

ブラックホール近傍からの 高エネルギー輻射について

愛知教育大学 修士課程1年

黒田健太

Introduction

ブラックホール探査に向けて

ブラックホールは光さえも一旦入ったら脱出できない時空領域を形成する。
→ 電磁波では直接観測することは不可能である。

ブラックホール近傍で輻射された電磁波を観測することは可能である。
ブラックホール近傍の時空構造を電磁波から読み取る。

→ ブラックホールの質量とスピンパラメータを求めることができる

本研究の指針

ブラックホール近傍で発生するMHD降着流の
高エネルギー輻射現象によって観測されるスペクトルに注目する。

→ ブラックホール近傍の時空構造の解明を目指します！

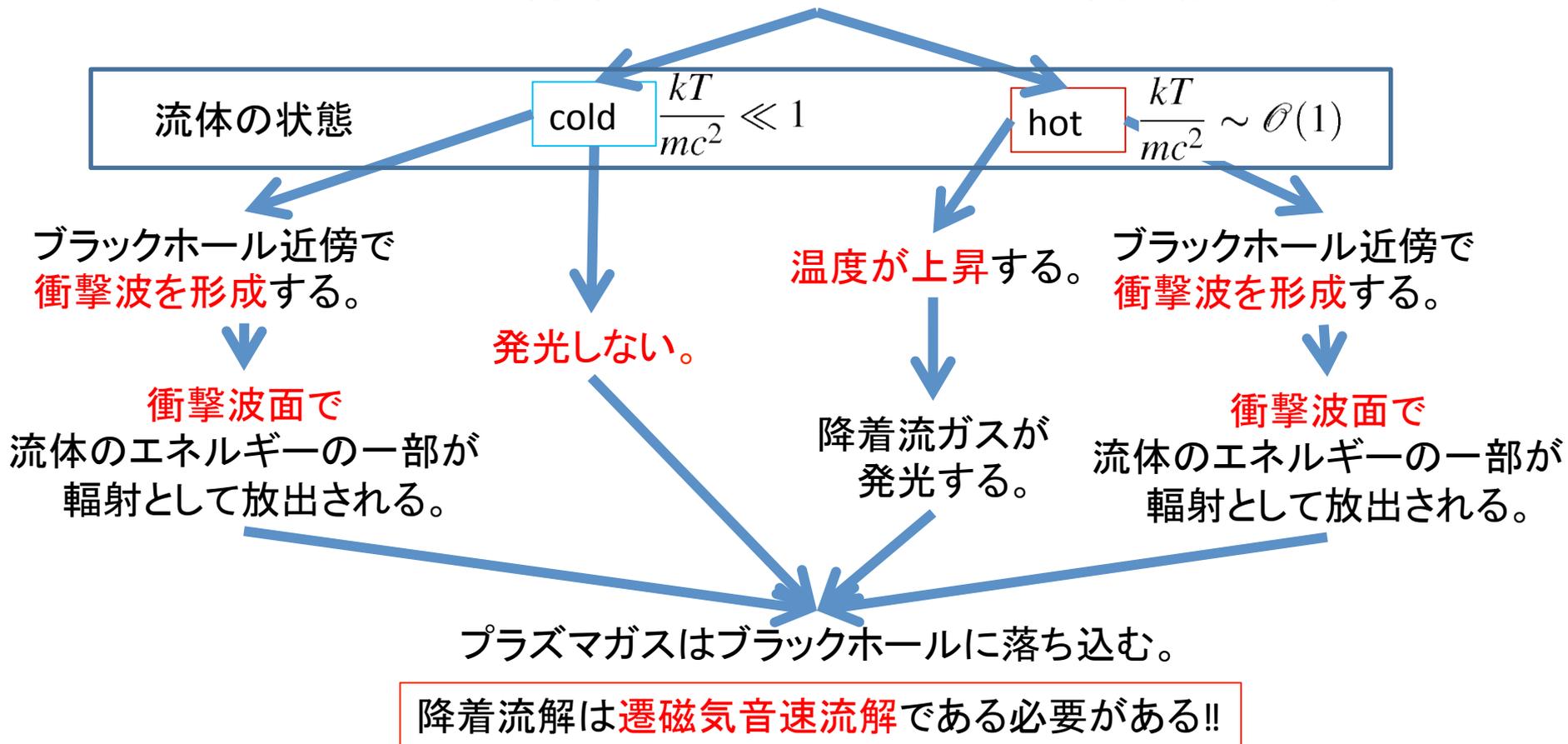
本講演では、特に、MHD降着流に焦点を絞り議論する。

状況設定

- ・降着円盤を周囲に形成しているブラックホール系を想定する。
- ・定常、軸対称、理想MHDプラズマ、ポリトロピック関係式を仮定する。

輻射過程

プラズマガスが降着円盤からブラックホール磁気圏に漏れ出す。



基礎方程式系

運動方程式

$$T^{\alpha\beta}_{;\beta} = 0$$

連続の式

$$(nu^\alpha)_{;\alpha} = 0$$

理想MHD条件

$$u^\beta F_{\alpha\beta} = 0$$

ポロトロピック関係式

$$P = K \rho_0^\Gamma$$

ここで、

$$T^{\alpha\beta} = n\mu u^\alpha u^\beta - P g^{\alpha\beta} + \frac{1}{4} \left(F^\alpha{}_\lambda F^{\lambda\beta} + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F^2 \right)$$

エネルギー・運動量テンソル

$$\mu \equiv \frac{\rho + P}{n} \quad \text{相対論的エンタルピー}$$

ρ エネルギー密度

n プラズマの粒子数密度

u^α 流体の4元速度

$F_{\alpha\beta}$ 電磁気テンソル

P 圧力

ρ_0 静止質量密度

MHD降着流

流線に沿った保存量

降着流は流線(磁力線)に沿って流れる。

磁力線に沿った保存量が5つあり、これらが降着流を特徴づける。

・磁力線の角速度	$\Omega_F(\Psi)$	・全角運動量	$L(\Psi)$
・磁束あたりの粒子数束	$\eta(\Psi)$	・エントロピー	$S(\Psi)$
・全エネルギー	$E(\Psi)$		

$\Psi(r, \theta)$: 流線関数

解くべき方程式系

ポロイダル方程式(相対論的ベルヌーイの式)

$$\hat{e}^2 - \hat{\mu}^2 \alpha - M^4 (\alpha \mathcal{B}_p^2 + \mathcal{B}_\phi^2) = 0$$

ここで、

$$\hat{e} \equiv \hat{E} - \Omega_F \hat{L}, \quad \alpha \equiv g_{tt} + g_{t\phi} \Omega_F + g_{\phi\phi} \Omega_F^2, \quad \mathcal{B}_p \equiv B_p / (4\pi \mu_c \eta), \quad \mathcal{B}_\phi \equiv B_\phi / (4\pi \mu_c \eta \rho_w)$$

相対論的エンタルピー

相対論的 Mach 数

磁場のトロイダル成分の無次元量

$$\hat{\mu} = 1 + \hat{\mu}_1 n^{\Gamma-1}$$

ここで、

$$\hat{\mu}_1 = \frac{\Gamma K}{\Gamma - 1} m_p^{\Gamma-2}$$

$$M^2 = \frac{4\pi \mu \eta^2}{n}$$

$$\mathcal{B}_\phi = \frac{G_\phi \hat{E} + G_t \hat{L}}{\rho_w (M^2 - \alpha)}$$

降着流ガスが cold か hot によって取り扱いが異なる!!

Alfven 速度、速い磁気音速、遅い磁気音速

$$M^2(r, \theta) = M_{AW}^2(r, \theta) = \alpha(r, \theta)$$

$$M^2(r, \theta) = M_{FW/SW}^2(r, \theta) = \frac{1}{2} \left(Z \pm \sqrt{Z^2 - 4\alpha \gamma_{sw}^2} \right)$$

ここで、

$$Z = \alpha + \beta^2 + \gamma_{sw}^2$$

$$\gamma_{sw}^2 = C_{sw}^2 \frac{4\pi \mu n}{B_p^2}$$

C_{sw} 音波の4元速度

MHD降着流の解析法

M.Takahashi & A.Tomimatsu (2008) で提案された β モデルを用いる。

磁力線のピッチ角を β と定義する。
$$\beta = \frac{B_\phi}{B_p}$$

β モデルの利点

- ・特異点の構造が磁場形状の関数 β に繰り込まれる。
→ 音速点での臨界条件の議論をせずに遷磁気音速流解を得ることができる。

手順

磁力線のピッチ角 β の関数
または、ZAMO 系で観測される
トロイダル磁場に対する電場の大きさ比 ξ の関数を与える。

この関数を、磁力線が磁気音速点や Alfvén 点で滑らかだと仮定する。

以上を踏まえてベルヌーイの式を求めると、
流速に関する高次の方程式が得られる。

(cold の場合、ベルヌーイの式は2次方程式に帰着される。)

cold limit

M.Takahashi & A.Tomimatsu (2008)より

ポロイダル方程式

$$AM^4 - 2BM^2 + C = 0$$

$$A = \left(z - \frac{1}{\beta}\right) \frac{1}{\rho_w^2} (G_\phi \hat{E} + G_t \hat{L})^2$$

$$B = \hat{e}^2 - \alpha$$

$$C = \alpha(\hat{e}^2 - \alpha)$$

$$z = -(k+1)\rho^2 / (G_\phi \hat{E} + G_t \hat{L})^2$$

$$k = (g_{\phi\phi} \hat{E}^2 + 2g_{t\phi} \hat{E} \hat{L} + g_{tt} \hat{L}^2) / \rho_w^2$$

解の公式を用いて、 M^2 について解く

$$M_{\pm}^2(r, \theta) = \frac{B \pm (B^2 - AC)^{1/2}}{A}$$

M_+^2 : the super-Alfvénic solution ($M^2 > \alpha$)

M_-^2 : the sub-Alfvénic solution ($M^2 < \alpha$)

Alfvén 速度、速い磁気音速、遅い磁気音

速 $M_{AW}^2(r, \theta) = \alpha$ $M_{SW}^2(r, \theta) = 0$

$$M_{FW}^2(r, \theta) = \alpha + \beta^2$$

計算例

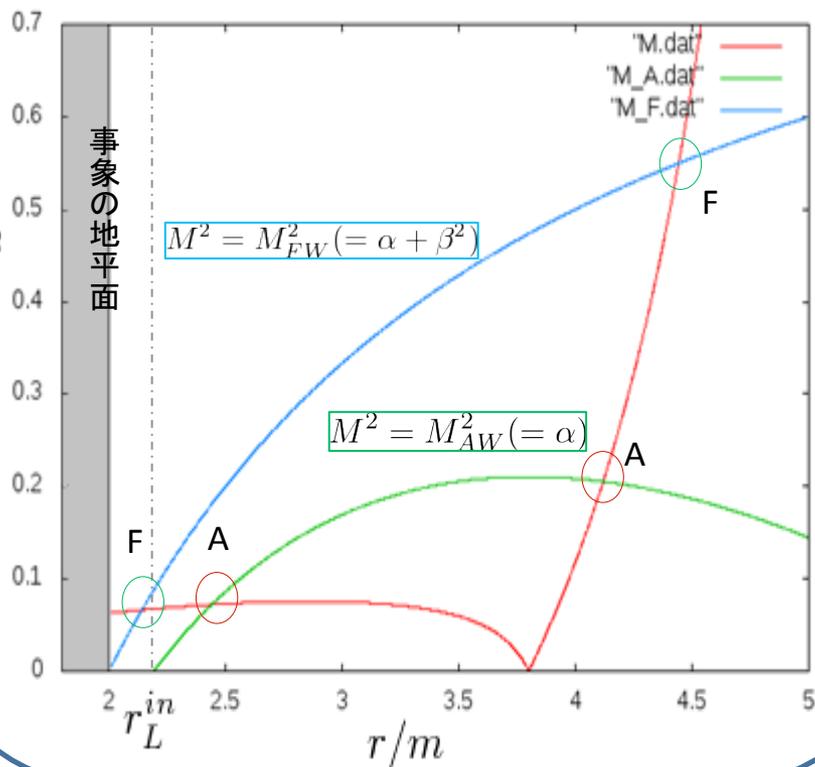
cold の再現を確認 → hot へ拡張

磁力線の角速度とブラックホールの角速度の関係によって ξ の関数形が異なる。

type I $\omega_H < \Omega_F < \Omega_{\max}$

$$\xi^2 = 1 + C_I \left(\frac{\Delta}{\Sigma} \right) \quad C_I = 0$$

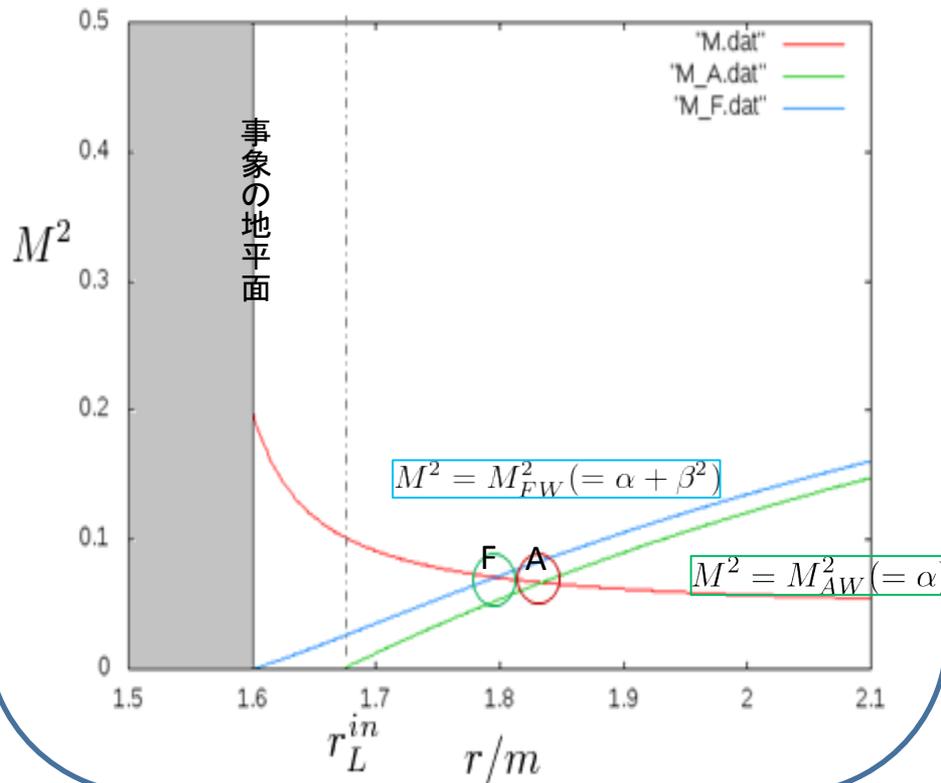
theta = 0.5*pi, a = 0, E = 1.15, OmegaF = 0.135, L = 0.69118/OmegaF



type II $0 < \Omega_F < \omega_H$

$$\xi^2 = \left\{ 1 + C_{II} \left(\frac{\Delta}{\Sigma} \right) \right\} \left(\frac{\omega - \Omega_F}{\omega_H - \Omega_F} \right)^2$$

theta = 0.5*pi, a = 0.8, E = 1.0, OmegaF = 0.155, L = -0.5/OmegaF, CII = 15



等温衝撃波を形成するMHD降着流

上流、下流ともに cold と仮定する。

M.Takahashi & R.Takahashi (2010) より

→ 衝撃波面で発生する熱的エネルギーはすべて輻射エネルギーなどに変換されシステムから放出される。

放出できる最大のエネルギーを見積もることができる。

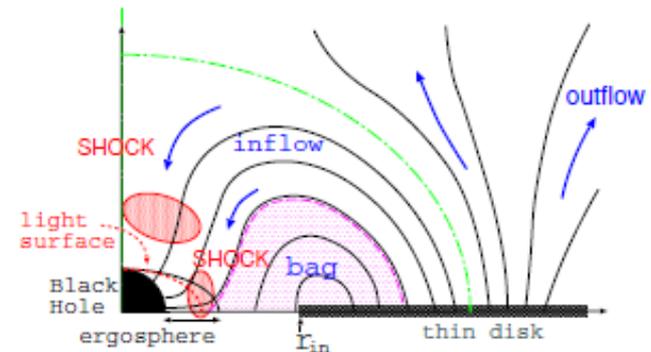
衝撃波がブラックホール近傍で形成できる。

エネルギー・運動量保存則の成分の
jump condition

$$\left(M^2 + \frac{1}{2}\beta^2 \right)_{\text{up}} = \left(M^2 + \frac{1}{2}\beta^2 \right)_{\text{down}}$$

(全角運動量、磁力線の角速度、粒子束は
衝撃波面前後で保存されると仮定する。)

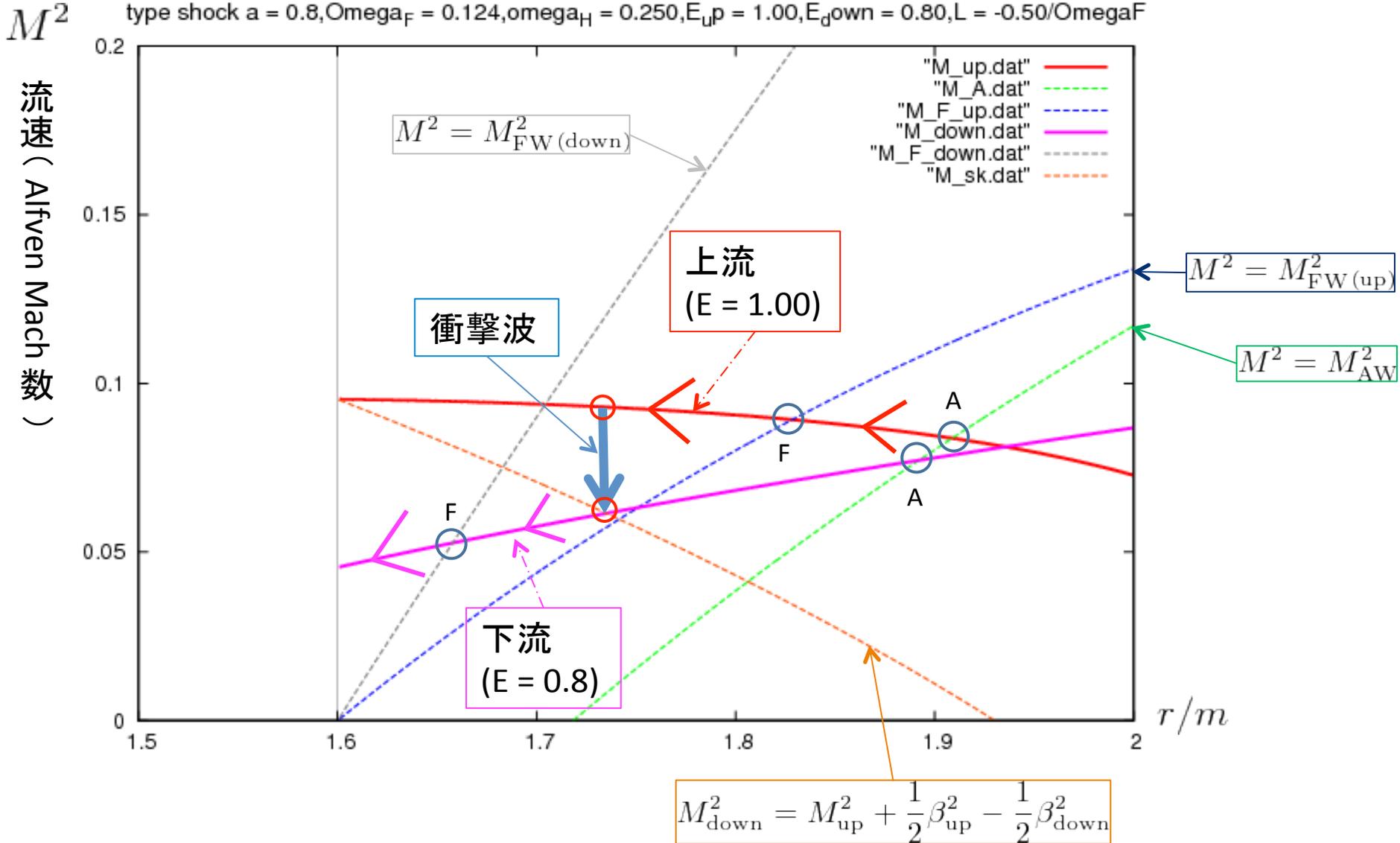
→ $M_{\text{down}}^2 = M_{\text{up}}^2 + \frac{1}{2}(\beta_{\text{up}}^2 - \beta_{\text{down}}^2)$
ピッチ角の変化量



M.Takahashi & R.Takahashi
(2010)

計算例

cold – cold 衝撃波モデル



hot モデル

ポロイダル方程式(相対論的ベルヌーイの式)

$$\hat{e}^2 - \hat{\mu}^2 \alpha - M^4 (\alpha \mathcal{B}_p^2 + \mathcal{B}_\phi^2) = 0$$

相対論的エンタルピー

$$\hat{\mu} = 1 + \hat{\mu}_1 n^{\Gamma-1}$$

相対論的 Mach 数

$$M^2 = \frac{4\pi\mu\eta^2}{n}$$

磁場のトロイダル成分の無次元量

$$\mathcal{B}_\phi = \frac{G_\phi \hat{E} + G_t \hat{L}}{\rho_w (M^2 - \alpha)}$$

流体を hot にした効果

Alfven 速度、速い磁気音速、遅い磁気音速

$$M^2(r, \theta) = M_{AW}^2(r, \theta) = \alpha(r, \theta)$$

$$M^2(r, \theta) = M_{FW/SW}^2(r, \theta) = \frac{1}{2} \left(Z \pm \sqrt{Z^2 - 4\alpha\gamma_{sw}^2} \right)$$

ここで、 $Z = \alpha + \beta^2 + \gamma_{sw}^2$

$$\gamma_{sw}^2 = C_{sw}^2 \frac{4\pi\mu n}{B_p^2}$$

C_{sw} 音波の4元速度

数密度

$$n = \frac{4\pi\mu\eta^2}{M^2}$$

圧力

$$p = K\rho^\Gamma$$

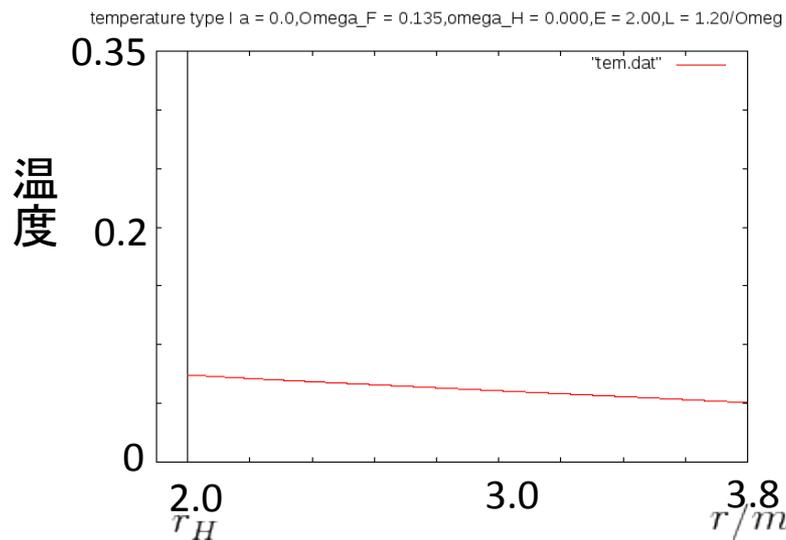
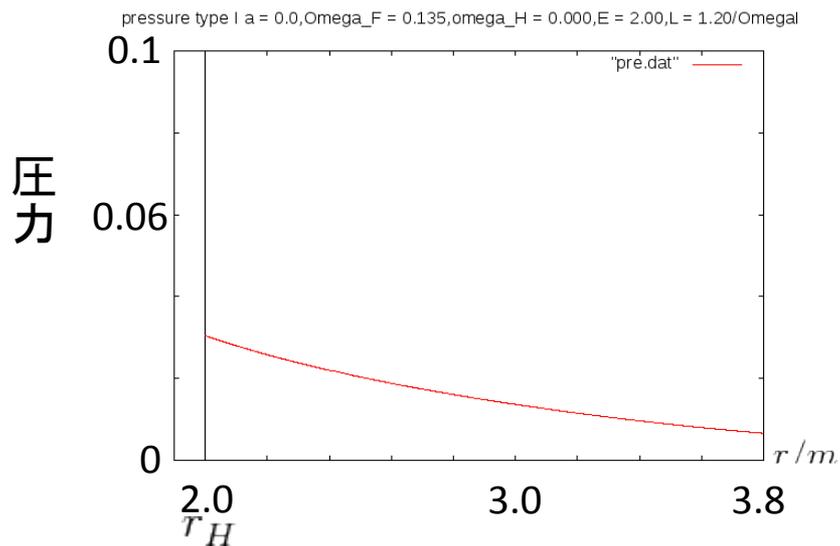
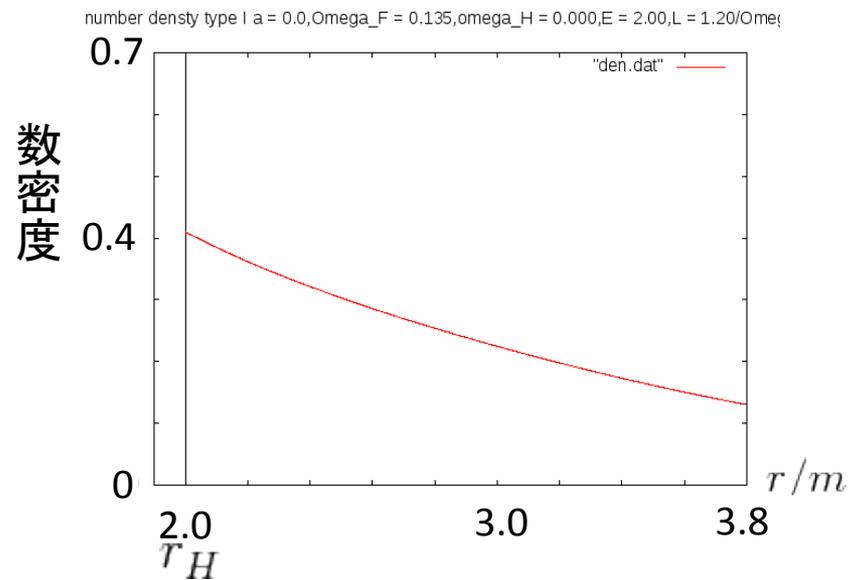
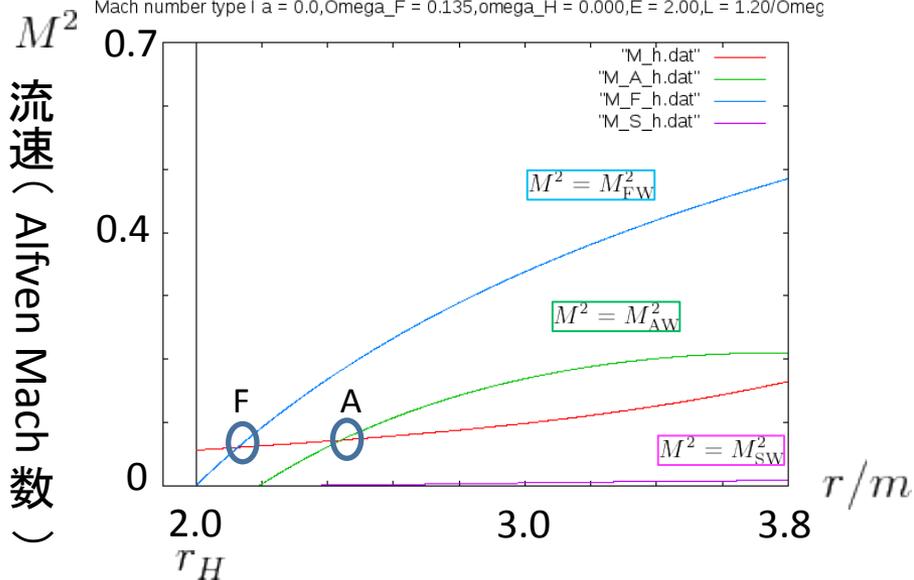
温度

$$\Theta = \frac{kT}{mc^2}$$

計算例

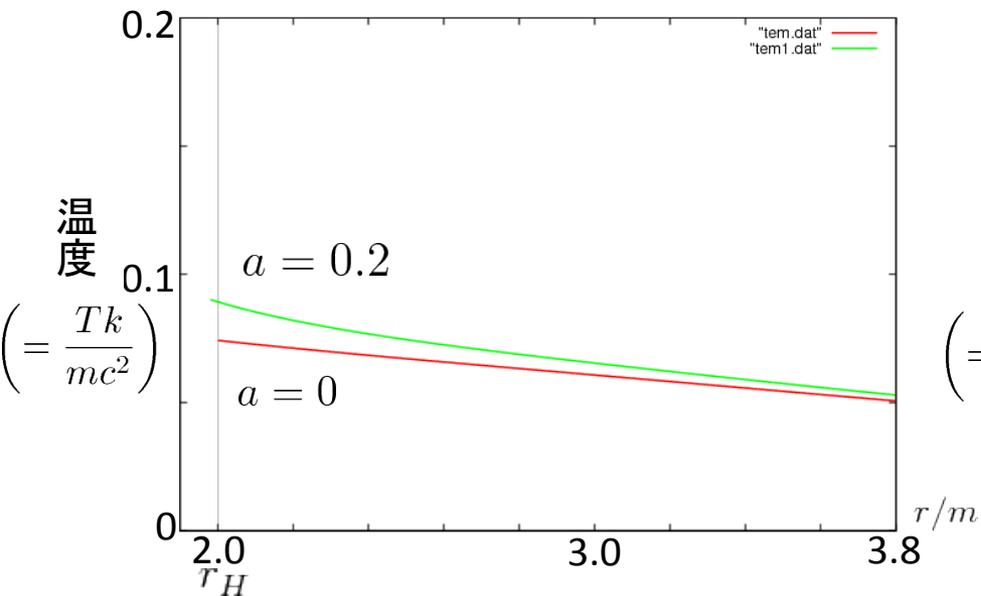
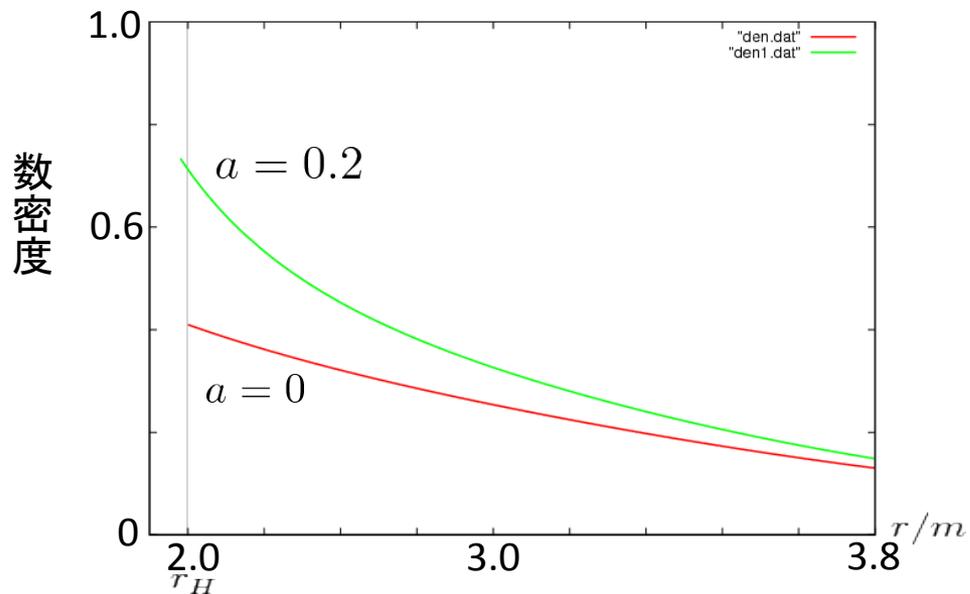
$$a = 0, \hat{E} = 2.0, \hat{L} = 1.2\Omega_F,$$

$$\Omega_F = 0.135, K = 0.1, \eta = 0.037$$

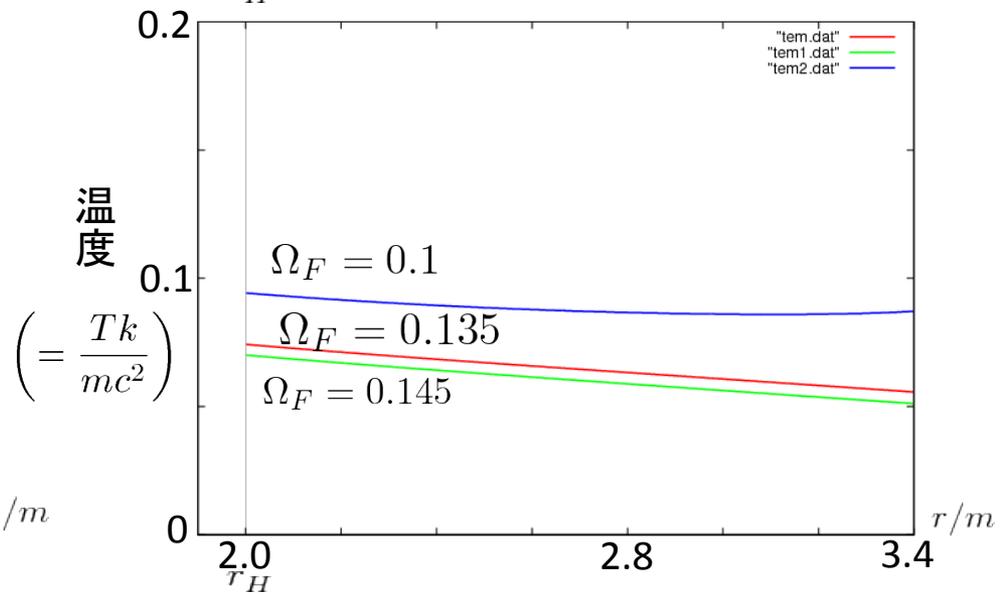
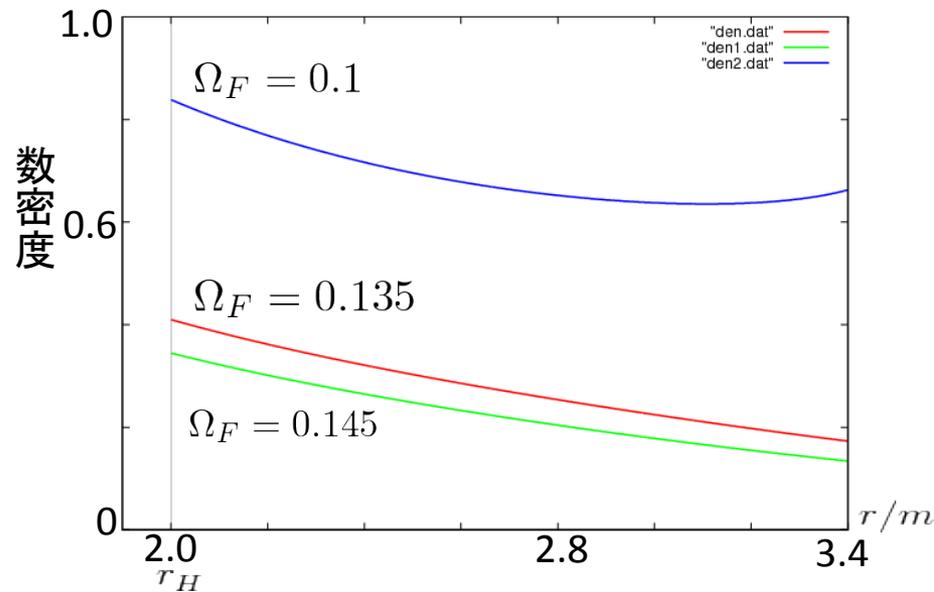


パラメータ依存性 (数密度と温度について)

スピンパラメータ

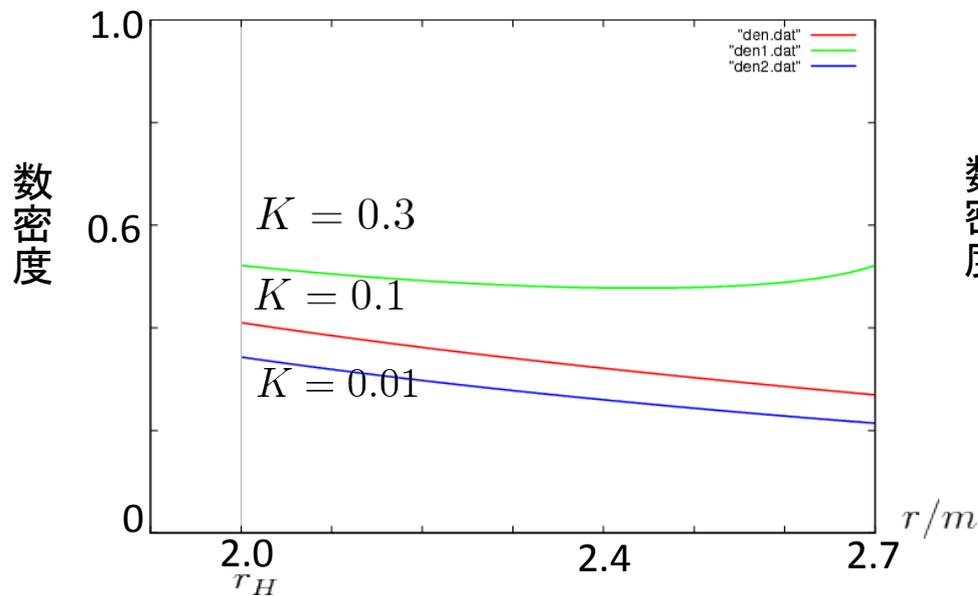


磁力線の角速度

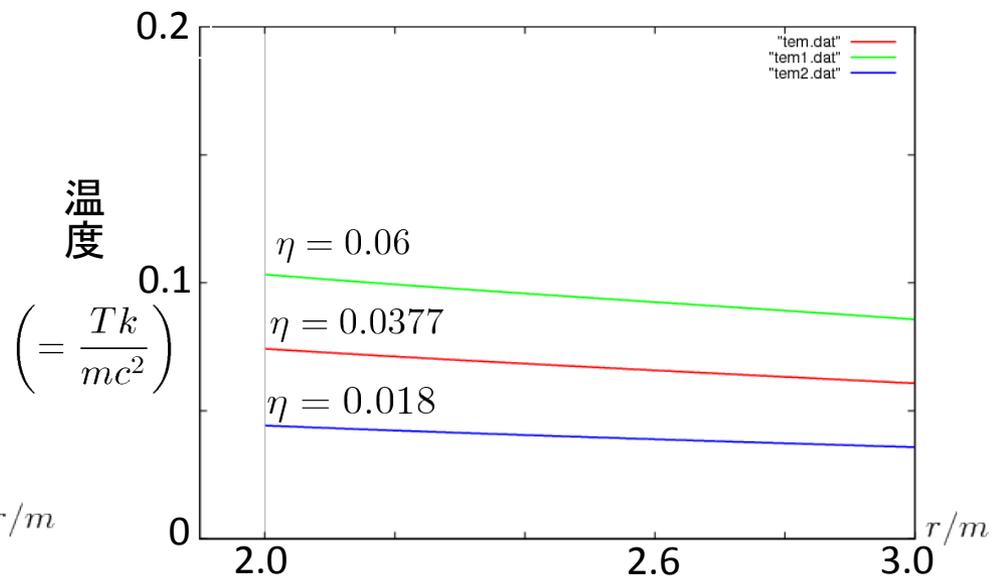
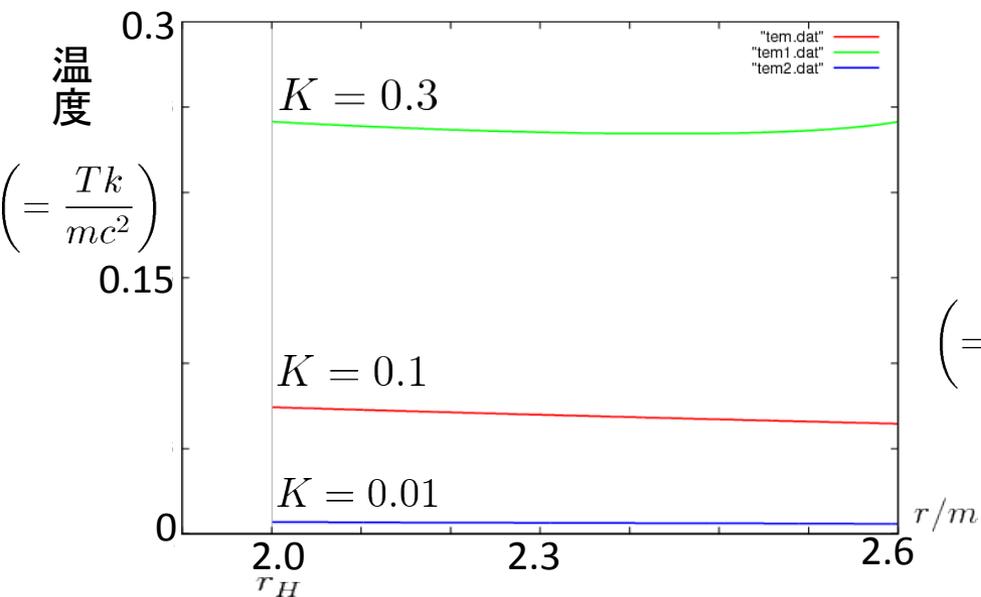
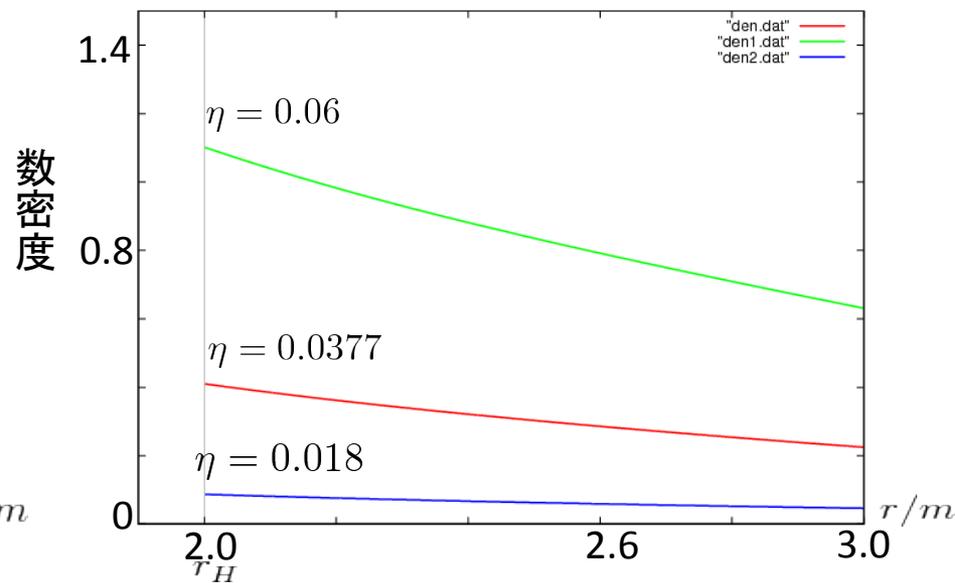


パラメータ依存性 (数密度と温度について)

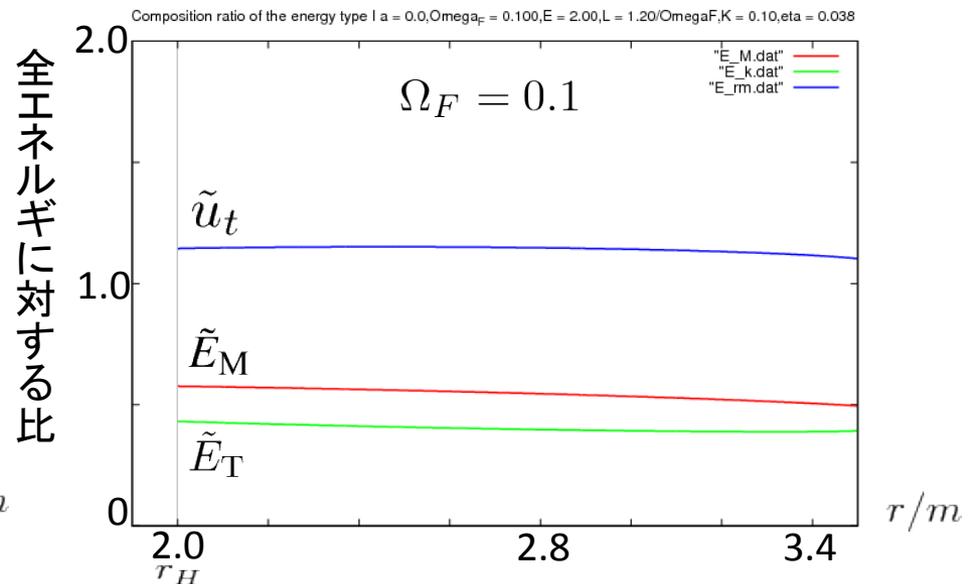
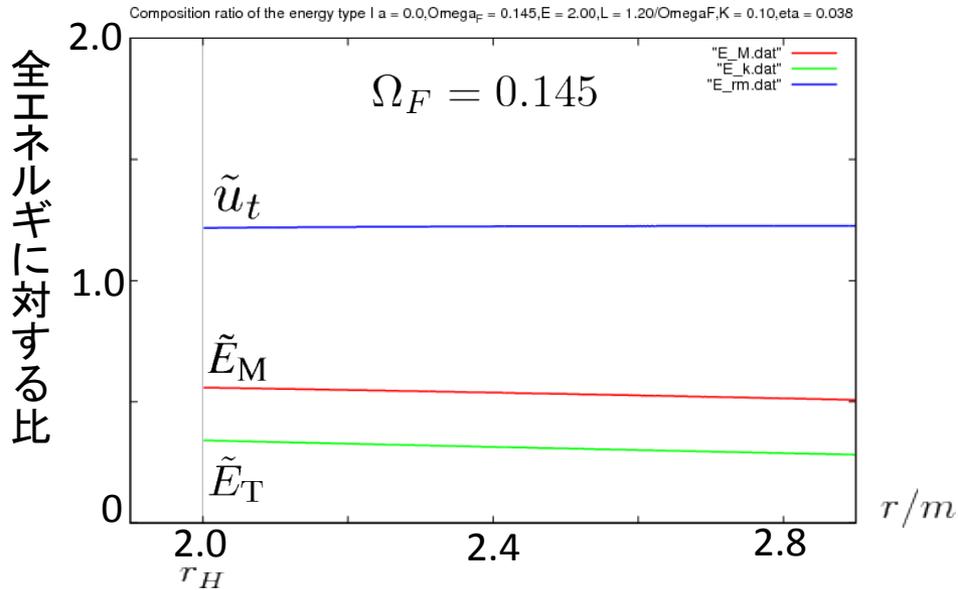
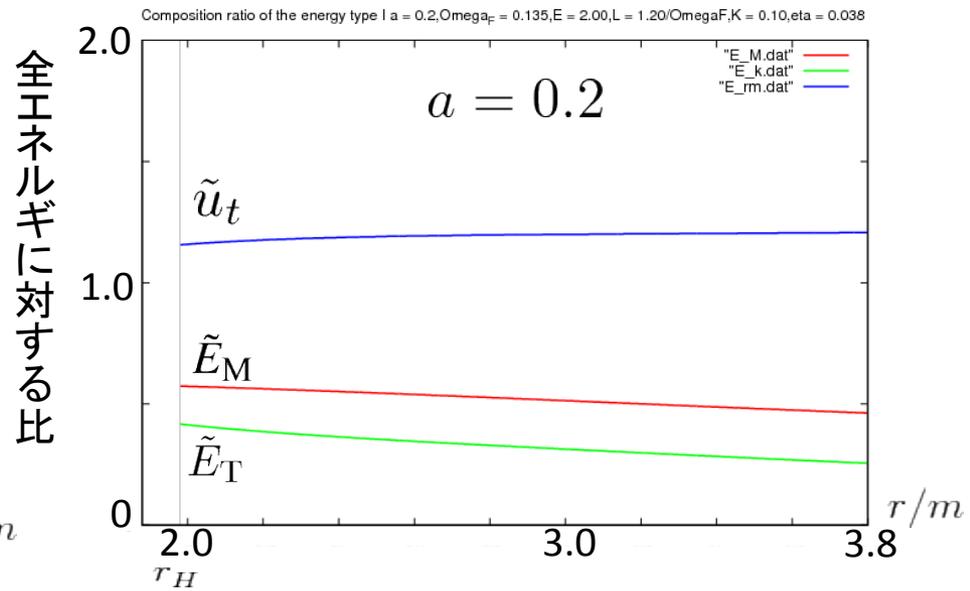
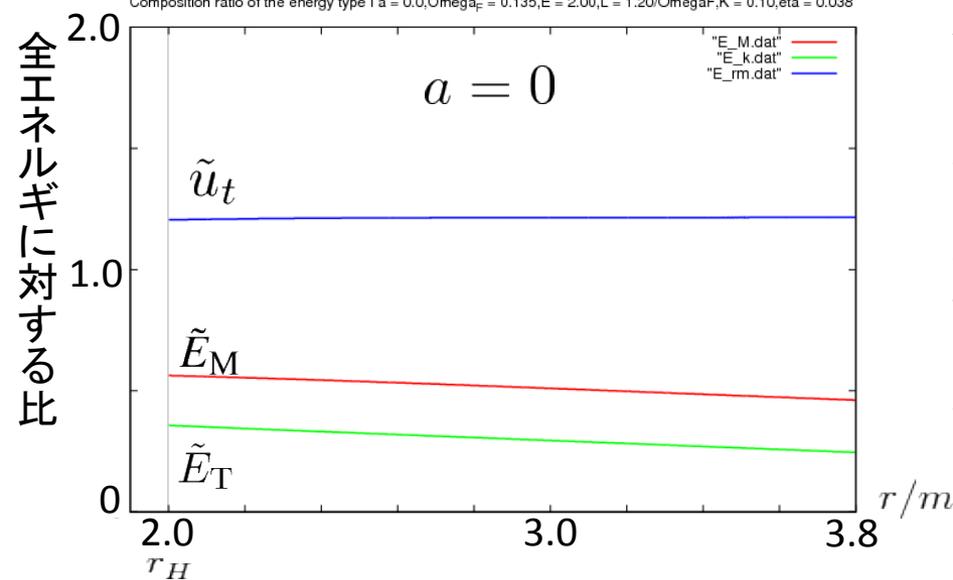
状態方程式の係数



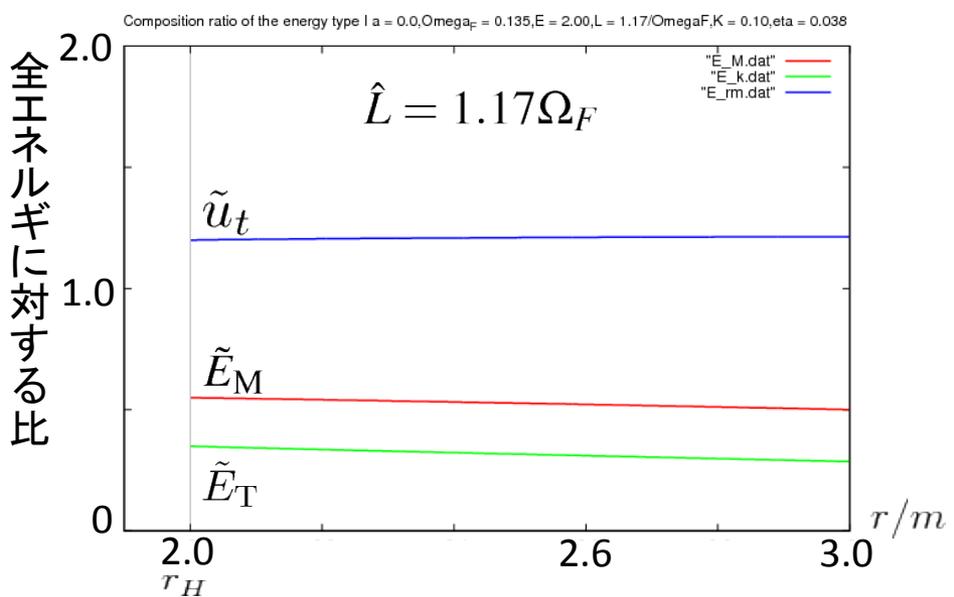
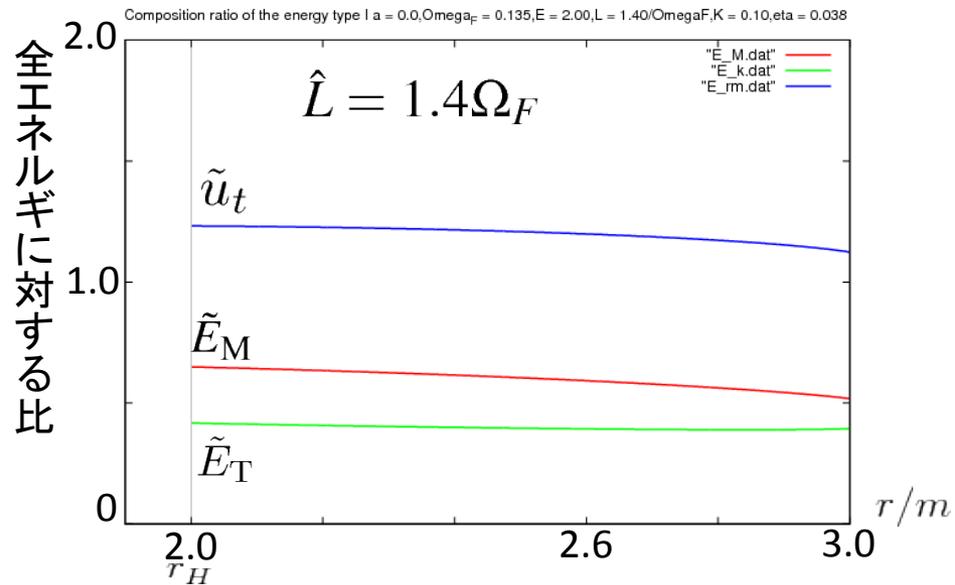
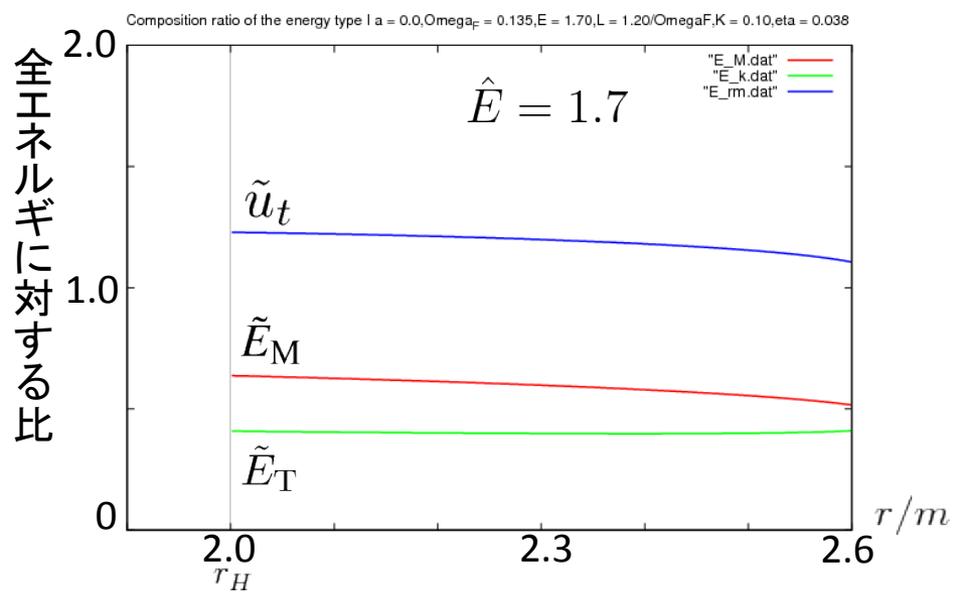
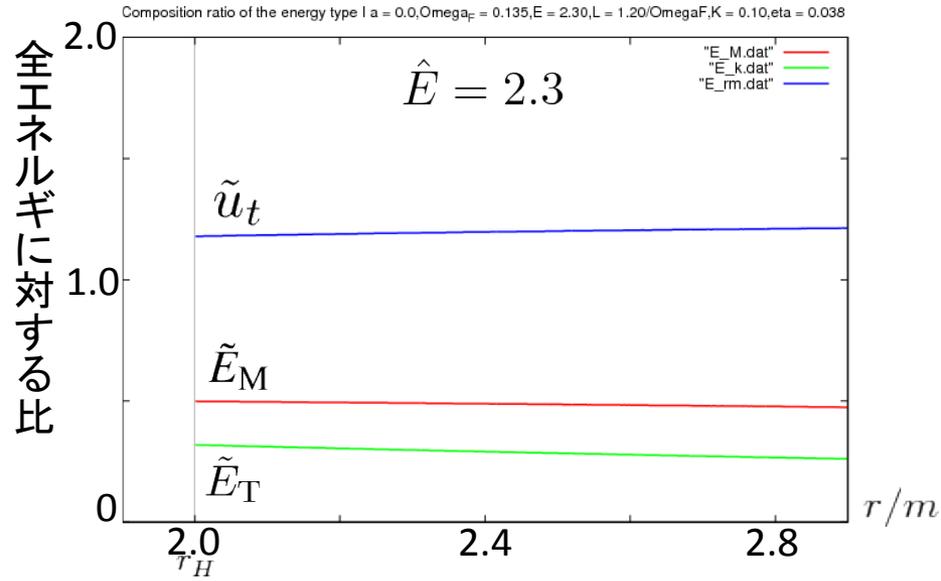
磁束あたりの粒子数束



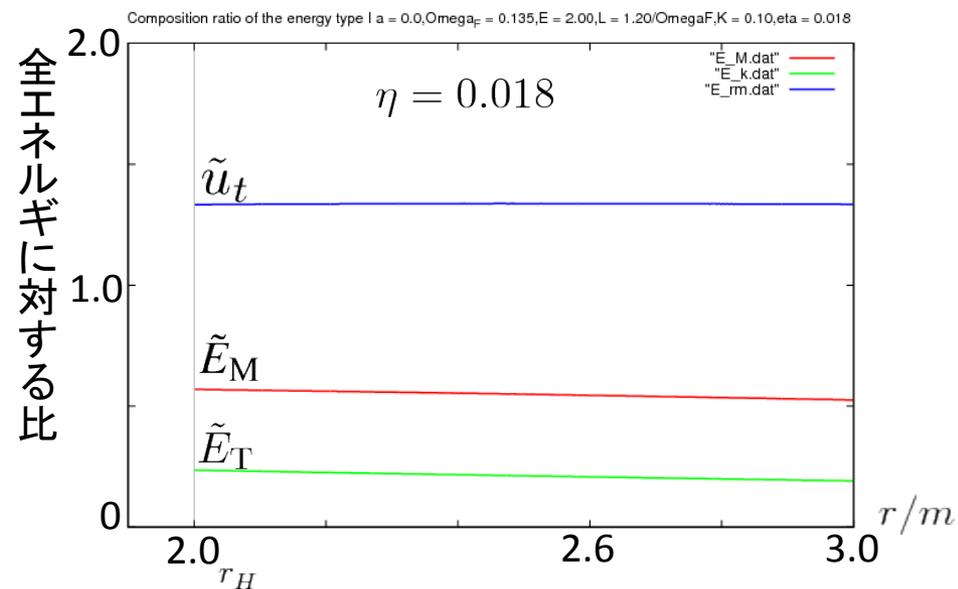
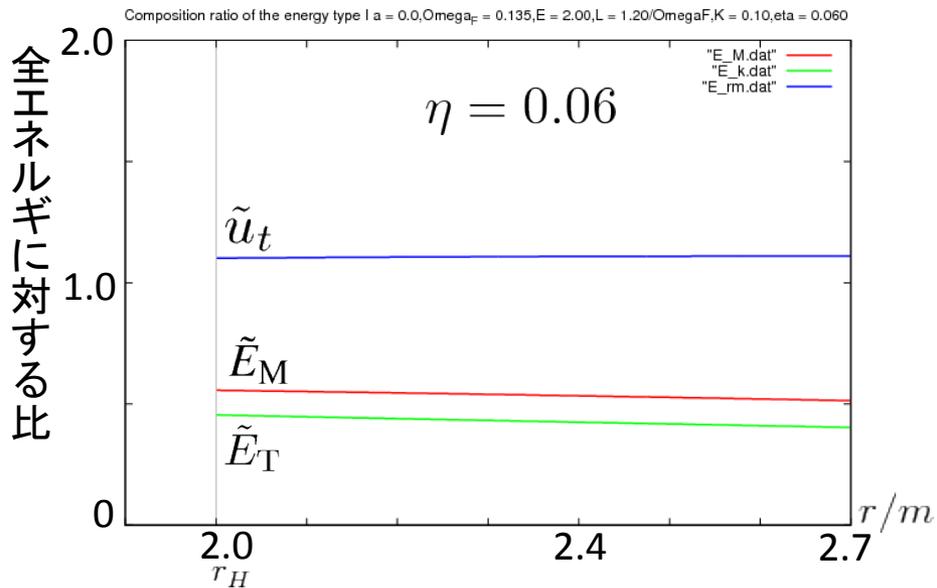
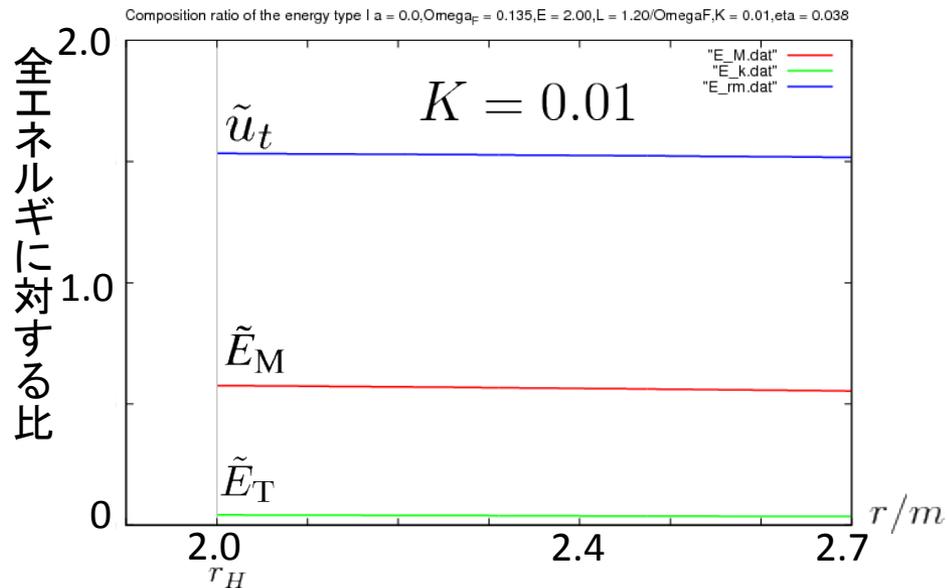
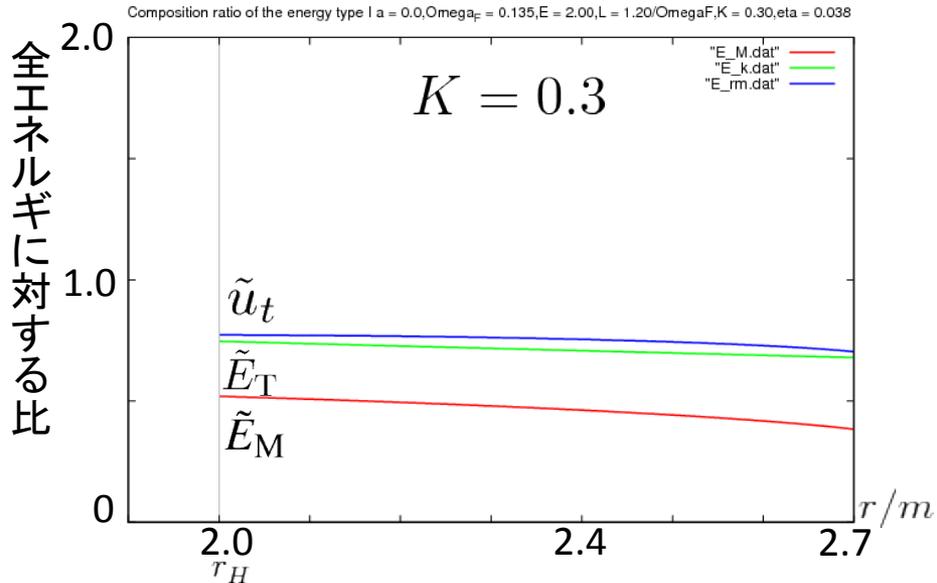
計算例



計算例



計算例



まとめと今後の展望

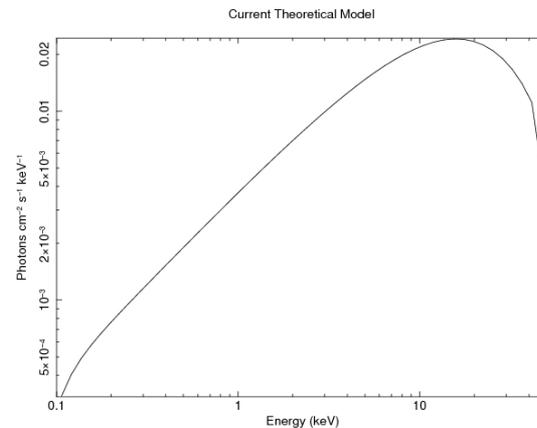
- cold → cold の等温衝撃波モデルの再現の確認
(M.Takahashi & A.Tomimatsu (2008) , M.Takahashi & R.Takahashi (2010))

➡ 衝撃波面で発生できる最大エネルギーを見積もれる。

- M.Takahashi & A.Tomimatsu (2008) を拡張し hot 降着流 のモデルを作成

BH 近傍では顕著な温度変化は見られない。

$$\Theta_H = \frac{kT_H}{m_p c^2} \sim 0.1$$



- cold → hot の衝撃波モデルを作成する。

➡ 一般的な取り扱いに拡張する

- XSPEC を用いてスペクトルの作成、フィッティングを行う (compbb model を使う予定)。➡ ブラックホールのスピン、降着流のパラメータを提案することを目指します。