

GRAPE-6を用いた三次元プラズマシミュレーションによる パルサー磁気圏の大局的構造の解明

和田 智秀¹ 柴田 晋平²

1:山形大学理工学研究科 2:山形大学理学部
wada@ksirius.kj.yamagata-u.ac.jp

概要: 質量の大きな恒星の最晩年の姿として、質量が太陽程度、半径10km程度の超高密度である中性子星ができる。パルサーは強磁場(10¹²ガウス)を持ち、周期(~0.1秒)で高速回転する中性子星である。その膨大な回転エネルギー(~10⁴²ジュール)は電磁気的な現象によって解放(~10³²ワット)される。しかし1968年のパルサー発見以来、その磁気圏構造は未だ理解されていない。我々は重力多体系計算機**GRAPE-6**を用いてプラズマ間相互作用を再現し、軸対称なパルサーにおける大局的な磁気圏構造を粒子シミュレーションによって調査した。結果として活動的な磁気圏構造の存在を初めて示した。

はじめに

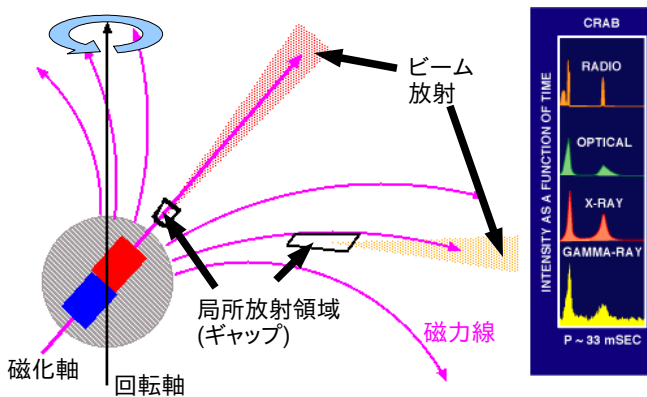


図1:パルサー磁気圏の子午面上の模式図(左)、EGRETによって検出された”かにパルサー”からの電波・可視光・X線・ガンマ線での各領域における電磁波のパルス波形(右)。横軸は周期である。

パルサーは高速回転する中性子星である。パルサーは灯台のように電磁波をビーム放射する¹ため、その自転周期に等しい電磁波のパルスが観測される(図1)。また、そのまわりにはシンクロトロン放射によって輝く星雲を持つ(図2)。パルサーの発見(Hewish

1968)は当時謎の天体とされていた中性子星の存在を確認づけた。パルサーは現在でも強い電磁波を放射する興味深い天体として着目されている。

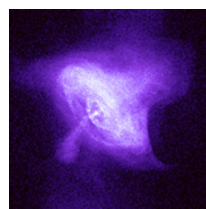


図2: X線でみたかに星雲(参考:NASA)

研究背景

観測事実は、パルサーのまわりの磁気圏ではパルサーの強い磁場のもとで相対論的なエネルギーまで加速されたプラズマが制動放射によってビームを出し(粒子加速)、さらに磁気圏から吹き出した豊富なプラズマ(粒子増幅)が星間物質と相互作用してシンク

*1パルサーの名前の由来はPulse+StarからPulsar(パルサー)である。

ロトロン放射によって星雲を光らせていることを示す。このために磁気圏内には局所的にプラズマ密度の薄い領域(ギャップ)があると考えられている(Holloway 1973)。ギャップ内では電場が維持され、プラズマを加速する。加速されたプラズマからは高エネルギーの光子が放射され、その光子は電子陽電子対生成によって電子と陽電子に変換する。しかしそれらの現象はお互いに関係しあっているため複雑である。現在に至っても磁気圏内のどこに、またなぜギャップがあり、ギャップからどのように電磁波のビームとプラズマが放出されるのかという問題に対する統一的なモデルは存在しない。この問題の解決には第一原理に基づいた大規模プラズマシミュレーションによる磁気圏構造の調査が必要である。

GRAPE-6のプラズマ間相互作用の計算への応用

粒子間の相互作用は粒子数の二乗に比例した計算ステップを必要とする。**GRAPE-6**は多粒子間の重力相互作用を高速(ピーク性能32T flops)かつ高精度に計算する専用計算機である。我々は粒子の質量に正負の符号を与えることにより、GRAPE-6でプラズマ間の相互作用を再現した。

$$E_{ij} = \sum_{j=1}^n q_j \frac{r_i - r_j}{|r_i - r_j|^3}$$

$$B_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{q_j v_j \times (r_i - r_j)}{|r_i - r_j|^3}$$

図3

クーロン力で同符号の電荷は引き合い、異符号は反発しあう。また、電荷が動くとき磁場(マゼンタの矢印)が発生する

磁気圏モデル

我々は磁気圏の空間電荷分布を点電荷によって代表し、軸対称性を持った外場(星の持つ磁場、電場)のもとでこれら超粒子の三次元的な運動(ジャイロ運動、プラズマ振動、磁気ドリフト運動)を特殊相対論的な運動方程式と電磁場に関するポワソン方程式を解くことで詳細に追う。システムが定常になったら計算を終了する。

我々のシミュレーションでは典型的には計算領域の 10^{-6} の運動スケールを持つ数十万体の粒子の運動を計算領域の力学的時間スケールで追わなくてはならない。計算コストのもっとも高い粒子間相互作用の計算を**GRAPE-6**で行うことで計算を加速している。

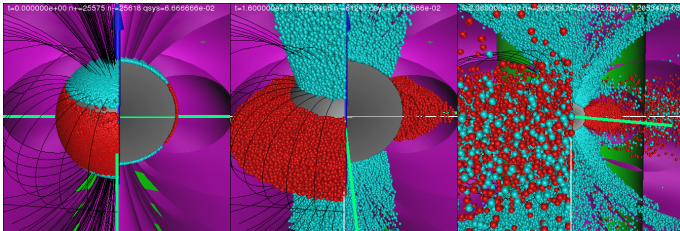


図4: 粒子シミュレーションが進んでいく様子

結果

初期にパルサーのまわりにあるパルサーと共に剛体回転する電荷雲は磁気圏内で起こる電子陽電子対生成によって成長し、光円柱(パルサーと剛体回転する粒子の速度が光速に達する距離)へ到達する。このとき粒子の運動エネルギーは増大し(ローレンツ因子で $\sim 10^6$)、粒子は放射の反作用によってアウトフローを形成する。

最終的に粒子の定常なアウトフローと電子陽電子対生成を行うギャップを維持する磁気圏構造を得た(図5)。

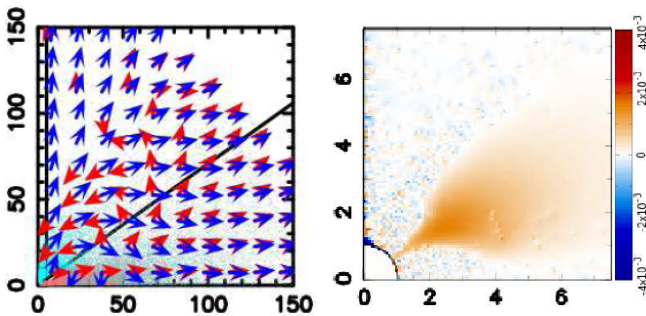


図5

シミュレーションの結果(Wada 2007)得られた定常磁気圏の子午面上の電荷分布(左パネル)と沿磁電場強度マップ(右パネル)。中緯度にギャップがある。どちらも距離の単位は星の半径で規格化してある。

まとめ

我々はパルサー磁気圏の構造を大規模三次元粒子シミュレーションによってself-consistentに解いた。粒子に働く放射の反作用と慣性、磁気圏内での電子陽電子対生成の効果を検討した結果、活動的な性質を示す定常磁気圏構造の存在を初めて示した。今後もこのシミュレーションを推し進め、さらに詳細な構造の調査を行う予定である。

今後の課題

- 我々のシミュレーションは計算時間による粒子数の制限(50万体内に設定した)から電子陽電子対生成が抑制されている。今後はさらに多くの電子陽電子対生成が起こる磁気圏の調査が必要である。このような磁気圏においては磁気圏電流によって発生した磁場がの効果も重要となる。
- 粒子による電場の揺らぎの誤差を現在の1/10に抑えるために最終的には粒子数1千万体程度の計算を行いたい。そのためにはP flopsクラスの計算速度が必要となるだろう。
- **GRAPE-6**によって相互作用の計算時間は劇的に加速したものの、それ以外の計算にかかる時間が大きく、計算時間の大部分を占めてしまっている。Programmable SIMD²を持つ**GRAPE-DR**(Makino 2006)は相互作用以外の計算をさらに加速することが可能であり、GRAPE-DRの使用によってさらなるブレークスルーを目指したい

*2 Single Instruction Multiple Data: 一つの複数のデータを扱う処理形式

参考文献

1. Hewish, A., et al., 「Observation of Rapidly Pulsating Radio Source」, 1968, *Nature*, 217, 709H
2. Holloway, N. J., 「Pulsars-p-n-junctions in pulsar magnetosphere」, 1973, *Nature*, 246, 6
3. Makino, J., 「Special-Purpose Computing for Dense Stellar Systems」, 2006, Modelling Dense Stellar Systems, 26th meeting of the IAU
4. Sugimoto, D., et al., 「A Special-Purpose Computer for Gravitational Many-Body Problems」, 1990, *Nature*, 345, 33
5. Wada, T., Shibata, S., 「A particle simulation for the global pulsar magnetosphere: the pulsar wind linked to the outer gaps」, 2007, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 376, 1460