

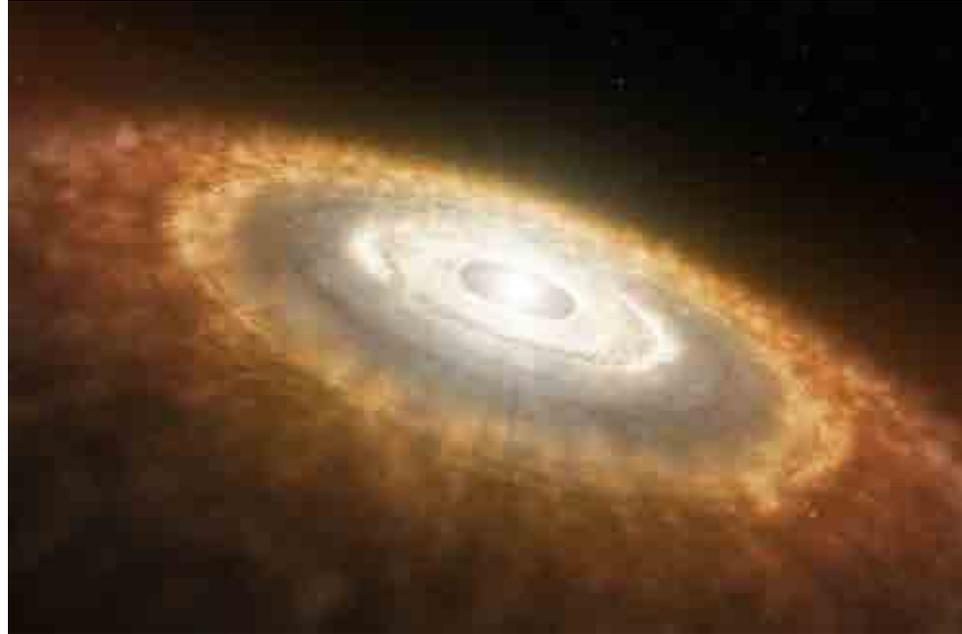
ALMAによる原始惑星系円盤の 「雷」の観測可能性

京都大学次世代研究者育成センター

通称:白眉センター 特定助教

村主崇行

原始惑星系円盤

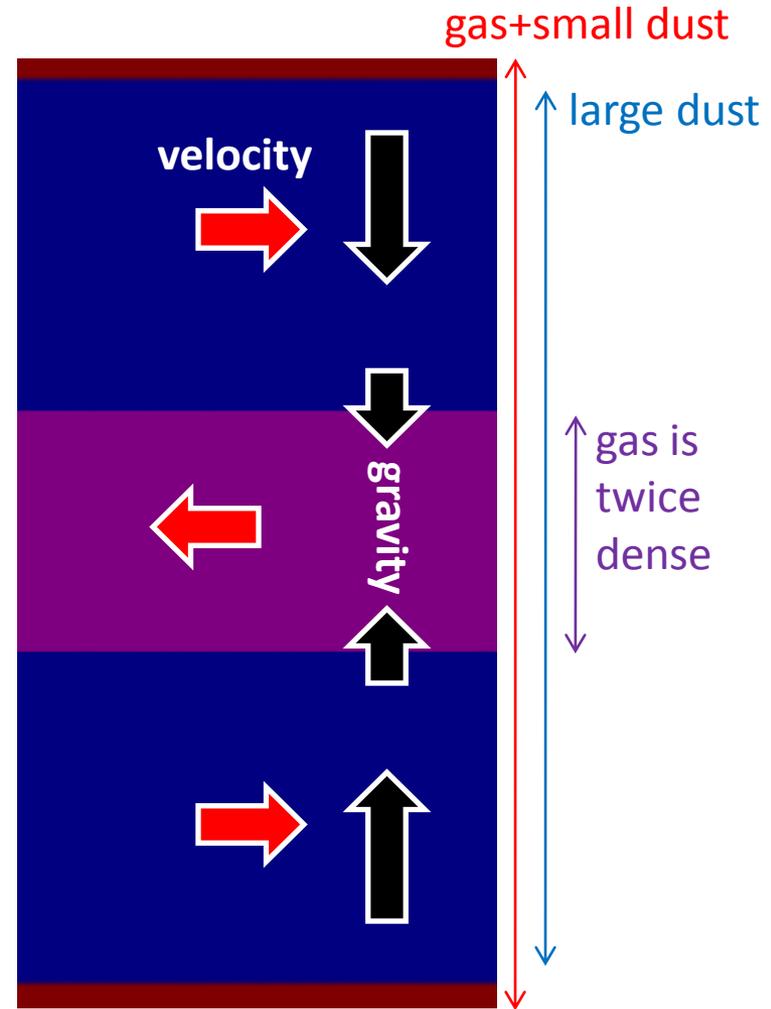
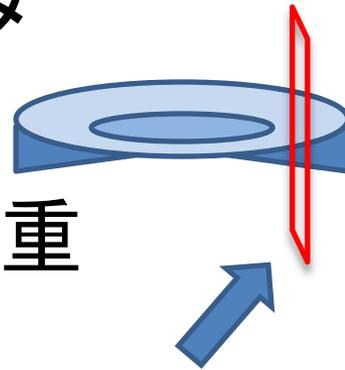


Artist's impression of a baby star still surrounded by a protoplanetary disc in which planets are forming.
ESO/L. Calçada

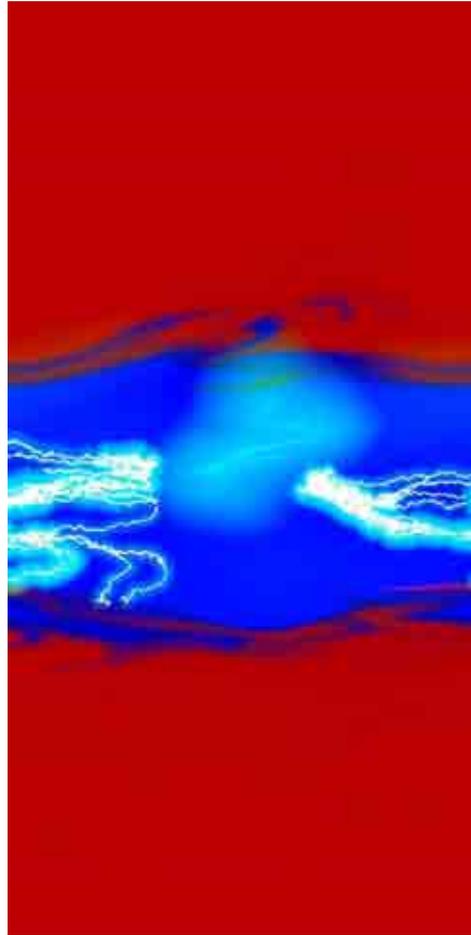
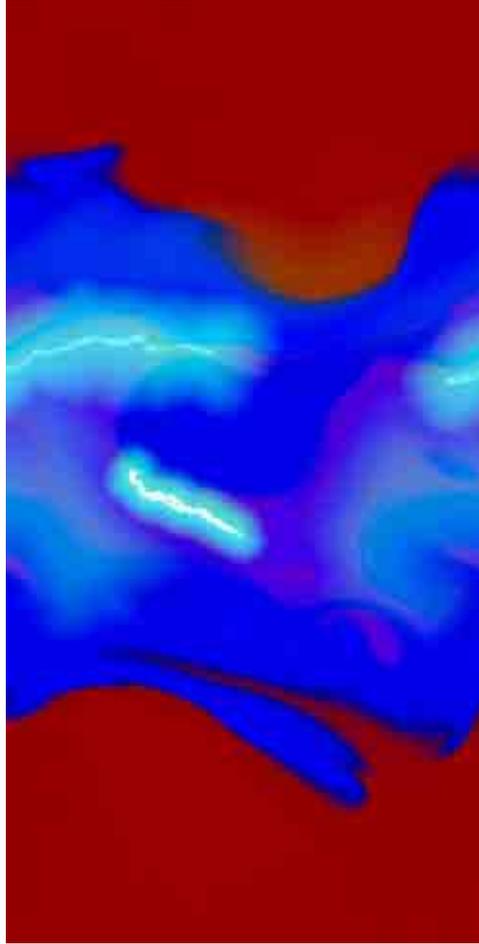
- 生まれたばかりの恒星の周りに形成される
- 水素分子を主とするガスと、氷・岩石・金属などの微粒子ダスト(半径 μm 程度)からなる降着円盤
- 惑星形成の現場

雷のテスト計算

- 2次元モデル
- 円盤の φ - z 断面
- ガス成分(赤), ダスト成分(青)
- 赤道面へ向かう重力
- KH不安定性を引き起こすため、中央紫の部分に逆向きの初速と密度差を与える。



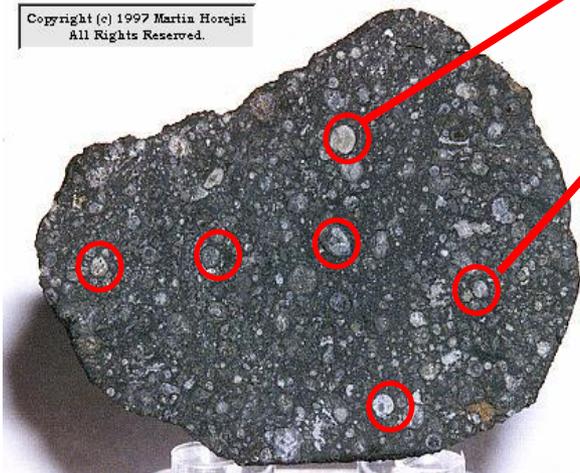
ムービー



原始惑星系円盤での「雷」の先行研究

- コンドリュール(過去に千数百度もの加熱を受けた痕跡がある岩石の粒)の形成を説明する候補として、古くから研究されてきた。

コンドリュール



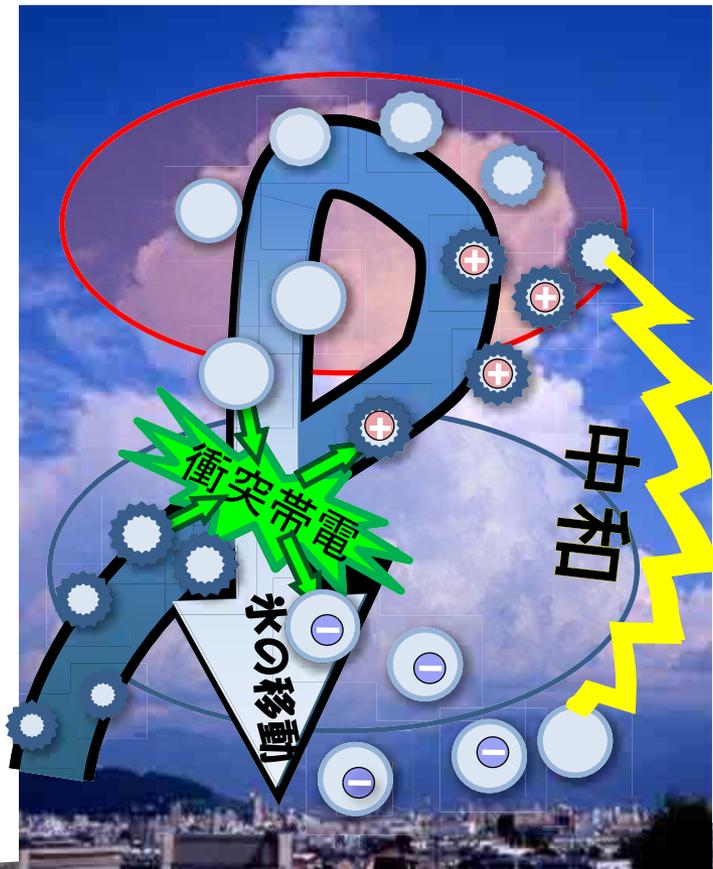
コンドリュール雷原因説の弱点は……

雷のおこるメカニズムが説明できなかったこと。

雷を説明しうる2つのモデル

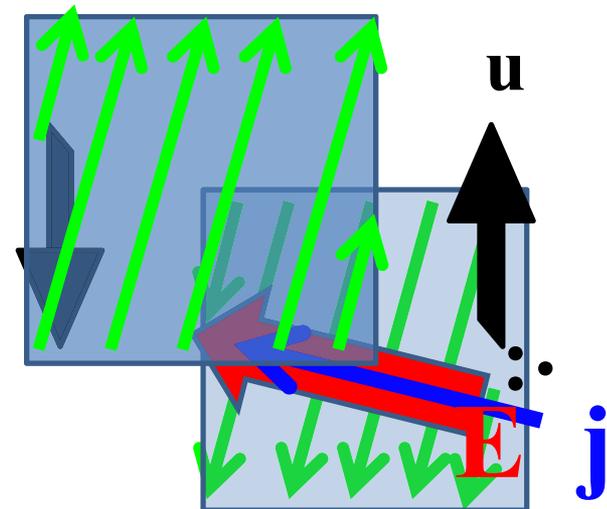
Muranushi 2010

- 地上の雷と同じメカニズム。氷粒子の衝突帯電による。



Inutsuka & Sano 2005

- Resistive MHD過程 (電気抵抗入り磁気流体力学) により、雷が起こるような電場を発生させる。固体粒子を必要としない。



「雷」の理論は分からないことばかりですが、
「雷」の観測や、観測的制限があれば、
円盤の電磁気過程を解く重要なカギに！



雷モデルの不定性はともかく

- 1発の雷の典型的エネルギーや持続時間は、実は雷モデルによらず、ガスの数密度などから決まる。

平均自由行程： $l = 1.2 \times 10^2$ [cm]

静電破壊電場： $E = 4.3 \times 10^{-4}$ [G]

電子のエネルギー： $eE l = 15.4$ eV

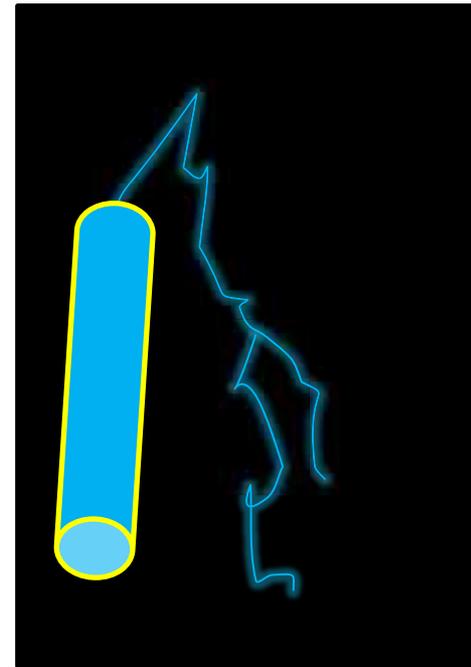
円盤の厚み： $H = 2.4 \times 10^{12}$ [cm]

雷のエネルギー： $E^2/8\pi \times H^3$

$$= 4.3 \times 10^{29}[\text{erg}]$$

稲妻の形

- 地上では、稲妻の太さは平均自由行程の～5000倍になることが知られている。これをこのまま使う。
- ざっくりと、
 - 長さ $H = 2.4 \times 10^{12}[\text{cm}]$
 - 太さ $5000l = 6 \times 10^5[\text{cm}]$ の筒の中に
 - 15.4eV の電子が
 - $4.3 \times 10^{29}[\text{erg}]$ ぶん満ちている
 - 持続時間は $10^4[\text{sec}]$ 。
 - Energy Budget から頻度の上限は～10秒
- この物体がALMAで観測できるか？



基本的な確認

全エネルギーをこめれば……

$$\frac{4.3 \times 10^{29}[\text{erg}] \quad 10^{23}}{10^4[\text{sec}] \quad (100\text{pc})^2 \quad 300\text{GHz}} = 1.4\text{Jy}$$

- ALMAは0.1mJyとかが観測できる。
- デフォルトの輻射帯域は紫外線なので、今まで観測されていないのと矛盾はしない
- ALMAの帯域にこのエネルギーの一部を持ってくるメカニズムは？

候補

- サイクロトロン輻射
- プランク輻射のTail
- 荷電分子のラインを速度分解
- 放電によって生じた新分子種
- ノイズからの掘り起こし(nongaussianity)
- afterglow

電子サイクロトロン輻射

$$\omega = eB/mc$$

- $B = 6[\text{G}]$ とするとデフォルトでは0.1GHz
- ALMAの帯域は 31.3GHz~950GHz
- 周波数を上げるには磁場を増幅するしかない
- Equipartitionだと3500[G]まで磁場増幅が可能
これで50GHzくらいにはなるが。
- 雷リーダー(先端部)では強烈な磁場増幅がある
かも??

プランク輻射のTail

- かりに先ほどの円筒が、電子による加熱とプランク輻射で熱平衡になるとすると $T = 800\text{K}$
- 円筒を横から見たとして 900GHz帯域なら

$$\sim 10^{20}[\text{erg/s}] \quad \rightarrow \quad 3\mu\text{Jy}$$

荷電分子のラインを速度分解

- 1価の正・負イオンになっている分子がそれなりの数いる。
- そいつらも雷電場に加齢される。平均自由行程も同じ。よって、電子と同じだけの運動エネルギーを得る。
- 分子量30の分子で7km/s 程度
- この速度で動いている分子の回轉準位等を観測すれば、熱速度としては有り得ないので加速の決定的証拠となる。
 - すぐに中性分子と衝突し、解離してしまつて困難？
 - 逆に励起されかつ高速な中性分子を生んで有利？

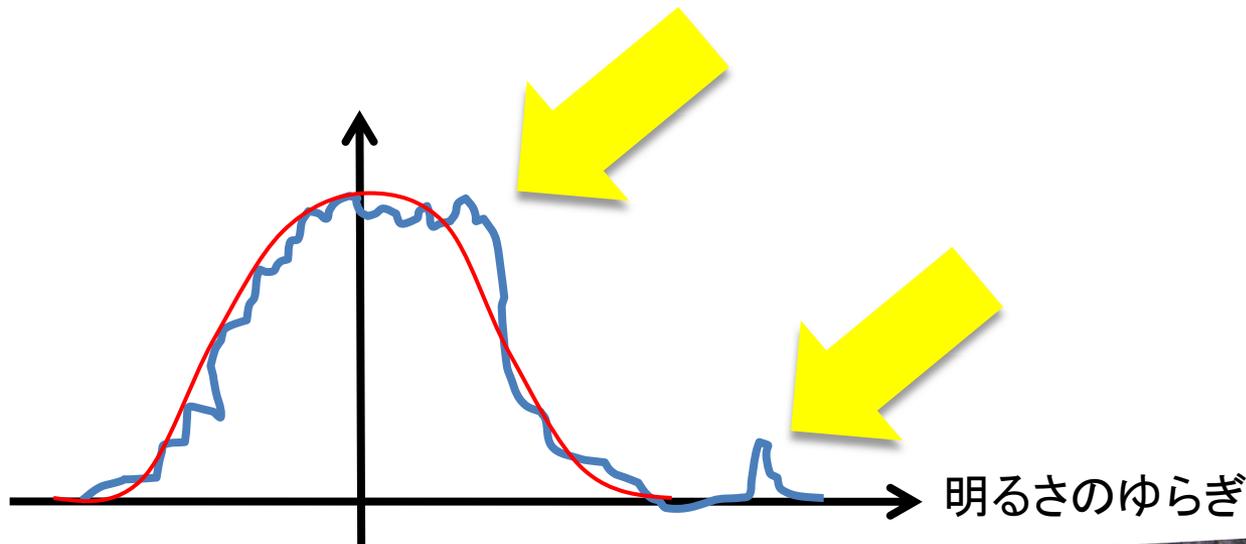
放電によって生じた新分子種

- 何が生じるか？
- ダストが雷に打たれた時が面白い？
- アミノ酸とか？

→ 生命円盤起源説

ノイズからの掘り起こし (nongaussianity)

- 原始惑星系円盤のImagingをすると、雷が含まれるピクセルは明るい。
- イメージの各ピクセルの明るさのヒストグラムを1時間ごとととかに作って、明るいピクセルが有意に多いか議論する。統計をためること勝負



afterglow

- 雷のエネルギーが巡り巡って一部がALMAで観測できる準位に分配される

狙うべき円盤の種類

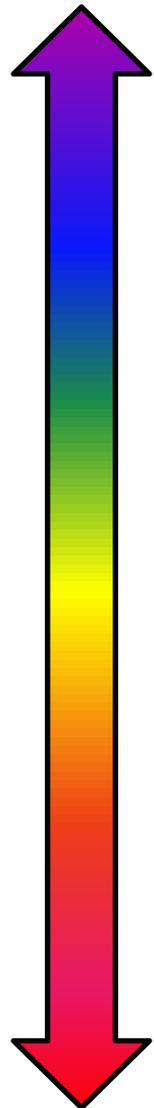
☆氷ダストモデルの場合

- 円盤の中で雷が最も激しく起こると目される領域はダスト数密度が最大になるSnow line付近。したがってSnow lineが大きくなる大質量星周りの原始惑星系円盤が良い？

☆MRIモデルの場合

- MRIの激しい円盤がいい。Dead Zoneが形成できるだけの量のDustが必要。

その他の波長による観測



- γ 線: 最高エネルギー 3×10^{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 γ 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 ~ 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)