

原始惑星系円盤における磁気回転不安定の非線形進化

Nonlinear evolution of magnetorotational instability in protoplanetary disks

佐野 孝好 [1]

Takayoshi Sano[1]

[1] 阪大レーザー研

[1] ILE, Osaka Univ

惑星系は若い星を取り囲む原始惑星系円盤の中で形成される。この円盤の形成当初には、星間ガスと共に固体微粒子であるダストも星間空間から取り込まれ、それらが一緒に混ざっていたと考えられている。一方、現在の太陽系では固体成分のほとんどは木星型惑星のコアや地球型惑星として存在し、ガスは惑星間空間にはほとんど存在しない。

従って、惑星系形成過程を理解するためには、円盤中でガスとダストがどのような進化をたどったのかを明らかにする必要がある。しかし、その理論的説明はまだ不十分な点が多い。特に、惑星系形成における磁場の効果はまだほとんど考えられていない。

そこで我々は、円盤ガスの流体シミュレーションをガスとダストの二相系に発展させ、さらにガスとダストの相互作用や磁場の効果を解析している。これによって、微惑星形成に至るまでのダストの成長・沈殿過程における磁気乱流の影響を理論的に解明することが期待できる。

磁気円盤中のガスとダストの進化過程において、ガスとダストの相互作用は本質的に重要である。星間空間から取り込まれたダストはガスの流れによくのっているため、ダストの成長過程は円盤ガスの運動状態(乱流か否か)に依存する。一方、円盤ガスを乱流状態にする最も有力な機構は磁気回転不安定である。ダストのサイズや円盤内での空間分布はガスの電離度を決めるため、ガスの磁気的運動はダストの影響を強く受けることになる。そこで我々は、ガスとダストの相互作用を考慮した上で両者の時間進化を同時に扱い、両者の進化に矛盾のない惑星系形成シナリオを構築したいと考えている。

原始惑星系円盤は低温のため熱的な電離はほとんど効かず、主な電離源は宇宙線や X 線である。もし電離度が低すぎる場合には、磁場の散逸によって磁気回転不安定は抑制されてしまう。円盤の密度・温度分布を考慮して、各場所での電離度を見積ると、原始惑星系円盤は極めて低い電離度にも関わらず、ほとんどの領域で磁気回転不安定によって乱流状態になることが明らかになった。乱流中の磁気応力によって角運動量は外側に輸送されるため、磁気回転不安定は降着円盤の角運動量輸送機構として重要視されている。磁気回転不安定の非線形進化の研究は大規模数値シミュレーションを用いて精力的に行われているが、不安定性の飽和機構や磁気応力の飽和レベルについてはまだ十分に理解されていない。降着円盤の理論モデルとして従来用いられていたモデルと比較する上でも、角運動量輸送効率の定量的理解は極めて重要である。本講演では、飽和機構を理解するために必要と思われる磁気乱流の特徴について詳しく解析した結果について報告する。

磁気回転不安定の最も不安定なモードはチャンネル流と呼ばれる軸対称モードである。このモードが成長すると、水平方向の速度シアによって磁力線が曲げられ、増幅された磁場に挟まれたカレントシートがペアで形成される。降着円盤の磁気乱流状態では、このチャンネル流が小さなスケールで成長・散逸を繰り返していることが明らかになった。乱流状態の基本構造がこのチャンネル流であると考えれば、乱流中の磁場の変動や強度比等が定量的に理解できる。また、降着円盤における磁気乱流の速度は音速に比べて十分に小さいので、非圧縮的な乱流であると考えられる。非圧縮磁気乱流の理論モデルは数多く提案されているため、数値シミュレーションの結果と理論モデルとを比較することは非常に興味深い。そこで本講演では、磁場のエネルギー Spektrum や確率分布関数等を用いて理論モデルとの比較を行い、飽和機構の理解に繋がる磁気乱流の特徴について議論する。