

## マグネターの強磁場中における電流シートの時間発展

竹重 聡史 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室)

### Abstract

$10^{15}\text{G}$  もの非常に強い磁場をもつ中性子星であるマグネターでは質量放出を伴う爆発現象が起きており、そのエネルギーはおおよそ  $10^{44}\text{erg} \sim 10^{46}\text{erg}$  程度にもなることが知られている。この質量放出のエネルギー源はマグネター内部および磁気圏に蓄えられた磁気エネルギーであると考えられており、このエネルギーを短いタイムスケールで粒子の運動エネルギーに変換して放出する物理過程が必要となる。このような機構として、太陽での爆発現象において重要な役割をもつと考えられている磁気リコネクションを提案する。本研究では反平行な成分をもつ磁場における磁気リコネクションを考えるために磁場中の電流シートがどのように時間発展するかを考察した。太陽での爆発ではこのような磁場構造では、電流シートが種々の不安定性によって薄くなることで散逸が起こり磁気リコネクションが起こることが知られている。しかしプラズマがマグネターと共回転していることを仮定して見積もられる電子数密度 ( $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ) は、電流シートが薄くなったときにそれを維持するのに必要な数密度 ( $\sim 10^{32}\text{cm}^{-3}$ ) よりも非常に小さい。したがって、マグネターで薄い電流シートを得るためには粒子数密度を補う機構が必要となる。このようなものとしては小さな爆発を複数起こすことでマグネター表面の粒子を蒸発させて粒子数を補うことが出来る可能性が指摘されている。本研究では別のアプローチを考え全く新しい物理過程として、マグネターの強磁場によって起こる電子陽電子対生成の効果によって粒子数密度を補うことを考えた。このアイデアをもとに方程式系を線形化して解析解を求め、数値シミュレーションの結果と比較してその一致をみた。本研究は強磁場天体の爆発現象理論の基礎となりうるものである。

## 1 Introduction

### 1.1 強磁場中性子星マグネターでの爆発現象

星の進化の一つの結果として出来る中性子星は一般に非常に短い自転周期と強い磁場 ( $10^{12}\text{G} \sim$ ) をもつ。この星が磁気双極子放射によって自転のエネルギーを消費すると仮定するとその自転周期の減少率から磁場強度 ( $10^{12} \sim 10^{13}\text{G}$ ) を見積もることが出来る。しかしこのような中性子星の中でも一際強い磁場をもつものとしてマグネターが発見され、以来理論観測の両面から様々な物理が研究なされてきた (Thompson & Duncan 1995)。これらの天体は  $10^{15}\text{G}$  程度の非常に強い磁場をもち、非常に大きなエネルギー ( $10^{44}\text{erg} \sim 10^{46}\text{erg}$ ) の質量放出を伴う爆発を起こすことが観測されている (Lyutikov 2006, Masada 2010)。この現象のエネルギー源としては 1. 降着物の重力エネルギーの解放、2. マグネターの自転エネルギー

を磁場のエネルギーに変換しての解放、3. マグネターが初めからもっていた磁気エネルギーが考えられる。まず重力エネルギーの解放である可能性は、マグネターは孤立中性子星であることが知られているためこのような大きな爆発が起きるとは考えにくい。次にマグネターの自転によって磁力線をねじることで自転の力学的エネルギーを磁気エネルギーに効率よく変換出来たと仮定する。このとき、マグネターのもつ運動エネルギー  $E_{\text{rot}}$  はマグネターの慣性モーメントを  $I$ 、自転周期を  $\omega$  として

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2 \sim 10^{44} \left( \frac{I}{10^{45}\text{g} \cdot \text{cm}^2} \right) \left( \frac{\omega}{1\text{s}^{-1}} \right) [\text{erg}] \quad (1)$$

と見積もられるのでこれでは爆発のエネルギーをまかなうことが可能かどうかといった程度である。最後に磁気エネルギー  $E_{\text{mag}}$  であるが、これはマグネターでの典型的なスケールを  $R \sim 10^6\text{cm}$ 、磁場強度

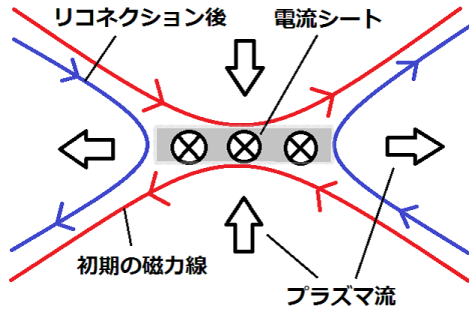


図 1: 磁気リコネクション

を  $B \sim 10^{15} \text{G}$  として次のように評価される。

$$E_{\text{mag}} = \frac{B^2 4\pi R^3}{8\pi \cdot 3} \sim 10^{47} \left( \frac{B}{10^{15} \text{G}} \right)^2 \left( \frac{R}{10^6 \text{cm}} \right)^3 [\text{erg}] \quad (2)$$

したがって爆発のエネルギー源として十分であることがわかり、マグネターの磁気エネルギーが有力であると考えられる。

## 1.2 爆発に必要な物理過程

本研究ではこの磁気エネルギーをプラズマの運動エネルギーに変換するための物理過程を考える。質量放出を伴う爆発現象は太陽で頻繁に見つかっている(太陽フレア)。本研究ではこの現象と類似の過程によってマグネターの爆発現象が説明できないかを考える。太陽フレアの多くは磁気リコネクションによって引き起こされていると考えられている。ここで磁気リコネクションとは磁場のトポロジーの変化によって磁場のエネルギーを効率的にプラズマの熱・運動エネルギーに変換する物理過程であり、これによって短いタイムスケールでの爆発現象を説明することが出来る。

このような速い磁気リコネクションを起こすためにはマイクロなスケールでの磁場の散逸が効くまで種々の不安定性によって磁場中の電流シートが薄くなる必要があることが知られている。太陽フレアが起きる過程では散逸が効果的になるのは電流シー

トがイオンのラーモア半径程度の厚さになりイオンと電子の運動が分離するときであるが、このときの電荷密度を  $\mathbf{J} = \frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}$  から評価すると

$$n \sim \frac{B}{4\pi e r v_e} \geq \frac{B}{4\pi e r} \sim 10^{32} \left( \frac{B}{10^{15} \text{G}} \right) \left( \frac{r}{10^{-9}} \right)^{-1} \text{cm}^{-3} \quad (3)$$

が必要となる。ここで  $e$  は電気素量、 $c$  は光速、 $v_e$  は電子の速度、 $r$  はイオンのラーモア半径である。一方、マグネター上でプラズマが共回転し  $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$  が成り立つと仮定すると必要になる電子数密度は Goldreich-Julian 密度  $n_{\text{GJ}}$  として知られており、

$$n_{\text{GJ}} = 10^{13} \left( \frac{B}{10^{15} \text{G}} \right) \left( \frac{R}{10^6} \right)^{-1} \text{cm}^{-3} \quad (4)$$

で見積もられる (Goldreich & Julian 1969)。したがってマグネター上では  $n_{\text{GJ}}$  程度の電子数密度があると考えられるが、これでは上記の薄い電流シートを保つことが出来ない。

この足りない電子数密度を補うために何らかの物理過程が必要となる。先行して行われた研究としてはマグネター上において小さな爆発現象を起こすことでマグネターの表面を熱し粒子を蒸発させて粒子を補える可能性が指摘されている (Masada et al 2010)。本研究ではマグネターでの強い磁場に注目し、磁場変動によって引き起こされる強電場のもとで起こる電子陽電子対生成によってこの不足を補うことを提案する。電子陽電子対生成は磁場の強さが  $\frac{eB}{m_e c} \geq 2m_e c^2$  を満たせば起こりうる。電子密度の単位時間単位体積あたりの増加率  $W$  は定数  $c_1, c_2$  を用いて

$$W = c_1 E^2 \exp\left(-\frac{c_2}{|E|}\right) [1/\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}] \quad (5)$$

$$c_1 = 7.0 \times 10^{23} [1/\text{V}^2 \cdot \text{cm} \cdot \text{s}]$$

$$c_2 = 1.4 \times 10^{14} [\text{V}/\text{cm}]$$

と表せる (Itzykson., Zuber 1980)。 $\frac{\partial B}{\partial t} + c \nabla \times \mathbf{E} = 0$  より  $B \sim E$  とし、対生成の相互作用時間を

$$\tau \sim \frac{r}{c} \sim 10^{-19} \quad (6)$$

として見積もると生成する粒子数密度は

$$n \sim W\tau \sim 6 \times 10^{34} [\text{cm}^{-3}] \quad (7)$$

と評価できる。ここで  $r$  はイオンのラーモア半径とした。したがって十分な粒子数密度を補うことが出来ると考えられる。本研究ではこの見積もりをもとに電子陽電子対生成の効果を含めたマグネター上での磁気リコネクションモデルを考えるため、線形化した方程式系に従って電流シートが薄くなっていく過程について考察した。

## 2 Methods/Instruments

### 2.1 線形化

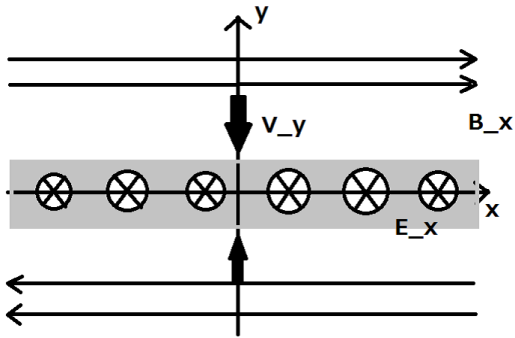


図 2: 自己相似解を満たすような数値シミュレーションに用いる初期条件

ここでは電流シートが薄くなっていく過程を調べるために  $x, z$  軸方向には物理量が対称であるとし、次の方程式系を取り扱う。

$$\frac{\partial n^\pm}{\partial t} = -\nabla \cdot (n^\pm \mathbf{v}^\pm) + c_1 E^2 \exp\left(-\frac{c_2}{|E|}\right) \quad (8)$$

$$n^\pm m \frac{d(\gamma^\pm \mathbf{v}^\pm)}{dt} = -\nabla p \pm ne \left( \mathbf{E} + \mathbf{v}^\pm \times \frac{\mathbf{B}}{c} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = c \nabla \times \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{j} \quad (11)$$

$$\mathbf{j} = e (n^+ \mathbf{v}^+ - n^- \mathbf{v}^-) \quad (12)$$

太陽における同様の過程において、電流シートの時間発展において一種のフラクタル構造が出現すると考えられている。これはすなわち系が自己相似的に時間発展することを示している。したがって方程式を線形化するため式 (8) の右辺第二項を  $E$  の一次に比例する項に置き換え、解析解を求めた。

### 2.2 解析解

この方程式系が図 2 のような反平行な磁場中の電流シートの時間発展を、自己相似解で記述するとする。したがって、

$$\mathbf{v}_e(t, y) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a} y \hat{\mathbf{y}} \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_p(t, y) \equiv \frac{\dot{b}(t)}{b} y \hat{\mathbf{y}} \quad (14)$$

のようにして電子の速度  $\mathbf{v}_e$  と陽電子の速度  $\mathbf{v}_p$  が与えられると仮定する。このとき得られる自己相似解の時間依存性は電流シートが無限に薄くなる時刻の極限を  $t_0$  として

$$t_0 - t \propto B_x^{-\frac{3}{4}} \quad (15)$$

$$t_0 - t \propto E_z^{-\frac{3}{7}} \quad (16)$$

$$t_0 - t \propto n^{-\frac{3}{2}} \quad (17)$$

$$t_0 - t \propto v_{ey}^{-1} \quad (18)$$

$$t_0 - t \propto v_{ez}^{-\frac{3}{2}} \quad (19)$$

として記述された。  $t = t_0$  において物理量が発散するのはシートが無限に薄くなる事が出来るよう自己相似解を求める過程でガスの圧力を 0 としたためであり、実際には非線形な効果によって発散しない。上記の解析解を保存系に書き換え時間に関して二次精度、空間に関して四次精度でシミュレーションを行った。なお境界は計算を行う領域から影響が出ない程度まで遠くに設定した。

## 3 Results

図 3 から図 7 のように圧縮の過程においては全ての物理量が時間とともに増加しており自己相似解がよく再現された。また電流シートにおいても電子・陽

電子のシート方向の速度  $v_z$  が増加するため電流の強さが増すことが確認された。

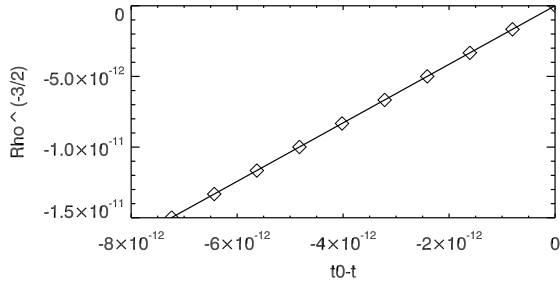


図 3: 粒子数密度

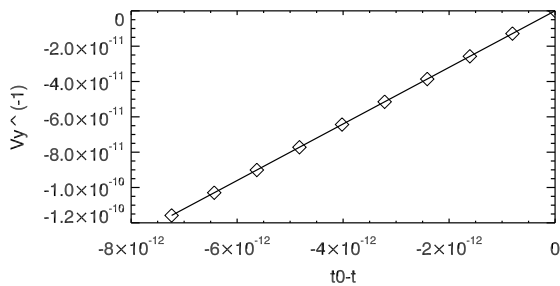


図 4: 電子の圧縮方向の速度

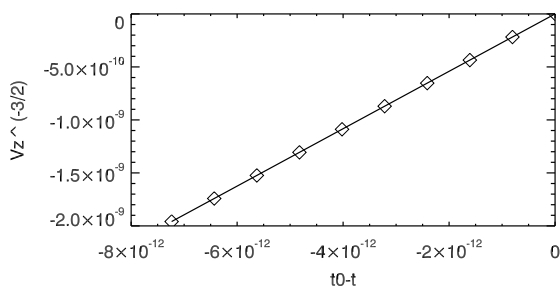


図 5: 電子の電流シート方向の速度

## 4 Conclusion

本研究では磁気リコネクションによってマグネターでの爆発現象を考えるため、電流シートがどのように時間発展するかを調べた。これを行うため、方程式を線形化し圧力を無視して自己相似解を解析的に

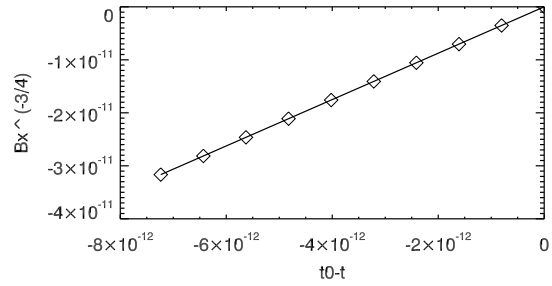


図 6: 紙面方向の磁場強度

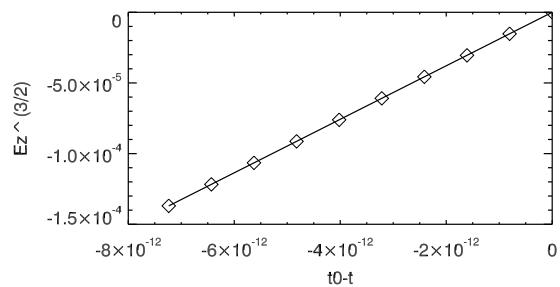


図 7: 紙面垂直方向の電場強度

求めた。その後数値シミュレーションを用いて解析解が自己相似的に時間発展することを確認することが出来た。したがってこのような解析解が安定に存在することが分かったため次に非線形の効果を含めたシミュレーションを行い、解析解との差異を比較しそののちに二次元において非線形の効果が確認されたのちには二次元、三次元において磁気リコネクションの効果を考えることを計画している。

## 5 Reference

- Goldreich, P., Julian, H. W. 1969, APJ, 157, 869
- Itzykson, C., Zuber, B. J. 1980, Quantum Field Theory, McGraw-Hill Inc
- Thompson, C., Duncan, R. C. 1995, MNRAS, 275, 255
- Lyutikov, M. 2006, MNRAS, 367, 1594
- Masada, Y., Nagataki, S., Shibata, K., Terasawa, T. 2010, PASJ, 62, 1093