

Astrophysique/Système solaire

## Le halo ionosphérique autour des anneaux de Saturne

Mehdi Bouhram<sup>a,\*</sup>, Jean-Jacques Berthelier<sup>a</sup>, Jean-Marie Illiano<sup>a</sup>, Robert E. Johnson<sup>b</sup>,  
Robert L. Tokar<sup>c</sup>, Frank J. Crary<sup>d</sup>, Dave T. Young<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Centre d'étude des environnements terrestre et planétaires, 4, avenue de Neptune, 94100 Saint-Maur des Fossés, France

<sup>b</sup> Material science and engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA

<sup>c</sup> Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA

<sup>d</sup> Southwest Research Institute, San Antonio, TX 78238, USA

Reçu le 13 juillet 2005 ; accepté après révision le 1<sup>er</sup> mars 2006

Disponible sur Internet le 4 avril 2006

Présenté par Pierre Encrenaz

### Résumé

Le survol des anneaux A et B de Saturne par la sonde Cassini lors de son insertion sur son orbite autour de la planète a révélé l'existence d'un halo ionosphérique composé d'ions  $O^+$  et  $O_2^+$ . Ces observations peuvent s'expliquer par la présence d'une atmosphère d'oxygène moléculaire  $O_2$  autour des anneaux créé par décomposition photolytique de la glace constituant les grains. L'existence de cette atmosphère est rendue possible par la propriété des molécules d'oxygène de ne pas coller à la glace dans les conditions de température des grains et par conséquent de ne pas être perdues lors de leurs collisions avec les grains. Nous présentons un modèle utilisant une approche particulière pour traiter le transport des neutres et des ions et les différents processus physico-chimiques. Ce modèle rend compte de façon très satisfaisante des observations. **Pour citer cet article : M. Bouhram et al., C. R. Physique 7 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**The ionospheric halo around Saturn's rings.** During its insertion on an orbit around Saturn, the Cassini orbiter flew above the A and B rings and observations have revealed the presence of an ionosphere composed of  $O^+$  and  $O_2^+$  ions. These observations can be explained by the presence around the rings of an atmospheric halo made up of molecular oxygen produced by the photolytic decomposition of the ice which constitutes the grains. At the temperature of the ring particles, oxygen molecules do not stick to the ice and thus are not lost during collisions with grains. A model of the formation of the ionospheric halo is presented based on a test-particle approach to describe the transport and the physical and chemical mechanisms that play an essential role. This model provides a very satisfactory fit with the data. **To cite this article: M. Bouhram et al., C. R. Physique 7 (2006).**

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

**Mots-clés :** Planétologie ; Plasmas ; Saturne ; Anneaux planétaires ; Ionosphère

**Keywords:** Planetary science; Plasmas; Saturn; Planetary rings; Ionosphere

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [mehdi.bouhram@cetp.ipsl.fr](mailto:mehdi.bouhram@cetp.ipsl.fr) (M. Bouhram).

## 1. Introduction

Plusieurs travaux ont suggéré l'existence d'une atmosphère ténue au voisinage des anneaux internes de Saturne et proposé comme mécanismes principaux de formation la photolyse ou le criblage des particules de glace par des particules énergétiques [1–3]. Cependant, jusqu'à la mise en orbite de la sonde Cassini autour de Saturne le 1er juillet 2004, l'environnement proche des anneaux restait largement méconnu et les modèles proposés n'avaient jamais pu être directement contraints par les observations.

Les premières mesures effectuées par Cassini lors de la manœuvre d'insertion, et en particulier les mesures de plasma dues à l'expérience CAPS [4], ont fourni des données totalement inédites qui vont permettre de faire progresser la compréhension de cette région de la magnétosphère de Saturne. Elles ont révélé l'existence, au voisinage des anneaux internes A et B, d'une ionosphère composée essentiellement d'ions  $O^+$  et  $O_2^+$  produits à partir de l'oxygène moléculaire  $O_2$  [5–7].

Nous présentons dans cette Note les résultats préliminaires d'un modèle à 2 dimensions décrivant la formation du halo ionosphérique entourant les anneaux. Il est fondé sur une approche particulière qui permet de prendre en compte les principaux mécanismes physico-chimiques qui régissent la formation des ions ainsi que leur transport. Les résultats de ce modèle sont comparés aux mesures faites par le spectromètre IMS (Ion Mass Spectrometer) de CAPS et montrent un très bon accord.

## 2. Observations et éléments du modèle

La Fig. 1 présente la trajectoire de la sonde Cassini lors de la manœuvre d'insertion sur son orbite autour de Saturne et, en gras, la partie de cette trajectoire pendant laquelle le spectromètre IMS a détecté les ions  $O^+$  et  $O_2^+$  constituant l'ionosphère des anneaux. La direction du Soleil, indiquée sur la figure, montre que les anneaux étaient éclairés sur leur face tournée vers le Sud alors que le survol s'est déroulé au dessus de leur face Nord.

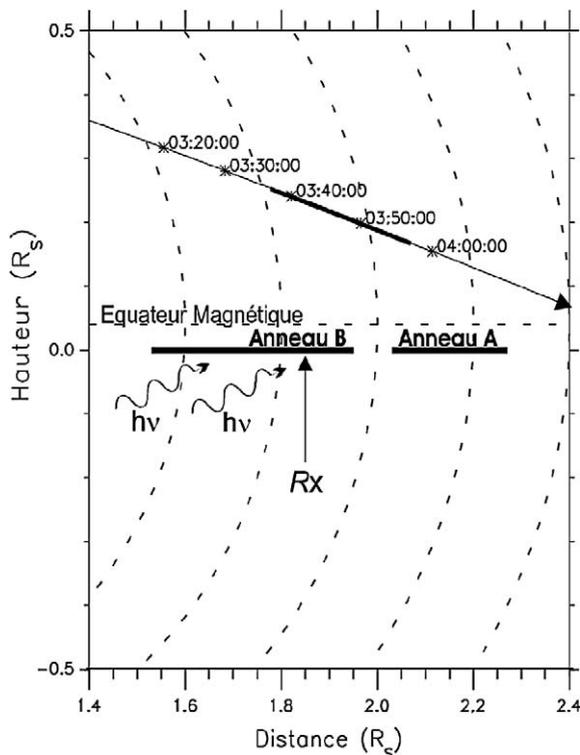


Fig. 1. Dessin montrant le domaine de simulation et la trajectoire de l'orbiteur Cassini lors de l'insertion d'orbite dans l'environnement de Saturne le 1<sup>er</sup> Juillet 2004. Les courbes en pointillés représentent les lignes de champ magnétique.

Fig. 1. Drawing showing the simulation domain and the trajectory of the Cassini orbiter during Saturn's orbit insertion (SOI) on July 1, 2004. The dotted lines correspond to the magnetic field lines.

## 2.1. Modélisation du halo neutre

Le halo neutre au voisinage des anneaux est dû principalement à la photolyse des particules de glace des anneaux sous l'action du rayonnement UV solaire. Dans les conditions de température des grains de glace ( $\sim 80\text{--}100\text{ K}$ ), les mesures en laboratoire ont montré que l'oxygène moléculaire n'est pas adsorbé lorsqu'il impacte la glace et est réémis pratiquement instantanément [8]. Il n'est donc pas perdu lors des collisions avec les grains et cette propriété le distingue des autres constituants produits par l'ensemble des processus de photolyse, tels l'oxygène atomique O, les atomes ou radicaux H, OH... et les ions  $O^+$  et  $O_2^+$ , qui sont, au contraire, adsorbés et perdus. Ceci explique pourquoi le halo atmosphérique est essentiellement constitué d'oxygène moléculaire, une situation également rencontrée dans le cas des satellites Joviens Europe et Ganymède [9]. Dans notre modèle, les molécules de  $O_2$  sont produites par les UV solaires sur la face Sud des anneaux avec un taux de production :

$$\Gamma = (1 - f)S_{O_2} \quad (1)$$

où  $S_{O_2} = 10^6\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  [8] et où  $f = \exp(-\xi / \cos \gamma)$  donne, à partir de la épaisseur optique  $\xi$  [10] la transparence effective des anneaux éclairés sous un angle  $\gamma = 66^\circ$  par rapport à la direction de la normale. Les molécules sont éjectées à partir du plan des anneaux vers le Sud à une vitesse totale égale à la somme de la vitesse orbitale des grains et d'une vitesse isotrope sur le demi-espace. Pour ce processus, la distribution en énergie des molécules de  $O_2$  éjectées a été mesurée en laboratoire [11] et s'exprime sous la forme :

$$F(E) \propto \frac{U}{(E + U)^2} \quad (2)$$

où  $U = 0,015\text{ eV}$ . Les vitesses correspondantes sont petites par rapport à la vitesse orbitale. Lors de leur parcours, les molécules reviennent dans le plan équatorial et leur probabilité d'impact sur un grain est donnée par :

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{\cos \alpha}\right) \quad (3)$$

où  $\alpha$  est l'angle entre la vitesse et la normale au plan des anneaux. Cette probabilité est généralement forte au niveau des anneaux A ( $\xi \sim 0,5$ ) et B ( $\xi \sim 1,0$ ) et relativement faible en dehors des anneaux dans le plan équatorial ( $\xi < 0,1$ ). Comme  $O_2$  ne colle pas à la glace, nous supposons qu'après un choc la molécule est réfléchiée de façon spéculaire, sans perte d'énergie.

## 2.2. Production et transport des ions

Les ions  $O_2^+$  and  $O^+$  sont créés par photo-ionisation suivant les réactions :



La réaction (2) est exothermique et les ions  $O^+$  sont créés avec un excès d'énergie de  $\sim 0,5\text{ eV}$  [12], alors que ce n'est pas le cas des ions  $O_2^+$  que nous considérons émis avec la vitesse des neutres correspondants. En outre, nous avons pris en compte la réaction ion-molécule :



Au voisinage des anneaux où  $[O_2] \sim 10^5\text{ cm}^{-3}$  et  $[O_2^+] \sim 3\text{ cm}^{-3}$  [5], on obtient des taux de production  $k_{O_2^+} = 6,4 \times 10^{-9}[O_2] \sim 6,4 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  pour  $O_2^+$  et  $k_{O_2} = 6,4 \times 10^{-9}[O_2^+] \sim 1,9 \times 10^{-8}\text{ s}^{-1}$  pour  $O_2$ . De plus, cette réaction n'intervient pas sur la densité des ions  $O_2^+$  mais joue un rôle important dans la redistribution de leurs vitesses donc dans la diffusion en angle d'attaque. En effet, dans le cas où les particules ont des vitesses voisines, la vitesse de l'ion créé est égale à la somme de la vitesse du centre de masse et d'une composante isotrope égale en module à la moitié de la vitesse relative de collision.

Comme les neutres ont une vitesse proche de la vitesse orbitale des grains  $\mathbf{V}_O$  dont le module varie en  $r^{-1/2}$ , les ions nouvellement formés ont dans le repère du plasma en co-rotation une vitesse  $\sim \mathbf{V}_O - \mathbf{V}_{CO}$  où  $\mathbf{V}_{CO} = \omega_S \times \mathbf{r}$  est la vitesse de corotation et ils entament donc un mouvement de giration autour du champ magnétique imposé par cette composante de leur vitesse. En l'absence de collision avec les particules des anneaux, un ion peut suivant son angle

d'attaque initial  $\alpha$  soit décrire un mouvement d'oscillation autour de l'équateur magnétique, situé à  $0,04R_S$  au Nord du plan des anneaux, dont l'amplitude dépend de  $\alpha$ , soit précipiter dans l'atmosphère de Saturne pour des valeurs de  $\alpha$  proches des directions parallèles ( $\alpha = 0^\circ$ ) et antiparallèles ( $\alpha = 180^\circ$ ) au champ magnétique.  $\mathbf{V}_O$  et  $\mathbf{V}_{CO}$  étant perpendiculaires à l'axe de rotation de Saturne, lui-même pratiquement aligné avec l'axe du dipôle magnétique de la planète, les ions ont tous un angle d'attaque  $\alpha \sim 90^\circ$  sauf ceux créés à une distance de Saturne  $R_X = 1,85R_S$  (voir Fig. 1) pour laquelle  $\mathbf{V}_O = \mathbf{V}_{CO}$  et où, par conséquent, la vitesse relative d'éjection des neutres depuis la surface des grains est le terme dominant. Dans ce cas, les ions vont être réfléchis à de plus grandes distances du plan des anneaux.

Le mouvement des particules est calculé en tenant compte de la gravité, et, pour les ions, du champ magnétique et du champ électrique de corotation. Pour des distances planétocentriques inférieures à  $8R_S$  le champ magnétique peut être pris comme dipolaire et s'exprimer en coordonnées sphériques sous la forme :

$$\mathbf{B} = B_0(R_S/r)^3(2 \cos \theta \mathbf{u}_r + \sin \theta \mathbf{u}_\theta) \quad (7)$$

où  $B_0 = 0,22 \times 10^{-4}$  T est l'intensité du champ à l'équateur magnétique à  $r = R_S$ . Le champ électrique de corotation  $\mathbf{E}$  est égal à  $\mathbf{V}_{co} \times \mathbf{B}$  et s'écrit de la même façon :

$$\mathbf{E} = E_0(R_S/r)^2(\sin^2 \theta \mathbf{u}_r - 2 \cos \theta \sin \theta \mathbf{u}_\theta) \quad (8)$$

où  $E_0 = \omega_S R_S B_0 = 220$  mV m $^{-1}$  est l'intensité du champ à l'équateur magnétique à  $r = R_S$ .

La probabilité de collision des neutres ou des ions avec les particules des anneaux est donnée par (3). A l'exception de  $O_2$ , tous les autres constituants considérés dans le modèle ( $O_2^+$ ,  $O^+$  et O) sont considérés comme perdus après une collision avec les grains.

### 3. Résultats et discussion

Une source de neutres est générée à partir de  $2 \times 10^4$  macroparticules de  $O_2$  répartis uniformément sur la face sud des anneaux entre  $r = 1,4$  et  $r = 2,4R_S$  et dont le poids  $W$  en particules/s est proportionnel au taux de production local  $\Gamma$  (voir Éq. (1)). On suit le mouvement de ces neutres en fonction du temps jusqu'à ce qu'ils soient perdus en créant des ions  $O_2^+$  ou  $O^+$  par photo-ionisation. Les trajectoires des ions et des neutres sont calculées à l'aide d'une méthode de Runge–Kutta d'ordre 4 en prenant un pas de temps fixe  $\Delta t$ . On modélise les trajectoires des ions jusqu'à ce qu'ils soient perdus, soit en impactant une particule de glace, soit en précipitant dans l'atmosphère de Saturne. En supposant une symétrie de révolution autour de la planète, des densités et moments d'ordre supérieur des fonctions de distribution sont obtenus à différentes distances  $\rho_i$  de l'axe de rotation de Saturne et différentes hauteurs  $z_j$  par rapport au plan des anneaux. A un temps  $t_k = k \Delta t$ , la contribution d'une particule à la densité  $n(\rho_i, z_j)$  dans la cellule  $(\rho_i, z_j)$  de volume  $V_{i,j}$  où elle se trouve est égale à  $W \Delta t / V_{i,j}$ .

La Fig. 2 présente une comparaison directe, le long de la trajectoire de Cassini, entre les mesures de composition ionique faites par IMS [5,7] et les densités de  $O_2^+$  et  $O^+$  fournies par le modèle. Nous avons également indiqué sur cette figure les positions des différents anneaux que survole Cassini. Comme il existe une certaine incertitude pouvant atteindre un facteur 2 au niveau des mesures absolues de densités, des étalonnages de l'instrument IMS étant en cours d'achèvement, les valeurs ont été normalisées par rapport à la valeur maximum mesurée pour  $O_2^+$  ( $\sim 10\text{--}20$  cm $^{-3}$ ). Au niveau de l'anneau B, peu transparent ( $\xi \sim 1,0$ ), les taux de production du côté nord ( $z > 0$ ) et les probabilités de transmission des ions sont faibles. C'est pourquoi les mesures de densités de  $O_2^+$  et  $O^+$  au dessus de cette région sont en moyenne plus petites qu'ailleurs. De plus, on note que les densités de  $O^+$  mesurées sont d'environ un facteur 5 supérieures à celles de  $O_2^+$  bien qu'au niveau des anneaux on ait un rapport  $[O_2^+]/[O^+] \sim 4$  à partir des réactions (4) et (5). Ce résultat s'explique par la plus grande diffusion en angle d'attaque des ions  $O^+$  liée au caractère exothermique de la réaction (5), ce qui leur permet d'avoir une probabilité de transmission à travers l'anneau B plus importante que celle des ions  $O_2^+$ . Au niveau de la division Cassini, la densité mesurée est plus importante dans la mesure où les ions diffusent plus librement à travers le plan des anneaux que dans les parties plus denses en particules de glace tels que les anneaux A et B. En revanche, on n'observe pas de diminution très nette des mesures de densité ionique à la frontière entre la division Cassini et l'anneau A pour des raisons liées à la trajectoire de Cassini. En effet, Cassini se rapprochant des anneaux, la présence d'un gradient horizontal de densité à cette frontière est ici compensé par le fait que le long d'un même tube de force, la densité ionique décroît en fonction de la distance aux anneaux.

Bien que les mesures aient été effectuées sur le coté non éclairé des anneaux, à l'opposé des régions de production par le rayonnement solaire, on constate un très bon accord entre les profils mesurés et modélisés. Ceci prouve que,

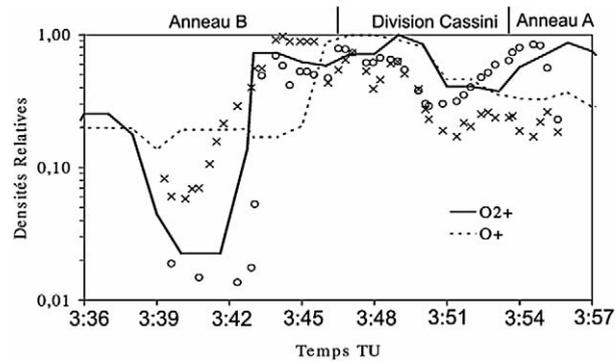


Fig. 2. Comparaisons entre les densités d'ions mesurées avec celles simulées le long de la trajectoire de Cassini le 1<sup>er</sup> Juillet 2004 entre 3:36 et 3:57 TU. Pour  $O_2^+$  et  $O^+$ , les points de mesure sont respectivement indiqués par des cercles et des croix, tandis que les profils simulés sont respectivement représentés par les courbes en trait plein et en pointillés. Les densités sont normalisées par rapport à la valeur maximale mesurée. Les lignes verticales indiquent les frontières entre les différents anneaux.

Fig. 2. Comparisons between measured and simulated ion densities along Cassini track on 1 July 2004 between 3:36 and 3:57 UT. For  $O_2^+$  and  $O^+$ , measurements are indicated by open circles and crosses, respectively, while simulated profiles are represented by a solid curve and a dotted curve, respectively. Densities are normalized with respect to the maximum measured density. The vertical lines indicate the boundaries between rings.

même dans sa forme préliminaire et compte tenu des imprécisions, le modèle prend en compte de façon satisfaisante les processus essentiels de production et de transport. Seule la région de fort gradient rencontrée dans les tubes de force qui correspondent à la limite de l'anneau B entre 3,40 et 3,44 TU n'est pas reproduite de façon correcte. Cet effet de bord peut s'expliquer parce que l'interaction des ions ou des neutres avec les anneaux dans ces régions où la densité des grains varie rapidement n'est pas reproduite de façon assez précise par le modèle. L'un des mécanismes auxquels on peut penser est par exemple la charge électrique des grains des anneaux. Cette charge dépend de l'intensité du rayonnement UV solaire et des flux d'ions et d'électrons du plasma environnant [13]. Ce phénomène de charge des grains de glace va modifier l'interaction des grains avec les particules du plasma. Par exemple, si les grains se chargent négativement, la probabilité de collision des ions et des électrons avec ces derniers vont respectivement être augmentées et diminuées. De plus, dans les régions de transition où la densité des grains diminue, l'absorption du rayonnement UV est plus faible et le potentiel d'une grande partie des grains devient moins positif ou plus négatif [13]. De cette manière, ce phénomène peut également contribuer à modifier les gradients de densité ionique à la limite entre l'anneau B et la division Cassini. Par ailleurs, nous avons négligé le champ électrique ambipolaire, induit par séparation de charges entre les électrons et les ions  $O_2^+$  majoritaires au niveau du plan des anneaux [14]. Dans les régions de fort gradient de densité, la variation de ce champ électrique peut être significative et avoir une influence sur la répartition des électrons et différentes espèces ioniques du plasma le long des lignes de champ magnétiques. Pour prendre en compte ces phénomènes de façon autocohérente, il est nécessaire d'incorporer un fluide d'électrons au modèle. C'est pourquoi une version plus élaborée du modèle est en cours développement et devrait permettre d'améliorer la modélisation de ces régions marquées par une forte inhomogénéité.

## Remerciements

Les travaux effectués au CETP sur l'expérience CAPS sont financés sous les auspices de la convention CNES EU282. L'un des auteurs (M.B.) remercie le CNES pour l'attribution d'une bourse post-doctorale.

## Références

- [1] W.-H. Ip, Plasmatization and recondensation of the Saturnian rings, *Nature* 320 (1984) 143–145.
- [2] W.-H. Ip, Exospheric systems of Saturn's rings, *Icarus* 115 (1995) 295–303.
- [3] W.-H. Ip, Thermal plasma composition in Saturn's magnetosphere, *Planet. Space Sci.* 48 (2000) 775–783.
- [4] D.T. Young, J.-J. Berthelier, M. Blanc, J.L. Burch, A.J. Coates, R. Goldstein, M. Grande, T.W. Hill, R.E. Johnson, V. Kelha, D.J. McComas, E.C. Sittler, K.R. Svenes, K. Szegö, P. Tanskanen, K. Ahola, D. Anderson, S. Bakshi, R.A. Baragiola, B.R. Barraclough, R.K. Black, S. Bolton, T. Booker, R. Bowman, P. Casey, F.J. Crary, D. Delapp, G. Dirks, N. Eaker, H. Funsten, J.D. Furman, J.T. Gosling, H. Hannula, C. Holmlund,

- H. Huomo, J.-M. Illiano, P. Jensen, M.A. Johnson, D.R. Linder, T. Luntama, S. Maurice, K.P. McCabe, K. Mursula, B.T. Narheim, J.E. Nordholt, A. Preece, J. Rudzki, A. Ruitberg, K. Smith, S. Szalai, M.F. Thomsen, K. Viherkanto, J. Vilppola, T. Vollmer, T.E. Wahl, M. Wüest, T. Ylikorpi, C. Zinsmeyer, Cassini plasma spectrometer investigation, *Space Sci. Rev.* 114 (2004) 1–112.
- [5] D.T. Young, J.-J. Berthelier, M. Blanc, J.L. Burch, S. Bolton, A.J. Coates, F.J. Crary, M.W. Dunlop, R. Goldstein, M. Grande, T.W. Hill, R.E. Johnson, R.A. Baragiola, V. Kelha, D.J. McComas, K. Mursula, E.C. Sittler, K.R. Svenes, K. Szegö, P. Tanskanen, M.F. Thomsen, S. Bakshi, B.L. Barraclough, Z. Bebesi, D. Delapp, M.W. Dunlop, J.T. Gosling, J.D. Furman, L.K. Gilbert, D. Glenn, C. Holmlund, J.-M. Illiano, G.R. Lewis, D.R. Linder, S. Maurice, H.J. McAndrews, B.T. Narheim, E. Pallier, D. Reisenfeld, A.M. Rymer, H.T. Smith, R.L. Tokar, J. Vilppola, C. Zinsmeyer, Composition and dynamics of plasma in Saturn's magnetosphere, *Science* 307 (2005) 1262–1264.
- [6] J.H. Waite, T.E. Cravens, W.-H. Ip, W.T. Kasprzak, J.G. Luhmann, R.L. McNutt, H.B. Niemann, R.V. Yelle, I. Mueller-Wodarg, S.A. Ledvina, S. Scherer, Cassini ion and neutral mass spectrometer measurements of oxygen ions near Saturn's A-ring, *Science* 307 (2005) 1260–1262.
- [7] R.L. Tokar, R.E. Johnson, M.F. Thomsen, D.M. Delapp, R.A. Baragiola, M. Francis, D.B. Reisenfeld, B. Fish, D.T. Young, F.J. Crary, A.J. Coates, D.A. Gurnett, W.S. Kurth, Cassini observations of the thermal plasma in the vicinity of Saturn's main rings and the F and G rings, *Geophys. Res. Lett.* 32 (2005) L14S04, doi:10.1029/2005GL022690.
- [8] M.S. Westley, R.A. Baragiola, R.E. Johnson, G.A. Barrata, Ultraviolet photodesorption from water ice, *Planet. Space Sci.* 43 (1995) 1311–1315.
- [9] V.I. Shematovich, R.E. Johnson, J.F. Cooper, M.C. Wong, Surface-bounded atmosphere of Europa, *Icarus* 173 (2005) 480–498.
- [10] L.W. Esposito, M. Ocallaghan, K.E. Simmons, C.W. Hord, R.A. West, A.L. Lane, R.B. Pomphrey, D.L. Coffeen, M. Sato, Voyager photopolarimeter stellar occultation of Saturn's rings, *J. Geophys. Res.* 88 (1983) 8643–8649.
- [11] R.E. Johnson, J.W. Boring, C.T. Reimann, L.A. Barton, J.W. Sieveka, J.W. Garrett, K.P. Farmer, W.L. Brown, L.J. Lanzerotti, Plasma ion-induced molecular ejection on the Galilean satellites: energies of the ejected molecules, *Geophys. Res. Lett.* 10 (1983) 892–895.
- [12] L.C. Luna, C. McGrath, M.B. Shah, R.E. Johnson, C.J. Latimer, E.C. Montenegro, Dissociative charge exchange and ionization of O<sub>2</sub> by fast H<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> ions: Energetic ion interactions in the Europa's oxygen atmosphere and neutral torus, *Astrophys. J.* (2005), sous-presse.
- [13] W.-H. Ip, Electrostatic charging of the rings of Saturn: A parameter study, *J. Geophys. Res.* 89 (1984) 3829–3836.
- [14] G.R. Wilson, J.H. Waite Jr., Kinetic modeling of the Saturn-ring ionosphere plasma environment, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 17287–17298.