

三次元輻射磁気流体力学シミュレーションを用いた 原始惑星系円盤の研究

廣瀬重信 (海洋研究開発機構)

利用カテゴリ XT4B

1 研究の目的と意義

降着円盤は、ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体や原始星の周囲に形成される差動回転ガス円盤である。降着円盤は、差動回転に伴う粘性加熱を通して、ガスの膨大な重力エネルギーを効率良く熱エネルギーに変換できるため、宇宙における様々な高エネルギー・活動現象のエンジンとして重要な天体である。

近年、長らく謎であった、エネルギー変換機構の要である「粘性」の素過程が、磁気回転不安定性によって駆動される磁気乱流であることが明らかになり、ようやく降着円盤の全体像をその第一原理から明らかにする道筋が開けた。しかし、そのためには、降着円盤内部での磁気乱流の散逸、ガスの熱エネルギーから輻射エネルギーへの変換、降着円盤内部から表面への輻射輸送のすべてを自己矛盾なく解く必要がある。

本研究では、三次元の輻射流体力学シミュレーションを用いることにより、これらのプロセス全てを正確に再現し、熱力学的に安定な構造（があればそれを）を求める。本年度は、特に、原始星の周囲に形成される降着円盤（原始惑星系円盤）を研究対象とし、その熱力学構造を求めることを目標とする。惑星の材料であるガスやダストの化学進化や、原始惑星と円盤ガスの重力相互作用などは、ガスの温度に大きく依存する。したがって、原始惑星系円盤の熱力学構造（特に温度構造）を正確に求めることは、惑星形成プロセスを理解する上で、必要不可欠である。

2 研究手法

本研究では、シアリングボックスと呼ばれる手法で、原始惑星系円盤の一部（動径スライス）を取り出し、それをシミュレーションボックスとする。シミュレーションボックスは、円盤の回転系に乗っていて、コリオリ力と潮汐力が働くほか、垂直方向の重力を考慮する。本研究では、特に、この垂直方向に生じる成層構造（温度、密度、加熱率の垂直構造）に着目する。

基礎方程式は、磁気散逸を考慮した輻射磁気流体力学方程式で、輻射輸送に関しては、流束制限つき拡散近似を用いる。また、原始惑星系円盤は、中心星から可視光による照射を受けているがこれに関しては、（散乱を無視し）吸収のみを考慮して解析的に取り扱い、単位体積あたりの加熱率を求めて内部エネルギーのソース項として加える。

原始惑星系円盤では、ダストと呼ばれるサブミクロンサイズの固体微粒子が、オパシティと電気抵抗の双方をコントロールしている。後者に関しては、電気抵抗は、ガス温度と電離度の関数として表されるが、電離度は、中心星から X 線による電離とダスト表面

への電子吸着の電離平衡によって決まるからである。したがって、ダストの量が、原始惑星系円盤の熱力学構造を決定していると言っても過言ではない。本研究では、ダストのガスに対する質量比をパラメータとするが、簡単のため、空間的に一様とする。また、これも簡単のため、ダストとガスは熱平衡にある（同じ温度を共有する）とする。

本年度行った計算では、シミュレーションボックスを中心星（質量0.5太陽質量）から1天文単位の距離に置き、（動径, 方位角, 垂直）の各方向のサイズを（1H, 4H, 10H）、グリッド数は（32, 64, 320）とした。ここで、Hは初期条件として与える $T=280\text{K}$ での静水圧平衡のスケールハイトで、約0.08天文単位である。

このシミュレーションにおける主要なパラメータは、面密度 ($1000\text{g}/\text{cm}^2$)、垂直磁場強度 (0.02 ガウス)、ダスト-ガス質量比 (0.0001) の3つであり、それぞれ括弧内の値を採用した。ダスト-ガス質量比に関しては、星間空間の値0.01から二桁小さい値を用いているが、これは、ダスト粒子の進化（沈殿、合体成長）を考慮してのことである。

原始惑星系円盤の加熱源は、中心星からの可視光照射と磁気乱流の散逸であり、これが、円盤表面からの輻射冷却とつりあうことで、熱平衡が達成される。一方、力学的には、垂直方向の重力に対して、ガス圧と磁気圧が対抗することで静水圧平衡が達成される。数値シミュレーションは、これらの力学時間（円盤回転周期程度）と熱力学時間（円盤回転周期の数倍）よりも十分長く、（統計的）定常状態に達するまで行う。以下に示す例では、200回転周期まで行った（時間ステップ数にすると1000万程度になる）。

3 計算結果

原始惑星系円盤は温度が低い（数百K）ため、熱的な電離が起こらず、上に述べたように中心星からのX線によって表面のみが電離する。結果として、磁気回転不安定性による磁気乱流は、表面（面密度にして $10\text{g}/\text{cm}^2$ 程度）でのみ起こり、内部は、磁気乱流が抑制されたデッドゾーンと呼ばれる領域になる。このデッドゾーンの境界（高さがおおよそ0.1天文単位に位置する）は、原始惑星系円盤の光球面（光学的厚さが1となる面）とほとんど一致する。以後、光球面の外側を「円盤大気」、内側を「円盤内部」と呼ぶ。したがって、磁気乱流によって実効的な粘性が生じるのは円盤大気中であり、乱流散逸もそこで起こることになる。また、この乱流ストレスは、質量降着率に換算すると、 $1.4\text{e-}8$ （太陽質量/年）となり、観測されている典型的な値の範疇に入る。一方、中心星からの可視光が吸収される面（可視光吸収面と呼ぶ）は高さがおおよそ0.2天文単位に位置する。

垂直方向の力学を見ると、磁気活動の弱い円盤内部がガス圧で支えられている一方で、円盤大気は磁気圧によって主に支えられている。結果として、ガス圧だけで支えられている従来のモデルに比べると、50%ほど円盤の厚みが増えていることになる。

加熱率を見ると、円盤の加熱、すなわち、中心星からの可視光照射と磁気乱流の散逸は円盤大気でのみ起こっている（体積積分すると、前者は後者の33倍程度で圧倒している）。一方、円盤内部には熱源はなく、円盤大気からの再放射によって温められているのみである。冷却機構（熱エネルギーの輸送機構）は、輻射拡散のみであり、熱対流などは起こっていない。

垂直方向の温度分布をみると、円盤大気、それはほとんど可視光照射によって温められているが、の温度は、黒体温度よりはかなり高く（400K以上に）なる。これは、円盤大

気のおパシティが、可視光に対して不透明なのに対して、円盤温度の輻射（赤外線）に対して透明なためである。一方、円盤内部では、上に述べたように熱源がないため、ほぼ等温（およそ 130K）になっている。ちなみに、従来のモデルで用いられている粘性モデルは、粘性が密度（あるいは圧力）に比例すると仮定しているため、粘性加熱が赤道面に集中している。このモデルとパラメータ（面密度と質量降着率）を合わせて比較すると、従来のモデルに比べて、赤道面の温度はおよそ 30K 下がることになる。この 30K という差は、ダストの化学進化を考える上では大きい差に成りうる。

また、従来のモデルでは、粘性の力学的側面（ストレス）と熱力学的側面（エネルギー散逸）に区別はないが、本シミュレーション結果では、それらは明確に区別される。すなわち、磁場には浮力があるため、磁場が作られてストレスが強く働く領域よりも高い位置で、磁気散逸が起こる。

磁気乱流の散逸を詳しく見てみると、円盤大気中の電流シートでの磁気リコネクションによって起こることがわかる。この電流シートは、円盤大気下部では水平方向であるのに対し、円盤大気上部では垂直方向であることが特徴的である。これは、磁場がガスに対して相対的に弱い大気下部では、磁場の変形が磁気回転不安定性によるものであるのに対し、磁場が相対的に強い大気上部では、パーカー不安定性によるものであるからである。磁気乱流の散逸が、電流シートに集中して起こるため、局所的な加熱率を見ると、乱流散逸の加熱率が、（平均では 33 倍大きい）可視光照射の加熱率を上回ることがある。実際、電流シートの温度は可視光照射温度（410K 程度）の最大 1.5 倍程度（600K 程度）になる。現実には、電流シートの厚みはさらに薄くなるであろうから（シミュレーションでは、グリッドサイズよりも細かい構造が分解出来ない）、乱流散逸による局所的な温度の上昇はさらに大きくなることが予想される。

4 まとめ

本研究では、輻射磁気流体力学シミュレーションを用いて、原始惑星系円盤の熱力学平衡解を求めた。

1. 円盤光球面はデッドゾーン境界と一致する。この結果はダスト（の有効断面積）がおパシティと電気抵抗の双方を支配している限り、ロバストな結論である。
2. （中心星 X 線によって電離した）光学的に薄い円盤大気において磁気回転不安定性による磁気乱流ストレスが維持され、散逸もそこで起こる。
3. 円盤大気の乱流散逸による加熱は電流シートに集中して起こるため、局所的に可視光照射による加熱を上回ることがある。したがって、観測されるスペクトル線は、乱流散逸の情報を含んでいる可能性がある。
4. 中心星可視光は、磁気圧で支えられて広がった大気によって吸収される。このことは、観測される赤外線超過がしばしば（磁場なしの）静水圧平衡モデルでは説明できないことと関連しているかもしれない。

5. 可視光吸収面は、磁束浮上に伴い（数周期のタイムスケールで）約 0.1AU 程度の幅の上下動を繰り返す。このような円盤表面の振動は、観測される低振幅の赤外線変動の説明につながる可能性がある。
6. 光学的に厚い円盤内部には熱源はなく、円盤大気からの再放射によって温められる。結果として、約 130K で等温になり、これは従来のモデルと比較すると 30K 程度低い値となる。