

小特集 宇宙における微粒子プラズマ

5. 宇宙の微粒子プラズマのシミュレーション

横田 俊昭

愛媛大学理学部物理学科

(原稿受付：2005年10月20日)

Fine particle plasmas (dust plasmas) exist everywhere in space and are related to extraordinary phenomena such as planetary ring, levitation on lunar surface, and birth of new stars in super novae and so on. Fine particle plasmas are characterized by large charges of fine particles and high Γ -value under the influence of space plasmas and solar UV-light. These play the important roles in space circumstances and on its evolutions. Planetary rings such as Saturn rings are composed of charged fine particles, and it is very interesting to reveal the origin and mechanisms of ring creation by laboratory experiments. Also, a laboratory simulation experiment on the levitation of lunar particles, discharge in Martian regolith, and noctilucent cloud are related to elementary processes and behaviors of space fine particle plasmas. Experimental simulations on ring creation et al. are reported in this article.

Keywords:

planetary rings, simulation experiment, lunar dust, levitation, noctilucent cloud, martian dust

5.1 はじめに

微粒子プラズマ (Fine Particle Plasma, Dusty Plasma, Dust Plasma) という用語が用いられるようになって久しい。微粒子プラズマは気体プラズマにない特徴をもっている。その代表的なものは、微粒子が担う電荷が極めて大きいこと、質量が大きいこと、結合性が極めて強いことがあげられる。ここでは、宇宙空間の微粒子プラズマを主に取り上げ、それらの挙動等について述べるとともに、実験室でのシミュレーション研究について述べたい。

太陽系内には微粒子が数多く存在している。土星をはじめとする外惑星 (木星, 天王星, 海王星) には微粒子のリングが存在している。これらの外惑星はかなりしっかりした双極子磁場をもって自転している。また、彗星の尾も本体からの水を主とした微粒子から成り立っている。これらは、太陽からの紫外線と太陽風に曝されて帯電し、微粒子プラズマの状態にあると考えられる。また、火星大気には微粒子が混在しているし、地球上空では、人間の宇宙活動に伴う微粒子 (スペースデブリ) が存在している。これらの多くは衛星の姿勢制御に伴って放出された微粒子である。さらに、自然現象では極域の地球上空に現れる夜光雲も微粒子が関与していると考えられる。月面にはミクロンサイズの微粒子が降り積もっているが、これらが帯電し浮遊する現象が観測されている。

さらに広く宇宙空間に目を向けると、微粒子プラズマが関与していると考えられる現象が幾つか存在している。銀河系を見るとコールザックを代表とする微粒子の集団が存在する。この様子は銀河系外の星雲の幾つかでも、銀河面に微粒子が集まった状態が見られる。また、オリオン星雲にも馬頭星雲に見られるように微粒子が存在する。これら

は、気体プラズマと混在した状態であり微粒子プラズマと考えられる。星が終わりを迎えると爆発を起こす。このとき、始めは可視光の強度が勝っているが、ある期間が経過すると赤外強度が増し、可視光強度は減少する。これは爆発によって飛散した揮発性物質が冷却に伴い微粒子が形成される。これが可視光を遮るとともに、中心星によって暖められることによっている。これらの微粒子も気体プラズマと混在状態であり、さらに、中心星からの紫外線にも曝されて微粒子プラズマとなっている。これらの微粒子プラズマは凝集・凝縮を重ねて新たな星が形成されることが推定される。実際に、この現象は1981年に爆発が起こった超新星白鳥座 A で観測されている。

微粒子プラズマは気体プラズマに比べてその帯電量が極めて大きく、粒子相互間に働くクーロン力が強いことが特徴である。以下では、幾つかの宇宙空間に存在する微粒子プラズマを取り上げ実験室での実験について述べる。

5.2 微粒子の帯電

宇宙空間では、微粒子は太陽風のような気体プラズマに浸されるとか、太陽や中心星からの紫外線に曝されることで電荷を獲得することができる。また、火星大気中の微粒子などでは粒子相互等の摩擦によって電荷を獲得できる。気体プラズマに浸された微粒子の帯電について幾つかの実験等がなされている[1]。また、電子ビームによる帯電と二次電子放出についての幾つかの実験[2]、紫外線照射による帯電についての実験[3]が行われている。光電子放出による帯電量は $Q_e = 4\pi\epsilon_0 r (hc/\lambda - W)$ で決定される。ここで r は粒子の半径、 λ は紫外線の波長、 W は仕事関数である。さらに、接触や摩擦による微粒子の帯電についての実験研

author's e-mail: yokota@phys.sci.ehime-u.ac.jp

究も見られる[4]. 接触帯電では接触電位 V_c は $V_c = (W_1 - W_2)/e$ で決まる. ここで W_1, W_2 は接触する物質の仕事関数を表している. また摩擦による帯電では大きい粒子の方が正に帯電すると言われている.

気体プラズマや紫外線による帯電では, 月面粒子, あるいは, それと同等の組成を持った粒子による実験に興味がある. 彗星の尾などに関連する帯電実験では, 彗星本体は言わば泥汚れした氷と推定されるが, 氷微粒子を用いた帯電過程の実験が重要となる. なかでも, 氷微粒子の帯電では夜光雲のシミュレーション実験においても紫外線との相互作用が大きな役割を演じていると考えられるので重要である. さらに, 実験室での研究では見られないが摩擦による帯電は火星大気中の微粒子では重要と思われる.

微粒子の磁化については微粒子プラズマでは殆ど取り上げられていないが, 隕石に見られるように石質隕石と鉄隕石が存在しているので, 宇宙の微粒子でも鉄を主体としたものが存在することが考えられる. これらでは, 電荷量だけでなく磁気量も挙動を考える上で必要なパラメーターとなることが考えられる. 鉄の微粒子等についての磁化曲線, 磁気モーメントについては Y. Yatsuya *et al.* および W.E. Henry の論文を参照していただきたい[5].

5.3 実験室でのシミュレーション

幾つかの宇宙の微粒子プラズマに関連した実験室におけるシミュレーションを取り上げる.

5.3.1 夜光雲

極域の中間圏上部の高度 80~90 km あたりに出現する雲でシルバーブルーの雲で, 氷粒子からできている. 発生機構には諸説あるが, 氷粒子が出来るためには結晶核が必要である. この結晶核には流星起源説とプロトンハイドレイト説がある. 極域の高度 90 km 付近は相当量の水蒸気が飽和状態で存在し, 140 K 以下の低温であり, 高度 50 km はオゾンによる太陽光の吸収領域のため地球表面に近い高温であること, 高温のオゾン領域から上昇気流によって高度 90 km 付近に達し断熱膨張するという観点から, プロトンハイドレイト説を用いると以下の Table 1 に示すような素過程が考えられる[6].

プロトンハイドレイトの生成実験は K.-I. Oyama らのグループによって実験が行われているし, O. Havnes により夜光雲が現れる高度での微粒子プラズマ環境の研究がなされている[7]. この説によると紫外線が大きな役割を演じている. 紫外線・電子ビーム・イオンビーム・気体プラズマによる氷微粒子の帯電過程に関する基礎データの収集は, このような微粒子プラズマの研究には欠かせない実験と思われる. これに関連して, 氷微粒子の生成と電子ビームや紫外線による帯電実験は日本工業大学の I. Tsukabayashi, S. Sato and T. Yokota のグループが宇宙科学研究所の大型チェンバーを用いて実験を行いつつある. これは彗星の尾など, 宇宙空間の微粒子も氷が基本と考えられるので興味ある実験であろう. この実験は, 真空チェンバー内に霧吹きの原理を用いて氷微粒子を発生させ, これに紫外線や電子ビームを照射し帯電させる試みである.

Table 1 Elementary process of creation of proton-hydrate.

$\text{NO} + h\nu$	$\rightarrow \text{NO}^+ + e$
$\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	$\rightarrow \text{NO}^+\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$
$\text{NO}^+\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	$\rightarrow \text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_2 + \text{N}_2$
$\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	$\rightarrow \text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_3 + \text{N}_2$
$\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_3 + \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_3 + \text{HNO}_2$
.....	
$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_{n-1} + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	$\rightarrow \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n + \text{N}_2$
$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_{n-1} + \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$
$\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n + e$	$\rightarrow \text{H} + (\text{H}_2\text{O})_n + E_R$

5.3.2 月面微粒子

アポロミッションによって月面には微粒子(宇宙塵)が降り積もっていることが知られた. さらに, この粒子が月面上に浮遊する様子が撮影されている[8]. コロラド大学の S. Robertson らはこの状態のシミュレーションを行っている[9]. 粒子の帯電・浮遊の素過程として最も有力なのは太陽光による光電子放出による正電荷獲得が考えられる. S. Robertson らは真空容器の底に疑似月面微粒子を置き, 紫外線を照射して粒子の挙動を調べる実験を行っている. T. Yokota らは愛媛大学において, 微粒子制御実験の一環として実験を試みている. この実験では, 大気圧の下で紫外線により月面の微粒子群は光電子を放出し正に帯電し, 微粒子群の中で比較的軽い粒子が月面表面の電場によって斥力が働き浮き上がるという単純な推定である. ハロゲンランプの紫外線によって正に帯電させた微粒子を, 正電位を印加した平板上に落下させると, 平板との斥力によって反発されて浮き上がり横方向へと移動する様子が観測できる[10]. Fig. 1はその実験の状況を示している. ガラス微粒子($\sim 20 \mu\text{m}\phi$)を上部のドロップパーから落下させる. 微粒子は途中で 500 W のハロゲンランプからの紫外線照射領域を通過し光電子放出によって約 $10^4 e$ の正電荷を獲得し, 下方の平板電極の上に到達する. このとき粒子は 2 通

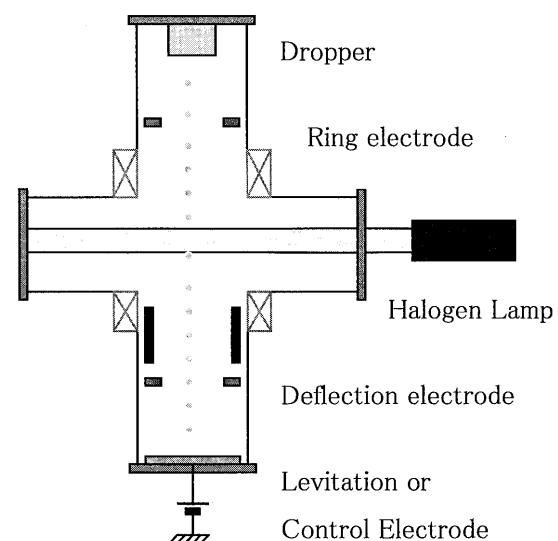


Fig. 1 Experimental setup for levitation and control of positively charged particles. Particle was charged positively by photo-emission.

りの挙動をした。多くは一度平板電極にまで到達した後上方へ飛び上がり浮遊を開始し、やがて側方へ移動してゆくのが観測された(Fig. 2)。まれに、平板電極に到達することなく数秒間の浮遊状態に至り側方へと移動するのが観測された。このことは、月面の粒子が太陽からの紫外線によって帯電し、微粒子の中から幾つかの粒子が電場によって浮遊を始めることができることを暗示している。

5.3.3 惑星のリング

土星のみならず、木星・天王星・海王星には微粒子で構成されたリングが存在していることが知られている。どのようなメカニズムによって微粒子のリングが形成されたか興味深い。M. Horanyi らは重力電気力学

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = Q \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{B} + \mathbf{E}_c \right) - \frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} \quad (1)$$

の式を用いてガリレオ衛星からの微粒子による木星のリング形成のモデル化を行っている[11]。ここで、 m 、 Q 、 r は微粒子の質量、電荷、中心星からの距離を表し、 $\mathbf{E}_c$ は星の回転速度を ω としたとき $\mathbf{E}_c = (\mathbf{r} \times \omega) \times \mathbf{B}$ であり、 μ は万有引力定数に星の質量を掛けた値である。太陽系の惑星の磁気的なパラメータを Table 2 に示している。リングがある惑星はいずれもガス惑星であり、これらは、地球と同様に、はっきりした双極子磁場をもっているのが特徴である。特に、土星は自転軸と双極子の方向が一致している (Table 2)。

このことから、実験室では単極誘導による電磁場と帯電微粒子との相互作用によりリング形成が可能となることが推定できる[12]。単極誘導による電磁場ポテンシャルの形成のシナリオは次のようである。惑星の中心からの距離を r 、惑星の半径を R 、自転の角速度を ω としたとき、赤道面での磁束密度・電場等は以下のような式で表せる。

$$\mathbf{B} = -\mathbf{M}/r^3, \quad B = B_0 R^3/r^3 \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -(\omega \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} \quad (3)$$

$P_m = 4\pi r^3$ 、 $T = 2\pi\omega$ を用いると赤道面での電場は

$$E = P_m/2r^2 T \quad (4)$$

と表すことができる。磁化した球の周りが微粒子プラズマで満たされている時の単極誘導によるポテンシャルは回転の赤道面で強く現れるので、帯電した粒子は赤道面にリング状に集中することが予想される。この時のシミュレー

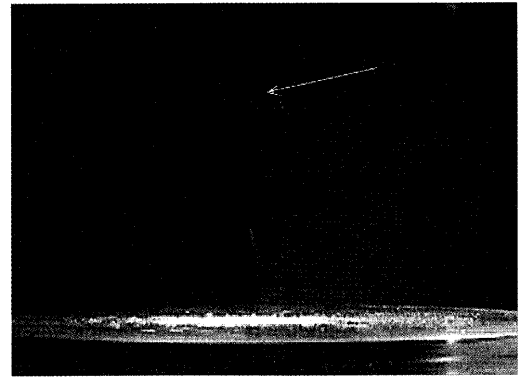


Fig. 2 Positively charged particle levitated on plane electrode on which positive potential was applied. Levitated particle moved along allow.

ションを行う条件を導く式は次のようにあらわせる。これを用いて惑星のデータとミニチュア惑星のパラメータを用いれば、ミニチュア惑星の回転数を決定することができる。

$$\frac{E_s}{E_M} = \frac{\frac{P_{ms}}{2r_s^2 T_s}}{\frac{P_{mM}}{2r_M^2 T_M}} = \frac{P_{ms}}{P_{mM}} \left(\frac{r_M}{r_s} \right)^2 \frac{T_M}{T_s} = 1 \quad (5)$$

ここで添え字の s, M は土星とミニチュア惑星を表している。土星の場合には、 $P_m = 1.265 \times 10^5/n$ の関係から $n = 1/T_M = 10$ Hz でリングが生成できることが予測される。

愛媛大学におけるシミュレーション実験はボート法によって発生させたアルミニウム微粒子にハロゲンランプによって紫外線照射して微粒子プラズマを生成した(Fig. 3)。微粒子の粒子径はレーザー光散乱、および、サンプリングによって測定した。微粒子プラズマ領域からプラズマをビーム状に引き出し、それを静電場、または、静磁場中を通過させ、ビームの分裂と濃度によって求めた。その結果微粒子は正、および、負に帯電した粒子が等量混在した2成分プラズマとなっていることがわかった (Fig. 4)。

微粒子プラズマ中に絶縁棒によってモーターに取り付けられたミニチュア惑星を置き回転させると、シミュレーション条件と一致した瞬間に赤道面に沿って微粒子のリングが形成されるのが確認された(Fig. 5)。このことから、惑星近傍の微粒子が太陽風や太陽紫外線によって微粒子プラズマ状態となった中で土星をはじめとする外惑星が回転することによって単極誘導の作用も加わってリングが形成されたことが推察される[12]。リングを形成している微粒子

Table 2 Planetary Magnetic Fields and Radius (Allen's Astrophysical Quantities 4th Edition, A.N. Cox, AIP 2000)

Planet	Dipole (T/m ³)	Quadrupole (%)	Octapole (%)	Angle (degree)	Radius (km)
Mercury	$2 \sim 6 \times 10^{12}$	---	---	---	2439.7
Venus	$< 10^{11}$	---	---	---	6051.8
Earth	7.84×10^{15}	13	10	10.8	6378.14
Mars	$< 10^{12}$	---	---	---	3397
Jupiter	1.55×10^{20}	23	20	10	71492
Saturn	4.6×10^{18}	14	7	0	60268
Uranus	3.9×10^{17}	---	---	59	25559
Neptune	2.2×10^{17}	---	---	47	24764
Pluto	?	---	---	---	1195

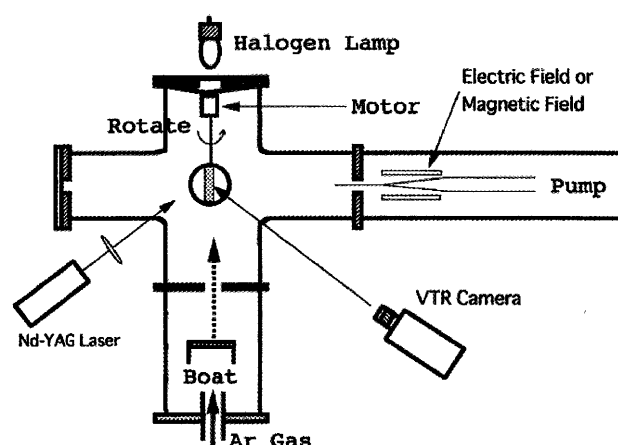


Fig. 3 Experimental setup for ring simulation. Particle density was measured by laser scattering. Particle charge was measured by particle beam split.

の源は惑星の衛星にある火山による噴出物という説が、ボイジャーによる衛星イオで火山噴火が発見されて有力となっている。M. Horany らは電磁気力に加えて中心星の重力による効果を考慮した重力電気力学の式(1)を用いて微粒子プラズマの挙動を求めている。この結果によれば地球の周りにもリングが形成されつつあるという M. Horany らの話も面白くなってくる。この場合の微粒子の源は、人類の宇宙活動に伴いスペースデブリが大きな問題となっているが、デブリの中でも衛星等の姿勢制御に用いられる小型ロケットからのアルミニウムを主とする微粒子が、太陽風や太陽紫外線によって微粒子プラズマ状態となり、重力場と電磁場によってリング状に集まりつつあるという説が唱えられている[13]。

5.3.4 火星大気

火星大気の圧力は、深い谷底ではやや高い (9 hPa) けれども、表面で 7 hPa の圧力があり、微粒子が多く含まれている。大気は CO_2 が 95%, N_2 が 2.7%, O_2 が 0.15%, Ar が 1.6%, 水蒸気が 0.03% で構成されている。火星表面での風速は 100 m/s にも達し、極冠部では、この微粒子を多く含んだ大気が砂嵐となり吹き荒れることが知られている。砂嵐のなかで起こる放電現象に注目すると、微粒子相互は互いに摩擦（衝突）を繰り返し電荷を獲得していることが推察される。このような帯電が原因となって、地球の雷雲

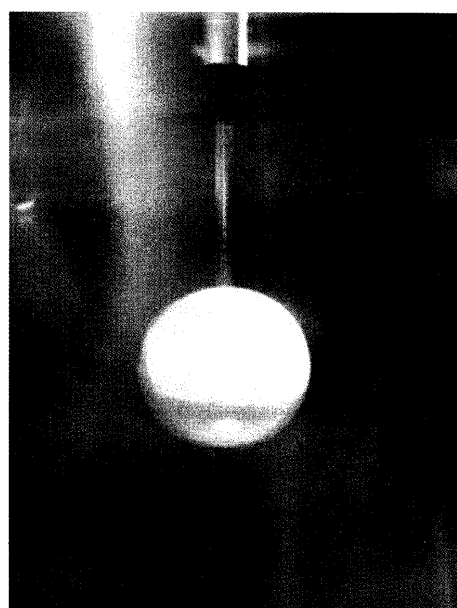


Fig. 5 Simulated Saturn ring form. Dipole sphere was rotated in two component fine particle plasmas. Radius of aluminum was ~ 0.5 mm.

中の稲妻と同じように放電現象が発生すると考えられている。最も単純な実験としては、ガラスチェンバーに微粒子を入れ、火星の大気圧程度の希ガスを封入する (Fig. 6)。この容器を上下転倒させる等の方法で振り回すと微粒子が摩擦で帯電するという実験である。S. Robertson らによって、これらの機構を調べる実験が提案され、比較的単純な装置を用いてそれが試みられている[14]。彼等の実験では CO_2 を数 Torr 封入した容器に火星の表土の成分に似せた疑似微粒子を入れ内部で攪拌する方法と、上部から疑似粒子を落下させる方法の2種類の実験を行い微粒子の帯電にともなう放電を光電子増倍管で観測し、摩擦帯電と接触帯電についての解析を行った結果風速約 2 m/s 付近が最も放電現象が多く現れたことが述べられている。

5.3.5 宇宙利用

衛星を用いる実験では、衛星の進行方向の背後では極めて高い真空状態が得られることと無重力（微小重力）の状態が得られることが最大の特徴である。実験室でのシミュレーションでは、地球の重力 (1g) があること、容器の壁が存在し壁との相互作用によって現象が乱されることがあ

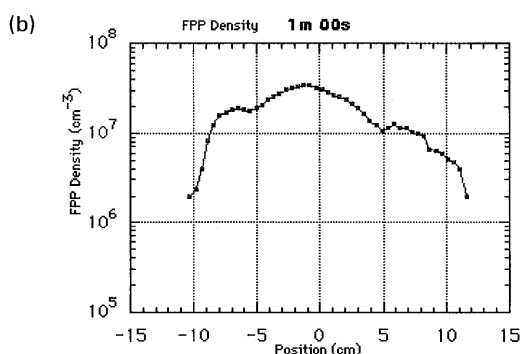


Fig. 4 (a) Fine particle beam split into two beams after path through static electric fields. This indicates that aluminum fine particle plasmas were in two component plasmas. (b) Density distribution measured by laser scattering.

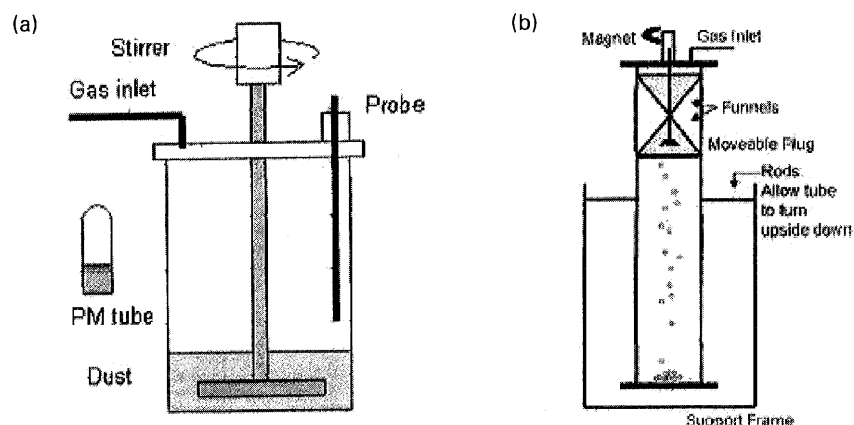


Fig. 6 Schematic diagram for Martian dust discharge. (a) Horizontal mixing type. (b) Vertical drop type.

る。実験室ではこれらの影響を克服するための容器のサイズを大きく器壁から遠ざけるとか、気流や電磁場によって微粒子を浮かせるなどの工夫が必要であった。この観点からは、航空機の弾道飛行や衛星を用いた実験を行えば、マイクロ g の状態が実現でき、重力の影響を殆ど受けないで微粒子プラズマの実験が可能となる。

あとがき

微粒子プラズマは粒子が担う電荷が極めて多いことから、 r 値が大きく結合性が極めて高い。このことから、コロイド研究で見られた幾つかの挙動と微粒子プラズマでも似た状態が起こっている。ここでは凝縮・凝集については述べなかったけれど、月面に微粒子が大量に存在していることはアポロによって知られている。このことは微粒子の凝縮・凝集がきっかけとなって惑星等の太陽系が誕生したという推理のヒントになるかもしれない。さらに、超新星の周囲に微粒子雲が形成され、それが凝縮・凝集によって新しい星の誕生となる可能性が考えられる。この様子は白鳥座 A の観測に見られる。水素が赤く光るガス星雲のオリオン星雲には多くの微粒子が存在している箇所が存在している。これは微粒子プラズマが関与して起こる現象の宝庫と思われる。ハッブル宇宙望遠鏡の観測によると微粒子プラズマの凝集・凝縮を想定させられる映像が撮影されている。NASA のディープインパクトが子機を衝突させたテンペル第 1 彗星の噴出物や画像から微粒子プラズマと関連があると思われる興味深いデータが示されている。まず第一に表面が $1\sim 100\ \mu\text{m}$ の微粒子覆われ核が微粒子で出来ていること、第二に彗星の形成に電磁気力が多く関わっていると考えられる説が有力となってきたことである [15]。

参考文献

- [1] S. Robertson, Phys. Plasmas 2, 2200 (1995); T. Yokota, J. Plasma Fusion Res. 73, 1222 (1997).
- [2] P. Zilavy, Z. Sternovsky, I. Cermak, Z. Nemecek and J. Safrankova, Vacuum 50, 139 (1998).
- I. Richterova, Z. Nemecek, J. Safrankova and J. Pavlu,

IEEE Trans. Plasma Sci. 32, 617 (2004).

- [3] A.A. Sickafoose, J.E. Colwell, M. Horanyi and S. Robertson, Phys. Rev. Lett. 84, 6034 (2000); M.M. Abbas, P.D. Craven, J.F. Spann, E. West, J. Pratico, D. Tankosic and C.C. Venturini, Physica Scripta T98, 99 (2002); A. Ando, A. Kawakami and T. Yokota, ICPDP4 Abstract III23, Orleans 2005.
- [4] A.A. Sickafoose, J.E. Colwell, M. Horanyi and S. Robertson, J. Geophys. Res. 106, 8343 (2001).
- [5] Y. Yatsuya, T. Hayashi, H. Akoh, E. Nakamura and A. Tasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 17, 355 (1978); W.E. Henry, Phys. Rev. 88, 559 (1952).
- [6] 杉山卓也, 深尾昌一郎: 「夜光雲の自律振動的形成」科学 65, No.1, 65 (1995); F. Arnold, Planet. Space Sci. 28, 1147 (1982); O. Havnes, Dusty Plasmas in the New Millennium, AIP Conference Proceedings 649 (2002) p.13.
- [7] H.S.S. Sinha, Y. Tokuyama, K.-I. Oyama and S. Watanabe, Geophys. Res. Lett. 31, L13802 (2004).
- [8] D.R. Criswell and B.R. De, J. Geophys. Res. 82, 1005 (1977); M. Horanyi, Dusty Plasmas in the New Millennium, AIP Conference Proceedings 649 (2002) p.22; S.F. Singer and E.H. Walker, Icarus, 1, 112 (1962).
- [9] J.E. Colwell, M. Horanyi, S. Robertson and A.A. Sickafoose, Dusty Plasmas in the New Millennium (3rd ICPDP) AIP 649 (2002) p.438; S. Robertson, P. Wheeler, M. Horanyi and J. Colwell, ICPDP4 Abstract II25, Orleans 2005.
- [10] T. Yokota, ICPDP4 Abstract III.24, Orleans 2005.
- [11] M. Horanyi, E. Grun and A. Heck, Geophys. Res. Lett. 24, 2175 (1997).
- [12] T. Yokota, IEEE Trans. Plasma Sci. 29, 279 (2001); T. Yokota, Physica Scripta T84, 175 (2000); T. Yokota, Frontiers in Dusty Plasmas (Elsevier, 2000) p.321; P. Bliokh, V. Sinitsin and V. Yaroshenko, Dusty and Self-Gravitational Plasmas in Space (Kluwer Academic Publishers, 1995).
- [13] A. Juhasz and M. Horanyi, J. Geophys. Res. 102, 7237 (1997).
- [14] C.E. Krauss, M. Horanyi and S. Robertson, Dusty Plasmas in the New Millennium (AIP, 2002) p.309; C.E. Krauss, M. Horanyi and S. Robertson, New J. Phys. 5, 70.1 (2003).
- [15] R.A. Kerr, Science 309, 1667 (2005).

その他の参考文献

月面粒子の帯電等

S. F. Singer and E. H. walker, Icarus **1**, 112 (1962)

水星表面粒子の帯電等

R. Grard, Planet. Space Sci. **45**, 67 (1997)

隕石表面の粒子の帯電等

P. Lee, Icarus **124**, 181 (1996)