

jh150034-NA21

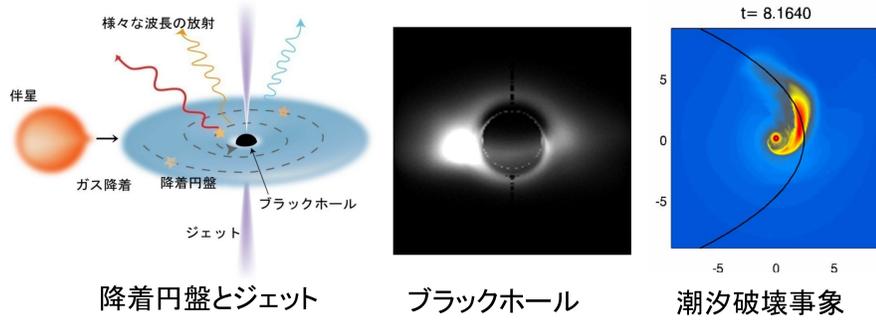
松元亮治(千葉大学)

次世代降着円盤シミュレータの開発

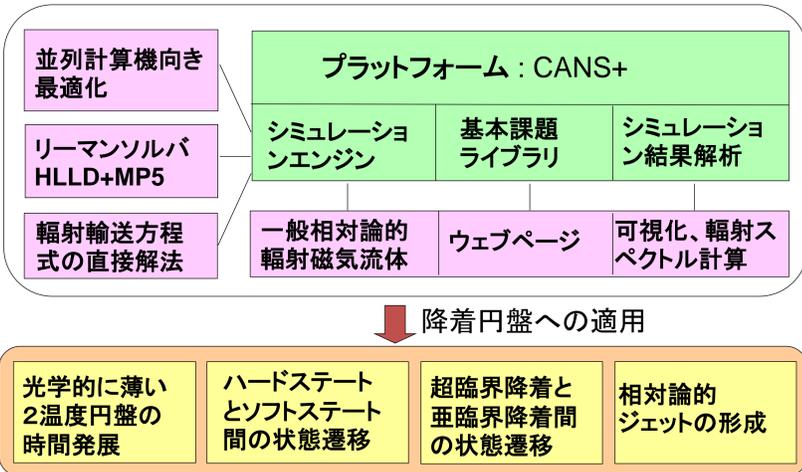


1. 研究目的

重力を及ぼす天体のまわりに形成される降着円盤の時間発展を計算する3次元磁気流体シミュレータを改訂して、その適用範囲を拡大することを目的とする。



2. 降着円盤シミュレータ



3. 一般相対論化した輻射磁気流体コードの実装

計量テンソル $g_{\mu\nu}$ の時空における基礎方程式

mass cons. $\partial_t(\sqrt{-g}\rho u^t) + \partial_i(\sqrt{-g}\rho u^i) = 0$

Gauss's law $\partial_i(\sqrt{-g}B^i) = 0$

Induction eq. $\partial_t(\sqrt{-g}B^i) = -\partial_j[\sqrt{-g}(b^j u^i - b^i u^j)]$

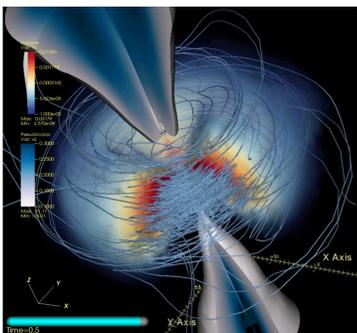
energy momentum cons. for MHD $\partial_t(\sqrt{-g}T_\nu^t) + \partial_i(\sqrt{-g}T_\nu^i) = \sqrt{-g}T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g}G_\nu$

energy momentum cons. for radiation $\partial_t(\sqrt{-g}R_\nu^t) + \partial_i(\sqrt{-g}R_\nu^i) = \sqrt{-g}R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g}G_\nu$

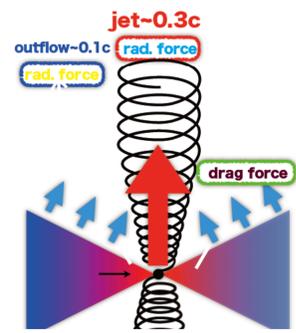
radiation four force $G^\mu = -\rho(\kappa_a + \kappa_s)R^{\mu\nu}u_\nu - \rho(\kappa_s R^{\alpha\beta}u_\alpha u_\beta + \kappa_a 4\pi B)u^\mu$

M1-closure $R^{\mu\nu} = \frac{4}{3}\bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3}\bar{E}_R g^{\mu\nu}$ (see, Sadowski'13)

- 輻射輸送方程式を角度積分した1次モーメント式を陽的差分法によって解くM1コードを一般相対論化(Takahashi et al. 2015)
- Kerr-Schild 座標を採用。ブラックホールの回転の効果を考慮
- 降着円盤の時間変動とジェット形成過程の計算に適用



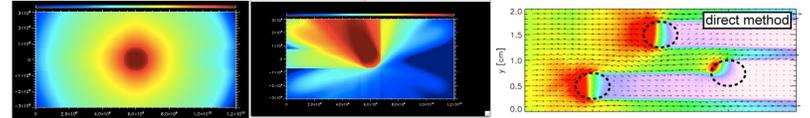
一般相対論的輻射磁気流体計算例。赤-青は密度。線は磁力線。上下にのびる青い領域はアウトフロー速度。



降着率が高い場合のシミュレーション結果の模式図。輻射圧加速されるジェットが形成される。

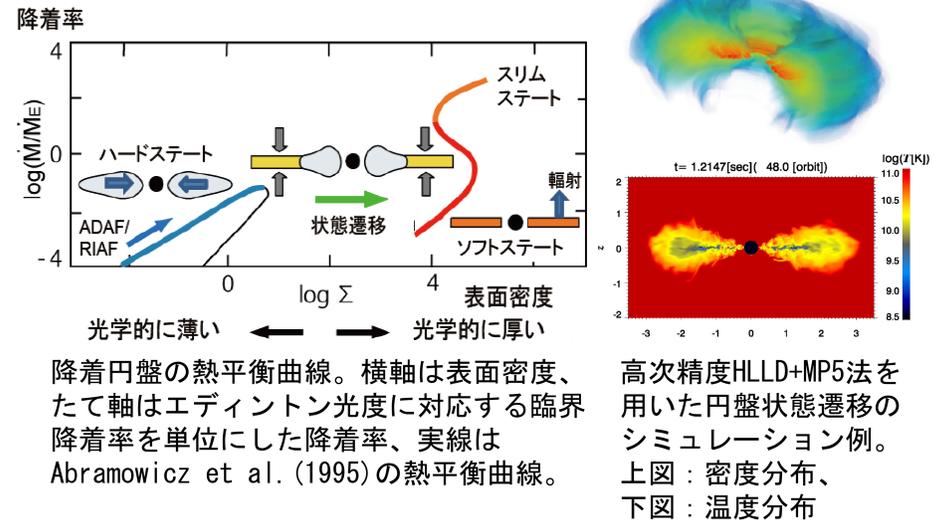
4. 降着円盤シミュレータの拡張

- (a) 輻射輸送方程式直接解法の実装
吸収・散乱を考慮した輻射輸送方程式を角度積分せずに各光線方向について解く直接解法を実装中 (Ohsuga et al. 2015)
- (b) 2温度プラズマへの拡張
イオン温度と電子温度の時間発展を熱制動放射、逆コンプトン散乱による電子冷却、クーロン散乱によるイオンから電子へのエネルギー輸送等を考慮して解くモジュールを実装する。
- (c) 熱伝導モジュールの実装
磁力線方向に依存する非等方熱伝導をsuper time stepping法を用いて陽的に解くモジュールを実装中。
- (d) 並列効率の高い輻射場・重力場の陰解法の実装
輻射場や重力場を求める際にあらわれる大規模連立方程式の解法として中島研吾氏らによって開発された差分法向けに最適化された行列解法ライブラリを適用して並列効率を高める。



散乱・吸収を考慮した輻射輸送方程式の直接解法によるテスト計算例。左：光学的に薄いガス雲による散乱光のエネルギー分布、中央：速度を持ったガス雲による散乱、右：光学的に厚い雲による散乱。

5. 降着円盤状態遷移への適用



降着円盤の熱平衡曲線。横軸は表面密度、たて軸はエディントン光度に対応する臨界降着率を単位にした降着率、実線は Abramowicz et al. (1995) の熱平衡曲線。

高精度HLLD+MP5法を用いた円盤状態遷移のシミュレーション例。上図：密度分布、下図：温度分布

6. 共同研究メンバーと役割分担

松元亮治(千葉大)	研究統括、降着円盤シミュレーションの実装
廣瀬重信(JAMSTEC)	陰的差分を用いた輻射磁気流体コードの並列性能向上、降着円盤への適用(副代表)
片桐孝洋(東大情報基盤センター)	陰解法に適用できる並列性能の高い連立1次方程式解法の実装(副代表)
大須賀健(国立天文台)	輻射輸送直接解法の実装、降着円盤への適用
高橋博之(国立天文台)	一般相対論的輻射磁気流体コードの実装、降着円盤への適用
川島朋尚(国立天文台)	輻射スペクトル計算モジュールの実装
松本倫明(法政大)	AMR法に基づく自己重力磁気流体コードの並列性能向上、星形成領域への適用
町田真美(九州大)	2温度降着円盤コード実装、数値実験の実施
中村賢仁(九州産業大)	熱伝導モジュールの並列性能向上
松本洋介(千葉大)	シミュレーションコード整備、チューニング、公開
花輪知幸(千葉大)	自己重力磁気流体コードの並列性能向上
朝比奈雄太(国立天文台)	相対論的輻射磁気流体コードの適用
工藤祐己(千葉大)	熱伝導モジュールの実装・並列性能向上
谷田部紘希(千葉大)	super time steppingを用いた熱伝導解法の実装
中島研吾、松本正晴(東大情報基盤センター)	陰解法に適用できる並列性能の高い連立1次方程式解法の実装、並列性能向上