

中質量星からの恒星風駆動と質量放出率の決定機構を理解するための数値シミュレーション研究

西澤 淳 (名古屋大学大学院 理学研究科 M2)

Abstract

宇宙空間のあらゆる恒星は恒星風を吹き出して質量放出をしている。太陽型星の恒星風駆動には磁気流体波動の一種である Alfvén 波が重要な役割を果たしていると考えられている。本研究では、恒星の質量放出率がどのように決定されているかを規定するために、数値シミュレーションを用いて恒星風の運動エネルギーを計算している。光球表面での磁場や摂動速度の大きさを変えることにより、注入する Alfvén 波の Poynting フラックスを変化させ、恒星風の運動エネルギーがどのように変化するか調べた。磁気流体力学を用いて光球から恒星風へのエネルギー輸送のメカニズムのモデルを構築し、磁気流体シミュレーションを行った Suzuki et al.2013 によると、注入する Poynting フラックスを大きくすると恒星風の運動エネルギーは急激に大きくなるが、途中から大きくならずにかえって減少してしまう現象が見られた。すなわち、エネルギー注入の増加と共に恒星風のエネルギーは飽和するということであり、Wood et al.2005 で観測されている傾向をよく説明している。

本研究では太陽よりも質量が小さい中質量星に注目して、同様のシミュレーションを行っている。中質量星における恒星風の運動エネルギーの依存性について、太陽型星と比較したときの類似点と相違点を議論する。

1 Introduction

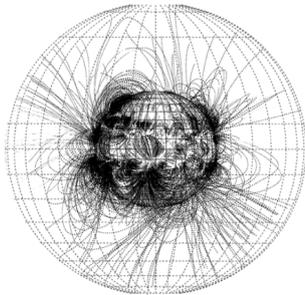


図 1: 太陽の磁場構造 (Hakamada et al.2005)

太陽では図 1 のように、閉じたループ状の磁場構造 (磁束管) と、開いたチューブ状の磁場構造が観測されており (Hakamada et al.2005)、他の恒星にも同様の磁場構造が存在すると考えられている。恒星風は主に開いたチューブ状の磁場構造の部分から吹き出しているため、閉じたループ状の磁場構造は考えずに開いたチューブ状の磁場構造のみを考えることにする。大質量星や漸近赤色巨星など光度の大きい星の恒星風は輻射で駆動されているのに対し、太陽

質量に近い星 (太陽型星) やそれより質量の小さい中質量星の恒星風は、表面对流層から発生する Alfvén 波の Poynting フラックスが上空に輸送されることにより、駆動していると考えられている。太陽型星の恒星風の運動エネルギーをシミュレーションにより求めた Suzuki et al.2013 は、星の放出する X 線フラックスが大きくなると恒星風の運動エネルギーはそれにしたがって増加するが、途中で増加が止まり (飽和) 、更に X 線フラックスが大きくなるとかえって運動エネルギーが減少してしまうという奇妙な現象が起こることを示した。本研究では中質量星で同様のシミュレーションを行い、このような飽和現象が起こるかについて、太陽型星との比較をする。

2 Methods

本研究では中質量星についてシミュレーションを行い、その質量、半径、有効温度はそれぞれ $M = 0.8M_{\odot}$, $r_0 = 0.74R_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 5096K$ の主系列星とする。また光球表面における密度と音速はそれぞれ、 $\rho_0 = 1.84 \times 10^{-7}g/cm^3$, $c_s =$

5.92km/s ($T_{\text{eff}} = 5096\text{K}$ から導いた) とし、外側の境界は $r \approx 25r_0$ とした。

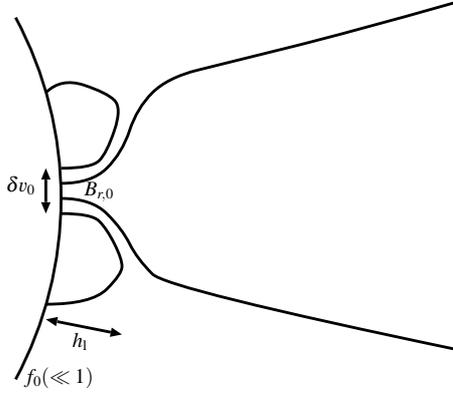


図 2: 光球の磁場構造

図 2 は光球における磁場構造を詳しく示している。閉じたループ状の磁場構造の高さ h_l を超えると開いたチューブ状の磁束管が一気に広がっている。 B_r はある高さ r での磁場の大きさ、 $B_{r,0}$ は光球表面での磁場の大きさである。 $f(r)$ はある高さ r における表面積中の開いたチューブ状の磁場構造が占める割合であり、 f_0 は光球表面での $f(r)$ であり $f_0 \ll 1$ である。今回は閉じたループ状の磁束管を考えないためにこれを導入した。このとき磁束は保存して

$$B_r f(r) r^2 = B_{r,0} f_0 r_0^2 \quad (1)$$

である。また δv_0 は光球の r 方向に垂直な方向の摂動速度で、これにより磁力線が揺らされて Alfvén 波が発生する。シミュレーションではこの 4 つの変数の値を変動させる。 $B_r, f_0, \delta v_0$ は光球で注入されるエネルギーの大きさを決め、 h_l は彩層における Alfvén 波の反射に関係する。光球表面からは r 方向に Alfvén 波が吹き出しており、Poynting フラックス F_A をもっている。今回行うシミュレーションでは、光球表面からは Alfvén 波のみを注入し、この Alfvén 波の Poynting フラックスが恒星風の運動エネルギーへと変換されていく過程を精査する。 F_A を高さ r での開いたチューブ状の磁束管の閉める表面積で表面積分すると、チューブ状の磁束管から吹き出る単位時間当たりの Alfvén 波のエネルギー (光度; erg/s の次元を持つ) が導ける。

$$L_A(r) f(r) = 4\pi r^2 f(r) F_A(r) \quad (2)$$

今後これを $(L_A f)_r$ と記述する。

注入された Alfvén 波の Poynting フラックスは最終的な恒星風の運動エネルギーに変換されるまでに様々な減衰過程を受ける。星の質量損失率を

$$\dot{M} = 4\pi r^2 f \rho v_r \quad (3)$$

と表わすと、減衰した後の最終的な恒星風の運動エネルギーは

$$\begin{aligned} L_K(r) f(r) &= \dot{M} \frac{v_r^2}{2} = 4\pi r^2 f(r) \rho v_r \frac{v_r^2}{2} \quad (4) \\ &= 4\pi r^2 f(r) F_K(r) \quad (5) \end{aligned}$$

と表わされる。ここで F_K と L_K は運動エネルギーフラックスと単位時間当たり r を通過する運動エネルギー (光度; erg/s の次元を持つ) である。

外側の境界 ($r_{\text{out}} = 25r_0$) を単位時間に通過する運動エネルギー $L_K(r_{\text{out}}) f(r_{\text{out}}) = L_K(r_{\text{out}}) (f(r_{\text{out}}) = 1)$ が、光球で注入されるエネルギー $(L_A f)_0$ からどのように決まるのかを考える。

光球で注入されるエネルギーフラックスは以下のように表せる。

$$F_{A,0} = \rho_0 \langle \delta v_0^2 \rangle v_{A,0} \quad (6)$$

ここで $v_{A,0}$ は光球表面での Alfvén 速度であり、位置 r のときは $v_A = \frac{B_r}{\sqrt{4\pi\rho}}$ である。

したがって、光球に注入される Alfvén 波のエネルギーは

$$(L_A f)_0 = 4\pi r_0^2 f_0 \rho_0 \langle \delta v_0^2 \rangle v_{A,0} \quad (7)$$

$$= 4\pi r_0^2 f_0 \rho_0 \langle \delta v_0^2 \rangle \frac{B_r}{\sqrt{4\pi\rho}} \quad (8)$$

と表すことができる。

図 3 は注入されたエネルギー $(L_A f)_0$ が最終的な恒星風の運動エネルギー $L_K(r_{\text{out}})$ に変換されるまでに受ける、エネルギーの減衰過程を示している。光球から放出された Alfvén 波 (エネルギー $(L_A f)_0$) は彩層を通過してコロナへ向かう。しかし彩層からコロナへの遷移領域付近では急激な密度減少が起こり、Alfvén 速度 v_A は急激に増加する。これによって Alfvén 波の一部は反射してしまい、遷移層を通過するエネルギーは減少する。このとき反射されずに彩層を通過

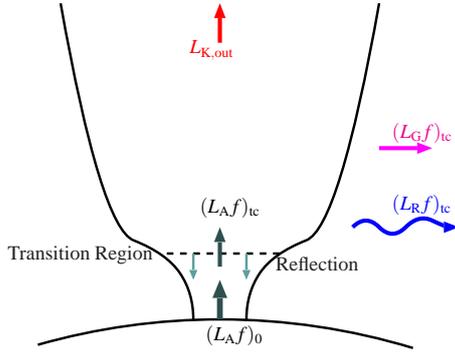


図 3: エネルギーの減衰過程

するエネルギーを $(L_A f)_{tc}$ とする。ただし彩層の頂上を温度が $T = 2 \times 10^4 \text{K}$ になる位置 $r = r_{tc}$ と定義した。

また彩層を通過したエネルギーは、 $r = r_{out}$ で運動エネルギーに変換されるまでに熱放射と重力損失によってエネルギーを損失する。熱放射するエネルギー量は $(L_R f)_{tc}$ と書いて

$$(L_R f)_{tc} \equiv 4\pi \int_{r_{tc}}^{r_{out}} q_R r^2 f dr \quad (9)$$

と表せる。ここで $q_R (\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1})$ は冷却率であり、高度が高い領域では $q_R \propto \rho^2$ である。

また、重力損失するエネルギーは $(L_G f)_{tc}$ と書いて

$$(L_G f)_{tc} \equiv \dot{M} \frac{GM}{r_{tc}} \quad (10)$$

である。したがって、彩層を通過した後に r_{out} まで残る最終的な恒星風の運動エネルギー $L_{K,out}$ は

$$L_{K,out} \approx (L_A f)_{tc} - (L_R f)_{tc} - (L_G f)_{tc} \quad (11)$$

である。以上、様々なエネルギーの減衰過程を説明した。次の節からは $(L_A f)_0$ を変化させたとき $L_{K,out}$ がどのように振る舞うか、磁気流体力学の基礎方程式に熱伝導と放射冷却の効果を取り入れて作成した数値シミュレーション (Suzuki&Inutsuka 2005) を使用して調べた結果について考察する。

3 Results

太陽型星と中小質量星の場合について計算した結果をそれぞれ示す。

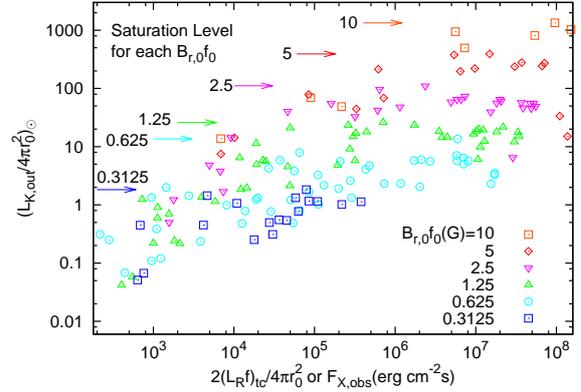


図 4: 太陽型星の恒星風の運動エネルギー (Suzuki et al. 2013 改変)

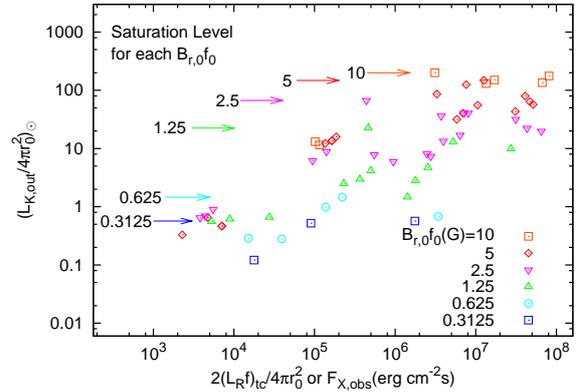


図 5: 中質量星の恒星風の運動エネルギー

図 4 は太陽型星について計算した結果である。横軸は Wood et al.(2005) で観測されたフラックス F_X である。シミュレーションの結果と比較するために、シミュレーションにおける放射損失 $(L_R f)_{tc}$ のフラックスを 2 倍した値を F_X と等しいとした (今回無視した閉じたループ状の磁束管の影響を近似的に取り入れるためである)。縦軸は恒星風の運動エネルギーフラックスを太陽レベルで規格化したものである。また、 $B_{r,0}f_0$ の値によって色分けをしており、色付きの矢印は $B_{r,0}f_0$ それぞれの値における最大値を示している。

図 5 は中質量星における結果である。太陽型星と同じ $B_{r,0}f_0$ を用いて、同様に色分けをした。

4 Discussion

図 4 から、横軸の値が大きくなると運動エネルギーフラックスが矢印の値で頭打ちになり、その後は上昇せずかえって減少していることから、恒星風のエネルギーが飽和していることを確認できる。

前者の急激な上昇は、 δv_0 を大きくしたため磁気圧が増加し、彩層での密度の r 変化が小さくなることから Alfvén 速度の変化が緩やかになり、Alfvén 波の反射が抑制されたためであると考えられる。また後者の減少は、磁気圧の増加により上空の密度が大きくなってしまい、放射損失 ($\propto \rho^2$) によりエネルギーを多く損失してしまうためであると考えられ、これが飽和が起こる原因であると考えられる。

図 5 を見ると中質量星においても、太陽型星と同様に矢印の値で運動エネルギーフラックスが頭打ちしていることから、恒星風のエネルギーが飽和していることを確認できる。また太陽型星 (図 4) と比較すると、同じ $B_{r,0} f_0$ のとき中質量星の方が、飽和したときの運動エネルギーが小さいことが分かる。これは表面重力の差が影響していると考えられる。中質量星は $M = 0.8M_\odot$, $r_0 = 0.74R_\odot$ から、表面重力は太陽型星と比べて約 1.46 倍であり、これにより太陽型星と比べて質量放出が少なくなるため、恒星風のエネルギーも小さくなったと考えられる。

5 Conclusion

以上の結果より、中質量星でも恒星風のエネルギーの飽和が起こることを確認でき、太陽型星との比較をすることもできた。この先も計算を続けて、さらに詳しく中質量星について調べていく予定である。特に太陽型星と比べて飽和の値が小さくなったことについては、表面重力の違い以外にも原因があると思われるため、さらなる考察を進めていきたい。

また今回は $M = 0.8M_\odot$ の恒星のみについて計算したが、 $M = 0.6M_\odot, 0.4M_\odot$ などさらに小質量星の場合についても調べて、中小質量星全体における恒星風駆動のメカニズムを理解したいと考えている。

Reference

Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2005, ApJL, 632, L49

Suzuki, T. K. et al. 2013, PASJ, 65, 98

Hakamada, K., Kojima, M., Ohmi T., Tokumaru, M., & Fujiki, K. 2005, Sol. Phys.

Wood et al. 2005, ApJL, 628, L143