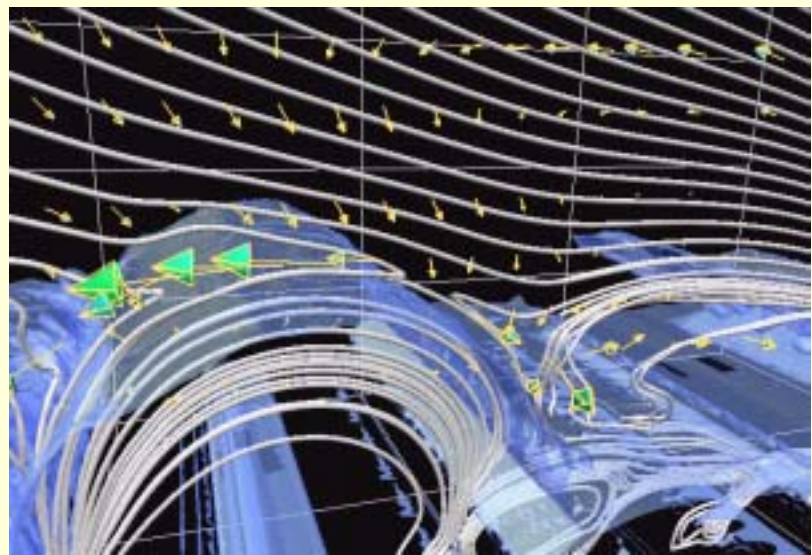
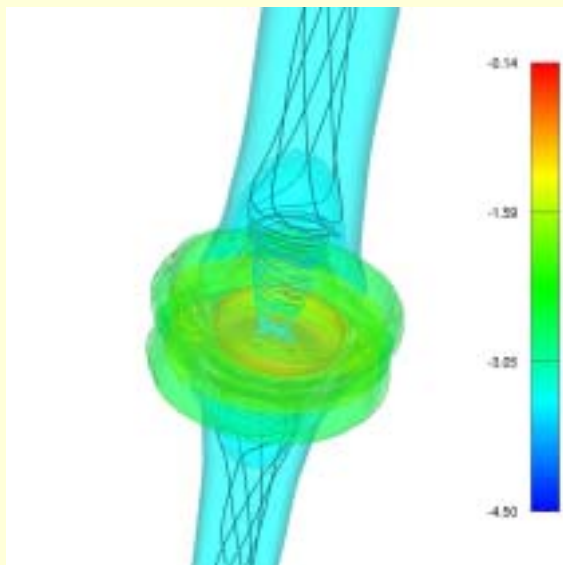


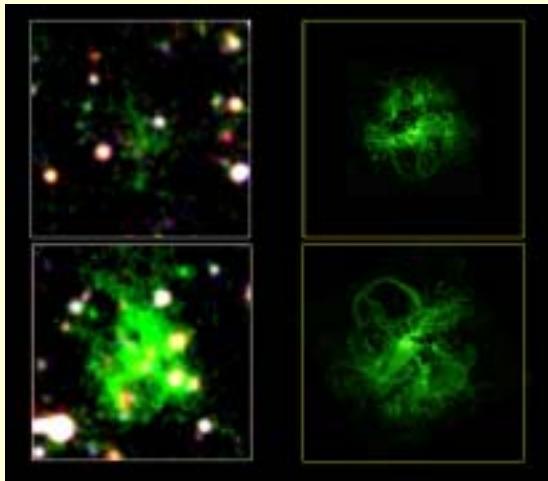
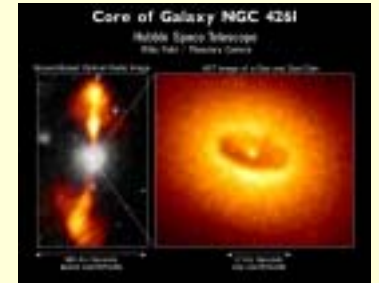
# 地球シミュレータプロジェクト 先進・創出分野

## 宇宙の構造形成とダイナミクス



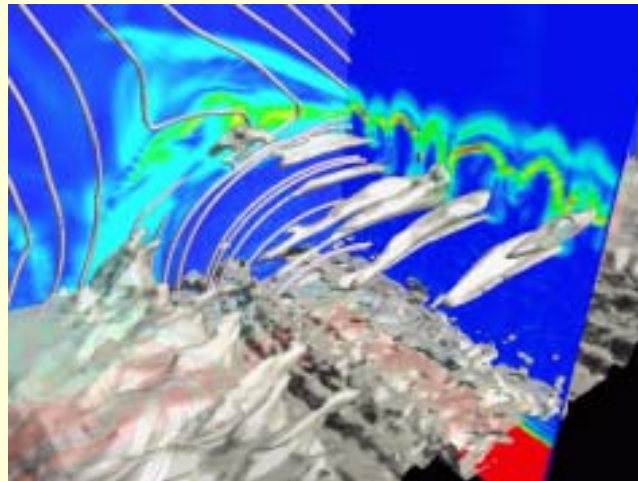
松元亮治(千葉大理)

# 地球シミュレータプロジェクト 「宇宙の構造形成とダイナミクス」



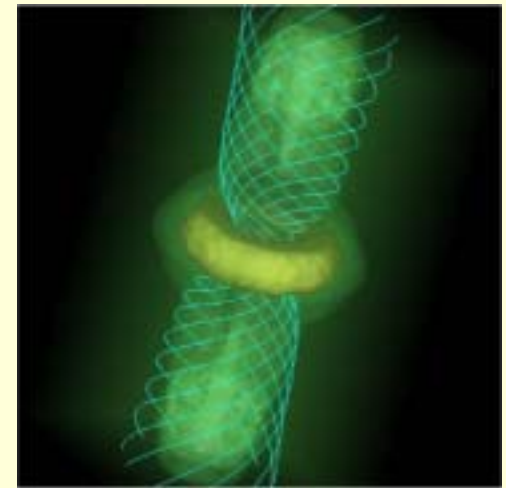
銀河形成

Nature 440, 644 (2006)



太陽活動

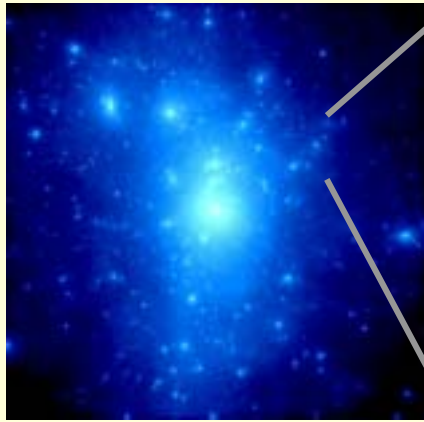
Nature 434,428 (2005)



ブラックホールと  
宇宙ジェット

# 研究目的

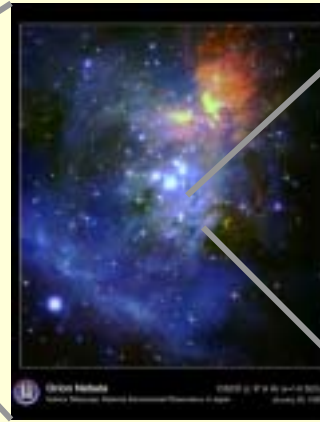
銀河団



銀河



星形成領域



原始星



銀河や銀河団などの宇宙構造の形成過程と、さまざまな天体で観測される活動性の起源を、複数の階層を計算領域に含め、重力、磁気、輻射等による階層間相互作用を取り入れた、マルチスケール、マルチフィジックスシミュレーションによって明らかにする。

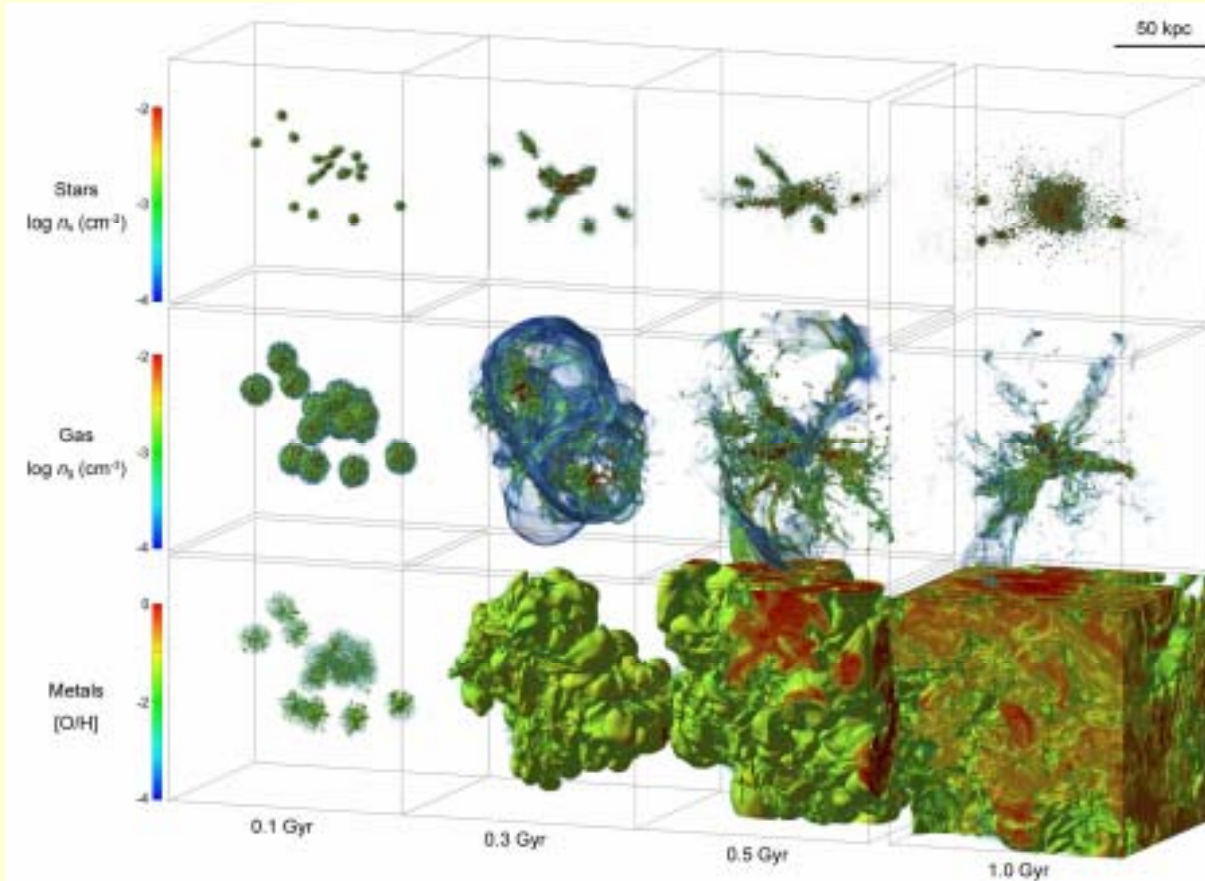
# プロジェクトグループ構成

コンソシアム：天文宇宙分野地球シミュレータ利用懇談会

- 大規模構造形成：矢作 (東大)
- 銀河形成：森 (専修大)、梅村 (筑波大)、中本 (東工大)
- 降着円盤：松元、小田、後藤、浅野 (千葉大)、加藤 (筑波大)、町田、工藤 (国立天文台)、佐野 (阪大)、大須賀 (立教大)、廣瀬 (地球シミュレータ)
- 太陽：柴田、塩田、清水、能登谷、西田、松本 (京大)、横山、磯部 (東大)、宮腰 (JAXA)、井上 (広島大)、草野 (地球シミュレータ)

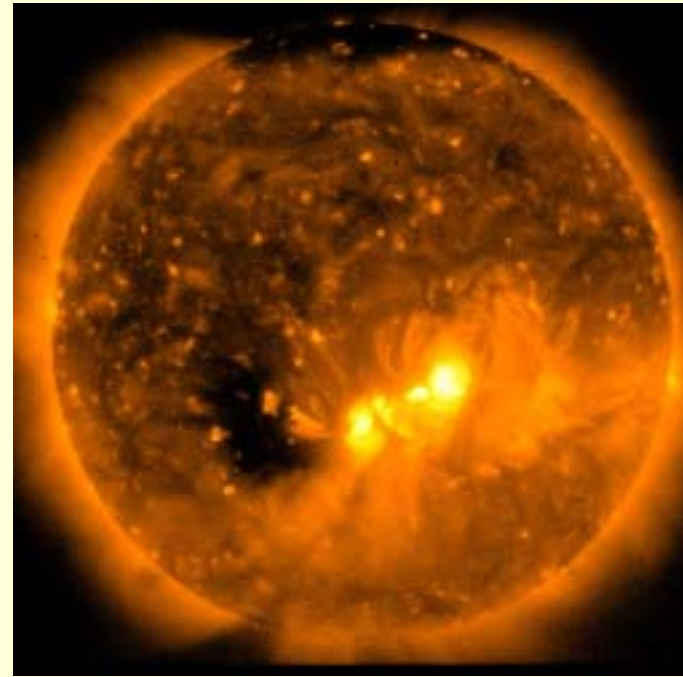
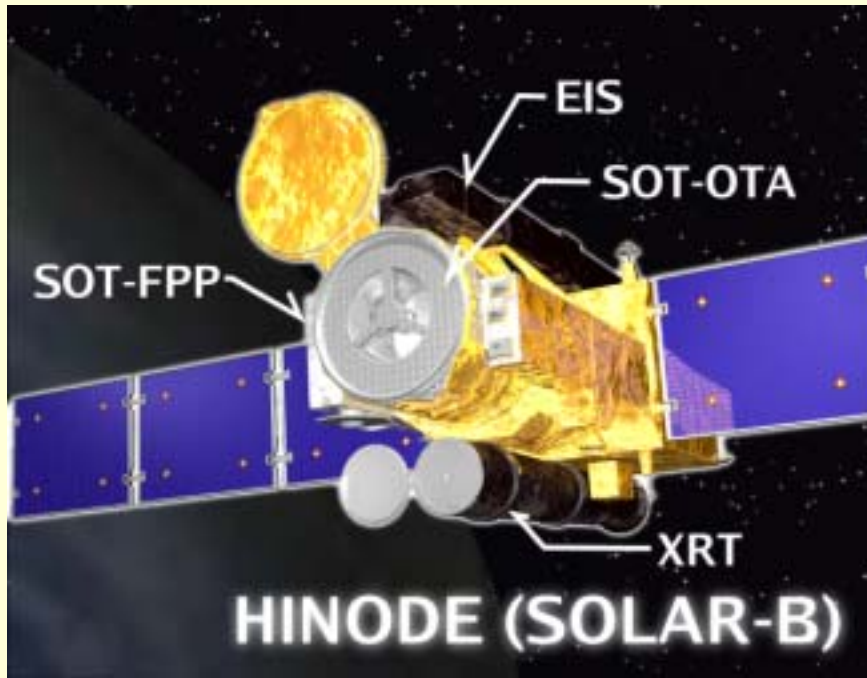
# 進捗状況と成果

銀河形成シミュレーション結果をNatureに発表



The evolution of galaxies from primeval irregulars to present-day ellipticals, Mori, M. and Umemura, M., Nature, 440, 644-647 (2006)

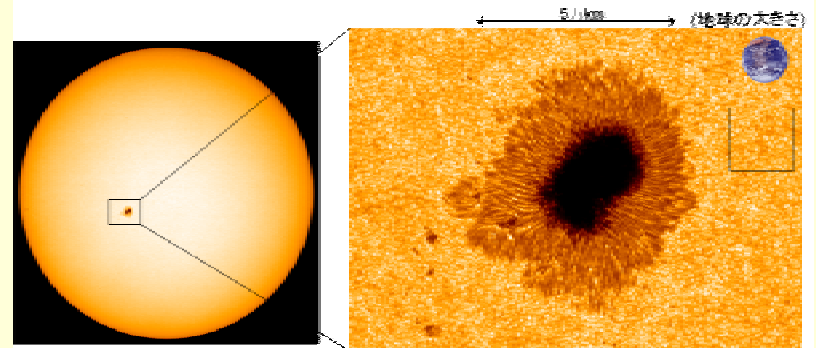
# 太陽活動シミュレーション



軟X線

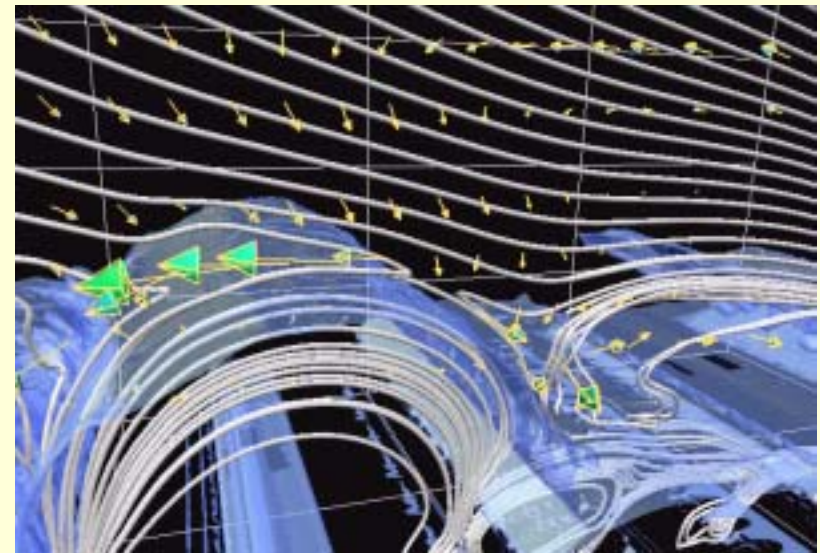
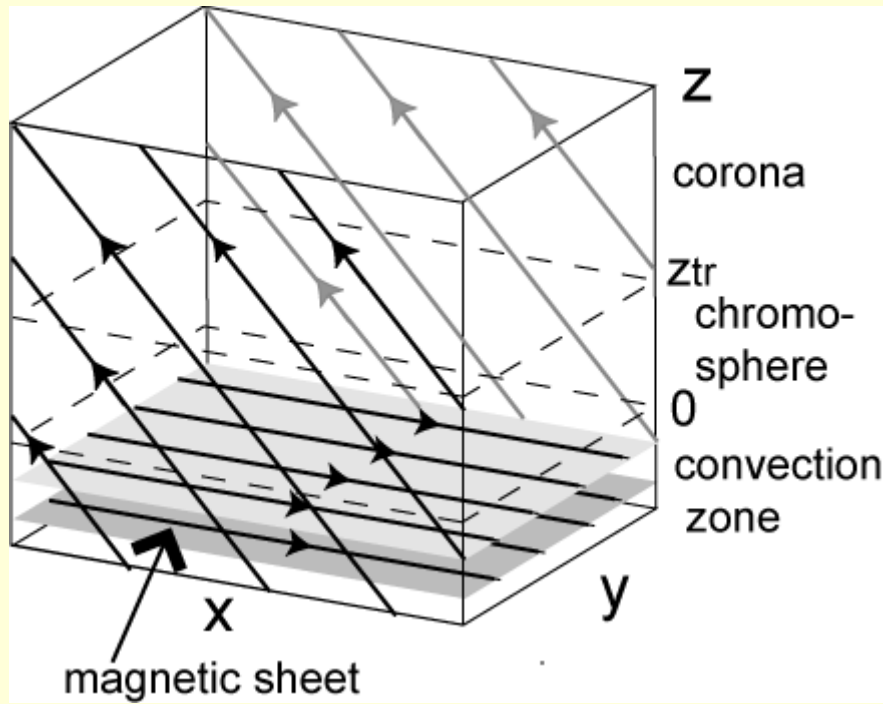
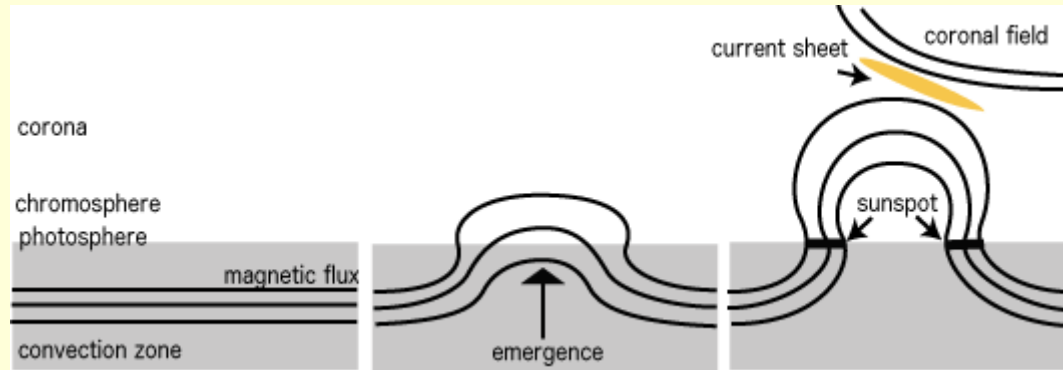


太陽観測衛星  
「ひので」打上  
2006.9.23



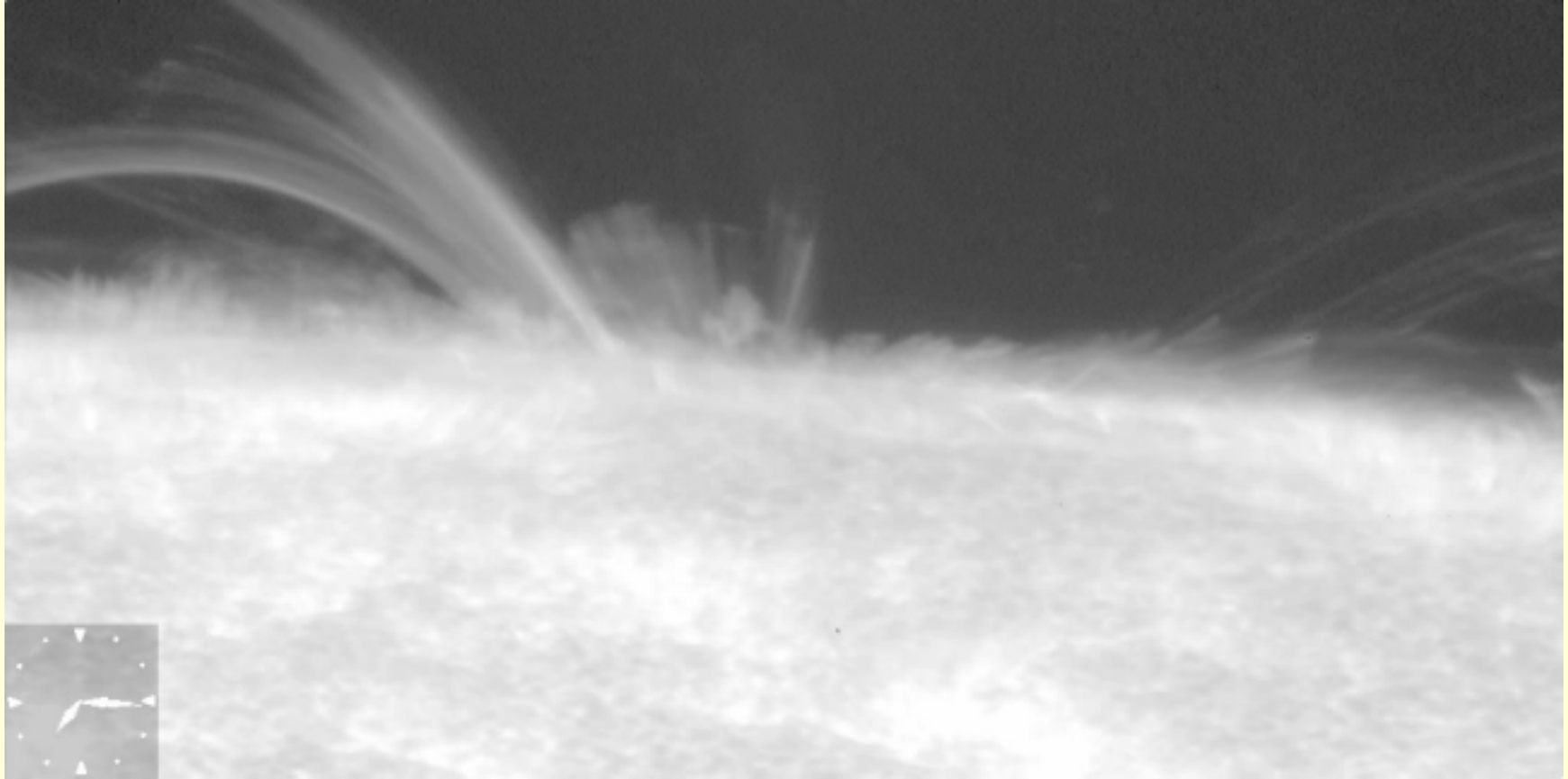
可視光望遠鏡

# 太陽浮上磁場の3次元MHDシミュレーション

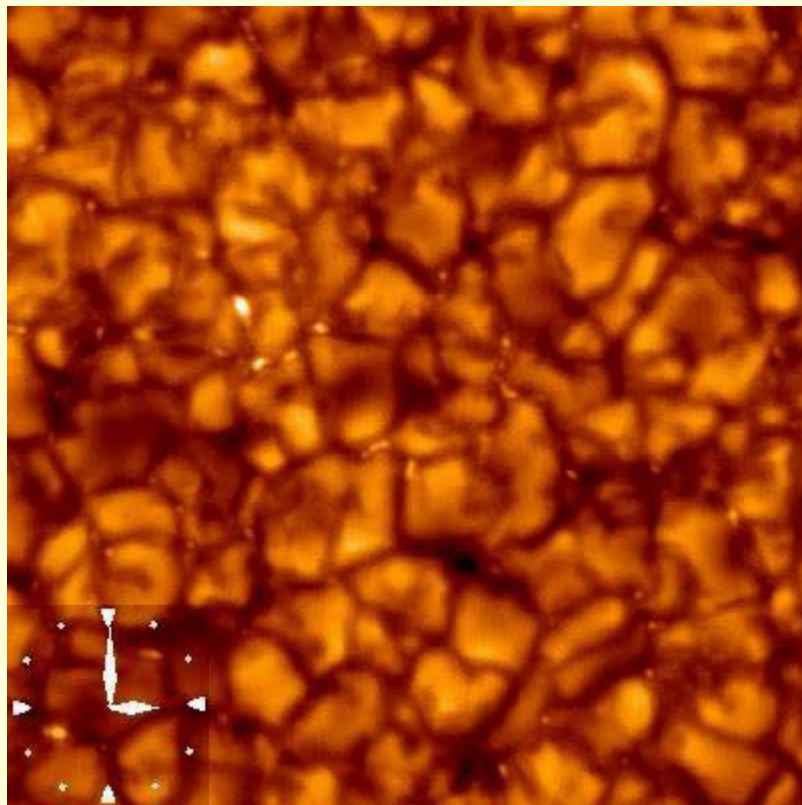


Isobe et al. 2006

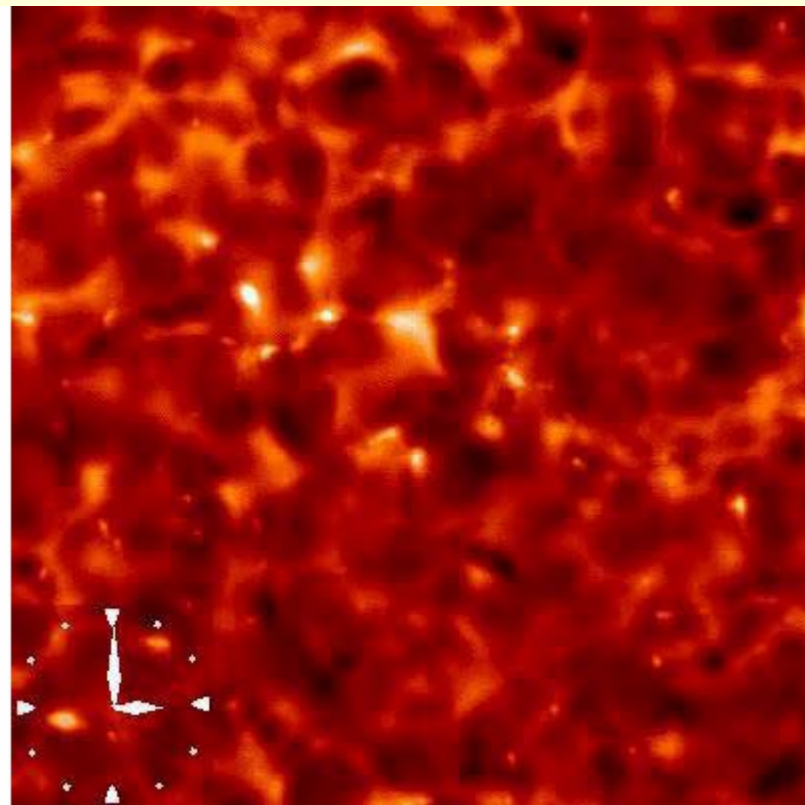
# 「ひので」可視光望遠鏡が捉えた活動領域上空の激しいプラズマ運動



# 「ひので」による太陽表面对流の観測

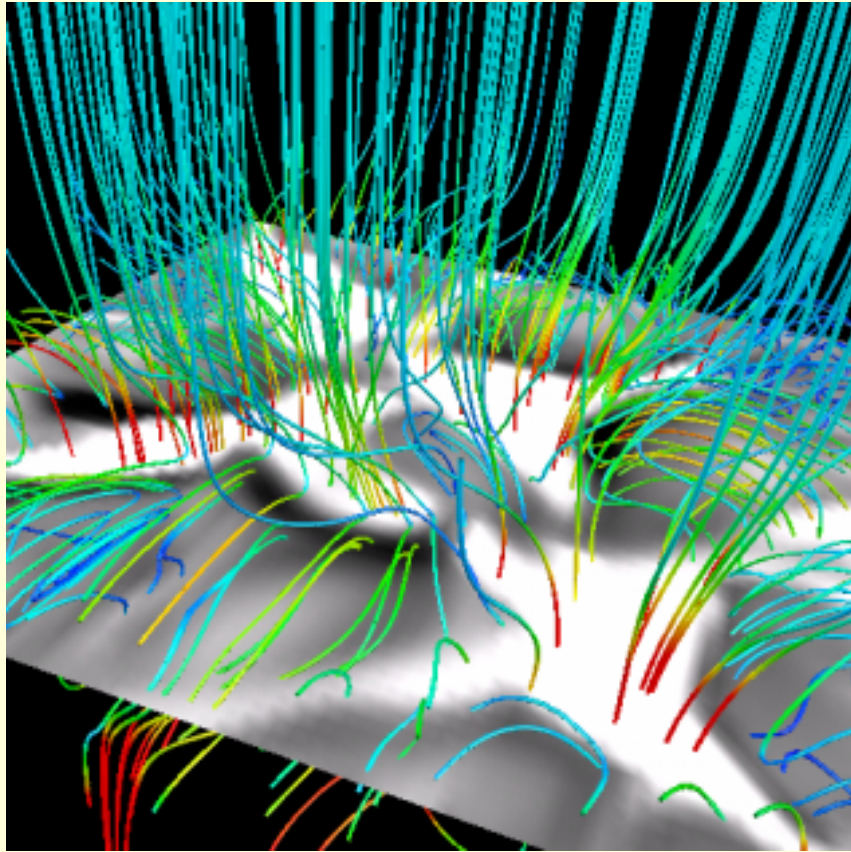


Gバンド(光球)



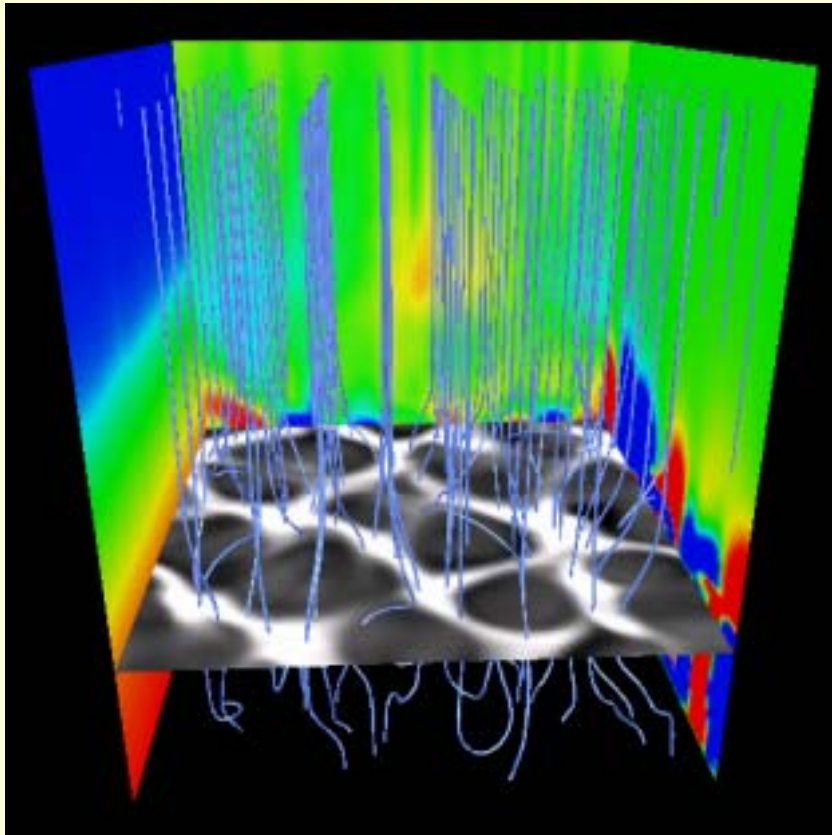
カルシウムH線(彩層)

# 磁気対流のMHDシミュレーション



16H × 16H × 30H Chandrasekhar Number  $Q=2000$  (  $=300$  at  $z=0$  )

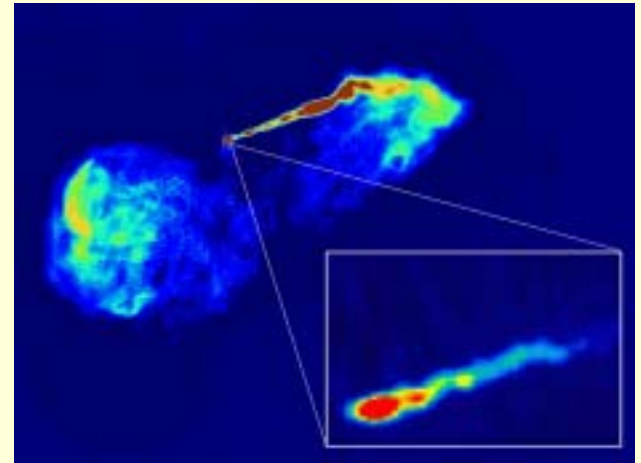
# 磁気対流のMHDシミュレーション



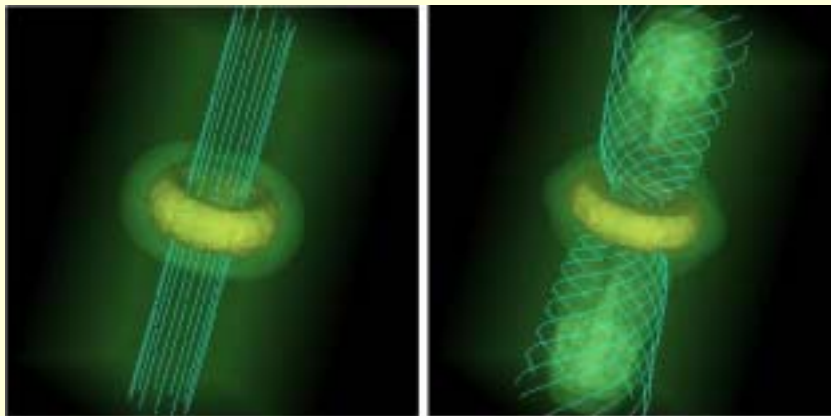
初期磁場が強い場合

$Q=4000$  (  $\beta=150$  at  $z=0$  )

# 宇宙ジェットのスミュレーション



活動銀河M87中心核から噴出する  
ジェット(VLA, 「はるか」による観測)

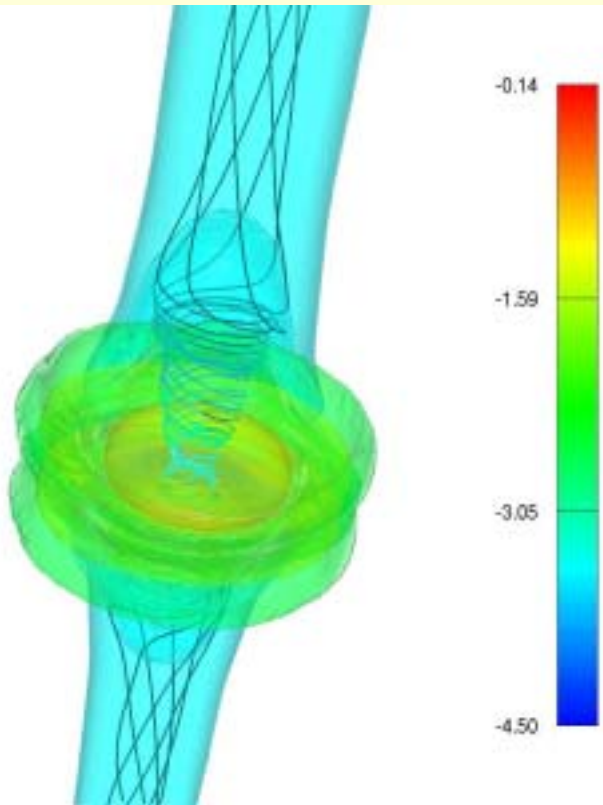


降着円盤から噴出するジェット  
は安定に存在できるか？



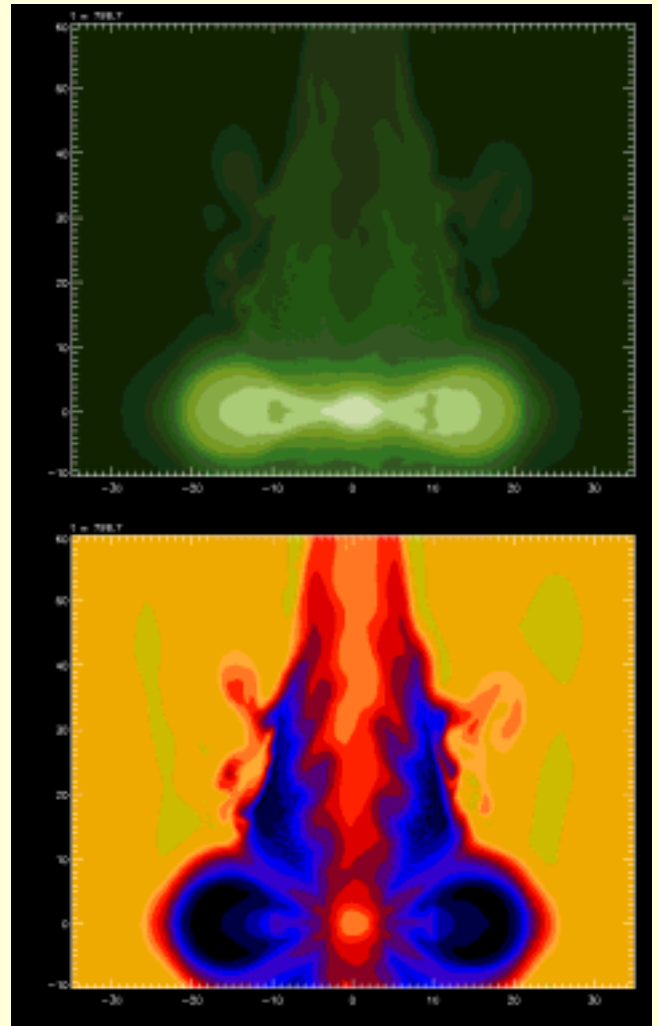
カーテシアン座標3次元  
MHDスミュレーション

# シミュレーション結果



密度

温度



カーテシアン座標  $400^3$  メッシュを用いたシミュレーションの結果。カラーは密度分布。

# ブラックホール降着円盤の大局的 3次元磁気流体シミュレーション

重力ポテンシャル :  $= -GM/(r-r_g)$

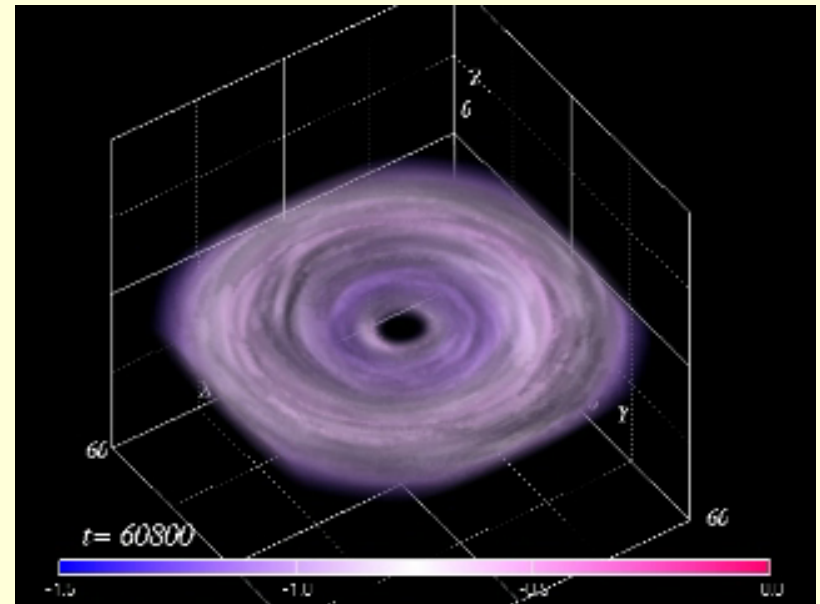
角運動量 : 初期に一定

初期磁場 : 方位角磁場

$$P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}} = 100$$

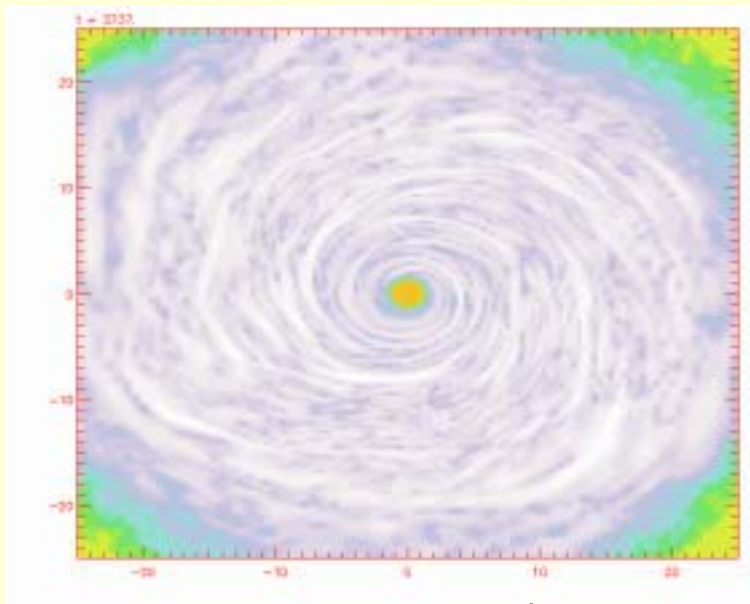
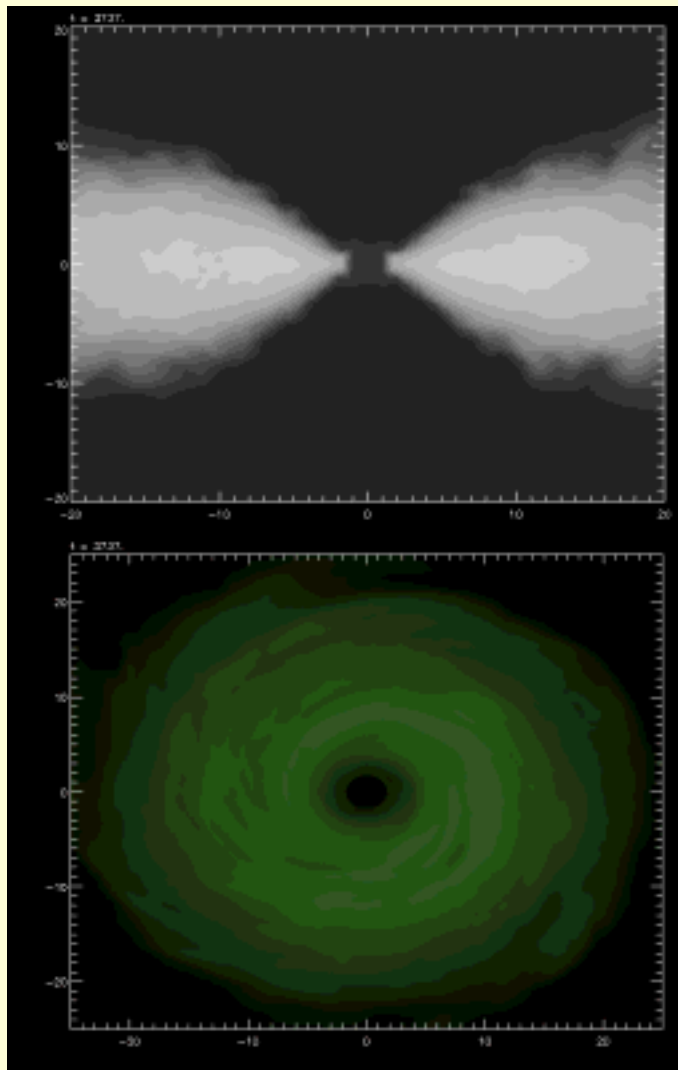
異常電気抵抗

$$= (1/R_m) \max [(J/\dots) / v_c - 1, 0.0]^2$$



# カーテシアン座標系 3次元シミュレーション結果

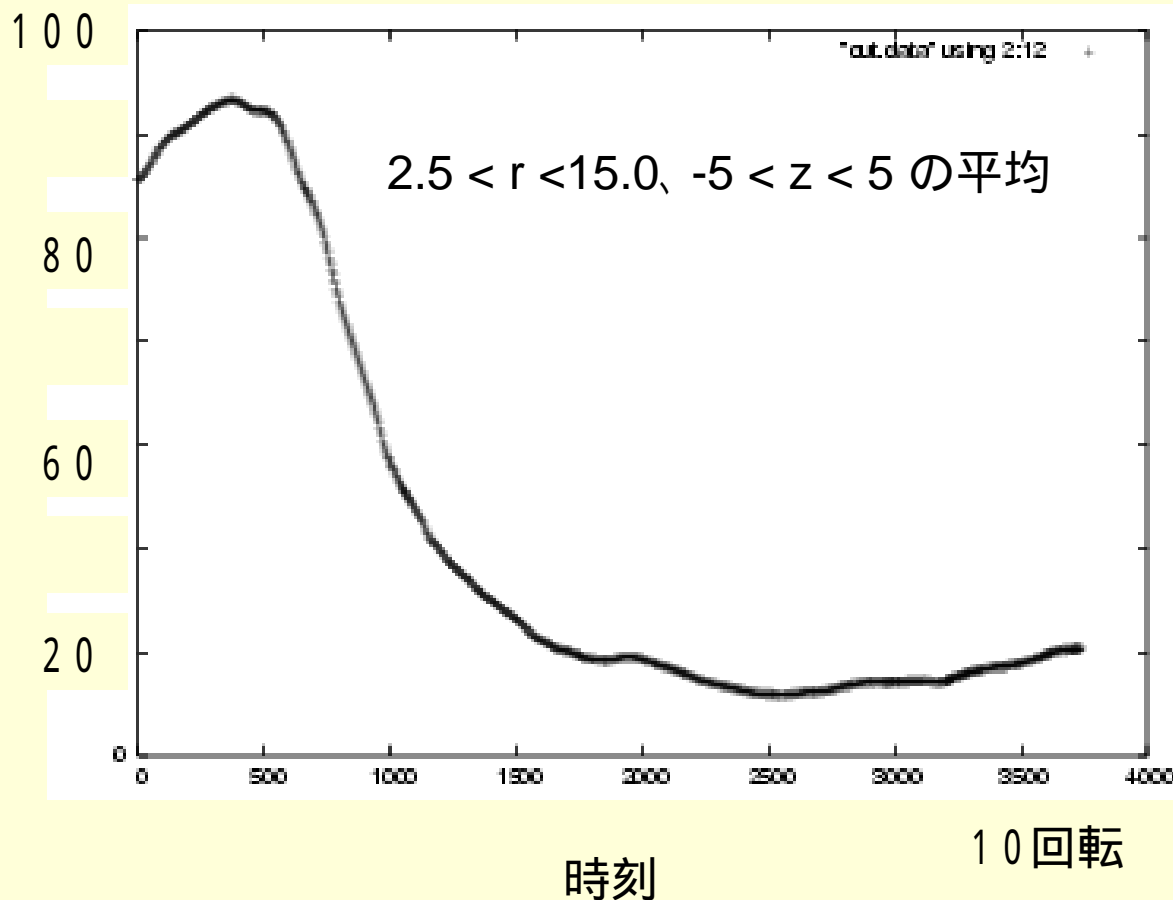
密度



=  $P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}}$

カーテシアン座標系で $400^3$  メッシュを用いた計算結果。円筒座標系での計算と同様に、円盤内部で磁気回転不安定性が成長し、円盤は乱流状態になる。円盤では一本腕の密度構造が発達する。

# 値の時間発展

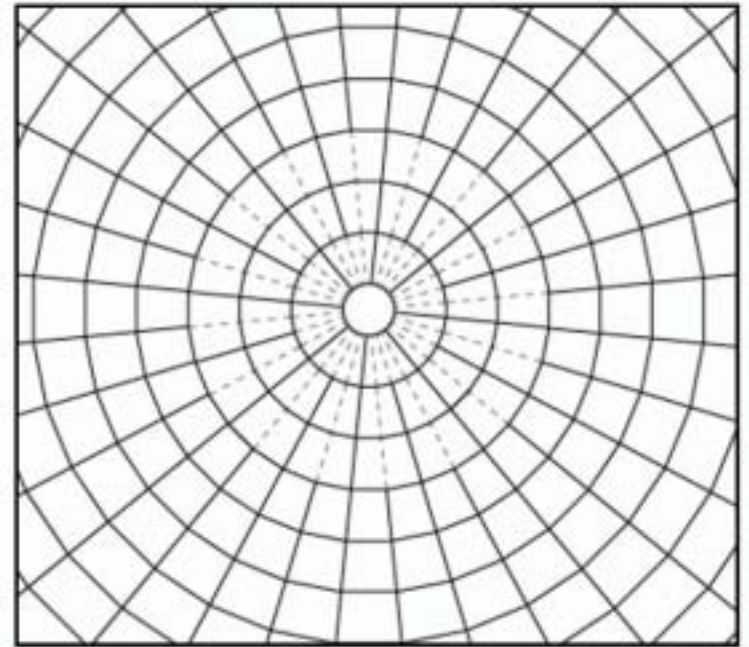
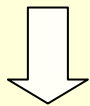


円筒座標系シミュレーションにくらべて方位角方向の解像度が高いカーテシアン座標の計算でも、  
=Pgas/Pmag が10程度まで磁場が増幅されることを確認した。

# より長いタイムスケールの計算には 円筒座標系が適す

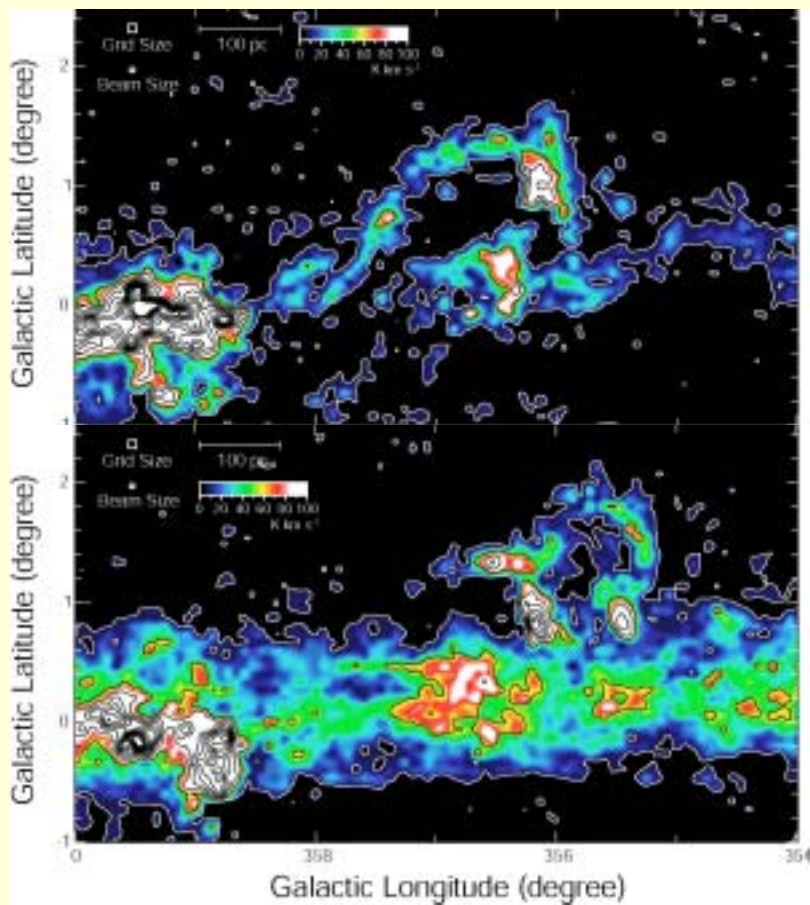
円筒座標系シミュレーションの難点

- 回転軸が singular になり、ノイズが入りやすい。
- 回転軸付近で方位角方向のメッシュサイズが小さくなり、クーラン条件から決まるタイムステップが短くなる。

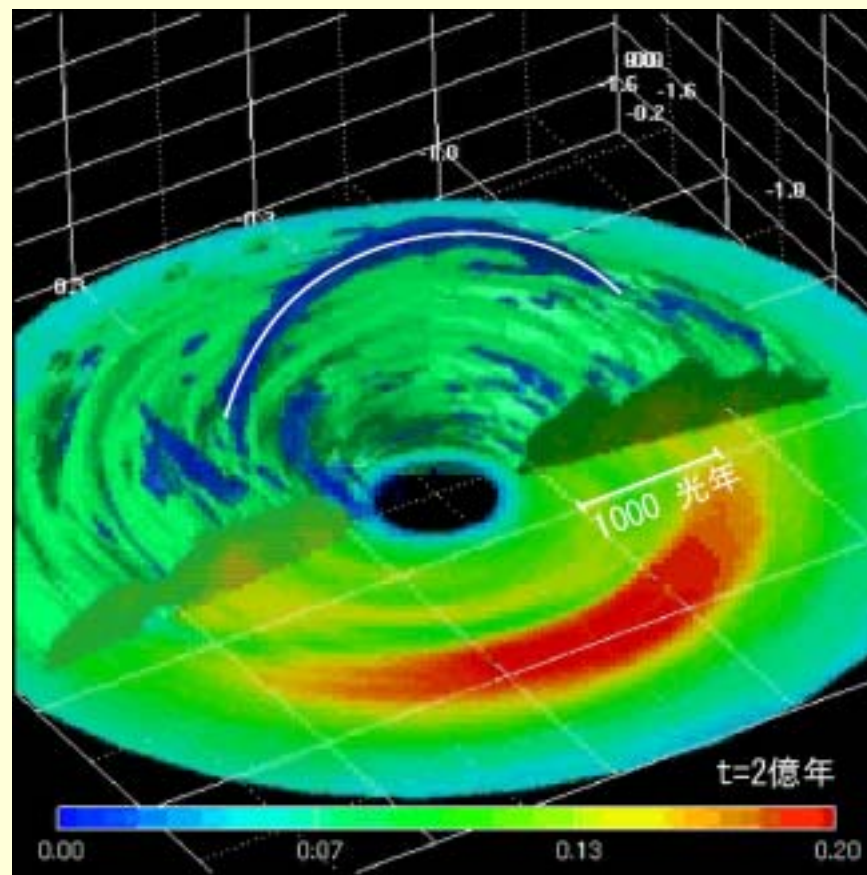


塩田、草野らが太陽コロナ質量放出の全球シミュレーションで採用した方法を回転円盤に適用したシミュレーションを今年度中に実施する

# 銀河系中心磁気ループの形成 (Fukui et al. 2006, Science 314, 106)

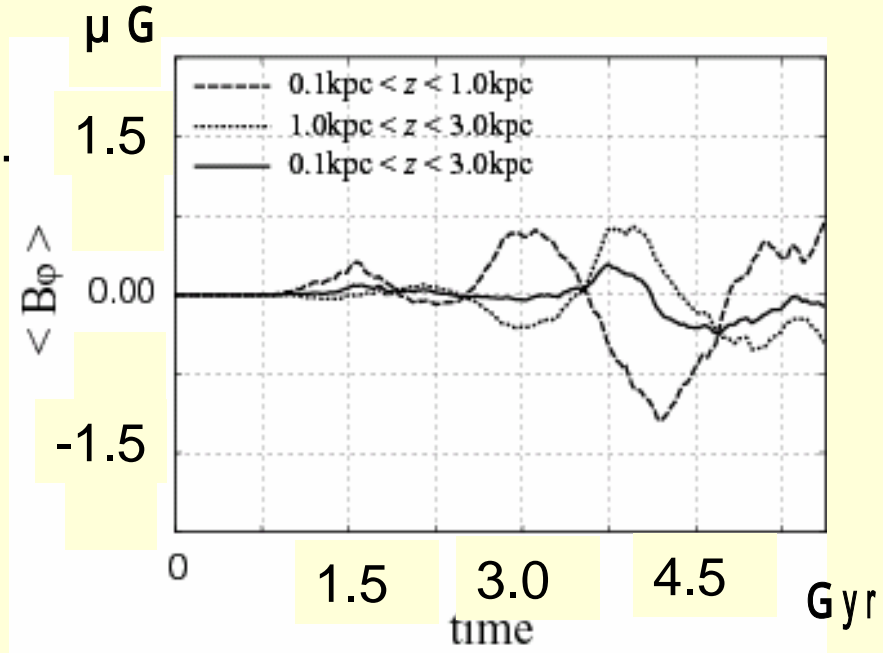
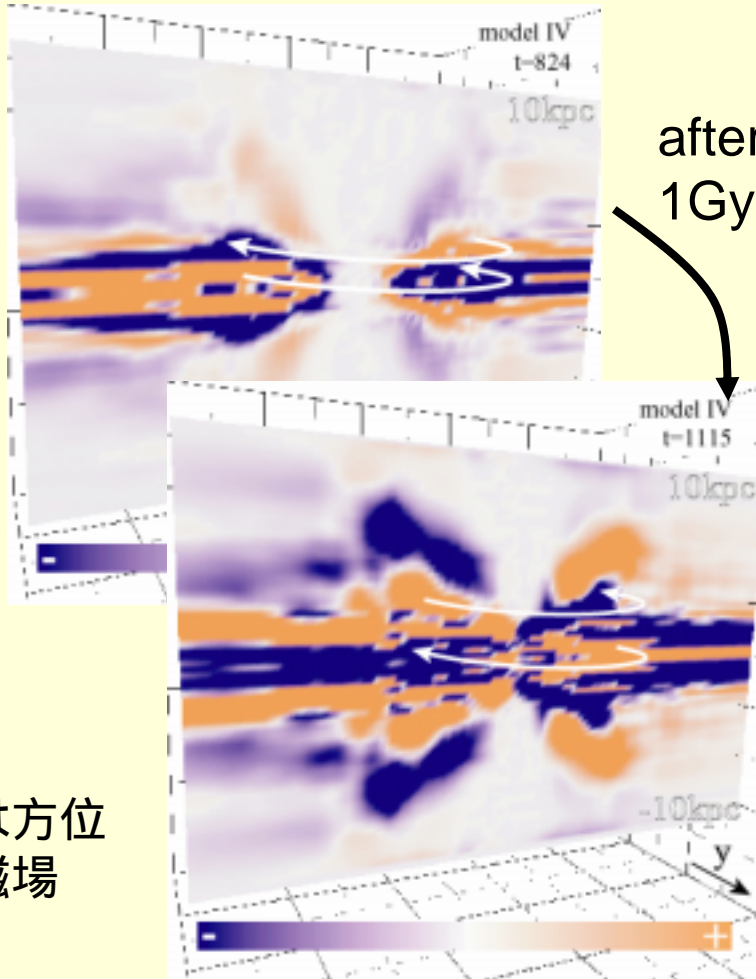


NANTENにより、銀河系中心で発見されたCO分子のループ構造



銀河円盤の3次元磁気流体シミュレーションの例 (町田他 2006)

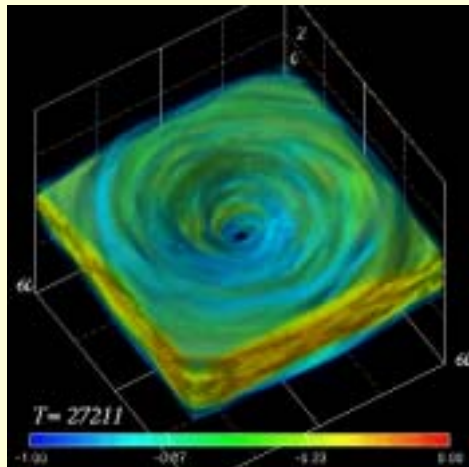
# 銀河ダイナモの3次元MHDシミュレーション (Nishikori et al. 2006)



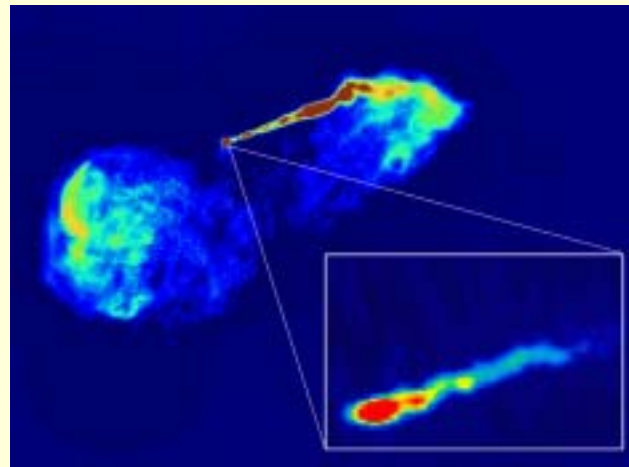
方位角方向の平均磁場の変化  
At  $5\text{kpc} < r < 6\text{kpc}$

# 相対論的MHDシミュレーション

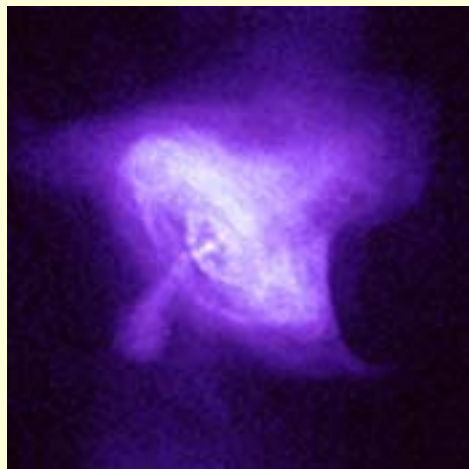
降着円盤



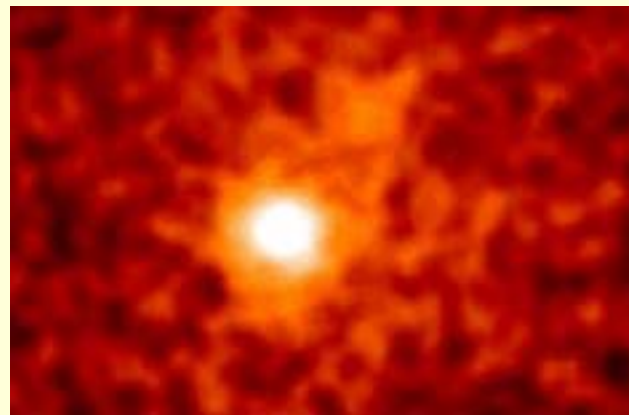
ジェット



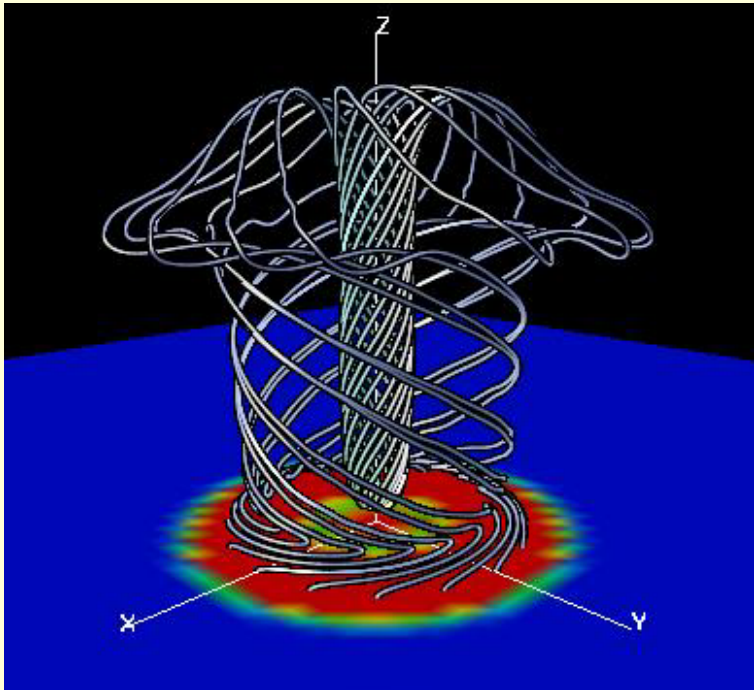
パルサー



ガンマ線  
バースト

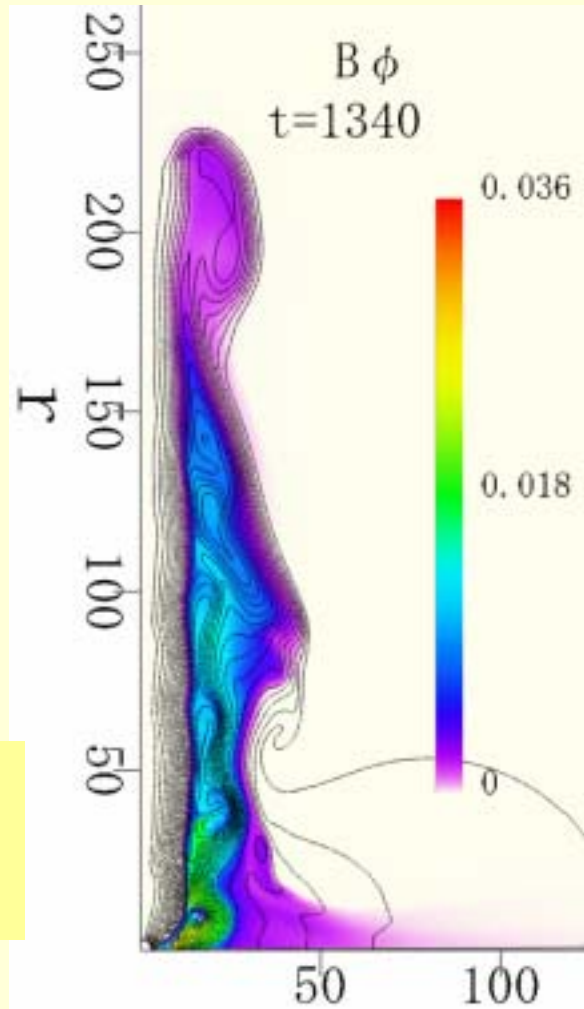


# 相対論的磁気流体コードを用いた磁気 タワージェットのシミュレーション



閉じた磁気ループの膨張  
による磁気タワージェット

加藤・林・松元 (2004)



Asano,  
Takahashi  
Matsumoto  
(2007)

# 主な成果論文

- "The evolution of galaxies from primeval irregulars to present-day ellipticals", Mori, M. and Umemura, M., Nature, 440, 644-647 (2006).
- "Early metal enrichment and Lyman alpha emission", Mori, M. and Umemura, M., New Astronomy Review, 50, 199-203 (2006).
- "Three-dimensional simulation of solar emerging flux using the Earth Simulator I. Magnetic Rayleigh-Taylor instability at the top of the emerging flux as the origin of filamentary structure", Isobe, H., Miyagoshi, T., Shibata, K., and Yokoyama, T., PASJ, 58, 423-438 (2006)
- "Galactic winds from high redshift galaxies", Mori, M. and Umemura, M., Astrophysics and Space Sciences in press.
- "Lyman alpha emission from high redshift galaxies", Mori, M. and Umemura, M. Astrophysics and Space Sciences in press
- "Magnetohydrodynamic simulation of emerging flux of the Sun", Isobe, H., Miyagoshi, T., Shibata, K., Yokoyama, T., and Matsumoto, R. , Journal of the Earth Simulator, submitted

# 学会発表等

- "地球シミュレータを用いた降着円盤と宇宙ジェットの磁気流体数値実験", 松元亮治, 加藤成晃, 町田真美, 日本流体力学会年会, 九州大学, 2006年9月17日
- "地球シミュレータを用いた太陽浮上磁場領域の大規模MHDシミュレーション", 磯部洋明, 宮越剛広, 柴田一成, 横山央明, 日本流体力学会年会, 九州大学, 2006年9月17日
- "地球シミュレータを用いた銀河形成の大規模CFDモデル", 森正夫, 梅村雅之, 日本流体力学会年会, 九州大学, 2006年9月17日
- "ライマンアルファエミッターから楕円銀河へ", 森正夫, 梅村雅之, 日本天文学会秋季年会, 九州国際大学, 2006年9月

# まとめと今後の計画

- 「ひので」衛星により、可視光、軟X線、及び磁場による太陽表面の高分解能観測が可能になった。この衛星観測と理論シミュレーション研究を両輪として、太陽対流層上部からコロナに至るエネルギー輸送、コロナ加熱機構についての理解が格段に進歩すると期待される。衛星観測と密接に関連する、対流層上部からコロナを計算領域とする磁気対流の3次元磁気流体シミュレーションに着手した。
- カートesian座標3次元磁気流体コードを用いて降着円盤とジェット形成の3次元シミュレーションを行った。より長いタイムスケールの進化を追跡するため、円筒座標系シミュレーションコードを改訂中。今年度中にシミュレーションを実施する予定。このコードは銀河ダイナモ、銀河系中心核円盤の進化のシミュレーションにも適用していく。
- 地球シミュレータを用いた銀河形成シミュレーションの成果がNature に掲載された。シミュレーション領域をより広くとった計算を実施する予定。
- AMR法にもとづく重力多体シミュレーションコードは再調整中のため今年度実施予定であった $1024^3$ 粒子を用いた宇宙構造形成のシミュレーションは停止中。
- 相対論的磁気流体コードの開発が進展し、磁気タワージェットの計算が可能になった。今後、地球シミュレータで計算を行いたい。