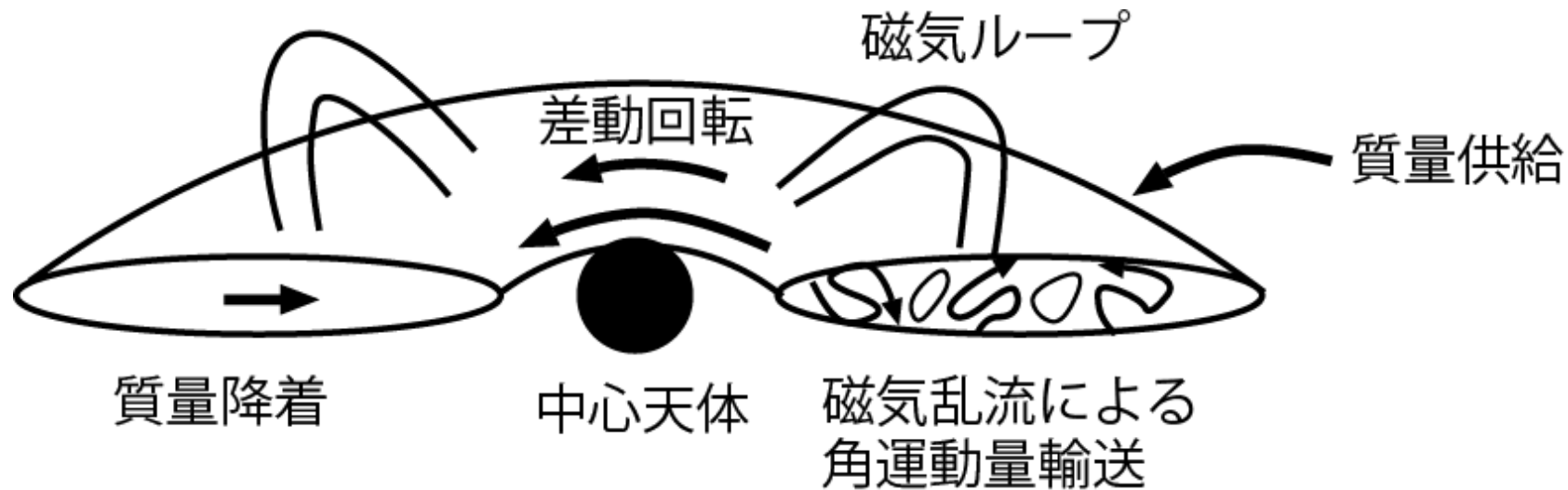


磁気流体コードCANS+を用いた 降着円盤の3次元磁気流体 シミュレーション

松元亮治(千葉大)

降着円盤のモデル

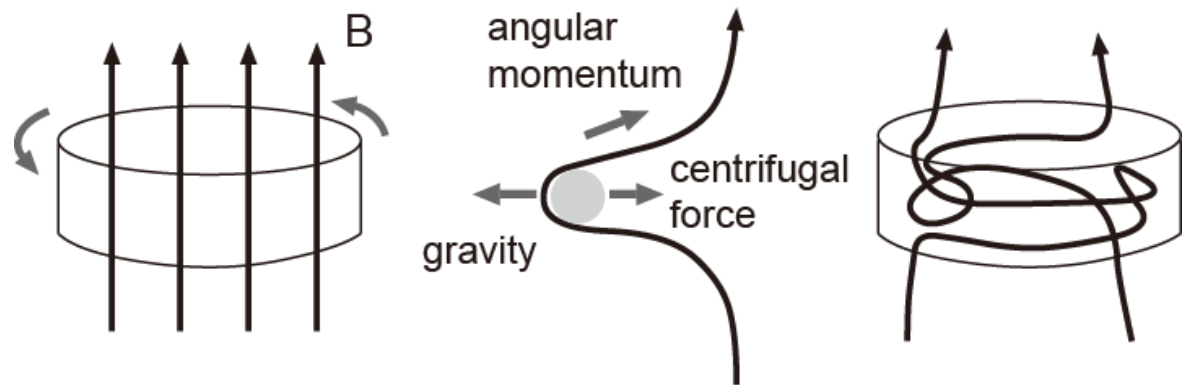
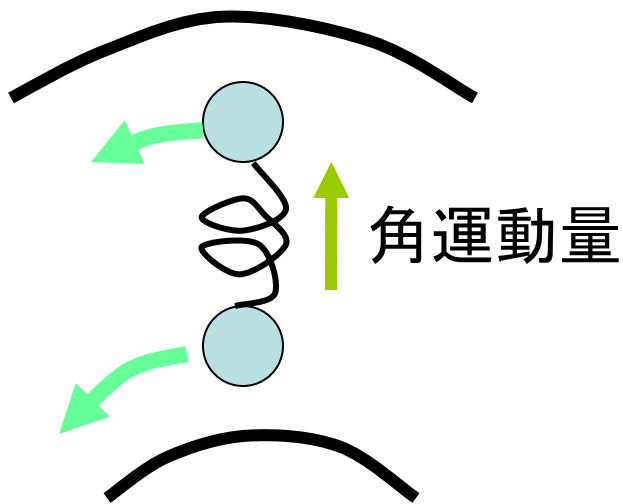


回転物質が落下するためには角運動量を失う必要がある。

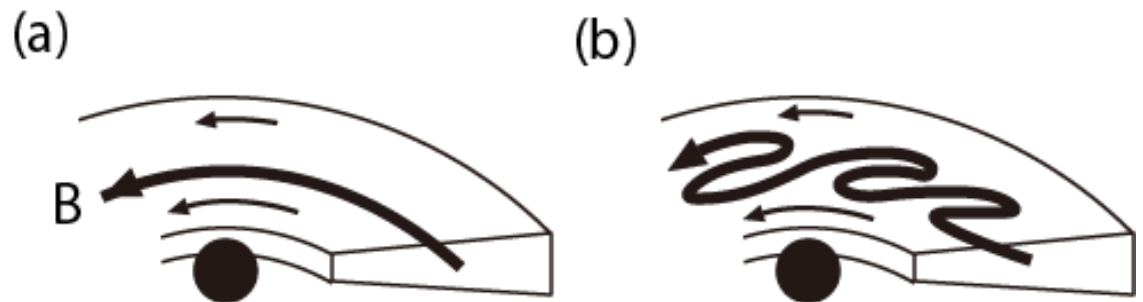
標準モデルでは粘性ストレス $T_{r\phi} = \alpha P$ と仮定

- 降着円盤が磁気乱流状態にあれば、Maxwell Stress $\langle BrB\phi/4\pi \rangle$ による角運動量輸送が可能

差動回転円盤における 磁気回転不安定性(MRI)

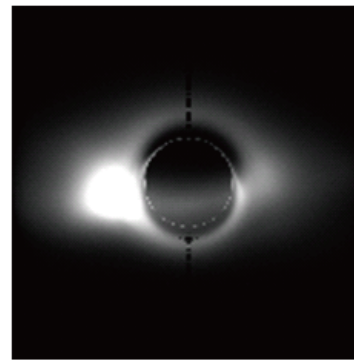
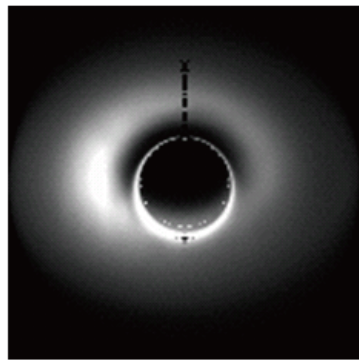
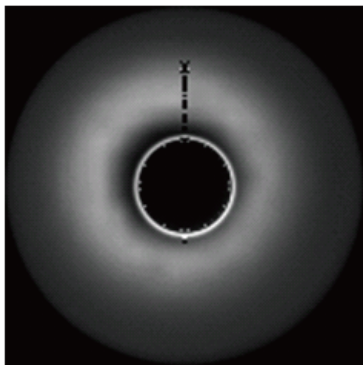
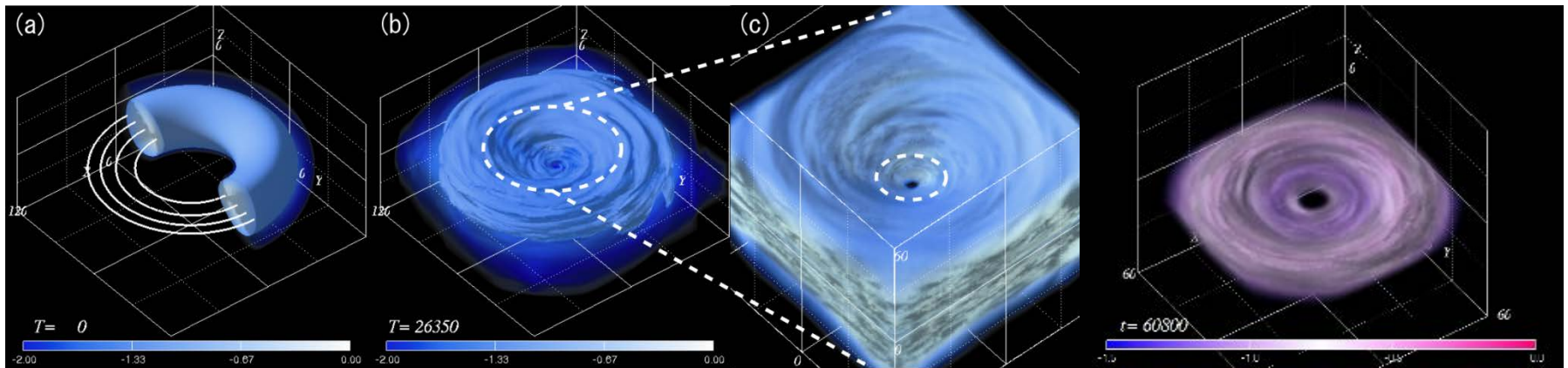


Balbus and Hawley (1991), Velikhov (1959)

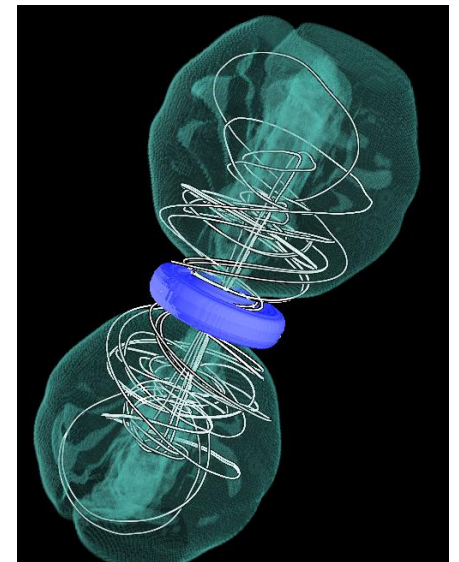


方位角磁場から動径磁場が生成される

降着円盤の大局的 3次元磁気流体(MHD)シミュレーション

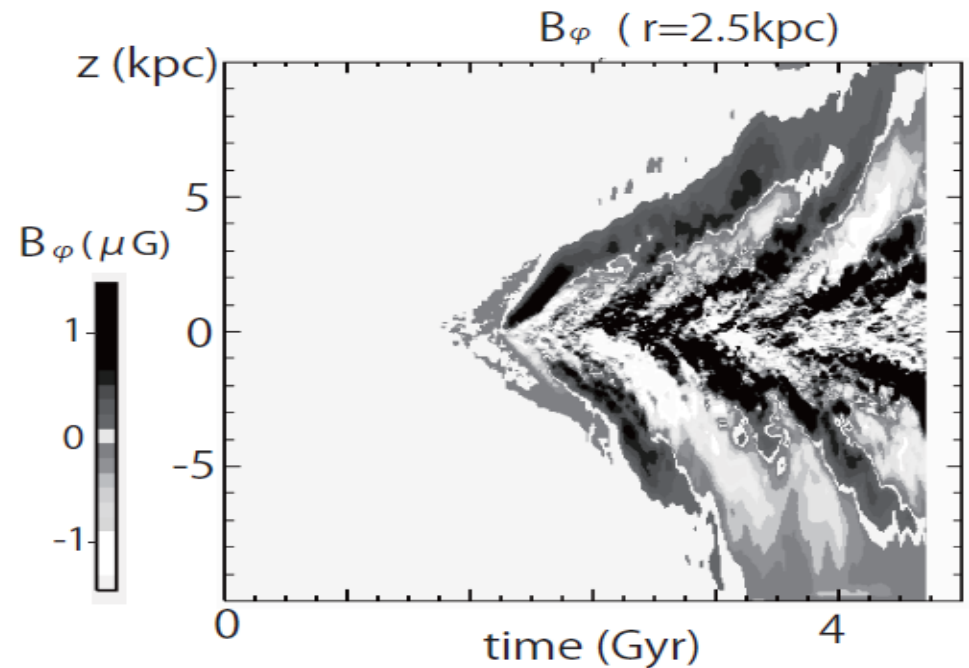
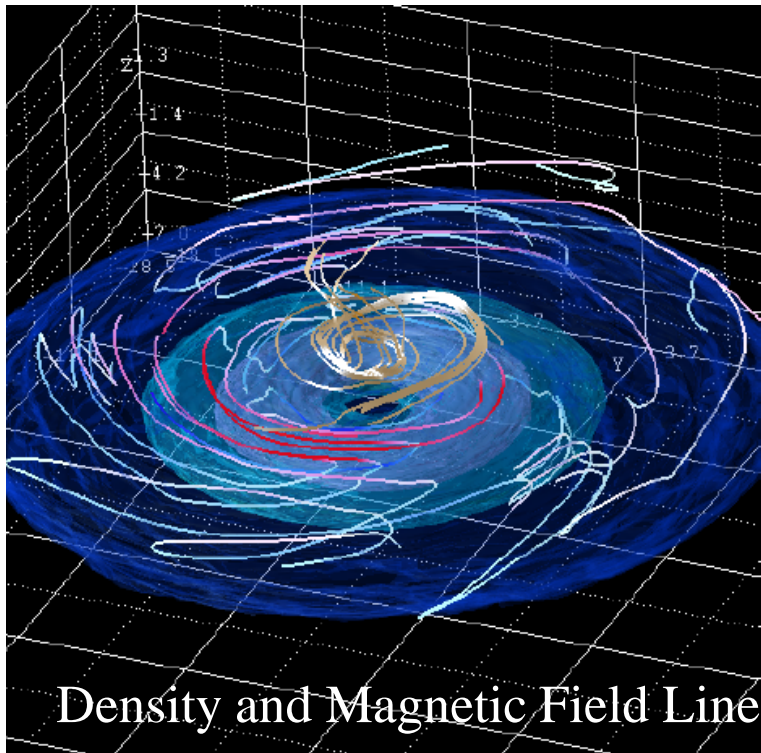


画像提供: 町田真美, M. Bursa氏



画像提供: 加藤成晃氏

降着円盤の準周期的ダイナモ

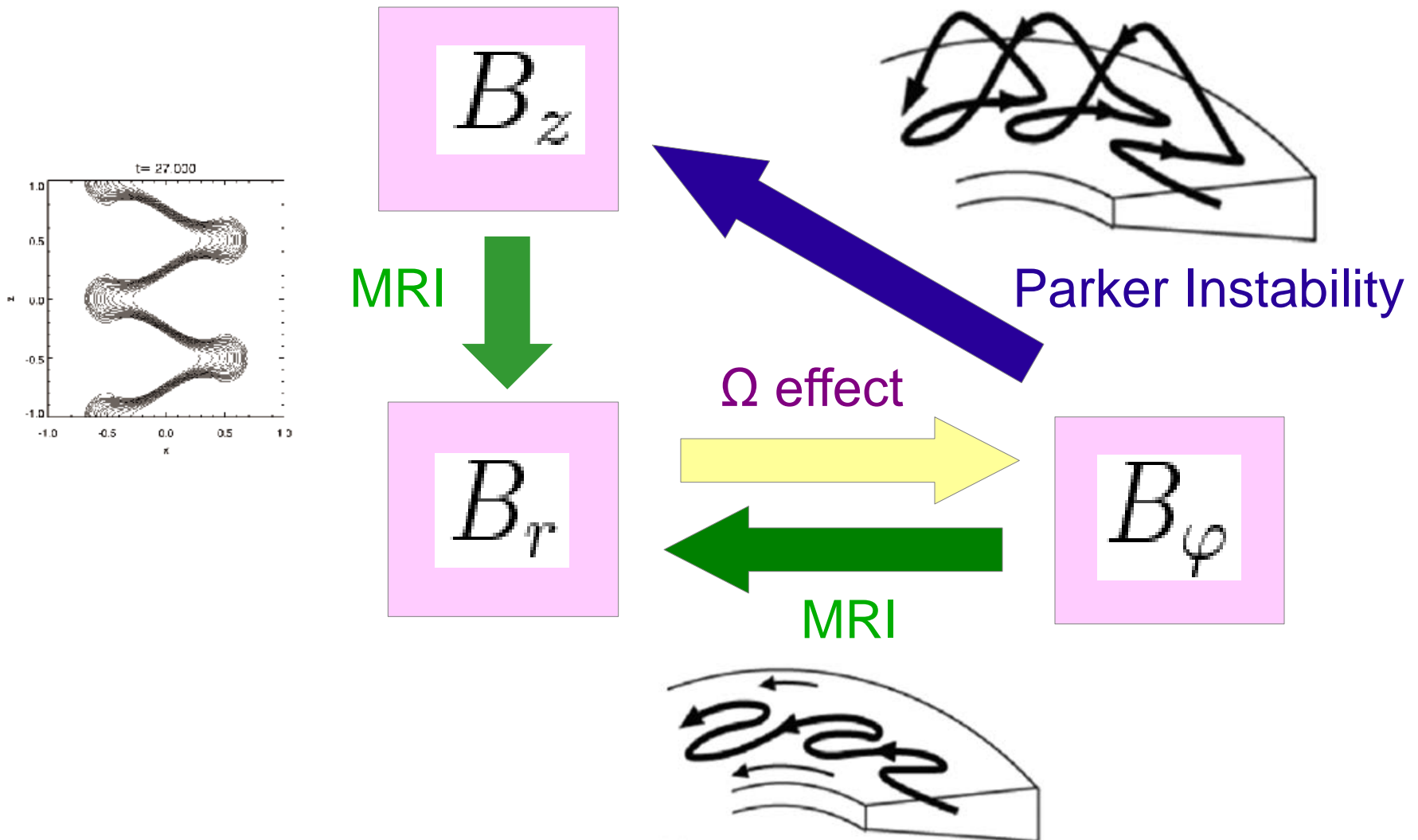


$(N_r, N_\phi, N_z) = (250, 128, 640)$ grids

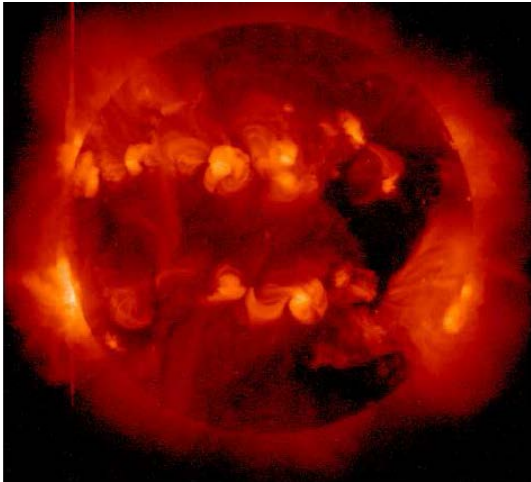
バタフライダイヤグラム

Machida et al. 2013

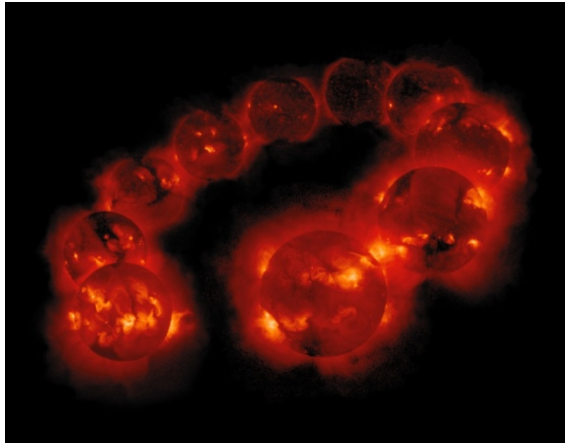
MRI-Parker Dynamo



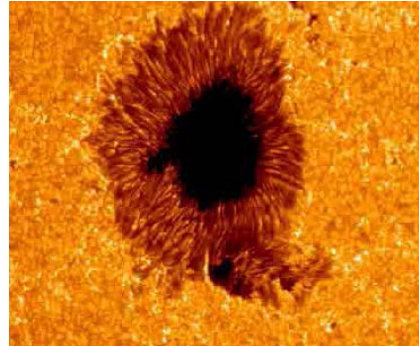
太陽ダイナモとの類似性



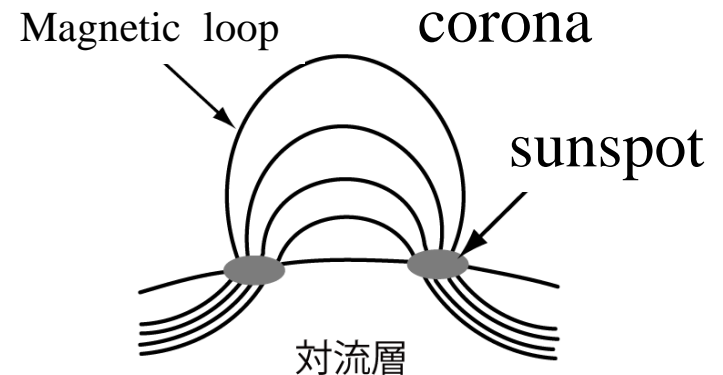
Soft X-ray Image of the Sun



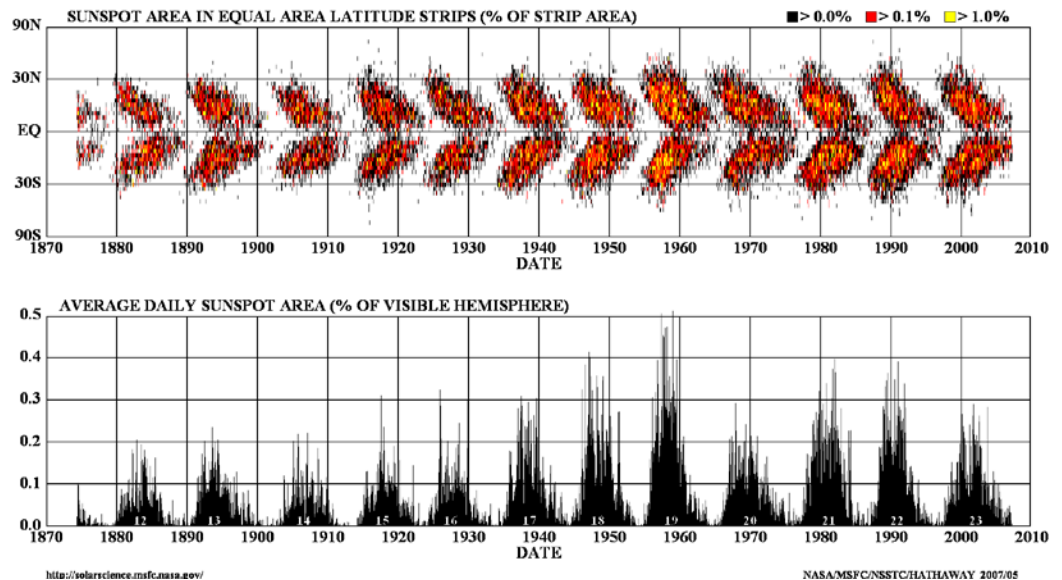
Solar cycle observed in X-ray



Sunspot (Hinode)



Formation of Sunspots



<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

NASA/MSFC/NSSTC/HATHAWAY 2007/05

Butterfly diagram (NASA)

高解像度の太陽ダイナモシミュレーション

Numerical Resolution

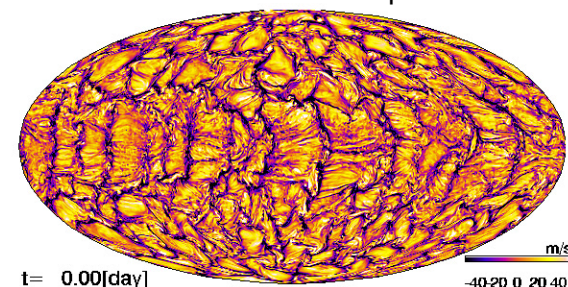
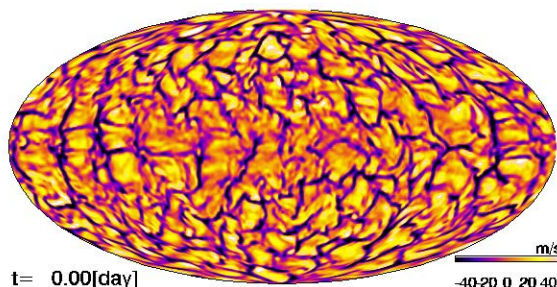
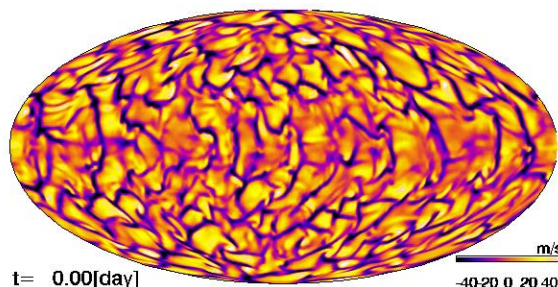
Low

Medium

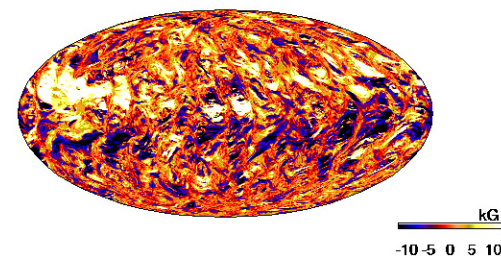
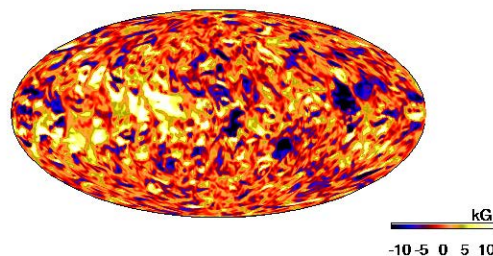
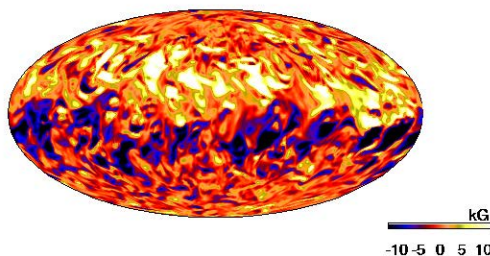
High

$N_\phi=1536$

v_r at
 $0.95R$



B_ϕ at
 $0.72R$



Global magnetic fields generated in low resolution simulation are destroyed in middle resolution simulations by turbulence. However, global magnetic fields are generated again in high resolution simulations because **turbulence is suppressed by strong local magnetic field**.

Hotta et al. 2016, Science

CANSからCANS+へ

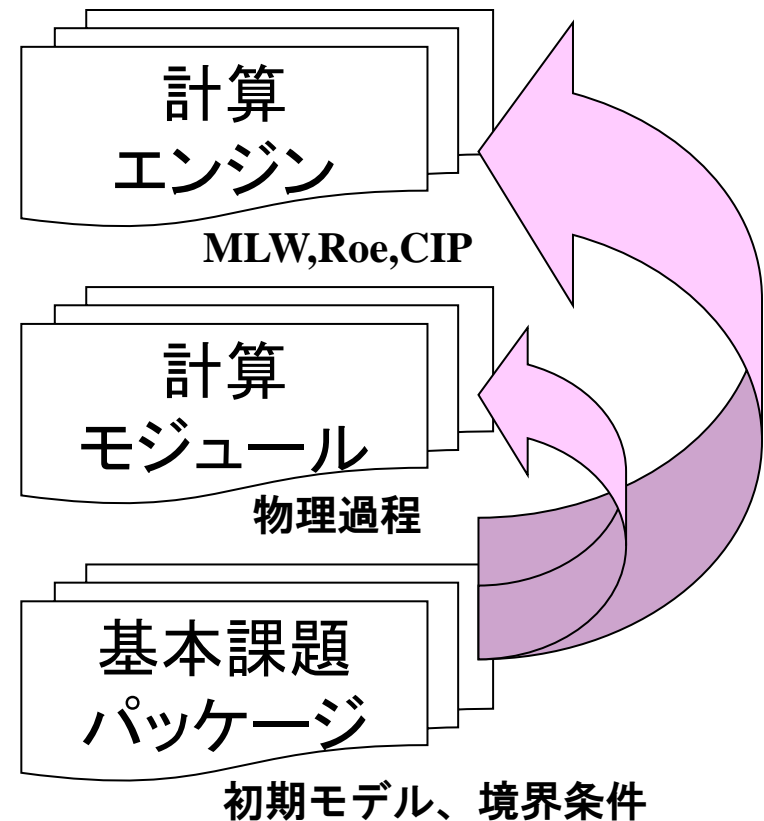
宇宙磁気流体シミュレータCANS

□ Coordinated Astronomical Numerical Software

□ ACT-JSTプロジェクト(2000-2002)で開発

□ Main developer: 横山央明

- 計算エンジンと基本課題シミュレーションモデルをパッケージ化
- 3つの特徴
 - 最先端の研究に用いることができる
 - 数値シミュレーションの初心者でも実行可能
 - 解説つきWebページ



CANS基礎方程式(散逸性磁気流体)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

質量保存

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi} + \rho \mathbf{g}$$

運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B})$$

誘導方程式

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) + P \nabla \cdot \mathbf{v} = Q_J + Q_{vis} - Q_{rad}$$

エネルギー式

Magnetohydrodynamic simulation code CANS+ : Assessments and Applications

Yosuke Matsumoto

Y. Asahina, Y. Kudoh, T. Kawashima, J. Matsumoto,
H. R. Takahashi, T. Minoshima, S. Zenitani, T. Miyoshi, &
R. Matsumoto

<https://arxiv.org/abs/1611.01775>

CANS+の磁気流体数値解法

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) &= 0, \\
 \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v + p_t I - B B) &= \rho g, \\
 \frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \cdot (v B - B v + \psi I) &= -\nabla \times (\eta j), \\
 \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot ((e + p_t) v - B(v \cdot B)) &= -\nabla \cdot (\eta j \times B) + \rho v \cdot g, \\
 \frac{\partial \psi}{\partial t} + c_h^2 \nabla \cdot B &= -\frac{c_h^2}{c_p^2} \psi,
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial t} + \sum_{s=x,y,z} \frac{\partial F_s}{\partial s} &= S \\
 \frac{\partial \bar{U}_{(i,j,k)}}{\partial t} &= - \sum_{s=i,j,k} \frac{F_{(s+1/2)}^* - F_{(s-1/2)}^*}{\Delta_s} + S_{(i,j,k)}
 \end{aligned}$$

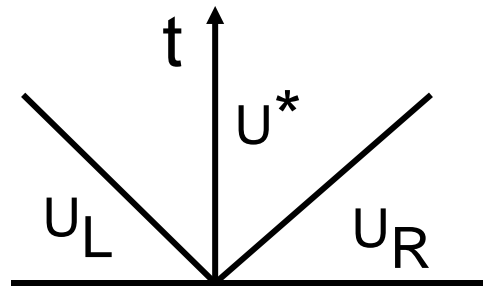
\bar{U} cell-averaged conservative vars. F^* Numerical flux

- ❑ 数値流束 F^* は HLLD 近似リーマン解法 (Miyoshi & Kusano 05)によって求める。
- ❑ 高次精度化 MP5 scheme (Suresh & Huynh 97)
- ❑ $\text{div } B=0$: Hyperbolic cleaning method (Dedner+ 02)
- ❑ 磁気圧優勢な場合でも数値的に安定に計算可能

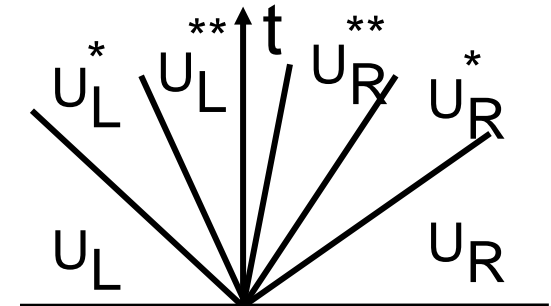
HLLD+MP5法の適用

- HLLD Scheme (Miyoshi and Kusano 2005)

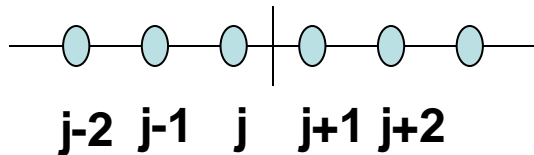
HLL
Scheme



HLLD
Scheme

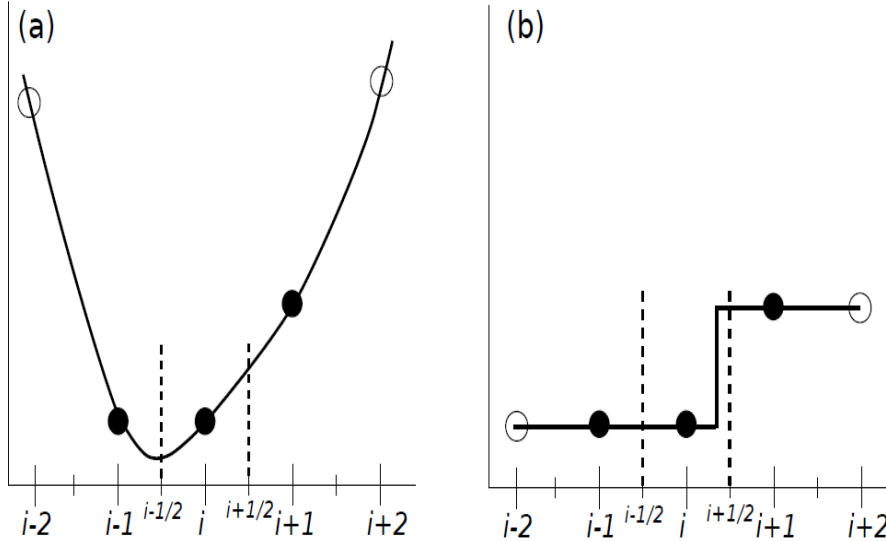


- MP5 Scheme (Suresh and Huynh 1997)

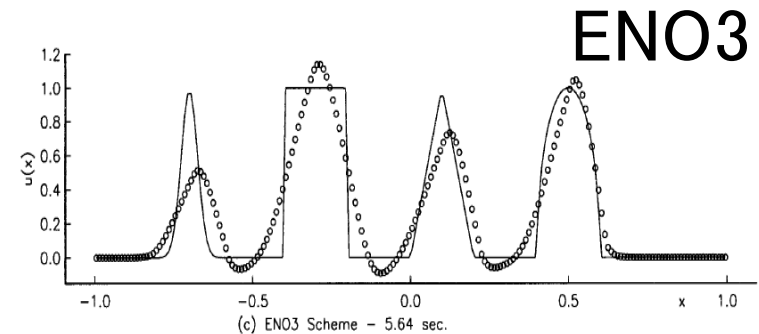
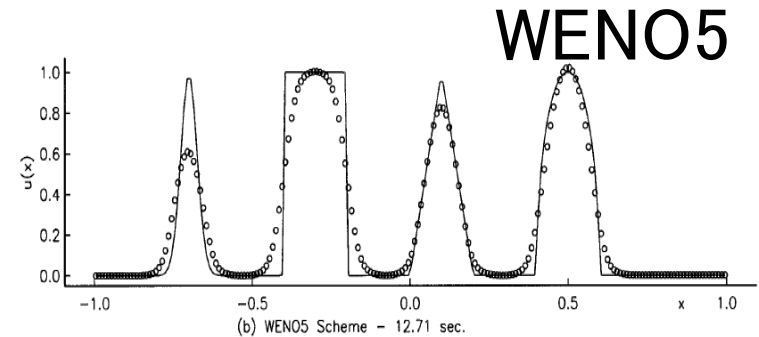
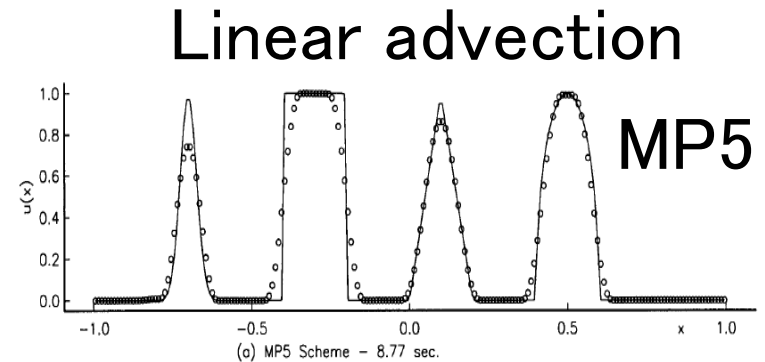


数値拡散を抑制するため、セル境界値を空間5次精度で求め、数値振動抑制のためのリミターの許容範囲を広げて極大、極小がならされてしまわないようにする

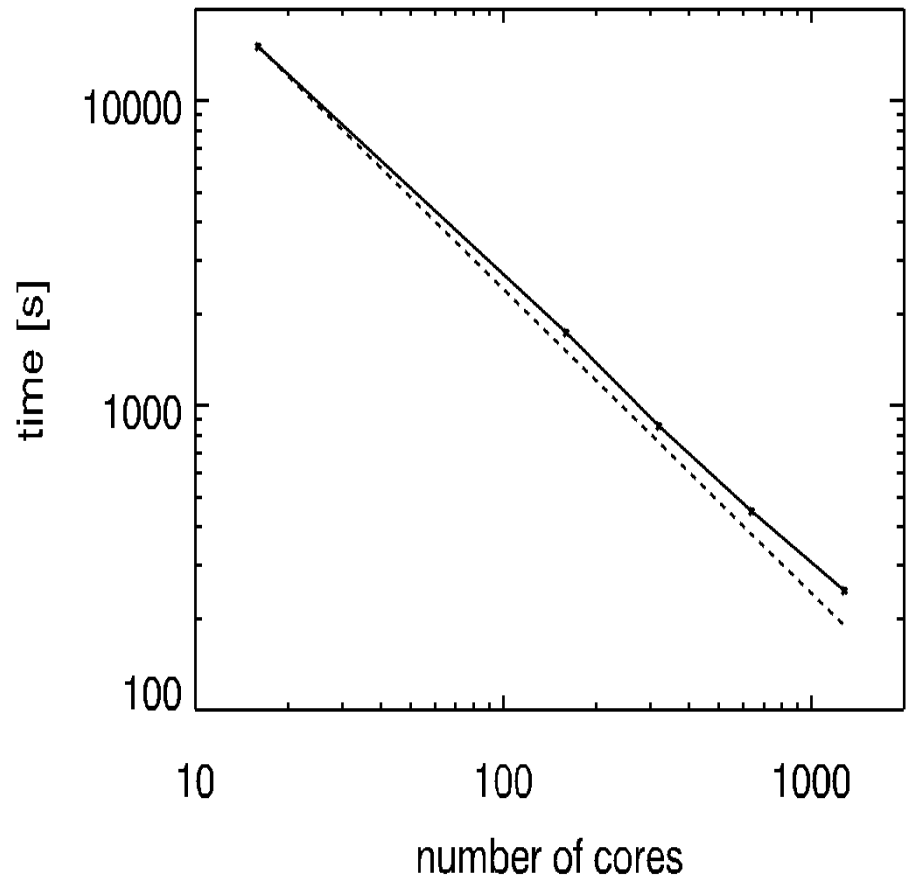
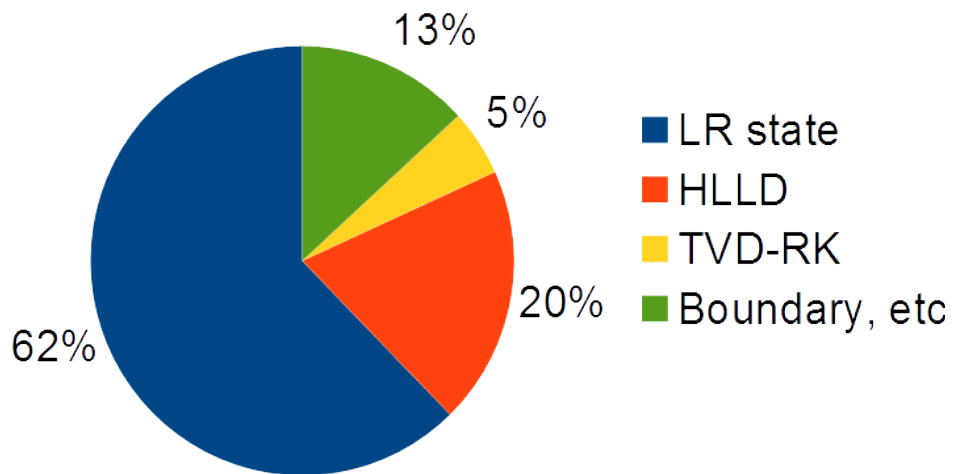
Monotonicity-preserving 5th-order (MP5)scheme (Suresh & Huynh, JCP, 1997)



- 空間2次精度のTVDスキームは 極値と不連続を区別できない \Rightarrow 波の減衰・数値拡散
- MP5 スキームでは5点を用いることによって不連続面近傍での単調性を維持しつつ、極値を検出し、減衰を避けることが可能



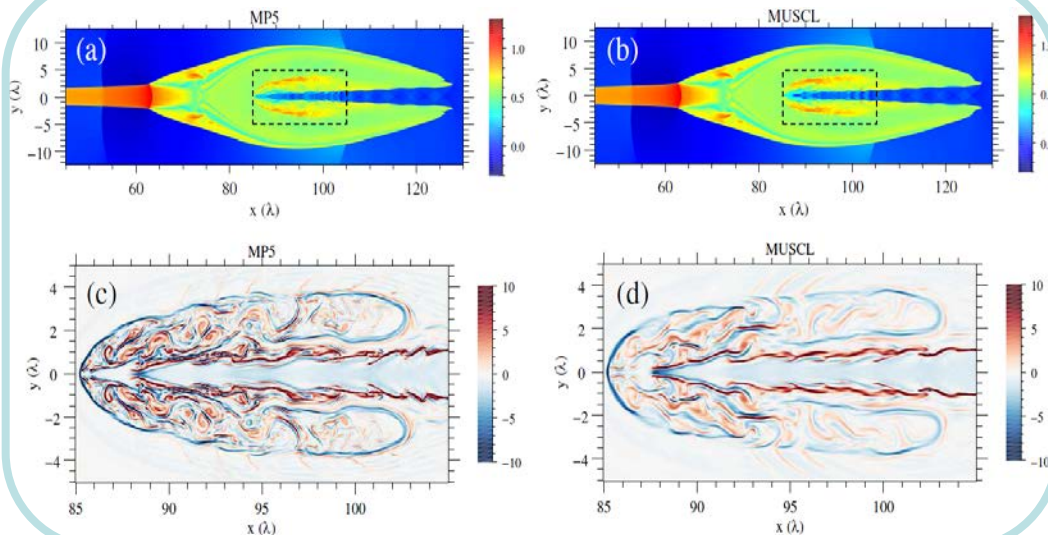
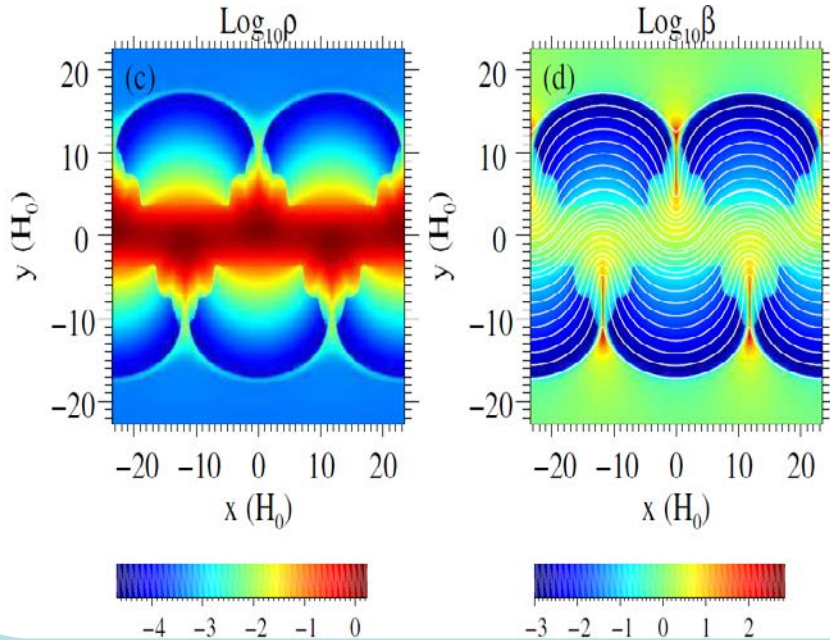
Code's performance on Cray XC30@NAOJ



1.9 TFLOPS with 40 nodes (14.4 % to peak performance)

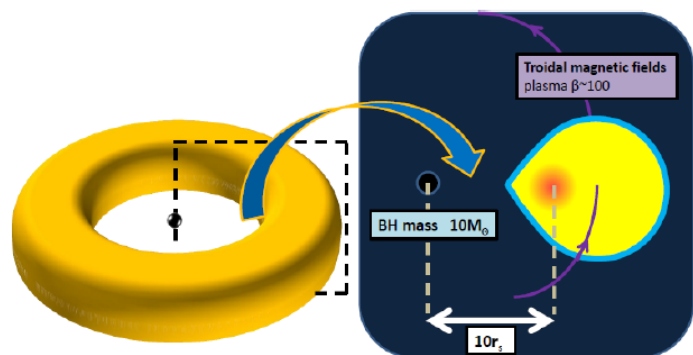
CANS+の適用例

パーカー不安定性
磁気圧優勢領域
($\beta = P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}} = 10^{-3}$)
でも安定に計算可能

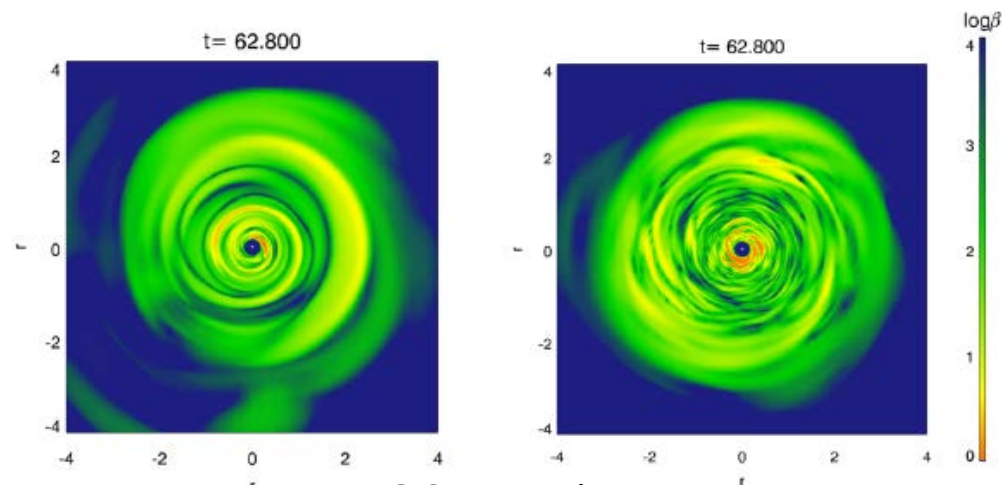


磁気リコネクション
各種衝撃波、不連続、
乱流構造を捉える
ことができた

CANS+を用いた円盤ダイナモ計算

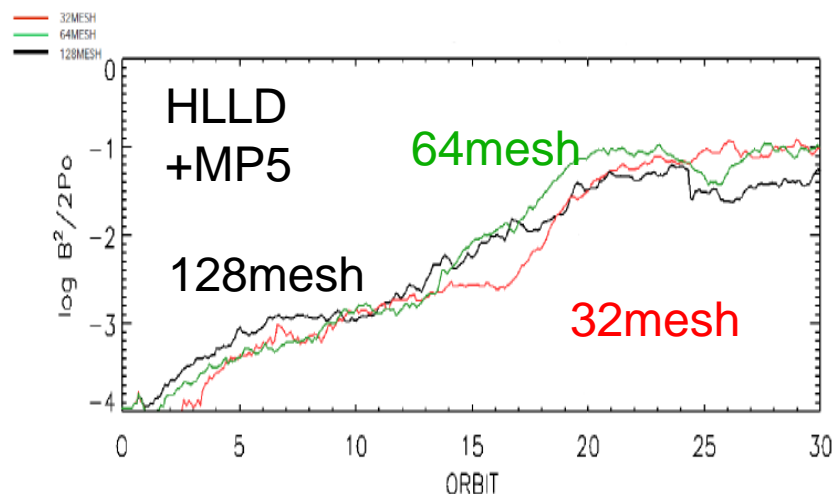


初期条件

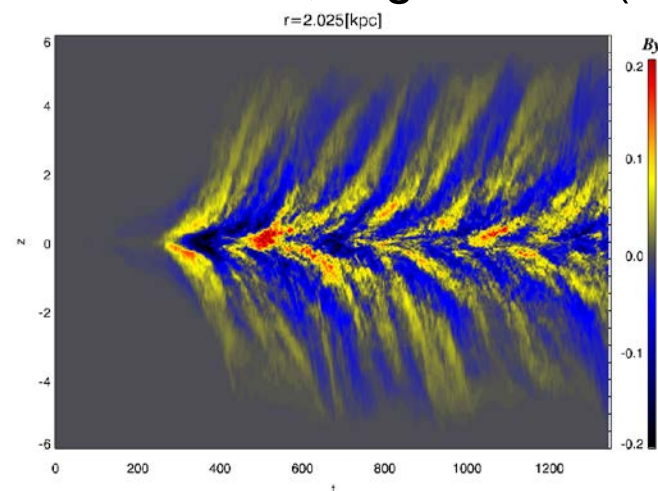


Distribution of $\beta = P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}}$

Left: Second Order, Right: MP5 (5th Order)

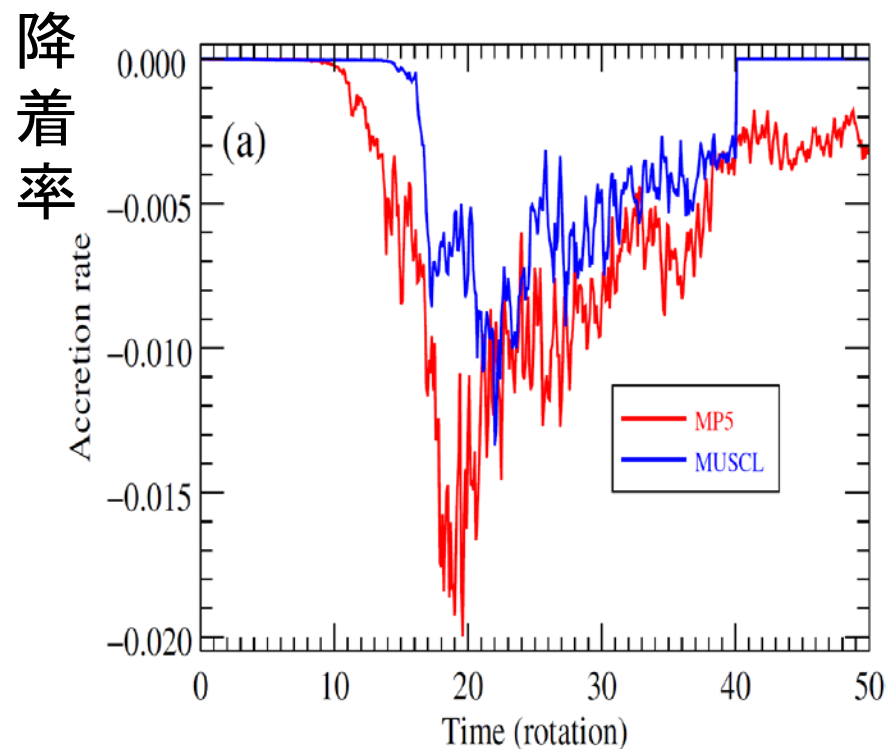
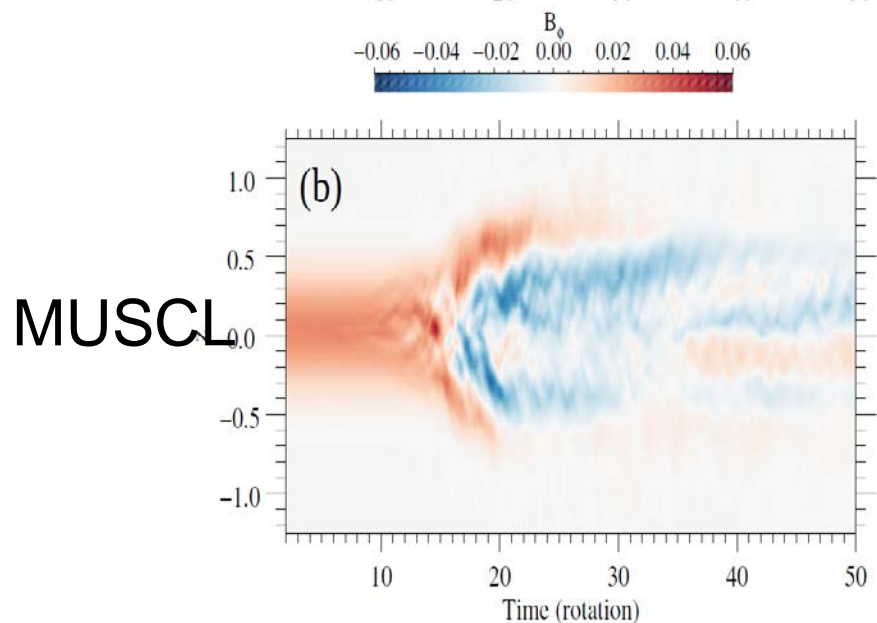
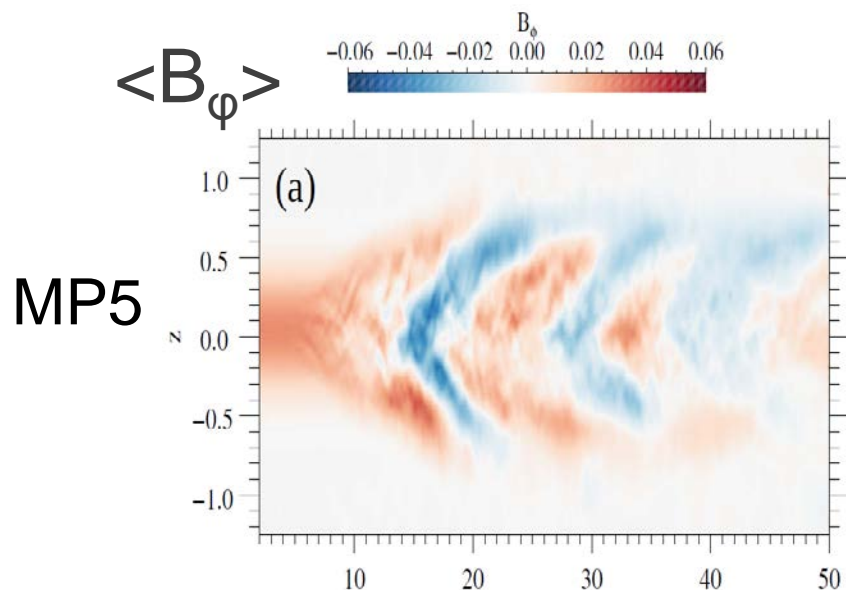


磁気エネルギーの時間発展



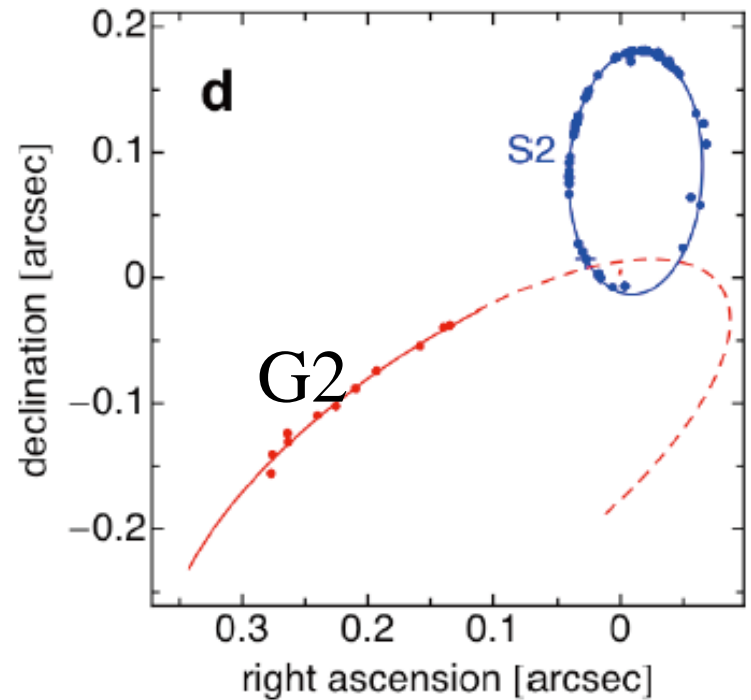
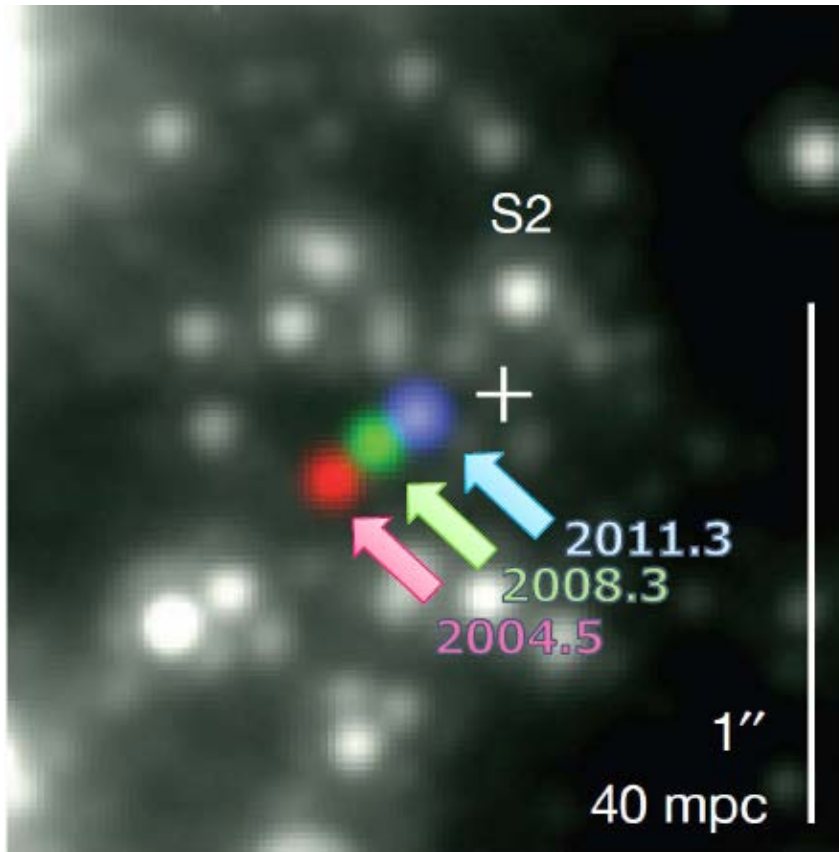
バタフライダイアグラム
カラーは方位角磁場

2次精度と5次精度の比較



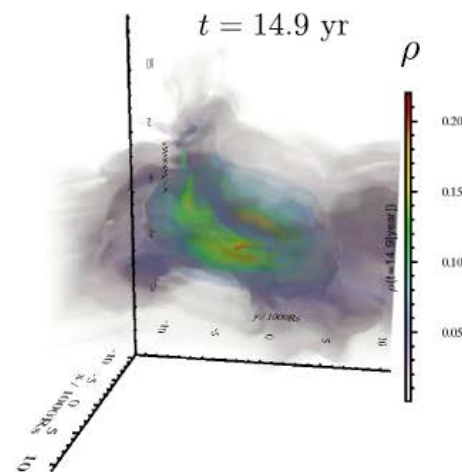
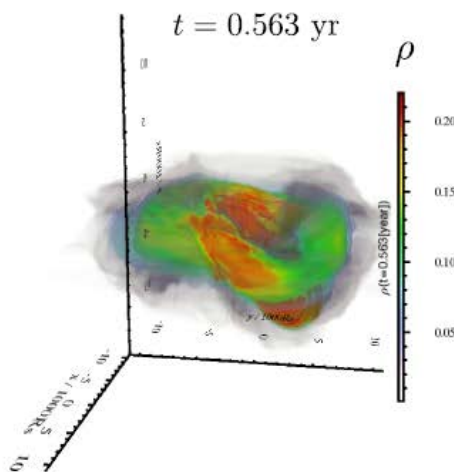
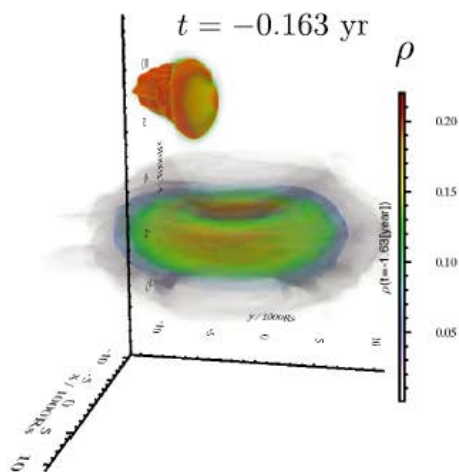
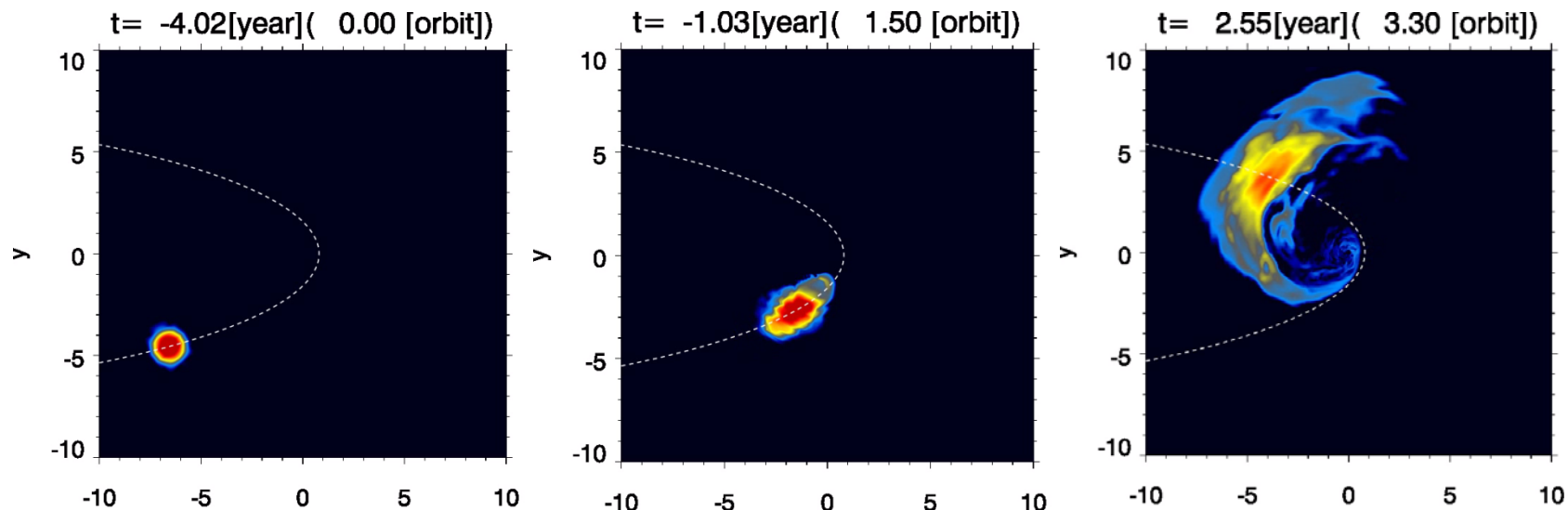
- 2次精度のMUSCLでは磁場が数値散逸
- MP5スキームを適用すると 降着が続く

Sgr A*へのG2雲落下シミュレーション



Gillessen et al. Nature 481. 51 (2012)

G2雲と降着円盤の衝突計算

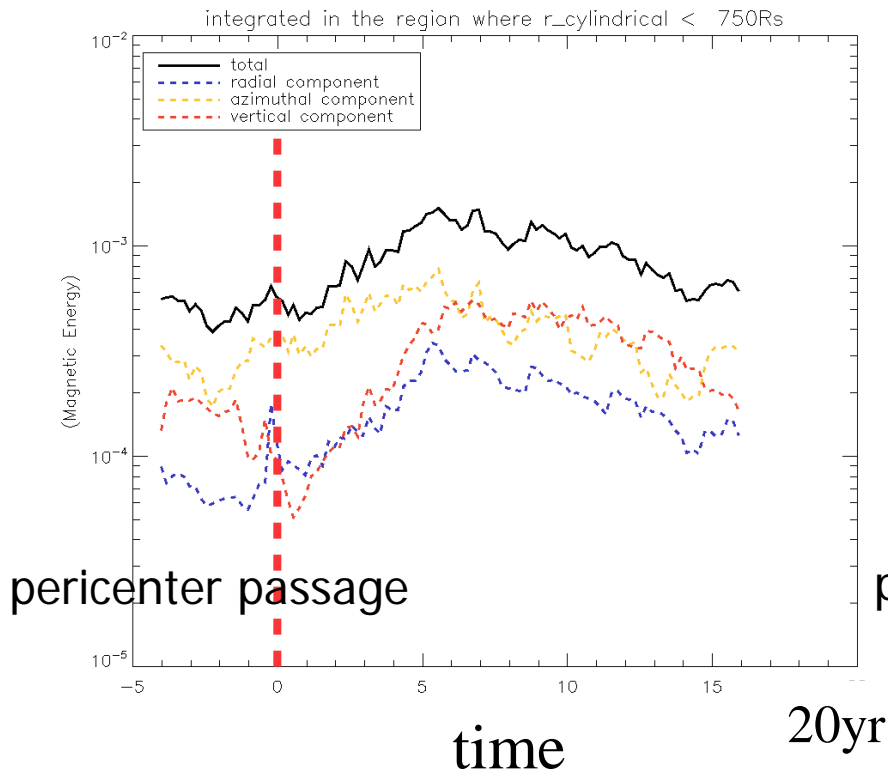


銀河系中心へのG2雲の落下シミュレーション

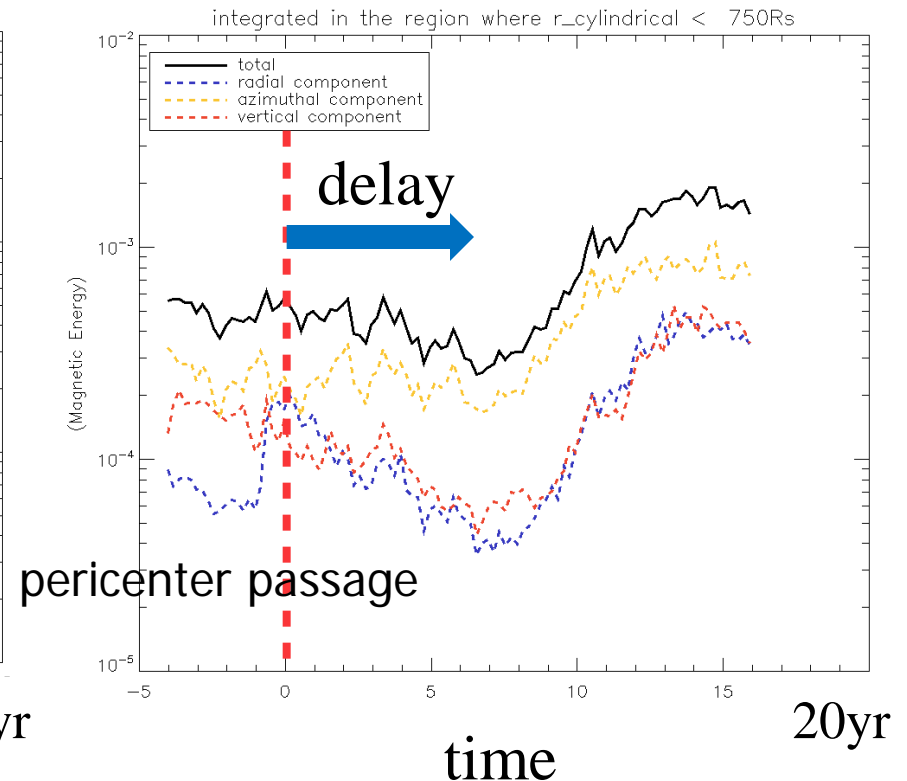
Kawashima et al. 2017 PASJ

磁気エネルギーの時間変化

$i=0^\circ$



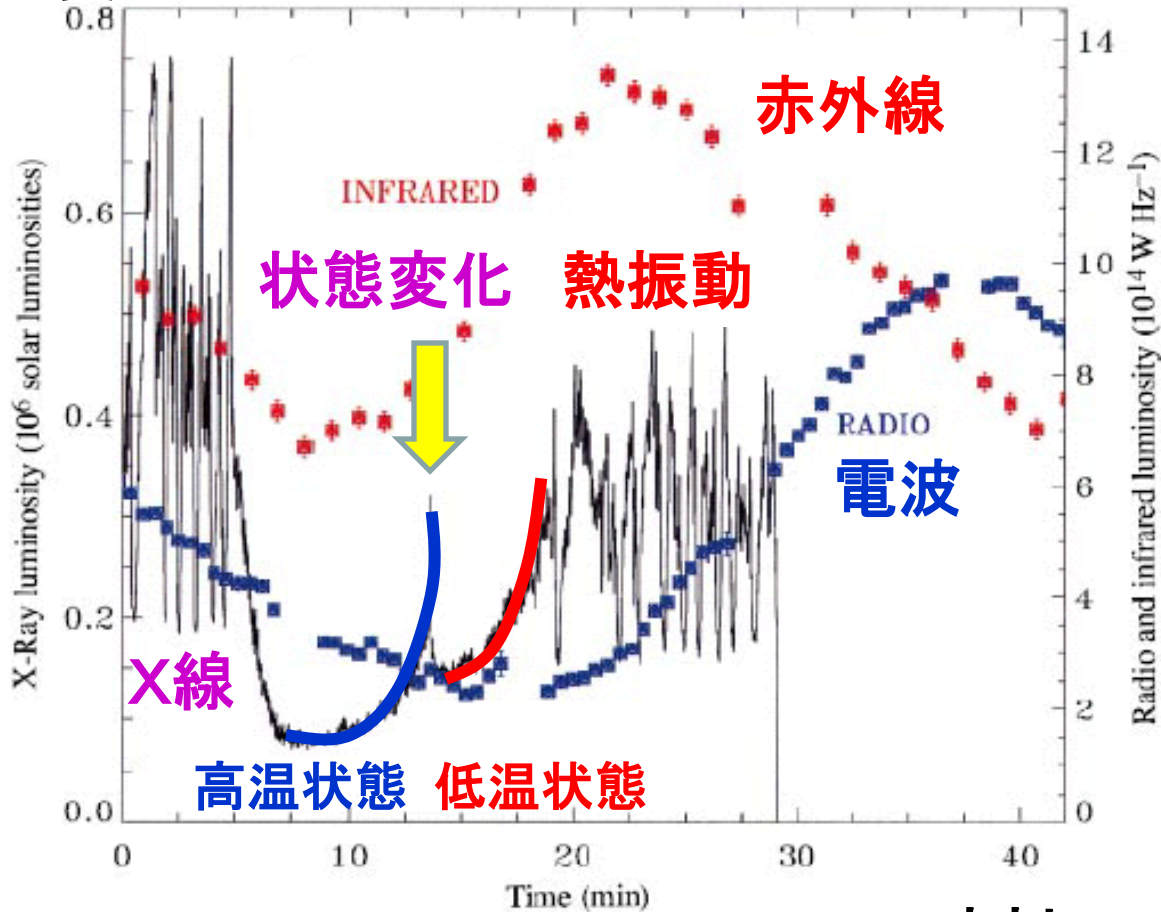
$i=60^\circ$



- The increase of the magnetic energy may be observed via the synchrotron emission in the radio band after 5-10 yrs.

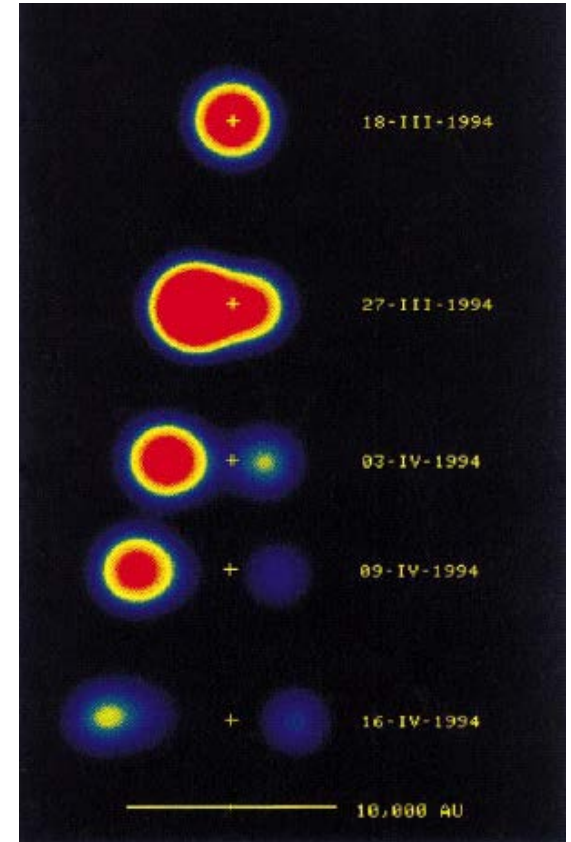
降着円盤状態遷移への適用

光度



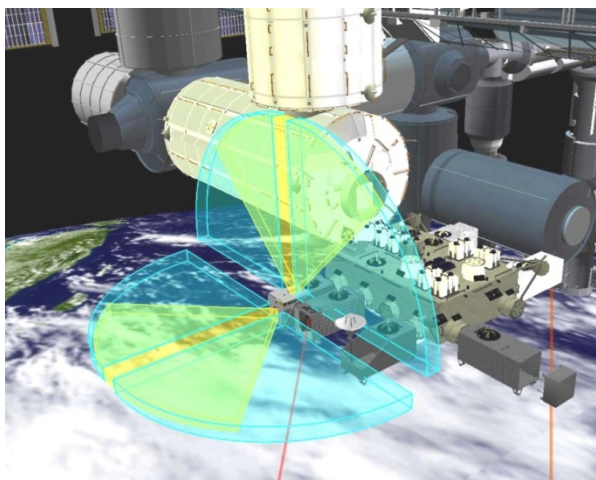
GRS1915+105の時間変動

時刻

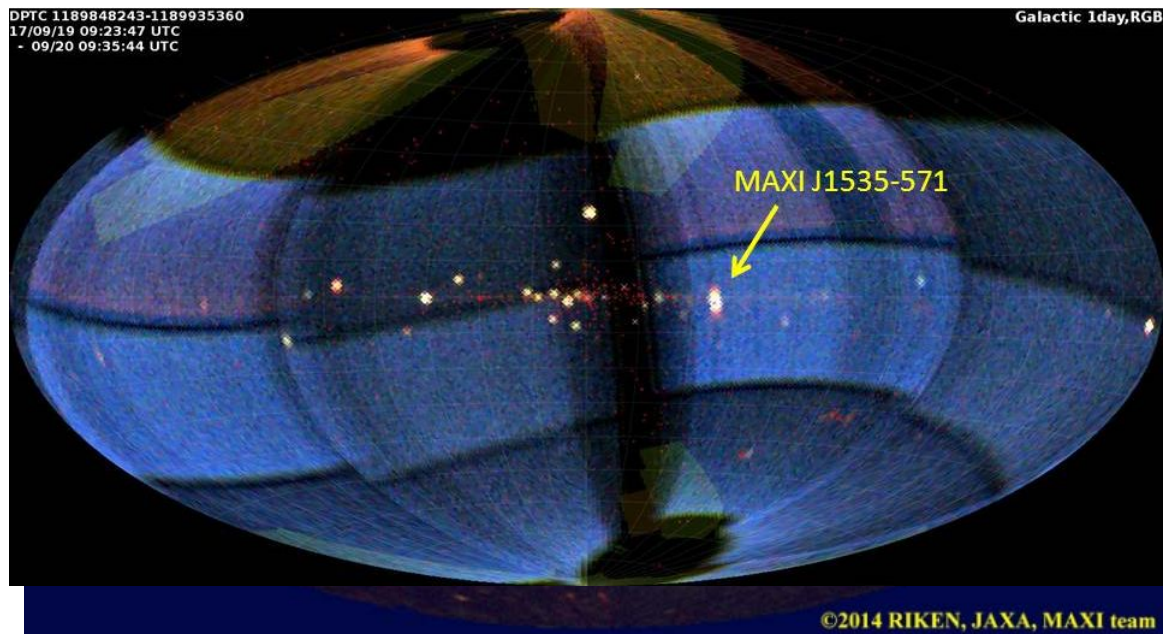


状態変化時の噴出現象
Mirabel and Rodriguez 1998

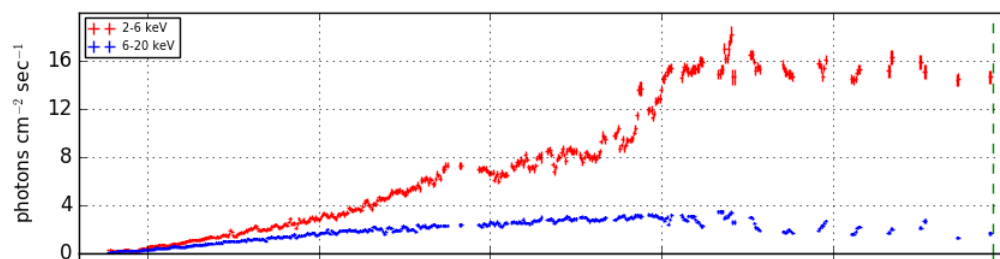
ブラックホール新星MAXI J1535-571



国際宇宙ステーションの日本の
実験モジュール「きぼう」に
取付られた全天X線モニタ
MAXI(2009-)



<http://maxi.riken.jp/>

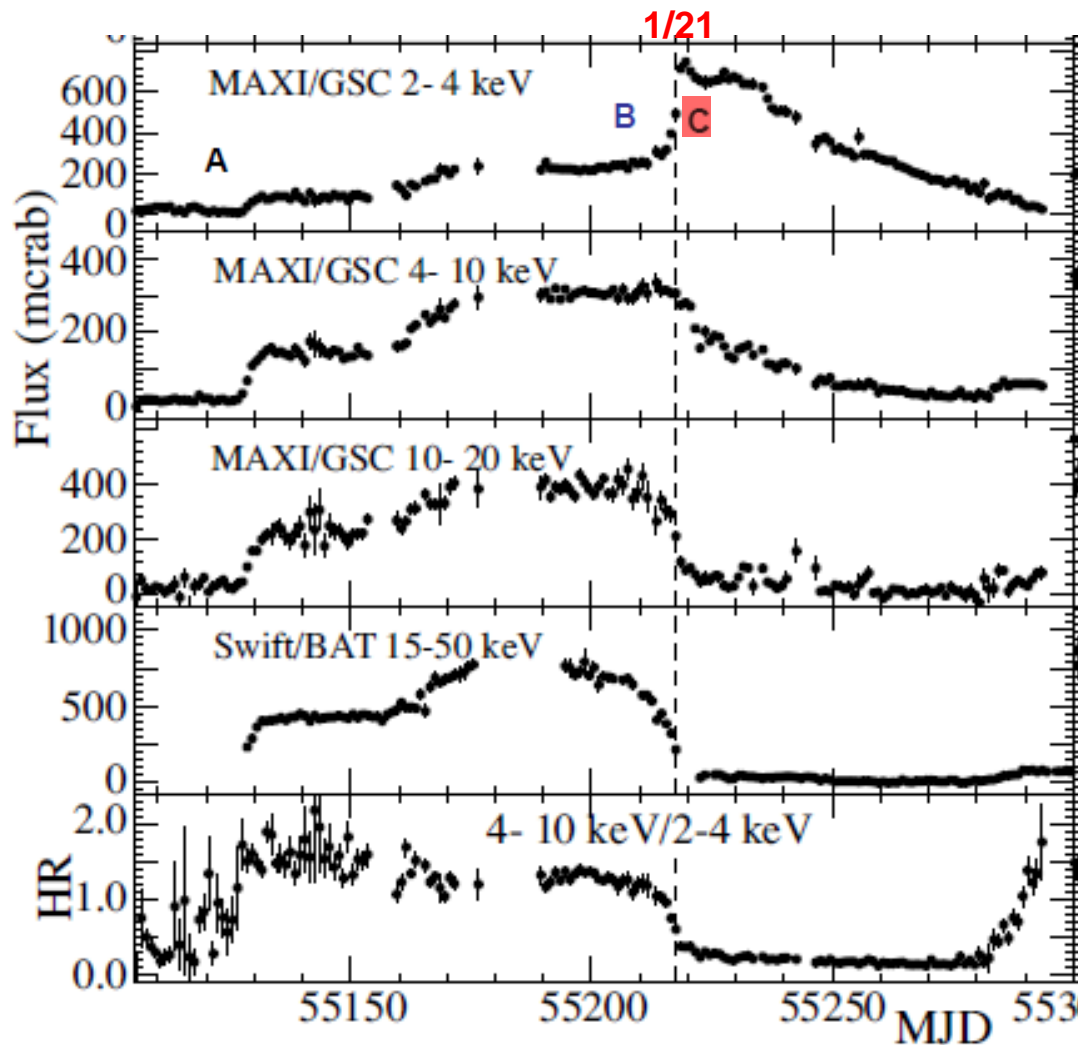


9月2日

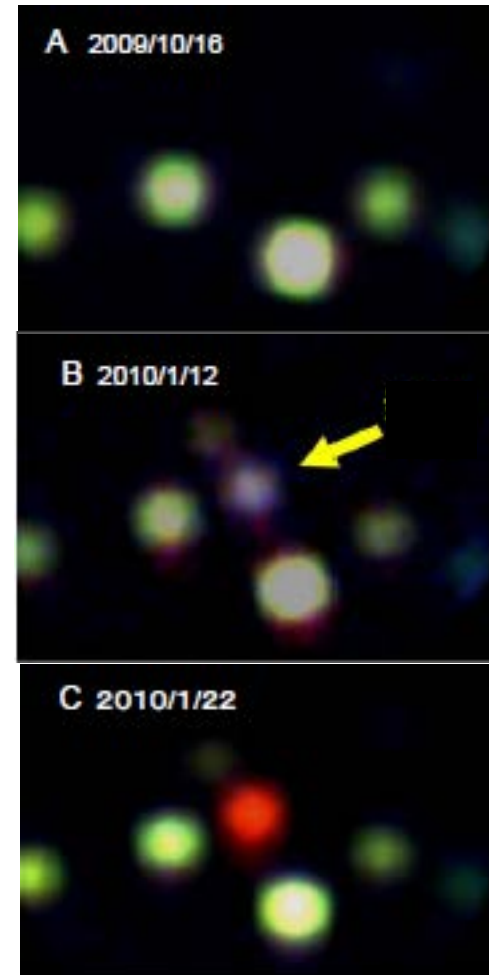
9月29日

2017年9月2日に発見されたブラックホール候補の光度変化

MAXIで観測したブラックホール新星 XTE J1752-223



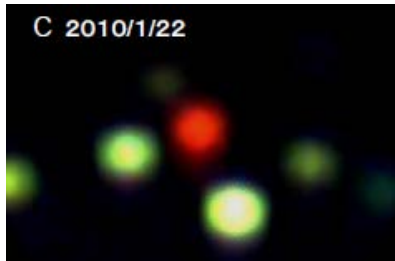
Nakahira et al. 2010



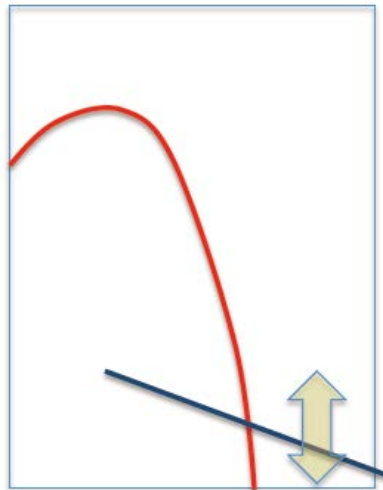
MAXI Science News #17

MAXIで観測されたブラックホール新星XTE J1752-223の進化

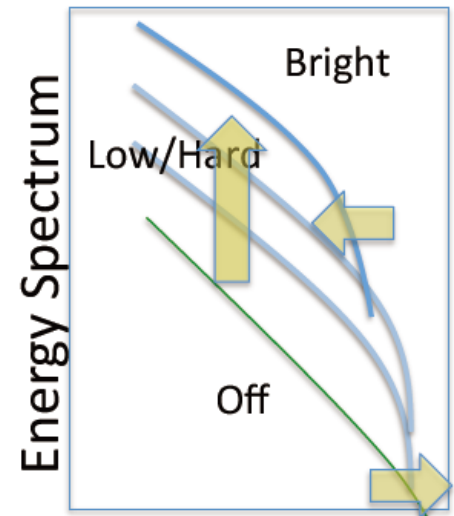
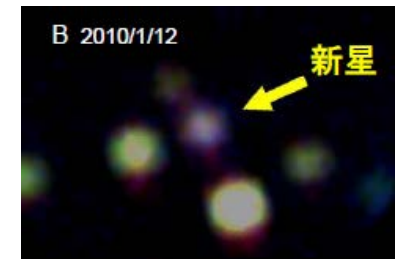
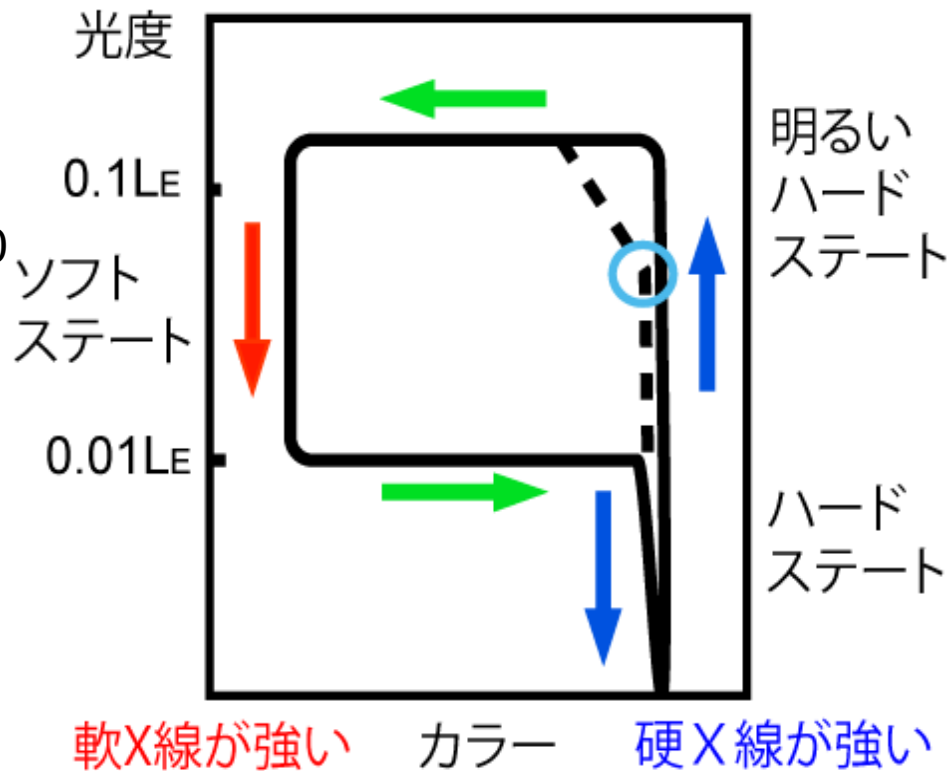
ブラックホール候補天体の アウトバースト中の進化



Nakahira et al. 2010



Negoro

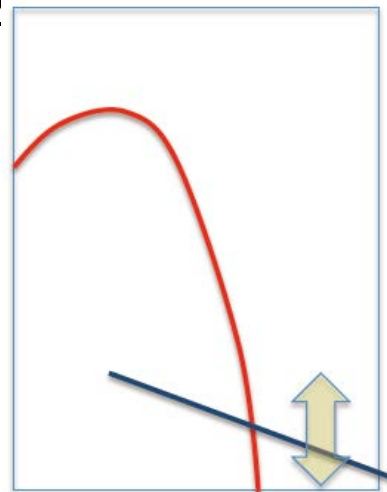


ブラックホール候補天体の アウトバースト中の進化

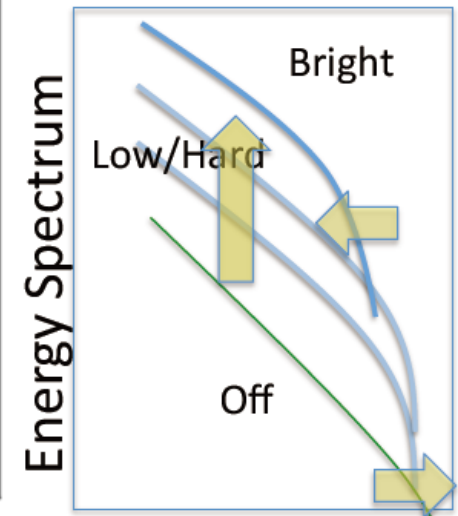
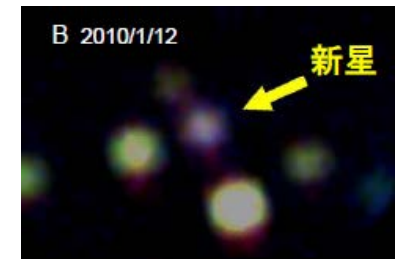
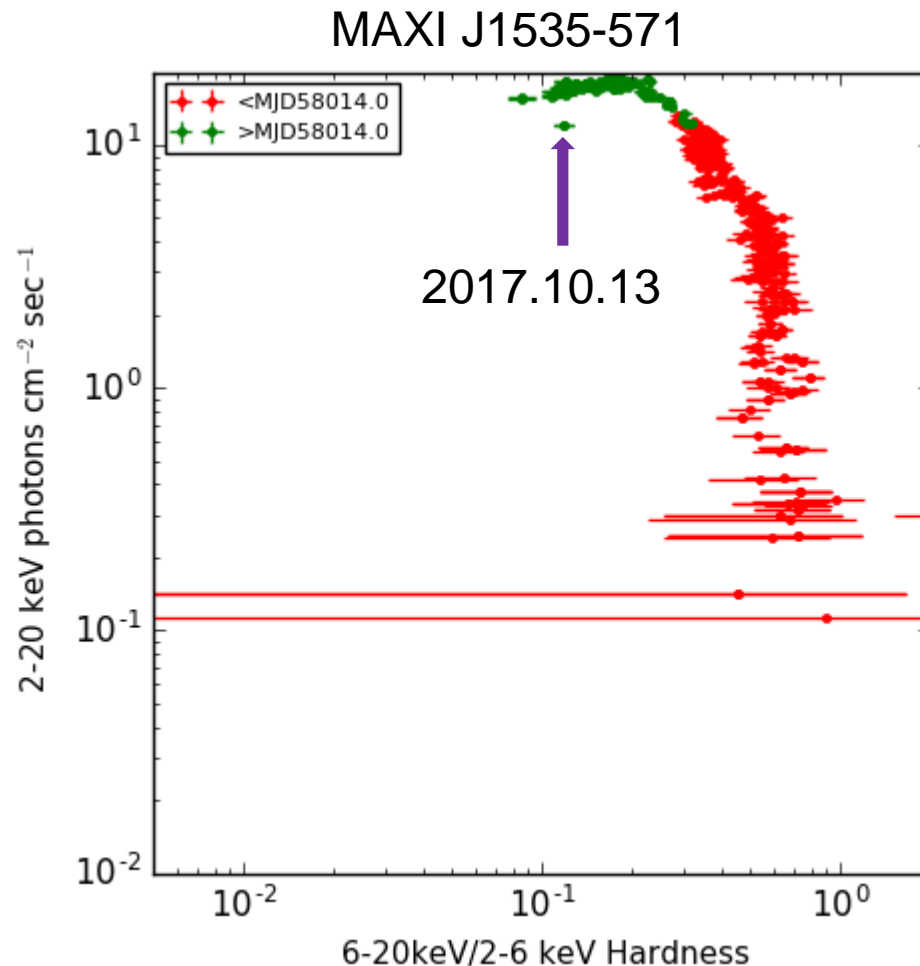


Nakahira et al.

2



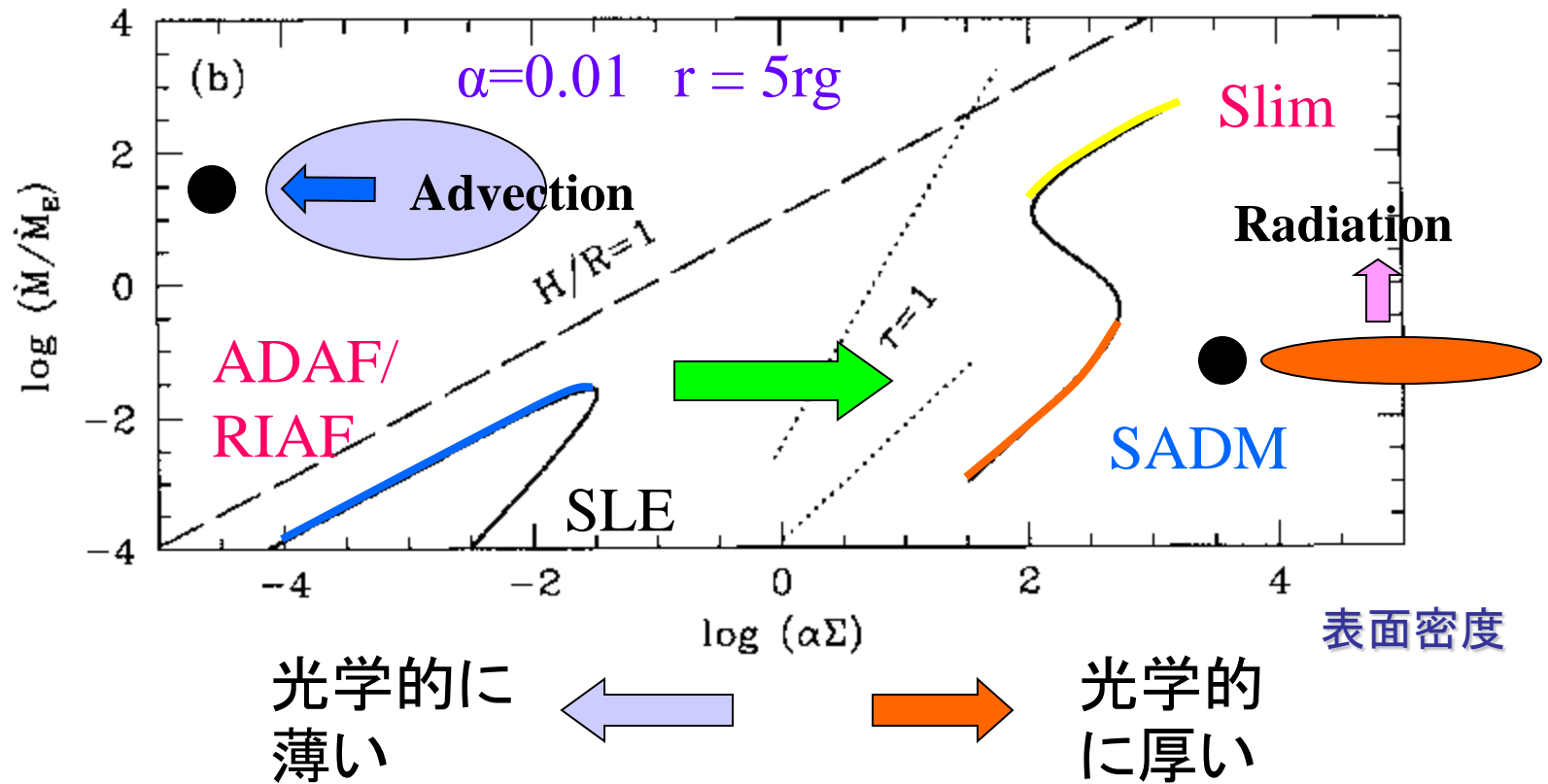
Negoro



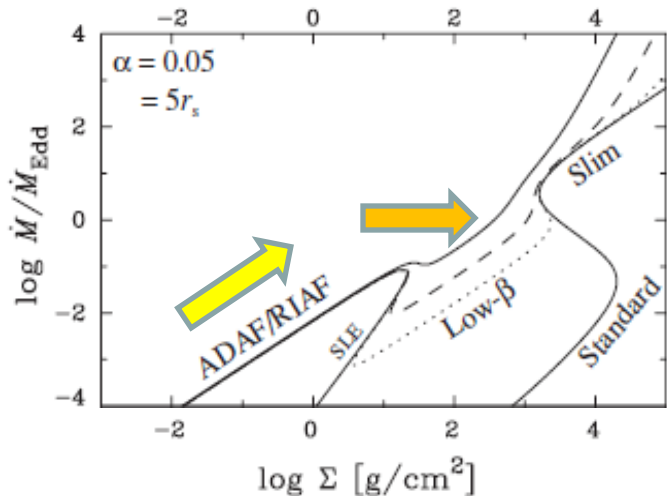
状態遷移の理論モデル

降着率

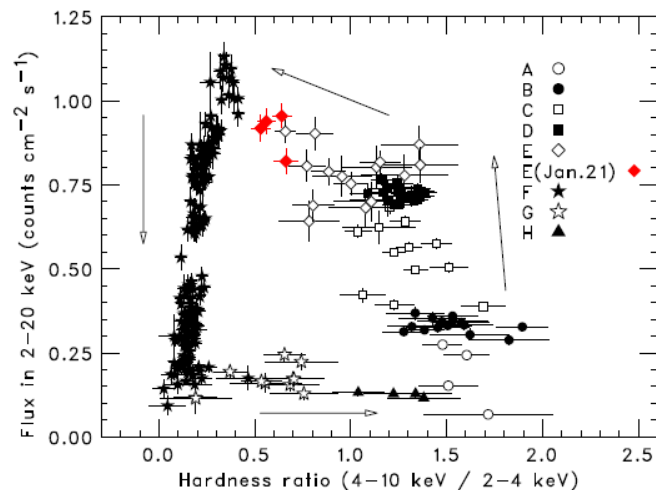
Abramowicz et al. 1995



降着率増増大に伴う降着円盤の進化



定常モデル (Oda et al. 2009)

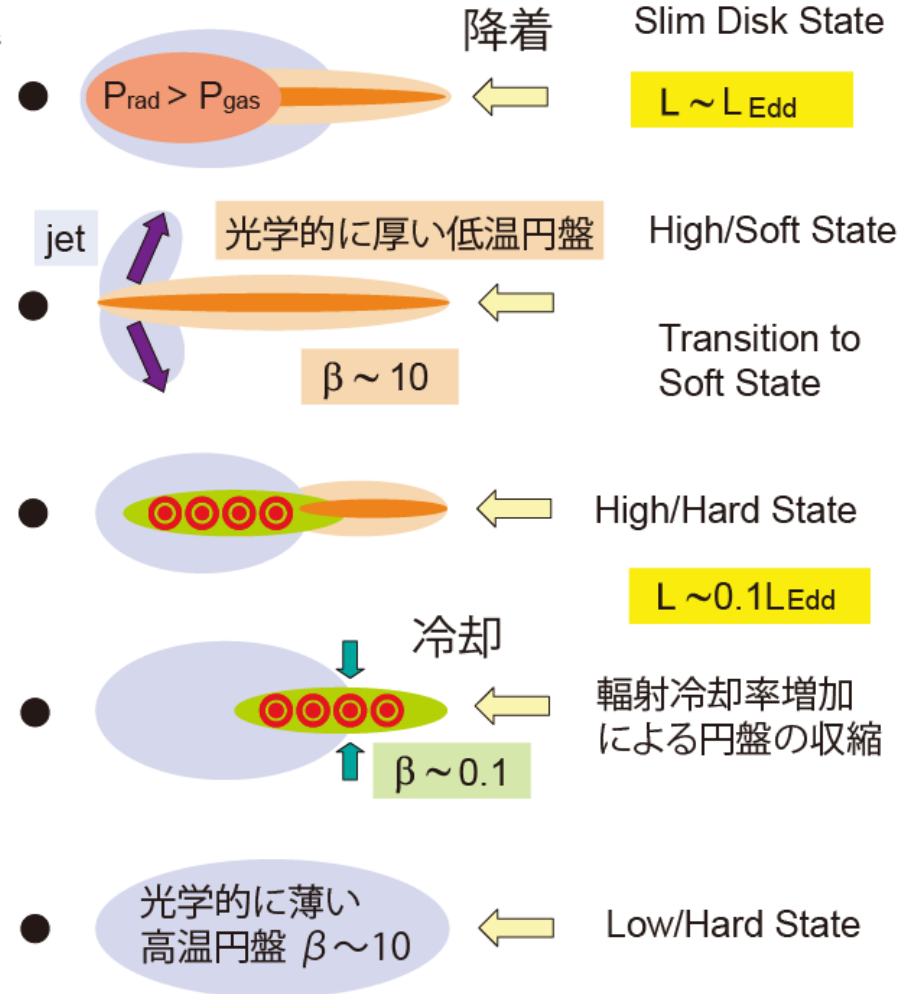


XTE J1752-223 (Nakahira et al. 2010)

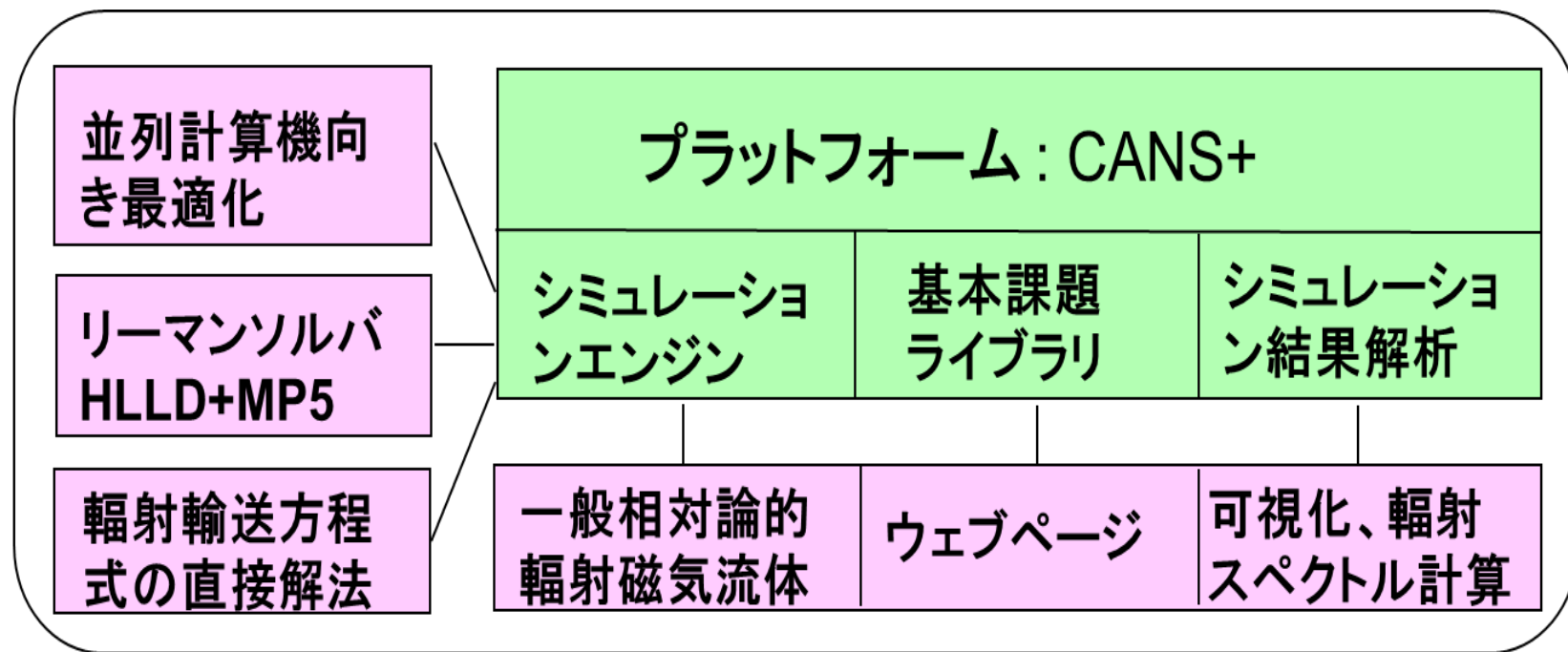
降着率

大

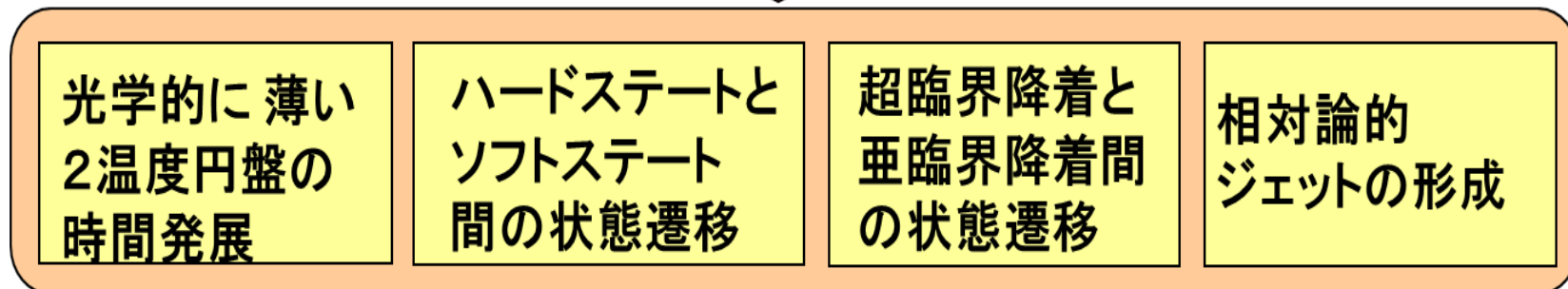
小



降着円盤磁気流体シミュレータ



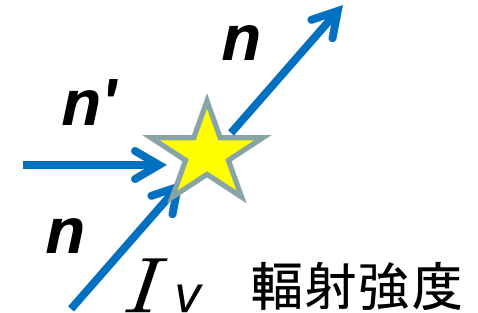
降着円盤への適用



1次モーメント法に基づく 輻射磁気流体コードCANS+R

- 輻射輸送方程式

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



- 角度方向に積分したモーメント式

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

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

- クロージャー関係

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

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

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

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

一般相対論的輻射磁気流体コード

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

$$\partial_i (\sqrt{-g} B^i) = 0$$

誘導
方程式

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

流体

$$\partial_t (\sqrt{-g} T_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} T_\nu^i) = \sqrt{-g} T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g} G_\nu$$

輻射

$$\partial_t (\sqrt{-g} R_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} R_\nu^i) = \sqrt{-g} R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g} G_\nu$$

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

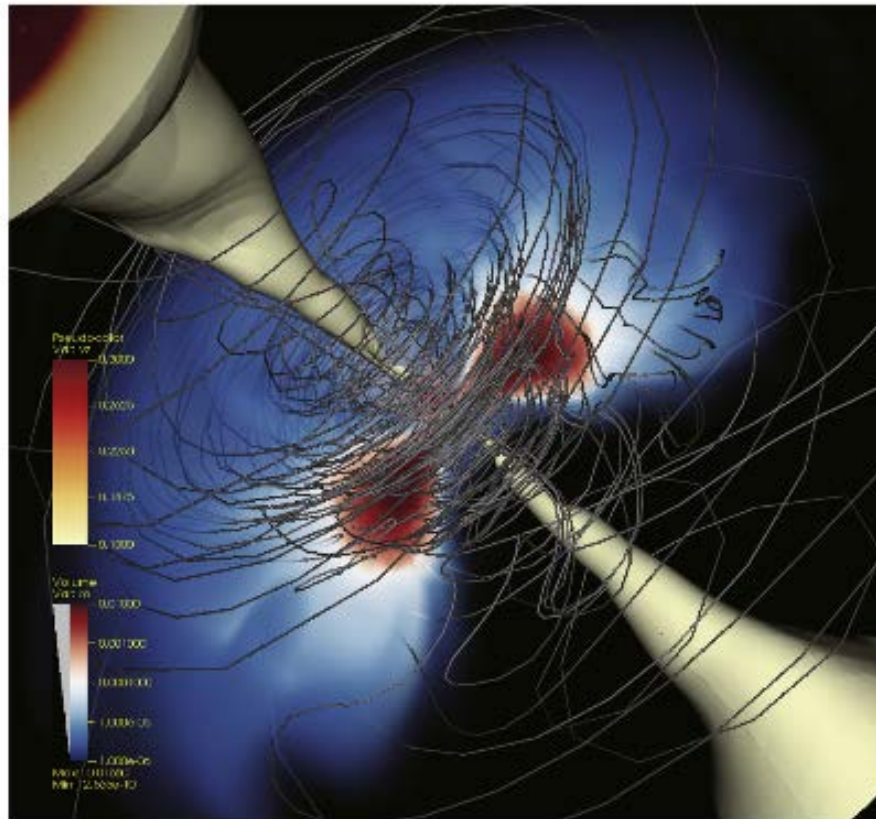
M1-closure

$$R^{\mu\nu} = \frac{4}{3} \bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3} \bar{E}_R g^{\mu\nu}$$

座標系: Kerr-Schild 座標

Takahashi et al. 2016, ApJ

一般相対論的3次元 輻射磁気流体シミュレーション結果



Takahashi et al. 2016, ApJ

まとめと今後の課題

- 降着円盤の大局的3次元磁気流体シミュレーション等に適用可能な高精度磁気流体コードCANS+を開発・公開した。
- CANS+は数値散逸が小さく、低解像度の計算でも円盤ダイナモを維持可能。また、磁気圧優勢領域にも適用可能なため、磁気流体ジェットの研究等にも適す。
- 1次モーメント(M1)法に基づく輻射磁気流体コードCANS+Rをテスト中。降着円盤の状態遷移計算に適用予定。
- 降着円盤の局所計算用のコード、2温度プラズマシミュレーションコードも実装中。

END