

RELAXATION NON-COLLISIONNELLE DES DISTRIBUTIONS ÉLECTRONIQUES DANS LE VENT SOLAIRE

Filippo Pantellini (Astronome, Obs. Paris, LESIA)
Arnaud Zaslavsky (Maître de Conférences, Sorbonne Univ., LESIA)
Matthieu Berthomier (Chargé de Recherche, CNRS, LPP)

Le vent solaire résulte de l'expansion thermique de la couronne solaire dans le milieu interplanétaire. Il s'agit d'un plasma magnétisé, et très peu collisionnel. De nombreuses sondes orbitant dans le milieu interplanétaire sont équipées d'instruments permettant de reconstituer les fonctions de distribution en vitesse des particules constituant ce plasma, montrant de nombreux écarts à l'équilibre thermodynamique local - mais étant donnée l'absence de processus bien identifiés permettant la relaxation vers l'équilibre, ce ne sont pas tant ces écarts qui sont étonnants, que l'observations d'états finalement assez proches de l'équilibre.

Nous chercherons à caractériser les processus de relaxation des distributions électroniques vers l'isotropie, à des énergies relativement hautes (au-dessus de la centaine d'eV) où il est clair que les collisions coulombiennes sont complètement négligeables. Pour cela nous partirons d'une équation de Fokker-Planck (EFP) décrivant la compétition entre processus déterministes (effets de la force miroir magnétique et du champ électrique, principalement) ayant tendance à éloigner les électrons de l'équilibre, et processus aléatoires ayant tendance à les y ramener. L'idée est d'utiliser les données fournies par différentes sondes, en particulier Solar Orbiter (Solo) et Parker Solar Probe (PSP), pour contraindre les caractéristiques du processus responsable de la relaxation à ces énergies.

Cette étude comportera un volet théorique et numérique, mené au LESIA sous la direction de F. Pantellini et A. Zaslavsky. Il sera centré sur l'étude des solutions de l'EFP. Celles-ci peuvent être dans certaines limites obtenues analytiquement par décomposition de la fonction de distribution en harmoniques sphériques, et en dehors de cette limite, obtenues via une méthode de type Monte-Carlo, basée sur l'intégration numérique de l'équation différentielle stochastique équivalente à l'EFP. Cette dernière technique a déjà été largement utilisée dans le cadre de l'étude de la propagation de particules énergétiques solaires, et un lien a déjà été créé sur ce sujet avec l'équipe d'Eduard Kontar à l'université de Glasgow dans le cadre du projet Alliance « *Solar flare energetic particles in the turbulent corona and Heliosphere* ». Il est clair que l'étude thermodynamique du vent solaire a beaucoup à gagner d'une collaboration, et d'un partage des méthodes qui reste très largement à développer, avec la communauté travaillant sur les plus hautes énergies. Ce projet de recherche doctorale participera à l'établissement d'un tel lien.

L'autre volet, complémentaire du premier, sera observationnel et fortement adossé à l'analyse des données fournies depuis 2018 et 2020 par les instruments électrons embarqués sur les sondes Solo et PSP. Cette étude bénéficiera de l'expertise de M. Berthomier (LPP), qui a conçu le système de détection des spectromètre d'électrons embarqués sur les missions Solo et PSP et qui a mis au point une procédure de calibration avancée des données électrons sur Solo. Elle s'insèrera aussi dans un contexte international actif, et bénéficiera des liens noués avec G. Nicolaou (MSSL, University College London) qui produit les spectres en énergie des électrons sur l'instrument SWA (Solar Orbiter), ainsi qu'avec D. Larson (SSL, UC Berkeley) en vue de l'étude des données fournies par l'analyseur

électrostatique de l'instrument particules SWEAP sur PSP. Ces instruments possèdent une résolution temporelle bien supérieure aux instruments ayant parcouru le vent solaire jusqu'à présent et avec un champ de vue complet permettant une meilleure estimation des paramètres du plasma.

Il s'agira d'étudier l'évolution des fonctions de distributions électroniques avec la distance au soleil – mais aussi de corréliser leur forme à différents autres paramètres caractérisant le plasma (densité, température, intensité des fluctuations électro-magnétiques...). Cette étude permettra de contraindre d'un point de vue observationnel les paramètres libres intervenant dans la modélisation via l'EFP. En particulier la dépendance énergétique du libre parcours moyen des électrons pourrait être déterminée (mais aussi sa dépendance potentielle à d'autres paramètres plasma). Ces mesures permettront *in fine* de contraindre le mécanisme responsable de la relaxation des électrons.

Ce sujet, fortement adossé sur l'exploitation des données fournies par les sondes SolO et PSP, porte sur une problématique très générale de physique des plasmas astrophysiques. L'identification des processus de relaxation est critique puisqu'ils régulent la thermodynamique hors équilibre de ces plasmas en règle générale très peu collisionnels. Ils déterminent en particulier la valeur des coefficients de transport, qui vont conditionner la dynamique des systèmes à grande échelle. Il est possible que dans le cas du vent solaire ce processus soit l'interaction des particules avec les fluctuations « aléatoires » du champ magnétique interplanétaire. Cette étude est l'occasion de vérifier une telle hypothèse : ce serait une première, qui pourrait déboucher sur l'étude future des couplages entre thermodynamique des plasmas astrophysiques et turbulence électromagnétique.

Quelques publications en lien avec le projet :

A. Zaslavsky et al., *A first observational characterization of the pitch-angle relaxation of solar wind's suprathermal electrons*, 2023 (*in prep*).

A. Zaslavsky, *On the Evaluation of Solar Wind's Heating Rates*, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2022GL101548>, [arXiv.2211.09650](https://arxiv.org/abs/2211.09650), 2022

C. Owen, D. Kataria, L. Bercic, T. Horbury, M. Berthomier et al., *High Cadence Measurements of Electron Pitch Angle Distribution from Solar Orbiter SWA EAS Burst Mode Operations*, Astronomy and Astrophysics, <https://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202140959>, 2021

J.C. Kasper, R. Abiad, G. Austin, M. Balat-Pichelin, S.D. Bale, J.W. Belcher, P. Berg, H. Bergner, M. Berthomier et al., *Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma Instrument Suite for Solar Probe Plus*, Space Science Reviews, <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0206-3>, 2016

S. Landi and F. Pantellini, *Kinetic simulations of the solar wind from the subsonic to the supersonic regime*, Astronomy & Astrophysics, 400, 769–778, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021822>, 2003

S. Landi and F. Pantellini, *On the temperature profile and heat flux in the solar corona: Kinetic simulations*, Astronomy & Astrophysics, 372, 686 – 701, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010552>, 2001