

11-NA18

天体活動現象の輻射磁気流体シミュレーション

松元亮治 (千葉大学・大学院理学研究科)

概要 輻射と磁気流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを超並列計算機に実装した。従来採用されてきた流束制限拡散(FLD)近似に基づく解法では高密度領域背後の影の形成を扱えないため、輻射輸送方程式の角度方向に関する 1 次モーメント式を解く解法を採用し、輻射応力と輻射エネルギー密度の間のクロージャ関係を満たす輻射場を再構成する解法と、特殊相対論的な抵抗性輻射磁気流体コードを実装してテスト計算を実施した。ブラックホール近傍では陽的な差分法が適用できるため、高い並列効率が得られる。さらに、短い特性曲線法を用いて輻射輸送方程式を直接解くコードを実装して太陽表面对流問題に適用した。また、オーム散逸、両極性拡散、ホール効果の方程式を陰的に差分し、適合格子細分化(AMR)格子上でマルチグリッド法を用いて解くコードを実装し、磁場の散逸を伴う原始星収縮過程に適用した。

1. 研究の目的と意義

本共同研究の目的は、輻射と磁気流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを超並列計算機に実装して天体活動現象の大規模シミュレーションに適用することである。

我々のグループでは、磁場と物質の相互作用を扱う 3 次元磁気流体コードを作成して、太陽内部からの磁束浮上と活動領域の形成 (図 1)、渦状銀河における磁場増幅と維持 (銀河ダイナモ)、重力を及ぼす天体のまわりに形成される回転ガス円盤 (降着円盤) の時間変動とジェット形成 (図 2)、星形成や重力崩壊型超新星爆発等のシミュレーション等を世界に先駆けて実施してきた。しかし、従来の 3 次元磁気流体計算では断熱過程や等温過程を仮定することが多く、多くの天体で重要になる輻射による加熱・冷却が考慮されていなかった。

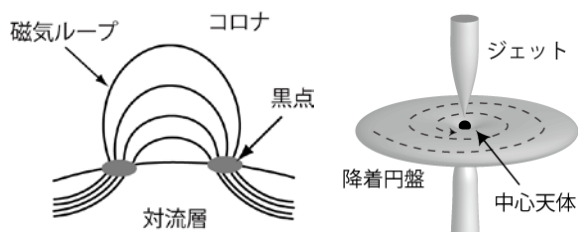


図 1 : 磁気ループの浮上と黒点の形成 図 2 : 降着円盤とジェットの模式図

高光度の天体では輻射圧も重要になる。球対称系において輻射が及ぼす力が重力と等しくなる光度はエディントン光度と呼ばれ、この光度に対応する降着率 (臨界降着率) を超えて物質が降着する

超臨界降着流では輻射圧によって磁気流体が加速され、噴出する。

図 3 に本研究グループの大須賀らによって軸対称性を仮定して実施されたブラ

ックホールへの超臨界降着流の 2 次元輻射磁気流体シミュレーション結果を示す。降着物質の一部が輻射圧で加速され、さらに磁場で絞こまれてジェットが形成されている。

昨年、系外銀河中心核の巨大ブラックホールの潮汐力によって星が破壊されたと考えられる増光現象が発見され、注目されている。Swift J1644+57 という天体では光度がエディントン光度を超えており、潮汐破壊された天体物質がブラックホールの周りを回転しつつ超臨界降着し、まさに図 3 に示したような降着円盤と噴出流を形成していると考えられる。

円盤物質が降着するためには角運動量を失う必要があるが、流体乱流のみによって観測から示唆される高い角運動量輸送率を得ることは難しく、円盤内部で成長する磁気回転不安定性によって生成された磁気乱流のマクスウェルストレスの寄与が大きいと考えられている。降着円盤中の磁場の

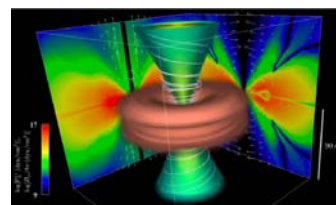


図 3 : 竹内・大須賀・嶺重 (2010) によるブラックホール超臨界降着流の 2 次元輻射磁気流体シミュレーション結果。白線は磁力線。

増幅・維持過程（円盤ダイナモ）には 3 次元効果が本質的に重要であるため、上記の大須賀らの計算を、軸対称性を仮定しない 3 次元輻射磁気流体計算に拡張することが急務になっている。

本共同研究の具体的な対象としては降着円盤とジェット噴出に加えて、星形成過程、太陽表面对流等も扱う。輻射磁気流体の計算手法は重力崩壊型超新星爆発におけるニュートリノと磁気流体の相互作用についても適用でき、応用範囲は広い。

輻射磁気流体のシミュレーション手法としては輻射流束と輻射エネルギー勾配を関係づけた表式を用いる流束制限拡散（Flux Limited Diffusion: FLD）法、輻射輸送方程式の角度方向に関する 1 次のモーメント式を解く 1 次モーメント（M1）法、光線方向に依存する輻射輸送方程式を解く ART 法などが提案され、この順に計算量が増えていく。前述の大須賀らの計算では FLD 法を採用しているが FLD 法では密度の濃い領域の背後にできる影の領域を精度良く扱えない等の問題がある。そこで、本年度には輻射輸送方程式の 1 次モーメント式まで含めて解く M1 法に基づく輻射磁気流体コードの実装とテスト計算、短い特性曲線法を用いて輻射輸送方程式を直接解くコードの実装と太陽表面对流層への適用を中心に共同研究を進めた。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

共同研究実施大学： 東京大学

本共同研究は以下の研究者によって実施した。

千葉大学・大学院理学研究科

松元亮治，川島朋尚，朝比奈雄太

千葉大学・先進科学センター

花輪知幸

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

廣瀬重信

東京大学・大学院理学系研究科

横山央明，堀田英之，鳥海 森，飯島陽久

東京大学・情報基盤センター

中島研吾，片桐孝洋

国立天文台・理論研究部

大須賀健，高橋博之

法政大学・人間環境学部

松本倫明

九州大学・大学院理学研究院

町田真美

九州産業大学・工学部

中村賢仁

総合研究大学院大学

富田賢吾

(2) 共同研究分野

超大規模計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本グループの大須賀はブラックホール超臨界降着流の輻射磁気流体シミュレーションを世界に先駆けて実施した。本共同研究を通して、軸対称性を仮定した 2 次元コードを、対称性を仮定しない 3 次元コードに拡張し、並列効率が低い陽的差分に基づく解法を適用して 3 次元シミュレーションを実施することにより、角運動量輸送の任意パラメータを導入することなく、磁気乱流生成・角運動量輸送過程をセルフコンシステントに組み込んだシミュレーションが可能になり、引き続き世界を先導することができる。

原始惑星円盤のように輻射のタイムスケールが力学的タイムスケールより短い系では陰的差分が必要になる。その並列効率改善のためには大規模連立方程式のソルバーについての豊富な知識と経験が必要であるため、この分野のエキスペートである東京大学情報基盤センターの中島氏、片桐氏に加わっていただき、助言を得ている。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

流束制限拡散（FLD）法よりも一歩近似を進めた 1 次モーメント法（M1 法）に基づく輻射磁気流体コードの実装を進めた。この解法は陽的差分に適合し、ブラックホール近傍等を含むシミュレーションで高い並列性能を得ることができる。輻射輸送方程式の直接解法にも着手した。

・ 1 次モーメント法を用いた輻射輸送モジュールの開発

輻射磁気流体計算においては磁気流体の時間発展を記述する方程式と輻射輸送方程式を連立して解く。振動数 ν の輻射の輻射強度を $I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n})$ とするとき (\mathbf{r} は位置ベクトル、 \mathbf{n} は光線方向の単位ベクトル)、輻射輸送方程式は次式で記述される。

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla \right) I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) = -\sigma_\nu I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_\nu S_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) + \sigma_{\nu,s} \int g(\mathbf{n}, \mathbf{n}') I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}') d\mathbf{n}'$$

ここで、 c は光速度、 σ_ν は吸収断面積、 $\sigma_{\nu,s}$ は散乱断面積、右辺第一項は吸収、第二項は放射、第三項は散乱をあらわす。この方程式は空間 3 次元、光線方向 2 次元、振動数 1 次元、計 6 次元の方程式になっている。この方程式を直接解くかわりに、角度方向について積分し、

$$E_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

$$\mathbf{F}_\nu(t, \mathbf{r}) = \int \mathbf{n} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

と置くと次式が得られる。

$$\frac{\partial E_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_\nu = \sigma_\nu (4\pi S_\nu - cE_\nu)$$

FLD 近似では、輻射流束 \mathbf{F}_ν が輻射エネルギー密度 E_ν の勾配に比例すると仮定し、方程式を閉じさせる。この解法では輻射の拡散方程式が解かれることになるため、障害物があっても拡散を通して障害物の背後に光がまわりこんでしまい、影ができなかったり、ビームが広がってしまったりするという問題がある。

これを回避するため、輻射輸送方程式に \mathbf{n} を乗じて角度方向に積分した 1 次モーメント式

$$\frac{\partial \mathbf{F}_\nu}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{P}}_\nu = -c(\sigma_\nu + \sigma_{\nu,s}) \mathbf{F}_\nu$$

を解いて輻射流束の時間発展を直接計算する方法 (1 次モーメント法) が提案されている (Gonzalez et al. 2007)。 \mathbf{P}_ν は次式で与えられる輻射による応力テンソルである。

$$\tilde{\mathbf{P}}_\nu(t, \mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \mathbf{nn} I_\nu(t, \mathbf{r}, \mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

ただし、このままでは方程式が閉じないため、応力テンソルと輻射エネルギー密度の間に以下のクロージャ関係が成立すると仮定する。

$$\tilde{\mathbf{P}}_\nu = \left(\frac{1-\chi}{2} \tilde{\mathbf{I}} + \frac{3\chi-1}{2} \mathbf{nn} \right) E_\nu$$

$$\chi = \frac{3+4f^2}{5+2\sqrt{4-3f^2}}$$

$$f = \frac{|\mathbf{F}_\nu|}{cE_\nu}$$

$U = (E_\nu, F_{\nu,x}, F_{\nu,y}, F_{\nu,z})$ とすると以下の方程式が得られる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{S}$$

これを差分化し、図 4 のメッシュ境界 $(i+1/2, j, k)$ における数値流束 $F_{x, i+1/2, j, k}$ を求めれば U の時間発展が求まる。

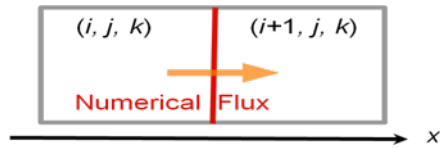


図 4 : 数値流束を求めるメッシュ境界点

メッシュ境界における数値流束を求める方法としては風上差分に基づく HLL 法などが適用できるが、本研究グループの花輪は、より数値拡散が小さい解法として、セル中心での $U = (E_\nu, \mathbf{F}_\nu)$ の値をもとにしてクロージャ関係を満たす輻射場 $I_\nu(\mathbf{n})$ を以下のように再構成する方法を提案した。

$$I_\nu(\mathbf{n}) = \frac{3E_\nu}{8\pi} \frac{(1-\beta^2)^3}{3+\beta^2} (1-\beta \cdot \mathbf{n})^{-4}$$

$$\beta = \frac{3f}{2+\sqrt{4-3f^2}} \quad \beta = \beta \frac{\mathbf{F}_\nu}{|\mathbf{F}_\nu|}$$

この輻射強度分布をもとに、メッシュ境界での輻射流束を、輻射の方向を考慮して以下のように決める。

$$F_{\nu, x, i+1/2, j, k} = F_{\nu, x, i+1/2, j, k}^{(+)} + F_{\nu, x, i+1/2, j, k}^{(-)}$$

$$F_{\nu, x, i+1/2, j, k}^{(+)} = \oint_{n_x > 0} n_x I_{\nu, i, j, k}(\mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

$$F_{\nu, x, i+1/2, j, k}^{(-)} = \oint_{n_x < 0} n_x I_{\nu, i+1, j, k}(\mathbf{n}) d\mathbf{n}$$

この積分は解析的に行うことができ、再構成された数値流束が求まる。吸収、放射がある場合はセル内での吸収、放射の補正を加える。

図 5 に $z=1.5$ に障害物を置き、左境界から $+z$ 方向に $E=1.0$, $F_z=0.999c$ の放射を入射させた場合のシミュレーション結果を示す。カラーは放射エネルギー密度、矢印は放射流束ベクトルを示す。HLL 法 (上図)、再構成法 (下図) いずれの場合も障害物の影ができるが、HLL 法では影との境界がなまっているのに対し、再構成法は境界がよりシャープに保たれていることが確認できた。

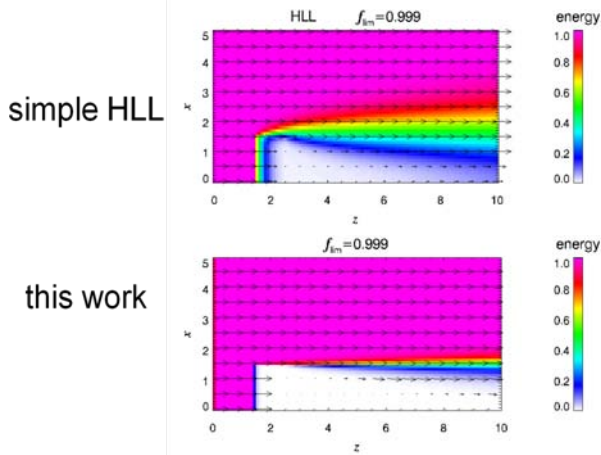


図 5 : 左境界から $+z$ 方向に放射が入射した場合の影形成。上図は HLL 法, 下図は再構成法を適用した結果。カラーは放射エネルギー密度, 矢印は放射流束ベクトル。

図 6 に閃光テストの結果を示す。初期に原点周辺の球内に E 一定, $\mathbf{F}=(0.9, 0, 0) cE$ の放射場を設定し、この放射が真空中に広がる過程を計算した。左図が HLL 法, 右図が再構成法による結果である。HLL 法では中心が初期の放射場の方向にずれる偏心が生じているが再構成法では偏心, 数値拡散ともに抑えられている。

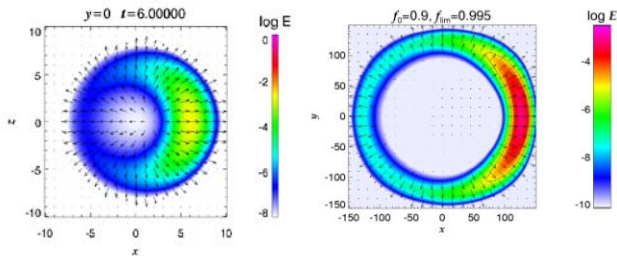


図 6 : 初期に E 一定, $\mathbf{F}=(0.9, 0, 0) E$ の場合の結果。左: HLL 法, 右: 再構成法。カラーは放射エネルギー密度, 矢印は $f=\mathbf{F}/E$ 。

・ 相対論的抵抗性放射磁気流体コードの開発

ブラックホール近傍でのジェット生成等の計算では相対論的な放射磁気流体コードが必要になる。本グループの高橋は、放射は実験室系で、吸収や散乱の断面積などについては流体とともに動く共動座標系で定義した場合の放射輸送方程式の 0 次, 1 次のモーメント式

$$\begin{aligned} \partial_i E_r + \partial_j F_r^j &= \rho \kappa \left(4\pi \gamma B - c \gamma E_r + \frac{u_j F_r^j}{c} \right) \\ &- \rho \kappa_s \left[\frac{\gamma u^2 E_r}{c} - \frac{\gamma u_i u_j P_r^{ij}}{c} - \left(\gamma^2 + \frac{u^2}{c^2} \right) \frac{u_j F_r^j}{c} \right] \\ \frac{1}{c^2} \partial_i F_r^i + \partial_j P_r^{jj} &= \rho \kappa \left(\frac{4\pi u^i B}{c^2} - \frac{\gamma F_r^i}{c} + \frac{u_k P_r^{ik}}{c} \right) \\ &- \rho \kappa_s \left[\frac{\gamma F_r^i}{c} - \frac{\gamma^2 u^i}{c} E_r - \frac{u_k P_r^{ik}}{c} \right. \\ &\quad \left. + \frac{u^i}{c} \left(\frac{2\gamma u_j F_r^j - u_j u_k P_r^{jk}}{c^2} \right) \right] \end{aligned}$$

を相対論的磁気流体方程式, マクスウェル方程式と連立させて解くコードを作成した。 κ , κ_s は吸収, 散乱の不透明度, γ はローレンツ因子, B は黒体放射強度である。放射の非等方性を考慮したクロージャ関係

$$P^{ij} = \left(\frac{1-\chi}{2} \delta^{ij} + \frac{3\chi-1}{2} n^i n^j \right) E_r$$

を採用した場合の障害物への照射テストの結果, 図 5 と同様に影ができることを確認した。

電気抵抗がある場合, 共同座標系でのオームの法則 $\mathbf{E}' = \eta \mathbf{j}'$ (\mathbf{E} は電場ベクトル) を観測者系にローレンツ変換すると

$$\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c} - \left(\frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}}{c} \right) \frac{\mathbf{v}}{c} = \frac{\eta}{\gamma} (\mathbf{j} - \rho_e \mathbf{v})$$

ここで ρ_e は電子の電荷密度である。

非相対論的な磁気流体現象では Maxwell 方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{B} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

の左辺の変位電流を無視するが, 相対論的な抵抗性電磁流体では左辺を残す必要がある。上式にオームの法則から求まる観測者系での電流密度を代

入し, \mathbf{v}, \mathbf{B} については他の方程式から求まる値を採用して時間方向に陰的な差分をとると次のタイムステップ ($n+1$ ステップ) での電場の各成分 $E_x^{n+1}, E_y^{n+1}, E_z^{n+1}$ を与える連立方程式が得られる。空間差分は含まれないため, この方程式は各メッシュ点の情報だけで解くことができ, 高い並列効率が得られる。この相対論的輻射磁気流体コードを用いて, 電流層における磁気リコネクションに輻射が及ぼす効果を調べた結果を図 7 に示す。周辺プラズマからの輻射による輻射抵抗のため, 輻射を考慮した場合の方がリコネクションジェット の速度が低下している。

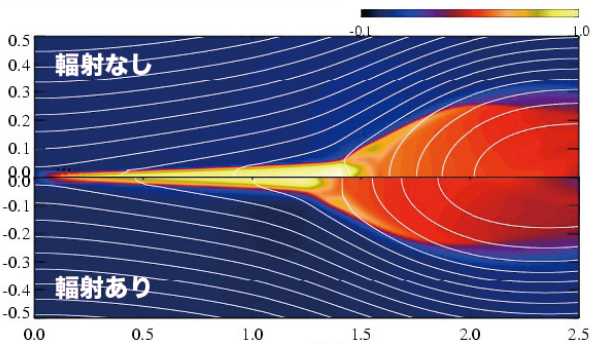


図 7: 左端中心で発生する磁気再結合 (磁気リコネクション) の相対論的輻射磁気流体シミュレーション結果 (Takahashi et al. 2012)。カラーは速度分布。白い実線は磁力線。

・輻射輸送を考慮した太陽表面对流のシミュレーション

本グループの飯島らは太陽表面における数万 km のスケールの構造 (超粒状斑) の形成機構を明らかにするためにカーテシアン座標 3 次元磁気流体コードに輻射加熱項を加えて太陽表面对流のシミュレーションを実施した。太陽内部は高温のため内部からの放射によって大気は加熱される。輻射加熱項 Q_{rad} は局所熱力学平衡を仮定し, 散乱を無視した定常状態の輻射輸送方程式

$$\frac{dI_{\nu}}{ds} = \rho\kappa_{\nu}B_{\nu}(T) - \rho\kappa_{\nu}(\rho, T)I_{\nu}$$

を直接解くことによって求める。 ds は光線方向の線素である。以下では振動数依存性を考えない単色近似を用い, Rosseland 平均した不透明度 κ を用いる。輻射強度 I が求まれば, この I を角度方

向に積分して平均輻射強度 J を求めることにより $Q_{\text{rad}} = 4\pi\rho\kappa(J - B(T))$ から Q_{rad} が求まる。

輻射輸送の直接解法には short characteristic 法を用い, 各光線方向について図 8 の数字の順に格子点上の I の値を決定した。光線方向は 24 方向について計算した。計算には HA8000 の 64 コアを用い, MPI を用いて並列化した。計算速度はコアあたり, 一秒間に 3.1×10^4 格子・ステップである。図 9 に磁場なし対流の場合の表面での輻射強度分布を示す。計算に用いたメッシュ数は $288 \times 288 \times 100$ 。計算領域の一辺の長さは 6000km, 厚さは 2000km である。上昇流がある領域が明るくなる。

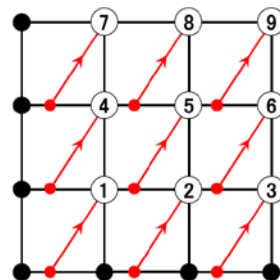


図 8: short characteristic 法による輻射輸送計算方法。数字の順に格子点上の I_{ν} の値を決定していく。

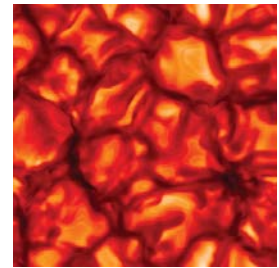


図 9: 輻射流体計算から求めた磁場なし対流の場合の太陽表面での輻射強度分布 (飯島ら 2012)。

・超臨界降着流・噴出流の輻射スペクトル計算

本グループの川島朋尚はモンテカルロ法による光子輸送計算を行うことにより, シミュレーション結果をもとに輻射スペクトルを求めるモジュールを作成し, ブラックホール超臨界降着流の輻射流体シミュレーション結果に適用した (図 3 参照)。その結果, ブラックホール近傍に形成される衝撃波加熱領域における逆コンプトン散乱によって 10keV 以上に至る冪スペクトルが得られること, 降着率がさらに高い場合には回転軸近傍の低密度領域で散乱された光子が輻射圧加速によって円盤から噴出する低温アウトフロー領域に入ってエネルギーを失い, 超高光度 X 線源 (Ultraluminous X-ray Sources: ULXs) に特徴的に見られる 5keV あたりにピークを持つ山型スペクトルが形成されることを示した (図 10)。この結果は ULX が超臨界降着状態にあることを示唆する。

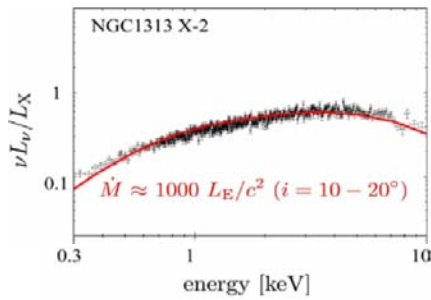


図 10: 超高光度 X 線源 NGC1313 X-2 の輻射スペクトル (黒, Gladstone et al. 2009) と超臨界降着流の数値実験結果から求めたスペクトル (赤, Kawashima et al. 2012)。

・磁場散逸を考慮した星形成シミュレーション

本グループメンバーである松本倫明によって開発された適合格子細分化法 (AMR法) に基づく磁気流体コード Sfumato を用いて、星形成の重要な要素である乱流と磁場が、分子雲コアが収縮して原始星が形成される過程に及ぼす影響を高解像度数値シミュレーションで調べた。

星間ガスにおいて、自由落下時間の時間スケールでは、ガスは磁場に凍結している。したがって重力収縮を考えるとときには理想 MHD は良い近似である。しかし、原始惑星系円盤の進化や分子雲コアの形成過程を考えると、進化の時間スケールは自由落下時間よりも長く、磁場と散逸効果が重要になる。オーム散逸を取り入れた計算の最終段

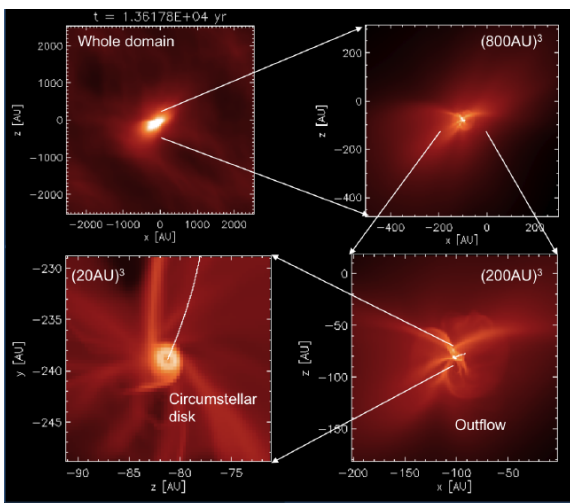


図 11: 磁場の散逸をともなう原始星収縮のシミュレーション。乱流を持った分子雲コアが収縮し (左上、右上)、アウトフローが放出され (右下)、原始星の周囲に原始惑星系円盤が形成される (左下)。色は密度。白線は原始星 (シンク粒子) の軌跡。

階 (ファーストコア形成後 1000 年) を図 11 に示す。

本年度は、昨年度に導入したオーム散逸に加え、両極性拡散 (ambipolar diffusion) とホール効果の陰解法スキームを開発した。本スキームでは両極性拡散・ホール効果・オーム散逸の方程式を陰的に差分し、AMR 格子上でマルチグリッド法を用いて解を収束させる。マルチグリッド法では、非線形方程式を解くことができる FAS (Full Approximation Scheme) を採用した。Smoother には Gauss-Seidel-Newton 法を用いた。

上記の陰解法は問題によっては収束しないことがあり、よりロバストなスキームの開発が必要である。そこで、マルチグリッド法を前処理とした Krylov 部分空間法を導入する計画である。ここで開発するスキームは、非線形の拡散方程式の解法なので応用範囲は広い。

・原始惑星系円盤の輻射磁気流体計算

図 12 に原始惑星系円盤の一部を取り出して廣瀬が実施した 3 次元輻射磁気流体シミュレーション結果を示す。円盤赤道面付近では電離度が低く電気抵抗が大きいため磁気回転不安定性が成長しない dead zone ができる。しかしながら、図 12 左図のように、速度シアが存在するために方位角方向の磁場が強められる場合がある。この例では、赤道付近には方位角方向に揃った強い磁場ができ、円盤の鉛直構造にも影響を及ぼしている。このような磁場が存在すれば惑星形成にも影響を及ぼす。

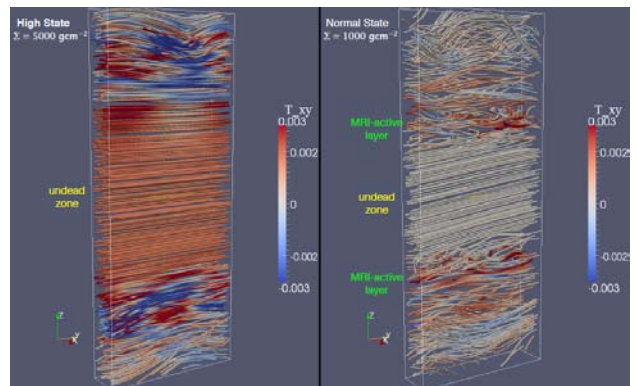


図 12: 原始惑星系円盤の輻射磁気流体シミュレーション結果。左: 面密度が高い場合。右: 面密度が低い場合。線は磁力線、カラーは磁気ストレス。

(2) 当初計画の達成状況について

本年度最大の目標としていた輻射輸送方程式の角度方向の 1 次モーメント式を用いて輻射流束の時間発展を陽的に解くモジュールを作成することができ、障害物による影形成等のテスト計算において、これまで使用してきた流束制限拡散 (FLD) 法に基づくコードよりも良好な結果を得ることができた。また、この手法を相対論的輻射磁気流体コードに拡張することもできた。これらのコードは陽的差分を用いているため 256 コア以上を使用した場合でもほぼコア数に比例する性能が得られている。ブラックホール降着流等、輻射のタイムスケールと力学的なタイムスケールが同程度になる現象では大規模 3 次元輻射磁気流体シミュレーションが実施可能になった。

輻射輸送方程式を角度方向に平均化せずに、短い特性曲線法を用いて直接解く並列化したコードを実装することができ、太陽表面对流計算に適用することができたことも大きな成果である。

輻射のタイムスケールが短い場合には陰的差分を適用することが必要になる。本グループの松本倫明は、適合格子上でマルチグリッド法を用いて陰的差分の解を収束させるコードを作成したが、問題によっては収束しないことがあり、よりロバストな解法を実装することが課題になっている。原始惑星円盤の輻射磁気流体計算においても同様な課題が残っている。本グループの中村賢仁、町田真美らは陰的差分を用いて熱伝導方程式を解く並列化したコードを原始星フレアに適用した。

シミュレーション結果をもとに光子輸送のモンテカルロ計算を実施して輻射スペクトルを求めるモジュールを作成することができ、ブラックホールへの超臨界降着流の輻射流体シミュレーション結果に適用することによって超高光度 X 線源の輻射スペクトルを再現することができた。これは、超高光度 X 線源 (ULX) が超臨界降着状態にあることを示唆する重要な成果である。

2012 年 3 月に千葉大学において宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップを開催し、宇宙磁気流体シミュレーション統合環境 CANS

の改訂、新たに開発したモジュールの組み込み等について議論するとともに、輻射磁気流体コードのアルゴリズム等を「数値天文学テクニカルマニュアル増補版」として公開する準備ができた。コード開発過程、天体現象への適用例等は様々な国際会議、国内研究会で発表され、日本における輻射磁気流体シミュレーション研究を活性化した。

4. 今後の展望

本共同研究最大の目標であるブラックホール降着流の大局的 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを実施する準備が整った。磁気流体コードとしては平成 22 年度の共同研究において作成した近似リーマン解法の一つである HLLD 法に基づく円筒座標系 3 次元磁気流体コードをベースとして、数値的な磁場散逸を防ぐため、セル境界値を空間 5 次精度で求める MP5 法を適用した HLLD+MP5 コードを採用する。このコードと平成 23 年度に作成した 1 次モーメント法に基づく輻射輸送モジュールを結合した円筒座標系 3 次元輻射磁気流体コードを実装してシミュレーションを実施する。

対象天体としては、系外銀河中心核巨大ブラックホールによる星の潮汐破壊によって超臨界降着していると考えられている Swift J1644+57 を選び、光度、輻射スペクトルの時間発展をシミュレートして観測と比較する。潮汐破壊現象は超臨界降着から亜臨界降着への降着率変化を観測できる貴重な機会であり、有効に活用したい。銀河系内のブラックホール候補天体で観測されている降着率増加に伴う硬 X 線が強い状態 (ハードステート) から軟 X 線が強い状態 (ソフトステート) への遷移過程と状態遷移に伴うジェット噴出過程を解明することも目指す。

太陽表面对流に適用した輻射輸送方程式を直接解くコードを降着円盤に適用することも試みていく。星形成、原始惑星系円盤の輻射磁気流体シミュレーションに必須となる陰的解法をよりロバストな解法に改訂することが課題として残されている。マルチグリッド法を前処理とした Krylov 部分空間法等を適用して改善をはかりたい。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

- Hirose, S., and Turner, N., Heating and Cooling Protostellar Disks, *Astrophys. J.*, 732, L30 (2011)
 - Blaes, O.M., Krolik, J.H., Hirose, S., and Shabaltas, N., Dissipation and Vertical Energy Transport in Radiation-dominated Accretion Disks, *Astrophys. J.*, 733, 110 (2011)
 - Okuzumi, S., and Hirose, S., Modeling Magnetorotational Turbulence in Protoplanetary Disks With Dead Zones, *Astrophys. J.*, 742, 65 (2011)
 - Machida, M. N., Inutsuka, S.-I., and Matsumoto, T., Effect of Magnetic Braking on Circumstellar Disk Formation in a Strongly Magnetized Cloud, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63, 555 (2011)
 - Machida, M. N., and Matsumoto, T., The origin and formation of the circumstellar disc, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 413, 2767 (2011)
 - Matsumoto, T., An Implicit Scheme for Ohmic Dissipation with Adaptive Mesh Refinement, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63, 317 (2011)
 - Ohsuga, K., and Mineshige, S., Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows around Black Holes from Two-Dimensional Radiation-Magnetohydrodynamic Simulations, *Astrophys. J.* 736, 2 (2011)
 - Takahashi, H.R., Kudoh, T., Masada, Y., and Matsumoto, J., Scaling Law of Relativistic Sweet-Parker Type Magnetic Reconnection, *Astrophys. J.*, 739, L53 (2011)
 - Hotta, H., and Yokoyama, T., Modeling of Differential Rotation in Rapidly Rotating Solar-type Stars, *Astrophys. J.*, 740, 12 (2011)
 - Toriumi, S., and Yokoyama, T., Numerical Experiments on the Two-step Emergence of Twisted Magnetic Flux Tubes in the Sun, *Astrophys. J.*, 735, 126 (2011)
 - Toriumi, S., Miyagoshi, T., Yokoyama, T., Isobe, H., and Shibata, K., Dependence of the Magnetic Energy of Solar Active Regions on the Twist Intensity of the Initial Flux Tubes, *Publ. Astron. Soc. Japan* 63, 407 (2011)
 - Hotta, H., Rempel, M., Yokoyama, T., Iida, Y., Fan, Y., Numerical calculation of convection with reduced speed of sound technique, *Astronomy and Astrophysics*, 539, id. A30 (2012)
 - Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., Yoshida, T., Heinzeller, D., Matsumoto, R., Comptonized Photon Spectra of Supercritical Black Hole Accretion Flows with Application to Ultraluminous X-ray Sources, *Astrophysical Journal* 752, in press (2012)
- (2) 国際会議プロシーディングス
- (3) 国際会議発表
- Hotta, H., and Yokoyama, T., Parity of solar global magnetic field determined by turbulent diffusivity in solar flux-transport dynamo, IUGG General Assembly 2011, Australia, July 4, 2011
 - Hotta, H., and Yokoyama, T., Modeling of differential rotation of rapidly rotating stars, IUGG General Assembly 2011, Australia, July, 5, 2011
 - Ohsuga, K., Radiation-HD/MHD Simulations, Black Hole Slim Disk Workshop, Warsaw, Poland, July 1 - 8, 2011
 - Toriumi, S., and Yokoyama, T., 2D and 3D MHD Simulations on the Solar Flux Emergence from -20,000km, Flux Emergence Workshop, Berkely, USA, Aug. 22, 2011
 - Yokoyama, T., MHD simulations on eruption triggered by flux emergence, Flux Emergence Workshop 2011, Berkeley, USA, August 22, 2011
 - Yokoyama, T., Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere, 第 13 回北東アジアシンポジウム, Daejeon, Korea, Sept. 27, 2011
 - Hirose, S., Magnetic Structure of Protoplanetary Disks, in *Formation of Stars &*

- Planets 2011, Ishigaki, Japan, October 3-7, 2011
- Toriumi, S., and Yokoyama, T., Numerical Simulation and the SOT Magnetogram Analysis on the Small-scale Magnetic Elements in the Solar Emerging Flux Region, Fifth Hinode Science Meeting (Hinode-5), Boston, USA, Oct 11, 2011
 - Ohsuga, K., Radiation-MHD simulations of black hole accretion flows and outflows, AGN Winds in Charleston, Charleston, SC, USA, October 15-18, 2011
 - Takahashi, H.R., Ohsuga, K., Magnetic Energy Release in Relativistic Plasma, IAU Symposium 279 Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts, March 12-16, 2012, Nikko, Japan
- (4) 国内会議発表
- 堀田英之, 太陽の対流・差動回転・子午面還流、そしてダイナモ, 第 2 回機構連携学術会合「乱流駆動の角運度量輸送」, 2011 年 4 月 26 日, 核融合科学研究所
 - Hirose, S., N. J. Turner, Heating and Cooling in Protoplanetary Disks Driven by Magnetic Turbulent Stresses, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 27 日, 幕張メッセ
 - 鳥海森, 横山央明, 太陽浮上磁場と活動領域形成に関する大規模 3 次元 MHD 数値計算, 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, 2011 年 5 月 27 日, 幕張メッセ
 - 堀田英之, 横山央明, 平均場モデルによる自転角速度の大きい恒星の差動回転の研究, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 27 日, 幕張メッセ
 - 大須賀健, RHD/RMHD-Simulations of Super-Eddington Accretion Flows & Outflows; 超光度 X 線源は super-Eddington 天体か? 滞在型研究会「全天体形成」, 2011 年 8 月 1-31 日, 北海道大学
 - 堀田英之, 現在と昔の太陽ダイナモ, Faint young sun paradox 研究会, 2011 年 9 月 6 日, 国立天文台
 - 松元亮治, 小川崇之, 朝比奈雄太, 小野貴史, 降着円盤磁気流体シミュレーションの高精度化, 日本流体力学会, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 町田真美, 中村賢仁, 松元亮治, 銀河ガス円盤ダイナモの 3 次元磁気流体数値実験, 日本流体力学会, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 朝日奈雄太, 小川崇之, 松元亮治, 冷却効果を考慮した磁気流体ジェットと HI ガスの相互作用シミュレーション, 日本流体力学会, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 廣瀬重信, 原始惑星系円盤の加熱・冷却機構, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 堀田英之, Matthias Rempel, 横山央明, 飯田佑輔, Yuhong Fan, 音速抑制法による太陽内部対流数値計算, 日本流体力学会 年会 2011, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 鳥海森, 横山央明, 3 次元数値計算による太陽磁束浮上・活動領域形成の研究, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京
 - 松元亮治, 川島朋尚, 小野貴史, ファンネル壁衝撃波加熱によるコンプトン雲形成モデル, 日本天文学会秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - 菅野裕次, 花輪知幸, 輻射輸送の M1 モデルの数値解法, 日本天文学会秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - 松本倫明, 陰解法を用いた磁場の散逸過程の数値解法, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - 廣瀬重信, 原始惑星系円盤デッドゾーンにおけるトロイダル磁場の増幅と散逸, 日本天文学会秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - 高橋博之, 大須賀健, 関口雄一郎, 井上剛志, 富田賢吾, 陰的解法に基づく安定な相対論的輻射磁気流体コードの開発, 日本天文学会, 2011 年 9 月 19-22 日, 鹿児島大学
 - 野村真理子, 大須賀健, 和田桂一, 須佐元, 三澤透, Broad Absorption Line クェーサーのラインプォース駆動型円盤風モデル, 日本天文学会, 2011

- 年9月19-22日, 鹿児島大学
- ・大須賀健, 竹内駿, 嶺重慎, 輻射磁気流体シミュレーションによるclumpyなAGN outflow, 日本天文学会, 2011年9月19-22日, 鹿児島大学
 - ・堀田英之, 飯田佑輔, 横山央明, 直接計算による乱流拡散強度の評価, 日本天文学会 2011 秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - ・鳥海森, 横山央明, 太陽浮上磁場・活動領域形成に関する 3 次元 MHD 数値シミュレーション, 日本天文学会秋季年会, 2011 年 9 月 21 日, 鹿児島大学
 - ・廣瀬重信, 原始惑星系円盤デッド・ゾーンの磁場構造, 日本惑星科学会2011年秋季講演会, 2011年 10月24日, 相模女子大学
 - ・松元亮治, 町田真美, 朝比奈雄太, 小川崇之, 工藤祐己, 銀河円盤・降着円盤ダイナモの3次元磁気流体数値実験, Plasma Conference 2011, 2011年 11月23日, 石川県立音楽堂
 - ・高橋博之, 大須賀健, 相対論的抵抗性磁気流体コードの数値解法, Plasma Conference 2011, 2011 年 11 月 24 日, 石川県立音楽堂
 - ・高橋博之, 相対論的リコネクションと輻射場による影響, NINS/UT Reconnection Workshop 2012, 2012 年 2 月 20 日, 学術総合センター
 - ・堀田英之, 音速抑制法, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ, 2012 年 3 月 5 日, 千葉大学
 - ・高橋博之, モーメント法を用いた輻射場と相対論的磁気流体の数値解法, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ, 2012 年 3 月 6 日, 千葉大学
 - ・飯島陽久, 太陽表面对流のための輻射磁気流体方程式の数値解法, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ, 2012 年 3 月 6 日, 千葉大学
 - ・花輪知幸, 1 次モーメント法の適用, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ, 2012 年 3 月 6 日, 千葉大学
 - ・町田真美, 松元亮治, 川島朋尚, モンテカルロ法による輻射スペクトル計算, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ, 2012 年 3 月 6 日, 千葉大学
 - ・廣瀬重信, 磁気乱流が駆動する降着円盤の熱力学, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・町田真美, 中村賢仁, 小田寛, 松元亮治, X線連星状態遷移時の明るいHard状態に関するMHD数値実験, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・中村賢仁, 町田真美, 原始星フレアに関する磁気流体数値実験, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・川島朋尚, 大須賀健, 嶺重慎, Blaes, O., 吉田鉄生, 松元亮治, ULXの超臨界降着流モデル:アウトフロー低温電子のコンプトン散乱によるスペクトル再現, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・松元亮治, 松本洋介, 小川崇之, 朝比奈雄太, 小野貴史, 工藤祐己, 長谷部英賢, 山本瑠祐, 横山央明, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションソフトウェアの拡充, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 19 日~3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・管野裕次, 花輪知幸, 輻射輸送のM1モデルの数値解とその特性, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 19 日~3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・高橋博之, 大須賀健, 相対論的抵抗性輻射磁気流体コードの開発とその応用, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 19 日~3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・飯島陽久, 横山央明, 超粒状班のスケール選択における磁場の役割, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
 - ・堀田英之, 横山央明, 飯田佑輔, Matthias Rempel, Yuhong Fan, 音速抑制法による太陽内部対流数値計算 2, 日本天文学会春季年会, 2012 年 3 月 19 日~3 月 21 日, 龍谷大学
- (5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)
- ・廣瀬重信, 原始惑星系円盤の加熱・冷却機構, ながれ「注目研究 in 年会 2011」, 第 30 巻第 6 号, 459, 2011
 - ・大須賀健, 『ゼロからわかるブラックホール』講談社ブルーバックス, 2011