

電波スペクトルから得られる土星のオーロラ加速域 の短時間発展の特徴

Characteristics of the transient evolution of the auroral acceleration region
at Saturn derived from radio spectra

丸野 大地¹, 笠羽 康正¹, 木村 智樹², 森岡 昭¹, B. Cecconi³

¹ 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻

² 宇宙航空研究開発機構

³ パリ天文台

1. 序論

2004年7月の土星到着以来、Cassini 探査機は土星磁気圏の新たな描像を数多く明らかにしてきた。現在、特に注目されている現象の一つがその「日周期変動」である。土星は、自転軸と磁軸の傾きが 1° 以下（地球：約 11° ，木星：約 10° ）しかないにもかかわらず、SKRの強度が日変動することがVoyager1,2 探査機の土星フライバイ観測によって発見された（変動周期は10時間39分24±7秒）[Desch and Kaiser, 1981]。その後、UlyssesおよびCassiniによって、このSKR日変動の周期変化が観測され、2003-4年にCassiniが観測した周期は1980-1年のVoyager観測時よりも約1%（6分）ほど長くなっていた[Lecacheux et al., 1997; Glopeau and Lecacheux, 2000; Gurnett et al., 2005]。また、CassiniによってSKR日変動周期の南北非対称性、すなわち2006年時点で北半球（冬）起源のSKRが10.6時間、南半球（夏）起源のSKRが10.8時間の周期で変動していることが報告され[Kurth et al., 2008, Gurnett et al., 2009]、新たな問題を投げかけている。なお、南北半球の変動周期は2009年8月に分点を過ぎたあと逆転し、北半球側（夏）のほうが長周期となった[Gurnett et al., 2010]。

同種の変動周期は、プラズマ・磁場・UV/IR オーロラにも存在する[e.g., Mitchell et al., 2009; Espinosa and Dougherty, 2000; Nichols et al., 2010]。Mitchell et al. [2009] は、高エネルギー中性原子（energetic neutral atoms, ENA）撮像観測によって、リングカレントを形成する陽子と酸素イオンの真夜中～朝側での周期的加速を示した。この周期変動はSKRとUVオーロラの強度増大と同期していた。彼らは、この変動の説明として、尾部からの高エネルギープラズマの流入による経度非対称で共回転するリングカレントの形成、およびこれによるSKR・UV/IRオーロラを引き起こす沿磁力線電流系の周期性の形成というシナリオを示唆した。沿磁力線磁場の変動観測においても、SKRと同様の周期変動およびその南北非対称性が報告されている[Southwood, 2011]。

これらを総合的に解釈しうるモデルとして、南北半球で異なる速さで共回転する高緯度の沿磁力線電流系のアイデアが *Andrews et al.* [2010]によって提案されている。

SKR はまた、土星のサブストーム・ライク現象と関係したより短時間の変動を示す [cf. *Jackman et al.*, 2009]. サブストーム・ライク現象は地球サブストームと類似の現象で、磁気圏尾部におけるプラズモイド状磁場構造で特徴づけられる。地球サブストームが太陽風駆動なのに対して、土星はそれに加え太陽風と磁気圏内部衛星起源のプラズマによるマス・ローディングの影響も受けると考えられる [Cowley et al., 2004]. *Jackman et al.* [2009] はこのイベント時に SKR 強度増大および低周波域への拡大 (lower-frequency extension, LFE) を示した。同様の現象は、地球でもサブストーム時のオーロラキロメータ波 (auroral kilometric radiation, AKR) で見られる。双方の電波とも沿磁力線加速された電子がサイクロトロン・メーザー不安定により電子サイクロトロン周波数付近で放射されるもので、その周波数低下は電波源の磁場強度の低下すなわち発生領域高度の上方拡大と解釈できる。つまり、サブストーム・ライク現象に伴い、SKR のソースが存在するオーロラ加速域は上方に拡大する。地球では、サブストーム開始時に AKR の高周波域 (~300–500 kHz) の強度がまず増大し、さらに低周波域 (~30-150 kHz) が新たに出現する [Morioka et al., 2007]. これはオーロラ加速域がまず低高度で増大し、それが高高度域へ拡大すると解釈できるが (二段階発展: two-step evolution), 前者がオーロラのイニシャル・ブライティングに、後者がオーロラのブレイクアップに対応する。この加速域の発達は、増大した沿磁力線電流が電流駆動型不安定の閾値を超えたとき引き起こされうる、と提唱されている *Morioka et al.* [2010].

土星の SKR も、同様にオーロラ加速域の高度分布情報を我々に提示している。我々はこれを用いて、土星で知られ始めた SKR の強度・周波数変動、すなわち「年変動 (~30年)」、「日変動 (~11時間)」、「サブストーム・ライク現象 (~数時間)」を、オーロラ加速域の強度・高度の変動およびその成因への解明へとつなげていく。本論文は、Cassini/RPWS で観測された高時間分解能の SKR スペクトルデータを用いた、土星オーロラ加速域の強度・高度にみられる「日変動」について、その暫定的な解析結果を報告する。日変動の時間軸としては、「SKR 位相」 $\Phi_{s,N}(t)$ を用いた。これは SKR 強度変動を基準として南北別に 0–360° で定義されたもので、SKR の強度が最大となるとき 0° となる [Lamy, 2011].

2. データ

本論文では、2004年から2010年の間に Cassini に搭載された Radio and Plasma Wave Science (RPWS) [Gurnett et al., 2004] の High Frequency Receiver (HFR) による 2004-2010 年の観測データを用いた。本データは NASA Planetary Data System (PDS, <http://pds.nasa.gov/>) で公開されているものである (時間分解能: ~15 s, 周波数分解能: $\Delta f/f \sim 5\%$ (~3.5 kHz–320 kHz), $\Delta f = 12.5$ kHz (318.75 kHz–1806.25 kHz)). RPWS には 3 本のモノポールアンテナがあるが、我々はその中の 2 本をダ

イポールアンテナとした電場データを用いた。この解析では、SKR 周波数帯 $\sim 3 \text{ kHz} - 1.2 \text{ MHz}$ (強度ピーク: $100 - 400 \text{ kHz}$) [Kaiser et al., 1984] を含む $3.5 \text{ kHz} \sim 1.5 \text{ MHz}$ のデータを用いている。Cassini の軌道情報は Cassini SLS4 longitude tool (アイオワ大学: <http://www-pw.physics.uiowa.edu/SLS4/>) から、SKR 位相データは Cassini / RPWS / HFR-Kronos (パリ天文台: <http://www.lesia.obspm.fr/kronos/>) を利用した。いずれも、時間分解能は3分である。

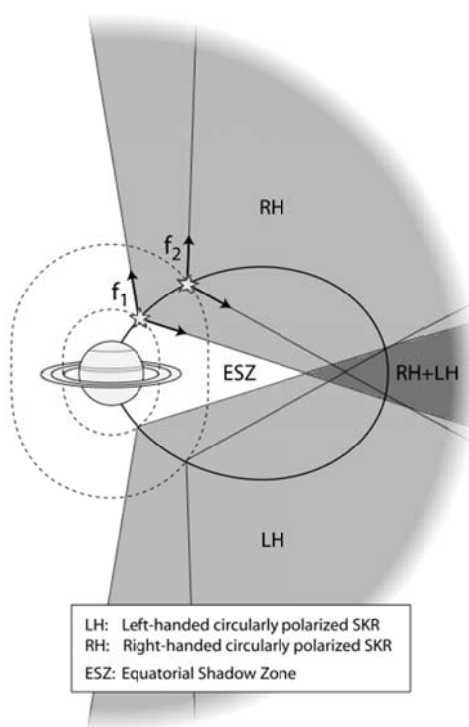


図 1 SKR の非等方的なビームが作り出す赤道の影領域の概念図。 [Lamy et al., 2008].

SKR は背景磁力線に対して周波数に依存した角度 ($\leq 90^\circ$) を持つホロー・コーン状に放射される (図 1) ため、その見え方は観測者位置に依存する [Lamy et al., 2008a,b]. これによる SKR スペクトルへの影響を避けるため、Cassini の土星中心からの距離 R_{SC} 、緯度 λ_{SC} 、が以下の条件を満たすデータのみを用いた。

- (1) $R_{SC} = 10 \sim 100 R_s$, SKR には赤道域に伝搬しない「影領域 (equatorial shadow zone)」が存在するため [Lamy et al., 2008a].
- (2) $\lambda_{SC} = -5^\circ \sim +5^\circ$, 南北両極からの SKR の平均的特性をまず確認するため。

なお、次段階の解析として、南北電波源の分離、およびローカルタイムの分離を行ないつつある。SKR は背景磁力線に対して R-X モードで放射されるため、北半球極域からは右旋 (right-hand, RH) 成分が、南半球の極域からは左旋 (left-hand, LH) 成分が放射される [e.g. Zarka,

2004]. 偏波観測データを用いることで、南北の電波を分離することが可能となる。また、RPWS/HFR は方向探知情報の取得が可能である。朝側のローカルタイムでより強度増大する SKR [Lamy *et al.*, 2008a]を他のローカルタイムと分離して議論することは潜在的に必須である。いずれも非公開データだが、既にパリ天文台との共同によりこの2点を追加した解析に着手しており、その結果も次機会に併せて報告する。

3. 解析結果

本論文では、2章の条件を満たす2004年から2010年の観測データを平均し、SKR スペクトルのSKR位相に対する依存性を評価した。次いで、これを年ごとに平均し、SKR位相に対する相関の季節変動を評価可能とした。平均化においては、周波数方向に34段階に分割し、SKR位相方向には 10° 毎に分割した。各ビンにおけるSKR強度の平均においては、 $1/R^2$ で減衰するとして1AUに規格化するとともに、常用対数を取ってから平均化を行なっている。なお、本解析では南北のSKRを分離していないが、2004-2010年の大部分で南半球(夏)のSKR強度が卓越していた [Kimura *et al.*, in preparation] ことから、この暫定解析ではSKR位相として南半球のもので代表させた。このため、北半球由来のSKRはコンタミネーションとして効いている可能性があることに留意が必要である。

SKRは電波源での電子サイクロトロン周波数付近で放射される。このため本解析の周波数軸はSKR電波源(オーロラ加速域と見なす)の高度に換算できる。ダイポール磁場を仮定すれば、SKRの周波数 f と電波源の惑星中心からの距離 R の関係は式(1)で表される。

$$\frac{R}{R_S} = \left(\frac{eB_{eq}\sqrt{1+3\sin^2\lambda}}{2\pi m_e f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 R_S (= 60,268 km) は土星の惑星半径。 e は素電荷、 B_{eq} は土星赤道表面での磁場強度 (= 21,000 nT)、 λ は磁気緯度 (70° を仮定)、 m_e は電子の質量である。SKRソース高度は式(1)で求めた R/R_S から1を引き算出している。高高度では狭帯域の低周波数成分 n-SKR (narrowband-Saturn kilometric radiation, 10–40 kHz) と n-SMR (narrowband-Saturn myriametric radiation, 10kHz 以下) [Gurnett *et al.*, 1981; Louarn *et al.*, 2007] が混入するため、次章で示すのは高度 $3.5R_S$ (~12 kHz 以上) に限る。

4. 結果

図2に、(a) 2004年から(g) 2010年までのSKR位相・SKRソース高度に対するSKR強度分布を示す。定性的だが、SKRが強い領域を「オーロラ加速域」と見なすことができる。

図2のSKR強度のSKR位相・高度に対する依存性から、オーロラ加速域の幅・強度に土星の自転に近い周期での変動を見いだすことができる。すなわち、オーロラ加速域の上端は、SKR位相およびそれに伴うSKR強度とともに変動している。いずれの年でも、SKR位相が $\sim 0^\circ$ のときにSKR強度およびオーロラ加速域上端高度が最大となり、SKR位相が $\sim 180^\circ$ のときにSKR強度およびオーロラ加速域上端高度が最低となる。一方、下端高度には明瞭な相関が見られない。SKR強度とオーロラ加速域上端の相関の定量的評価は今後の解析で行っていく。

図2に見られる年変化は、オーロラ加速域の季節変動の影響も含んでいる。例えば、SKRの強度およびオーロラ加速域の上端高度は2004年から2010年にかけて減少が見られる。一方、オーロラ加速域の下端高度はおおよそ一定である。これらは一定のSKR位相のみに限って季節変動を解析したKimura *et al.* [in preparation]の結果と一致しており、この変動が特定のSKR位相に留まらないことが伺える。

Mitchell *et al.* [2009]は、ENAで見える朝側リングカレントの増大がSKR・オーロラの増大と同タイミングで起こることを示した。この事実と得られた結果から、「回転する沿磁力線電流系 [Mitchell *et al.*, 2009]」の増大箇所において、SKRの強度増大とオーロラ加速域の高高度拡大が同居することが示唆される。一方、オーロラ加速域下端高度に明確な依存性が見えないことは、地球オーロラ加速域の下端高度に日・季節依存性が見られることと対照的である。地球の場合、オーロラ加速域下端高度は電離圏のスケールハイトに関係し、夏には電離圏のスケールハイトの拡大に伴い加速域の下端高度も高くなり、冬にはスケールハイトの縮小に伴い下端高度は低くなることを示唆されている [Morioka *et al.* 2012]。土星のオーロラ加速域下端高度の安定は、電離圏のスケールハイトの日・季節変動が地球に比して小さいか、電離圏が加速域に与える影響が少ないことを示しうるものであり、モデル計算を含めた今後の検討を行う必要がある。

なお、Cassiniは年ごとに軌道が相当変化している。SKRは周波数によって伝搬経路が異なる [Lamy *et al.*, 2008b] ため、SKRの上限周波数・加減周波数は衛星値の影響を含みうることに留意が必要である。例えば、(b) 2005年と比較して (c) 2006年はSKR強度が極端に減少しているが、前者の軌道は朝側のローカルタイム (SKR強度が増大する領域) に偏っている一方、後者の軌道は真夜中側に偏っている。(d) 2007年、(e) 2008年も朝側には偏っておらず、2005年以前との強度差がこれにより出ている可能性を排除しきれない。また、(f) 2009年と (g) 2010年において加速域上端高度の変動幅が小さくなっているが、両者とも夜側にCassiniの軌道が偏っているため、データ選択の際にローカルタイムの偏りが起きている可能性がある。SKRのソースは朝側に集中的に存在 [Lamy *et al.*, 2008a] しており、この不定性を排除するにはローカルタイムを分割した解析を進めていく必要があるだろう。

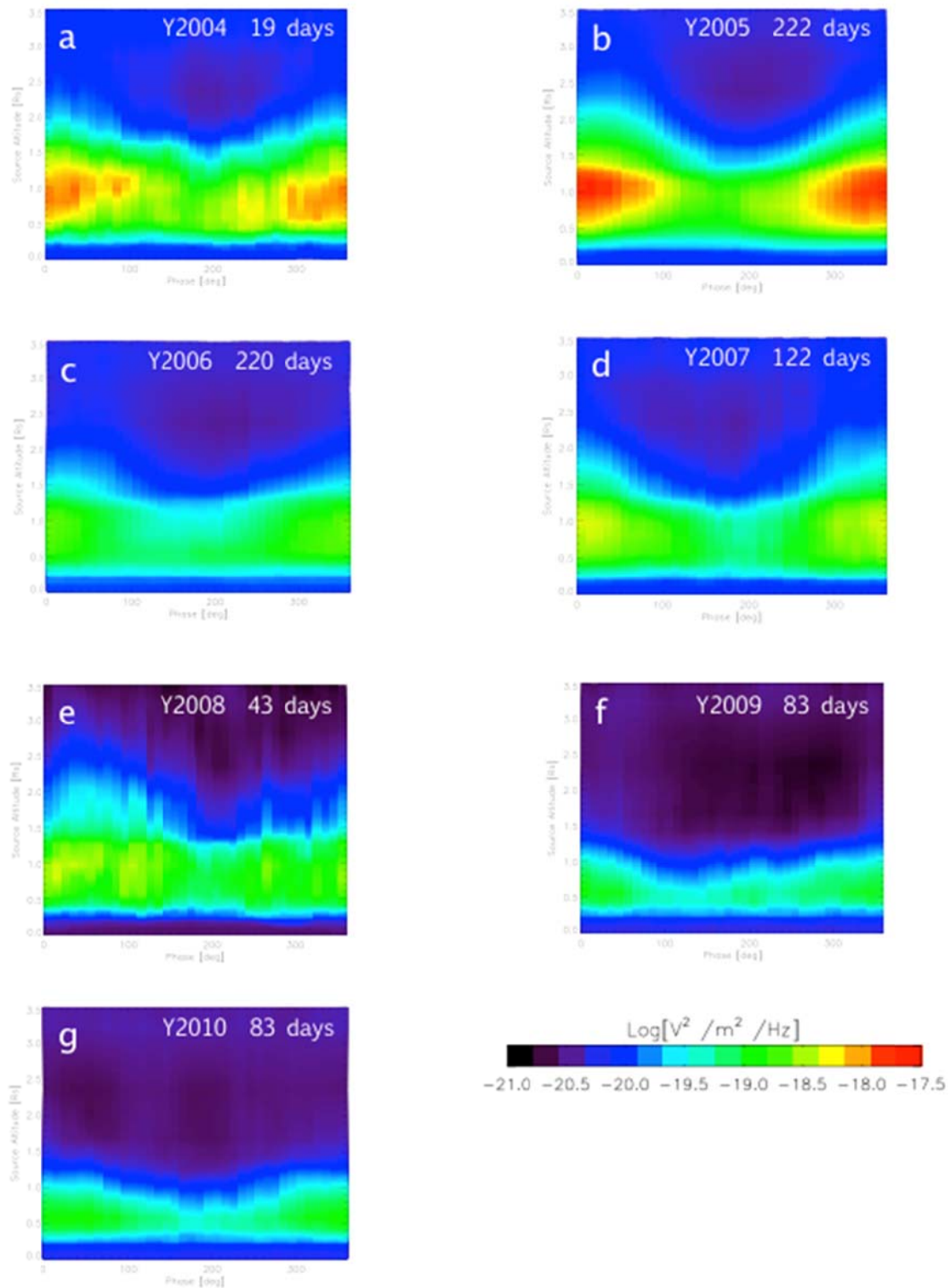


図 2 SKR 位相 (X 軸 : 0 - 360°) ・ SKR ソース (Y 軸 : 0.0 - 3.5 R_S) に対する SKR 強度.
 (a) (g) は, 2004 年-2010 年の結果を示す. 各図の右上の数値は, 平均化に用いたデータ日数 (単位 : 地球日) である. その日の全データが使われていない日も 1 日としてカウントしてあるため, あくまでデータ数の目安として示している.

6. まとめ

本論文で、我々は土星オーロラ加速域から放射される SKR 電波強度の SKR 位相依存性・電波源高度依存性を調べた。暫定結果として、SKR 電波下端周波数が示唆するオーロラ加速域上端高度は SKR 位相・SKR 強度に依存する (SKR 位相 $\sim 0^\circ$ で最大) が、下端高度には同様の依存性が見られないことを示した。

次段階の解析として、南北電波源の分離、およびローカルタイムの分離を行ないつつある。背景磁力線に対して R-X モードで放射されるため、北半球極域からは右旋 (RH) 成分が、南半球の極域からは左旋 (LH) 成分が放射される [e.g. Zarka, 2004]. 偏波観測データを用いることで、南北の電波を分離することが可能となる。また、RPWS/HFR は電波の方向探知情報の取得が可能である。朝側のローカルタイムと分離して議論することは潜在的に必須である。いずれも非公開データだが、既にパリ天文台との共同によりこの 2 点を追加した解析に着手しており、その結果も次機会には併せて報告する。

参考文献

- [1] Andrews, D. J., A. J. Coates, S. W. H. Cowley, M. K. Dougherty, L. Lamy, G. Provan, and P. Zarka (2010), Magnetospheric period oscillations at Saturn: Comparison of equatorial and high - latitude magnetic field periods with north and south Saturn kilometric radiation periods, *J. Geophys. Res.*, 115, A12252, doi:10.1029/2010JA015666.
- [2] Cowley, S. W. H., E. J. Bunce, and J. M. O'Rourke (2004), A simple quantitative model of plasma flows and currents in Saturn's polar ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 109, A05212, doi:10.1029/2003JA010375.
- [3] Desch, M. D., and M. L. Kaiser (1981), Voyager measurement of the rotation period of Saturn's magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 253-256.
- [4] Espinosa, S. A. and M. K. Dougherty (2000), Periodic perturbations in Saturn's magnetic field, *Geophys. Res. Lett.*, 27(17), 2785–2788, doi:10.1029/2000GL000048. Galopeau, P. H. M., and A. Lecacheux (2000), Variations of Saturn's radio rotation period measured at kilometer wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 105(A6), 13,089–13,101, doi:10.1029/1999JA005089.
- [5] Gurnett, D. A., W. S. Kurth, and F. L. Scarf (1981), Narrowband electromagnetic radiation from Saturn's magnetosphere, *Nature*, 292, 733 – 737, doi:10.1038/292733a0.
- [6] Gurnett, D. A., et al. (2004), The Cassini radio and plasma wave investigation, *Space Sci. Rev.*, 114, 395–463, doi:10.1007/s11214-004-1434-0.

- [7] Gurnett, D. A., et al. (2005), Radio and plasma wave observations at Saturn from Cassini's approach and first orbit, *Science*, 307, 1255-1259.
- [8] Gurnett, D. A., A. M. Persoon, J. B. Groene, A. J. Kopf, G. B. Hospodarsky, and W. S. Kurth (2009), A north-south difference in the rotation rate of auroral hiss at Saturn: Comparison to Saturn's kilometric radio emission, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21108, doi:10.1029/2009GL040774.
- [9] Gurnett, D. A., J. B. Groene, A. M. Persoon, J. D. Menietti, S.-Y. Ye, W. S. Kurth, R. J. MacDowall, and A. Lecacheux (2010), The reversal of the rotational modulation rates of the north and south components of Saturn kilometric radiation near equinox, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24101, doi:10.1029/2010GL045796.
- [10] Jackman, C. M., C. T. Russell, D. J. Southwood, C. S. Arridge, N. Achilleos, and M. K. Dougherty (2007), Strong rapid dipolarizations in Saturn's magnetotail: In situ evidence of reconnection, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11203, doi:10.1029/2007GL029764.
- [11] Jackman, C. M., L. Lamy, M. P. Freeman, P. Zarka, B. Cecconi, W. S. Kurth, S. W. H. Cowley, and M. K. Dougherty (2009), On the character and distribution of lower-frequency radio emissions at Saturn and their relationship to substorm-like events, *J. Geophys. Res.*, 114, A08211, doi:10.1029/2008JA013997.
- [12] Kaiser, M. L., M. D. Desch, W. S. Kurth, A. Lecacheux, F. Genova, B. M. Pedersen, and D. R. Evans (1984), Saturn as a radio source, in *Saturn*, edited by T. Gehrels and M. S. Matthews, 378 pp., Univ. of Ariz. Press, Tucson.
- [13] Kimura, T., et al., Seasonal variations of Saturn's auroral acceleration region deduced from spectra of auroral radio emissions, in preparation.
- [14] Kurth, W. S., T. F. Averkamp, D. A. Gurnett, J. B. Groene, and A. Lecacheux (2008), An update to a Saturnian longitude system based on kilometric radio emissions, *J. Geophys. Res.*, 113, A05222, doi:10.1029/2007JA012861.
- [15] Lamy, L., P. Zarka, B. Cecconi, R. Prang, W. S. Kurth, and D. A. Gurnett (2008a), Saturn kilometric radiation: Average and statistical properties, *J. Geophys. Res.*, 113, A07201, doi:10.1029/2007JA012900.
- [16] Lamy, L., P. Zarka, B. Cecconi, S. Hess, and R. Prangé (2008b), Modeling of Saturn kilometric radiation arcs and equatorial shadow zone, *J. Geophys. Res.*, 113, A10213, doi:10.1029/2008JA013464.
- [17] Lamy, L. (2011), Variability of southern and northern SKR periodicities, in *Proceedings of the Seventh International Workshop on Planetary, Solar, and Heliospheric Radio Emissions*, edited by H. O. Rucker et al., Austrian Acad. Sci. Press, Vienna, in press.
- [18] Lecacheux, A., P. Galopeau, and M. Aubier (1997), "Re-visiting Saturnian kilometric radiation with Ulysses/URAP" in *Planetary Radio Emissions*, edited by H. O. Rucker, S. J. Bauer, and A. Lecacheux, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna, pp. 313–325.
- [19] Louarn, P., et al. (2007), Observation of similar radio signatures at Saturn and Jupiter, implications for the magnetospheric dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20113, doi:10.1029/2007GL030368.

- [20] Mitchell, D. G., et al. (2009), Recurrent energization of plasma in the midnight-to-dawn quadrant of Saturn's magnetosphere, and its relationship to auroral UV and radio emissions, *Planet. Space. Sci.*, 57, 1732–1742, doi:10.1016/j.pss.2009.04.002.
- [21] Morioka, A., Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa, T. Sakanoi, K. Yumoto, R. R. Anderson, J. D. Menietti, and E. F. Donovan (2007), Dual structure of auroral acceleration regions at substorm onsets as derived from auroral kilometric radiation spectra, *J. Geophys. Res.*, 112, A06245, doi:10.1029/2006JA012186.
- [22] Morioka, A., et al. (2010), Two-step evolution of auroral acceleration at substorm onset, *J. Geophys. Res.*, 115, A11213, doi:10.1029/2010JA015361.
- [23] Morioka, A., Y. Miyoshi, N. Kitamura, H. Misawa, F. Tsuchiya, J. D. Menietti, and F. Honary (2012), Fundamental characteristics of field-aligned auroral acceleration derived from AKR spectra, *J. Geophys. Res.*, 117, A02213, doi:10.1029/2011JA017137.
- [24] Nichols, J. D., B. Cecconi, J. T. Clarke, S. W. H. Cowley, J. - C. Gérard, A. Grocott, D. Grodent, L. Lamy, and P. Zarka (2010), Variation of Saturn's UV aurora with SKR phase, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L15102, doi:10.1029/2010GL044057.
- [25] Southwood, D. (2011), Direct evidence of differences in magnetic rotation rate between Saturn's northern and southern polar regions, *J. Geophys. Res.*, 116, A01201, doi:10.1029/2010JA016070.
- [26] Zarka, P. (2004), Radio and plasma waves at the outer planets, *Adv. Space Res.*, 33, 2045-2060, doi:10.1016/j.asr.2003.07.055.