

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

今井 拓心 (高2) 【宮城県仙台二華高等学校】

要 旨

本研究では、原始星系の種磁場がどのように形成され成長するかを、原始星の帯電可能性とその維持という観点から理論的に考察した。その結果、帯電した原始星の自転による種磁場に対し、極方向にミリスケールハイト、赤道方向にキロデバイ長程度の厚みを持つ二重層の発生により、ミリガウス程度の磁場を形成可能であることが示された。

1. 前提

原始星形成において磁場は角運動量輸送や形成時間スケールを決定する重要な役割を担うが、種磁場がどのように形成されるかは未解決である。本研究では、形成初期の原始星核が有限の電荷を帯び得る可能性に着目し、自転する帯電原始星による種磁場生成と、その後のダイナモ増幅過程における二重層効果の寄与について検討した。

2. 要求電荷方程式

種磁場 B_{seed} を目標磁場 B_{fin} までダイナモ増幅するために要する時間 $t_{dyn} = \tau_{ed} \ln(B_{fin}/B_{seed})$ [1]と二重層効果、磁気ミラー効果により引き伸ばされたプラズマ中和時間 $t_{pla} = S_{DL} S_m \omega_p^{-1}$ が一致するとして方程式を作る。

種磁場は帯電した原始星が自転することにより形成される。一様帯電球の自転磁気モーメントはその半径 R 、自転周期 P 、総電荷によって決定され、種磁場 B_{seed} も求めることができる。

原始星表面に形成される二重層の厚みを極方向に縮められたスケールハイト eh 、赤道方向に引き伸ばされたデバイ長 $\sigma\lambda_d$ とすると、 $\sigma/\varepsilon \equiv \Lambda$ で定義される無次元の歪み Λ 、保持電荷 Q を用いて二重層をコンデンサーと見立てれば、その静電容量を定義することにより、電位 φ を決定することができる。このとき、系がボルツマン分布であれば、 $S_{DL} = \exp(e\varphi/k_B T)$ であろう [2]。磁気ミラー効果については $S_m = 2 B_{max}/B_{min} = 2R_m$ とする。

以上の式をそれぞれ代入、連立すれば、要求電荷 Q_{req} を定める方程式として次式を得ることができる。

$$Q_{req} = \frac{2\pi R h \sqrt{n_e \varepsilon_0 k_B T}}{\Lambda} \ln\left(\frac{\tau_{ed}}{2R_m} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e} \ln\left(\frac{5RPB_{fin}}{\mu_0 Q_{req}}\right)}\right) [C]$$

この式は計10個のパラメータを内包する。特に電離電子密度 n_e 周辺温度 T は鋭敏な時間変数である可能性があるが、次の議論を参照して今回は変数を Λ のみとして Q_{req} を探索する。

上の式は $\ln(a \ln(b))$ という形を含むが、原始星の代表値として $R \sim 3R_{sun}$ 、 $P \sim 5\text{day}$ 、 $\tau_{ed} \sim 10^3\text{yr}$ 、 $T \sim 300\text{K}$ 、 $n_e \sim 30\text{cm}^{-3}$ などを代入し、 $R_m \sim 10 \sim 10^3$ 、 $B_{fin} \sim 10^{-4} \sim 10^{-2}\text{G}$ [3]程度の範囲を探索すると、対数項はほとんど16程度に収束することがわかる。同様に線形定数も数値として求めれば、最終的に、以下のような数値式が得られる。

$$Q_{req} \sim \frac{10^7}{\Lambda} [C]$$

星が電荷をもつとき、重力よりもクーロン斥力が勝らない最大電荷として $Q_{Nes} \sim 10^2 (M/M_{sun})$ が存在する [4]。ここで原始星の代表質量 $M \sim 0.1M_{sun}$ を考慮すれば、上式から $\Lambda \sim 10^6$ が要求されることがわかる。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長の厚みを持つ二重層であることを示す。

3. 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している。これらはおおよそ $U_{req} \sim 10^{-10}\text{J}$ 、 $I_{req} = 10^{-4}\text{A}$ 程度であり、電荷は漏れ続けていることを考慮した。ここで、周辺環境において $U_{acc} \sim 10^{24}\text{W}$ 、 $I_{acc} \sim 10^{16}\text{A}$ であることから、これらの $f = 10^{-20}$ 程度の影響で容易に維持することが可能であることがわかる。

二重層の帯びうる不安定性について、二流体不安定性と電位差自己崩壊について考える。前者はドリフト速度が音速を超えていれば起こりうる不安定性であるが、 $\tau_{ed} \sim 10^3\text{yr}$ 程度の環境では極めて小さいことがわかる。後者については $e\varphi \gg k_B T$ のときに起こりうる不安定性であるが、今回 $e\varphi/k_B T \sim 100$ 程度であるため、起こりうる可能性がある。しかし、先ほど述べた通り、 $I_{acc} \sim 10^{16}\text{A}$ という環境では、小さな綻びはすぐ保管されるであろう。

4. 非線形効果発展及び観測の方針

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、 $T \downarrow = n_e \downarrow = \tau_{neu} \uparrow$ という増減関係から、より少ない歪みで要求電荷が満たされる可能性がある。これは今後の課題である。

また、観測の方針としては、初期段階でのミリガウス程度の磁場、またそれによる偏光などが挙げられる。これらをアルマ望遠鏡などで観測することができれば、以上の理論を支持することとなる。

5. 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。

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.