

弱電離プラズマにおける磁気回転不安定性の解析に基づく原始惑星系円盤モデルの検討

Magnetorotational instability in weakly ionized plasma-application to the protoplanetary disk

西村 佳代子 [1]; 飯島 雅英 [2]; 小野 高幸 [3]

Kayoko Nishimura[1]; Masahide Iizima[2]; Takayuki Ono[3]

[1] 東北大・理・地球物理; [2] 東北大・理・地物; [3] 東北大・理

[1] Geophysics, Tohoku Univ.; [2] Geophysical Inst., Tohoku Univ.; [3] Department of Astronomy and Geophysics, Tohoku Univ.

Balbus and Hawley(1991) によって、完全電離プラズマで構成された降着円盤において角運動量輸送に有効に働くことが示された磁気回転不安定性が、原始惑星系円盤のような弱電離プラズマ環境において、有効な角運動量輸送プロセスとして寄与できるか否かについて検討するために、その線形成長率を求めることにより、弱電離プラズマ環境における磁気回転不安定性の諸相について調べた。基礎方程式中には特に弱電離プラズマで重要となる Hall 項を加えている。まず、一般的に、磁気回転不安定性が、様々な物理量に対してどのような性質を示すのかについて調べた。その結果、磁気回転不安定性は、電離度が高いほど有効であり、成長率には電離度の高さが重要なパラメーターであることが確認された。また現在の太陽と同程度の質量を持つ中心星を考えた場合、中心星に近いほどケプラー運動による差動回転効果が大きく、速い成長を示す。ただ、その速度がアルフベン速度を越えると、逆に成長が起こらない場合もあり得るということが判明した。不安定性の成長は初期磁場強度が大きいほど速く、密度とは逆の相関を示し、ガスの慣性が大きいほど成長は抑えられる。温度は衝突頻度に関係し、温度が高ければ磁場エネルギーの散逸は大きい。温度は、電離度にも関連するが、弱電離状態に限る場合にはむしろ散逸に働く。次に Hall 効果については、弱電離プラズマでは大きな影響を持つことが判明した。Hall 電流の向きが磁場の向きによって変わるために、円盤のケプラー回転の角速度ベクトルと磁場の向きが平行か反平行かによって不安定に対して逆の作用をもたらす。すなわち、平行な場合は、Hall 電流は不安定を促進する方向に働き、反平行な場合は、抑制する方向に働くことが示された。これは磁場の誘導方程式の Hall 項の、ダイナモ項への寄与が、磁場の反転とともに反転するためである。

線形解の物理的特性は a 、 b という二つのパラメーターによって決定される。 a はアルフベン速度、ケプラー回転速度、及び Hall 電流を荷う電子の運動速度で決まるパラメーターであり、磁場の向きによって、Hall 電流の効果のために異なった振舞いをする。すなわち、磁場ベクトルが円盤の回転角速度ベクトルと平行な場合は、流体の変形速度であるケプラー回転速度が、アルフベン速度を超えない場合、また、ダイナモ作用を抑える向きに働く Hall 電流を荷う電子の速度がアルフベン速度を超えない場合に不安定が発生する。しかし、反平行の場合は、Hall 電流の効果がダイナモにプラスに働き、その不安定の領域を大きく広げることが明らかになった。つまり、ケプラー回転の方向と磁場の方向の関係が、磁気回転不安定性による降着円盤での角運動量輸送に大きな影響を及ぼすのである。一方、 b は、アルフベン速度と、磁場の拡散速度、ケプラー回転速度から決まるパラメーターで、磁場の拡散が速い場合、及び、ケプラー回転速度が大きい場合には、不安定性を失ってしまうことが示された。しかし、このパラメーターに対する依存性もその値によって変わり、Hall 項が大きくダイナモ作用に寄与する場合には、 a の値が大きい場合でも (磁場の拡散やケプラー回転速度が大きい場合でも) 不安定性を持ち得る。

α -disk モデルを原始惑星系円盤モデルとして採用した場合、一部の電離度の高い円盤の表面や中心星近くを除いて、原始惑星系円盤の環境では、磁場が十分大きくなければ、多くの場合、磁気回転不安定性は成長せず、また、磁場ベクトルが角速度ベクトルと反平行方向に向いている場合には、ほとんどの場合、不安定となることは困難であるとの結論に至った。

これらの結果から、原始惑星系円盤内で磁気回転不安定性によって角運動量が効果的に輸送されるためには、磁場強度が強いこと、中心星からの放射による電離が大きく寄与して高い電離度を持つことなどが必要であり、円盤全域にわたってこの条件を満たしうるか否かは検討を要する。また、従来、磁気回転不安定性が角運動量輸送に有効に働くと考えられてきたブラックホールの周辺などの降着円盤においても、等価的な抵抗の存在、高速な流体運動などの条件の下では、効果的に働かない可能性も示唆される。

本研究では線形解析のみを行ったため、非線形発展について述べることはできないが、線形成長率が存在する条件が、不安定が増大するための必要条件であると考え、その必要条件は、 a と b という二つのパラメーターを用いて表され、原始惑星系円盤にとどまらず、一般の降着円盤に関しても、磁気回転不安定性の有効性について、評価するための手段を得たと言える。