

## **ACCELERATION DE PARTICULES A TRES HAUTE ENERGIE DANS LES SOURCES ASTROPHYSIQUES RELATIVISTES**

Directeur de thèse principal : **Martin Lemoine** (Institut d'Astrophysique de Paris)

Co-directeur de thèse : **Laurent Gremillet** (CEA/DAM/DIF)

**Contexte** – Quelles sont les sources des rayons cosmiques de très haute énergie, au-delà du PeV, voire du EeV ? D'où viennent les neutrinos cosmiques d'énergie TeV – PeV ? Quelle physique est à l'origine des spectres radiatifs produits par les blazars, sursauts gamma et autres sources puissantes, désormais collectés de façon routinière depuis le domaine radio jusqu'aux gammas de haute énergie ? Quel processus donne lieu aux contreparties électromagnétiques des événements d'ondes gravitationnelles ?

Toutes ces questions façonnent l'astrophysique des hautes énergies, l'astroparticule ou le champ émergent de l'astrophysique multi-messagers. Elles sont portées par les avancées expérimentales majeures réalisées ces dernières décennies grâce au développement de détecteurs géants (Auger, Virgo, Antares-KM3NeT, H.E.S.S etc.). Elles touchent et empruntent à de nombreuses disciplines de la physique et de l'astrophysique moderne. Au cœur de ces questions, on retrouve une même problématique : quel est le processus donnant lieu à l'accélération de particules chargées (électrons, noyaux) dans ces objets ?

Cette problématique fournit le cadre-même de ce projet de thèse, qui vise à faire progresser notre compréhension des mécanismes d'accélération de particules à très haute énergie dans les écoulements turbulents, relativistes et magnétisés des sources astrophysiques puissantes.

**Descriptif** – La physique de l'accélération de particules dans les plasmas astrophysiques remonte aux travaux pionniers de Enrico Fermi en 1949. On peut décrire dans leurs grandes lignes les principaux mécanismes d'accélération : processus dits de Fermi (accélération autour d'une onde de choc, dans un plasma turbulent, dans un champ de vitesse avec cisaillement etc.), zones de reconnexion ou champs électrostatiques localisés. Le problème est cependant si complexe qu'il reste difficile de tirer des prédictions détaillées et d'un intérêt astrophysique immédiat, par exemple quel sera la forme du spectre en énergie produit, quelle sera l'énergie maximale atteinte, ou dans quelle condition tel ou tel mécanisme pourra opérer.

Cette complexité tient au caractère non-linéaire et multi-échelle de la physique mise en jeu : non-linéaire car l'accélération repose sur l'interaction entre les particules chargées et des champs électromagnétiques, qui sont fortement modifiés par la réaction en retour des particules accélérées ; multi-échelle, car des particules de haute énergie modifient la configuration électromagnétique sur de grandes échelles spatiales, affectant ainsi l'accélération de particules de moindre énergie (moindre libre parcours moyen). Par ailleurs, ces processus prennent effet dans des conditions qui échappent encore à l'astrophysique de laboratoire, en dépit de progrès majeurs dans ce domaine : ces plasmas sont sans collisions, relativistes, fortement magnétisés, et comprennent souvent des paires électrons-positrons. Enfin, ces mécanismes agissent sur des échelles spatiales si petites par rapport à celle de la source qu'ils ne sont pas directement observables.

L'introduction récente de la technique de simulation numérique « particle-in-cell » (PIC) en astrophysique, connue de longue date dans les communautés de l'interaction laser-plasma et de la physique à haute densité d'énergie, a bouleversé ce domaine car elle fournit un nouvel outil de pointe pour aborder ces questions. Elle offre une modélisation N-corps électromagnétique d'un plasma, qui permet donc de prendre en compte de manière auto-cohérente les interactions entre particules chargées et champs électromagnétiques ; elle

est donc idéale pour répondre aux problèmes évoqués plus haut. Cependant, de telles simulations restent coûteuses en temps de calcul, de sorte qu'on ne peut encore simuler que les premiers pas de l'accélération, sur des échelles de temps et d'espace réduites. Pour cette raison, la conduite de telles simulations doit s'accompagner d'une interprétation et d'une modélisation théorique, afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus aux échelles astrophysiques.

La thèse se fera dans cet esprit : elle combinera simulations numériques en calcul haute performance et modélisations analytiques avancées, à l'instar de nos travaux précédents dans ce domaine (voir bibliographie).

**Objectif & Méthode** – La thèse propose d'étudier la physique de l'accélération de particules dans un environnement turbulent, fortement magnétisé, tel qu'on peut le rencontrer dans les sources puissantes (sursauts gamma, jets de radio - galaxies, nébuleuses de pulsars ou environnements de trous noirs). La simulation d'une telle turbulence par la technique PIC est très récente, voir Zhdankin et al. (PRL 118, 055103, 2017) ou Comisso & Sironi (PRL 121, 255108, 2018) pour les premières études. Ces simulations suscitent un grand intérêt, car elles ont révélé une riche phénoménologie pour ce qui touche à l'accélération de particules : des spectres en loi de puissance et une importante variation spatiale et temporelle de l'efficacité de l'accélération, qui doit se traduire par une forte variabilité spectrale et temporelle du rayonnement émis. Par ailleurs, elles invalident la modélisation analytique couramment utilisée en astrophysique des hautes énergies, extrapolée de la théorie quasi-linéaire de physique des plasmas, voir Lemoine & Malkov (2019). Ces travaux, et ceux qui les suivent, ouvrent donc un nouveau champ d'étude très prometteur.

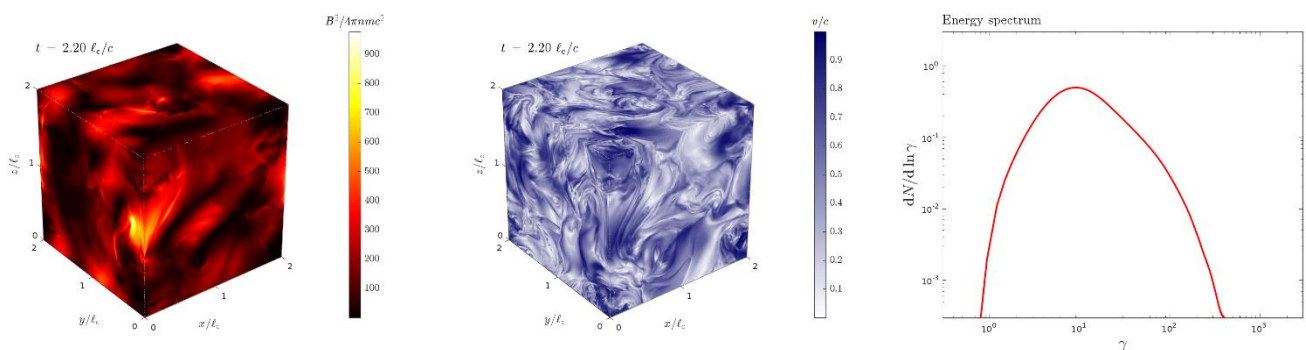


Figure 1: simulation PIC 3D d'une turbulence relativiste magnétisée dans un plasma de paires électrons-positrons. À gauche : densité d'énergie magnétique ; au milieu : champ de vitesse du plasma ; à droite : distribution en énergie des particules du plasma, révélant l'émergence d'une queue suprathermique en loi de puissance.  $\ell_c$  désigne la longueur de cohérence de la turbulence. La vitesse d'Alfvén initiale vaut  $v_A \sim 0.7c$ , et les fluctuations magnétiques dominent le champ moyen,  $\delta B/B \sim 3$ . Simulation conduite par V. Bresci, M. Lemoine et L. Gremillet (2022) à l'aide du code CALDER, sur la machine Irene du TGCC.

Nous avons récemment mis au point un module d'excitation de turbulence pour le code PIC CALDER que nous utilisons depuis 2015 pour étudier la physique de l'accélération, voir Fig.1 et Bresci et al. (2022). Nous avons par ailleurs développé une technique de simulation pour étudier l'interaction entre une onde de choc relativiste et une turbulence préexistante ; nous sommes à notre connaissance le seul groupe à disposer de cet outil pour le régime relativiste. Enfin, nous incluons prochainement un module de rayonnement de synchrotron dans le code.

Les objectifs précis de la thèse seront : (i) approfondir notre compréhension de l'accélération de particules et de leurs signatures radiatives dans ces milieux turbulents, par la conduite de simulations PIC et par la modélisation analytique ; (ii) généraliser les simulations pour des plasmas de paires au cas de plasmas électrons-ions ; (iii) appliquer les résultats à la phénoménologie en astrophysique des hautes énergies et astrophysique multi-messagers. Les travaux de modélisation se baseront sur le modèle analytique d'accélération décrit dans Lemoine (2019, 2021), récemment corroboré par nos simulations PIC (Bresci et al., 2022).

Il est difficile de détailler un calendrier précis dans un domaine aussi dynamique et compétitif, car il faut savoir s'adapter. On peut cependant considérer que chaque point ci-dessus occupera un an de la thèse, et qu'ils seront suivis dans l'ordre. Le point (ii) requiert des simulations coûteuses en temps de calcul, mais représente une extrapolation directe de (i).

**Adéquation & Encadrement** – Ce projet de recherche s'insère parfaitement dans les thématiques de l'IPI, car il émerge aux deux axes majeurs de cette initiative (physique des plasmas et physique de l'Univers et des hautes énergies). Le caractère pluridisciplinaire de ce projet apparaît manifeste. En particulier, les porteurs sont issus de communautés distinctes : Martin Lemoine (DR1 CNRS) est un astrophysicien théoricien spécialisé dans l'origine des particules de haute énergie dans l'Univers, tandis que Laurent Gremillet (Ingénieur) est un théoricien de la physique cinétique des plasmas, expert en interaction laser-plasma et en simulations numériques PIC. Cela permet aux doctorants encadrés de bénéficier d'une double culture dans ces deux domaines, un atout majeur dans l'astrophysique théorique d'aujourd'hui. Cette collaboration a permis d'encadrer la thèse d'Arno Vanthieghem (2016 – 2019, post-doctorant à U. Princeton après un séjour de 2 ans à Stanford U.) puis celle de Virginia Bresci (2019 – 2022). La première thèse a permis d'élaborer un modèle théorique détaillé de la physique des ondes de chocs relativistes, non-collisionnelles et faiblement magnétisées, telle que celles générées par la coalescence d'étoiles à neutrons, donnant lieu à la contrepartie suivie en X. Ces travaux ont fait l'objet de communiqués de presse INSU et CEA. La deuxième thèse (en cours) a permis d'étudier en détail la physique de l'accélération dans l'interaction entre une onde de choc et une turbulence magnétisée.

Ces travaux s'appuient sur des simulations numériques conduites sur les supercalculateurs du Très Grand Centre de Calcul (TGCC) du CEA. Notre collaboration obtient chaque année, depuis 2015, un temps de simulation suffisant pour ce faire, environ 7 millions d'heures CPU par an. Le/la candidat(e) devra donc avoir une appétence pour la physique et l'astrophysique théoriques et pour le calcul numérique haute performance. Des acquis dans ces domaines sont souhaités.

### **Bibliographie des encadrants relative au projet (2018-2022)**

- [1] J. Biteau, E. Prandini, L. Costamante, M. Lemoine, P. Padovani, E. Pueschel, E. Resconi, F. Tavecchio, A. Taylor, A. Zech: Progress in unveiling extreme particle acceleration in persistent astrophysical jets, *Nature Astronomy* **4**, 124 (2020).
- [2] V. Bresci, L. Gremillet, M. Lemoine: Saturation of the asymmetric current filamentation instability under conditions relevant to relativistic shock precursors, *Phys. Rev. E*, à paraître, arXiv:2111.04651 (2022).
- [3] C. Demidem, M. Lemoine, F. Casse: Particle acceleration in relativistic turbulence: a theoretical appraisal, *Phys. Rev.* **D102**, 023003 (2020). [Editor's choice]
- [4] L. Gremillet, M. Lemoine: Miniature supernovae shock waves, *Nature Physics* **16**, 901 (2020)
- [5] M. Lemoine, L. Gremillet, G. Pelletier, A. Vanthieghem: Physics of Weibel-mediated relativistic collisionless shocks, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 035101 (2019)
- [6] M. Lemoine, A. Vanthieghem, L. Gremillet, G. Pelletier: Physics of relativistic collisionless shocks: II Heating and dynamics of the background plasma, *Phys. Rev.* **E100**, 033209 (2019)
- [7] M. Lemoine, G. Pelletier, A. Vanthieghem, L. Gremillet: Physics of relativistic collisionless shocks: III The supra-thermal particles, *Phys. Rev.* **E100**, 033210 (2019)
- [8] M. Lemoine: Generalized Fermi acceleration, *Phys. Rev.* **D99**, 083006 (2019).
- [9] M. Lemoine, M. Malkov: Powerlaw spectra from stochastic acceleration, *MNRAS* **499**, 4972 (2020).
- [10] M. Lemoine: Particle acceleration in strong MHD turbulence, *Phys. Rev.* **D104**, 063020 (2021).
- [11] G. Pelletier, L. Gremillet, A. Vanthieghem, M. Lemoine: Physics of relativistic collisionless shocks: I The scattering centre frame, *Phys. Rev.* **E100**, 013205 (2019)
- [12] A. Vanthieghem, M. Lemoine, I. Plotnikov, A. Grassi, M. Grech, L. Gremillet, G. Pelletier: Physics and phenomenology of weakly magnetized, relativistic astrophysical shock waves, *Galaxies* **8**, 33 (2020)
- [13] A. Zech, M. Lemoine: Electron-proton co-acceleration on relativistic shocks in extreme-TeV blazars, *A&A* **654**, 96 (2021)