



Le satellite Encelade source d'ions N^+ dans la magnétosphère de Saturne

Mehdi Bouhram^{a,*}, Jean-Jacques Berthelier^a, Jean-Marie Illiano^a, Howard T. Smith^b,
Edward C. Sittler^c, Frank J. Crary^d, Dave T. Young^d

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

^b Material Science and Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA

^c NASA Goddard Spaceflight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

^d Southwest Research Institute, San Antonio, TX 78238, USA

Reçu le 11 juillet 2005 ; accepté après révision le 16 décembre 2005

Présenté par Pierre Encrenaz

Résumé

Le premier passage de la sonde Cassini dans l'environnement de Saturne, au dessus de l'anneau E, a mis en évidence l'existence d'un plasma composé d'un mélange d'ions issus des produits de l'eau (H^+ , O^+ , OH^+ , H_2O^+) avec une faible composante en ions N^+ (3 %). A partir d'un modèle simple du transport des ions dans la magnétosphère, nous montrons que la source de ces ions N^+ coïncide avec le satellite Encelade. Un tel résultat peut s'expliquer par la présence de composés volatiles tels que l'ammoniac NH_3 sur ce satellite de glace, supposé encore actif géologiquement, ou par la présence d'ions N^+ d'origine externe préalablement implantés sur sa surface. **Pour citer cet article :** *M. Bouhram et al., C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The Enceladus satellite as a source of N^+ ions in Saturn's magnetosphere. The first pass of the Cassini probe in the vicinity of Saturn, above the E-ring, demonstrated a plasma consisting of water group ions (H^+ , O^+ , OH^+ , H_2O^+) with a small N^+ ion component (3%). Using a simple model for the transport of magnetospheric ions, we show that the N^+ ions can be traced back to the Enceladus satellite. Such a result can be explained by the existence in this icy satellite, supposed to be still geologically active, of volatile components such as ammonia NH_3 , or by the previous implantation of N^+ ions of external origin on its surface. **To cite this article:** *M. Bouhram et al., C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Planétologie ; Plasmas ; Saturne ; Anneaux et satellites de glace ; Magnétosphère

Keywords : Planetary science; Plasmas; Saturn; Rings and icy satellites; Magnetosphere

* Auteur correspondant.

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

1. Introduction

La magnétosphère de Saturne diffère de la plupart des environnements planétaires par le nombre et la complexité des sources internes de plasma. Outre le vent solaire et l'ionosphère de la planète elle-même, les satellites de glace, Mimas, Enceladus, Tethys, Dione et Rhea, les anneaux et Titan constituent en effet des sources abondantes voire majeures du plasma magnétosphérique et déterminent pour l'essentiel sa composition. A l'inverse, les ions magnétosphériques peuvent être utilisés comme traceurs et fournir des informations originales sur la composition et la nature des sources. Dans cette Note nous présentons les données fournies par l'expérience CAPS au cours de la mise en orbite de la sonde Cassini autour de Saturne qui montrent que le satellite Encelade est une source d'ions N^+ et que sa surface recèle donc des composés azotés.

2. Description de l'expérience et des données

Les instruments embarqués à bord des sondes Pioneer 11 et 12 ou sur les sondes Voyager 1 et 2 ne permettaient pas de déterminer la composition en masse des ions magnétosphériques et l'analyse de leurs données avait seulement suggéré l'existence de deux populations, l'une constituée d'ions légers, assimilés à des protons H^+ , l'autre constituée d'ions lourds, assimilés aux ions du groupe de l'eau, principalement O^+ [1–5]. Depuis l'insertion de la sonde Cassini sur son orbite autour de Saturne le 30 juin 2004, la situation a radicalement changé puisque nous disposons désormais des données fournies par les instruments du Cassini Plasma Package (CAPS) [6] et en particulier du spectromètre de masse IMS (Ion Mass Spectrometer) qui permet de déterminer la masse des ions détectés et, par conséquent, de remonter à la composition du plasma magnétosphérique. IMS est constitué de deux parties principales. La première est un analyseur électrostatique multi-directionnel qui permet de sélectionner l'énergie des ions analysés par l'instrument entre ~ 1 et ~ 40 keV avec une résolution de $\sim 8\%$ et permet aussi de connaître leur distribution angulaire sur un champ de vue instantané de $160^\circ \times 10^\circ$ divisé en 8 secteurs identiques de $20^\circ \times 10^\circ$. Les instruments de CAPS sont montés sur une plateforme dont l'orientation peut varier de $\pm 100^\circ$ autour d'un axe situé dans le plan moyen du champ de vue de IMS et perpendiculaire à la direction centrale de ce champ de vue. Ceci permet de mesurer la fonction de distribution à trois dimensions dans l'espace des vitesses sur pratiquement un demi-espace. A la sortie de l'analyseur électrostatique, les ions sont accélérés par un potentiel de -14.6 kV imposé sur des feuilles de carbone de très faible épaisseur et correspondant à chacun des secteurs du champ de vue. Ils ressortent de la feuille de carbone à l'état de neutres ou d'ions positifs ou négatifs, les proportions relatives dépendant de l'énergie et de la nature de l'ion incident. Ils entrent alors dans un analyseur de temps de vol où un champ électrique linéaire (LEF) permet de défléchir les fragments positifs vers le détecteur LEF, tandis que les fragments de neutres et d'ions négatifs suivent une trajectoire différente et sont collectés par le détecteur ST (Straight-Through). De la mesure de la durée de leur trajet, ou « temps de vol », dans cet espace de dérive on déduit leur vitesse et, connaissant leur énergie, leur masse. A la traversée de la feuille de carbone, les ions moléculaires sont dissociés en fragments atomiques qui sont mesurés indépendamment et permettent donc l'identification du constituant initial. Sans entrer dans les détails de l'instrument que l'on trouvera en [6], on peut simplement dire que, dans la gamme d'énergie qui nous intéressera dans cet article, la résolution en masse $M/\Delta M$ est de l'ordre de 8 pour le détecteur ST et qu'elle atteint ~ 30 pour les ions détectés par le détecteur LEF, lorsque les ions entrant dans IMS sont des ions atomiques, mais avec une efficacité de détection inférieure à celle du ST.

Les données que nous présentons ont été obtenues lors de la première orbite de Cassini, au cours du survol des anneaux à des distances planétocentriques comprises entre 3 et 8 rayons de Saturne (R_S). La Fig. 1 représente l'histogramme des temps de

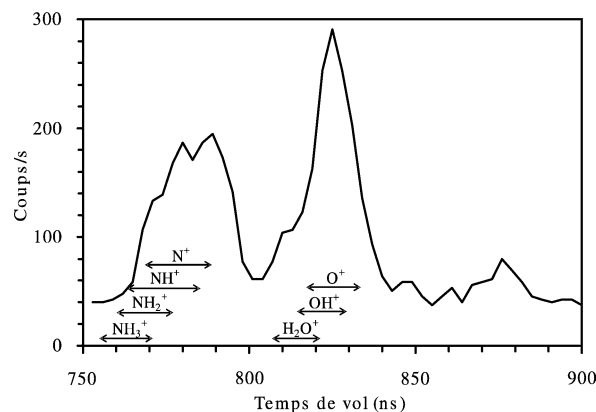


Fig. 1. Exemple de spectre en temps de vol obtenu le 30 Juin 2004 vers 20:30 TU.

Fig. 1. Example of time-of-flight spectrum recorded on 30 June 2004 around 20:30 UT.

vol des ions positifs qui sortent des feuilles de carbone et qui sont détectés par le détecteur LEF. Ces données ont été obtenues à une distance planétocentrique de $6,5R_S$ et pour des particules incidentes de 330 eV. On distingue très clairement deux pics : le plus élevé se situe vers 825 ns et correspond à la masse 16. Il s'agit d'ions O^+ présents dans le plasma ou qui résultent de la fragmentation dans la feuille de carbone d'autres ions du groupe de l'eau comme OH^+ , H_2O^+ . Le second, avec un maximum moins prononcé vers ~ 780 ns, est plus complexe et résulte de la superposition de particules différentes. Pour ce qui nous intéresse ici, la partie gauche du pic avec des temps de vol faibles, peut correspondre, comme indiqué sur la Fig. 1, à des ions N^+ magnétosphériques ou à des ions moléculaires tels que NH^+ , NH_2^+ ou NH_3^+ qui se fragmentent dans la feuille de carbone. Les taux de comptage étant faibles, il n'est pas possible de déterminer avec une précision suffisante les proportions possibles de ces différents ions. La forme du pic indique que le plus probable est N^+ , sans que l'on puisse exclure une proportion significative de NH^+ et NH_2^+ . Il faut en outre remarquer qu'en raison de la forte électronégativité de l'oxygène, la proportion d'ions positifs O^+ en sortie de la feuille de carbone est nettement plus faible ($\sim 2\%$) que celle des ions N^+ ($\sim 15\%$). Le spectre mesuré par le détecteur LEF est donc enrichi en ions N^+ par rapport aux ions O^+ et si l'on se ramène à l'entrée de l'instrument, donc dans le plasma magnétosphérique, les ions du groupe de l'azote (N^+ , NH^+ , ...) ne représentent que $\sim 3\%$ du nombre d'ions total et sont donc minoritaires. Dans cette région de la magnétosphère, on sait que le plasma est en corotation autour de la planète [7] et que l'énergie de corotation, $E_{co} = 0,5Mr^2$ où r est la distance planétocentrique en R_S , est égale à 295 eV pour les ions de masse $M = 14$ et 360 eV pour les ions de masse $M = 17$, masse moyenne des ions du groupe de l'eau. Les ions détectés à une énergie de 330 eV à l'entrée dans l'instrument sont donc des ions dont l'énergie dans le repère en corotation est inférieure à ~ 50 eV. On sait que le tore de Titan est une des sources potentiellement importantes d'ions N^+ . Cependant pour passer de l'orbite de Titan, dont le rayon est de $20R_S$, à une distance de $\sim 6,5R_S$, ces ions devraient avoir diffusé radialement sur une grande distance, diffusion qui s'accompagne d'une augmentation de plusieurs keV de leur énergie [7,8]. Cet argument montre donc que les ions N^+ détectés à $6,5R_S$ ne peuvent pas provenir du tore de Titan mais doivent avoir été créés sur des tubes de force voisins, ce qui suggère une source au niveau des anneaux et/ou des satellites de glace. Nous avons donc recherché, en modélisant le transport des ions, s'il était possible de déterminer plus précisément cette source.

3. Modélisation du transport des ions

L'idée de cette modélisation est de déterminer les trajectoires inverses des ions depuis la position de Cassini jusqu'au plan équatorial où ils sont créés principalement par radiolyse [9–11] à partir de la surface des grains de glace des anneaux ou de celle des satellites de glace. La Fig. 2 montre la position de Cassini par rapport au plan des anneaux ainsi que la position des satellites de glace après la manoeuvre d'insertion. Les distances planétocentriques des orbites des satellites de glace Mimas, Encelade, Tethys, Dione et Rhea sont respectivement 3,1, 3,9, 4,8, 6,2 et 8,7 R_S . Les mesures de composition dont un exemple a été montré sur la Fig. 1 ont été réalisées juste avant et juste après l'insertion de Cassini sur son orbite, entre 18h00 et 24h00 UT le 30 Juin 2004, puis de 05h00 à 12h00 UT le 1^{er} Juillet. Au cours de cette période l'orientation de la plateforme CAPS était fixe et la direction de la vitesse de corotation était dans le champ de vue de IMS, configuration qui permet de mesurer correctement les ions du plasma magnétosphérique.

En l'absence de collisions et en négligeant les interactions avec les ondes, ce qui est légitime dans notre cas en raison de la faible intensité de celles-ci, on peut considérer que le mouvement des ions est adiabatique le long des lignes de champ magnétique. Pour un ion de charge q et de masse m , l'évolution de la position de son centre guide $\mathbf{r}(t)$ est régit par l'équation suivante [12] :

$$m\ddot{\mathbf{r}} = q[\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{B}(\mathbf{r})] + m\mathbf{g}(\mathbf{r}) - \mu \nabla B(\mathbf{r}) \quad (1)$$

où \mathbf{g} , \mathbf{E} and \mathbf{B} représentent respectivement le champ de gravité et les champs électrique et magnétique, $\mu = mv_{\perp}^2/(2B)$ le moment magnétique dans le repère du centre guide, v_{\perp} désignant la composante de la vitesse perpendiculaire au champ magnétique due au mouvement de giration des ions autour de \mathbf{B} . 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 :

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

où $B_0 = 0,22 \times 10^{-4}$ T est l'intensité du champ à l'équateur 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 :

$$\mathbf{E} = E_0(R_S/r)^2(\sin^2 \theta \mathbf{u}_r - 2 \cos \theta \sin \theta \mathbf{u}_{\theta}) \quad (3)$$

où $E_0 = \omega_S R_S B_0 = 220$ mV m⁻¹ est l'intensité du champ à l'équateur à $r = R_S$.

En utilisant les données d'attitude de Cassini et les modèles des champs magnétique et électrique indiqués ci-dessus, la distribution en angle et en énergie des ions mesurée par IMS fournit la distribution des vitesses ($v_{\parallel 0}$, $v_{\perp 0}$) dans le repère local

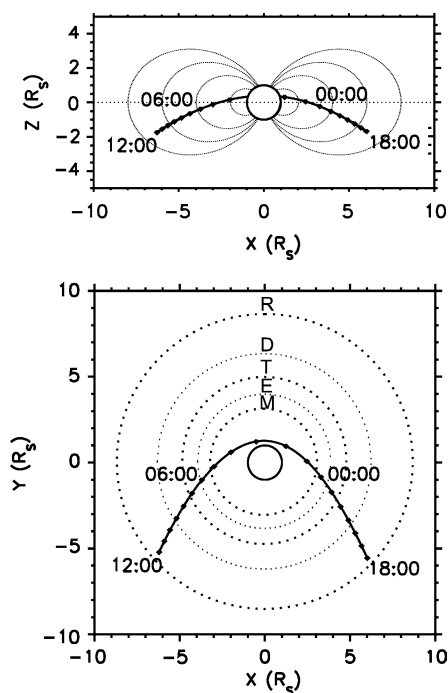


Fig. 2. Trajectoire de Cassini du 30 juin 2004 à 18h00 au 1 juillet 2004 à 12h00 TU projetée dans les plans $X-Z$ (haut) et $X-Y$ (bas). L'axe Z est parallèle au pôle nord de Saturne et l'axe Y perpendiculaire à l'axe Saturne–Soleil qui est inclinée d'environ 23° par rapport au plan $X-Y$. Dans le plan $X-Y$, les cercles en pointillés indiquent les orbites des principaux satellites de glace : Mimas (M), Encelade (E), Téthys (T), Dione (D) et Rhéa (R).

Fig. 2. Projections of the Cassini's trajectory from 30 June 2004 at 18:00 until 1 July 2004 at 12 :00 UT in the $X-Z$ (top) and $X-Y$ plane (bottom). The Z -axis is parallel to Saturn's northern pole and the Y -axis perpendicular to the Saturn–Sun line which is inclined by about 23° from the $X-Y$ plane. In the $X-Y$ plane, the dotted circles correspond to the orbits of the main inner icy satellites: Mimas (M), Enceladus (E), Tethys (T), Dione (D) and Rhea (R).

du plasma en corotation. A partir de cette distribution, on génère par une méthode de Monte Carlo un ensemble de vitesses initiales pour des particules test dont on remonte les trajectoires à partir des positions successives \mathbf{r}_0 de Cassini. Les calculs sont arrêtés lorsque les ions atteignent le plan équatorial des anneaux. Les temps de parcours sont de l'ordre de 20 minutes à 2 heures. On obtient ainsi la distribution statistique des positions des ions au voisinage des sources possibles dans le plan équatorial.

4. Résultats et discussion

La Fig. 3 montre les résultats de cette modélisation avec la densité des positions dans le plan des anneaux codés suivant l'échelle de gris indiquée sur la droite. Pour donner une idée de la variation au cours du temps de la distribution des positions et du nombre d'ions, nous avons représenté des intervalles de temps successifs de 3 heures à partir de 15h00 TU le 30 Juin 2004 afin de tenir compte des temps de trajets des ions entre le plan des anneaux et Cassini. La position des satellites est indiquée au cours de ces mêmes intervalles de temps ainsi que la position dans le plan équatorial de la ligne de force passant par Cassini.

Les Figs. 3(a)–(c) montrent que les intensités les plus fortes des sources d'ions N^+ dans le plan des anneaux sont observées au cours des 3 premiers intervalles de temps lorsque Cassini se situe dans des tubes de force magnétiques proches de ceux du satellite Encelade. Au contraire, le 1er juillet, lorsque les tubes de force correspondant à la position de Cassini sont éloignés de ceux d'Encelade, l'intensité des sources est faible et est réduite de pratiquement 2 ordres de grandeur alors que le flux des ions du groupe de l'eau reste pratiquement constant pendant la même période [7]. On remarque aussi que la densité des sources est plus importante dans le sillage de ce satellite qu'en amont, ce qui pourrait s'interpréter comme une conséquence de la création d'un tore de gaz neutre engendré par Encelade qui disparaît progressivement lorsque le satellite s'éloigne. Un travail identique pour les ions NH^+ ou NH_2^+ donne sensiblement les mêmes résultats sur la position des sources puisque les trajectoires sont très voisines en raison de la faible différence des masses. On peut donc conclure que s'il est bien établi que les ions du groupe

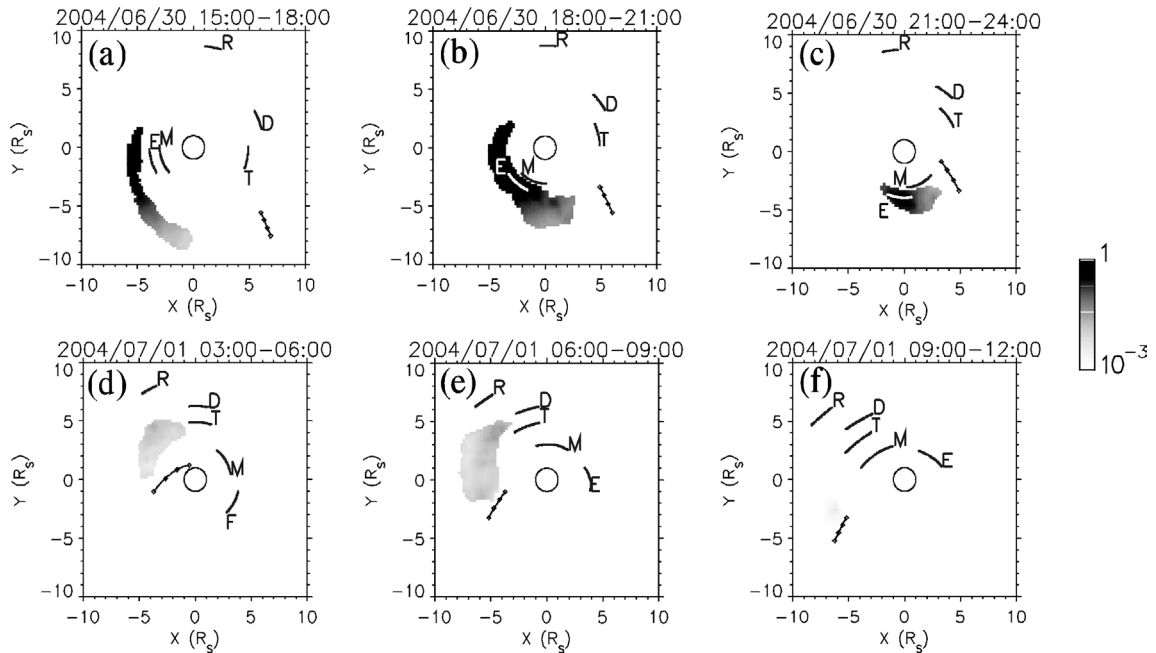


Fig. 3. Cartes dans le plan des anneaux montrant la position de la source des ions N^+ sur des intervalles de 3 heures, obtenus à partir du modèle de transport. Les niveaux de gris correspondent aux flux d'ions observés suivant une échelle logarithmique et sont normalisés par rapport à la valeur maximum mesurée.

Fig. 3. Maps in the ring plane showing the source location of N^+ ions over 3-hours intervals, as calculated from the transport model. The grey level scales correspond to the observed ion fluxes using a logarithmic scale and are normalized to the maximum measured value.

de l'eau sont produits par les anneaux et les satellites de glace [8], le satellite Encelade apparaît en revanche comme la source d'ions N^+ dans la magnétosphère interne de Saturne. Il convient de remarquer que la zone source déterminée par notre calcul est étendue. Ceci peut s'expliquer par la simplicité de notre modèle, une certaine imprécision sur les paramètres de vitesse des ions mesurés par IMS en l'état actuel du traitement des données ou par une raison physique réelle : une partie des ions ou des neutres azotés émis par Encelade peut être capturée par les grains des anneaux et réémis par la suite, induisant ainsi une diffusion de la source.

Nos observations posent la question de la nature des constituants azotés inclus dans la glace à la surface d'Encelade et de la chaîne de mécanismes qui conduisent à la création d'ions N^+ transportés jusqu'à l'orbite de Cassini. Deux hypothèses peuvent ici être avancées. Tout d'abord, pour expliquer certains aspects morphologiques de la surface d'Encelade [13], certains auteurs [10] ont suggéré que l'ammoniac NH_3 ou ses hydrates étaient un des constituants volatils à la surface des satellites de glace. Des observations récentes réalisées en infrarouge proche avec le télescope IRTF d'Hawaï [14] semblent témoigner de la présence de glace d'ammoniac sur Encelade bien que les signaux soient à la limite de la sensibilité du télescope. Nos observations et l'utilisation des ions N^+ comme traceurs apportent une première confirmation indirecte de la présence de composés azotés sur Encelade. Par radiolyse et ionisation, l'ammoniac NH_3 peut être à l'origine d'ions N^+ , NH^+ , NH_2^+ et NH_3^+ [11,15]. Par ailleurs, Le satellite Titan peut être de manière indirecte la source des ions N^+ observés. En effet, les atomes et molécules d'azote éjectés de l'atmosphère du satellite engendrent un tore de gaz neutre autour de son orbite [16]. C'est pourquoi, on ne peut exclure que les atomes ou molécules ayant des orbites suffisamment excentriques pour se déplacer d'une distance géocentrique de $20R_S$ à quelques R_S se retrouvent implantés sur les surfaces des grains et satellites de glace au niveau de l'anneau E. Grâce au travail en cours sur les mesures réalisées par Cassini sur les orbites qui ont suivi l'insertion, il devrait être possible d'améliorer la précision dans l'identification des sources potentielles de N^+ ainsi que la compréhension des mécanismes de production.

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] L.A. Franck, B.G. Bureck, K.L. Ackerson, J.H. Wolfe, J.D. Mihalov, Plasma in Saturn's magnetosphere, *J. Geophys. Res.* 85 (1980) 5695–5708.
- [2] H.S. Bridge, J.W. Bercher, S. Olbert, J.D. Sullivan, F. Bagenal, R.E. Hartle, K.W. Ogilvie, J.D. Scudder, E.C. Sittler, A. Eviatar, G.L. Siscoe, C.K. Goertz, V.M. Vasyliunas, Plasma observations near Saturn : Initial results from Voyager 1, *Science* 212 (1981) 217–224.
- [3] H.S. Bridge, F. Bagenal, J.W. Bercher, A.J. Lazarus, R.L. McNutt, J.D. Sullivan, P.R. Gazis, R.E. Hartle, K.W. Ogilvie, J.D. Scudder, E.C. Sittler, A. Eviatar, G.L. Siscoe, C.K. Goertz, V.M. Vasyliunas, Plasma observations near Saturn: Initial results from Voyager 2, *Science* 215 (1982) 563–570.
- [4] J.D. Richardson, Thermal plasma and neutral gas in Saturn's magnetosphere, *Rev. Geophys.* 34 (1998) 501–524.
- [5] M. Blanc, S. Bolton, J. Bradley, M. Burton, T.E. Cravens, I. Dandouras, M.K. Dougherty, M.C. Festou, J. Feynman, R.E. Johnson, T.G. Gombosi, W.S. Kurth, P.C. Liewer, B.H. Mauk, S. Maurice, D. Mitchell, F.M. Neubauer, J.D. Richardson, D.E. Shemansky, E.C. Sittler, B.T. Tsurutani, P. Zarka, L.W. Esposito, E. Grün, D.A. Gurnett, A.J. Kliore, S.M. Krimigis, D. Southwood, J.H. Waite, D.T. Young, Magnetospheric and plasma science with Cassini–Huygens, *Space Sci. Rev.* 104 (2002) 243–346.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] H.T. Smith, M. Shapiro, E.C. Sittler, D. Reisenfeld, R.E. Johnson, R.A. Baragiola, F.J. Crary, D.J. McComas, D.T. Young, Discovery of Nitrogen in Saturn's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.* 32 (2005) L14S03, doi:10.1029/2005GL022654.
- [9] R.E. Johnson, E.C. Sittler, Sputter-produced plasma as a measure of satellite surface composition: Cassini mission, *Geophys. Res. Lett.* 17 (1990) 1629–1632.
- [10] D.J. Stevenson, Volcanism and igneous processes in small icy satellites, *Nature* 298 (1982) 142–144.
- [11] M.L. Delitsky, A.L. Lane, Saturn's inner satellites: ice chemistry and magnetospheric effects, *J. Geophys. Res.* 107 (2002) 5093 doi:10.1029/2002JE001855.
- [12] T.G. Northrop, *The Adiabatic Motion of Charged Particles*, Wiley Interscience, New York, 1963.
- [13] J.S. Kargel, S. Pozio, The volcanic and tectonic history of Enceladus, *Icarus* 119 (1996) 385–404.
- [14] J.P. Emery, D.M. Burr, D.P. Cruikshank, R.H. Brown, J.B. Dalton, Near-infrared (0.8–4.0 μm) spectroscopy of Mimas, Enceladus, Thetys, and Rhea, *Astronomy and Astrophysics* 435 (2005) 353–362.
- [15] L.J. Lanzerotti, W.L. Brown, K.J. Marcantonio, R.E. Johnson, Production of amonnia-depleted surface layers on the Saturnian satellites by ion sputtering, *Nature* 312 (1984) 139–140.
- [16] H.T. Smith, R.E. Johnson, V.I. Shematovich, Titan's atomic and molecular nitrogen tori, *Geophys. Res. Lett.* 31 (2004) L16804 doi:10.1029/2004GL020580.