



## 成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

(a). 「Nonaxisymmetric Magnetorotational Instability in Proto-Neutron Stars.」

Masada, Y., Sano, T., and Takabe, H. 2006, *Apj*, 641 in press (astro-ph/0512311).

(b). 2005 年度理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」

タイトル「Neutrino induced Parker instability in the Proto-Neutron Stars」

集録「高エネルギー天体物理学の最前線」P.248

(c). 京都大学 21 世紀 COE「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」シンポジウム

「光と物理学」研究会 ポスター発表 (P38)

タイトル「原始中性子星における磁気流体不安定性」

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

## 成果の概要

(必要に応じてページを加えて下さい。)

本年度は、星の内部における磁気回転不安定性 (MRI) 及び磁気浮力不安定性の線型解析と平行して、これら磁気流体不安定性のシミュレーションを進めてきた。また、線型解析の結果を原始中性子星の内部に応用することで重力崩壊型超新星の爆発機構において磁場が重要な役割を果たす可能性があることを明らかにした (Masada et al.2006)。上に挙げた項目それぞれについて、現在どのような状況にあるか報告する。

(1). Nonaxisymmetric Magnetorotational Instability in Proto-Neutron Stars.

この研究に関しては VPP を使った大規模シミュレーションではないが、プロジェクトの一環として行っているため、参考の為に記載する。原始中性子星 (PNS) の内部の対流は、ニュートリノ球から出てくるニュートリノ光度を増幅し、遅延爆発を促進させる有力な機構として注目されてきた (Epstein 1979)。しかしながら最新の重力崩壊の多次元数値シミュレーションによると、重力崩壊の際に、原始中性子星の外層 (ニュートリノ球近傍) が対流安定になる為、効率的な物質の混合が生じず、原始中性子星内部の対流はニュートリノ光度の増幅に寄与しないことが示唆されている (Buras et al.2003)。本研究では、この PNS の対流安定成層における磁場の効果に着目し、磁気回転不安定性 (MRI) の線型解析を行った。その結果、(a). Brunt-Vaisala 振動の大きさに関わらず対流安定成層において MRI が成長すること、(b). 現実的なパラメータを用いると、その成長率は回転軸近傍の方が大きくなることが期待されること、を明らかにした。また、ニュートリノ放射に起因した熱拡散、粘性拡散が磁気流体不安定性の成長に及ぼす効果についても現在解析中で

ある。まだ preliminary な結果ではあるが、熱拡散、粘性拡散を考慮すると、軸対称 MRI が粘性散逸の効果で安定化される一方で、非軸対称 MRI はその影響を受けずに成長することができるという新しい成果も得られている (Masada et al.2006 in prep) 以上の結果は、星の内部における MRI のシミュレーションを行う上で、重要な指針となる成果であり、今後、非線形シミュレーションを行うことでより定量的にその効果を調べることを目指している。

(2) . 星の内部における磁気浮力不安定性の非線形シミュレーション

「恒星内部の磁気回転不安定性と角運動量輸送」研究の第一段階として、回転が無い場合の磁気流体不安定性、つまり磁気浮力不安定性について2次元非線形成長を調べた。本年度このような計算を行った理由は以下の三点である。

a. この計算は、回転を考慮していない分、デカルト座標系での初期セッティングが行いやすく、計算自体に含まれる物理も単純化される為、シミュレーションを行う手順とその解析方法を理解する上では最適なテーマである。

b. 今後回転を考慮し、磁気回転不安定性のシミュレーションに発展させていく上でも磁気浮力の影響は必ず生じると考えられるので、その効果を抜き出して、定量的、定性的な物理を理解することが非常に重要である。

c. 安定成層中の磁気浮力型不安定性の非線形成長はまだ殆ど調べられていない。しかしながら、磁気浮力不安定性は恒星の放射層(対流安定層)における元素混合や角運動量輸送を担う機構になる可能性があることが示唆されており、その効果を定量的に調べることは、角運動量輸送機構を明らかにしていく上で非常に重要である (c.f., Parker 1979「COSMICAL MAGNETIC FIELDS」)。本研究では初期条件として、MacGregor&Cassinelli 2003 が仮定している、太陽質量の9倍の質量を持つ星の Radiative envelope を採用する。この時、重力分布は以下ようになる。

$$\frac{g}{g_0} = \exp \left[ - \frac{z/z_0 - 0.4}{4} \right]$$

ここで  $g_0$ 、 $z_0$  はそれぞれ radiative envelope の底の重力加速度、 $z$  座標である。この重力分布と静水圧平衡の条件から密度分布、圧力分布、温度分布を決定する。比熱比  $\gamma$  としては  $\gamma = 1.35$  を採用する。この時、系は対流安定な構造になる。また磁場の分布としてはガウス分布を採用する。以上の初期条件を図示すると図1のようになる。各図の縦軸、横

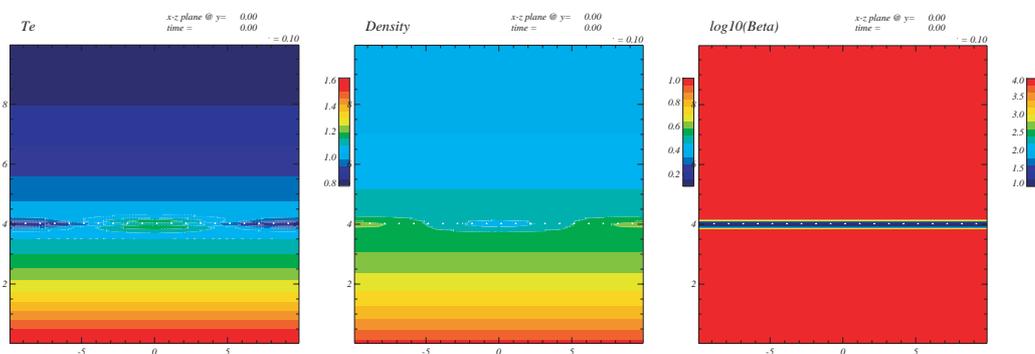


図 1: 左から順に t=0 での温度、密度、プラズマ  $\beta$  分布

軸は radiative envelope の底でのプレッシャースケールハイトで規格化されている。この初期条件に対し、 $x$  軸方向の波数ベクトルを持つ摂動を加えることで、磁気浮力不安定性の時間発展を調べた。まず波長依存性を調べた結果、約 10 スケールハイトの波長を持つモードの成長率が最も大きくなることがわかった。これは、パーカー不安定性の線形解析の結果とほぼ一致する。次に波長が 10 スケールハイトの磁気浮力不安定性の非線形成長の様子を図 2 に示す。但し、図 2 は温度分布の時間発展である。この図から、対流安定成層

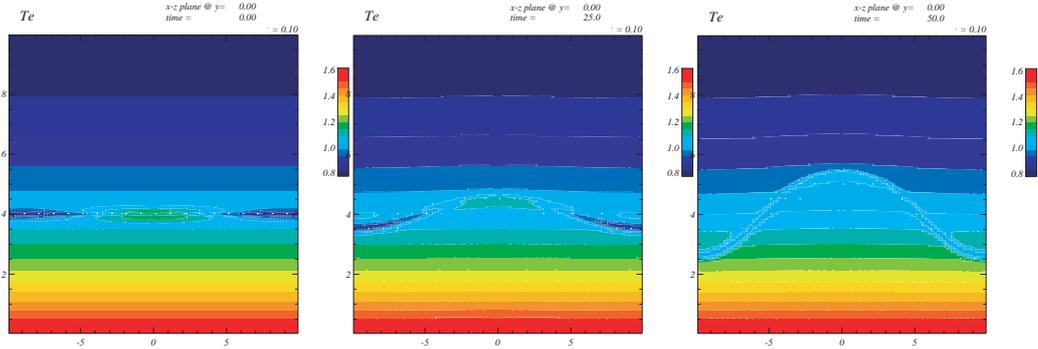


図 2: 左から順に  $t=0, 25, 50$  での温度分布

による安定化の効果にも関わらず、磁気浮力不安定性が成長することがわかる。磁気浮力型不安定性の成長率は  $0.05C_s$  ( $C_s$  は音速) 程度で、これは線形解析から得られる結果をよく再現している。断熱的な場合の磁気浮力不安定性の最大成長率は  $0.1C_s$  程度であるが、今回のシミュレーションでは対流安定成層の効果によって不安定性の成長が妨げられて、成長率が小さくなっている。最後に図 3 で、 $t=70$  での温度分布、密度分布、プラズマ  $\beta$  の分布を図示する。図 3 から flux rope の浮上に伴い、flux rope の中に閉じ込められた高

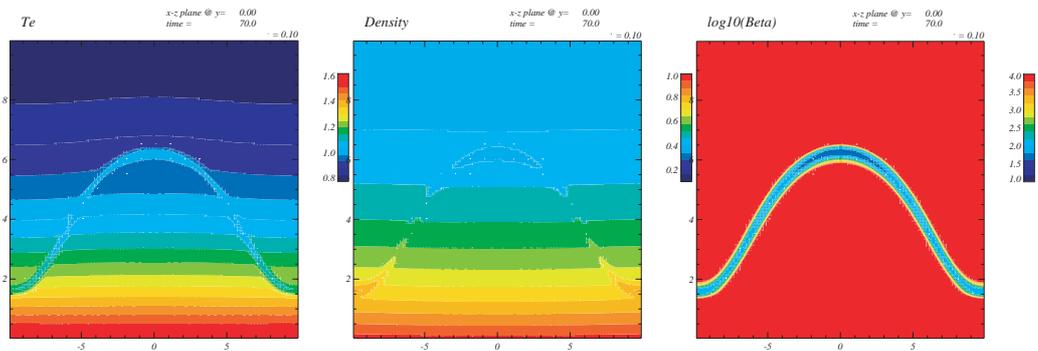


図 3: 左から順に  $t=70$  での温度、密度、プラズマ  $\beta$  の分布

温、高密度の物質が、安定成層の向きに逆らって  $z$  軸正の方向へ輸送されていることがわかる。しかしながら、今回の研究では、その効果を定量的に議論するところまでは行っておらず、今後は様々なパラメータについてシミュレーションを行うことで、より定量的に物質混合の効果について調べていく予定である。また恒星の放射層では放射熱拡散が重要な役割を果たすと考えられているので、熱拡散を考慮したシミュレーションも今後進めていく予定である。