

## UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

École doctorale n°572 — Ondes et Matière (EDOM)

Laboratoire de Physique des Plasmas — LPP

### PhD Thesis Defense

# Electromagnetic Emissions at the Plasma Frequency by Type III Solar Radio Bursts in Solar Wind and Coronal Plasmas

*Emissions électromagnétiques à la fréquence plasma par les sursauts radio de type III dans la couronne et le vent solaires*

PHD CANDIDATE

**Francisco Javier POLANCO-RODRÍGUEZ**

| DATE                                                                      | TIME  | LOCATION                                 |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------|
| Friday 18 September 2026                                                  | 14:00 | École Polytechnique<br>Palaiseau, France |
| Amphithéâtre Jean-Lascoux — Aile 0, Laboratoires de l'École polytechnique |       |                                          |

You are warmly invited to attend the defense

### Thesis supervision

**Catherine KRAFFT**  
Professor, Université Paris-Saclay

**Philippe SAVOINI**  
Professor, Sorbonne Université

### Jury

|                             |                              |                     |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>Karine BOCCHIALINI</b>   | Université Paris-Saclay, IAS | President           |
| <b>Thierry DUDOK DE WIT</b> | Université d'Orléans, LPC2E  | Reviewer & Examiner |
| <b>Pierre HENRI</b>         | CNRS, Lagrange, Nice         | Reviewer & Examiner |
| <b>Francesco CALIFANO</b>   | University of Pisa           | Examiner            |
| <b>Milan MAKSIMOVIC</b>     | CNRS, LIRA, Meudon           | Examiner            |
| <b>Caterina RICONDA</b>     | Sorbonne Université, LULI    | Examiner            |
| <b>Nicole VILMER</b>        | CNRS, LIRA, Meudon           | Examiner            |

Type III solar radio bursts are produced by near-relativistic electron beams accelerated in the solar corona that propagate along open magnetic field lines into the solar wind. These beams generate Langmuir/ $\mathcal{Z}$ -mode ( $\mathcal{LZ}$ ) wave turbulence, which is converted into electromagnetic radiation near the plasma frequency  $\omega_p$  and its harmonics through a sequence of linear and nonlinear wave processes known as plasma emission. Despite more than seventy years of research, the mechanisms responsible for plasma emission in the randomly inhomogeneous and weakly magnetized solar wind plasma remain incompletely understood.

We study plasma emission at  $\omega_p$  under realistic Type III burst conditions from 0.05 to 1 au by combining long-term, large-scale 2D/3V (two dimensions in space and three in velocity) Particle-In-Cell (PIC) simulations, theoretical modeling, and analysis of *in situ* wave measurements from the Solar Orbiter spacecraft. The two-dimensional PIC simulations performed in this thesis are the first to study the beam-plasma system under conditions that simultaneously include realistic beam and plasma parameters, highly resolved electromagnetic and electrostatic scales, high- and low-frequency dynamics, plasma magnetization and random density fluctuations. Moreover, we provide a new framework for connecting PIC simulations with spacecraft observations of radio-emitting space plasmas by developing a virtual satellite technique.

Within this framework, we show in detail how the main processes leading to electromagnetic emission at  $\omega_p$  are interconnected, interact and compete with one another, and how they are impacted by plasma magnetization. The weak ambient magnetic field modifies the electrostatic decay of  $\mathcal{LZ}$  wave turbulence through the appearance of a small-wavenumber boundary layer that prevents  $\mathcal{LZ}$  wave energy condensation and favors instead the radiation of electromagnetic  $\mathcal{Z}$ -mode waves near  $\omega_p$ . In addition to this new channel of electromagnetic radiation evidenced through PIC simulations, we provide the first *in situ* evidence for the decay of  $\mathcal{LZ}$  waves into  $\mathcal{Z}$ -mode waves during a Type III burst observed by the Solar Orbiter spacecraft in the solar wind.

We also demonstrate that, in magnetized and randomly inhomogeneous radio sources, linear mode conversion at constant frequency of  $\mathcal{LZ}$  wave turbulence into electromagnetic waves is the fastest and most efficient mechanism. Radiation is predominant in the  $\mathcal{Z}$  mode, while only  $\sim 10\%$  of the emitted energy can escape the source in the form of  $\mathcal{O}$ -mode waves and, under specific conditions only, of  $\mathcal{X}$ -mode waves. Moreover, linear mode conversion is shown (i) to be closely linked to the polarization ratios of  $\mathcal{LZ}$  wavepackets, thereby providing new insight into the properties of  $\mathcal{LZ}$  wave turbulence, and (ii) to play a crucial role in stimulating slower nonlinear three-wave interactions.

Finally, the electromagnetic decay — the nonlinear three-wave interaction process long regarded as the main mechanism of plasma emission at  $\omega_p$  in homogeneous and unmagnetized plasmas — is evidenced for the first time in realistic PIC simulations of Type III bursts, as well as its transition to nonlinear induced scattering on thermal ions when ion acoustic waves become damped. This electromagnetic decay is also shown to be stimulated by the electrostatic decay.

Les sursauts radio solaires de Type III sont produits par des faisceaux d'électrons quasi-relativistes accélérés dans la couronne solaire qui se propagent dans le vent solaire le long de lignes de champ magnétique ouvertes. Ces faisceaux génèrent une turbulence d'ondes de Langmuir/mode  $\mathcal{Z}$  (dites ondes  $\mathcal{LZ}$ ), converties en rayonnement électromagnétique au voisinage de la fréquence plasma  $\omega_p$  et de ses harmoniques au cours d'une suite de processus linéaires et non linéaires appelée "émission plasma". Malgré plus de 70 ans de recherche, les mécanismes responsables de cette émission dans le vent solaire, plasma faiblement magnétisé et aléatoirement inhomogène, demeurent partiellement incompris.

L'émission plasma à la fréquence  $\omega_p$  est étudiée dans les conditions physiques des sursauts de Type III, à des distances du Soleil entre 0,05 ua et 1 ua, à l'aide de simulations numériques Particle-In-Cell (PIC) de grandes échelles spatiale et temporelle, d'une modélisation théorique et de l'analyse de données mesurées *in situ* par le satellite Solar Orbiter. Les simulations PIC bi-dimensionnelles réalisées dans cette thèse permettent pour la première fois d'étudier le système faisceau-plasma dans des conditions incluant à la fois des paramètres physiques réalistes, des échelles électromagnétiques et électrostatiques fortement résolues, la dynamique conjointe des ondes de haute et basse fréquences, ainsi que la présence d'un champ magnétique ambiant et de fluctuations aléatoires de densité. De plus, une nouvelle méthode utilisant des satellites virtuels générés dans les simulations permet l'interprétation plus aisée des observations spatiales.

Dans ce cadre, nous montrons en détail comment les principaux processus participant à l'émission électromagnétique à la fréquence plasma sont interconnectés, en interaction et en compétition, et comment ils sont impactés par la magnétisation du plasma. Le champ magnétique ambiant modifie le processus de décomposition électrostatique de la turbulence d'ondes  $\mathcal{LZ}$  par l'apparition d'une limite à petit nombre d'onde empêchant la condensation de l'énergie des ondes  $\mathcal{LZ}$  et favorisant l'émission d'ondes électromagnétiques en mode  $\mathcal{Z}$  au voisinage de  $\omega_p$ . Conjointement à la mise en évidence de ce processus de rayonnement par les simulations PIC, nous apportons la première preuve de la décomposition *in situ* des ondes  $\mathcal{LZ}$  en ondes  $\mathcal{Z}$  lors d'un sursaut de Type III observé par Solar Orbiter dans le vent solaire, confirmant nos résultats théoriques.

De même, nous montrons que, dans des sources radio magnétisées et aléatoirement inhomogènes, la conversion linéaire de mode à fréquence constante de la turbulence d'ondes  $\mathcal{LZ}$  en ondes électromagnétiques  $\mathcal{O}$ ,  $\mathcal{X}$  et  $\mathcal{Z}$  est le mécanisme le plus rapide et le plus efficace. Le rayonnement en mode  $\mathcal{Z}$  prédomine, tandis qu'environ 10% de l'énergie émise sous forme d'ondes de mode  $\mathcal{O}$  peut s'échapper de la source et, dans des conditions spécifiques seulement, de mode  $\mathcal{X}$ . De plus, nous démontrons que la conversion linéaire de mode (i) est étroitement liée aux rapports de polarisation des paquets d'ondes  $\mathcal{LZ}$ , offrant un nouvel éclairage sur les propriétés de la turbulence d'ondes  $\mathcal{LZ}$ , et (ii) joue un rôle crucial dans la stimulation d'interactions non linéaires à trois ondes, de dynamique plus lente.

Enfin, la décomposition électromagnétique, *i.e.* le processus d'interaction non linéaire à trois ondes longtemps considéré comme le mécanisme principal de l'émission plasma à la fréquence  $\omega_p$  dans les plasmas homogènes et non magnétisés, a été mise en évidence pour la première fois dans des simulations PIC aux paramètres physiques réalistes, ainsi que sa transition vers le processus de "diffusion non linéaire induite sur les ions thermiques", lorsque les ondes acoustiques ioniques deviennent amorties. Cette décomposition électromagnétique des ondes  $\mathcal{LZ}$  est stimulée par leur décomposition électrostatique.