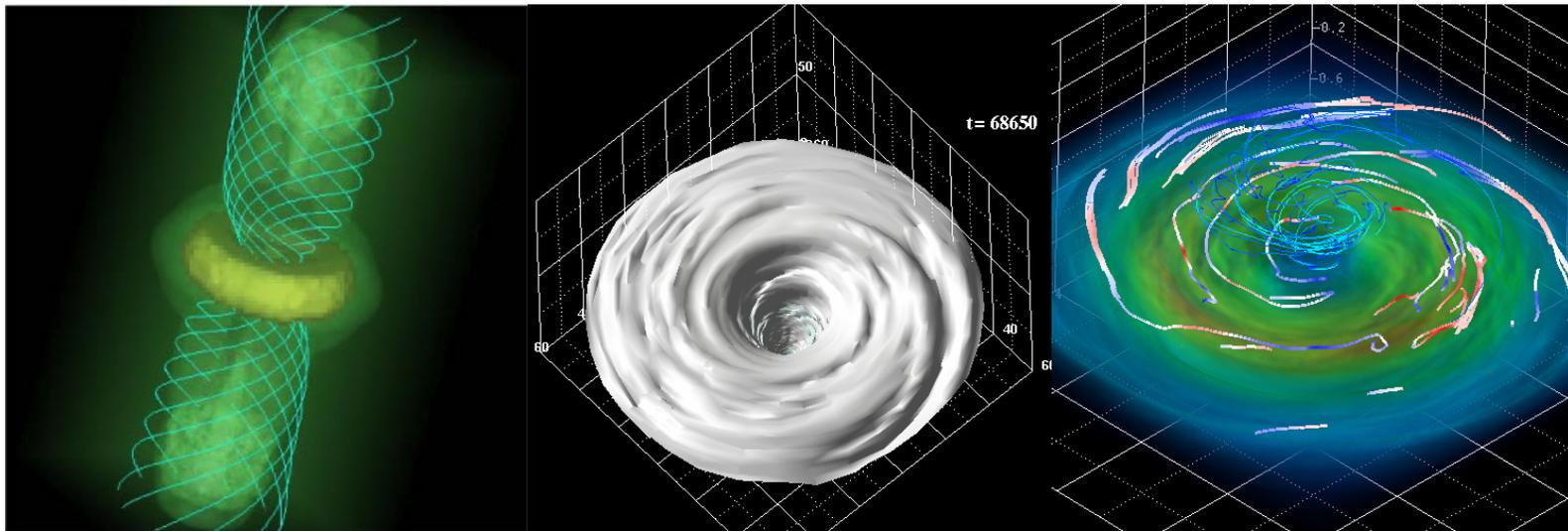
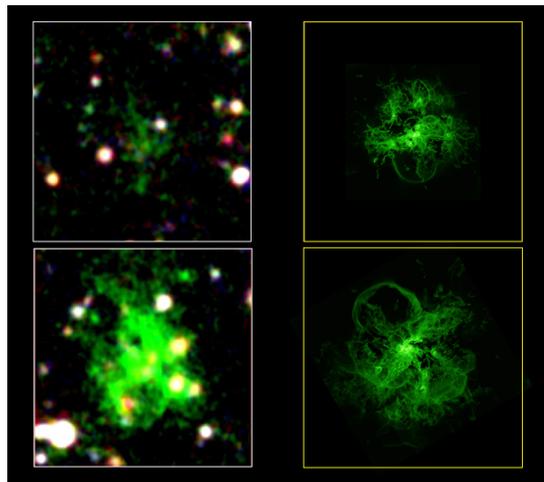
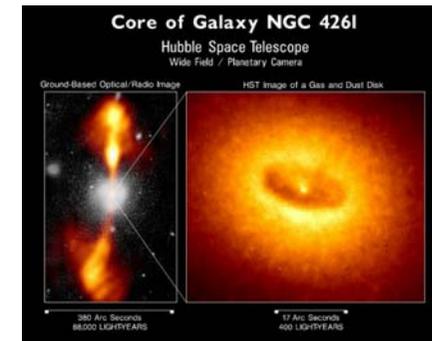
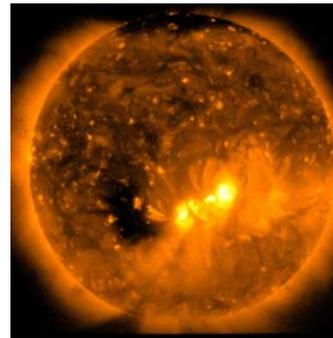


# 宇宙磁気流体现象の シミュレーションと可視化

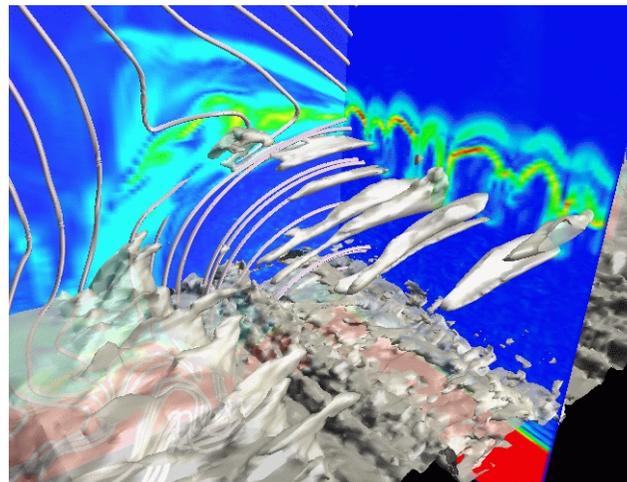


松元亮治(千葉大学)

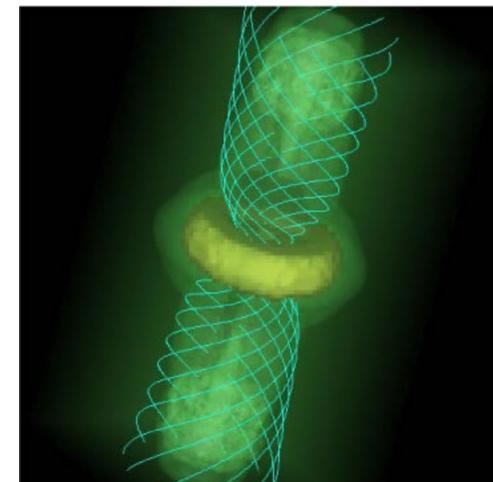
# 地球シミュレータ共同プロジェクト 「宇宙の構造形成とダイナミクス」



銀河形成



太陽活動



ブラックホールと  
宇宙ジェット

# 講演内容

- 宇宙現象の特徴
- 宇宙シミュレーションの方法
- 銀河形成、星形成のシミュレーション
- 宇宙シミュレーションラボラトリーの紹介
- 宇宙シミュレーションスクールの紹介
- 降着円盤と宇宙ジェットの数値流体実験
- シミュレーション結果の観測的可視化
- 今後の展望

# 宇宙現象の特徴

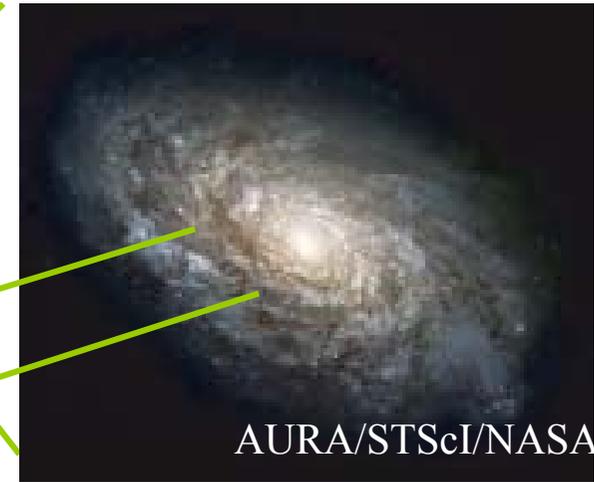
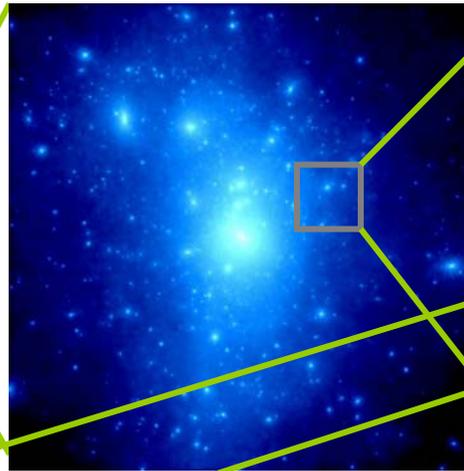
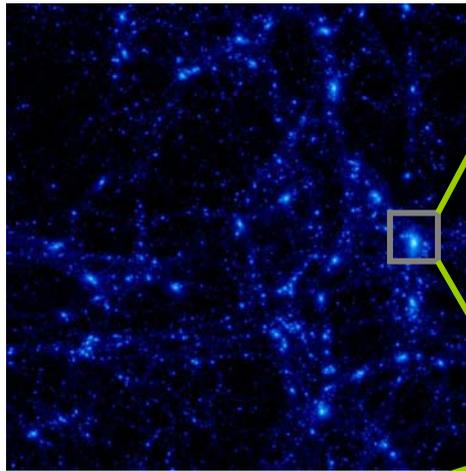
- 空間スケールの異なる構造が存在し、それらが相互作用する高階層性を持つ(マルチスケール)
- 重力、磁場、輻射など様々な物理過程が関与し、これらが階層間を連結する(マルチフィジックス)
- 超低密度から超高密度、超低温から超高温に至る広いダイナミックレンジで現象が生起する
- 地上の実験室での直接実験が困難。計算機の中に宇宙を創る宇宙シミュレーションが有効

# 宇宙の階層構造

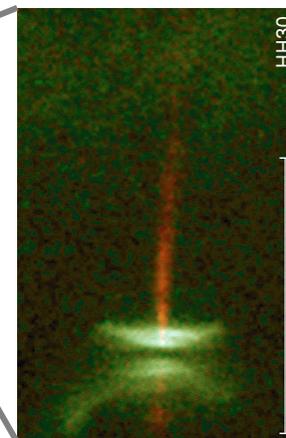
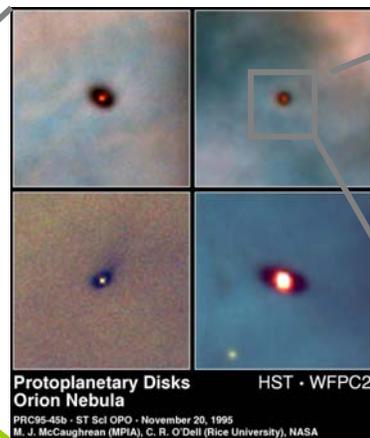
大規模構造

銀河団

銀河



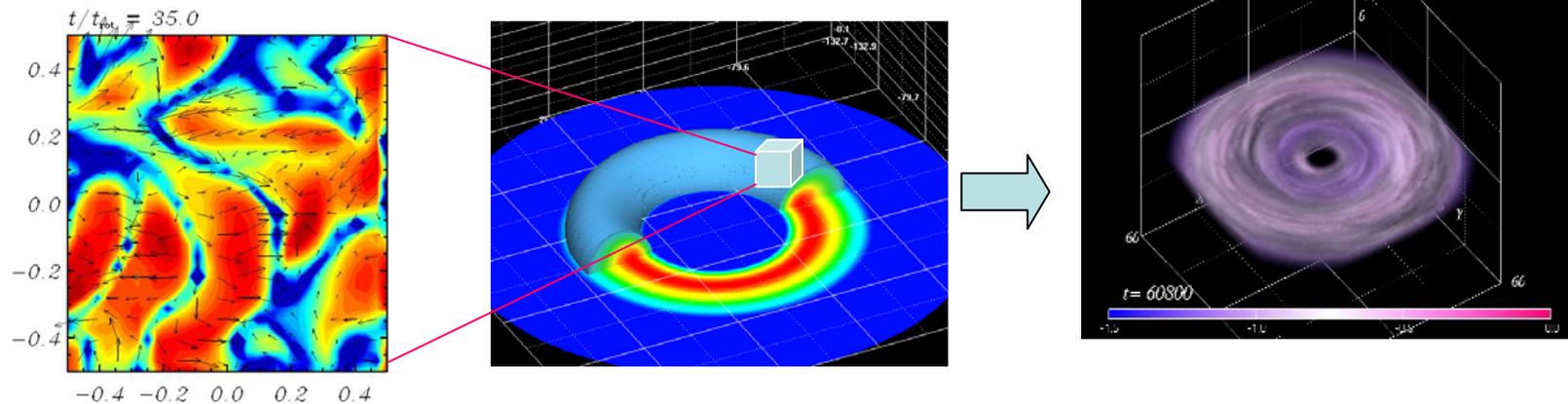
星形成領域



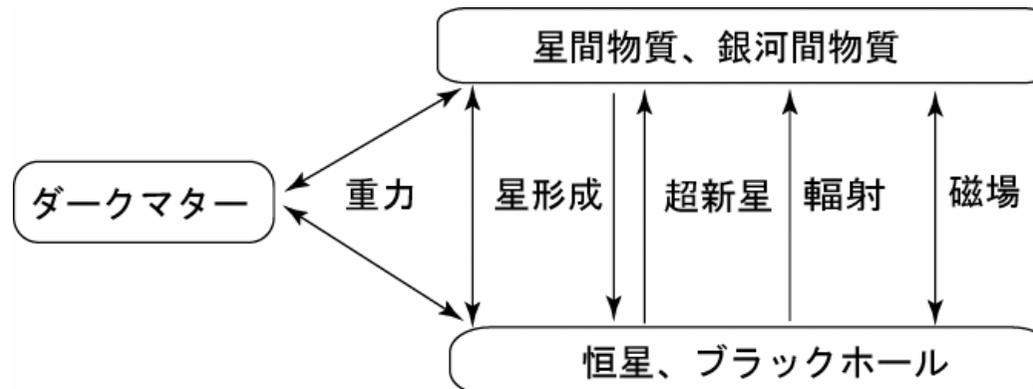
原始星

# 宇宙シミュレーションのトレンド

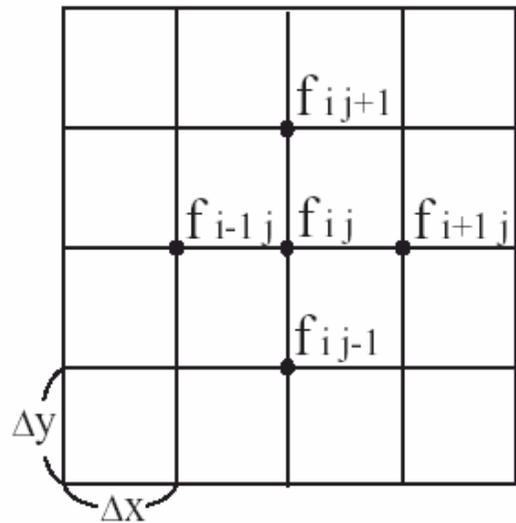
- 部分系から全体系へ



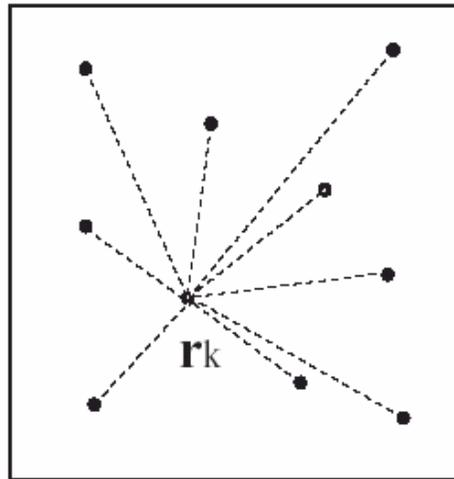
- 階層間相互作用を含むマルチフィジックスシミュレーションへ



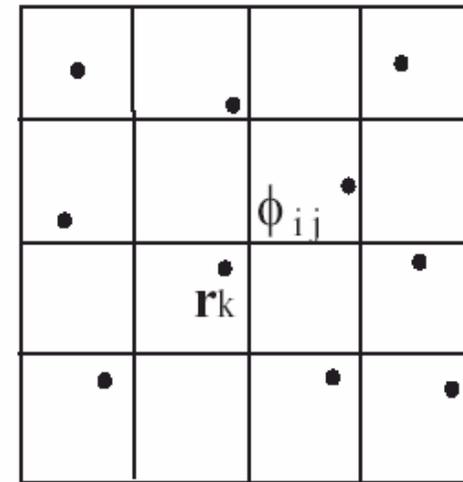
# 宇宙シミュレーションの方法



差分法



粒子直接計算

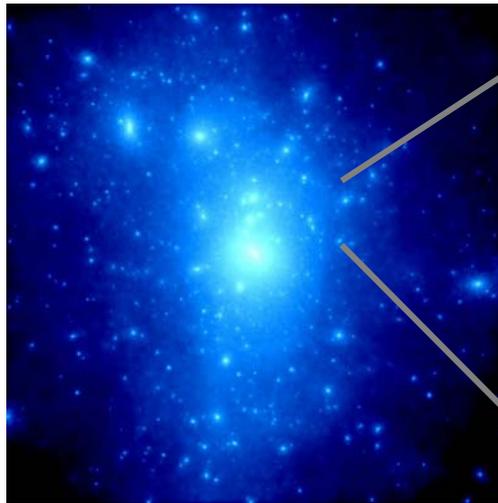


粒子一格子法

# 宇宙シミュレーションの対象、手法、 現在扱える問題サイズ

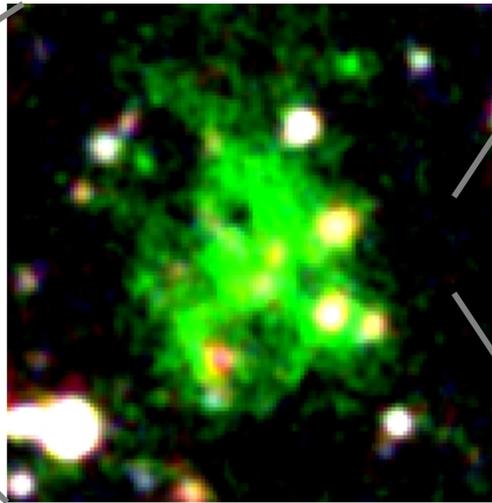
対象	手法	問題サイズ
流体	差分法	$1000^3$ 格子点
磁気流体	差分法	$500^3$ 格子点
重力多体問題	粒子直接計算	$10^6$ 粒子
	粒子-格子法	$10^9$ 粒子
プラズマ	粒子-格子法	$10^9$ 粒子

# 銀河形成シミュレーション



ダークマターの塊が  
集積して銀河・銀河団  
を作る。

(矢作による重力多体  
シミュレーション結果)



すばる望遠鏡が捉え  
た形成期の銀河

水素輝線(Ly $\alpha$ )で  
輝く巨大なガスの塊  
(Matsuda et al. 2004)



現在の銀河

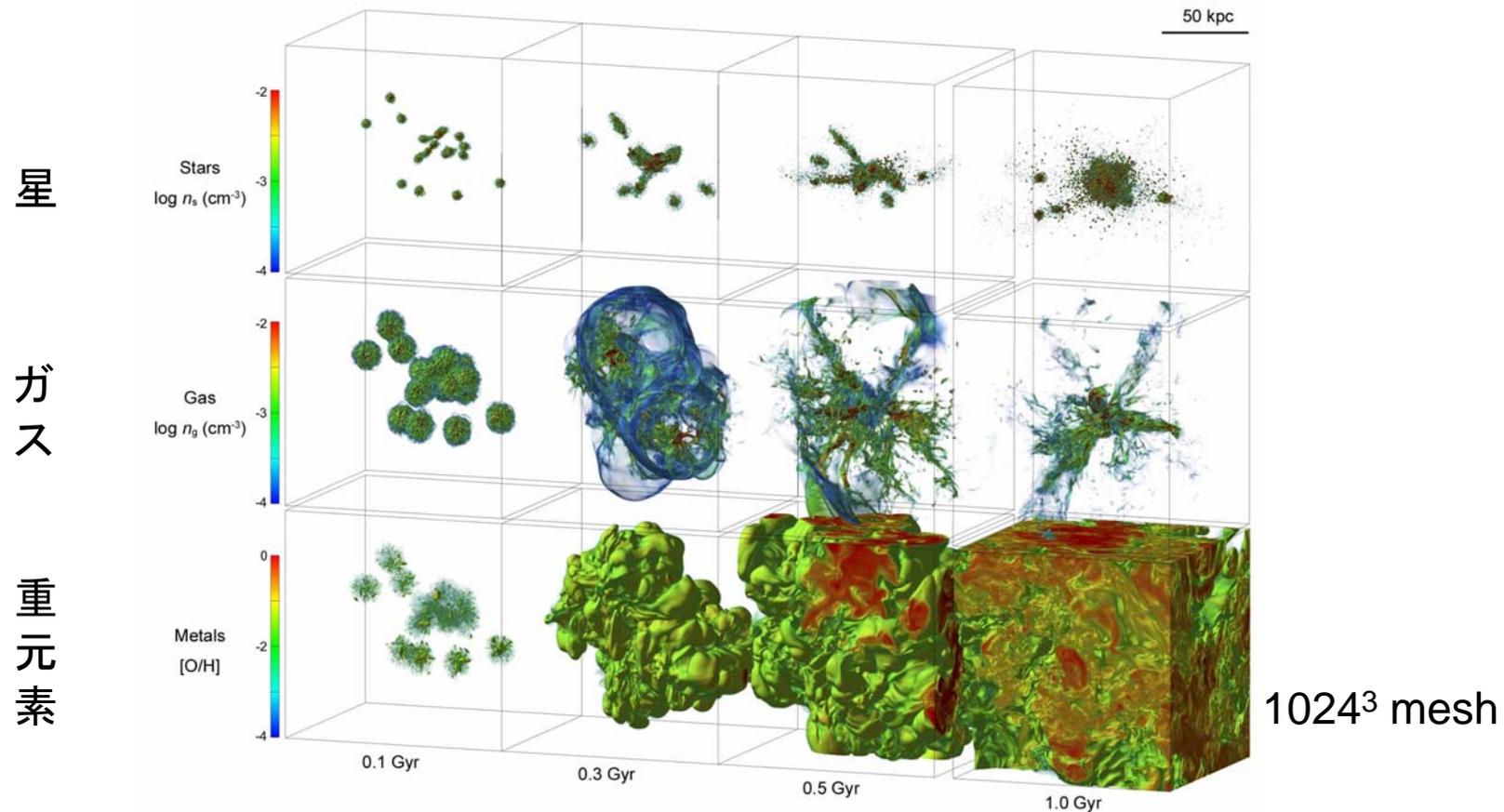


進化

# 銀河形成シミュレーション

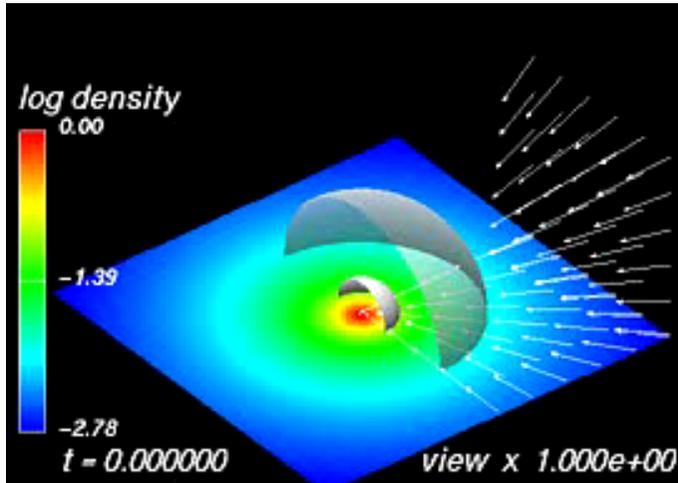


## ボトムアップシナリオに基づく流体シミュレーション



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

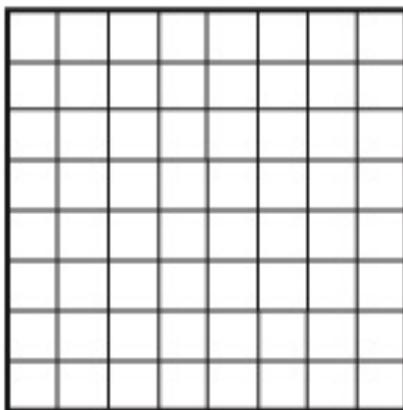
# 星形成シミュレーション



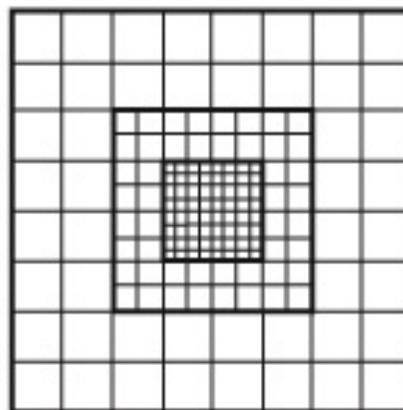
星間ガスが収縮して星を形成する過程では空間スケールが大きく変化する



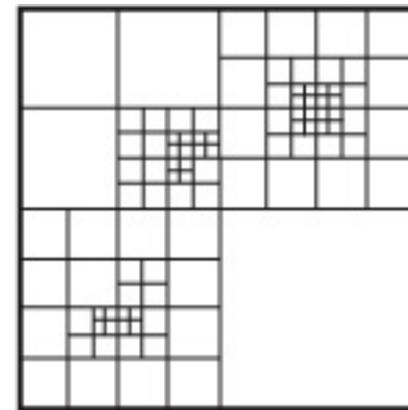
多層格子法、適合格子法



uniform grid

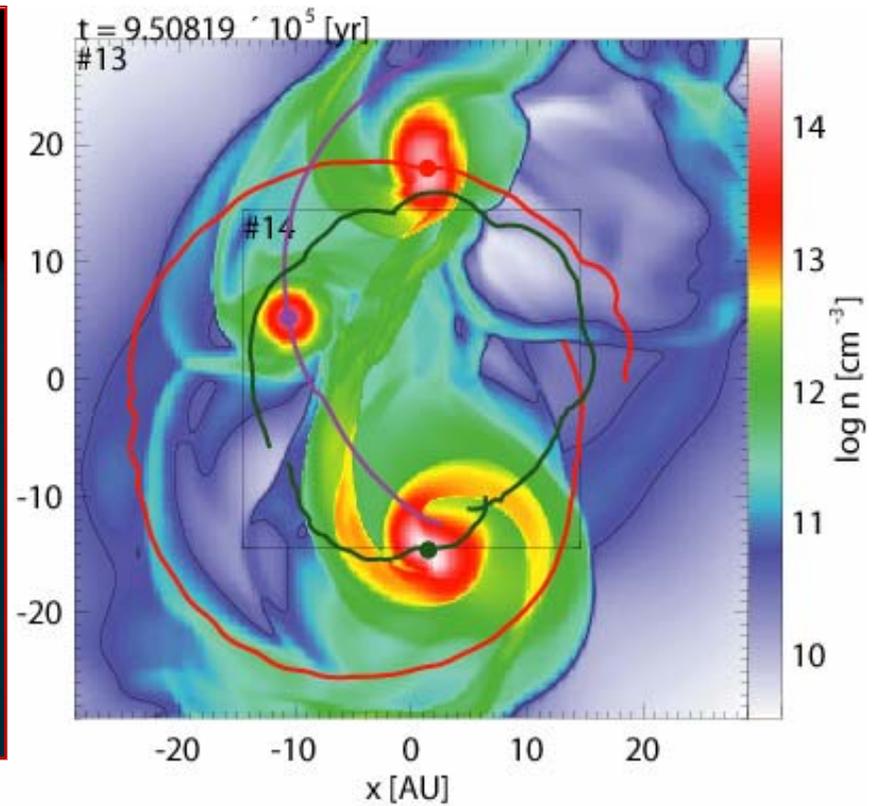
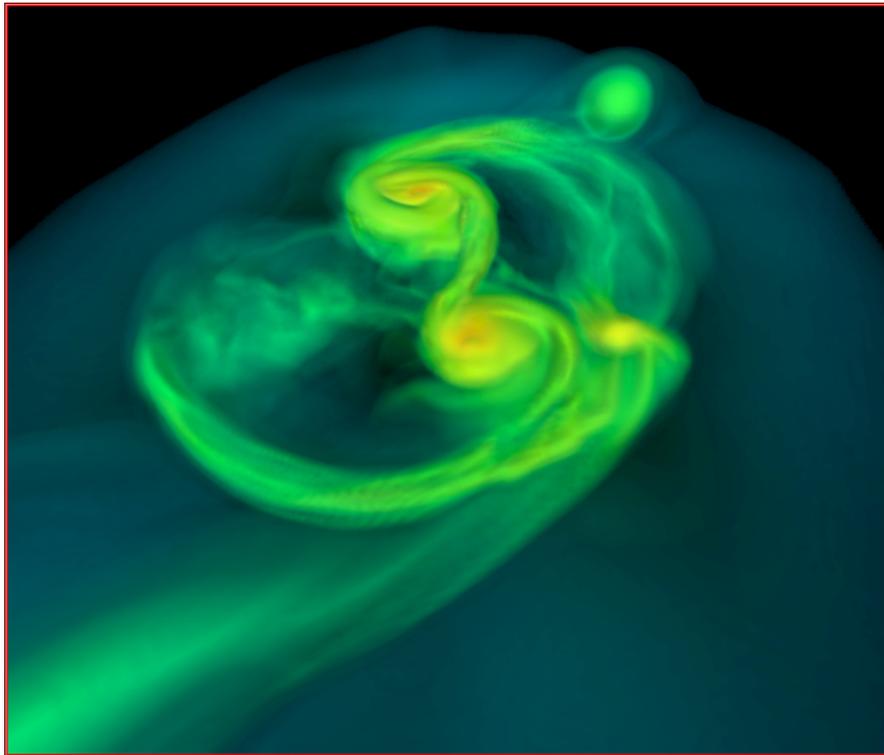


nested grid



adaptive grid

# 連星系形成のシミュレーション

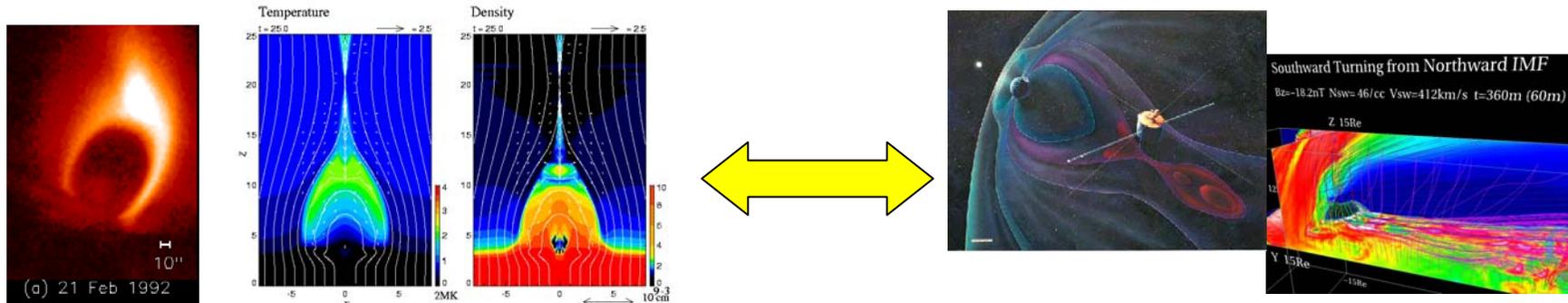


松本倫明(法政大学)、花輪知幸(千葉大学)

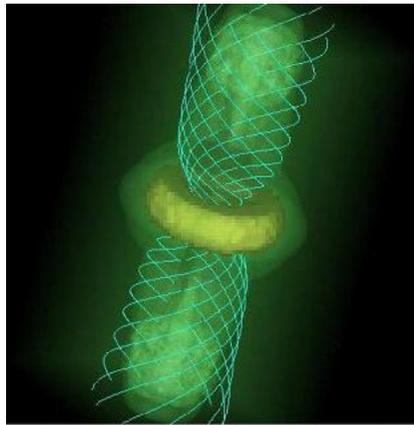
# 宇宙シミュレーションラボラトリー

ACT-JST Project (2000-2002)

## 宇宙シミュレーション・ネットラボラトリーシステムの開発



天体シミュレーション



可視化、データ解析

共同開発

スペースプラズマ  
シミュレーション

高速ネットワークを  
活用したバーチャル  
ラボラトリー

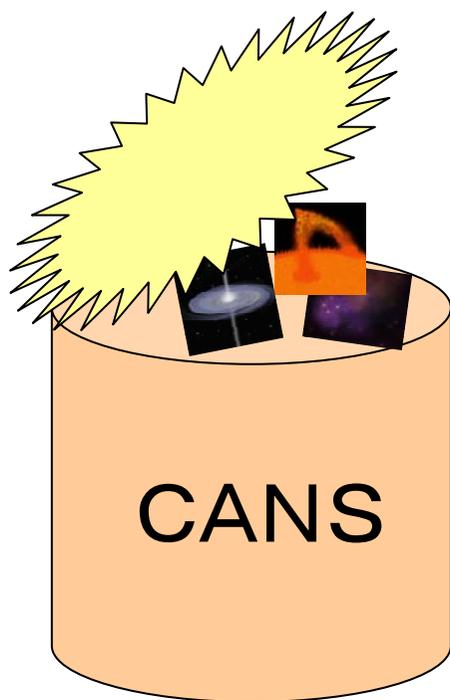
データベース

- シミュレーション結果
- コードライブラリ

# シミュレーションソフトウェア CANSを開発・公開

Coordinated Astronomical Numerical Software

天文数値缶詰



- シミュレーションコードだけを公開しても使いこなすことは難しい
  - そこで、
- 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
- MPIによる並列化
  - 高いベクトル・並列効率

# CANS: 基礎方程式

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

質量保存

運動量保存

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

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

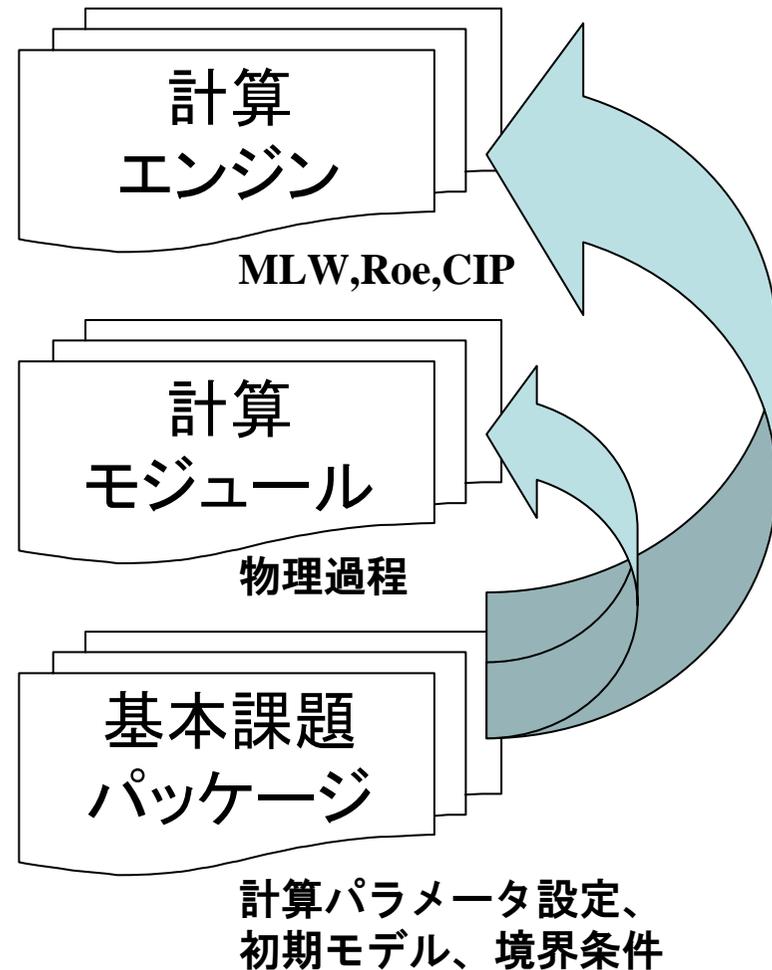
磁気誘導

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

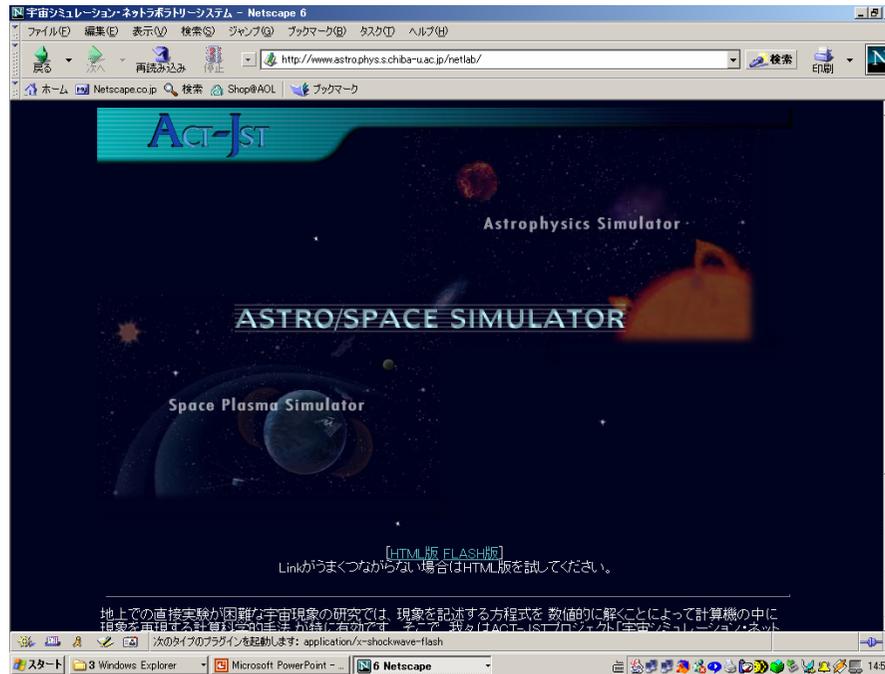
エネルギー保存

# CANS: 基本デザイン

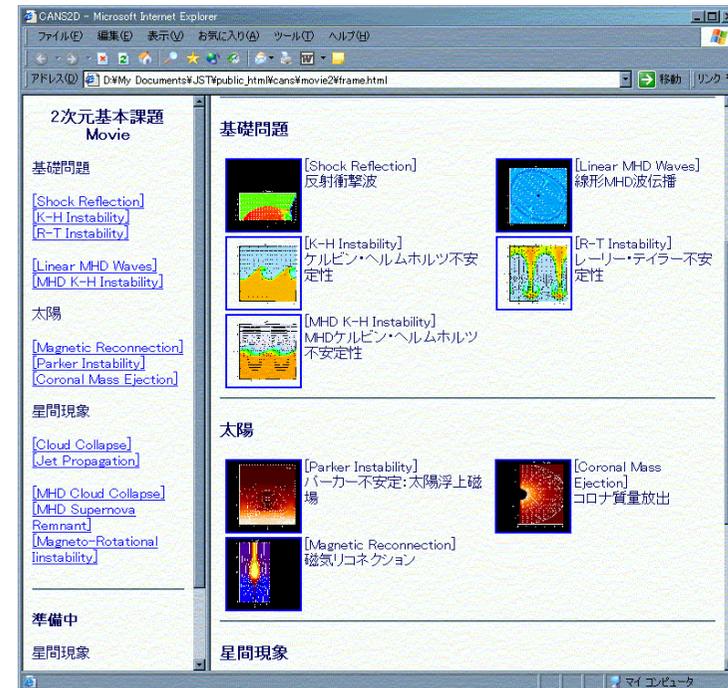
- プログラム
  - 各種計算エンジン、
  - 各種計算モジュール
  - 基本課題パッケージ集
- 動作環境
  - Linux PC, SunやSGI WS, cygwinでも動作
  - 国立天文台スーパーコンピュータや地球シミュレータでも利用可能
- データ可視化
  - ソフトウェアIDLを使用



# ネットラボラトリーシステムWebページ



ホームページ



基本課題Webページ

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/>

# シミュレーションスクール

## 天体とスペースプラズマのシミュレーションサマースクール

(流体・磁気流体コース、流体・磁気流体アドバンストコース)

期日：平成16年9月6日(月)～10日(金)

会場：千葉大学総合メディア基盤センター

(千葉市稲毛区弥生町1-33)

### 講座内容

#### (1) 流体・磁気流体コース (9/6 - 9/10)

- 第1日(9/6) イントロダクション、差分法の基礎、実習増大の利用説明、差分法の実習
- 第2日(9/7) システム方程式の解法、衝撃波管問題の解説、  
磁気流体1次元基本課題(衝撃波管など)、磁気流体2次元基本課題、応用課題紹介
- 第3日(9/8) 近似的リーマン解法、VPPの利用説明、応用課題実習
- 第4日(9/9) 地球磁気圏のMHDシミュレーションと可視化、応用課題実習
- 第5日(9/10) 発表準備、課題発表会

#### (2) 流体・磁気流体アドバンストコース (9/6 - 9/10)

参加者に、自分が使っているシミュレーションスキーム、あるいはシミュレーション結果の可視化、解析方法等について、1人1時間程度ずつ発表してもらいます

### 講師

松元亮治、花輪知幸、宮路茂樹(千葉大)、柴田一成(京大)、  
富坂幸治(国立天文台)、荻野竜樹(名大・STE研)、  
福田尚也(岡山理科大)、野澤 憲(茨城大) 他

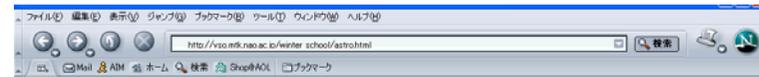
サマースクールの案内と参加申し込みのURL  
[http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/summer-school\\_2004/](http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/summer-school_2004/)

主催：宇宙シミュレーション・ネットラボラトリーシステム開発グループ  
千葉大学理学部宇宙物理学研究室

共催：国立天文台天文学データ解析計算センター

実行委員：松元亮治、花輪知幸、宮路茂樹(千葉大)、  
富坂幸治、和田裕一(国立天文台)、  
横山央明(京大)、  
福田尚也(岡山理科大)

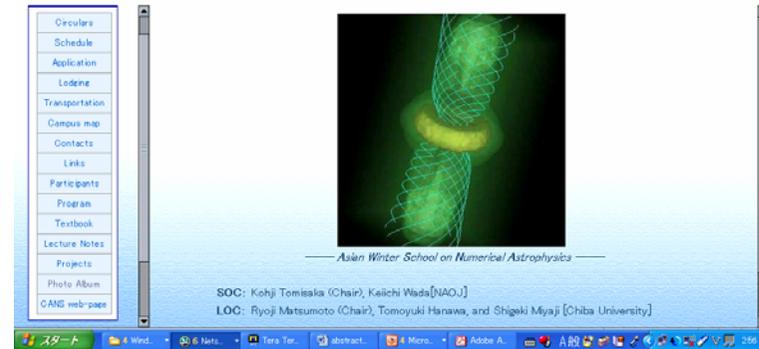
問い合わせ：千葉大学理学部宇宙物理学研究室  
TEL: 043-290-2885  
E-mail: s-school@astro.s.chiba-u.ac.jp



## Graduate University for Advanced Studies Asian Winter School on Numerical Astrophysics

Date: March 13 (Mon) - March 17 (Fri), 2006

Place: Chiba University and National Astronomical Observatory



# シミュレーションスクールのスナップショット



◆『数値天文学テクニカルマニュアル』  
◇◇◇ ダウンロードサイト ◇◇◇

◆一括ダウンロードすることができます。

CD-ROM集録データ [cdrom.tar.gz] 252MB  
(テクニカルマニュアル[PDF版]と全てのサンプルデータが含まれます。)

数値天文学テクニカルマニュアル  
[PDF版] 17MB / [PS版] 155MB

枠内をクリックすると各章毎に表示されます。  
ファイルサイズ: 1.2~2.7MB [PDF]

- 第1章 磁気流体力学方程式の数値解法【花山秀和】
- 第2章 磁気流体力学方程式の近似Riemann解法【佐藤裕司】
- 第3章 CIP-NICOT法による磁気流体力学方程式の解法【上原一浩】
- 第4章 保存保証型CIPコードの開発に向けて【木暮宏光】
- 第5章 一般相対論的磁気流体力学の数値解法【水野陽介】
- 第6章 相対論的磁気流体における保存量からの基本量の導出【富高真】
- 第7章 Vlasov方程式の数値解法【天野孝伸】
- 第8章 IDLを使った可視化【越智康浩】
- 第9章 AVSを使った可視化【錦織弘充】※12MB
- 第10章 観測的可視化の目的【大須賀健】
- 第11章 Fourier解析【杉本香菜子】
- 第12章 Minkowski functionalsを用いた構造解析【杉本香菜子】

枠内をクリックすると、サンプルデータをダウンロードすることができます。

■シミュレーションサマースクール アドバンスコース研究成果

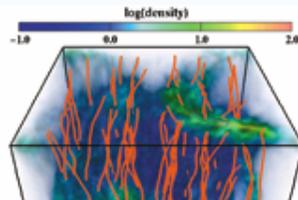
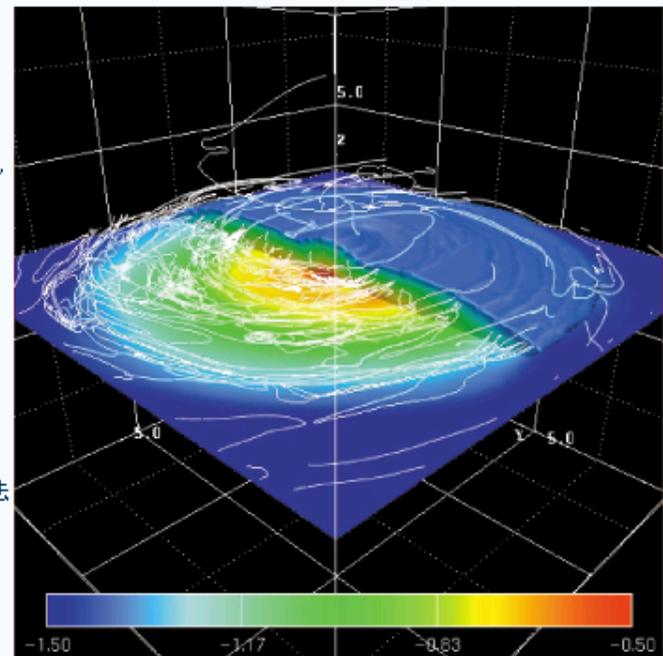
■アドバンスコース代表: 先進科学教育センター・教授・花輪知幸  
マニュアル編集コーディネーター: 先進科学教育センター・研究員・町田正博

『数値天文学  
テクニカルマニュアル』

2004年度シミュレーションサマースクール・アドバンスコースの参加者が執筆・編集したマニュアルです。  
CD-ROMにまとめ、各研究機関に配布しました。

マニュアルの構成

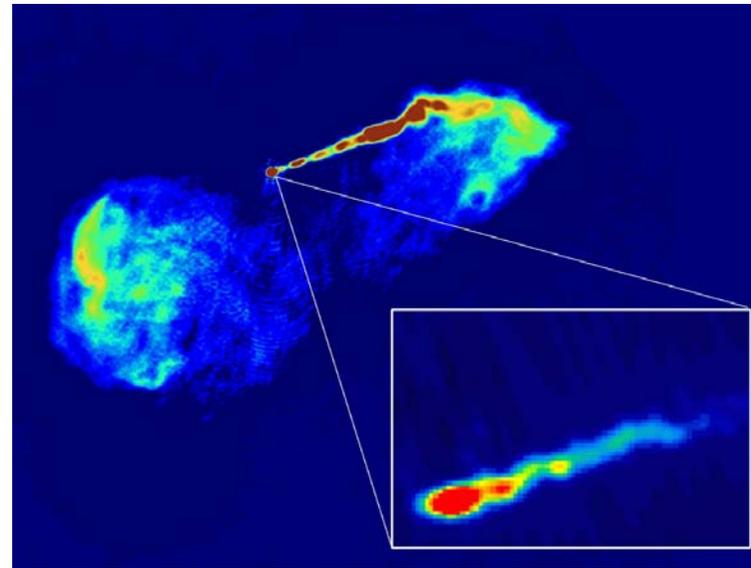
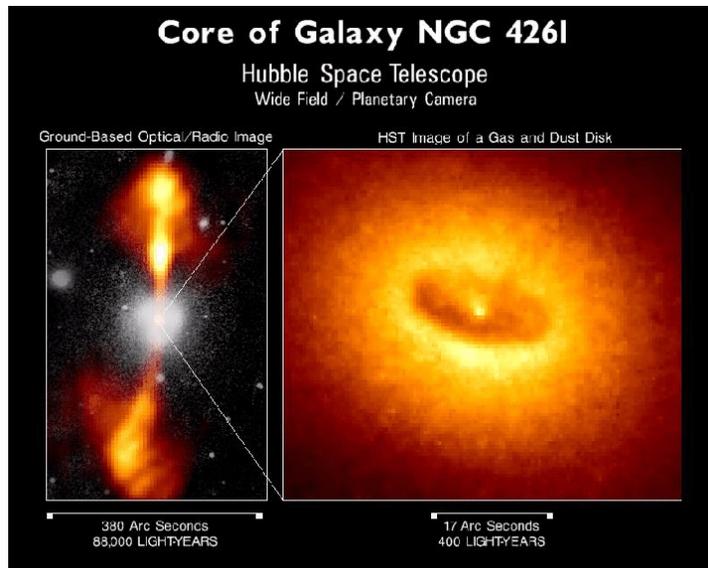
- 第1部… 第1章~7章  
磁気流体力学方程式を数値的に解く方法、あるいはその準備のための解析計算
- 第2部… 第8章~10章  
数値計算の結果を可視化するための方法
- 第3部… 第11章~12章  
数値シミュレーション結果を解析するための技法の紹介



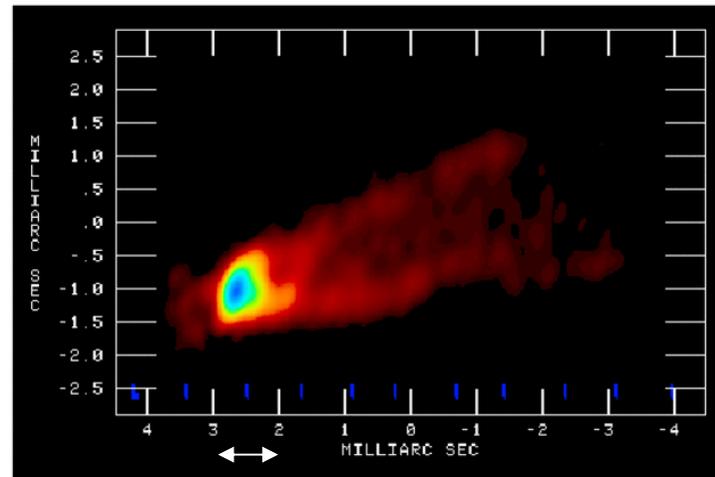
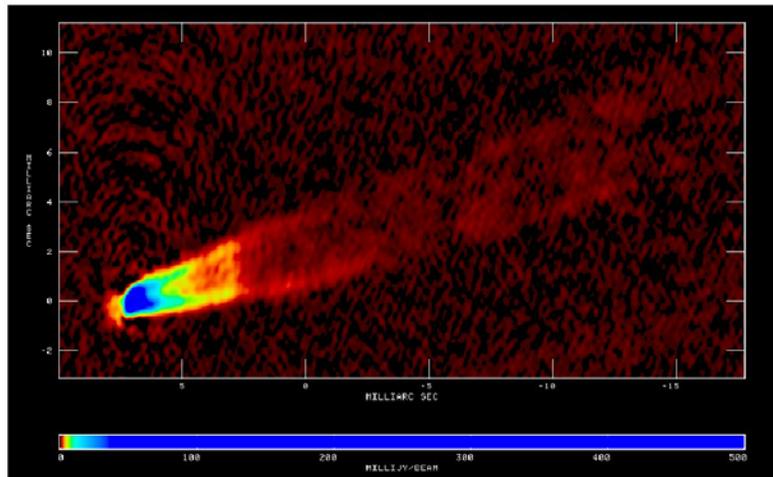
マニュアル改訂履歴

初版公開日: Sep.27/2004  
最終更新日: Oct.25/2004 第9章一部加筆

# 降着円盤・ジェットの高気流体力シミュレーションと可視化



**M87**  
**VLA+**  
**HALCA**



**VLBA**  
**43GHz**  
**Walker**  
**et al.**  
**2007**  
**Resolution**  
**0.21 mas**

$$300r_s = 0.078 \text{ pc}$$

# 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

(Machida and Matsumoto 2003 ApJ)

重力ポテンシャル :  $\phi = -GM/(r-r_g)$

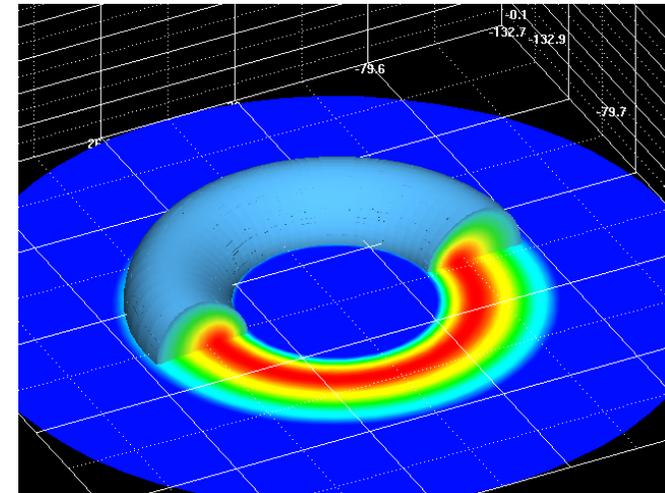
角運動量 : 初期に一定

初期磁場 : 方位角磁場

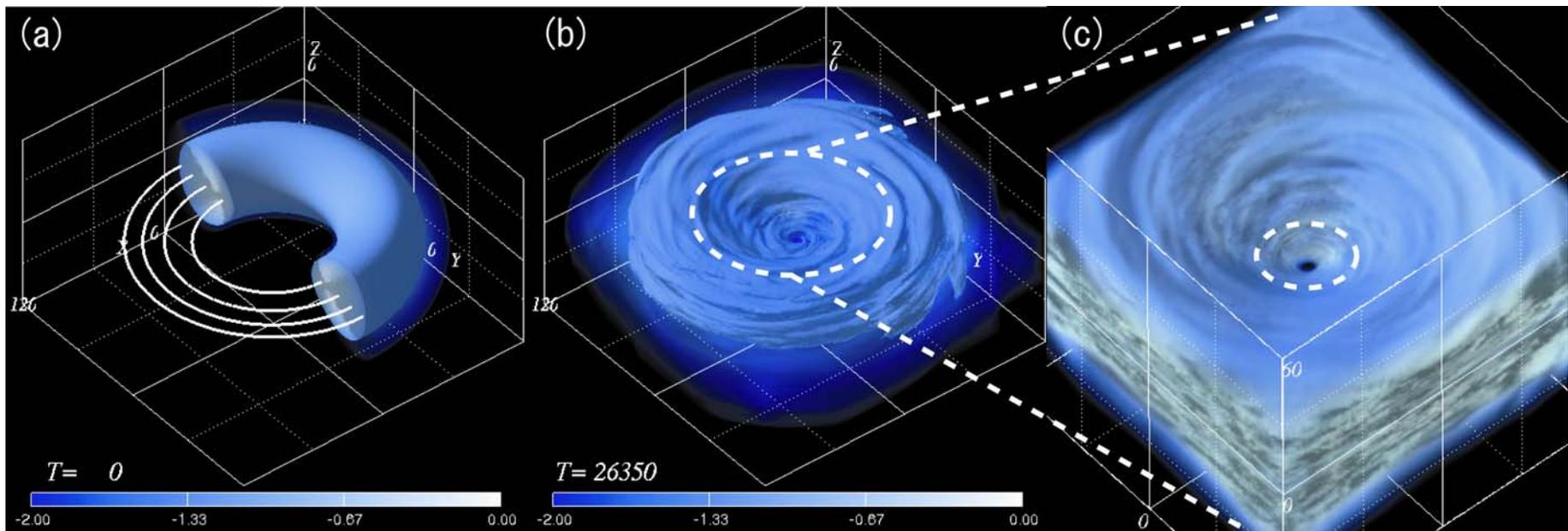
$$P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}} = \beta = 100 \text{ at } 50r_g$$

異常電気抵抗

$$\eta = (1/R_m) \max [(J/\rho)/v_c - 1, 0.0]^2 \quad 250*64*192\text{mesh}$$



# ブラックホール降着円盤の形成

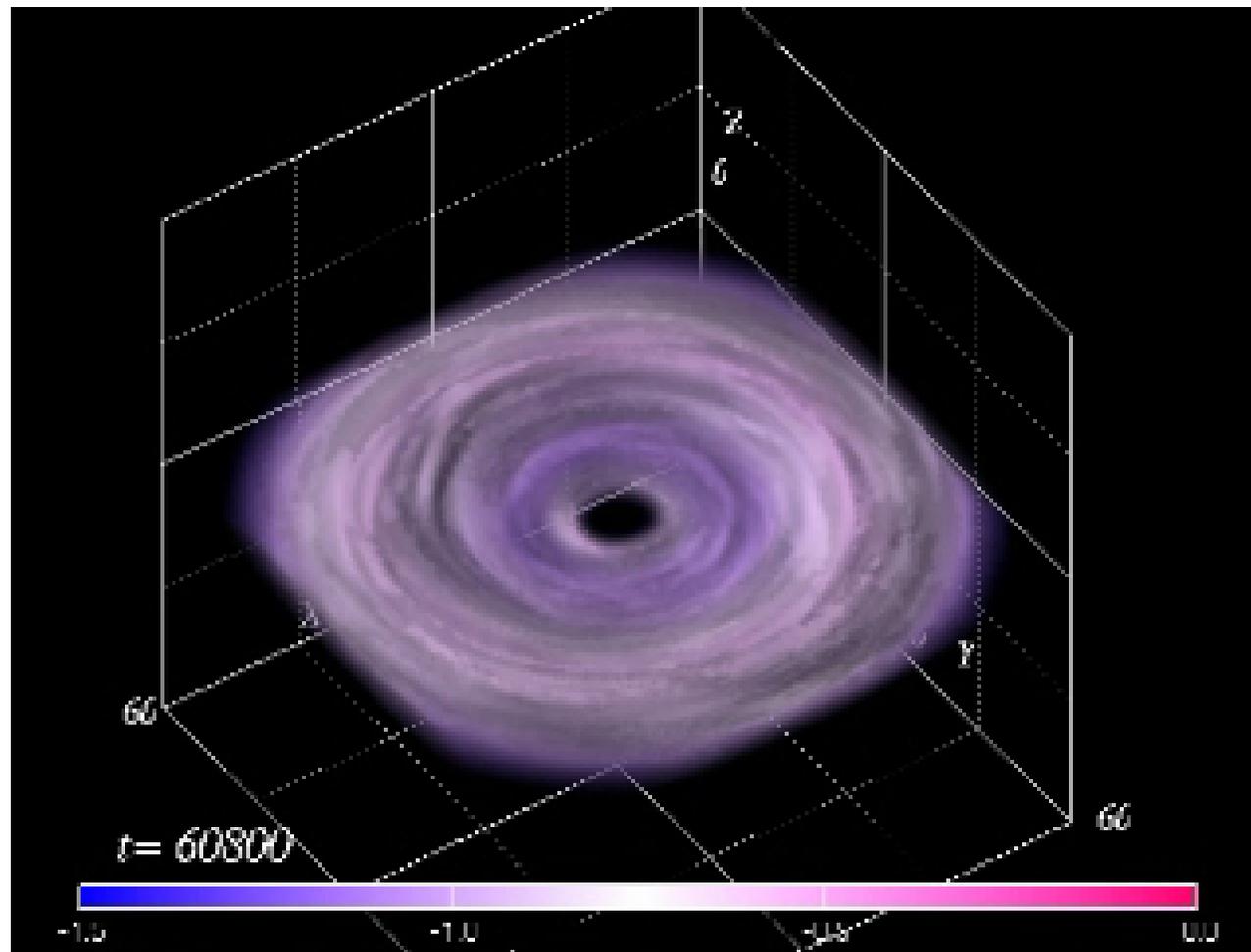


Initial state

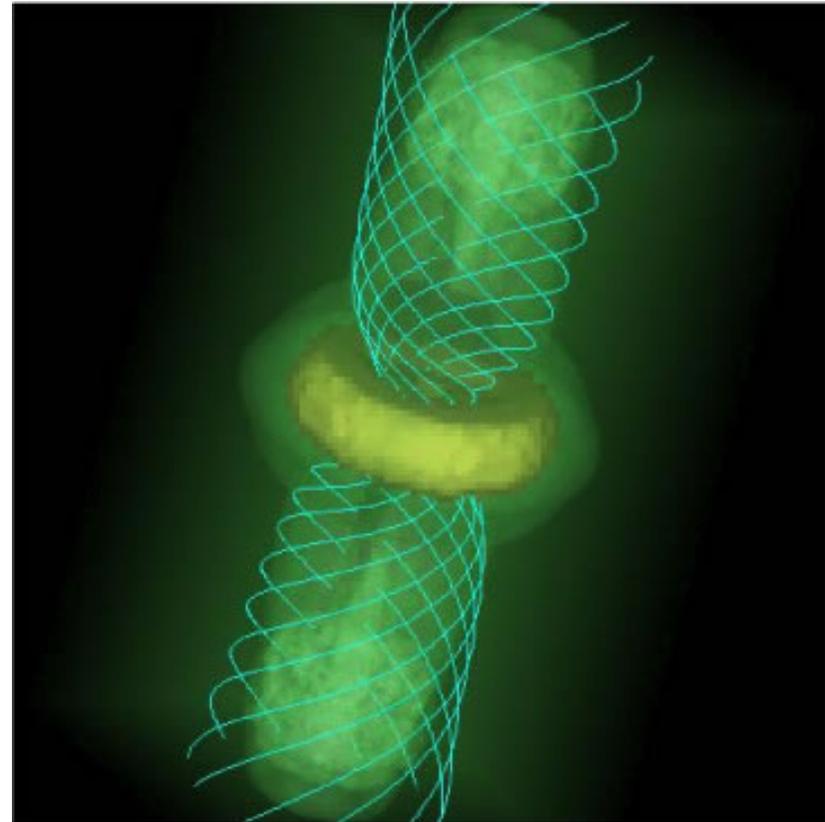
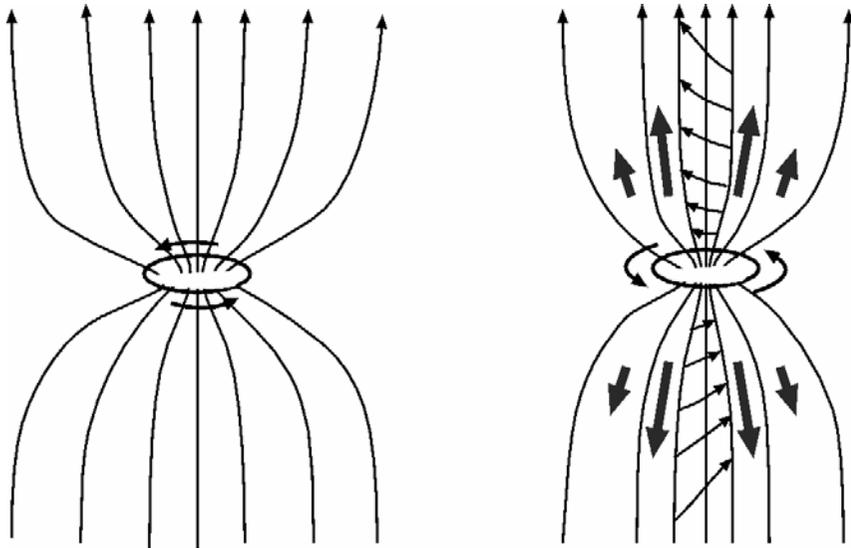
$t=26350$

unit time  $t_0=rg/c$

# ボリュームレンダリングによる可視化

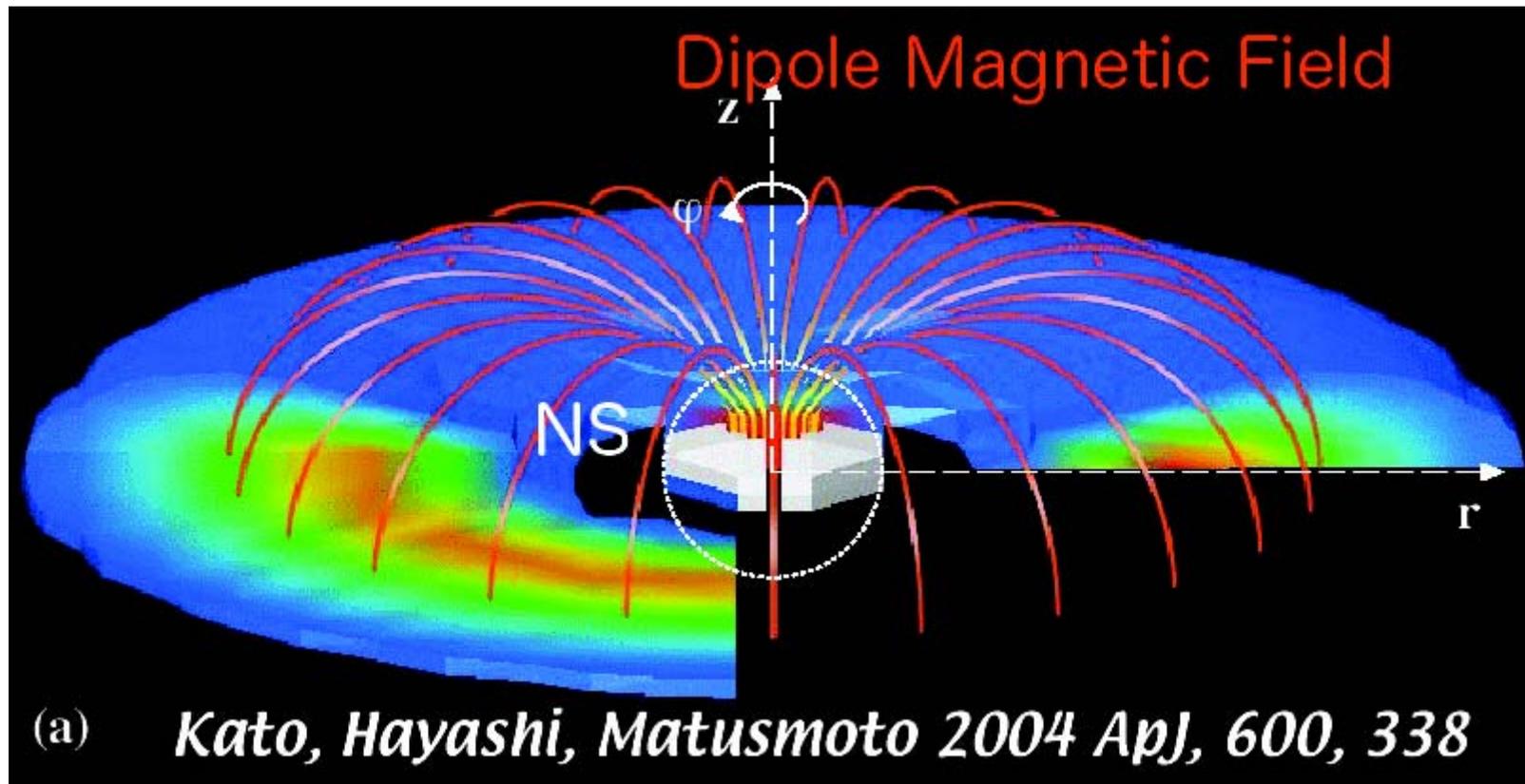


# 宇宙ジェットの磁気流体モデル

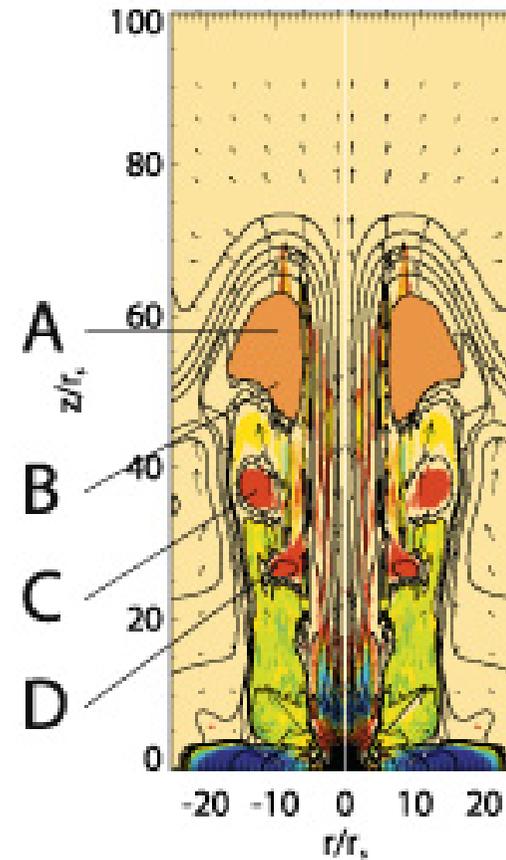
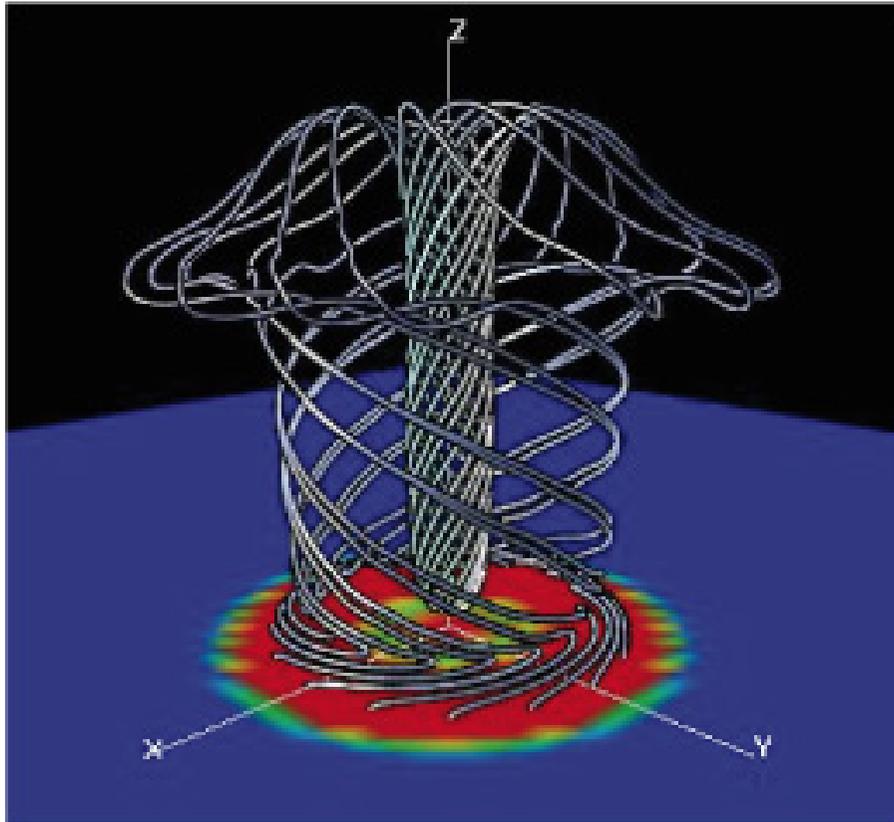


Uchida, Shibata (1985) and Shibata, Uchida (1986) carried out global 2D MHD simulation including accretion disk.

# 磁気タワージェットのシミュレーション

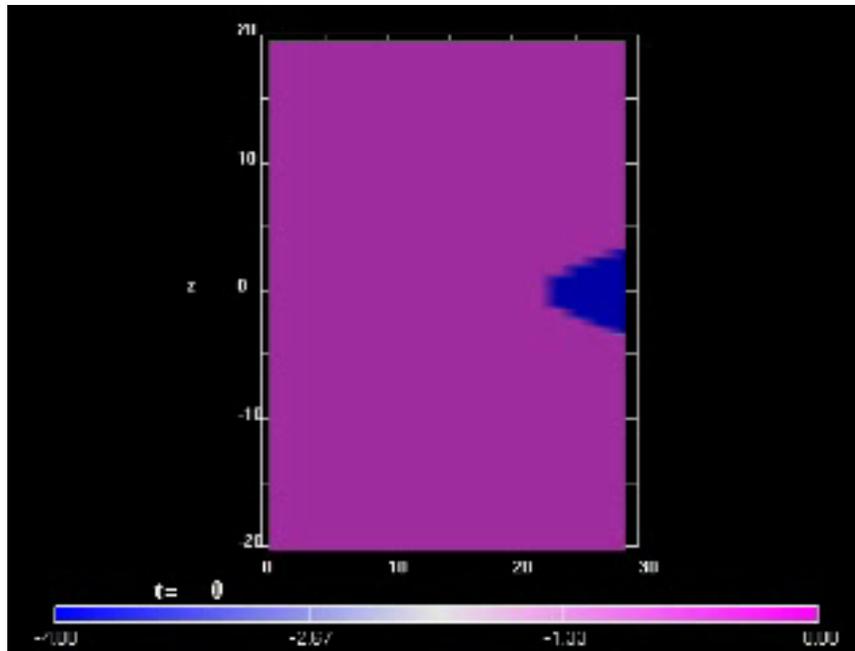


# 磁気タワージェット形成

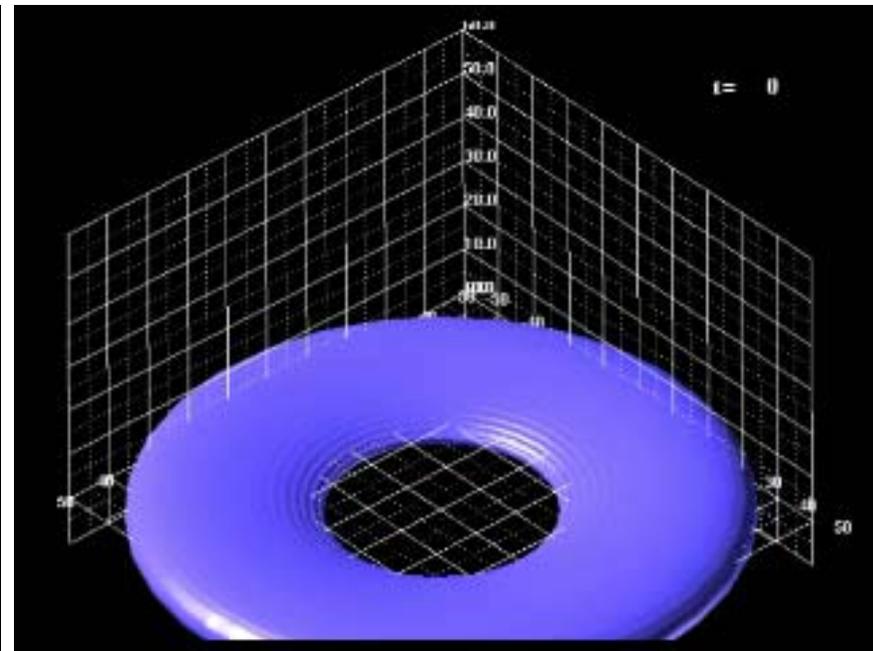


Kato, Hayashi, Matsumoto (2004)

# 磁気乱流状態にある降着円盤から 噴出するアウトフロー



temperature



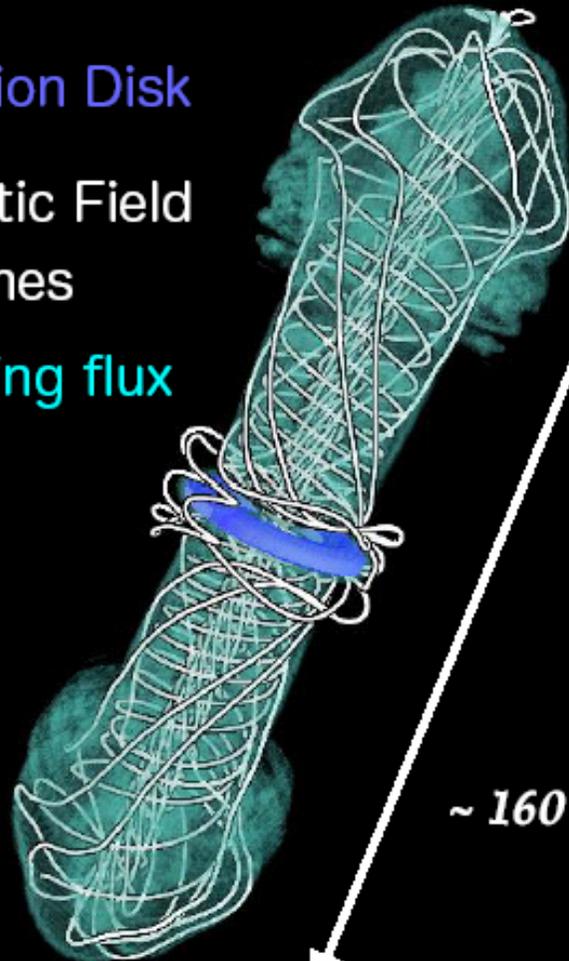
Isosurface of vertical velocity

# FORMATION OF MAGNETIC-TOWER JETS

Accretion Disk

Magnetic Field  
Lines

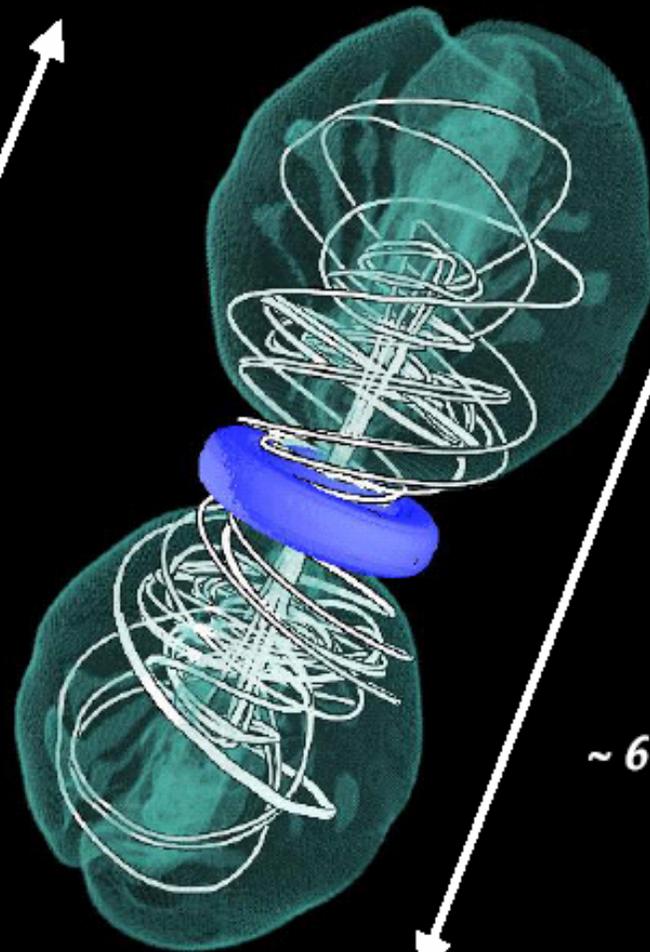
Poynting flux



$\sim 160 r_s$

**Neutron Star + Accretion Disk**

*Kato, Hayashi, Matusmoto 2004 ApJ, 600, 338*



$\sim 600 r_s$

**Black Hole + Accretion Disk**

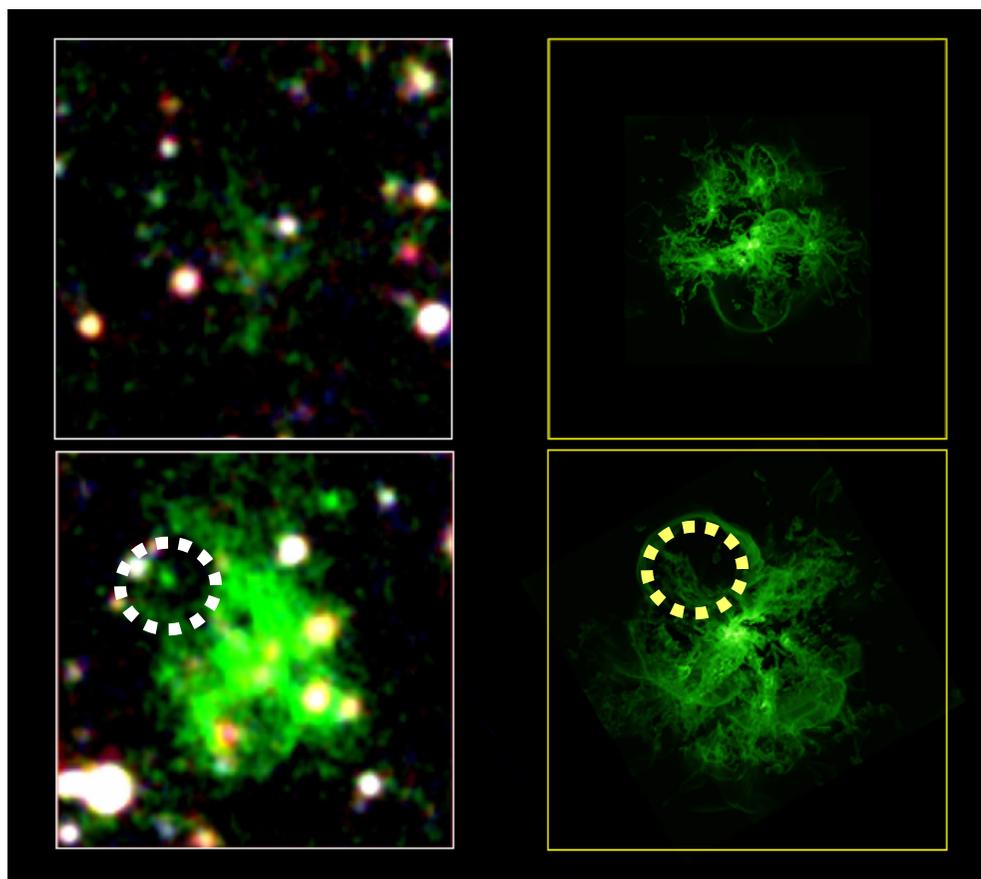
*Kato, Mineshige, Shibata 2004 ApJ, 605, 307*

# シミュレーション結果の 観測的可視化



## 観測的可視化例

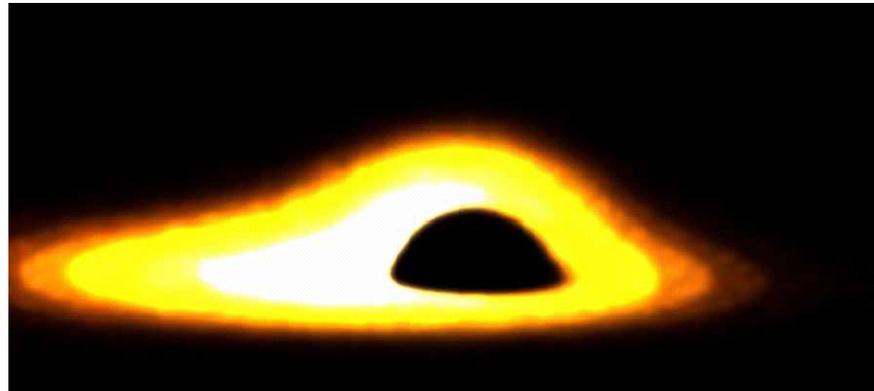
- 銀河形成シミュレーションの結果をもとにライマン $\alpha$ 輝線放射分布を計算 (Mori and Umemura 2006)
- すばる望遠鏡によって発見されたライマン $\alpha$ 輝線天体 (Matsuda et al. 2004) と比較



すばる望遠鏡

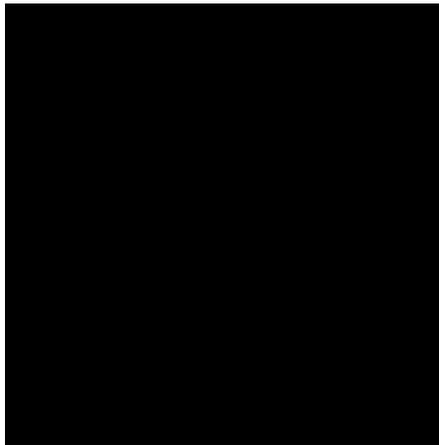
シミュレーション

# ブラックホール降着円盤はこう見える

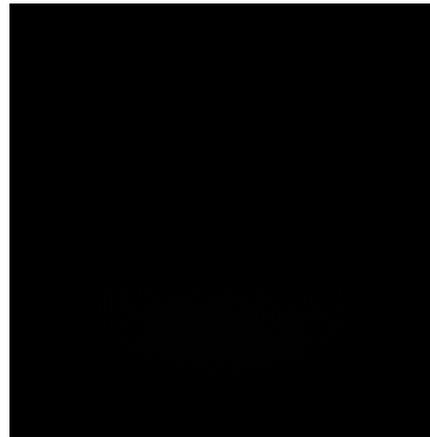


J. Fukue 1988

Inclination 5



45



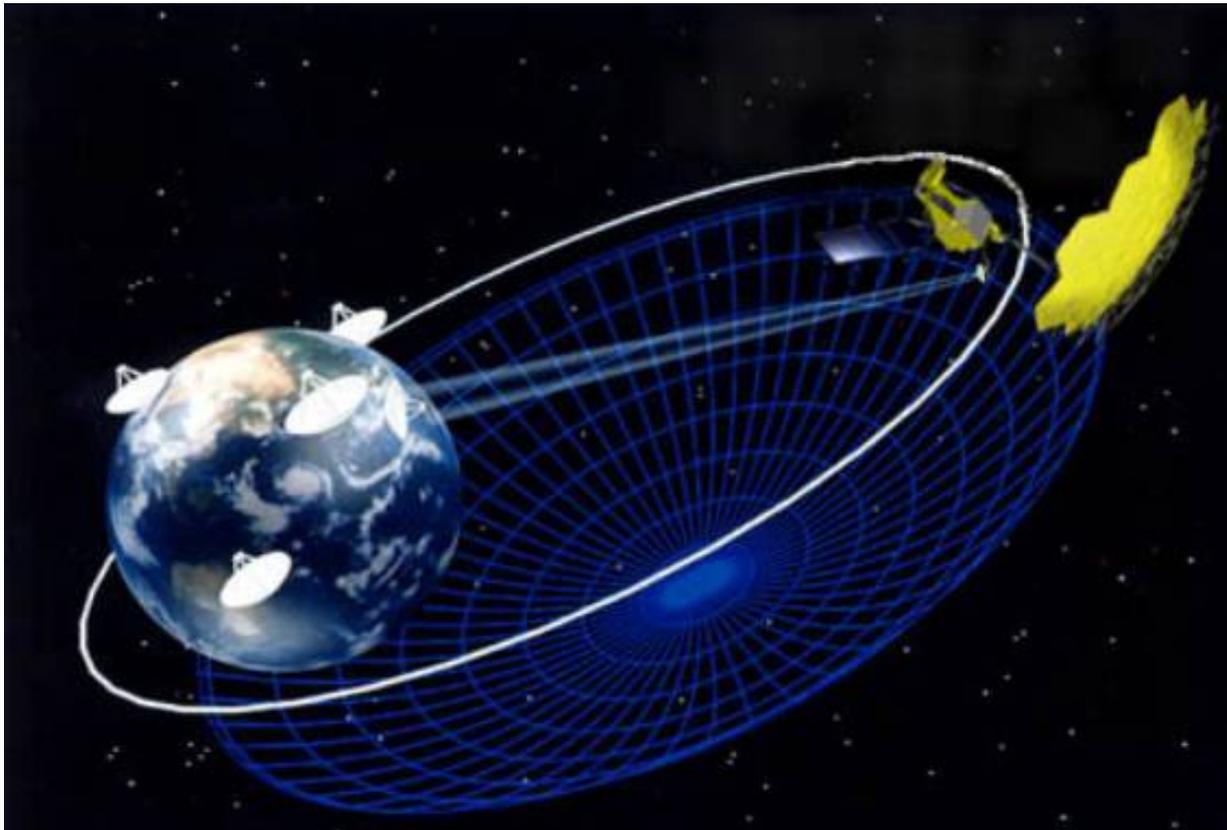
75



相対論的レイトレーシングによる可視化

Calculated by M. Bursa

# VSOP2 (VLBI Space Observatory Program) mission in 2012



Antenna  
diameter

9m

Data link

1Gbps

Spatial Resolution : 0.037mas @ 43GHz

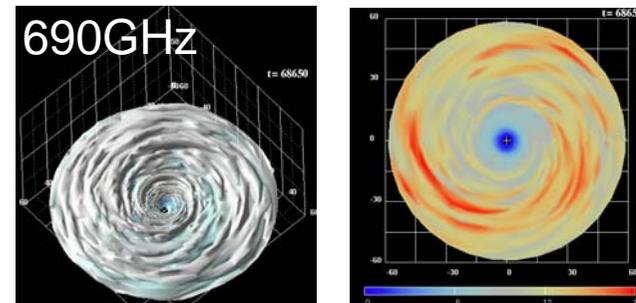
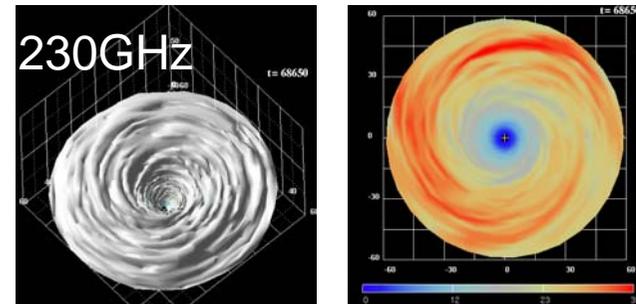
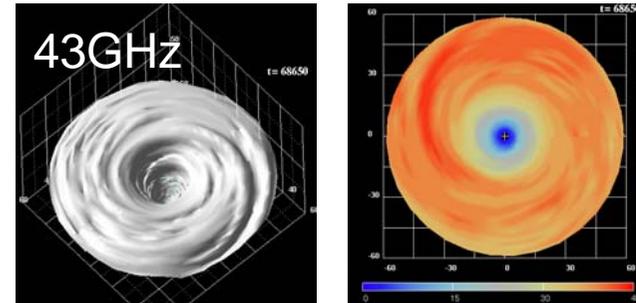
# 各種振動数で観測した降着円盤

By using the formula for synchrotron self-absorption, we computed the surface where optical depth =1 at 43GHz, 230GHz, 690GHz, respectively.

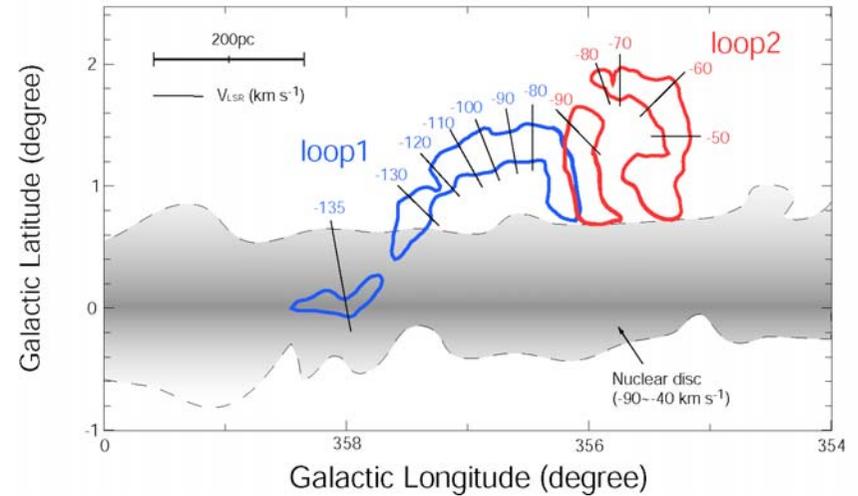
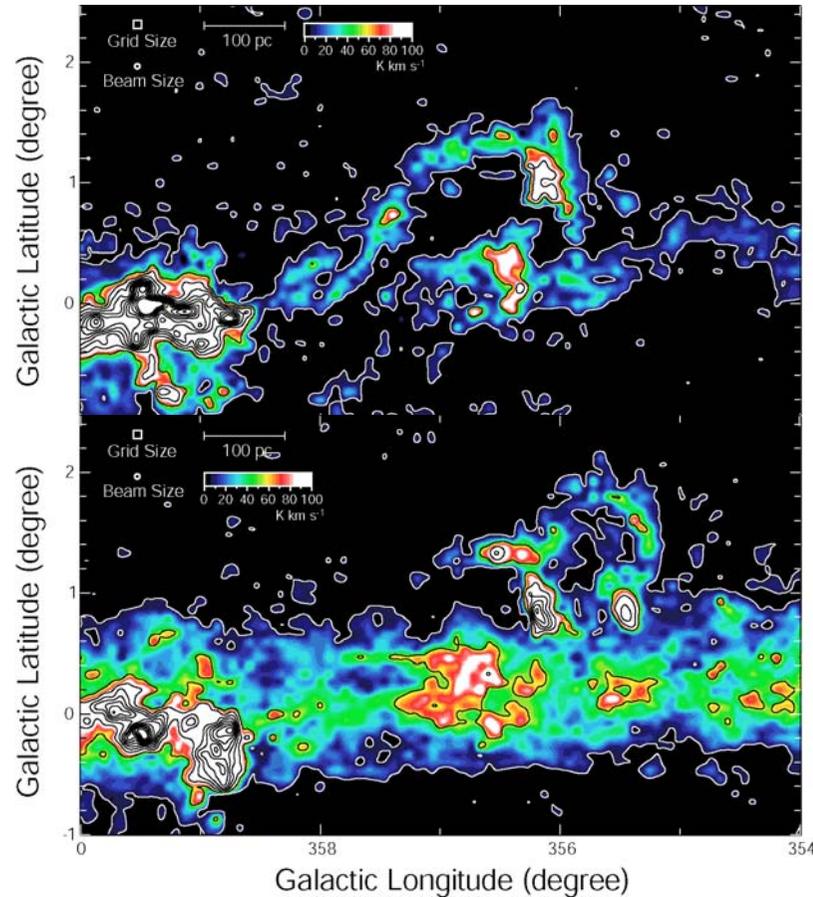
$$\alpha_{ssa} = \frac{\sqrt{3}e^3 \rho}{8\pi m_e m_i} \Gamma\left(\frac{3p+2}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3p+22}{12}\right) \left(\frac{3e}{2\pi m_e^3 c^5}\right) (B \sin \zeta)^{\frac{2+p}{2}} \nu^{-\frac{p+4}{2}}$$

Black Hole Mass	$4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$
Density	$5.0 \times 10^{-15} \text{g cm}^{-3}$
Frequency	43GHz, 230GHz, 690GHz
Power-law index: p	1
Pitch angle $\sin \zeta$	0.5
Inclination	0 deg (face on)

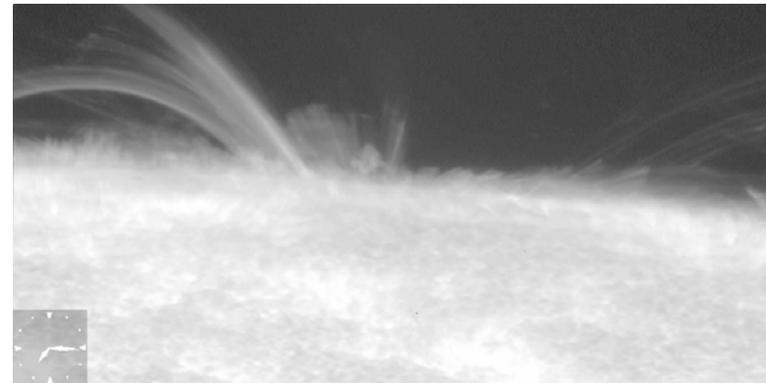
$\tau = 1$  surface (3Dview and projection)



# 銀河系中心の分子ループ構造



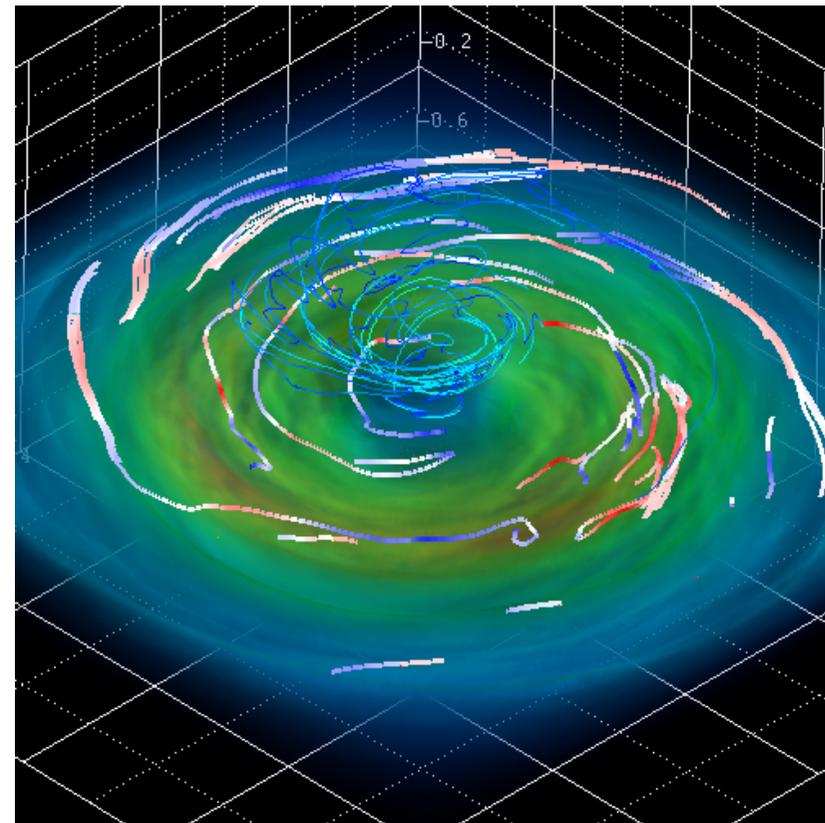
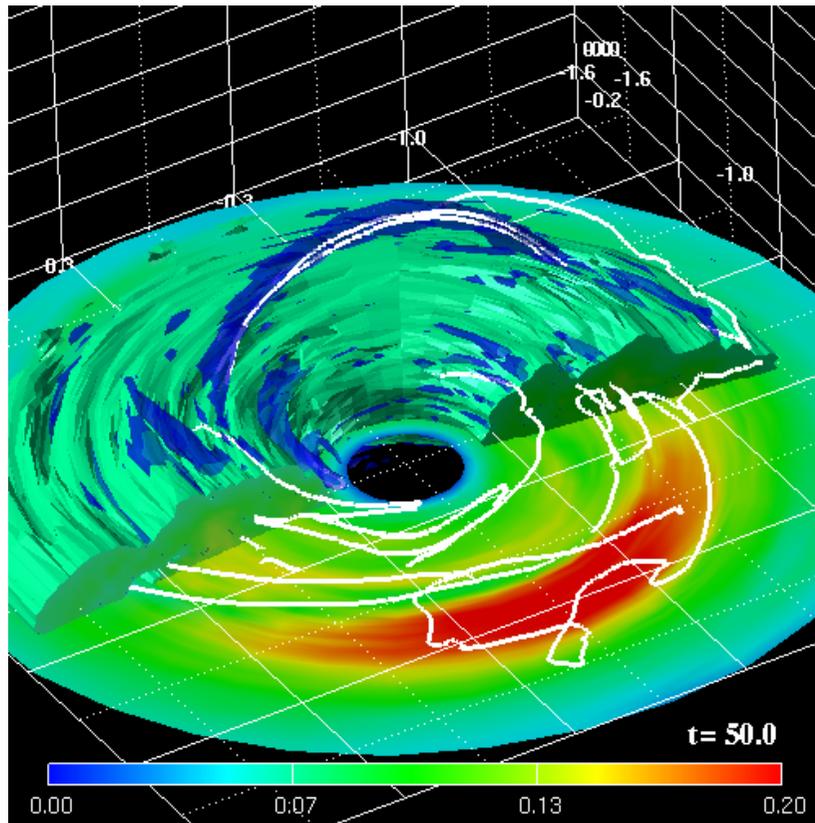
ループに沿って50km/s以上の速度差



「ひので」衛星で観測された太陽コロナの磁気ループ

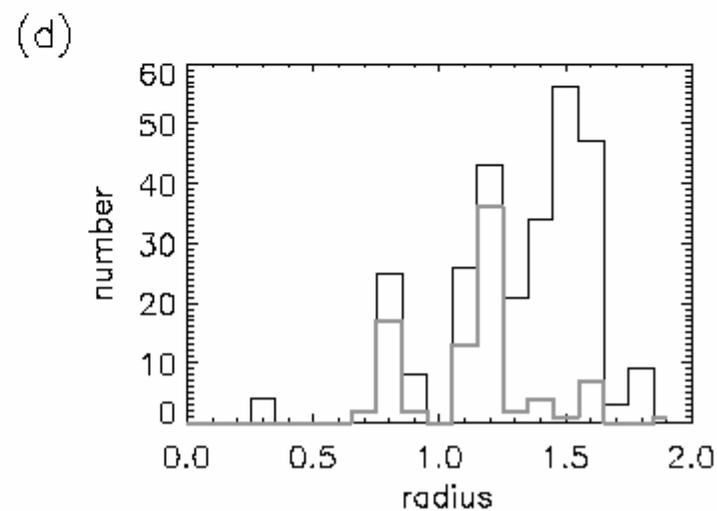
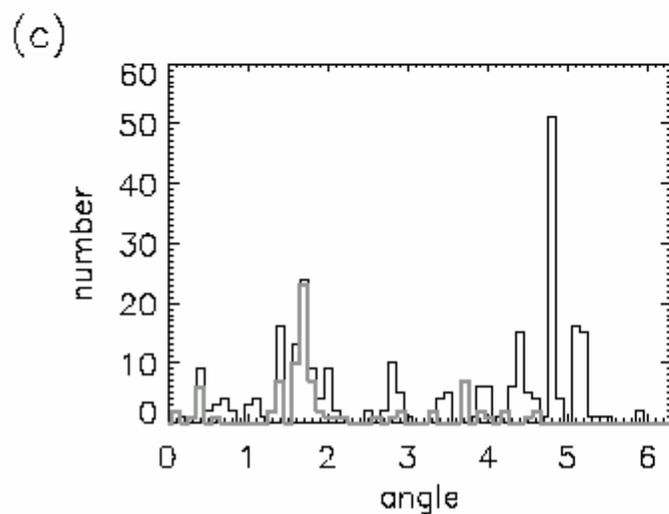
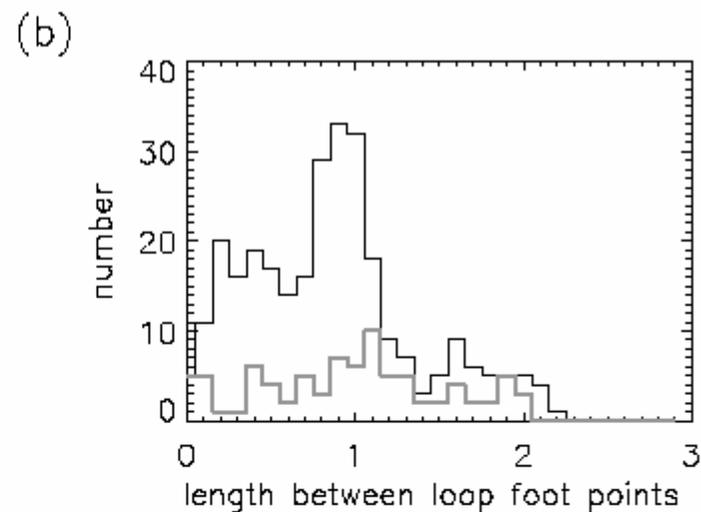
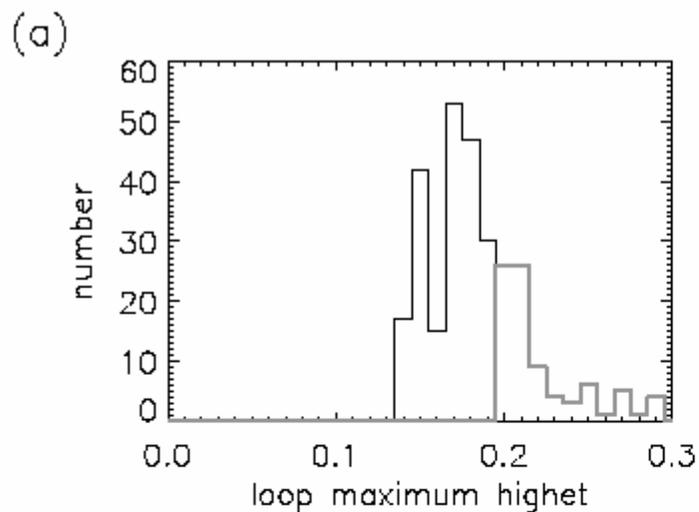
NANTENにより、銀河系中心で発見されたCO分子のループ構造 (Fukui et al. 2006)

# 銀河中心ガス円盤の大局的3次元 MHDシミュレーション



Machida et al. (2008)

# シミュレーション結果から自動探索によってみつけた磁気ループ分布



# 宇宙シミュレーションの今後の展望

- 数値天文台
  - 計算機は「理論の望遠鏡」
  - シミュレーション結果を「観測」
  - 宇宙現象を再現するだけでなく、新たな現象を予測し、観測によって検証する
- 相対論＋輻射＋磁気流体＋粒子加速
  - ブラックホール形成、ガンマ線バースト現象などを解明

**END**