
MORPHOLOGY AND DYNAMICS OF THE IO UV FOOTPRINT



Dissertation présentée par
Bertrand BONFOND
en vue de l'obtention du grade
de
Docteur en Sciences

A Marie,

Acknowledgments

Je tiens remercier en particulier le professeur Jean-Claude Gérard pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet fascinant au sein du LPAP en m'accordant à la fois sa confiance et les moyens de mener à bien cette étude. Pour un passionné de tout ce qui concerne l'Espace comme moi, l'opportunité de travailler sur de véritables images provenant du Télescope Spatial Hubble fut un honneur et un plaisir au quotidien. Je le remercie, ainsi que le docteur Denis Grodent, pour leur encadrement et leur disponibilité exceptionnels. Tout ce que je sais aujourd'hui sur les magnétosphères des planètes géantes et sur l'analyse des images HST, je le dois à leur patience et à leur compétence scientifique. En outre, je voudrais remercier ma collègue de bureau, le docteur Aikaterini Radioti, pour sa bonne humeur et ses avis éclairés.

Je remercie également Angela Della Vecchia, Anne Mouchet, Caroline Blockx, Cédric Cox, Lauriane Soret, Mahdia Belounis, Marie Dury et Valérie Coumans sans qui l'ambiance du labo ne serait pas ce qu'elle est. Merci enfin à tous les membres du LPAP et de l'UMCCB pour leur accueil et les conseils que chacun m'aura donné durant ces dernières années.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance envers mes parents, Marie-Lise et Ronan, pour avoir supporté mes états d'âmes et mes angoisses pendant de très longues années, ainsi qu'à ma compagne, Marie, pour avoir pris la relève. Son soutien et sa compréhension furent vraiment précieux, en particulier ces derniers temps.

Enfin, mes remerciements vont à ma famille qui m'a toujours soutenu ainsi qu'à mes potes avec qui j'ai partagé pas mal de bons moments durant cette thèse.

“There is a theory which states that if ever anyone discovers exactly what the Universe is for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable.

There is another theory which states that this has already happened.”

Douglas Adams

Abstract

The Io UV footprint (IFP) is one of the most spectacular signatures of the Io-Jupiter interaction. It consists of several auroral spots and an extended tail which are located close to the feet of the magnetic field lines passing through Io in each hemisphere. The purpose of the present study is to demonstrate that a careful analysis of the Io UV footprint based on observations acquired with the STIS and ACS high resolution and high sensitivity FUV cameras on board the Hubble Space Telescope can provide us with essential information on the ongoing physical processes. The thesis is organized around basic questions: “What is the Io footprint?”, “Where is the Io footprint?”, “How high is the Io footprint?”, “How big is the Io footprint?” and finally: “How bright is the Io footprint?” The answers to these questions have profound implications for the understanding of the phenomenon.

Among the most important results of this work is the unexpected finding of a faint auroral spot appearing upstream of the main Io spot in one hemisphere while only downstream spots are seen in the opposite hemisphere. The detailed study of the evolution of the inter-spot distances puts previous models describing the footprint morphology under question. We propose a new interpretation which involves that some spots are caused by electrons accelerated away from the planet along the field lines in one hemisphere, crossing the equatorial plane in the form of electron beams and precipitating in the opposite hemisphere, creating the so-called Trans-hemispheric Electron Beam (TEB) spots.

The information provided by the position of the satellite footprints is not restricted to the interaction between the moon and the Jovian magnetosphere. The analysis of the footpaths of Io, Europa and Ganymede helped us to further constrain the magnetic field models, notably through the identification of a large magnetic anomaly in the northern hemisphere. Additionally, the study of the speed of the Io footprint along its reference contour suggests that a second anomaly regions may also exist in the North.

In this work, we present a new and direct method to measure the altitude of the different footprint features. The main spot and the tail emissions have a peak altitude of 900 km while the peak altitude of the Trans-hemispheric Electron Beam spot is 700 km. These results suggest that the main spot and tail emissions are caused by the precipitation of electrons with a mean energy around 1 keV, far lower than the 55 keV value previously derived from spectral measurements. The vertical extent of these emissions is surprisingly broad (scale height ~ 400 km) and is best fitted with an incoming kappa electron energy distribution (spectral index ~ 2.3). This suggests that the electron acceleration is supplied by processes related to inertial Alfvén waves rather than by quasi-static potentials as proposed by some theoretical models.

The size of the main footprint spot is carefully estimated on a much larger image sample than before: its length along the footpath is ~ 900 km while its width perpendicular to the footpath is < 200 km. Larger lengths are sometimes observed but in that case, they are attributed to the mix of individual spots. The spot length is larger than the projected diameter of Io around the magnetic field lines but is consistent with recent simulations.

As far as the Io footprint brightness is concerned, variations on two timescales have been studied. On timescales of minutes, systematic brightness fluctuation on the order of 30% (and going up to 50%) are observed. Additionally, cases of simultaneous variations of the main and the TEB spots are reported, which suggests that the process that triggers these fast variations is located close to the planet. Variations of the main spot brightness with the System III longitude of Io are also analyzed. Our new measurement method fully considering the multi-spot structure of the IFP and the real geometry of the observations provides more accurate estimates for the precipitating energy flux (between 100 and 500 mW/m² for the main spot). The main spot brightness peaks at 110° and 290° longitude, which could be attributed either to an enhanced interaction strength when Io is near the dense torus center or to spots merging which is also observed to occur in these sector. Nevertheless, strong North-South asymmetries are also observed, which suggests that the surface magnetic field strength also influences the spots brightness.

Résumé

L’empreinte aurorale d’Io est l’une des signatures les plus impressionnantes de l’interaction Io-Jupiter. Présente dans chaque hémisphère, elle se situe à proximité des pieds des lignes de champ magnétique qui interceptent Io et se compose de plusieurs taches suivies d’une longue trainée. Cette étude vise à démontrer qu’une analyse minutieuse de l’empreinte UV d’Io basée sur les observations des instruments STIS et ACS du Télescope Spatial Hubble peut apporter des informations cruciales sur les processus physiques qui sont en jeu. Cette thèse est organisée autour de questions relativement basiques: “Qu’est-ce que l’empreinte d’Io?”, “Où se trouve-t-elle?”, “A quelle altitude se trouve-t-elle?”, “Quelle est sa taille?” et enfin “Quelle est sa brillance?”. Les réponses à ces questions ont de profondes implications pour la compréhension du phénomène.

Parmi les résultats principaux de ce travail, il y a la découverte inattendue d’une faible tache aurorale apparaissant en amont de la tache principale dans un hémisphère alors que les seules taches observées dans l’hémisphère opposé sont situées en aval. L’étude détaillée de la distance inter-taches remet en question les précédents modèles décrivant la morphologie de l’empreinte. Nous proposons ici une nouvelle interprétation de certaines de ces taches: elles seraient causées par des électrons initialement accélérés le long des lignes de champ dans la direction opposée à Jupiter, qui ensuite traverseraient le plan équatorial sous la forme de faisceaux d’électrons et qui précipiteraient finalement dans l’hémisphère opposé en générant la tache du Faisceau d’Electrons Trans-hémisphérique (FET).

Les informations fournies par la position des empreintes de satellites ne se limitent pas à l’interaction entre Io et la magnétosphère de Jupiter. L’analyse des contours parcourus par les empreintes d’Io, d’Europe et de Ganymède permet de mieux contraindre les modèles de champ magnétique joviens, entre autre à travers l’identification d’une importante anomalie magnétique dans l’hémisphère nord. De plus, l’étude de la vitesse de l’empreinte d’Io le long du contour de référence suggère qu’elle pourrait être accompagnée d’une deuxième anomalie dans cet hémisphère.

Dans cette étude, nous présentons une méthode directe pour mesurer l’altitude des différentes sous-structures qui forment l’empreinte. Le pic d’émissions de la

tache principale et de la trainée est situé à 900 km d'altitude alors que celui de la tache FET est à 700 km. Ces résultats suggèrent que la tache principale et la trainée sont la conséquence de la précipitation d'électrons ayant une énergie moyenne d'approximativement 1 keV, une valeur largement inférieure aux 55 keV déduits à partir de précédentes mesures spectrales. L'extension verticale de ces émissions est étonnamment large (hauteur d'échelle: ~ 400 km) et la distribution d'énergie des électrons incidents qui reproduit au mieux les observations est une distribution kappa d'indice spectral 2.3. Cela suggère que l'accélération des électrons est liée à des ondes d'Alfvén inertielles plutôt qu'aux potentiels quasi-statiques proposés par certains modèles théoriques.

La taille de la tache principale a été mesurée sur un ensemble d'images beaucoup plus étendu qu'auparavant: sa longueur le long du contour est de ~ 900 km alors que sa largeur telle que mesurée perpendiculairement à celui-ci est de < 200 km. Des longueurs plus importants sont parfois observées mais elles résultent de la superposition partielle de plusieurs taches individuelles. La longueur des taches est plus grande que la projection du diamètre d'Io le long des lignes de champ, ce qui était prévu par des simulations récentes.

En ce qui concerne la brillance des taches, deux échelles de temps ont été étudiées en particulier. A l'échelle de la minute, nous avons mis en évidence des fluctuations de l'ordre de 30% de la brillance moyenne et pouvant atteindre jusqu'à 50 % de celle-ci. Dans certains cas, on observe des variations corrélées de la tache principale et de la tache FET, ce qui suggère que le processus qui induit ces variations rapides se situe près de la surface de Jupiter. Les variations de la brillance de la tache principale en fonction de la longitude Système III d'Io ont également été analysées. Notre nouvelle méthode de mesure prend pleinement en compte la géométrie de l'observation ainsi que le fait que l'empreinte est composée de différentes taches, ce qui permet une estimation plus précise du flux d'énergie incident (entre 100 et 500 mW/m² pour la tache principale). La brillance de la tache principale possède deux maxima, un à 110° et un autre à 290° de longitude. Ces augmentations de brillance peuvent avoir deux origines: soit elles sont dues à l'augmentation de l'intensité de l'interaction entre Io et le plasma quand Io est proche du centre du tore, soit elles sont liées à la superposition des taches principales et FET qui se produit également dans ces secteurs. Néanmoins, de fortes asymétries Nord-Sud sont aussi observées, ce qui semble indiquer que l'intensité du champ magnétique de surface joue aussi un rôle en ce qui concerne la brillance des spots.

Contents

Acknowledgments	iv
Abstract	vi
1 Introduction	1
1.1 Why study the Io footprint?	1
1.2 Outline of the thesis	3
1.3 Coordinate systems	4
1.4 The Jovian magnetosphere	5
1.5 The Io-Jupiter interaction	8
1.6 Observations	20
1.7 Description of the instruments	35
2 Catalog and data processing	40
2.1 Foreword	40
2.2 HST Observation Programs	41
2.3 Information sources	44
2.4 Field description	46
2.5 Data reduction	49
2.6 Determination of the planetary center location and rotation axis orientation	51
2.7 The Saturn observation catalog	63
2.8 Removing the planetary disk contribution	66
2.9 Epilogue: contributions to the study of Jupiter's and Saturn's aurorae	69
3 Spots multiplicity	73
3.1 Introduction to the Io footprint morphology	73

3.2	Publication: <i>The UV Io footprint leading spot: A key feature for understanding the UV Io footprint multiplicity?</i>	77
3.3	Complementary results on the Io footprint morphology	86
4	Spots position	91
4.1	Foreword	91
4.2	Satellites footpaths as constraints for improving Jovian magnetic field models	92
4.3	Location of the Io footprint spots: key observations for validating the interaction models	97
4.4	Epilogue	109
5	The Io footprint tail emissions	110
5.1	Foreword	110
5.2	Introduction	114
5.3	Peak altitude and vertical profiles	115
5.4	Estimate of the energy distribution	119
5.5	Discussion	131
5.6	Conclusions	133
6	Spots size	136
6.1	Foreword	136
6.2	Introduction	137
6.3	The spots length	138
6.4	The spots vertical extent	145
6.5	The spot width	149
6.6	Conclusions	153
7	Brightness variations	155
7.1	Foreword	155
7.2	Short timescale brightness variations	156
7.3	Epilogue	165
7.4	System III related brightness variations	167
7.5	Conclusions	181

8	Conclusions	184
8.1	Discussion	184
8.2	Future work and perspectives	187
8.3	Final words	189
A	Altitude of Saturn's aurora	190
A.1	Forewords	190
A.2	Publication: Altitude of Saturn's aurora and its implications for the characteristic energy of precipitated electrons	192
A.3	Additional details on the modified Kronian polar atmospheric model .	201
A.4	Estimate of the particle energy distribution	205
	Bibliography	209