

相対論的電磁流体シミュレーションによるマグネターアウトフローの研究 (修士論文)

宇宙最強の磁場天体であるマグネターは、超強磁場中性子星である。その磁場強度は一般的な電波パルサーの数千倍の 10^{15} G にも及ぶ。軟ガンマ線リピータ (SGR) や異常 X 線パルサー (AXP) がこの種族に属すると考えられているが、観測例が極めて少なく、その物理に対する理解はほとんど進んでいない。

この特異な天体が示す磁氣的活動性の中で、その特徴が最も顕著に現れる現象が巨大フレアである。マグネター巨大フレアはこれまで3つのSGRで観測されており、磁気圏における磁気エネルギー解放がその起源だと考えられている。マグネター巨大フレアでは、 $10^{44} - 10^{46}$ erg の巨大なエネルギーが数100ミリ秒という短時間で急激に解放されるため、爆発によって駆動されるアウトフローは相対論的な速度を持つことが期待される。しかしながら、その物理ダイナミクスや相対論的アウトフローの形成・伝播の条件等は、フレア現象の理解にとって本質的であるにも関わらずこれまで全く調べられてこなかった。

本研究ではマグネター巨大フレアが駆動するアウトフローの物理を理解するために、磁氣的爆発現象における物質の力学進化を相対論的電磁流体シミュレーションによって調べた。ここではマグネター表面で起きた磁氣的爆発にともなったアウトフローのダイナミクス、および磁化されたアウトフローに先行して相対論的な速度で伝播する衝撃波について述べる。

磁化されたアウトフローのダイナミクス

初期にマグネターと星周媒質(星の中心からの距離のべきに比例する密度構造: $\rho \propto r^{-\alpha}$)、マグネターを貫く双極強磁場構造を仮定し、星表面での磁気エネルギー解放に起因した流体のダイナミクスを調べた。エネルギー解放プロセスは太陽フレアの研究で確立されている初期条件を応用した。

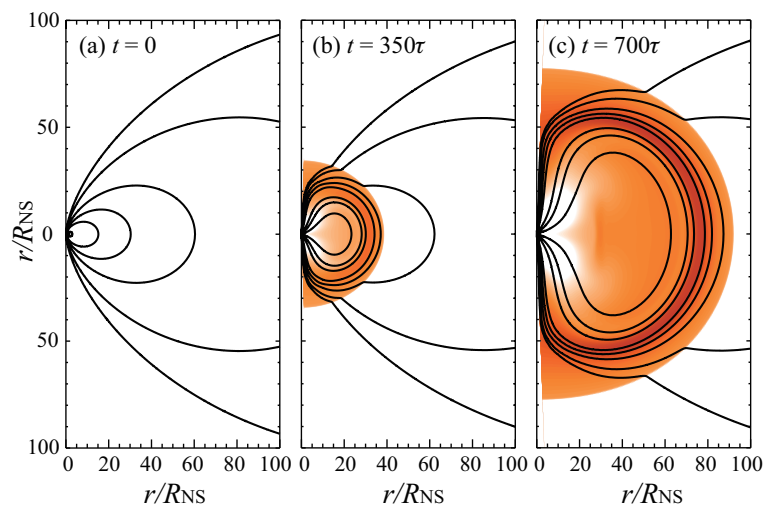


図 1: 星の赤道付近で爆発が起きた際のアウトフローの時間発展 (左から時系列)。原点に星が存在。色は密度をコントアーは磁力線を表す。

本研究の結果、星表面での爆発に起因して準球対称なアウトフローが生じ、アウトフローの前面に強い衝撃波が形成されることがわかった(図1参照)。星に近い領域ではガス圧よりも磁気圧が卓越しており、このアウトフローは磁気圧により駆動されている。詳細に解析した結果、この磁化されたアウトフローの速度はマグネターを貫く磁気双極子の磁場強度の $1/2$ 乗に比例することが分かった(図2a参照)。

自己相似的に発展する相対論的衝撃波

初期で仮定した密度勾配の指数 α が大きい場合、磁化されたアウトフローに先行する衝撃波の伝播速度は相対論的な速度になり、自己相似的に発展することが分かった(図2b参照)。アウトフローの駆動源はマグネターの磁気エネルギーである。しかし、その相対論的速度への加速は、星周物質の急激な密度勾配を衝撃波が伝搬するために生じており、純粋に流体力学的な効果である。これは相対論的フローが形成される天体現象一般に応用可能な極めて基礎的で重要な物理過程である。また、爆発によって形成される衝撃波は非常に強く、系内銀河における粒子加速の有力なサイトになる可能性があり、最高エネルギー宇宙線の加速源を探る上でも重要な鍵となると期待される。

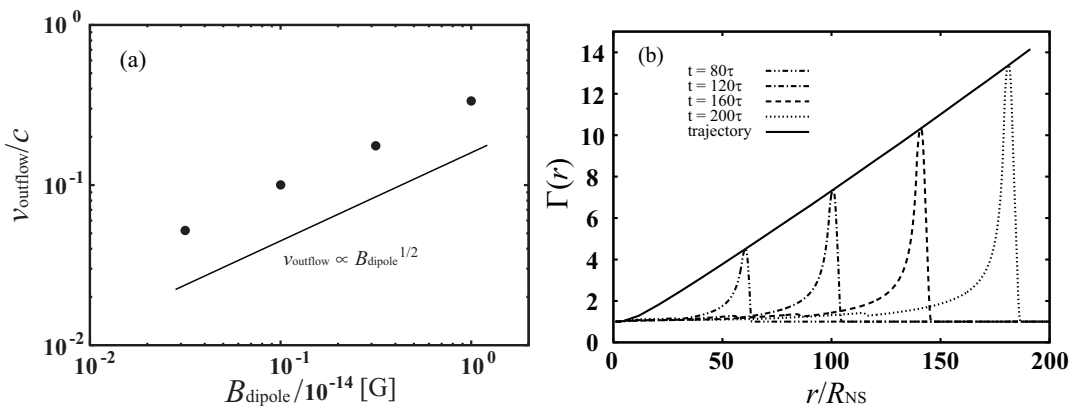


図2: (a) 磁化されたアウトフローの速度とマグネターを貫く双極磁場の関係。(2b) 磁化されたアウトフローに先行する自己相似的に発展する相対論的衝撃波。 $\Gamma(r)$ は流体のローレン因子を表す。

(松本仁 記)