

# 原始惑星系円盤における 氷ダストの衝突帯電と雷について

arXiv:0908.1575, submitted to MNRAS

村主崇行(京大)

富康達也(元京大)、山本哲生(低温研)、  
田中秀和(低温研)、奥住聡(京大)、三浦均  
(東北大)、武藤恭之(京大)、犬塚修一郎(名  
大)

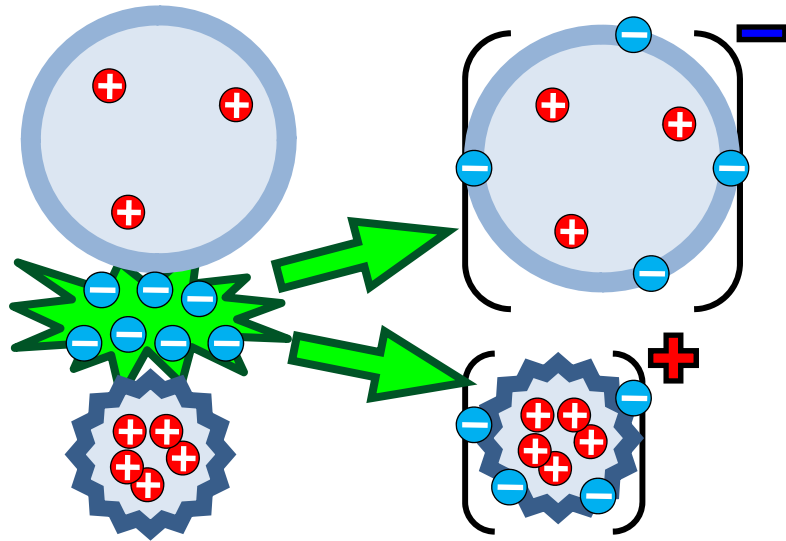
# 全体の流れ

1. 原始惑星系円盤でダスト帯電、および雷放電を考慮する動機
2. ダストを帯電させ雷を起こす機構、今回採用したモデルと基礎方程式
3. 結果1: 原始惑星系円盤でのダストプラズマ帯電状態の4つの相
4. 結果2: ダスト移動により励起される電場の評価、および雷が起こる条件
5. **New** 雷条件の解析解
6. 円盤雷の観測可能性

# 1. ダスト帯電量の理解は原始惑星系円盤を研究するうえで不可欠である。

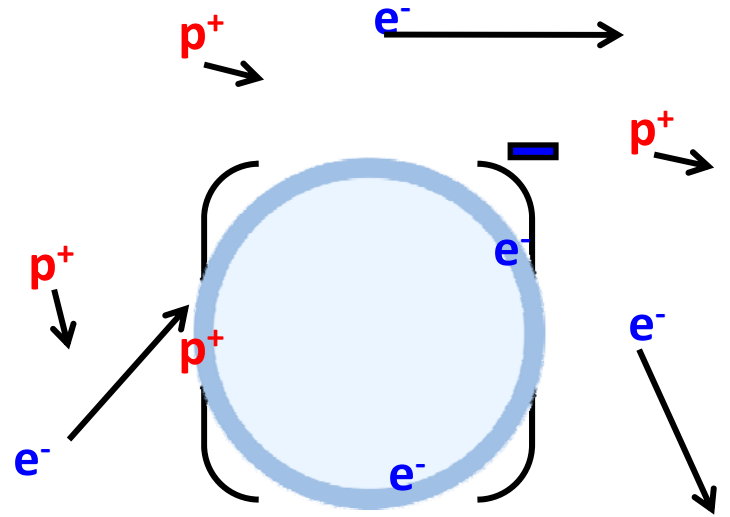


- また帯電か・・・
- 衝突帯電とプラズマ吸収による帯電はどう違うのか



**衝突電離**: 氷ダストの表面電荷密度  $\pm 10^{10}$  [e/cm<sup>2</sup>]まで帯電する (Dash et al. 2001)

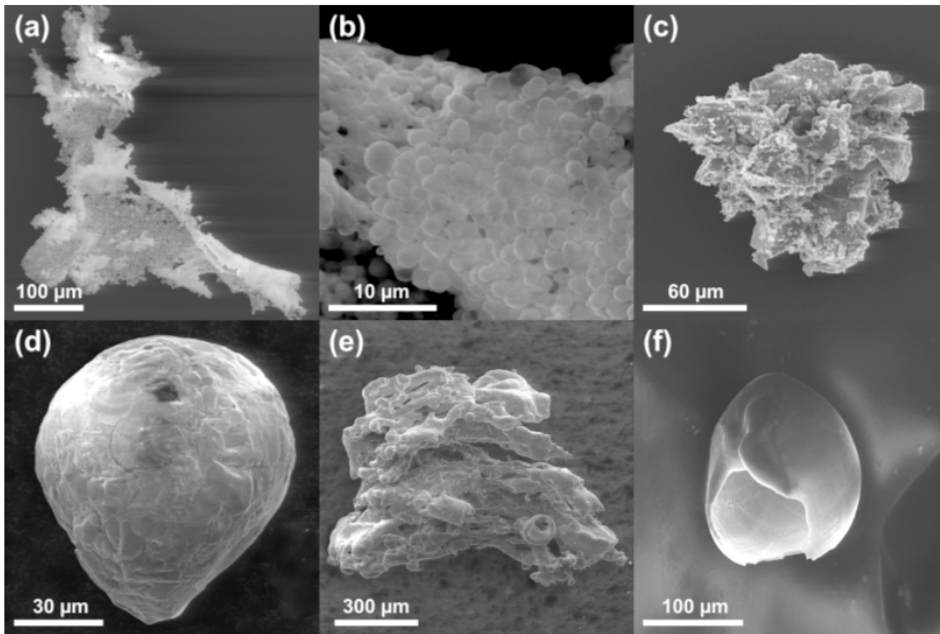
もし実現していれば、  
帯電量がとても大きい  
正負両符号に帯電できる



**プラズマ吸収**: ダストの帯電は  $-e$  ( $a/0.1\mu\text{m}$ )が平衡 (Okuzumi, 2009)

帯電量は比較的小さい  
負帯電しか作れない

# 1. 原始惑星系円盤の雷を探求する動機

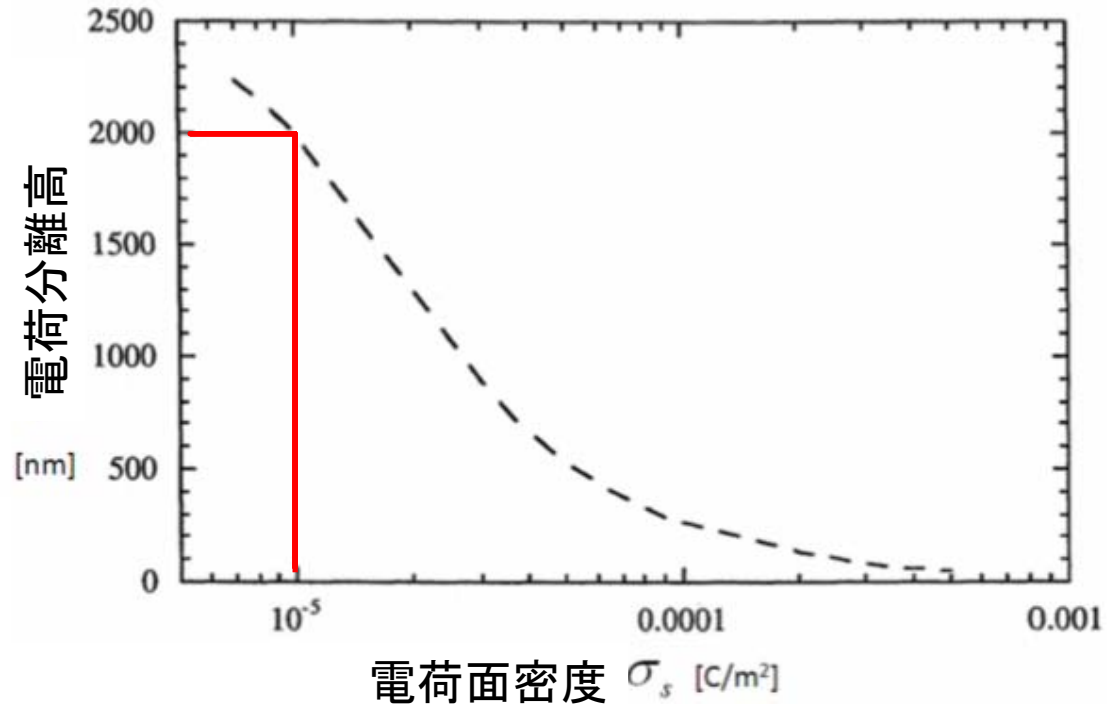
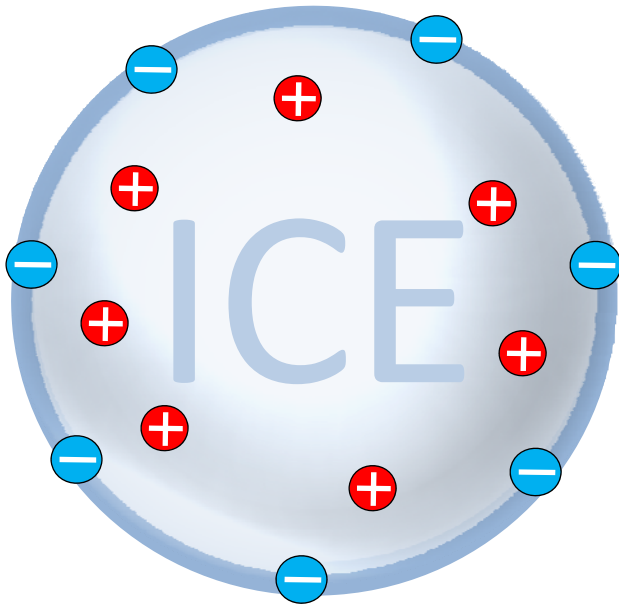


## コンドリュール

とは現在、太陽系に存在する隕石に含まれるmmサイズ、ほぼ球形をしているシリケート鉱物。原始太陽系円盤において、非結晶シリケートダストがなんらかの急速加熱を受けて融解し表面張力で球形になったあと冷却されてできたものと思われる。

- コンドリュールの加熱源としての雷
  - ダストの帯電は微惑星形成および円盤のMRIを考えるうえで必須 (by Okuzumi 2009, Sano et. al. ...)
  - 雷がもし有り、観測できれば帯電状態のプローブとなる
- 原始惑星系円盤でもダスト同士の衝突電離が貢献し、雷が起きていた可能性を検討したい

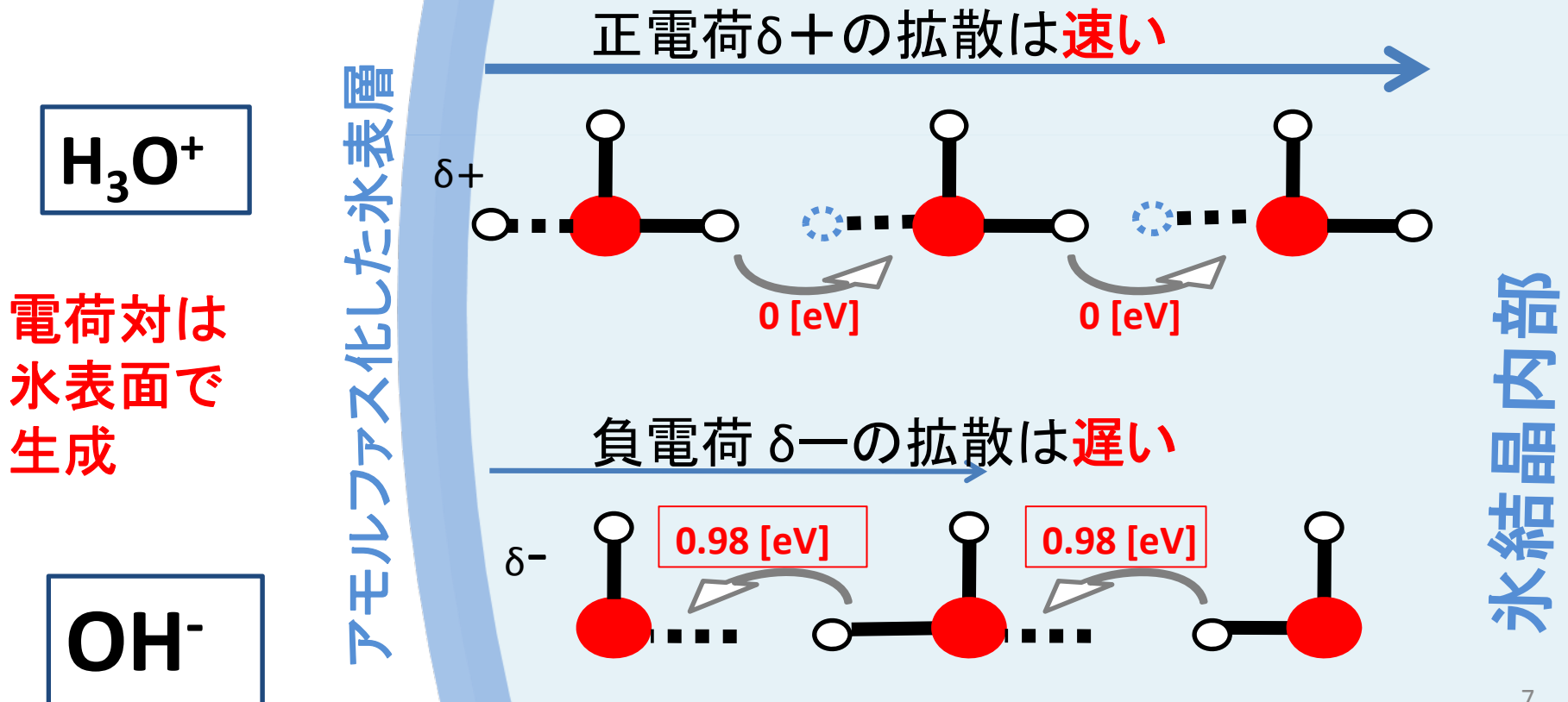
## 2-1.氷結晶の表面には、負の電荷が偏って分離している。



- 典型的な電荷密度  $\sim 10^{10}$  [e/cm<sup>2</sup>]
- 典型的な電荷分離層の厚さ  $\sim 2 \times 10^{-4}$  [cm]
- なぜ? → (富康修論)

# 2-1. 氷の表面がマイナスに帯電する理由

- 氷の表面付近では氷結晶構造が融けて液体に近くになっており(「格子のソフトニング」by Y.Kimura)、ここで  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$  イオン対が生成される。
- $\text{OH}^-$  イオンより  $\text{H}_3\text{O}^+$  イオンのほうが移動が速い。

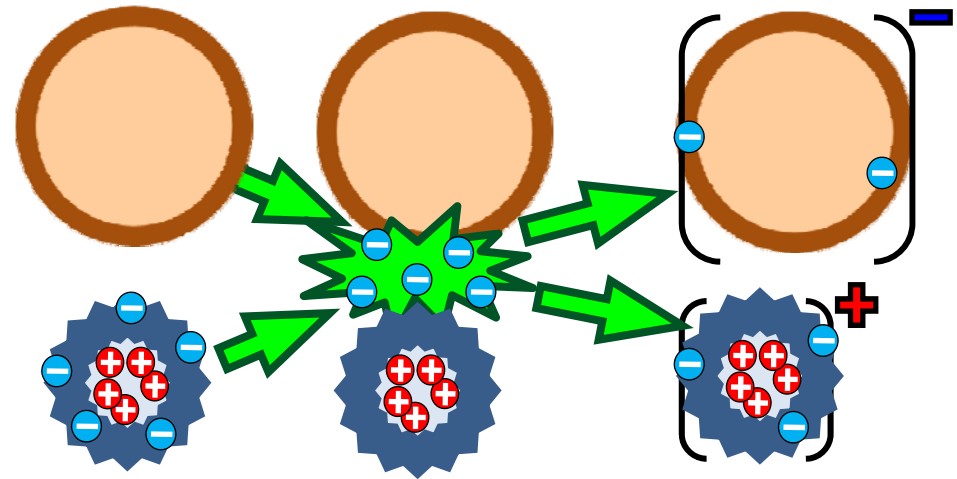


## 2-1.氷ダストの衝突帯電

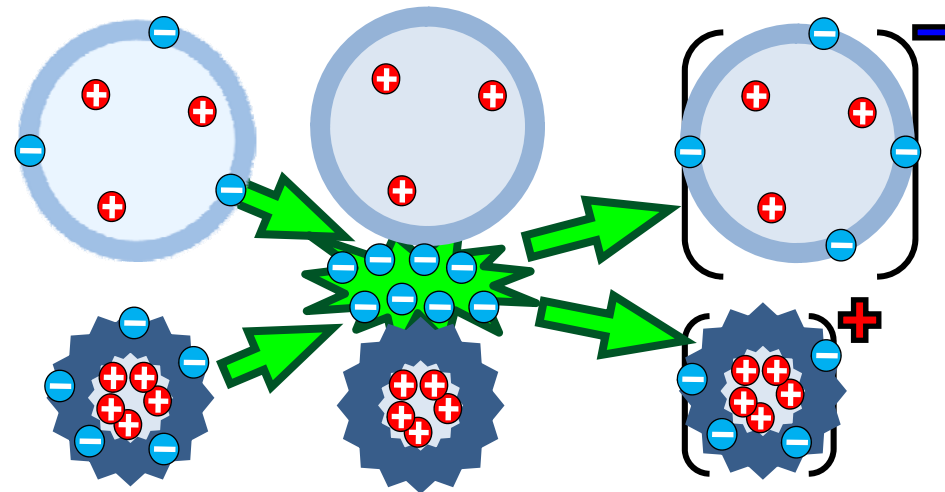
Barker et al. Meteorol. Soc., Vol.113 p.1193(1987),

Dash et al. J. Geophys. Res. Vol. 106, p 20395(2001)

- 例えば氷と、電氣的に中性なSiダスト等が衝突した場合、氷の表層が融け、負電荷のみがSiダストに移動するので、ダスト同士が帯電するだろう。

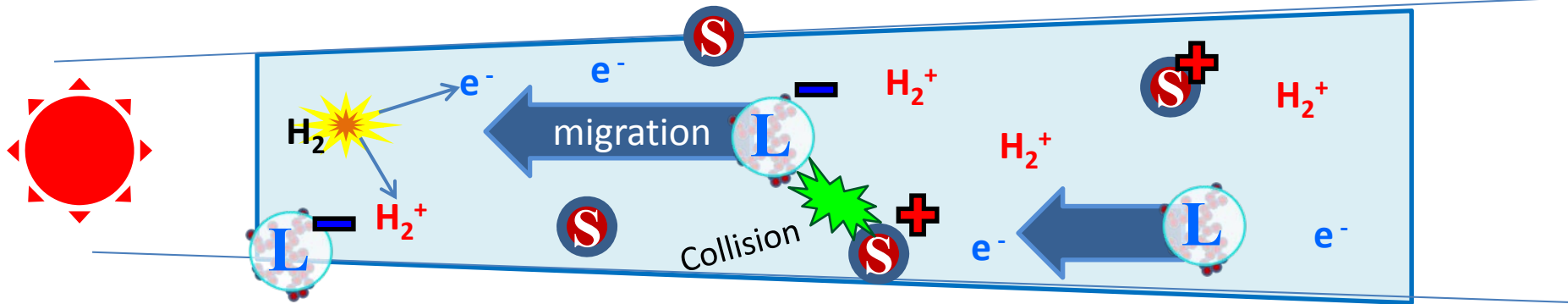


- 表面状態が異なる氷同士の衝突でも帯電は起こる(雷雲でおこっているのはこっち。)





## 2. モデル



- 大ダスト(L)、小ダスト(S)、イオン(i)、電子(e)、中性ガス分子(g)の5成分。一様な領域 (One box)での電荷交換方程式の平衡解を求める。**大小ダストは氷でできているので衝突すると帯電する。**
- 大ダストはほかの成分に対して相対速度を持つ。これとプラズマ中和電流の釣り合いによりマクロ電場が決まる。
- 林モデルを基準に測った無次元のダスト数密度を  $\eta$  とする:

$$\rho_S = \eta \times 10^{-2} \rho_{g(\text{MMSN})}, \rho_L = \eta \times 10^{-3} \rho_{g(\text{MMSN})}$$

- パラメタはダストの半径  $r_S, r_L$  とフラクタル次元  $D_S, D_L$ 、数密度  $\eta$ 
  1.  $\eta$  を変えると**ダストの帯電量、生じる電場**はどう変わるか?
  2. **ダストのパラメータ**を変えると**雷が起こる  $\eta$** はどう変わるか?

## 2.ダストプラズマ帯電量の発展方程式

$$\frac{dq_L}{dt} = -\Delta q n_s \sigma_{SL} \Delta v_{SL} + e(n_i \sigma_{iL} v_i - n_e \sigma_{eL} v_e)$$

ダスト衝突帯電・中和

$$\frac{dq_S}{dt} = +\Delta q n_L \sigma_{SL} \Delta v_{SL} + e(n_i \sigma_{iS} v_i - n_e \sigma_{eS} v_e)$$

プラズマ吸収

$$\frac{dn_i}{dt} = \zeta n_g - (n_i n_L \sigma_{iL} v_i + n_i n_S \sigma_{iS} v_i)$$

ガスイオン化

$$\frac{dn_e}{dt} = \zeta n_g - (n_e n_L \sigma_{eL} v_e + n_e n_S \sigma_{eS} v_e)$$

平衡解を求め、  
 $\eta$ 依存性を調べる。

$n_L, n_S, n_i, n_e, n_g$ : 大ダスト(L)、小ダスト(S)、イオン(i)、電子(e)、中性ガス分子(g)の数密度

$q_L, q_S$ : 大ダスト、小ダスト一粒あたりの電荷。

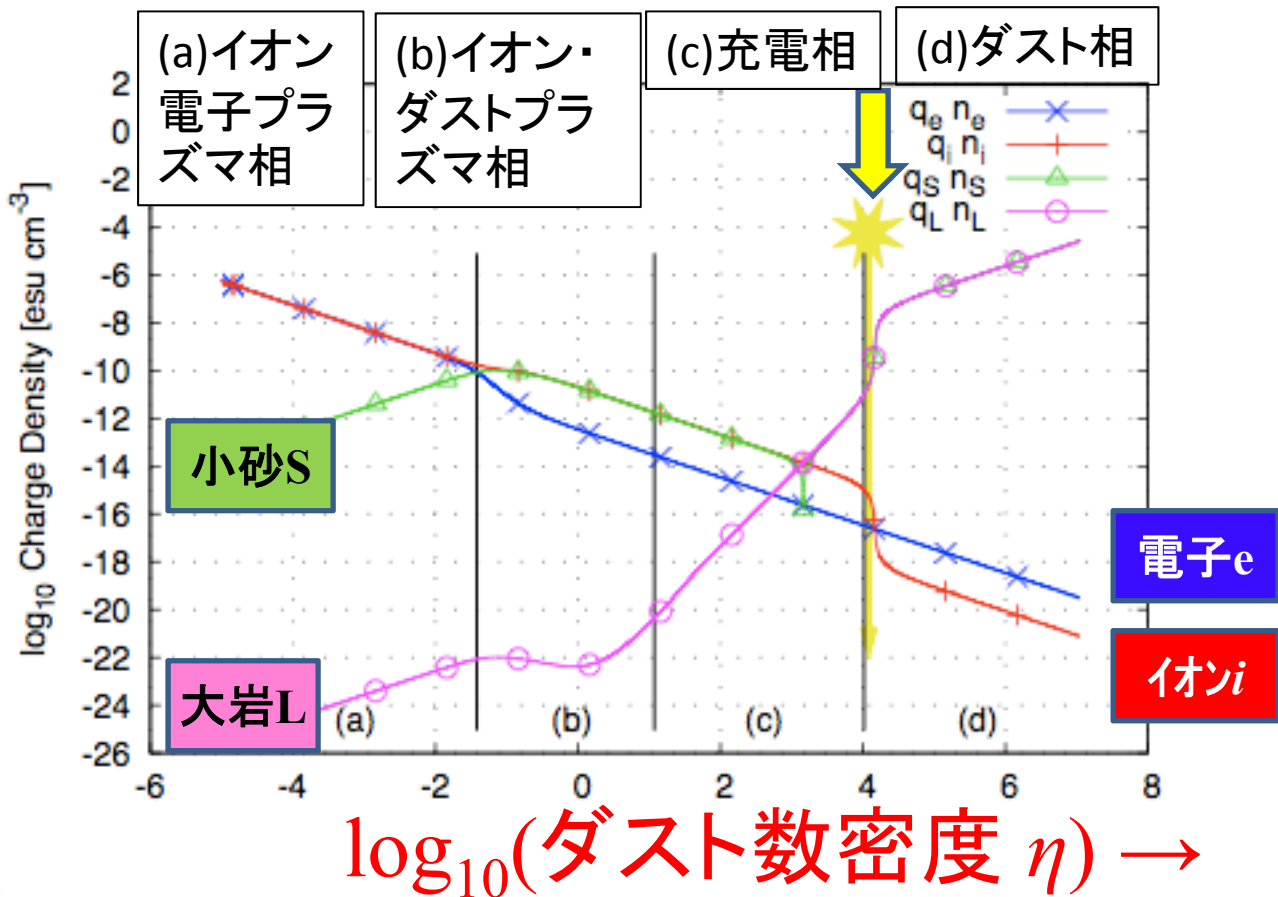
$\Delta q (q_L, q_S)$ : 1回のダスト衝突で移動する電荷。地上実験から決定

$\Delta v_{LS}$ : 大小ダストの相対速度。3.4cm/s ~ 3400cm/s の範囲で固定

$\zeta$ : ガスのイオン化率

$\eta$ : ダストの数密度(MMSN比);  $m_S n_S = \eta \times 10^{-2} m_g n_g$ ,  $m_L n_L = \eta \times 10^{-3} m_g n_g$

$\log_{10}$ (ダストやガスの帯電量)  $\uparrow$

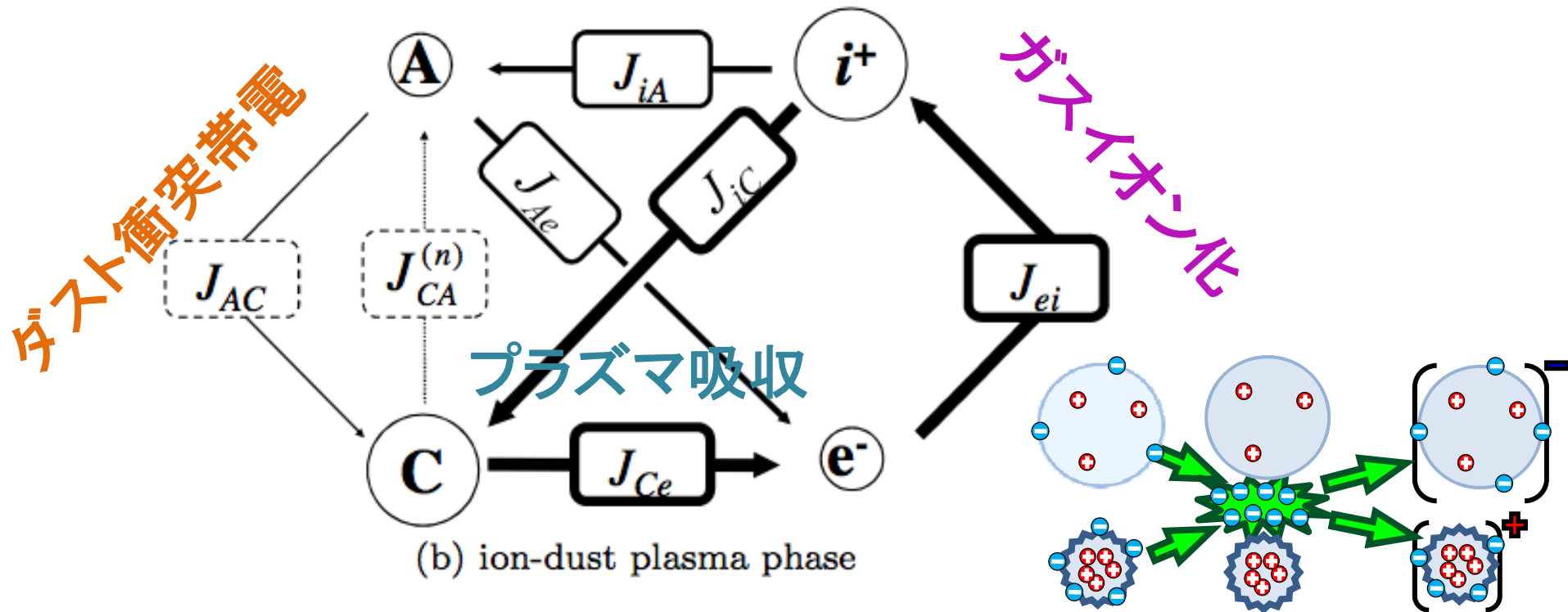


$\log_{10}$ (ダスト数密度  $\eta$ )  $\rightarrow$

**Figure 3.** Amount of charge stored in each species,  $en_e$ ,  $en_i$ ,  $|q_s|n_s$ , and  $|q_L|n_L$ , as function of  $\eta$ . This figure is for ice dust-ice dust case, so boulder is anionic and sand is cationic. The polarity matches that of Fig. 5. The radius of sand, radius of boulder, fractal dimension of sand, fractal dimension of boulder are  $1.0 \times 10^{-4}$  cm,  $1.0 \times 10^2$  cm, 3.0, and 3.0 respectively. (a), (b), (c), and (d) corresponds to the four phases described in §5.2. The yellow arrow denotes the critical condensation  $\eta$  where the macroscopic electric discharge condition (123) is met.

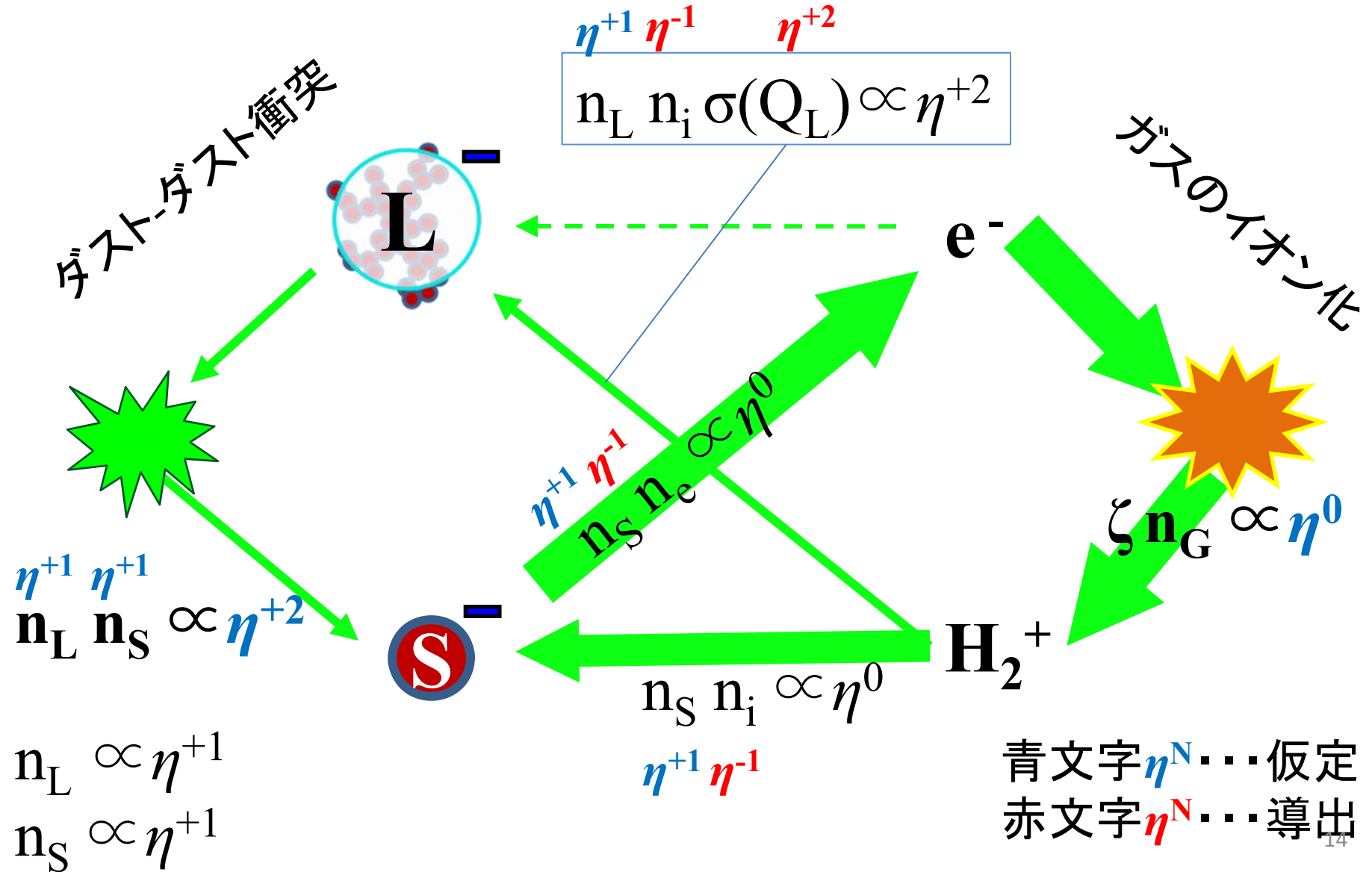
原始惑星系円盤の帯電には4つの相があり、各相で電荷密度はどの冪に従うことがわかった。

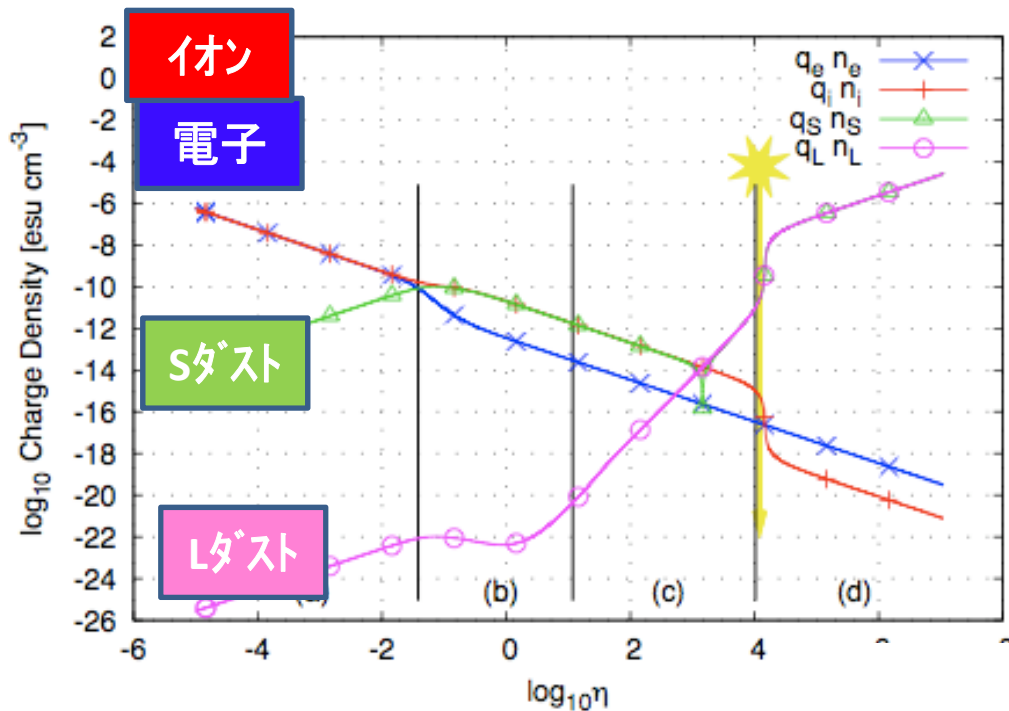
# 「サーキットダイアグラム」による 各相の電荷密度の $\eta$ 依存性の理解



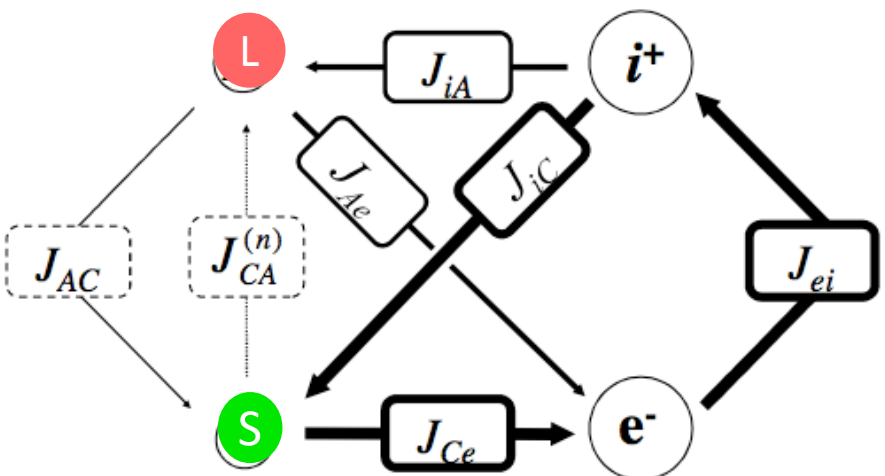
- 矢印が電荷移動の向き & 大きさ、丸の大きさが電荷密度の多さを表す。
- 以下ではSダストが衝突で正(Cation)、Lダストが負(Anion)の電荷をもらう場合を例にとる。

# 電荷の $\eta$ 依存性の冪則はサーキット ダイアグラムから理解できる。

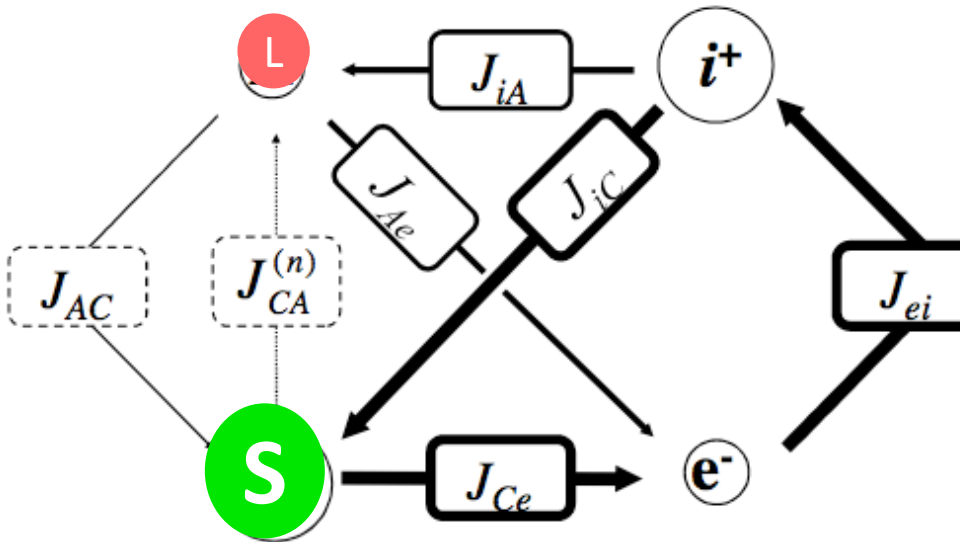




- (a) イオン電子プラズマ相ではガスが主に電荷を担う。ダストは全部弱く負に帯電。
- (b) イオン・ダストプラズマ相では小さいダストが大部分の電子を吸収し負電荷を担うようになる。(電子欠乏効果)

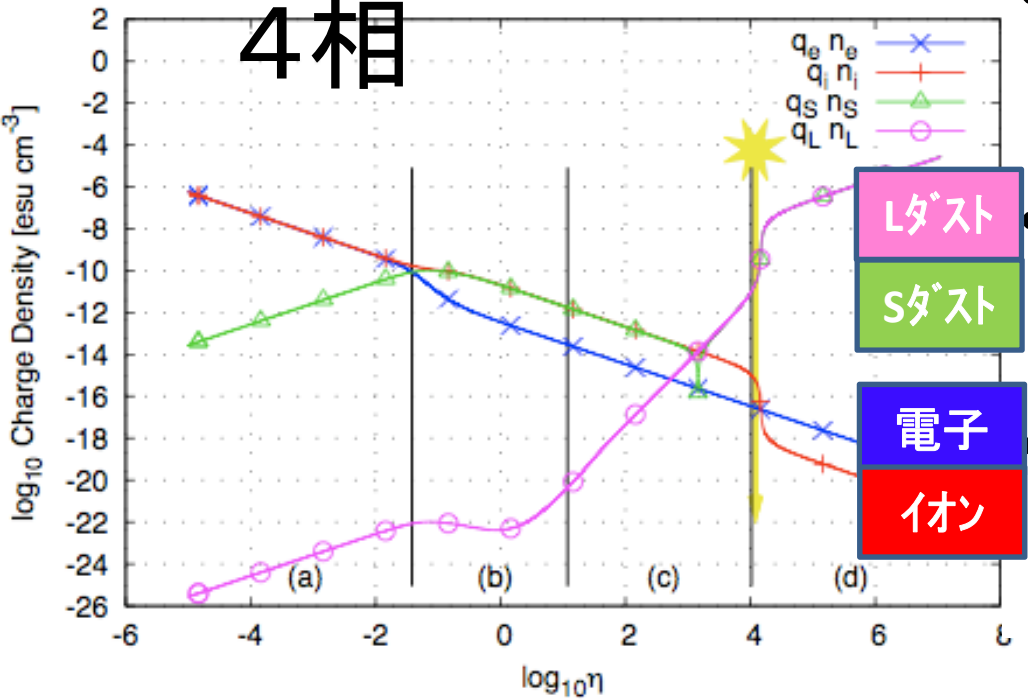


(a) ion-electron plasma phase  
イオン電子プラズマ相

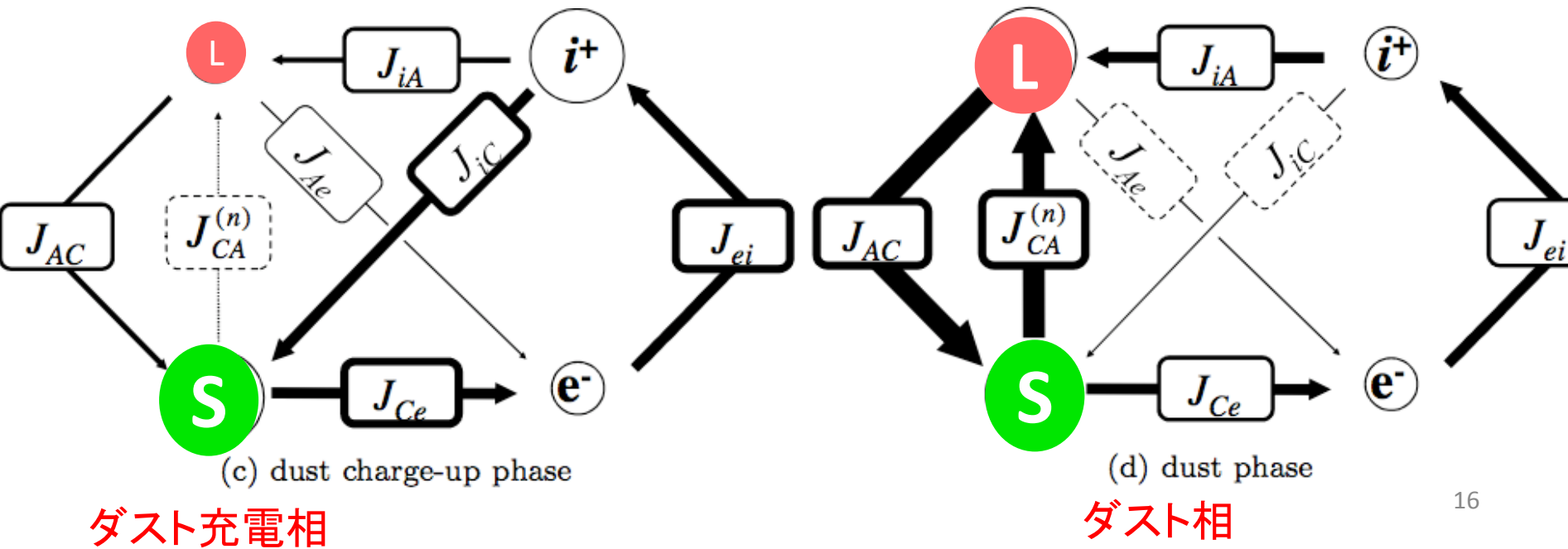


(b) ion-dust plasma phase  
イオン・ダストプラズマ相

# 4相



- (c) 充電相ではダスト衝突帯電が効き始め大ダストの電荷密度が  $\eta^3$  に比例して増加する。
- (d) ダスト相ではダストの衝突帯電が中性ガスのイオン化を上回る。
- (c)(d) 境界で一気にダストの電荷が上昇するので、ここで雷が起きることが多い。



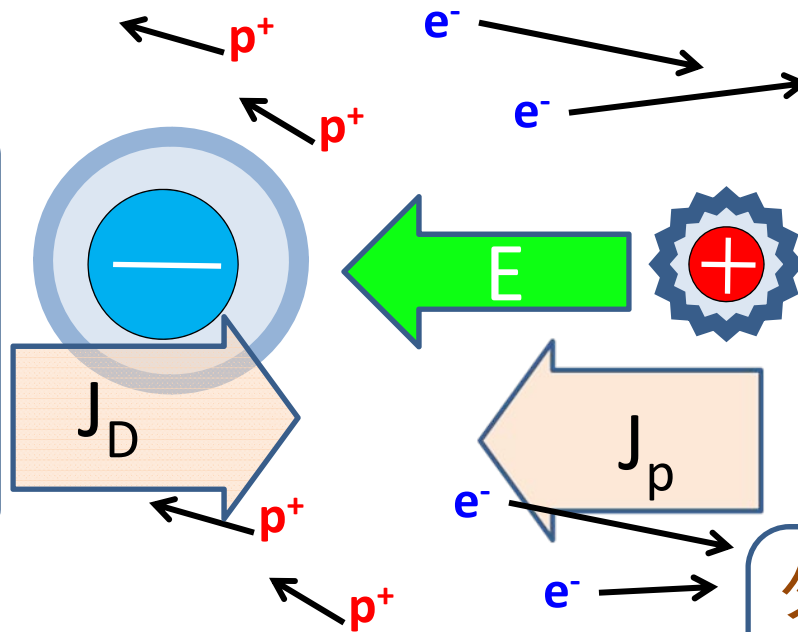
# 4.ダスト移動により生じる電場の評価 および静電破壊条件

## 静電破壊条件

$$e E_{\text{dis}} l_{\text{mfp}} = \Delta W_{\text{ion}}$$

$$E_{\text{dis}} = \frac{\Delta W_{\text{ion}}}{e l_{\text{mfp}}}$$

$$\Delta W_{\text{ion}} = 15.4 [\text{eV}]$$



ダストとプラズマ  
による電流

$$j_D = Q_L n_L u_L$$

$$j_p = \nu E_{\text{max}}$$

$$\nu = \frac{n_e l_{\text{mfp}} e^2}{m_e v_e}$$

## ダストプラズマで静電破壊が 起こる条件

$$\frac{E_{\text{max}}}{Q_L n_L} > \frac{E_{\text{dis}}}{e n_e}$$

$$\frac{Q_L n_L}{e n_e} > \frac{\Delta W_{\text{ion}}}{m_e v_e u_L}$$

大ダストと電子の電荷密度  
の比が「雷の起こりやすさ」  
パラメータである。

ダストとプラズマの  
電流の釣り合いで  
決まる電場

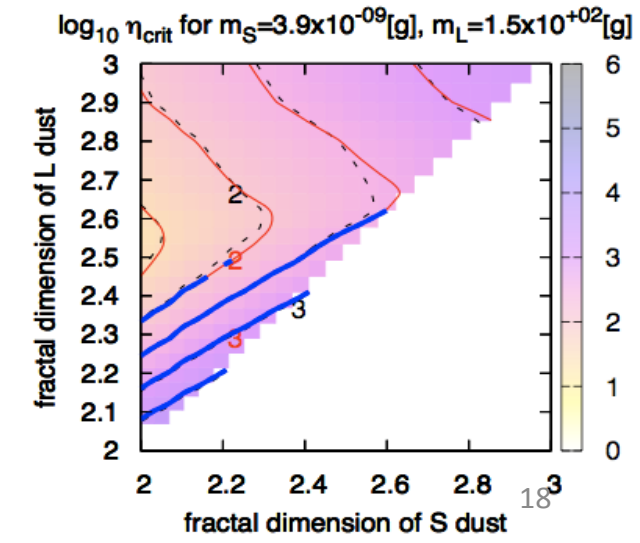
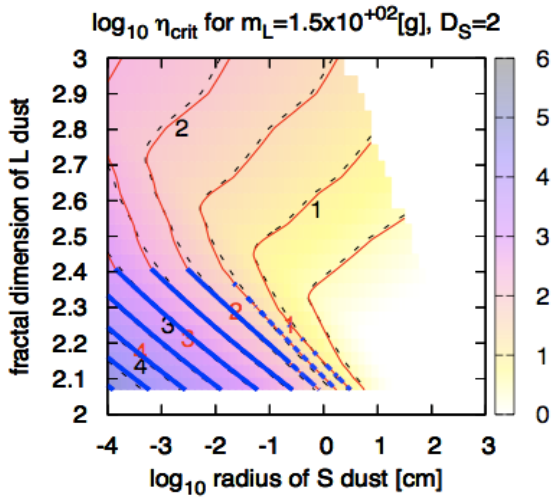
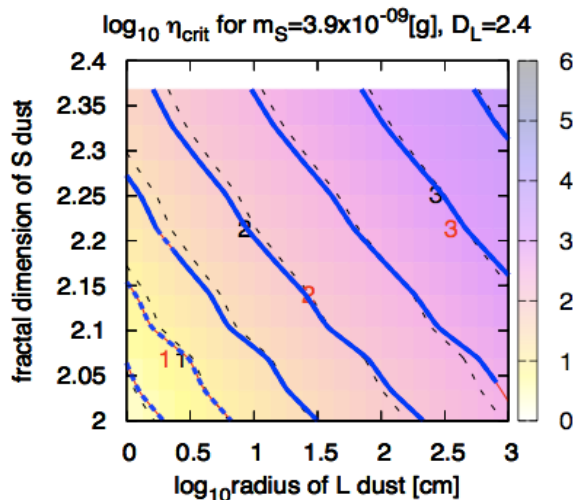
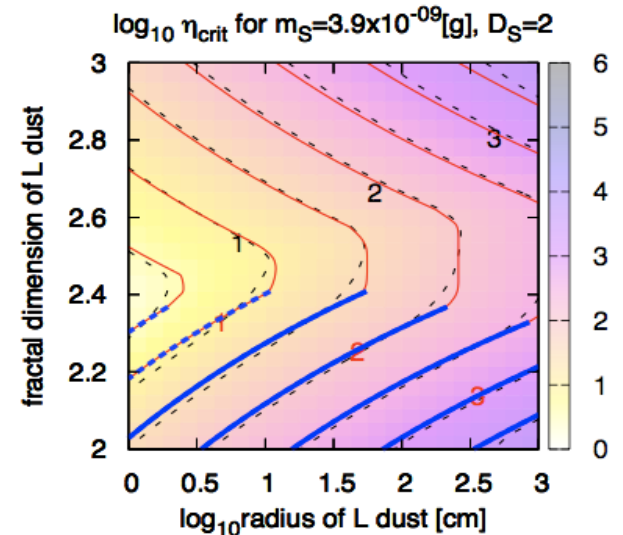
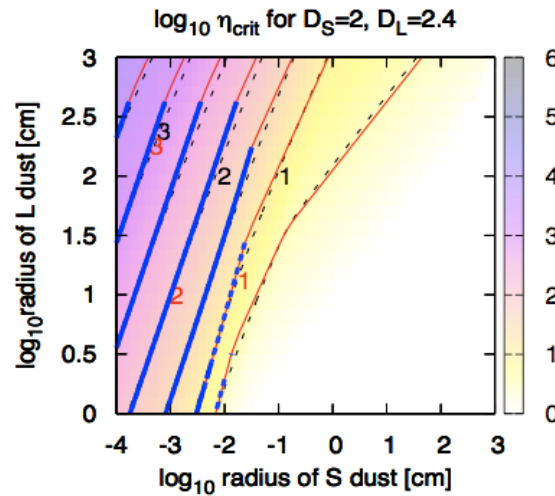
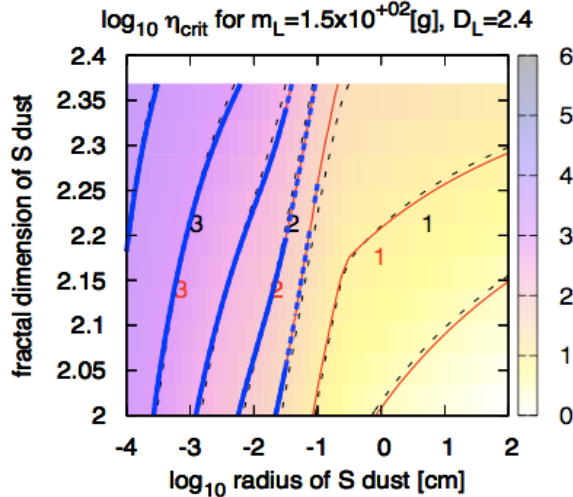
$$j_D = j_p$$

$$E_{\text{max}} = \frac{m_e v_e Q_L n_L u_L}{n_e l_{\text{mfp}} e^2}$$



# ダスト半径 $r_S, r_L$ とフラクタル次元 $D_S, D_L$ に対する、 雷が起こるダスト数密度 $\eta(r_S, r_L, D_S, D_L)$ の依存性

カラーマップ、黒点線・・・シミュレーション  
赤・青線・・・解析解



# 解析解！

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{crit}} &= \eta_{\text{crit}}^{(d)} \quad \text{if } \eta_{\text{crit}}^{(d)} > \eta^{(cd)}, \\
 &= \eta^{(cd)} \quad \text{if } \eta_{\text{crit}}^{(c)} > \eta^{(cd)} > \eta_{\text{crit}}^{(d)}, \\
 &= \eta_{\text{crit}}^{(c)} \quad \text{otherwise.}
 \end{aligned}$$

- (c)充電相で起こる場合、(cd)相境界で起こる場合、(d)ダスト相で起こる場合を仮定し臨界数密度を求める。
- 3つのうちから1つをルールにしたがって選ぶ。

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{crit}}^{(c)} &= 1.1 \times 10^3 \left( \frac{\Delta q_{A,C}}{6.2 \times 10^2 \text{ e}} \right)^{-\frac{1}{4}} \left( \frac{n_g}{4.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{n_S^{\infty}}{8.8 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{3}{4}} \left( \frac{n_L^{\infty}}{4.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{4}} \\
 &\quad \left( \frac{r_S}{1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}} \right)^{-\frac{5}{4}} \\
 &\quad \left( \frac{\zeta}{1.0 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{\Delta v_{L,S}}{3.4 \times 10^3 \text{ cm sec}^{-1}} \right)^{-\frac{1}{4}} \left( \frac{u_L}{3.4 \times 10^3 \text{ cm sec}^{-1}} \right)^{-\frac{1}{4}} \\
 &\quad \left( \frac{\Delta W_{\text{ion}}}{15.4 \text{ eV}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{T}{1.7 \times 10^2 \text{ K}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (124)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta^{(cd)} &= 3.3 \times 10^2 \left( \frac{\Delta q_{A,C}}{6.2 \times 10^2 \text{ e}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{n_g}{4.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{n_S^{\infty}}{8.8 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{n_L^{\infty}}{4.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{r_S}{1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{r_L}{1.0 \text{ cm}} \right)^{-\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{\zeta}{1.0 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{\Delta v_{L,S}}{3.4 \times 10^3 \text{ cm sec}^{-1}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (125)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{crit}}^{(d)} &= 5.9 \times 10^1 \left( \frac{\Delta q_{A,C}}{6.2 \times 10^2 \text{ e}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{n_g}{4.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{n_S^{\infty}}{8.8 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \\
 &\quad \left( \frac{r_S}{1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{r_L}{1.0 \text{ cm}} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{\zeta}{1.0 \times 10^{-18} \text{ sec}^{-1}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{u_L}{3.4 \times 10^3 \text{ cm sec}^{-1}} \right)^{-\frac{1}{2}} \\
 &\quad \left( \frac{\Delta W_{\text{ion}}}{15.4 \text{ eV}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{T}{1.7 \times 10^2 \text{ K}} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (126)
 \end{aligned}$$

# 雷が生じる $\eta$ の解析的見積もり(一例)

MMSN,  $r = 2.7\text{AU}$ ,

ガス : Sダスト : Lダスト =  $1 : 10^{-2} \eta : 10^{-3} \eta$

モノマーサイズ  $r_m = 10^{-5} \text{cm}$

$D_S = 2.0$

$D_L = 2.4$

$r_S = 10^{-2} \text{cm}$

$r_L = 10^2 \text{cm}$

$m_S = 3.9 \times 10^{-9} \text{g}$

$m_L = 1.5 \times 10^2 \text{g}$

$n_S = 4.0 \times 10^{-2} \times \eta \text{ cm}^{-3}$

$n_L = 1.0 \times 10^{-15} \times \eta \text{ cm}^{-3}$

電荷分離するような衝突の断面積:

$$\sigma_{SL} = r_S r_L = 1.0 \text{ cm}^2$$

ダストの相対速度は氷破壊速度と仮定:

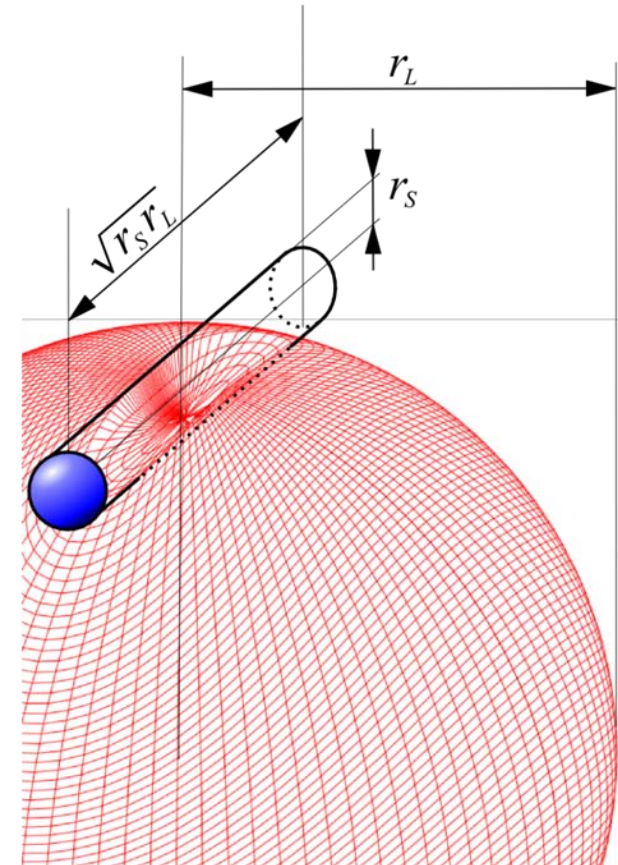
$$v_{SL} = 3.4 \times 10^3 \text{ cm/s (Wada et al.2008)}$$

LダストにSダストがかすり衝突する頻度:

$$\sigma_{SL} n_S v_{SL} = 140 \eta^2 \text{ s}^{-1}$$

単位体積あたりの衝突イベント数:

$$\sigma_{SL} n_S n_L v_{SL} = 1.4 \times 10^{-13} \eta^2 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$



氷表面の電荷面密度：

$$\sigma_{\text{ch}} = 6.2 \times 10^9 \text{ e cm}^{-2}$$

接触時の電荷交換効率：

$$\eta_{\text{ch}} = 10^{-1}$$

以上の知識は気象学より継承(e.g. Dash et.al. 2001)

一回の衝突あたりの接触面積：

- $S_{\text{kiss}} = r_S^{3/2} r_L^{1/2}$  Lダストが稠密な場合
- $S_{\text{kiss}} = r_m^{2-DL} r_S^{5/2} r_L^{DL-5/2}$  Lダストが疎な場合

上記2つのうちの最小値。今回は下の場合になり、

$$S_{\text{kiss}} = 6.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

一回の衝突イベントあたり分離される電荷：

$$\Delta q = \sigma_{\text{ch}} \eta_{\text{ch}} S_{\text{kiss}} = 4.0 \times 10^5 \text{ e}$$

単位体積あたりのダスト衝突による電荷分離：

$$J_{\text{SL}} = \Delta q \sigma_{\text{SL}} n_S n_L v_{\text{SL}} = 5.5 \times 10^{-8} \eta^2 \text{ e cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

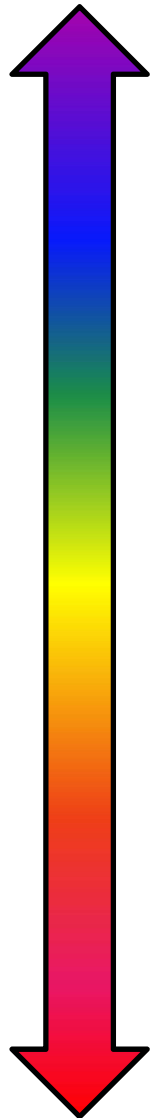
$$J_{\text{ie}} = e \zeta n_g = 4.7 \times 10^{-5} \text{ e cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

雷がおちるところ：

$$J_{\text{SL}} = J_{\text{ie}} \quad \therefore \eta = 29$$

ダストがfluffyであること  
複数成分ダストを考えること  
ダストを濃集させること  
いずれもが雷発生に重要

# 円盤雷の観測可能性



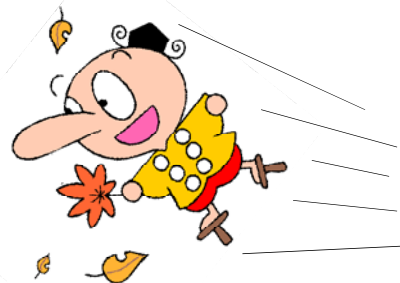
- $\gamma$ 線: 最高エネルギー  $3 \times 10^{11}$  eV
  - 地上の雷雲からは、落雷の直前に、雷雲電場で加速された電子によると思われる $\gamma$ 線が観測されている。(e.g. Tsuchiya et al. 2007; Enoto et al. 2008)
- 紫外line
  - 雷の電離電子により様々なlineが出るだろう
  - 吸収されずに観測できるか？
- 赤外image
  - 雷による円盤のHeating? 他の熱源と区別する鍵はVariability/Correlation? (雷の伝搬は電離電子の速度なので音速より速い)
- ALF wave: 最大波長  $\sim 0.1$  AU
  - 地上の雷雲はScale Height程度の波長のELF電磁波を出す(e.g. Koshak & Krider 1989)

# 結論

- ダストの半径、フラクタル次元、数密度の変化を考慮して、氷ダスト同士の衝突帯電を含んだ原始惑星系円盤での電荷配分の平衡を解いた。
- 1. ダスト数密度 $\eta$ を変えるとダストの帯電量はどうか？ → **4つの相を経験する。**
- 微惑星形成を議論するにあたっては、ダスト同士の衝突帯電を無視することはできない。 (プラズマ吸収 → 負のみ、ダスト衝突 → 両符号の大きな帯電)
- 2. ダストの性質を変えると雷が起こる $\eta$ はどの程度か → **Fluffyならたった10倍、100倍の数密度で雷は可能!!**
- 衝突帯電により、ダストがプラズマを吸収し尽くし、静電破壊 = 雷が起こる可能性も十分ありうる。
- 斬新な観測から円盤雷の証拠がつかめるかも??

10月8日はおこたこの日

# 汎用グラフィックボードによる ダストプラズマの電荷平衡の 計算について



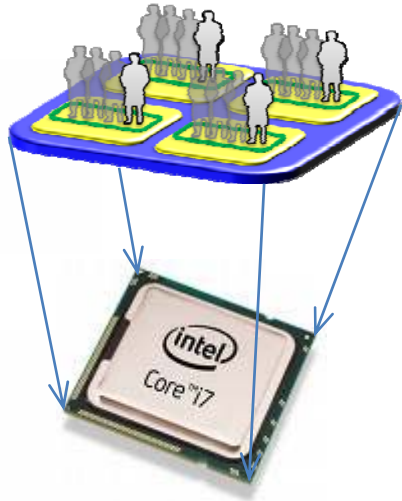
(株)天狗缶詰

TENGU

Tenmon GPGPU cluster  
@ Kyoto University

京都大学  
村主崇行

# 汎用グラフィックボード, General Purpose Graphic Processing Unitとは CPU



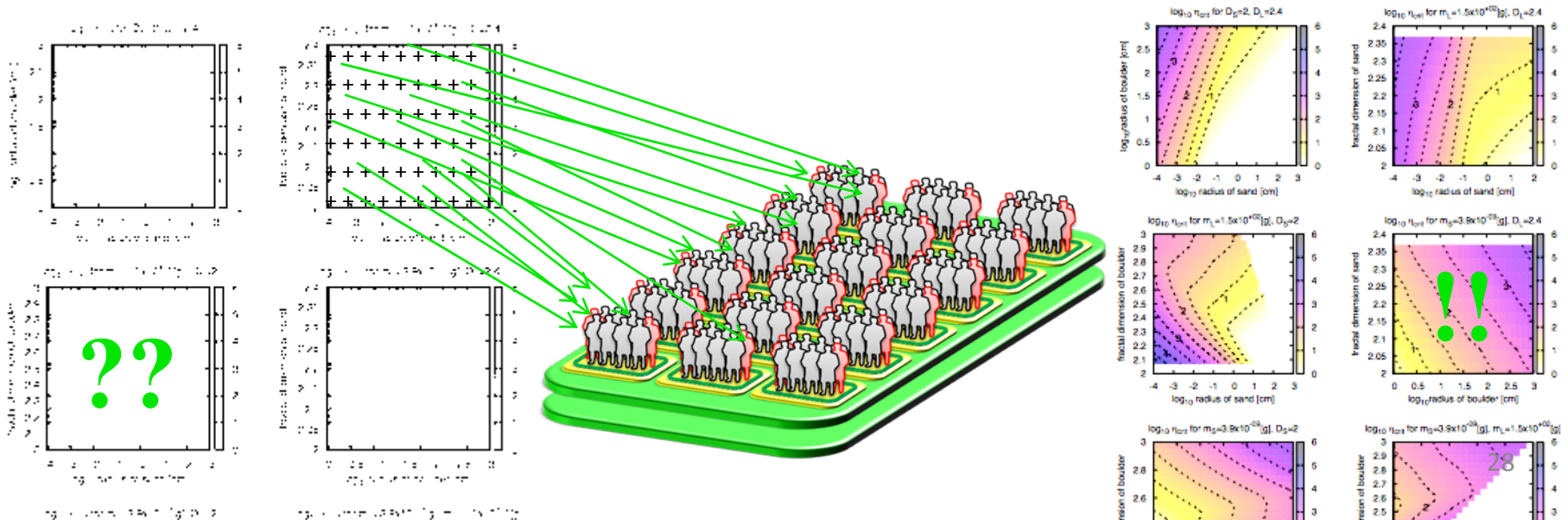
GPU

- パソコンの画面を描く部品、比較的安価(最大5万円)ながら数百個の計算機を内蔵し、膨大な並列計算能力を持つ
- その性能を一般の数値計算に利用するのが汎用グラフィックボード(GPGPU)計算



# GPUによる雷条件のパラメータサーチ

- ダストの半径 $r_S, r_L$ とフラクタル次元 $D_S, D_L$ の組み合わせ36万通りについて、それぞれ雷が起こる瞬間の濃集度 $\eta$ を計算した。
- 各計算ユニットにパラメータを分担させればいいので、パラメータサーチではGPUの計算力が最も容易に利用できる。



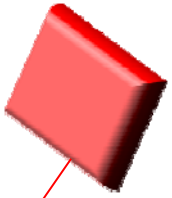
# 速報

複数のコンピュータが協力して数値計算すること



解析解をあてはめて、衝撃波をきちんとシミュレートできる手法

衝撃波のない所では、精度を上げてシミュレートする手法



- MPI GPU Full Godunov 2<sup>nd</sup> order MUSCL 3次元  
一様メッシュ Euler方程式ソルバーができました

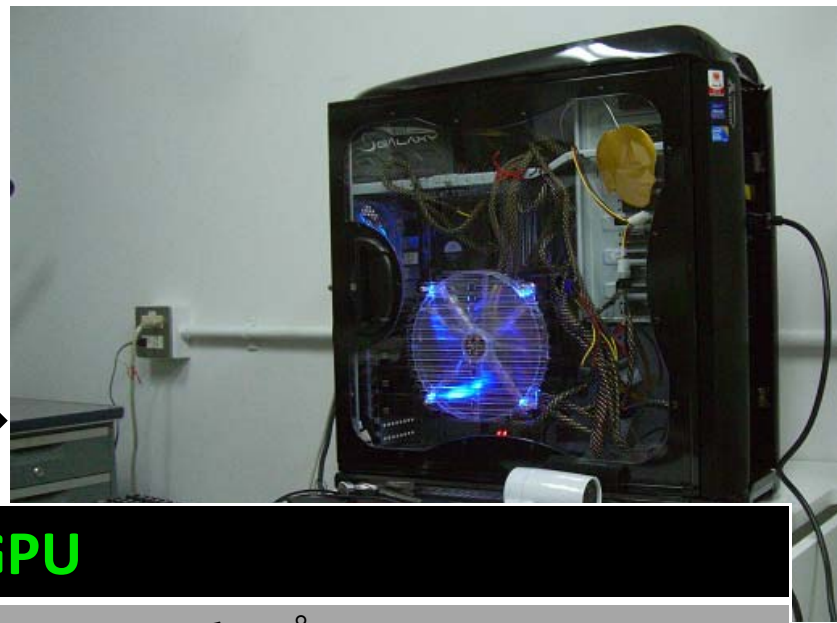
AMRとかはとくになし

圧縮性流体の基礎方程式、粘性なし

- GPUが複数装備されたマシンを複数台連結したクラスタ上で流体計算が実行できます
- テスト駆動開発なのでさまざまなテストが済んでいます

# 計算速度

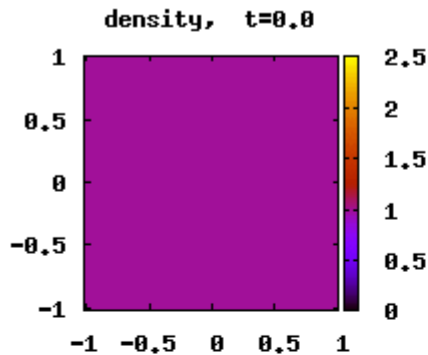
このパソコン1台で →



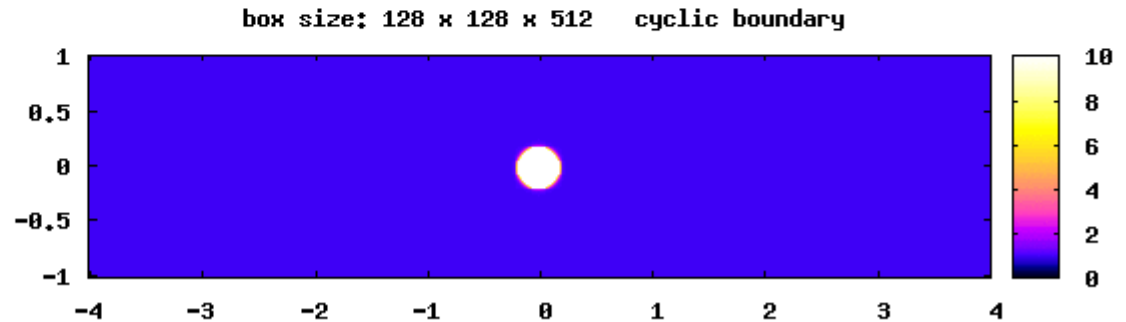
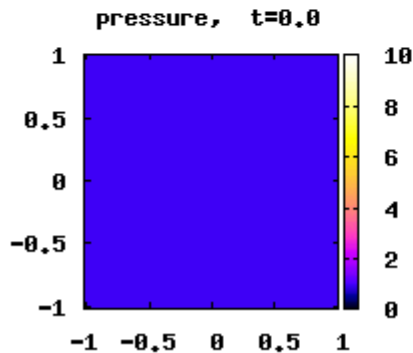
	CPU	GPU
ハード 問題設定	Core i7 920, シングルスレッド 128 x 128 x 128, 斜め衝撃波問題, 0.12 sound crossing time	GTX 295 , 1チップ
所要時間 速度比	8分 46.887 秒 1	7.509 秒 70
ハード 問題設定	Core i7 920, シングルスレッド 128 x 128 x 512, Blast 問題, 1.6 sound crossing time (長辺)	GTX 295 , 4チップMPI
所要時間 速度比	1日 2時間 39分 46秒 1	9分 13.437 秒 173

並列計算!

PRELIMINARY (CPU/GPUいずれも未最適化コードです)



ダスト衝突帯電の物理の詳細についてポスターで説明しています。



- ◆ 原始惑星系円盤で雷があった場合の観測可能性
- ◆ GPUの応用先について
- ◆ そのほか何でも！！

→ P57b

ポスターの前でご指導・ご意見を賜りますようお願いしております！！