



Title	連星中性子星合体における磁場エネルギー散逸過程の 解明を目指したプラズマ粒子シミュレーション
Author(s)	杉本, 馨
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 29- 32
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106228
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

連星中性子星合体における磁場エネルギー散逸過程の解明を目指した プラズマ粒子シミュレーション

杉本 馨

京都大学 基礎物理学研究所 (現所属：芝浦工業大学 SIT 総合研究所)

1. イントロダクション

1.1 連星中性子星合体

中性子星とは主に中性子により構成された天体であり、半径が 10km 程度しかない。一方で太陽程度の質量を有し、表面重力は地球表面の一千億倍に達する。また、磁気圏での最大磁場強度は $10^8 \sim 10^{15} \text{G}$ と見積もられている。

2つの中性子星が互いの周りを公転する物理系を連星中性子星と呼ぶ。互いの重力の影響により相対距離が小さくなっていき、最終的に中性子星同士の衝突・合体を経て、より重たい中性子星やブラックホールが形成されると考えられている(図 1 参照)。合体の際に電磁波以外にも重力波が同時に観測されており[1]、これらの信号から極限環境下の物理過程の解明を目指す「マルチメッセンジャー物理学」という新たな研究分野が誕生した。加えて、合体の最中に r-過程を通じて金などの重元素が生成されている可能性も示唆されており、核物理の検証という観点からも重要な現象である。

1.2 磁気散逸過程とプリカーサ(Precursor)

合体時・合体後の状態は、上記の重力波・電磁波の観測により解析できると考えられているが、合体前の中性子星の磁気圏構造などを推定する方法は確立されていない。中性子星の磁気圏には

膨大なエネルギーが存在するため、何らかの散逸過程を通じて強力な電磁波信号が駆動される可能性がある。そこで、注目されているのがプリカーサ(precursor)と呼ばれる合体前の先行電磁波である。先行研究[2]では、一般相対論的磁気流体シミュレーションにより合体前の磁気圏構造の解析が行われた。2つの中性子星の磁場が反平行のまま接近すると、その相互作用面では磁場の散逸に伴い電流シートが形成され、磁気リコネクションにより生じたプラズモイド(プラズマを含む磁気島)の合体から電磁波が生成されるモデルが議論されている。しかし、プリカーサが観測された例はなく、磁気エネルギーの散逸過程にはさらなる検証が必要である。特に、先行研究は流体描像ゆえに非熱的粒子の発生や、2光子衝突による電子陽電子対生成過程などの粒子描像のエネルギー変換過程の詳細は明らかとなっていない。

本研究では粒子描像での磁気圏プラズマのダイナミクスを理解すること、特に、磁気リコネクションの成長・磁気エネルギーの散逸過程・輻射スペクトルのパラメータ依存性を明らかにすることを目的とする。今回の研究では、磁気リコネクションの駆動要因の一つであるティアリング不安定性(後述)に着目した。先行研究で得られた相対論的環境下でのティアリング不安定性の成長率[3]の理論式から見積もられる最大成長波数が数値シミュレーションの結果と合わないことが確認されていた。ここでの相対論的とは、磁場エネルギー密度がプラズマの静止エネルギー密度より大きい状況($\sigma \equiv B^2/8\pi\rho c^2 > 1$: B =磁場強度, ρ =プラズマ質量密度, c =光速)を指す。今後のシミュレーションとの検証を見据え、理論式の修正を行なった。また、荷電粒子に対する輻射減衰過程・対生成過程の影響を考慮した包括的

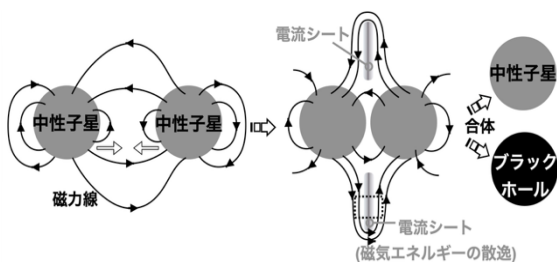


図 1. 連星中性子星合体の概略図。ここでは2つの中性子星の持つ磁気モーメントが互いに反転している場合を考えている。

な理論式が確立されていない。当該相対論的な環境下での磁気リコネクションの成長速度を理解するには、これらの物理過程を考慮した包括的な理論式が必要となる。そこで、輻射減衰過程を考慮したティアリング不安定性の成長への影響とプラズモイド形成・合体への影響も数値的に調査した。

2. 計算の準備

2.1 ティアリング不安定性

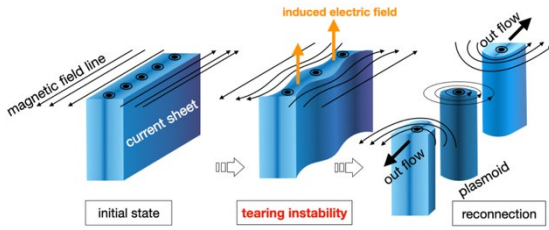


図 2：平面電流シートにおけるティアリング不安定性の概略図。後に磁気リコネクションへと発展する。

ティアリング不安定性の概略を述べるために、図 2 の左端のような平面電流シートとそれを挟み込む反平行磁場が平衡状態にある系を設定する。このシート中に局所的かつ小さな摂動(例えば電流摂動)が生じたと仮定する。すると、プラズマは摂動を消去する(電流を補填する)ため電場を発生させる。しかし、荷電粒子には質量があるため瞬時に電流の補填は達成されない。加えて、荷電粒子は磁力線方向に熱速度で動くことができ、結局、電流を補填する前に当該加速(電場)領域から出ていってしまう。摂動で生じた電場が生き残り、ファラデーの法則に従い摂動磁場(磁力線の歪み)が成長する。この成長した磁場を消去しようとさらに強い電場が発生するが、先ほどと同じように、完全には電流の補填が起きないので磁場の成長と電場の成長が交互にフィードバックされる。これがティアリング不安定性の大まかな流れである。今回取り扱うような相対論的環境における波数 k 毎のティアリング不安定性の線形成長率 $\gamma(k)$ の理論式は先行研究により導出されており、以下の形で書ける[3]。

$$\gamma(k)\tau_c = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} kw(1 - k^2w^2) \frac{\beta^{\frac{3}{2}}}{\Gamma_\beta} \quad (1)$$

ここで w 、 β 、 Γ_β はそれぞれ電流シートの厚み、電流を構成する荷電粒子の平均的なドリフト速度の大きさを光速で規格化した値、 β から定義されるローレンツ因子を指す。 τ_c はシートの厚み w を光速 c で割った値である。1.2 で述べたように本研究では(i)理論式の修正を行い、スーパーコンピュータ SQUID による大規模で高精度なシミュレーションとの比較を行った。新しい理論式の詳細は現在論文投稿準備中[4]であり、本報告書では数値検証結果を中心に報告する。シミュレーション手法として Particle-In-Cell(PIC)を用いる。PIC シミュレーションの技法自体はよく知られたものであり、詳細について著名な文献[5]を参考されたい。そして、(ii)荷電粒子からの輻射減衰過程を考慮した場合でのティアリング不安定性の線形成長への影響とプラズモイド形成・合体に対する影響を PIC シミュレーションにより調査した。

3. 二次元大規模並列 PIC 計算

3.1 理論式検証のためのシミュレーション設定

新しく得られた理論式を検証するために二次元平面でのティアリング不安定性の PIC シミュレーションを SQUID(汎用 CPU 群, 20~200 nodes)により実行した。使用した PIC コードは阪大レーザー研の千徳靖彦教授謹製 PICLS[6]である。

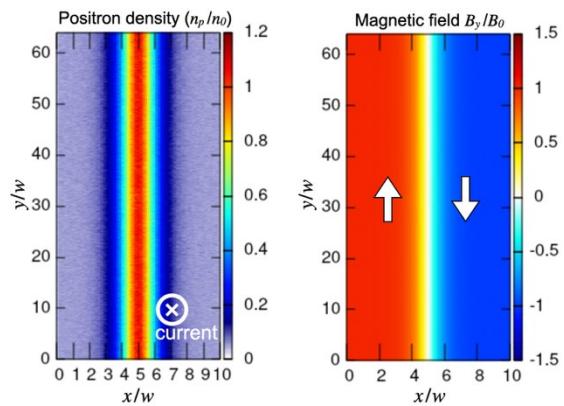


図 3(左)は初期の粒子密度プロファイル。電荷中性を満たすに電子、陽電子は同じ分布を持つ。(右)は初期磁場プロファイルを表している。電流シート中心を境に、磁場の向きが反転している。

計算領域は図 3 に示すような xy 平面上の長方形領域であり、 z 方向については物理量が一様な分布を持っていると仮定している。今回の計算では、相対論的溫度における宇宙プラズマとして電子-陽電子ペアプラズマを想定している。粒子密度・磁場は Harris 平衡状態[7]にあり、それぞれ以下の式で表される。

$$n(x) = n_0 \cosh^{-2} \left(\frac{x}{w} \right) \quad (2)$$

$$B_y(x) = B_0 \tanh \left(\frac{x}{w} \right) \quad (3)$$

粒子は xy 平面（紙面）に対し垂直な方向に流れて電流を形成し当該磁場を支えている。一方で、磁場は磁気圧によって電流シートを支えている。原理的には、微小な数値ノイズによりティアリング不安定性が駆動され得るが、その場合、多大な計算時間を要する可能性がある。そこで、次式を満たす人工的なベクトルポテンシャル摂動を印加し不安定性を駆動した。

$$\delta A_z(x, y) \propto \exp \left(-\frac{x^2}{l_x^2} - \frac{y^2}{l_y^2} \right) \cosh^2 \left(\frac{x}{l_x} \right) \quad (4)$$

ここで、 $l_x = 2w$, $l_y = w$ である。初期パラメータとして、粒子の温度を $10m_e c^2$ に固定し、 $\beta = 0.3, 0.5, 0.8$ の場合で計算を行った。 m_e は電子の静止質量を指す。 $0.5, 0.8$ の場合では x, y 方向のグリッド数はそれぞれ 2000, 12000 とし、 $w = 200$ グリッドとした。 0.3 の場合では全体的に成長率が小さいため、数値ノイズを抑えるようにグリッド数を各方向において 4 倍（高精度化）した。また、いずれの計算においても、1 セルあたりの平均粒子数は電子（陽電子）50 個である。時空間グリッドの間には、 $c\Delta t = \Delta x$ が成立している。領域の境界条件は y 方向に対して周期境界条件、 x 方向に対して Conducting-Wall 条件を課している。

3.2 輻射減衰過程を考慮した計算設定

上述の PICLS コードには電磁場にさらされた荷電粒子に対する輻射減衰の効果を運動方程式の中に自己無撞着に含めることができる。これを利用して、ティアリング不安定性の線形成長に対する輻射減衰の影響を調査した。3.1 にある $\beta = 0.8$

の計算設定をベースとし、温度を $25 m_e c^2 (\sigma = 50)$, $100 m_e c^2 (\sigma = 200)$ の 2 通りでシミュレーションした。また、プラズモイドの生成・合体に対する影響の調査も行った。初期のプラズマの温度を $100 m_e c^2$, $\beta = 0.8$ とした。初期の摂動の形として、

$$\delta A_z(x, y) \propto \exp \left(-\frac{x^2}{l_x^2} \right) \cos \left(\frac{2\pi}{L_y} y \right) \quad (5)$$

という周期的な摂動を印加しプラズモイドを発生させた。 L_y は y 方向の計算領域の長さである。この計算では非線形段階までの長時間計算を行う都合上、 $w = 100$ グリッドとした。

時空間グリッドの関係性、境界条件は 3.1 の設定と同じである。

4. 計算結果

4.1 成長率理論式の検証

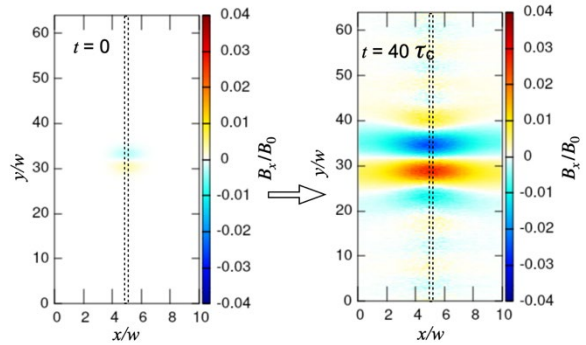


図 4. 磁場の x 成分 B_x の時間発展。図中の波線は平均値 $\overline{B_x}(y)$ を計算する領域を示す。

3.1 で述べた $\beta = 0.8$ の場合での磁場摂動の時間発展の様子を図 4 に示す。初期に与えられた状態（図 4 左）に比べ、成長が進んだ段階（図 4 右）では強度の増加および分布の拡大が確認できる。また、 y 方向に対して磁場の正負が周期的に反転した小さな構造も現れている。図 4 中の波線領域に示された $0.49 < x/w < 5.1$ の幅で B_x の平均分布 $\overline{B_x}(y)$ を計算する。この $\overline{B_x}(y)$ を y 方向に関してフーリエ変換し、各波数 k のフーリエ係数の大きさに対して、横軸を時間、縦軸を係数の大きさとした場合の傾きから成長率を導出した。既存の理論式から見積もられる最大成長波数 $k_{\max}$ は $k_{\max} w = 0.577$ の位置に現れるが、先述の通り、PIC シミュレーションの結果と不整合であることが知ら

れていた。シミュレーションでは $k_{\max}w = 0.39$ 程度の長波長側に最大成長率が現れていた。今回新しく得られた理論式ではこの最大成長波数を正確に再現することを確認できた。

4.2 輻射減衰の影響

荷電粒子に対する輻射減衰の計算の on/off を切り替え 4.1 と同じようにして、成長率を導出した。シミュレーションの結果、輻射減衰の効果が小さい場合($\sigma = 50$)では輻射減衰過程を考慮しない計算結果と同じ成長率が得られたが、輻射減衰の効果が大きい($\sigma = 200$)場合では差異が確認された。まず、最大成長波数がより短波側にシフトした。加えて、全体的に成長率が増加し、特に短波長側での成長率の増加が顕著にみられた。詳細な解析は今後の課題であるが、上記の振る舞いの原因として、輻射減衰により粒子がエネルギーを失うことでプラズマ全体の圧力が下がり、シートが磁気圧によって押し潰されやすくなったことが考えられる。

次に、プラズモイド生成・合体に対する輻射減衰のシミュレーション結果を図 5,6 に示す。図 5 では初期の粒子（陽電子）密度分布と式(5)に係る初期磁場摂動の分布を示している。この周期的な磁場構造に応じてプラズモイドが形成される。図 6 は輻射減衰を考慮しない場合と考慮した場合での陽電子密度の時間発展に着目している。輻射減衰を考慮しない場合では、形成されたプラズモイド同士が合体を経てより巨大化・高密度へ遷移していくことが確認された。一方で、輻射減衰を考慮した場合には合体は抑制され、むしろ、プラズモイドのサイズが縮小していき、それに伴い密度が上昇していく様子が見られた。プラズモイドのサイズは、合体の際に生じる電磁波の波長を決める要素であるため、輻射減衰を考慮することの重要性を示す結果である。パラメータによっては、プラズモイドの合体が完全に抑制される可能性もあるため、さらなる検証が必要である。

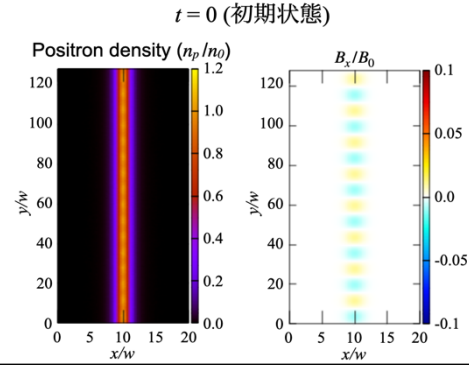


図 5. プラズモイドの発生・合体に対するシミュレーションの初期設定。

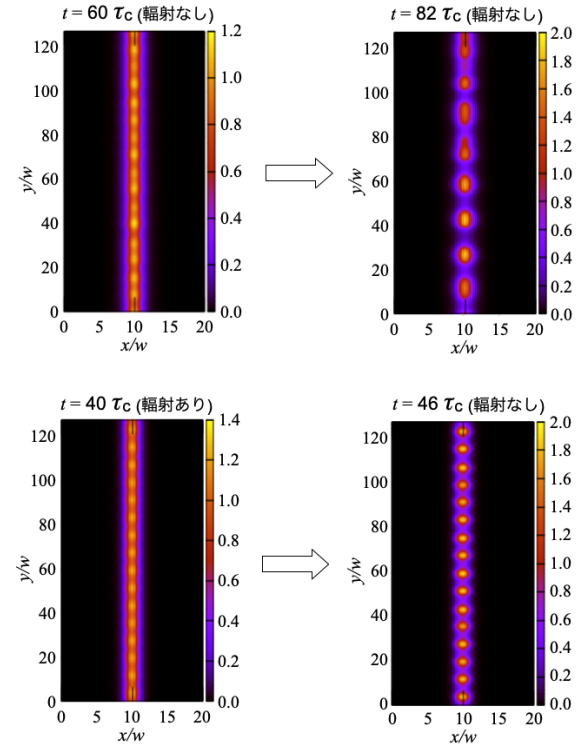


図 6. プラズモイドの時間発展に対する輻射減衰の影響。

参考文献

- (1) B.P. Abbott *et al.*, ApJL, **848**, L12, (2017).
- (2) E.R. Most and A.A. Philippov, ApJL, **893**, L6, (2020).
- (3) M. Hoshino, ApJ, **900**, 66, (2020).
- (4) K. Sugimoto and K. Ioka, in prep.
- (5) C.K. Birdsall and A.B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York, (1985)
- (6) Y. Sentoku and A.J. Kemp, J. Comput. Phys., **227**, 6846, (2008)
- (7) E.G. Harris, Nuovo Cim., **23**, 115, (1962)