmiques. Lorsqu'on analyse ces régions, une question simple mais fondamentale se pose : quelle forme d'énergie domine ? Est-ce la chaleur du gaz, l'énergie emmagasinée dans les champs magnétiques, ou celle portée par les particules cosmiques à haute énergie ? Répondre à cette question, c'est chercher à comprendre ce qui structure réellement le milieu galactique.

On suppose que les conditions physiques dans Andromède sont similaires à celles observées dans la Voie lactée, hypothèse couramment utilisée en astrophysique lorsque les mesures directes sont difficiles.

1. Les étudiants ajoutent d'abord les librairies nécessaires, puis procèdent à la lecture des fichiers de données de Voyager 1, du spectre des rayons cosmiques et des raies à 21 cm.
2. Par les fonctions de "scipy", ils intègrent le flux des rayons cosmiques $\Phi(E)$ au-delà de $E = 3 \text{ MeV/nucléon}$ en J.m^{-3} : $u_{cos} = \int \Phi(E) E dE$
3. Par les données de Voyager 1 concernant l'intensité du champ magnétique B , ils calculent la densité d'énergie magnétique moyenne : $u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$
4. Par les valeurs de densité et température du gaz monoatomique neutre, ils calculent la pression P de ce gaz parfait ainsi que la densité d'énergie thermique : $u_{gaz} = \frac{3}{2} P$
5. Par les données radio à 21 cm d'une ligne de visée spécifique, ils identifient les différents nuages par effet Doppler. Ensuite, ils déterminent la largeur à mi-hauteur Γ de chaque raie. Par $\Gamma = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_v$, ils calculent la densité d'énergie turbulente : $u_{turb} = \frac{1}{2} n \sigma_v^2$.

Conclusion : Cette activité offre aux étudiants la possibilité d'observer une équipartition des énergies, phénomène remarquable à l'échelle galactique. Elle permet d'appliquer concrètement différentes notions du cours à partir de données réelles, dans un cadre scientifique cohérent.

Activité 2 : Mission ISS2 de l'ESA

Contexte scolaire : Cette activité trouve sa place en terminale générale spécialité physique-chimie. Elle sera présentée au dernier mois de l'année après avoir vu la majorité des 4 thèmes du programme.

Objectifs :

- Appliquer les notions du programme de physique-chimie à un projet concret et interdisciplinaire.
- Développer un esprit critique et scientifique.
- Travailler en groupe de manière coopérative. Apprendre à organiser son temps et à distribuer les missions entre les membres du groupe (recherche, calculs, présentation).

Déroulement de l'activité :

Après avoir diffusé une vidéo sur l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et ses missions, ainsi qu'un séjour d'un astronaute dans l'ISS, je formerai 4 groupes d'élèves. Ils auront pour mission de concevoir le satellite ISS2 qui sera envoyé en orbite terrestre basse. Chaque groupe sera chargé d'un aspect fondamental à la réussite de la mission. Pour cela ils auront une enveloppe contenant :

1. Les consignes de la mission dédiée à leur groupe.
2. Des références utiles (livres ou sites internet) et un formulaire
3. Un quiz (format QCM) qui les aidera à faire le travail de recherche nécessaire pour obtenir toutes les valeurs tabulées et les constantes dont ils auront besoin

Chaque équipe devra produire :

1. Des calculs détaillés et commentés
2. Une représentation graphique d'un des résultats

3. Une courte présentation orale

Les résultats des équipes seront testés par un code Python à la fin du projet, pour vérifier si la mission est bien réussie ou pas.

Groupe 1 : Mise en orbite du satellite selon le thème 2 "Mouvement et interactions".

- Calculer la vitesse de libération, la période de révolution, le temps d'arrivée en orbite et faire un bilan énergétique.
- Tracer un graphique de la période de révolution en fonction de l'altitude d'orbite.

Groupe 2 : Panneaux solaires selon le thème 3 "Énergie : conversions et transferts".

- Calculer la puissance solaire, la surface des panneaux solaire, le rendement et la consommation journalière de ISS2
- Tracer un graphique de l'énergie produite en fonction de la surface des panneaux solaires.

Groupe 3 : Communication selon le thème 4 "Ondes et signaux".

- Calculer la fréquence et la longueur d'onde, le temps de transmission, le diamètre de l'antenne et appliquer l'optique géométrique
- Tracer un graphique de la variation du délai de transmission selon l'altitude du satellite.

Groupe 4 : Moteur selon le thème 1 "Constitution et transformations de la matière".

- Calculer le bilan de réaction, l'enthalpie, appliquer la loi du gaz parfaits et analyser les gaz par spectroscopie
- Tracer l'énergie dégagée en fonction de la quantité de réactif utilisée.

Conclusion : Cette activité permet aux élèves de voir une application concrète des notions abordées en cours, tout en développant leur autonomie, leur travail en équipe et leur esprit critique face aux résultats obtenus.

5

Conclusion

Toutes ces expériences ont renforcé ma vocation pour l'enseignement et mon envie d'aider les élèves à développer un esprit critique et une curiosité scientifique dans leur quotidien. Ma formation en physique des particules et ma thèse en astroparticule me permettent d'aborder des sujets qui fascinent naturellement les élèves. Je compte m'en servir comme points d'accroche pour introduire des notions du programme avec du sens et de l'émerveillement. Ce type de contexte concret et motivant peut profondément changer leur rapport aux sciences, souvent perçues comme abstraites ou déconnectées du réel.

Au-delà du contenu disciplinaire, mon expérience en recherche m'a appris à formuler des problèmes ouverts, à raisonner de manière critique, à confronter des hypothèses aux données et d'autres compétences que je souhaite transmettre en classe. Je veux encourager les élèves à questionner, à tester, à douter, plutôt qu'à seulement appliquer des formules. Les amener à penser comme de jeunes scientifiques.

Je souhaite aussi leur faire découvrir la science à travers des découvertes récentes ou des sorties vers des lieux de culture scientifique comme la Cité des Sciences ou le Palais de la Découverte. Grâce aux contacts que j'ai pu avoir pendant ma thèse, je pourrais organiser des visites de laboratoires ou aider les élèves à trouver des stages d'observation dans des environnements de recherche, pour leur faire entrevoir des perspectives qu'ils n'imaginaient peut-être pas.

Je souhaite apporter non seulement des connaissances, mais aussi une méthode, une culture scientifique vivante, et une capacité à relier les programmes scolaires aux grandes questions actuelles de la science. J'ai à cœur de transmettre tout cela avec passion, rigueur et bienveillance.