# FLDを用いた輻射流体シ ミュレーションの現状と RMHDの展望

## 大須賀 健 (立教大)

### 目次

### 1. 導入

- 2. 基礎方程式
- 3. 計算法
- 4. 結果
- 5. 輻射磁気流体計算への展望

### Introduction

### <u>超臨界降着流</u>

- •質量降着率が臨界値(L<sub>E</sub>/C<sup>2</sup>)を超える降着流[L<sub>E</sub>:Eddington光度]
- •NLS1sやULXs等のhigh L/L<sub>E</sub>天体のエネルギー源
- •ブラックホールの急成長を可能にする物理現象
- •輻射圧優勢円盤が構築されると予想される
- •スリムディスクモデルは不十分:多次元効果を扱えない

・2次元輻射流体シミュレーション(粘性)に降着流の構造、ダイナミクスの解明
・最終的には輻射磁気流体計算が必要であろう!



#### **Basic Equations of RHD**



- •Radiation fields: FLD approximation
- • $\alpha$ -viscosity:  $\alpha P$  ( $\alpha$ =0.1, *P*:total pressure)
- •Absorption coefficient( $\kappa = \kappa_{ff} + \kappa_{bf}$ ),  $\kappa_{ff}$ :free-free absorption,  $\kappa_{bf}$ :bound-free absorption (Hayashi, Hoshi, Sugimoto 1962)

•Radiation transfer [Flux-Limited Diffusion Approximation]

$$\mathbf{F}_{0} = -\frac{c\lambda}{\kappa_{0} + \sigma} \nabla E_{0} \quad \mathbf{P}_{0} = \mathbf{f}E_{0}$$

$$R = \frac{|\nabla E_{0}|}{(\kappa_{0} + \sigma)E_{0}}, \quad \lambda = \frac{2 + R}{6 + 3R + R^{2}}, \quad \eta = \lambda + \lambda^{2}R^{2}$$

$$[\mathbf{f}]_{ij} = \frac{1}{2}(1 - \eta)\delta_{ij} + \frac{1}{2}(3\eta - 1)\frac{[\nabla E_{0}]_{i}}{|\nabla E_{0}|}\frac{[\nabla E_{0}]_{j}}{|\nabla E_{0}|}$$

$$\mathbf{F}_{0} = \begin{cases} -cE_{0}\frac{\nabla E_{0}}{\left|\nabla E_{0}\right|} & (\tau \to 0) \\ -\frac{1}{3}\frac{c}{\kappa + \sigma}\nabla E_{0} & (\tau \to \infty) \end{cases}$$

#### まじめな輻射輸送









Gas-Radiation Interaction Step
 ・陰解法

 
$$\frac{\partial e}{\partial t} = -4\pi\kappa B + c\kappa E_0$$
 ・4 次方程式を解く

  $\frac{\partial E_0}{\partial t} = 4\pi\kappa B - c\kappa E_0 - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P}_0$ 
 ・並列化に何の問題もなし



### <u>計算法と境界条件</u>

- •流体コード(陽解法) + 輻射輸送コード(陰解法)
- ・極座標回転軸対象( $96 \times 96 \times 92$ )、計算領域は $3r_{g} \sim 500r_{g}$
- •初期条件は円盤無し
- •境界条件(500rgの赤道面付近)
  - •ガスを連続的に注入
  - ・注入ガスはサブケプラー回転(遠心力バリアは100 $r_g$ )
- ・境界条件 $(500r_g$ の赤道面以外)
  - ・流出は自由、流入は遮断
- •境界条件 $(3r_g)$ 
  - •自由境界
- ・境界での輻射フラックスはF=cE
- PCクラスタによる並列計算



### 結果その1 Ohsuga et al. 2005











#### 2D-RHDシミュレーションとslim diskの比較



・質量降着率はBH近傍で減少する。Slim diskでは一定と仮定。 ・密度分布、動径速度分布は大きく異なる。 ・回転速度、温度分布は似ている。



### **Collimated Radiation**







幾何学的&光学的に厚い 円盤のため、輻射が軸方 向にコリメートされる。

0.4

21



円盤の不安定理論による周期的光度変動

不安定率で円盤にガス が供給されると、周期 的光度変化が起こる









•GRS 1915+105の準周期的光度変動の再現に成功
•2次元効果(アウトフロー&Photon-trapping)が重要

### **Conclusions**

質量降着率の大きなブラックホール降着円盤の2D-RHDシミュレーショ ンを行った。

- ◆超臨界降着流は光学的&幾何学的に厚く、輻射圧駆動型のアウトフ ローが発生する。赤道面付近の密度分布、動径速度分布ともにslim disk とは異なる。
- ◆質量降着率はブラックホールに近づくにつれて減少する。質量降着率 が一定という仮定は正しくない。
- ◆Photon-trappingは有効に働く。Slim diskは光度を過大評価する。
- ◆輻射がコリメートされるため、face-onの場合に高L/L<sub>E</sub>天体として観 測される。 cos関数の補正では不十分。
- ◆2D-RHDシミュレーションで初めてLimit-cycle oscillationsを再現することに成功した。
- ◆GRS 1915+105の光度曲線を再現することに成功した。

### Radiation MHDへの展望

### FLDを用いたRMHDへ



### ここで考えたFLD-RMHDの注意事項

- 1. 輻射エネルギーの振動数依存性を無視している(振動数依存 型の輻射流体方程式は項が増えるので注意が必要)
- 2. ガスを一温度プラズマと仮定している(例えば密度の低い領 域では陽子と電子の温度が一致しない可能性がある)
- 3. 輻射輸送でFLD近似を用いている以上、相対論効果[O(v/c)] は入らない

#### 私の考えるRMHDの展望のまとめ

- FLDを用いた非相対論的RMHD計算(陽解法+大規模並列計 算)は既に現実可能なターゲットであろう。
- Full transferを用いた相対論的RMHDは計算量が膨大。長期 的課題
- 陽子と電子を(せめて温度だけでも)個別に扱うことが低質 量降着率円盤では重要であるが、リコネクションの物理の解 明が必須