

大規模シミュレーションプロジェクト成果報告書 中性子星の持つ双極子磁場と降着円盤の磁氣的相互作用によるキロヘルツ準周期振動現象の数値実験 (nyk51)

加藤 成晃(千葉大自然), 林 満(国立天文台), 松元 亮治(千葉大理),
宮路 茂樹(千葉大自然)

2001年4月9日

1 INTRODUCTION

RXTE(Rossi X-ray Timing Explorer)の観測により, 低質量X線連星からのX線強度がミリ秒程度の短い準周期振動を示す天体(kHz QPOs)が発見され注目されている. このような時間変動のタイムスケールは, 中性子星近傍の降着円盤のケプラー回転周期に相当し, kHz QPOの発生機構に降着円盤内縁での物理現象が関わっていると考えられる. しかしながら, 一般相対論的效果が重要となる中性子星近傍での磁気圏と降着円盤の振るまいについては, 明らかになっていない.

本研究では, pseudo-Newtonian ポテンシャルを用いることにより一般相対論的效果をとりいれ, 中性子星の磁気圏と降着円盤の境界における降着円盤の非定常な振るまいを追跡するため, 修正 Lax-Wendroff 法に人工粘性を加えた2.5次元磁気流体コードを用いて数値実験を行った. とくに, 星と円盤を繋ぐ磁気ループの捻れと解放の過程に着目した. 初期条件として幾何学的に薄い円盤の一部をモデル化したリング状のトーラスを用いて, 磁気相互作用の磁気拡散係数(抵抗値)の依存性を調べた結果を報告する.

2 SIMULATION MODEL

トーラスの中心を $(r, z) = (13r_g, 0)$ とし, トーラスの持つ角運動量分布を $L = L_0 r^a$ と仮定して, ポリトロップ近似 $P = K\rho^{1+1/n}$ を用いて, 力学平衡状態のリング状トーラスを初期条件とした ($a = 0.35, n = 3$). トーラスの外側には,

静水圧平衡状態の熱い等温(トーラス中心におけるケプラー回転エネルギーとコロナの熱エネルギーの比を 5×10^4)のコロナを仮定した(トーラス中心におけるトーラスとコロナの密度比を 2×10^{-4}). 双極子磁場の強さはトーラス中心半径におけるコロナの圧力と磁気圧の比(プラズマ β)によってパラメータ化した($\beta = 100$). 一樣抵抗を仮定し $\eta \equiv 1/R_m$ として, 磁気レイノルズ数をパラメータとした. 計算領域はシュバルツシルト半径の30倍四方とし, 500×500 グリッドを用いた. シュバルツシルト半径 r_g と光速 c を単位とし $r_g = c = 1$ とする. また, 中性子星の質量を $1.4M_\odot$ とし, 中性子星の半径は臨界安定起動よりも小さいとし, $2r_g$ に境界をおいた. Figure 1 を参照.

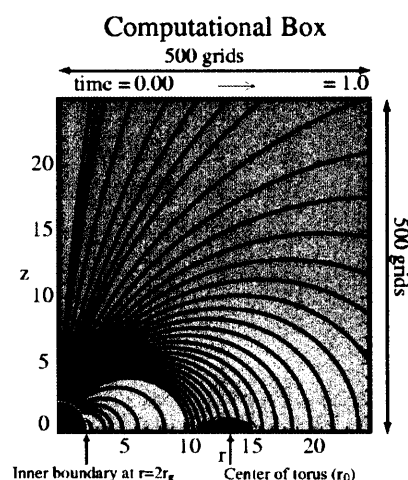


Figure 1: 初期条件

3 RESULTS

計算の結果、磁気レイノルズ数によって中性子星の磁気圏と降着円盤の磁気相互作用は3つに分類できることが判った (Table 1 参照).

モデル	磁気圏と降着円盤の磁氣的相互作用
磁気拡散が強い場合 ($R_m < 1000$)	円盤中のプラズマと磁気圏との結び付きが弱いため、降着物質を磁気圏境界に留めることができず、中性子星表面へ準定常的に降着する. このため磁気リコネクションは起こらない.
磁気拡散が中程度の場合 ($1000 \leq R_m < 10000$)	磁気圏に降着物質が溜り、磁気ループが円盤のケプラー回転によって捻られ、磁気圏と降着円盤との境界で磁気リコネクションが起こる. 磁気リコネクションによってできた channel を通じて、磁気圏に溜った降着物質は中性子星表面へ降着する. このプロセスを繰り返すことで、再帰的な磁気リコネクションによって中性子星表面へ準周期的な質量降着が起こる (Figure 2 を参照).
磁気拡散が弱い場合 ($10000 < R_m$)	磁気回転不安定性により初期トラスから間欠的な質量降着が起こる. 円盤中のプラズマと磁気圏との結び付きが強いため、円盤物質は角運動量を急激に失い、磁気ループを十分に捻るまえに中性子星表面に降着してしまうため、磁気リコネクションを起こしにくい.

Table 1: 磁気相互作用の磁気拡散係数依存性.

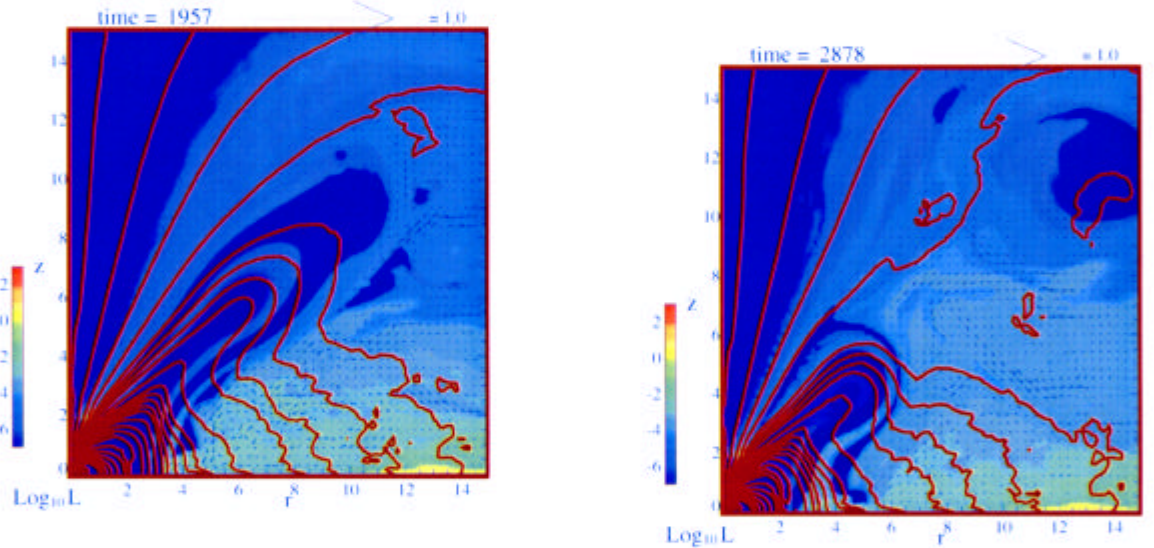


Figure 2: 磁気拡散が中程度の場合における再帰的な磁気リコネクションの様子: 磁力線 (実線) 速度 (矢印) で表し、円盤物質のトレーサーとして角運動量分布 (カラー) をプロットした. 図はそれぞれ磁気リコネクション直前 (左) と最初の磁気リコネクション直後 (右) を示している.

磁気拡散が弱い場合、トラス内で磁気回転不安定性が成長するという結果が得られたが、3次元計算においては磁気乱流が生成され維持されることが知られている. したがって降着円盤内において、磁気乱流によって磁気レイノルズ数が小さくなり磁気拡散が中程度の場合が実現されると考えられる. この磁気拡散が中程度の Mildly Resistive Accretion Disk では、磁気ループの捻れと解放が再帰的に起こり、中性子星表面への質量降着率が時間変動することによって X 線強度の準周期的な時間変動を説明し得ることがわかった.

今後は、磁気拡散中性子星から十分に離れたところに内縁を持つ Slim Disk の時間発展を計算することで、円盤内縁半径 (磁気圏境界半径) の時間変動を追跡する計画である. 特に、中性子星が自転している場合について、自転の回転角速度と降着円盤のケプラー角速度が同じになる共回転半径の内側と外側における角運動量輸送プロセスの違いによる効果を明らかにしたい.