

帯電原始星における種磁場増幅と二重層効果によるプラズマ中和抑制の可能性

宮城県仙台二華高等学校2年 今井 拓心

背景

- 原始星の形成段階で磁場は「形成時間の遅延」「角運動量の輸送」などの役割を果たす
→観測はミリガウス程度の磁場の存在を示唆
- しかし**その磁場の起源は未解明**

論点

- 「原始星の帯電」により磁場は生成されるか
Ⅰ 原始星は形成環境の下で帯電可能か？
Ⅱ 要求電荷はどのような条件で達成されるか？
Ⅲ そのような条件は形成可能か？

議論Ⅰ：原始星の帯電可能性

摩擦があり、電場 E 、重力場 g の下で粒子の運動は

$$m \frac{dv}{dt} = mg + qE - \gamma mv \quad (1.1)$$

で記述される。仮に $E(0) = 0, v = 0$ のとき $v \sim gt$ である。しかし衝突、慣性差から電子、イオン、ダストの変位は

$$x_e > x_i > x_d \sim gt^2 \quad (1.2)$$

を満たす。これにより電荷密度 $\rho \neq 0$ が成り立ち、電場は $\epsilon \nabla \cdot E = \rho$ に従って発生する。 $\dot{v} \propto \frac{q}{m} E, m_i \gg m_e$ から正負の電荷の降着には十分な時間差があり、原始星の持つ電荷 $Q(t) \sim t^2$ のスケールで成長していくと考えられる。

議論Ⅱ：要求電荷の決定

帯電した原始星が自転すれば種磁場が作られる。しかしその磁場は非常に微弱であり、十分な増幅が必要になる。

Part1:種磁場 B_{seed} の決定

周期 P で自転する半径 R の原始星が電荷 Q を持つとき、

$$B_{seed} = \frac{\mu_0 2\mu}{4\pi R^3} = \frac{\mu_0 Q}{5RP} \quad (2.1)$$

Part2:増幅機構について

ダイナモ増幅の発生を考える。目標磁場 B_{target} への増幅時間は $t_{amp} = \tau_{ed} \ln \frac{B_{target}}{B_{seed}}$ で与えられる^[1]。

Part3:中和抑制機構について

二つの中和抑制機構を考える。

①磁気ミラー効果

磁場の分布ずれはロスコーンを形成し、電子を抑制する。効果を $S_{mirror} = 2R_m = 2B_{max}/B_{min}$ と定義する。

②電気二重層効果

仮に**原始星周辺で二重層が形成されるとすると**、二重層の容量 $C = \frac{Q}{\phi} = \frac{\epsilon_0 A}{d}$ が主要なパラメータになる^[2]。幅をラムダスケールの定数倍 $d = \sigma_d \lambda_d$ 、厚みをスケールハイトの数倍 $A = 2\pi R \sigma_A h$ とする。また、歪み $\Lambda = \sigma_d / \sigma_A$ を定義する。二重層はポテンシャル制御により透過電子数を指数的に減らす。これは周辺環境の温度 T にも強く依存する。

効果を $S_{DL} = \exp\left(\frac{e\phi}{kT}\right) = \exp\left(\frac{\Lambda Q}{2\pi R h \sqrt{n_e \epsilon_0 k_B T}}\right)$ で定義する。

Part4:要求電荷方程式

以上の中和抑制機構から、プラズマ中和時間 $t_{pla} = \omega_p^{-1}$ は $S_{mirror} S_{DL}$ 倍に遅延される。これを t_{amp} と比較して、

$$\tau_{ed} \ln\left(\frac{5RPB_{fin}}{\mu_0 Q}\right) < 2R_m \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e}{n_e e^2}} \exp\left(\frac{\Lambda Q}{2\pi R h \sqrt{n_e \epsilon_0 k_B T}}\right)$$

$$Q_{req} = \frac{2\pi R h \sqrt{n_e \epsilon_0 k_B T}}{\Lambda} \ln\left(\frac{\tau_{ed}}{2R_m} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \ln\left(\frac{5RPB_{fin}}{\mu_0 Q_{req}}\right)\right) \quad (2.2)$$

という方程式を得る。この方程式を要求電荷 Q_{req} について解けばよい。

Part5:方程式の解について

方程式(2.2)は単純な形に近似できる。ここで各パラメータを以下の値で定める^[3]。
 $R \sim 3R_{sun}, P \sim 5\text{day}, \tau_{ed} \sim 10^3\text{yr}, T \sim 300\text{K}, n_e \sim 30\text{cm}^{-3},$
 $M \sim 0.1M_{sun}, R_m \sim 10 \sim 10^3, B_{fin} \sim 10^{-4} \sim 10^{-2}\text{G}$ で探索すると、

$$\ln\left(\frac{\tau_{ed}}{2R_m} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \ln\left(\frac{5RPB_{fin}}{\mu_0 Q_{req}}\right)\right) = \ln\left(\frac{\tau_{ed}}{2R_m} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}\right) + \ln \ln \frac{5RPB_{fin}}{\mu_0 Q_{req}}$$

~16 に収束することがわかる。よって式は、

$$Q_{req} \sim \frac{10^7}{\Lambda} [\text{C}] \quad (2.3)$$

と近似される。

一般に星の蓄えることができる電荷は重力とクーロン斥力の釣り合いから $Q_{Nes} \sim 10^2 (M/M_{sun})$ である^[4]。これを式(2.3)と比較して、結果的に $\Lambda \sim 10^6$ を得る。この値は、**極方向にミリスケールハイト、赤道方向にキロデバイスケール程度の厚みを持つ二重層**であることを示す。

議論Ⅲ：二重層安定性

二重層はコンデンサーとしてエネルギーと電荷を保持

→ $U_{req} \sim 10^{-10}\text{J}, I_{req} \sim 10^{-4}\text{A}$ 程度

降着流... $U_{acc} \sim 10^{24}\text{W}, I_{acc} \sim 10^{16}\text{A}$

→これらの $f \sim 10^{-20}$ 程度の影響で容易に維持

二重層の帯びうる不安定性

Ⅰ 二流体不安定性...ドリフト速度 $\tau_{ed}^{-1} \ll$ 音速より起こらない

Ⅱ 電位差自己崩壊... $e\phi \gg kT$ から起こりえる

→ $I_{acc} \gg I_{req}$ より補完は非常に早い

結論

原始星の帯電と二重層効果の寄与は、星形成領域での磁場の生成について、革新的かつ好意的な結果を与えた。本研究は**既存理論への補助的**な立ち位置に位置しており、既存理論を否定し完全に別の理論として提唱しているわけではないことに注意されたい。また、二重層の形成及びその維持については未だ決定的な理論は存在しない。

課題

星形成環境では放射冷却が活発であるため、 $T(t)$ が鋭敏である可能性がある。このとき、温度の急激な減少に伴い中和時間は長くなり、より少ない歪みで要求電荷が満たされる可能性がある。また、観測的方針としては、この理論に基づく $R \sim 3R_{sun}$ 程度の段階の原始星周辺でミリガウス程度の磁場が形成されている可能性がある。

参考文献

- [1] Brandenburg, A. and Subramanian, K. (2005). Astrophysical magnetic fields and nonlinear dynamo theory. Physics Reports, 417, 1–209.
- [2] Raadu, M. A. (1989). The physics of double layers and their role in astrophysics. Physics Reports, 178, 25–97.
- [3] Crutcher, R. M. and Kemball, A. J. (2019). Review of Zeeman Effect Observations of Regions of Star Formation. arXiv:1911.06210.
- [4] Neslusan, L. and Hajdukova, M. (2019). Long-period comet C/1963 A1 (Ikeya), the probable parent body of pi-Hydrids, delta-Corvids, November alpha-Sextantids, and theta-Leonids. Astronomy & Astrophysics, 631, A112.