

Avis de Soutenance

Monsieur Pierre Mariotto

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Kinetics of Nonequilibrium Recombining Nitrogen-Argon Plasmas

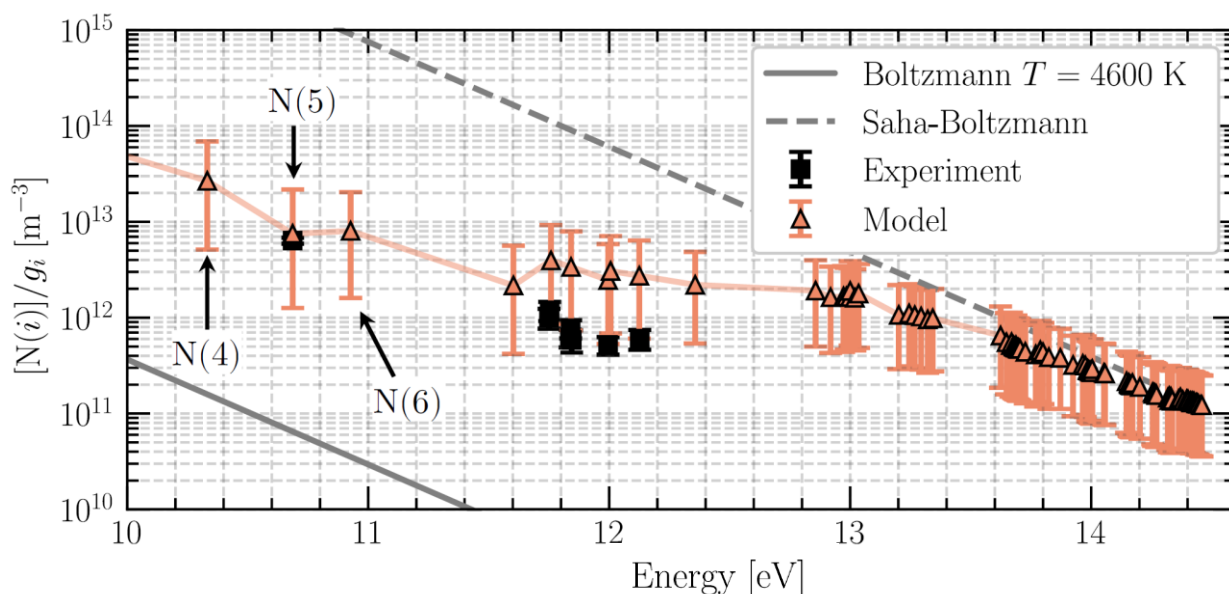
Cinétique de recombinaison des plasmas hors-équilibre azote-argon

Thèse dirigée par Christophe LAUX, Marie-Yvonne PERRIN, Rowan GOLLAN et Peter JACOBS

Le lundi 11 septembre 2023 à 13h

À CentraleSupélec, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex

Théâtre Rousseau (Bâtiment Bouygues)



*Distribution des niveaux électroniques de l'azote atomique dans un plasma de recombinaison N_2/Ar .
Comparaison entre les mesures de Tibère-Inglesse (2019) et les prédictions du modèle collisionnel-
radiatif développé.*

Composition du jury

Dr. Gianpiero COLONNA	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy, <i>Senior Researcher</i>	Rapporteur
Dr. Christopher JOHNSTON	NASA Langley Research Center, USA, <i>Aerospace Engineer</i>	Rapporteur
Pr. Ursel FANTZ	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Germany, <i>Professor</i>	Examinatrice
Pr. Khaled HASSOUNI	LSPM, Université Sorbonne Paris Nord, France, <i>Professor</i>	Examineur
Dr. Mehdi AYOUIZ	LGPM, Université Paris-Saclay, France, <i>Associate Professor</i>	Invité
Mr. Philippe TRAN	ArianeGroup, France, <i>Aerospace Engineer</i>	Invité

Titre : Cinétique de recombinaison des plasmas hors-équilibre azote-argon

Mots clés : plasma d'azote, modèle collisionnel-radiatif, recombinaison, rentrée atmosphérique, arrière-corps

Résumé : Prédire les transferts d'énergie entre un plasma d'azote en recombinaison et son environnement est un enjeu majeur pour des applications telles que la rentrée atmosphérique, la combustion assistée par plasma, la fusion par confinement magnétique, et le traitement de surface. Ces transferts dépendent en partie de la densité de populations des états excités de N et N₂.

Cette étude se concentre en particulier sur les phénomènes collisionnel-radiatifs importants pour la rentrée atmosphérique terrestre des véhicules spatiaux à hypervitesse $v > 10$ km/s. La prédiction du flux radiatif incident sur l'arrière-corps souffre de très larges incertitudes, que ce travail vise à quantifier et à réduire.

En situation de déséquilibre fort, les populations des états électroniques et vibroniques de l'azote atomique et moléculaire (N et N₂) ne suivent plus une distribution de Boltzmann et dépendent des processus collisionnels et radiatifs. Nous avons développé un modèle collisionnel-radiatif électronique-spécifique pour N et vibronique-spécifique pour N₂, capable de prédire la densité des principaux états radiatifs de N/N₂ en fonction des paramètres du plasma (températures, pression, degré d'ionisation). Le modèle inclut les processus-clés responsables du peuplement et dépeuplement des états excités.

Le modèle CR est ensuite utilisé pour prédire les distributions internes hors-équilibre de N et N₂, mesurées récemment dans une expérience de recombinaison au laboratoire EM2C. L'expérience consiste en un plasma de N₂/Ar, initialement en équilibre thermodynamique local à ~7000 K et 1 atm, dont on force le refroidissement à ~5000–3000 K en quelques centaines de microsecondes par injection dans un tube refroidi par eau, de diamètre 1 cm et de longueur 10 ou 15 cm. A la sortie du tube, la surpopulation S_{ion} de {N⁺, électron} vis-à-vis de N atteint ~10⁴–10⁵, et la surpopulation S_{diss} de N(4S*) vis-à-vis de N₂(X,v=0) atteint ~10²–10³. Le modèle est capable de prédire la densité du 5^{ème} multiplet de N (10.7 eV), principale source de rayonnement sur l'arrière-corps, à 20% près, et la densité des niveaux entre 11.7 et 12.2 eV à un facteur ~2–6 près. Ces différences sont faibles en comparaison du facteur de surpopulation S_{ion}. Les simulations reproduisent les distributions vibrationnelles de N₂(B) et N₂(C) à un facteur 3 près, c'est-à-dire avec une marge d'erreur très inférieure au facteur de surpopulation S_{diss}. Trois processus-clés, dont une étude plus approfondie des coefficients de réaction serait souhaitable pour améliorer les prédictions, sont mis en évidence.

Title: Kinetics of Nonequilibrium Recombining Nitrogen-Argon Plasmas

Keywords: nitrogen plasma, collisional-radiative model, recombination, atmospheric reentry, afterbody

Abstract: Predicting the energy transfer between a recombining nitrogen plasma and its environment is a major challenge for applications such as atmospheric reentry, plasma-assisted combustion, magnetic confinement fusion, and materials processing. These transfers depend in part on the population density of the excited states of N and N₂.

In particular, this study focuses on the collisional-radiative phenomena of importance for the reentry of spacecraft into the Earth's atmosphere at hypervelocity $v > 10$ km/s. Predictions of the afterbody radiative heating suffer from very large uncertainties, which this work aims to quantify and reduce.

Under nonequilibrium conditions, the populations of the electronic and vibronic states of atomic and molecular nitrogen (N and N₂) are no longer governed by a Boltzmann distribution but rather by collisional and radiative processes. We developed a collisional-radiative model, electronic-specific for N and vibronic-specific for N₂, able to predict the density of the main radiative levels as a function of key plasma parameters. We account for the main kinetic processes responsible for their population and depletion.

This CR model was used to predict the nonequilibrium internal distribution of N and N₂ measured in recent recombination experiments of the EM2C laboratory. In these experiments, an atmospheric pressure nitrogen/argon plasma, initially in local thermodynamic equilibrium at 7000 K, is forced to recombine by flowing through a water-cooled tube of diameter 1 cm and length 10 or 15 cm. The residence time is several hundreds of microseconds. At the tube outlet, the "ionization overpopulation factor O_{ion}" between {N⁺, electron} and N is ~10⁴–10⁵, and the "dissociation overpopulation factor O_{diss}" of N(4S*) with respect to N₂(X,v=0) is ~10²–10³. The model is able to predict the density of the 5th multiplet of N (10.7 eV), the main source of radiation on the afterbody, to within 20% and the densities of the levels between 11.7 and 12.2 eV within a factor ~2–6. The difference is small in comparison to the overpopulation factor O_{ion}. The simulations agree with the vibrational distributions of N₂(B) and N₂(C) within a factor of less than 3, which is much smaller than the overpopulation factor O_{diss}. We identified the three key processes for which further studies of the rate coefficients would be desirable to improve modeling predictions.

