

## 惑星形成過程における弱電離ダストプラズマの物理 Physics of weakly ionized dusty plasmas in planet formation

奥住 聡<sup>1\*</sup>  
OKUZUMI, Satoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Planets form in gas disks around young stars. These protoplanetary disks are a typical example of weakly ionized plasmas in space: they are cool ( $\sim 10$ -1000 K) but are nonthermally ionized by galactic cosmic rays and stellar X-rays. The disks can also be viewed as dusty plasmas as they contain micron-size dust particles from which planets form.

In this talk, we highlight interesting aspects of protoplanetary disks as weakly ionized dusty plasmas, and discuss their importance in planet formation as well as the MHD of the disks themselves. In particular, we focus on the interplay between charged dust particles and disk's MHD turbulence. Ionized accretion disks are prone to become turbulent because of the magnetorotational instability (MRI; Balbus & Hawley 1991). In protoplanetary disks, the activity of MRI strongly depends on how much dust has grown to larger solid bodies, as small dust particles determine the ionization degree of the disk gas. Meanwhile, turbulence, if present, drives the relative velocity of solid particles, which in turn affects how far the particles can grow by collisions. We briefly review recent developments in the numerical study of MRI-driven turbulence, and then discuss possible coevolution of MRI turbulence and dust particles as predicted by our latest self-consistent simulation (Okuzumi & Hirose 2012).

We will also highlight the importance of plasma heating by turbulent electric fields. A simple order-of-magnitude estimate shows that electric fields in MRI turbulence can significantly heat up electrons in the gas. This implies that Ohm's law can become *nonlinear* in the field strength. To study the nonlinearity of Ohm's law, we construct a gas-dust charge reaction model that takes into account the heating of ionized gas particles as well as impact ionization by hot electrons (Okuzumi & Inutsuka, in prep.). We find that the heating gives rise to negative differential resistivity at a high electric field strength. This occurs because heated electrons more frequently adsorb onto dust particles. The reduced conductivity will lead to suppressed MHD turbulence. Our ionization balance calculations predict that this effect becomes important in realistic protoplanetary disks (Mori & Okuzumi, in prep.).

キーワード: 弱電離プラズマ, ダスト, 惑星形成, MHD, 乱流

Keywords: weakly ionized plasma, dust, planet formation, MHD, turbulence

## 高解像度 GPS 全電子数観測による電離圏擾乱の研究 Ionospheric disturbances studied by high-resolution GPS total electron content observations

津川 卓也<sup>1\*</sup>; 西岡 未知<sup>1</sup>; 齊藤 昭則<sup>2</sup>; 大塚 雄一<sup>3</sup>; 石井 守<sup>1</sup>

TSUGAWA, Takuya<sup>1\*</sup>; NISHIOKA, Michi<sup>1</sup>; SAITO, Akinori<sup>2</sup>; OTSUKA, Yuichi<sup>3</sup>; ISHII, Mamoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Global Positioning System (GPS) is a worldwide precise radio-navigation system formed from a constellation of at least 24 satellites at 20,200 km altitude, 4.2  $R_E$  from the center of the Earth. GPS orbit configuration ensures that 5-10 satellites are visible from any single point on the Earth. The dual-frequency signals from the GPS satellites pass through the ionosphere to reach ground-based GPS stations. The phase and group velocities of radio waves vary in the ionosphere depending on the integrated electron density, that is total electron content (TEC), along the ray path and on the frequency of the radio waves. Using these characteristics, the TEC integrated along the ray path between a GPS satellite and a receiver can be accurately measured using two GPS signals in different frequencies. The TEC strongly reflects variations in the ionosphere at an altitude of about 300 km, where is the peak height of ionospheric electron density.

We have developed high-resolution TEC maps using dense GPS receiver networks. We have been collecting all the available GNSS receiver data in the world to expand the TEC observation area. These GNSS data are provided by IGS, UNAVCO, SOPAC, and other regional data centers. Currently, we are providing global and regional maps of absolute TEC, detrended TEC, and rate of TEC change index (ROTI). These data and quick-look maps are archived and available in DRAWING-TEC website (<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>).

These high-resolution GPS-TEC maps have been applied to studies of various ionospheric disturbances. Sudden increase in TEC caused by solar flares were studied using global TEC observations. Regional TEC observations have revealed new characteristics of large- and medium-scale traveling ionospheric disturbances (LSTIDs and MSTIDs). Recently, clear concentric waves and short-period oscillations were observed after huge earthquakes/tsunamis and massive tornadoes, indicating that acoustic and/or gravity waves propagate upward from the lower atmosphere and reach the ionosphere.

In this presentation, we will introduce recent studies of ionospheric disturbances using high-resolution GPS-TEC observations.

キーワード: 電離圏, GPS, 全電子数, 熱圏

Keywords: ionosphere, GPS, TEC, thermosphere

## イオン輝線による原始惑星系円盤雷の観測 Observation of Lightning in Protoplanetary Disks by Ion Lines

村主 崇行<sup>1\*</sup>; 秋山 栄治<sup>2</sup>; 犬塚 修一郎<sup>3</sup>; 野村 英子<sup>4</sup>; 奥住 聡<sup>4</sup>

MURANUSHI, Takayuki<sup>1\*</sup>; AKIYAMA, Eiji<sup>2</sup>; INUTSUKA, Shu-ichiro<sup>3</sup>; NOMURA, Hideko<sup>4</sup>; OKUZUMI, Satoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 名古屋大学, <sup>4</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>The National Astronomical Observatory of Japan, <sup>3</sup>Nagoya university, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤における雷は原始惑星系円盤科学における重要な素過程である。円盤雷はコンドリュール形成の候補メカニズムとして、また原始惑星系円盤の電磁的状态を観測するための手法の一つとして研究されてきた。そこで、原始惑星系円盤において雷を引き起こしうる複数のモデルが提案されており、そのいずれが正しいかを観測的に区別することは原始惑星系円盤を物理的に理解するうえで極めて重要である。本発表では、我々は原始惑星系円盤における雷モデルを観測的に区別する可能性について研究した。

地上の雷は空気中における放電現象であり、空気中における放電現象は、世紀に渡る研究の歴史があり確立された物理である。しかし、観測的には地上の雷は空気の絶縁耐力よりも 1-2 ケタ低い電場ですでに発生することが知られており、この事実は長い間雷研究の謎のひとつであった。(ここで、絶縁耐力とは、物質が絶縁破壊を起こさずに耐えられる電場の強さの最大値のことである。絶縁耐力は放電物理の中心となる物性値である。)

この謎を解くために、伝統的な Townsend 放電モデル以外にも、新たに Druyverstejn-Penning 放電モデルやランナウェイ放電モデルが提案されてきた。この 2 つのモデルによって導かれる絶縁耐力の値は Townsend 放電モデルが予言する値よりもずっと小さい。

この絶縁耐力の値を測定することにより、放電モデルを区別することができる。絶縁耐力とは、電場によって加速された電子が一定の電離エネルギーに達する点であると解釈することができる。ところで物質に印加されたこの電場は、その物質にふくまれる正イオン粒子をも加速する。放電を引き起こすのに必要な電離エネルギーは一定であるから、イオンが加速によって達するエネルギーも一定である。これは、観測的には、諸イオンの速度は熱速度では説明のつかないほどの高速にあり、かつその速度は雷領域にわたって一定で、局所的な密度や温度にはよらないことを意味する。このようなきわだった性質は、放電現象の存在を証明し、また放電モデルを区別するためのまたとない観測的特徴といえる。たとえば、体積分率 92% の水素分子と 8% のヘリウムからなる円盤ガスを考えた場合の、 $\text{HCO}^+$  イオンについてこの特徴速度は、Townsend 放電モデル、Druyverstejn-Penning 放電モデル、runaway 放電モデルについてそれぞれ 7.1km/s、2.9km/s、0.49km/s である。

我々は、 $\text{HCO}^+$ 、 $\text{DCO}^+$  and  $\text{N}_2\text{H}^+$  という三種類のイオン種について、雷モデルを考慮に入れた速度分布を計算し、それをもとにラインプロファイルおよび 2 次元 P-V 図をシミュレートした。その結果、ラインプロファイルにおいて、雷モデルごとに決まる速度領域に、10-100mJy 程度の特徴が現れることがわかった。Mathews et al. (2013) や Qi et al. (2013) によれば、ALMA によって 10mJy 程度の感度のイオン観測結果が報告されているので、ALMA 公開データにもとづいて一部の雷モデルを棄却したり、将来観測において雷モデルを識別できる可能性があることがわかった。

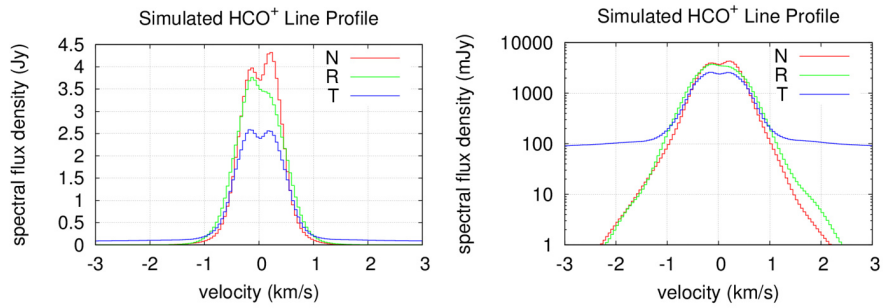
キーワード: 原始惑星系円盤, 放電現象, 雷, 弱電離プラズマ, 天体プラズマ

Keywords: Protoplanetary disks, Discharge phenomena, Lightning, Weakly-ionized plasma, astrophysical plasma

PEM31-03

会場:503

時間:5月1日 16:15-16:30



Simulated HCO<sup>+</sup> line profile of an MMSN disk located at distance  $d=56\text{pc}$ , inclination  $i = 7(\text{deg})$ . The three curves indicate disk without lightning (N), disk with runaway breakdown model (R), and with Townsend breakdown model (T), respectively.

## N体計算による Debye 球の重なりによる引力の検証 Investigation of attractive forces associated with overlapping Debye spheres using N-body simulations

伊東 保崇<sup>1\*</sup>; 天野 孝伸<sup>1</sup>; 星野 真弘<sup>1</sup>  
ITOU, Hotaka<sup>1\*</sup>; AMANO, Takanobu<sup>1</sup>; HOSHINO, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

ダスト粒子は宇宙のいたるところ、たとえば分子雲、原始惑星系、地球磁気圏、惑星円盤などに存在している。さらに実験室においてもダスト粒子が格子を作ることは良く知られていて Coulomb 結晶と呼ばれている。プラズマ中のダスト粒子はプラズマ粒子との衝突や光電効果などの帯電過程によって帯電し、背景のプラズマと強く結合する。このようなプラズマはダストプラズマ、または複合プラズマと呼ばれ、太陽系内のその場観測や Ikezi の Coulomb 結晶の予言以降、宇宙科学だけでなく産業の観点からも研究されている。

ダスト粒子とプラズマ粒子の衝突が帯電過程において支配的などとき、通常電子のフラックスがイオンのフラックスより大きいのでダスト粒子は負に帯電する。よってダスト粒子同士は互いに反発すると考えられるが、ダスト粒子にはたらく力は背景のプラズマとの相互作用のため極めて複雑で、様々な種類の力が提案されている (例えば Shukla and Eliasson, [2009])。興味深いことに、引力も存在するかもしれない、ダストプラズマの集積や結晶化において重要な役割を果たしているかもしれない。

提案されている引力のひとつに、Debye 球の重なりによる引力がある。Resendes et al [1998] は、二つのダスト間のポテンシャルが Lennard-Jones 型のポテンシャルであり、近くで斥力、遠くで弱い引力を及ぼすことを示した。さらに Hou et al [2009] はこの引力がもし存在すれば強い集積や結晶化の効果があることを示したが、一方電氣的にダストにトラップされた粒子を無視する OML 理論はこの引力の存在を否定し、実験的にもまだ立証されていない。

我々の研究の目的は、N 体計算を用いてこの引力の存在を調査することである。N 体計算ならば仮定をほとんど用いずにダストプラズマの挙動を調べることができる。我々はすでに近距離部分を実空間で、遠距離部分を波数空間で計算する Ewald 和を用いたコードによって低プラズマパラメータではこの引力は存在しないことを示しており、今回の研究ではメッシュを導入し PM 法や PPPM 法を実装して拡張したコードによって高プラズマパラメータの場合について調査する。

## Enceladus 衛星周辺における電子-水分子弾性衝突のテスト粒子シミュレーション Test-particle simulation of electron-H<sub>2</sub>O elastic collision along the magnetic field line around Enceladus

田所 裕康<sup>1\*</sup>; 加藤 雄人<sup>2</sup>

TADOKORO, Hiroyasu<sup>1\*</sup>; KATO, Yuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工科大学, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

<sup>1</sup>Tokyo University of Technology, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Saturn's inner magnetosphere is dominated by water group neutrals originated from Enceladus' water plume [e.g., Shemansky et al., 1993; Richardson et al., 1998; Esposito et al., 2005]. The neutrals in the inner magnetosphere contribute to one of the important loss processes of plasma through plasma-neutral collisions. However, little has been reported on a quantitative study of the electron loss process due to electron-neutral collisions. In this paper, we will focus on the collisional loss process with neutrals.

We examine the variation of equatorial electron pitch angle distribution and loss rate of precipitated electrons into Saturn's atmosphere through pitch angle scattering due to elastic collisions with neutral H<sub>2</sub>O along Saturn's magnetic field line around Enceladus. We focus on 1 keV electrons as a typical energy in the present study. To examine the variation of those, we perform one-dimensional test-particle simulation when the co-rotating electron flux tube passes the dense H<sub>2</sub>O region in the vicinity of Enceladus (~6.4 minutes). Results show that the equatorial electron pitch angle distribution near the loss cone (<20 degrees and >160 degrees) decreases with time through pitch angle scattering due to elastic collisions. It is found that the electrons of ~19 % to the total number of equatorial electrons at the initial condition are lost in ~380 seconds. The calculated loss time is twice faster than the loss time under the strong diffusion.

キーワード: プラズマ-中性粒子衝突, 土星, エンケラドス, 弾性衝突, ピッチ角散乱

Keywords: plasma-neutral collision, Saturn, Enceladus, elastic collision, pitch angle scattering

## 磁気流体波動が駆動する巨大ガス惑星からの質量放出と惑星の大気構造 MHD wave-driven mass loss from gas giants and effects on atmospheric structure

田中 佑希<sup>1\*</sup>; 鈴木 建<sup>1</sup>; 犬塚 修一郎<sup>1</sup>  
TANAKA, Yuki<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Takeru<sup>1</sup>; INUTSUKA, Shu-ichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学理学研究科

<sup>1</sup>Department of Physics, Nagoya University

近年は多数の太陽系外惑星が発見されており、その中には中心星に極めて近接した軌道を公転している巨大ガス惑星も多く存在している事が分かっている。このような惑星はホットジュピターと呼ばれており、中心星からの強力な輻射を受けて表面は1000K程度の高温に加熱されている。

一方、太陽系外惑星の発見手法の一つであるトランジット法からは、系外惑星の半径や軌道周期についての情報を得ることができる。さらに最近では、トランジット時と非トランジット時のスペクトルの変化から惑星の大気組成を推定したり、異なる波長での観測から惑星の大気構造を推定したりすることも可能である。これらの観測からは、ホットジュピターが持つ大きく膨張した水素大気の大気からの大量の質量放出現象の存在も分かっている。ホットジュピターからの質量放出については、大気上層部から高速で流れ出す水素大気の大気存在が観測から明らかになっており、モデル依存性はあるものの質量放出率の推定値も得られている。しかし、このような大量の質量放出現象の詳細なメカニズムは未だにはっきりとは解明されていない。

そこで我々がホットジュピターからの質量放出のメカニズムとして提案しているのが、磁気流体波動によって駆動される太陽風の質量放出現象である。ホットジュピターの表面は1000K程度であるため弱電離であるが、大気上層では理想MHDとしての近似が可能である。巨大ガス惑星が固有磁場を持っており、惑星表面に乱流が存在している場合は、表面で磁気流体波動が励起される。さらにその波が上空へ伝播し散逸することによって大気の運動エネルギーとなり、質量放出を駆動する事が考えられる。本研究では、太陽風と同様の数値計算を、ホットジュピターに関して典型的だと考えられるパラメータを用いて行った。その結果、磁気流体波動によって引き起こされた質量放出の値は、観測から推定されている質量放出率を説明出来る事が分かった。

また、発見されている惑星の半径や質量、推定される表面温度などは様々であるため、これらをパラメータとして計算を行った。質量放出率のパラメータ依存性を調べたところ、解析的に得られた惑星半径・質量への依存性と数値計算結果が一致することも確認した。加えて、磁気流体波動が惑星大気内で散逸することによって、惑星の大気構造にも影響を与える。計算の結果から、ガス流は大気上層で超音速まで加速され、さらに高層大気は数万Kにまで加熱されることも示した。本講演では、ホットジュピターだけではなく巨大ガス惑星全般における質量放出の可能性や大気構造への影響についても議論したい。

キーワード: 系外惑星, 質量放出

Keywords: exoplanet, atmospheric escape

## 異径微粒子含有高周波プラズマにおける構造と運動の観察 Group motion of heteromorphic fine particles in HF discharge plasma

三重野 哲<sup>1\*</sup>; 増田 理沙<sup>2</sup>; 盛林 高志<sup>2</sup>; 林 康明<sup>3</sup>

MIENO, Tetsu<sup>1\*</sup>; MASUDA, Risa<sup>2</sup>; MORIBAYASHI, Takashi<sup>2</sup>; HAYASHI, Yasuaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学・院・創造科学技術, <sup>2</sup> 静岡大学・理学部, <sup>3</sup> 京都工芸繊維大学・院・工

<sup>1</sup>Grad. School Sci. Technol, Shizuoka Univ., <sup>2</sup>Dept. Phys., Shizuoka Univ., <sup>3</sup>Grad. School Eng., Kyoto Inst. Technol.

複雑系研究と関係して、微粒子プラズマは多くの研究者により研究されている。[1, 2] ここでは、異径粒子分布を持つ微粒子を含むプラズマを高周波アルゴン内に作り、研究を行っている。そして、新規現象を探索している。直径 150 mm、高さ 150mm の円柱型ステンレス容器内に 2つの円板電極と 1つのリング電極が置かれている。高周波プラズマは、10-13 Pa の Ar ガス中で、270-290  $V_{rms}$  の高周波電圧を上下電極に加えて作られる。リング電極は、粒子閉じ込めの為、下電極の上に置かれる。用いた微粒子は、炭化シリコン (直径約 8  $\mu m$ )、窒化シリコン (直径約 8  $\mu m$ )、短い麻 (直径約 25 $\mu m$ 、長さ 10-1500  $\mu m$ ) で、上方のダストボックスから供給される。顕微高速カメラ (SELMIC LWD100) とビデオカメラで、個々の微粒子運動と集団運動が記録される。図 1 は、放電電圧  $V_d = 280 V_{rms}$ 、放電電流  $I_d = 0.2 A_{rms}$ 、Ar 圧力 13 Pa において作られた、円板状微粒子雲である。図 2 は、SiC 粒子粒子の軌跡であり、周期約 0.07 s で惑星型運動を行っている。短い麻の場合、自転運動や惑星型運動が観測された。これらの運動は、ダスト音波振動で励起されると考えている。

[1] Y. Hayashi, K. Tachibana, J. Vac. Sci. Technol. A 14 (2) (1996) 506.

[2] H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 652.

キーワード: 微粒子プラズマ, 異径分布, 構造形成, 惑星運動, 自転, ダストプラズマ

Keywords: fine particle plasma, heteromorphic particles, self organization, planetary motion, spin, dust plasma

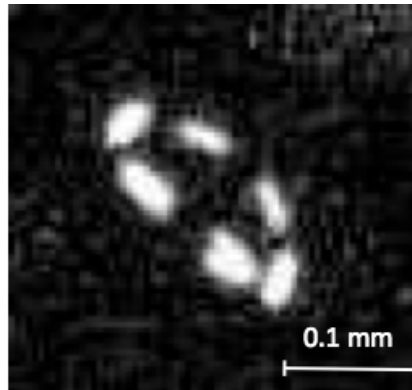
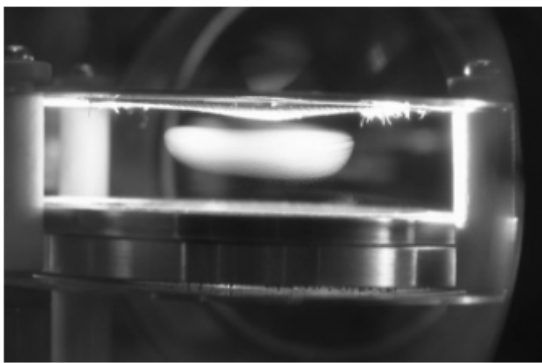


Fig. 1 Fine particles in the HF plasma.

Fig. 2 Planet-like motion of a particle.