

1. 導入・計算設定

Taylor-Spruit Dynamo (以下TSD) は1999年にSpruitが提唱した新しいダイナモ/角運動量輸送機構であり、恒星内部では磁気回転不安定性 (=MRI) よりも支配的になる事が示唆されている。TSDによる角運動量輸送・磁場増幅の「定性的」モデルも提案されており、星の力学的進化計算への応用も進んでいる (c.f., Spruit 2002; Heger et al. 2006; Eggenberger et al. 2005)。TSDの非線形成長は、Braithwaite (2006) のシミュレーションによって確認されているが、計算の解像度・計算時間ともに不十分であったため、TSDが現実存在するかどうかについては、未だにコンセンサスが得られていないのが現状である (c.f., Gellert et al. 2008)。さらに我々の研究から「臨界値以上の速度シアが存在する領域ではTSDの線形成長が急激に抑制されること」、「MRIの成長がTSDより支配的になるケースが存在すること」が示唆されており、これはSpruit(1999)の主張と相反している (Masada et al. 2006; Masada & Taam 2011 in prep)。

このような背景から、本研究では、恒星内部の角運動量輸送/磁場増幅機構を定量的に理解するために、3次元磁気流体シミュレーションによってTaylor-Spruit Dynamoの非線形成長を調べた。使用した3次元Godunov CMoC-CTコードで採用している数値計算法は空間・時間2次精度のゴドノフ法 (van Leer 1979; Clarke 1996; Sano et al. 1998) であり、数値流速の評価に非線形リーマン問題の厳密解を用いることで高精度の計算を実現している。また、多重拡散の効果 (熱、粘性、磁気拡散) は、保存形式を破らない形で計算コードに組み込まれている。

計算設定として、高さ L ・幅 $2.5L$ のボックス中の半径 L の円柱領域を考える (図1)。MHD方程式は円柱領域のみで解き、円柱の外側で初期の差動回転を保ち続けることで、回転エネルギーをインプットする。円柱上部/下部の境界条件として自由境界を採用する。また、円柱 (計算) 領域の外側で、磁気拡散係数 η を計算領域内の10倍の値に設定することで、矩形境界の影響を減少させる。密度・圧力一定 ($\rho=1, Cs=8$) の媒質に、一様な垂直磁場 $(0, 0, B_z^0)$ を加えた状態を初期状態とする。 $d\Omega/dz \neq 0$ の差動回転を加える事で初期平衡を崩し、ダイナモを駆動する。

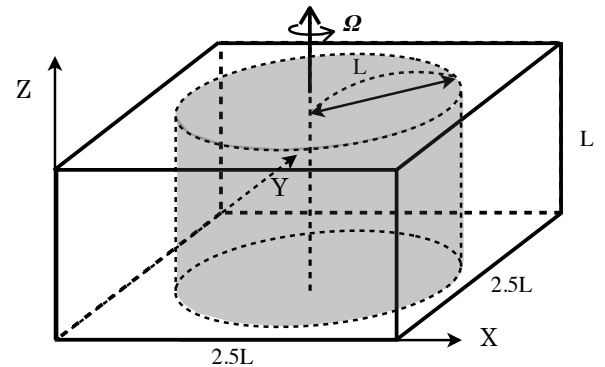


Fig1. Numerical model for the Taylor-Spruit dynamo.

2. 計算結果

まずfiducial model ($B_z^0 = 0.01, \nu=3 \times 10^{-2}, \eta=2 \times 10^{-3}$) の計算結果を示す。図2は準定常状態に到達した後のトロイダル磁場強度を、 $Z=0.5L$ の断面で2次元カラーコントラストで表現した図である。円柱 (計算) 領域の中心部で、 $m=1$ の非軸対称構造が支配的になっていることがわかる。この $m=1$ の構造は、kink型のTaylor不安定性が非線形発展している一つの証拠

であり、Spruitが提唱したTaylor-Spruitダイナモの理論モデルと無矛盾である(see Gellert et al. 2008)。図3に体積平均した各エネルギー成分の時間発展を示す(横軸は回転周期で

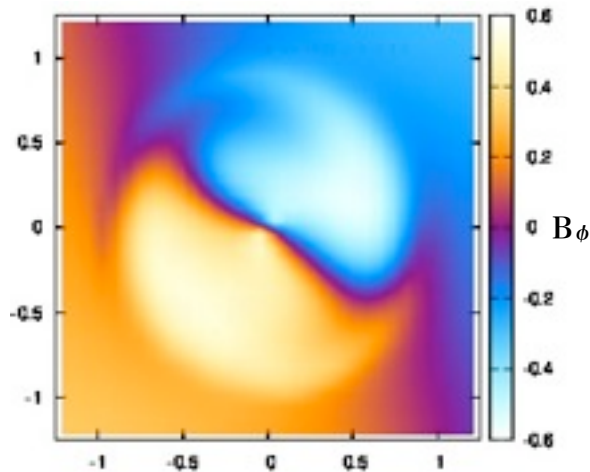


Fig2. Non-axisymmetric structure appeared in the toroidal field component at the quasi-steady state

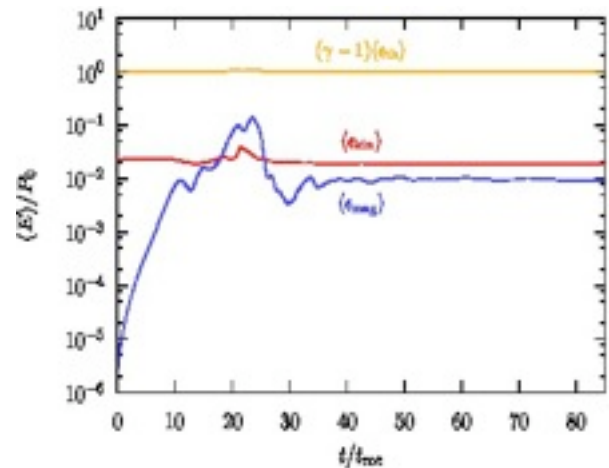


Fig3. Temporal evolution of each energy component. (yellow: E_{th} , red: E_{kin} , blue: E_{mag})

規格化された時間)。青線が磁気エネルギー、赤線が流体の運動エネルギー、黄線が熱エネルギーである。時間とともに磁気エネルギーが増幅され、運動エネルギーの数十%のレベルで磁気エネルギーが飽和していることがわかる。飽和状態では、トロイダル磁場成分のエネルギーが、他の磁場成分より卓越しており、それに起因したマクスウェル応力によってZ方向の角運動量輸送が生じている。Braithwaite (2006) では同様の計算設定で磁場の反転が観測されているが、本計算では観測されていない。

最後に、fiducial modelの10倍の粘性を与えた場合の計算結果を示す。図4の黄線はfiducial modelの、赤線は粘性10倍のモデルの磁気エネルギーの時間発展を示している。図より、粘性10倍のモデルの方が、fiducial modelより磁気エネルギーの飽和レベルが大きくなっている事がわかる。また、粘性10倍のモデルでは、Braithwaite (2006)で観測されたものと同様の周期的な磁場反転が、青矢印で示した時刻に生じた。現在、飽和機構および磁場反転の物理メカニズムについて継続して調査中である。

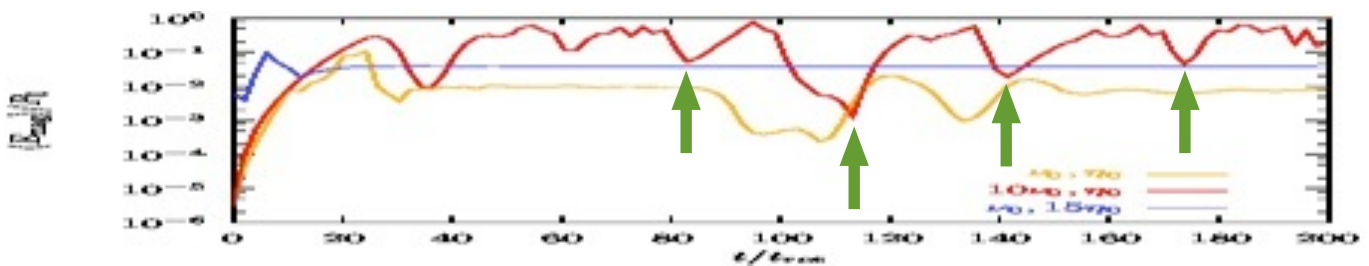


Fig4. Enhanced viscosity model with $10\nu_0$ (red curve) where ν_0 is the viscosity adopted in the fiducial model (yellow curve).

References:

- [1]. Braithwaite 2006, A&A, 449, 451
- [2]. Gellert, Rudiger, & Elstner. 2008, A&A, 479, 33
- [3]. Spruit 1999, A&A, 349, 189
- [4]. Taylor 1973, MNRAS, 161, 365
- [5]. Clarke 1996, ApJ, 457, 291
- [6]. Heger, Woosley, & Spruit 2005, ApJ, 626, 350
- [7]. Spruit 2002, A&A, 381, 923
- [8]. van Leer 1979, J. Comput. Phys., 32, 101