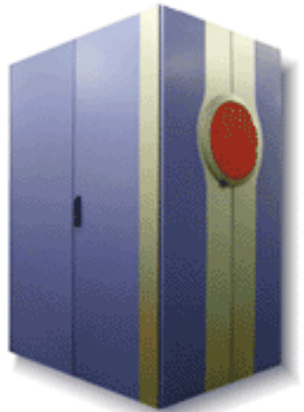


地球シミュレータによる 計算宇宙物理学の成果

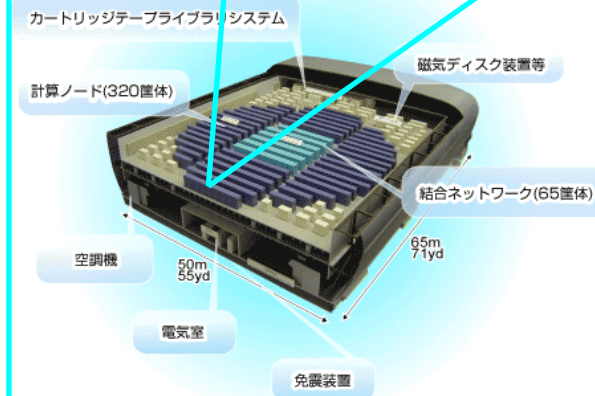


松元亮治 (千葉大学理学部)

地球シミュレータ



Peak performance/AP	8Gflops	Total number of APs	5120
Peak performance/PN	64Gflops	Total number of PNs	640
Shared memory/PN	16GB	Total peak performance	40Tflops
		Total main memory	10TB



1 プロセッサ	8 GFLOPS
1 ノード	8 プロセッサ
全体で	640 ノード
プロセッサ数	5120
ピーク性能	40 TFLOPS

地球シミュレータの利用

- 地球シミュレータ共同プロジェクトに申請
- 共同プロジェクトの対象分野
大気・海洋、固体地球、計算科学、**先進・創出**
- 共同プロジェクトの研究テーマ内容
 - 地球シミュレータを用いることによってのみ社会に還元しうる成果を生み出せる課題
 - 競争的課題に対しては、その課題の解明に対する分野全体のコンセンサスが得られた提案であること
- 共同プロジェクトの対象となるシミュレーション規模
 - 少なくとも10ノード (80プロセッサ) 以上を必要とするもの
- 具体的な利用方法
 - ジョブの投入は地球シミュレータセンターでのみ可能

天文学分野の共同プロジェクト

- コンソシアム

- 「天文学分野地球シミュレータ利用懇談会」

- 天文学分野を代表するコンソシアムからの提案として申請

- 平成15年度：宇宙の構造形成とダイナミクス

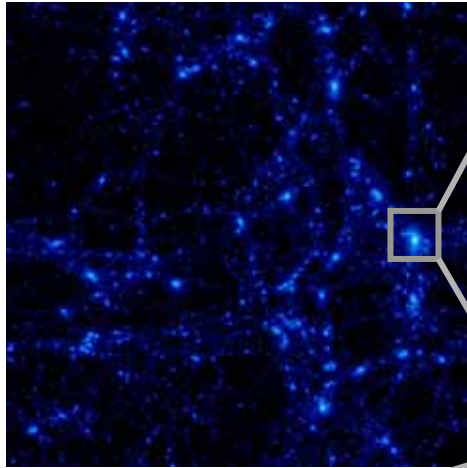
- 認められたノード時間 : 約15000ノード時間

- 平成16年度：宇宙の構造形成とダイナミクス

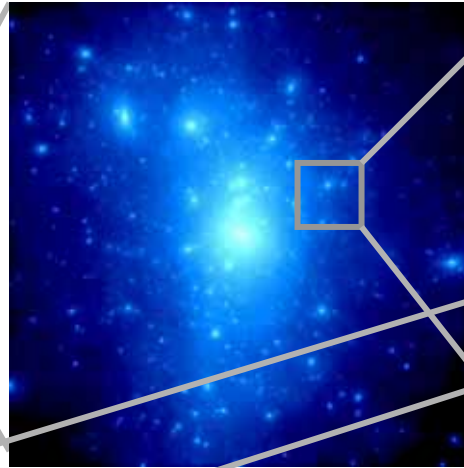
- 階層構造を連結する流体、磁気、輻射プロセスへの新たなアプローチ : 10500ノード時間

宇宙の階層構造

大規模構造



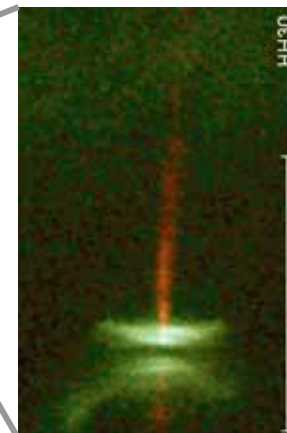
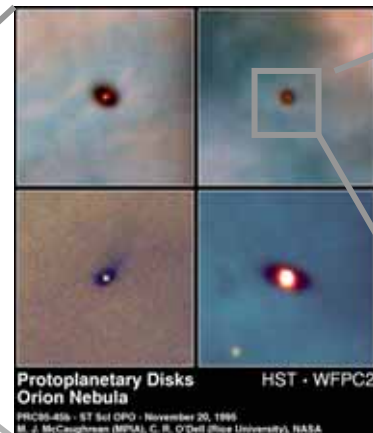
銀河団



銀河



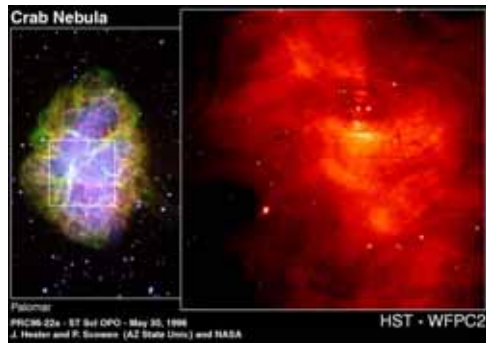
星形成
領域



原始星

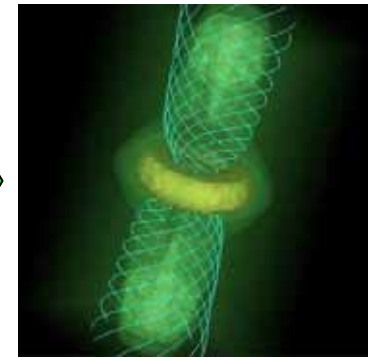
異なる階層を連結する相互作用

流体相互作用



超新星爆発

磁氣的相互作用



輻射相互作用



光電離領域

共同プロジェクトの目的

- 多階層性を持つ宇宙現象を複数階層とその相互作用(重力、音波、磁気流体波、輻射を通じた相互作用など)を含めてシミュレートする
- 従来の3次元シミュレーション: 1層のみ
- 地球シミュレータを用いたギガメッシュ (1000^3 メッシュ) シミュレーション
 - 計算領域の中に多数の部分系を含めることができる。
 - 銀河+超新星爆発、局所エネルギー解放領域+系全体(フレア)、降着円盤+ジェットなど
- 局所と全体をつなぐ数値的方法論を確立する

共同プロジェクトのグループ構成とメンバー

平成15年

銀河形成 : 矢作、林 満 (国立天文台)

銀河進化 : 森 (専修大)、梅村 (筑波大)

降着円盤 : 松元、錦織、松尾 (千葉大)、町田 (国立天文台)、
佐野、加藤精一 (阪大)、木暮、上原、加藤成晃 (京大)

太陽活動 : 柴田、磯部、宮腰、田沼、塩田、桑原 (京大)、
横山 (東大)、野沢 (茨城大)

平成16年

流体・輻射流体 : 森 (専修大)、梅村、中本 (筑波大)、
大須賀 (立教大)、中里 (理研)

磁気流体

太陽 : 柴田、磯辺、宮腰、田沼 (京大)、横山 (東大)

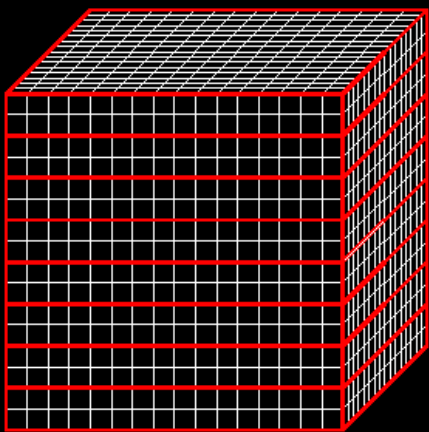
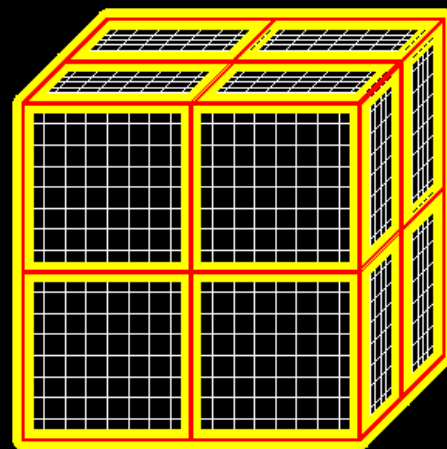
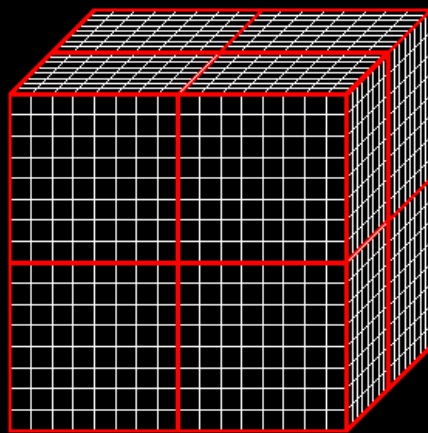
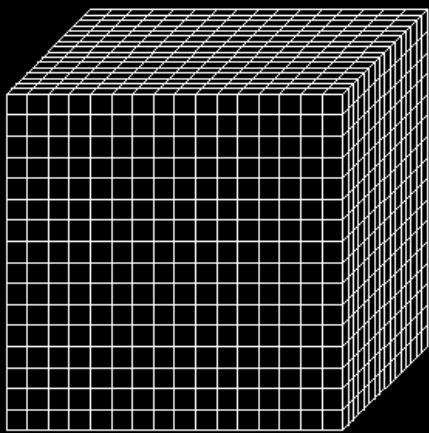
降着円盤 : 松元、錦織 (千葉大)、町田 (国立天文台)、
加藤成晃 (京大)、佐野 (阪大)

各グループの活動と成果

- **流体・輻射流体グループ**
 - シミュレーションコードAFD2のインプリメント
 - 銀河形成シミュレーションの実施
- **磁気流体グループ**
 - シミュレーションコードCANSのインプリメント
 - 太陽浮上磁場シミュレーションの実施

流体シミュレーションコードの実装

- **宇宙流体シミュレーションコード AFD2**
 - 差分法: AUSMDV + MUSCL (2次精度化)
 - カートesian座標3次元
 - ダークマターの重力を考慮 (ダークマター系は重力多体問題として解く)
 - 輻射冷却を含む (H₂, HD, Liによるクーリング)
- **並列化**
 - 3次元領域分割
 - MPIを用いて並列化



$N=1024^3$ を128 node (1024 PE)で計算

$$\begin{aligned} [1] \quad (x, y, z) &= (1024, 1024, 8) / \text{node} \\ &= (1024, 1024, 1) / \text{PE} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [2] \quad (x, y, z) &= (256, 256, 128) / \text{node} \\ &= (128, 128, 64) / \text{PE} \end{aligned}$$

Performance on Earth Simulator

AFD2: AUSMDV+MUSCL 2'nd order

(1) Three-dimensional hydrodynamic simulation:

1024 x 1024 x 1024 grid points, 10 steps

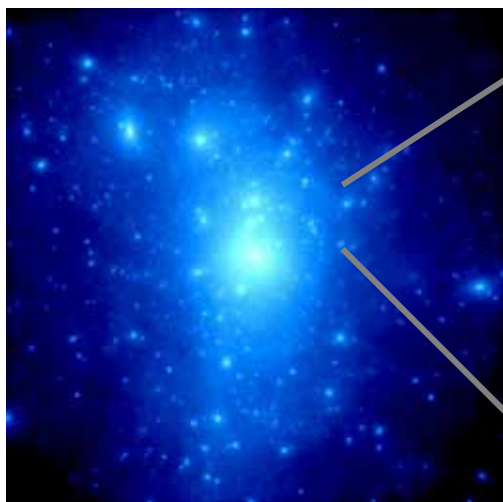
# PEs	Nodes	T min	T max	T mean	P-Alpha	P-E	Vector
64	8	111.825	112.278	112.081	-	-	99.556
128	16	55.891	56.129	56.014	1.0000	1.0000	99.488
256	32	28.217	28.449	28.359	0.9999	0.9731	99.418
512	64	13.982	14.411	14.271	0.9999	0.9742	99.491
1024	128	8.733	9.264	9.088	0.9992	0.5560	99.309

(2) Three-dimensional hydrodynamic simulation:

2048 x 2048 x 2048 grid points, 10 steps

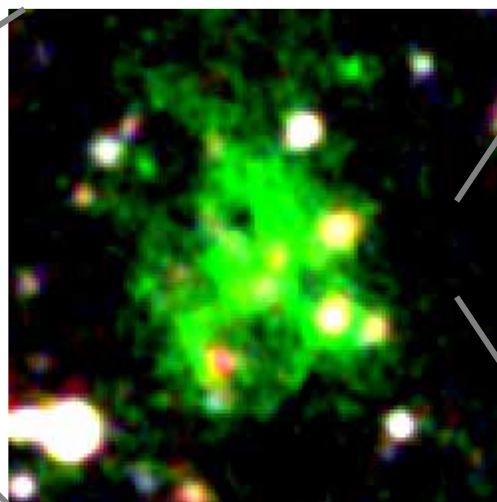
512	64	115.911	116.555	116.307	-	-	99.518
1024	128	56.128	56.600	56.419	1.0000	1.0000	99.488

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 ($\text{Ly } \alpha$) で
輝く巨大なガスの塊
(Matsuda et al. 200
4)

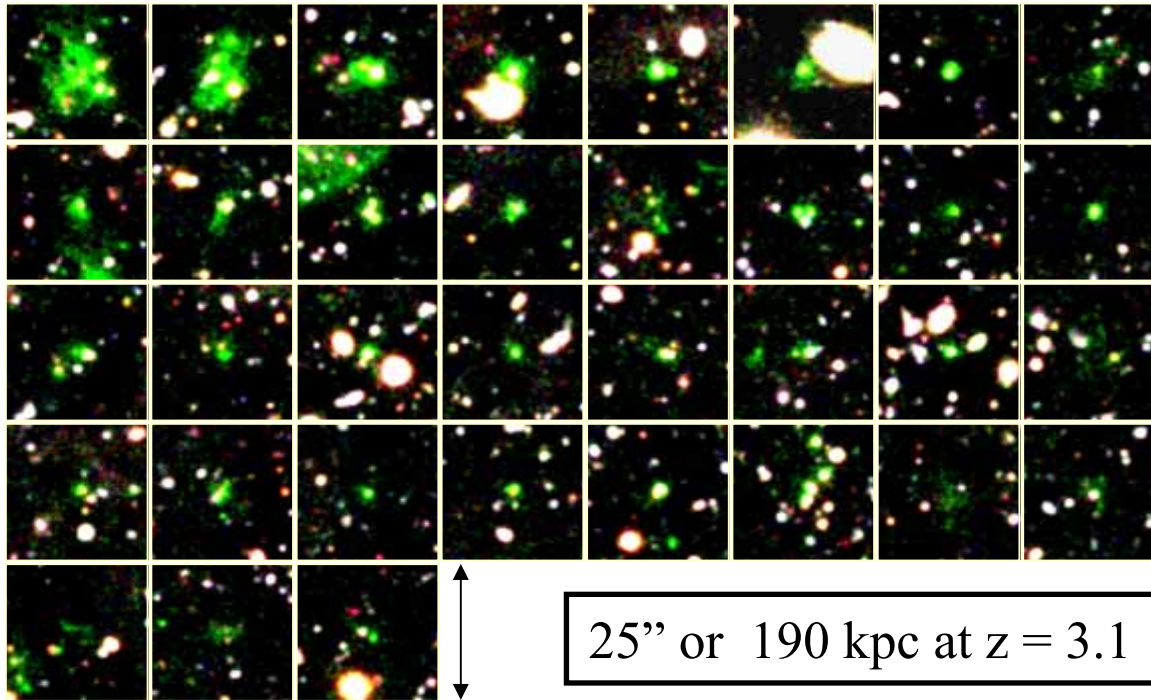


現在の銀河

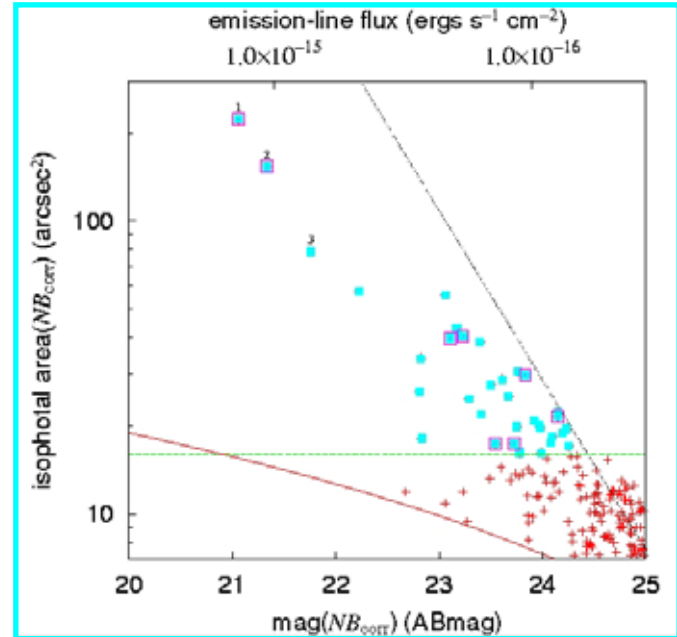


進化

Extended Ly α objects: Matsuda et al. 2004

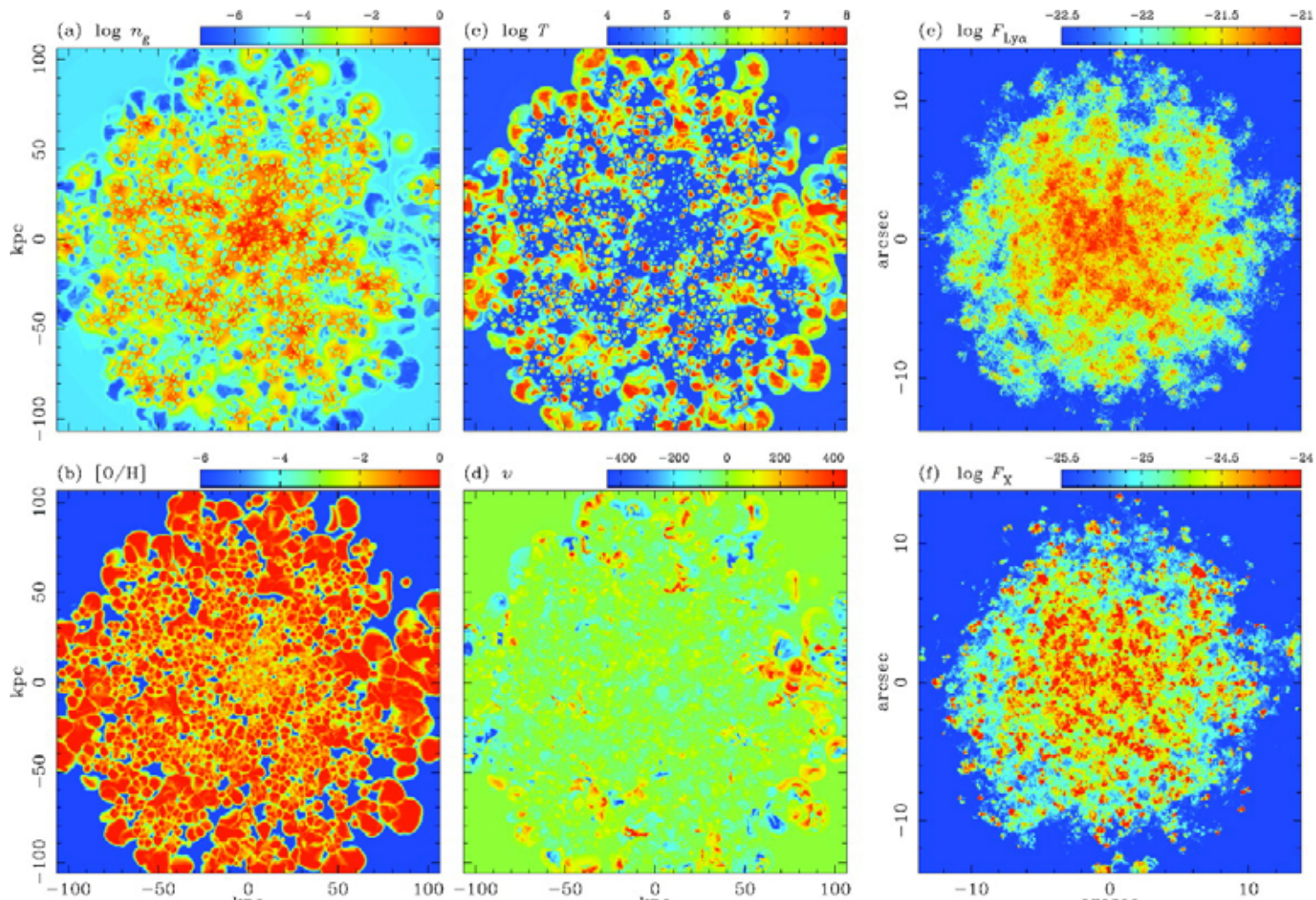


25'' or 190 kpc at $z = 3.1$



- Matsuda et al. 2004 found the 35 extended Ly α blobs (LABs) in the proto-cluster region at redshift $z=3.1$ (SSA22).
- They have **bubbly features**.
- The luminosity range of Ly α emission is 6×10^{42} to 10^{44} erg s $^{-1}$.
- One third of them are apparently not associated with UV continuum sources that are bright enough to produce Ly α emission.

従来のシミュレーション: Static Model



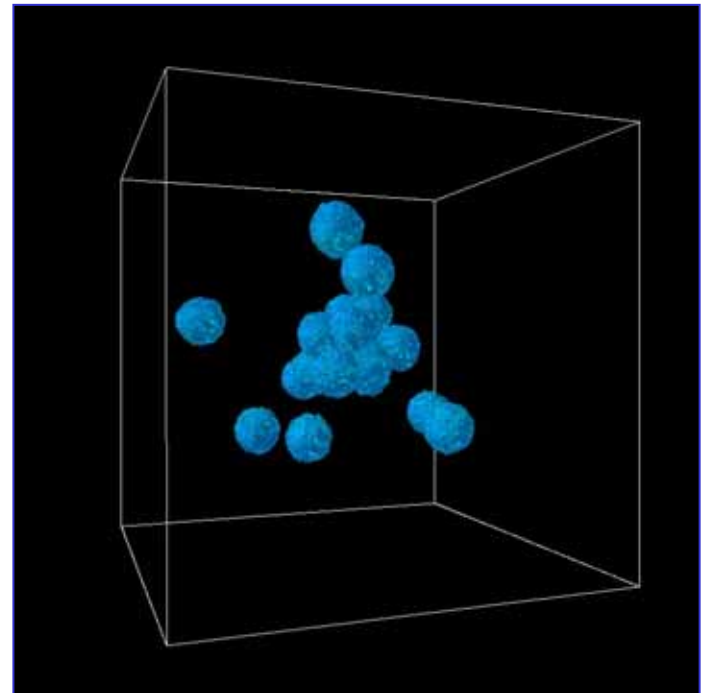
Mori, Umemura, Ferrara (2004) 1024^3 mesh on CP-PACS

ダイナミカルシミュレーション

- **流体コードAFD2を地球シミュレータに実装して、ダークマター塊が集積して銀河を形成する過程を、ダークマターの重力場に捕捉されたガスの運動、星形成、超新星爆発による重元素放出の効果を含めて調べた。**

(Mori and Umemura 2005)

- **超新星 (局所系) と銀河 (全体系)**
- **シミュレーションコード:**
AUSMDV + MUSCL (2'nd order)
- **重力場: 暗黒物質 (重力多体系)**
- **放射冷却: 原子・分子輝線放射**
H₂, HD, Li cooling
重元素量依存性を考慮
- **メッシュ数: $1024 \times 1024 \times 1024$**



密度分布の 時間発展

Total Mass:

$$10^{11} M_{\odot}$$

Gas Mass:

$$1.5 \times 10^{10} M_{\odot}$$

of Subunits

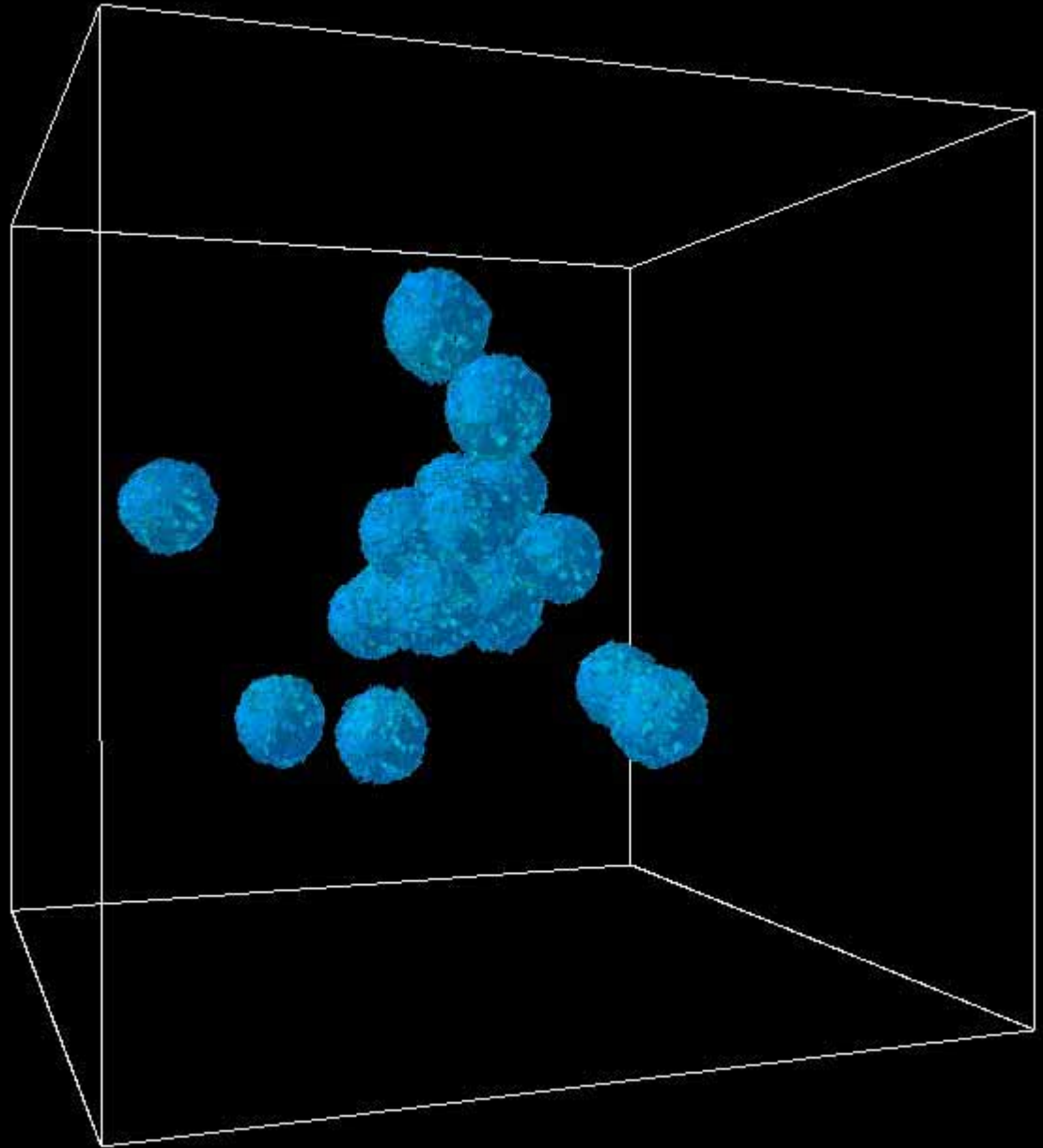
20

Box size:

120 kpc

Grid Points:

$$1024^3$$



Evolution of [O/H]

Total Mass:

$$10^{11} M_{\odot}$$

Gas Mass:

$$1.5 \times 10^{10} M_{\odot}$$

of Subunits

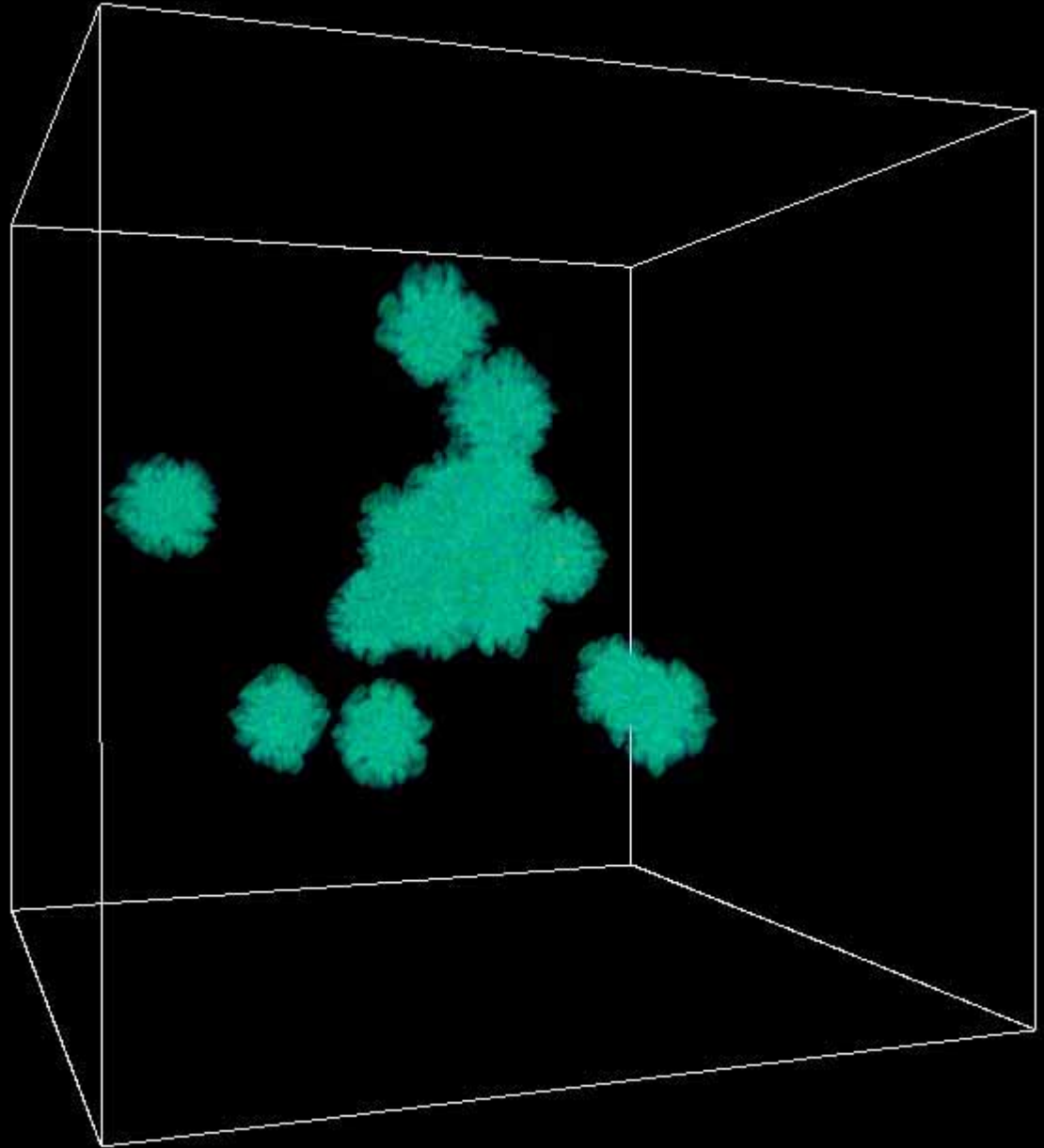
20

Box size:

120 kpc

Grid Points:

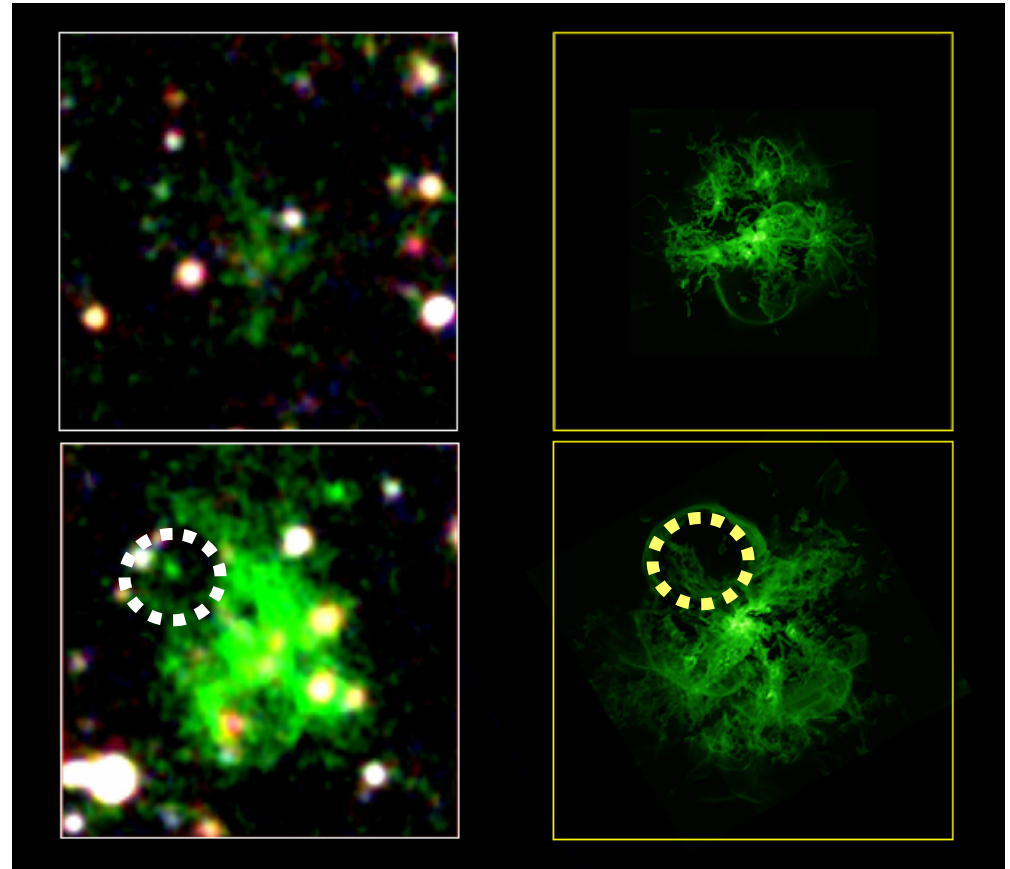
$$1024^3$$



銀河形成過程を再現

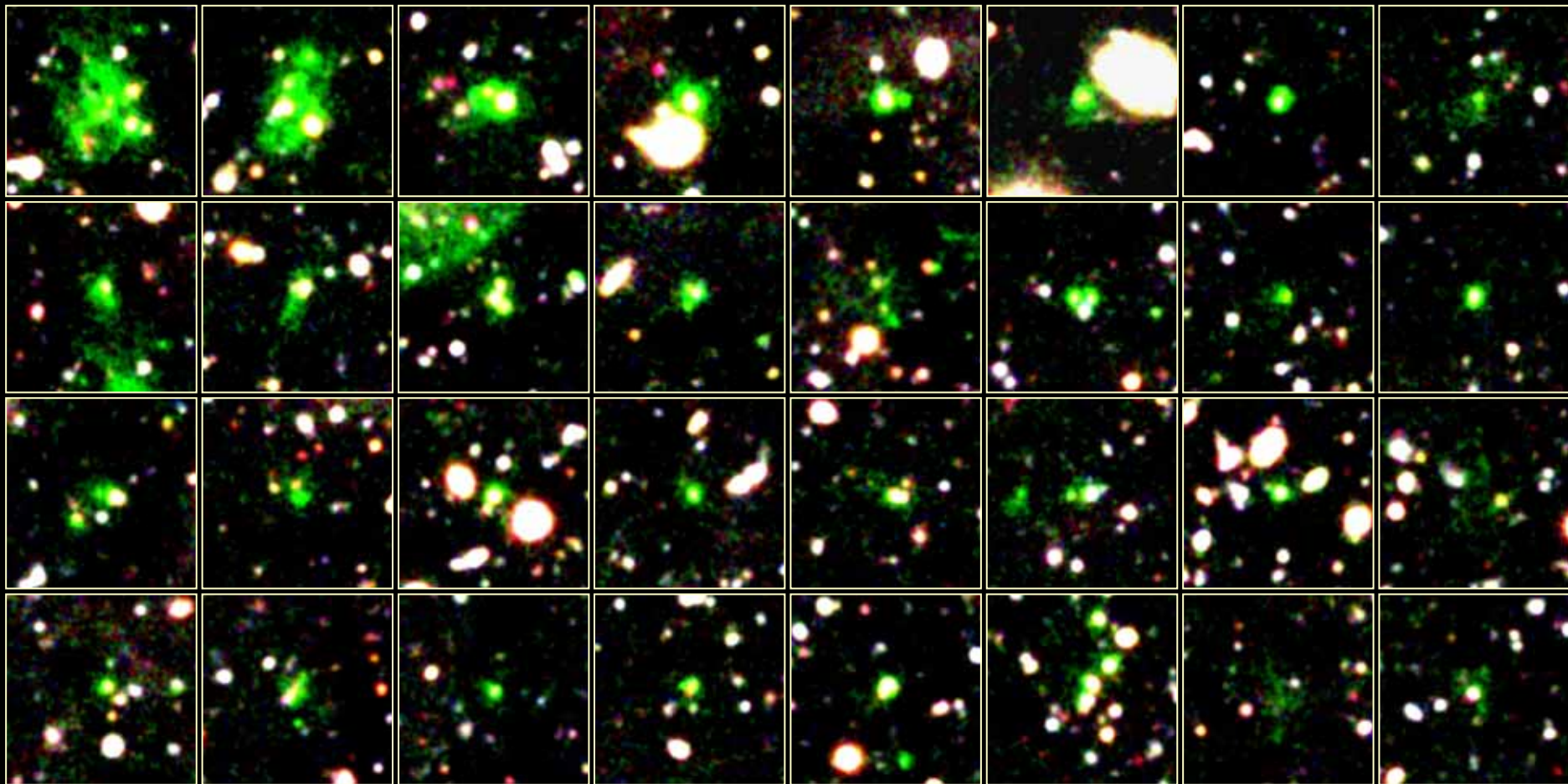
観測的可視化

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



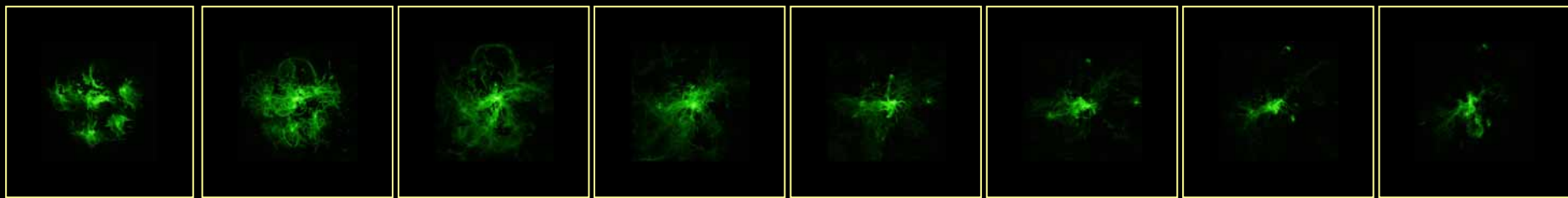
すばる望遠鏡

シミュレーション

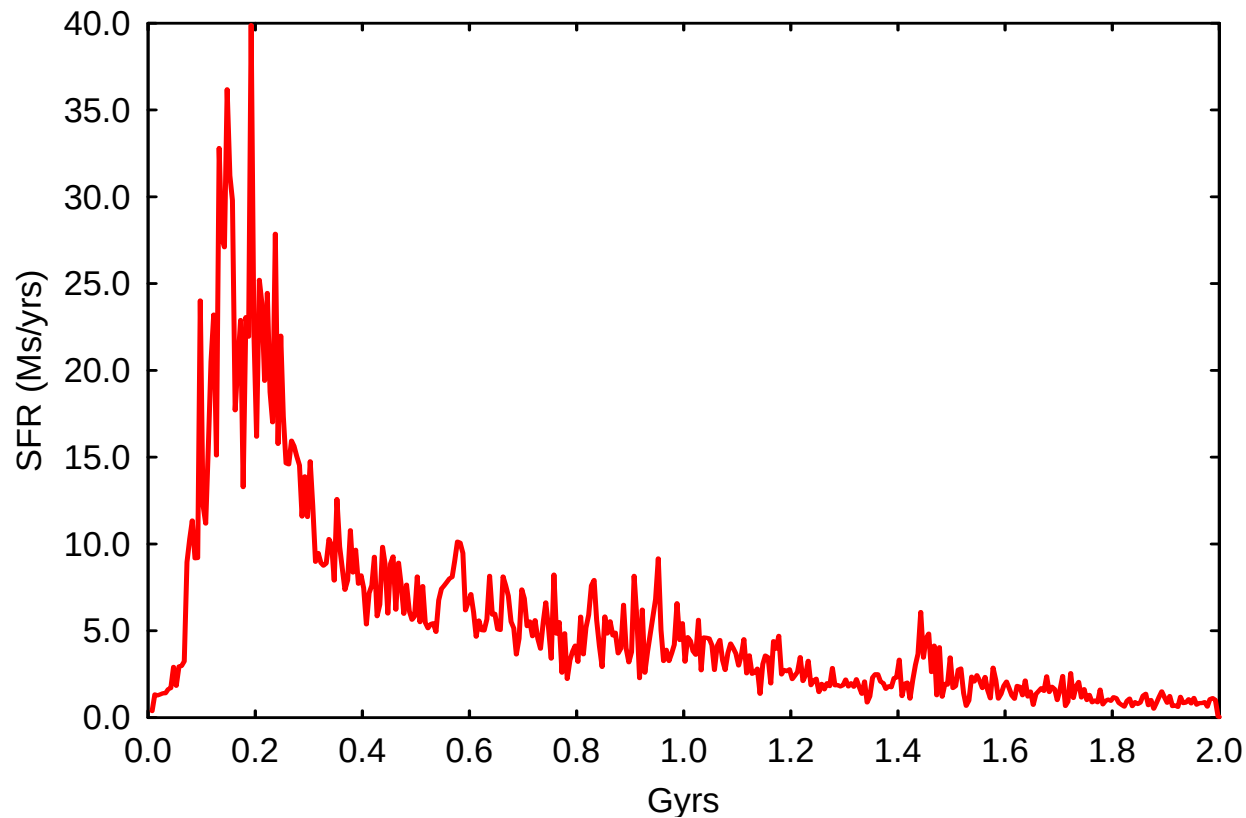


Observation (Matsuda et al.2004)

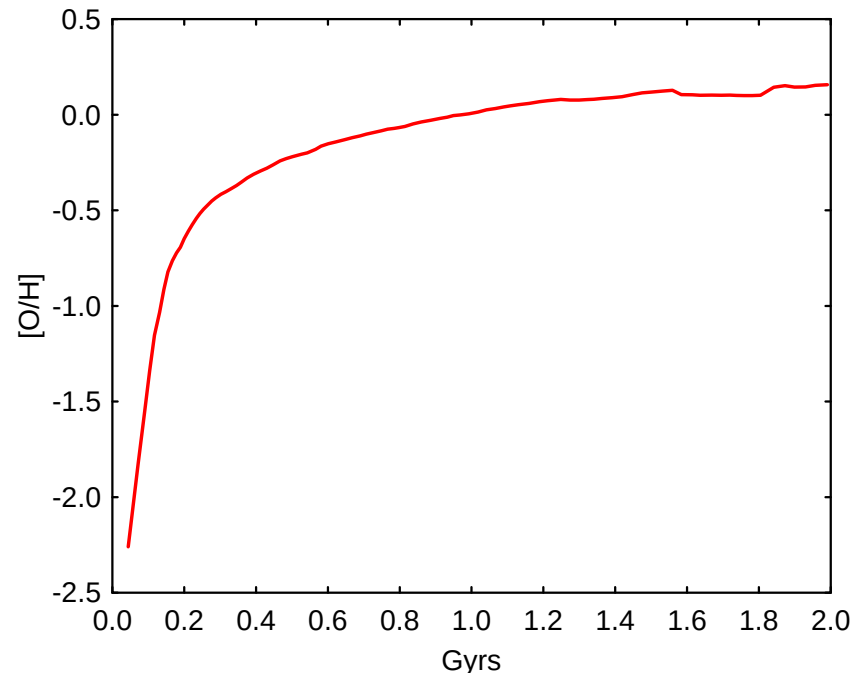
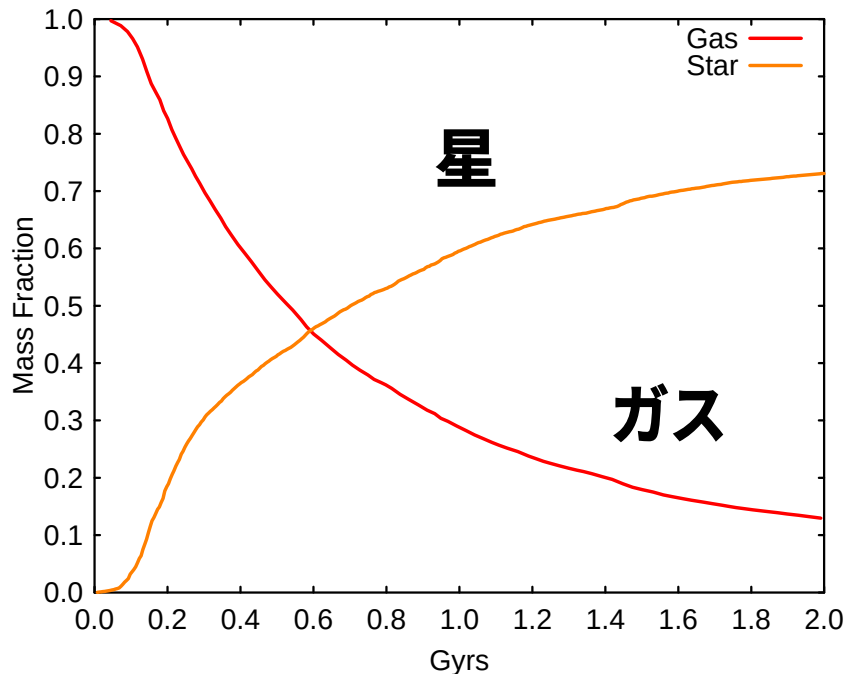
Present work



星生成率の時間変化



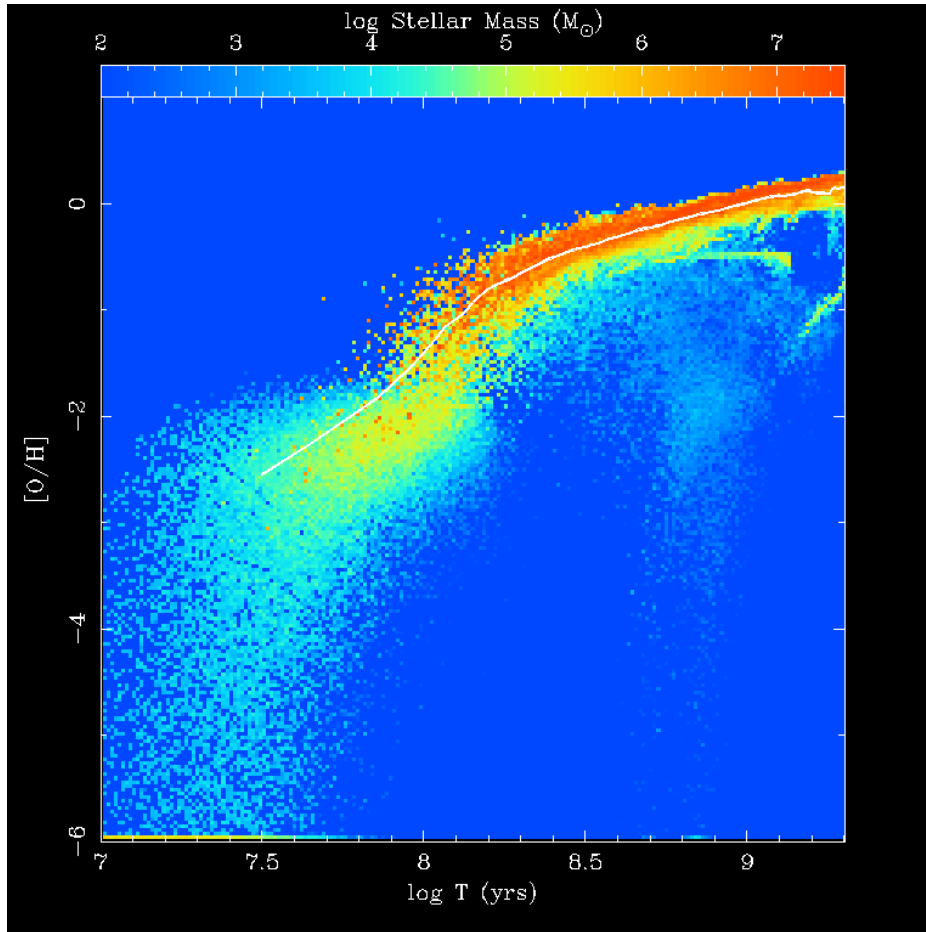
星とガスの質量比および 重元素組成の時間変化



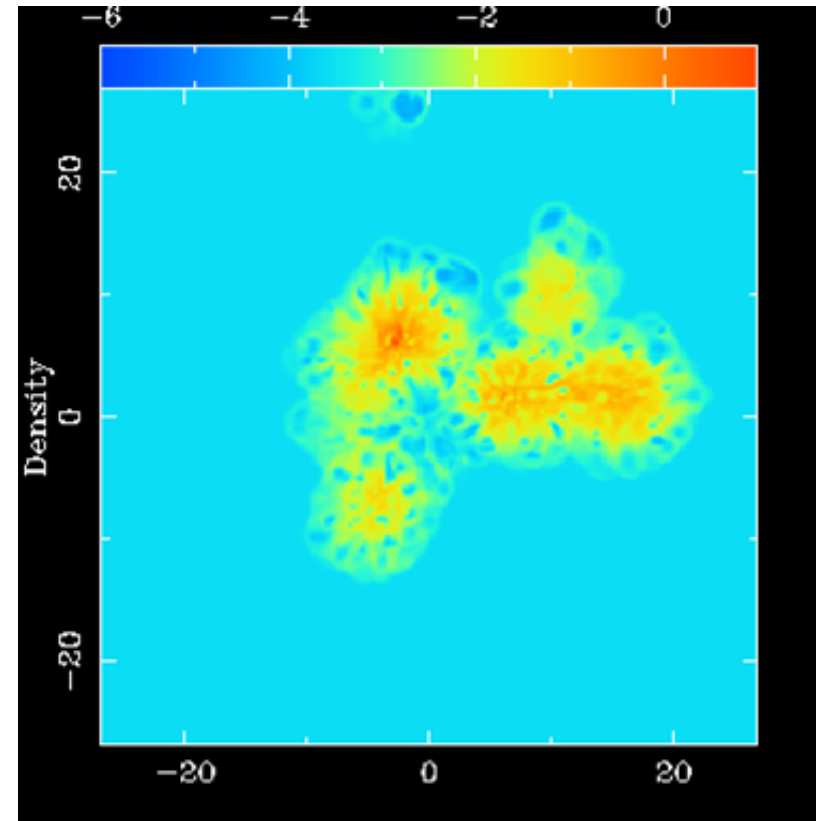
Star: 73%	$1.1 \times 10^{10} M_{\odot}$
Gas: 13%	$0.2 \times 10^{10} M_{\odot}$
Outflow: 14%	$0.2 \times 10^{10} M_{\odot}$

1. $T < 2 \times 10^8 \text{ yr}$: $[\text{O}/\text{H}] < -1$
2. $2 \times 10^8 \text{ yr} < T < 1 \text{ Gyr}$
: $-1 < [\text{O}/\text{H}] < 0$
3. $T > 1 \text{ Gyr}$: $[\text{O}/\text{H}] \sim 0$

Evolution of Gas and Stellar Metallicity



重元素比の時間変化。カラーはガス、白い実線は星の平均値。.



銀河進化初期 (1億年以下) における非一様な密度分布

磁気流体シミュレーション

ACT-JSTプロジェクト(2000-2002)で開発した
Coordinated Astronomical Numerical Software
(CANS)を地球シミュレータに実装



- 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 (並列化率99.9%)

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

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

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

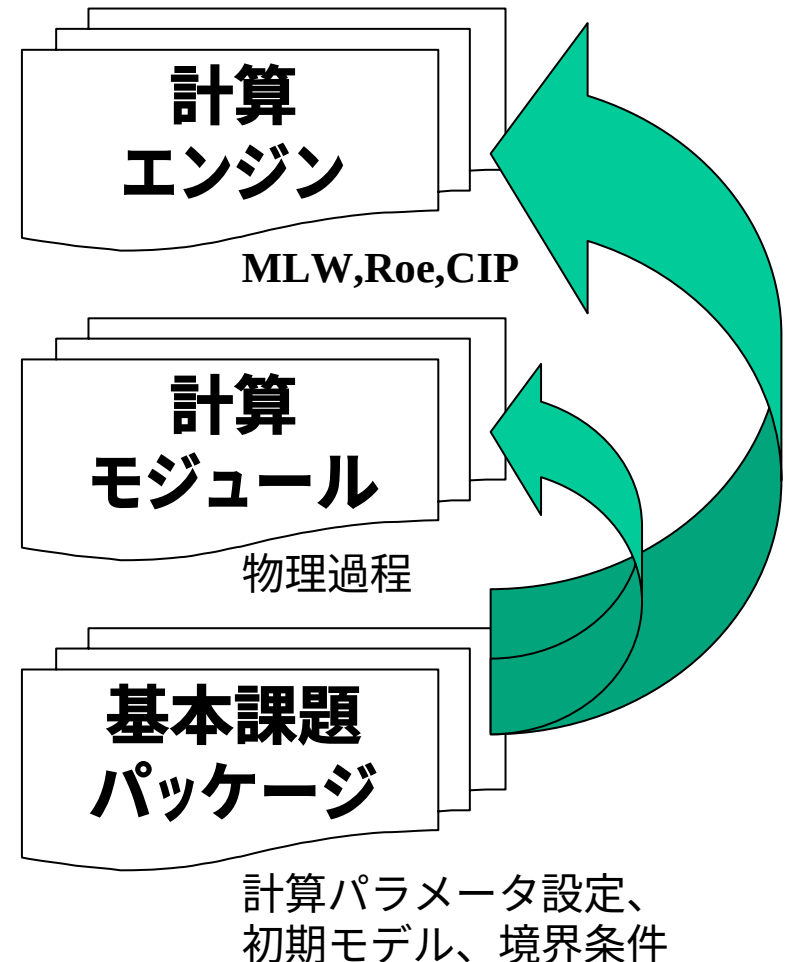
磁気誘導

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

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

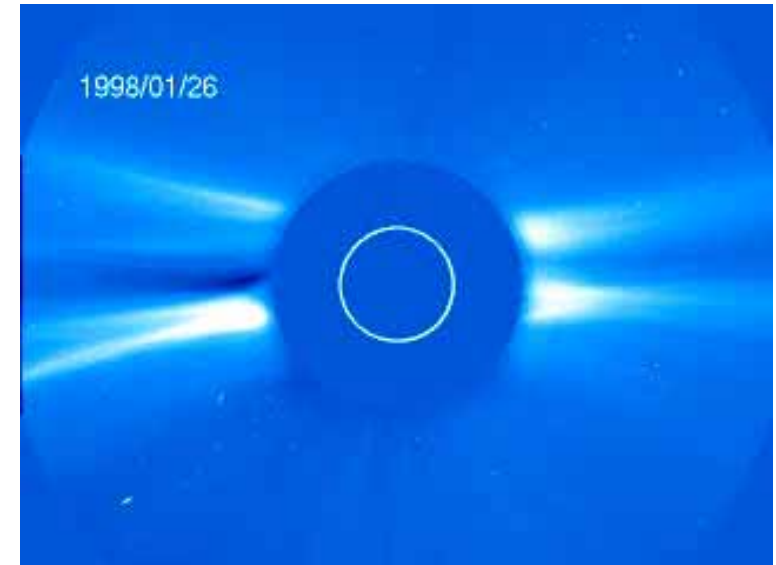
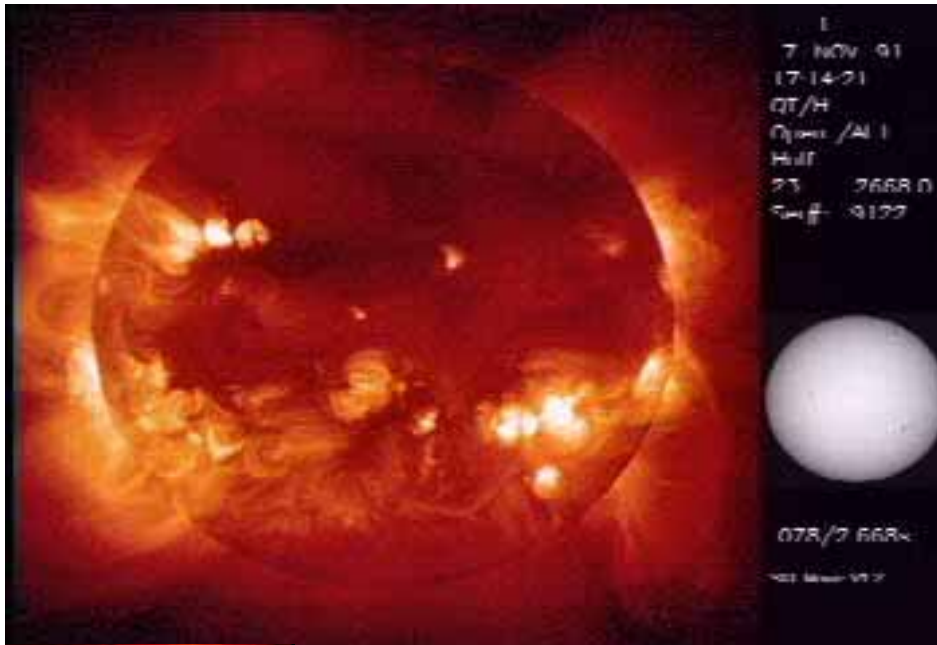


宇宙シミュレーションラボラトリー Webページ

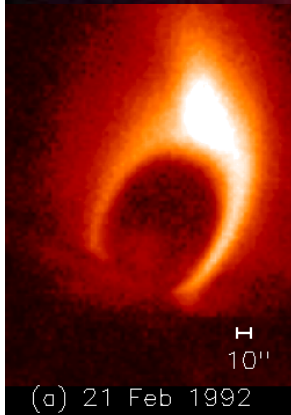


<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/>

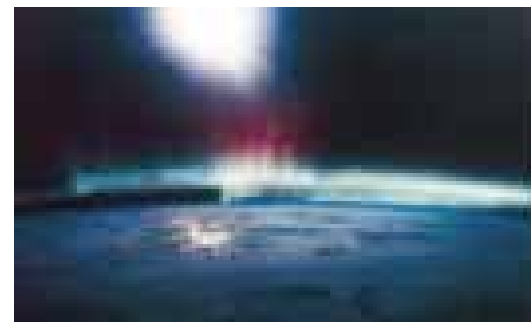
太陽表面活動のシミュレーション



太陽風 (SOHO衛星)



「ようこう」衛星による軟X線画像。
上: 全面像、
左: フレア

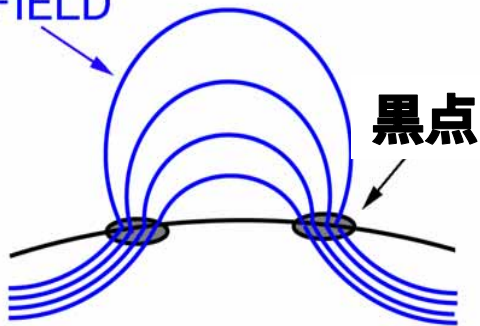


オーロラ

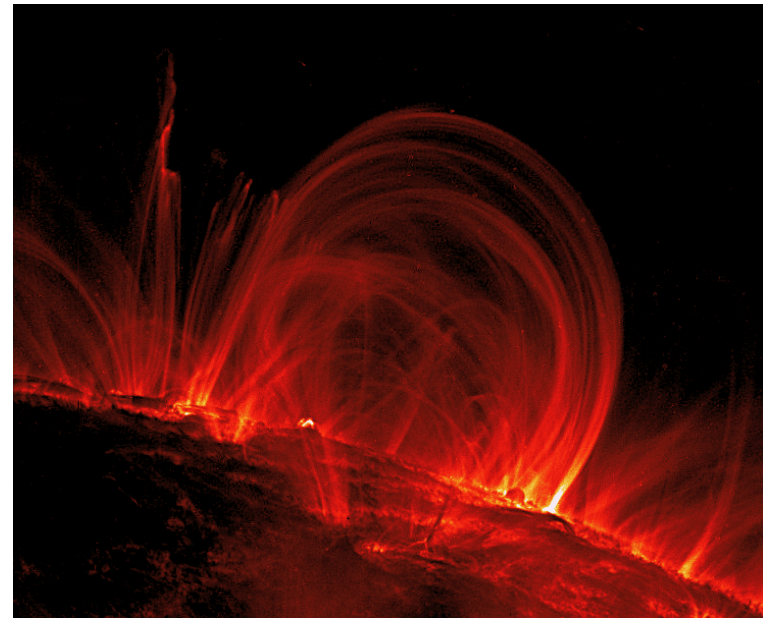
太陽表面活動のメカニズム

コロナ

MAGNETIC
FIELD

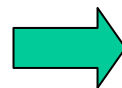


対流層



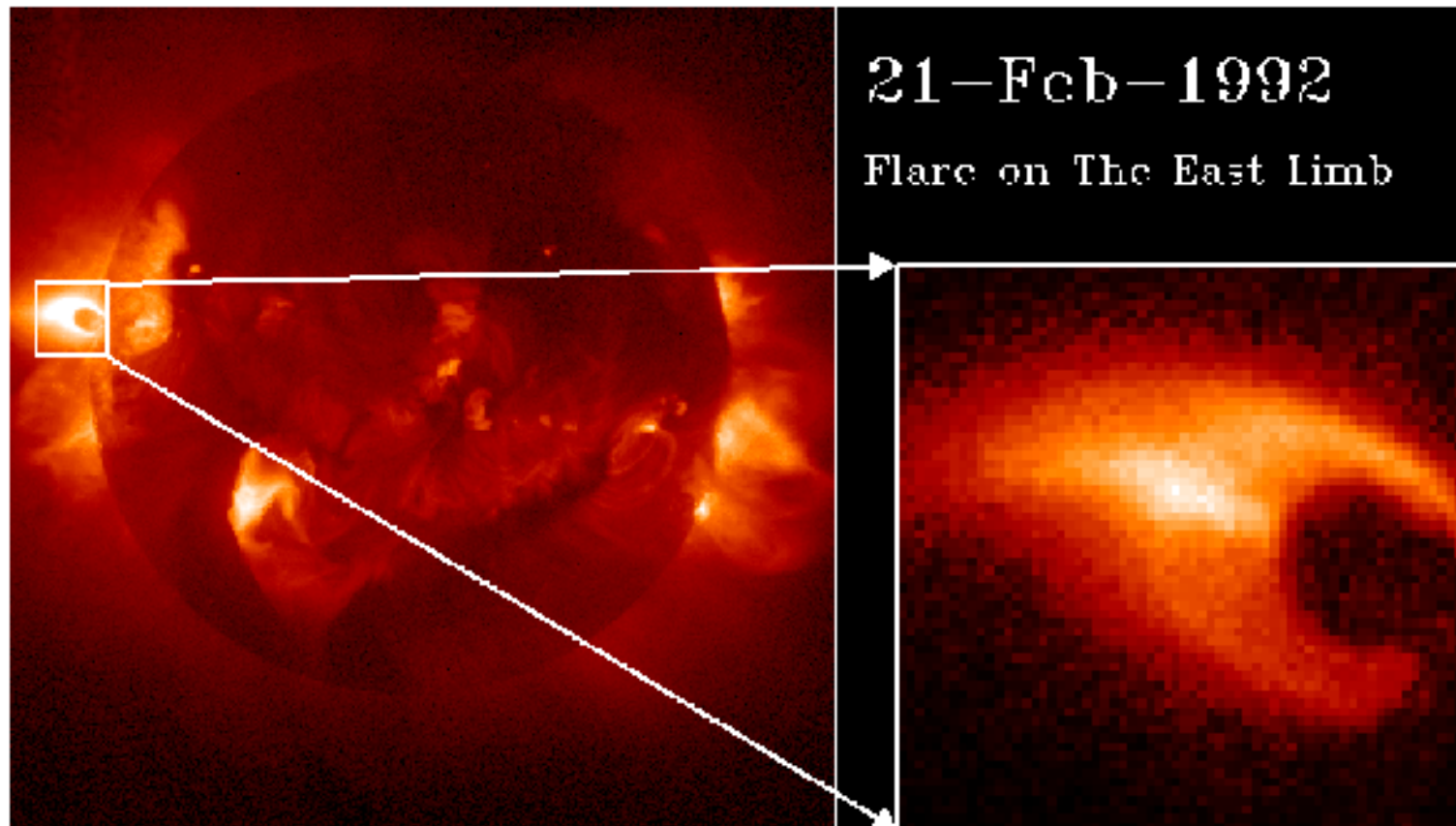
磁気ループ (TRACE衛星)

- 磁場に閉じ込められたプラズマの運動
- 磁気エネルギーの蓄積と解放

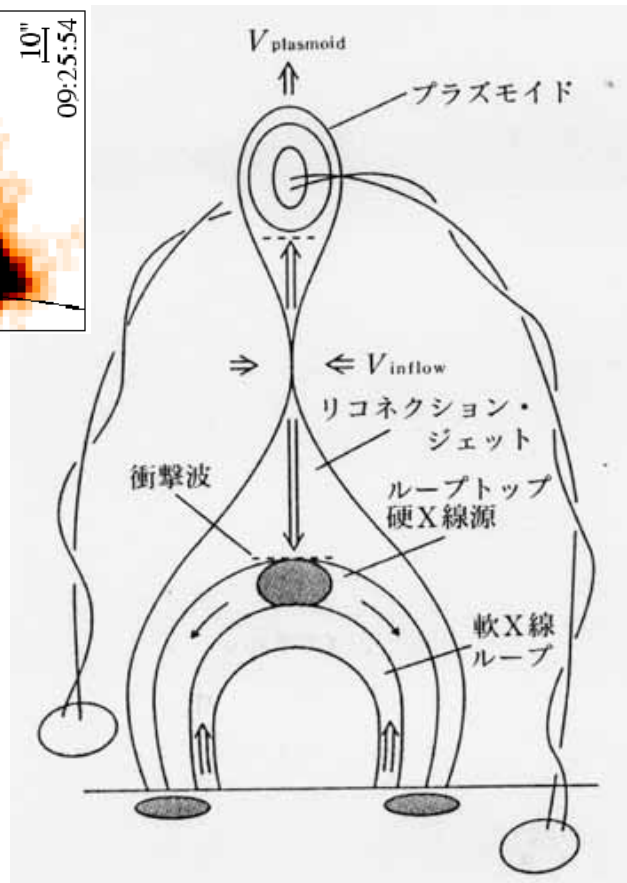
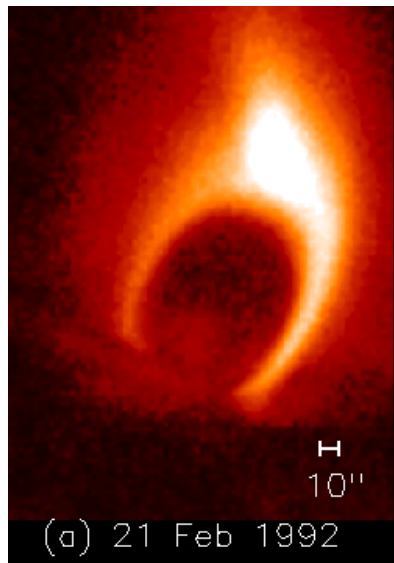
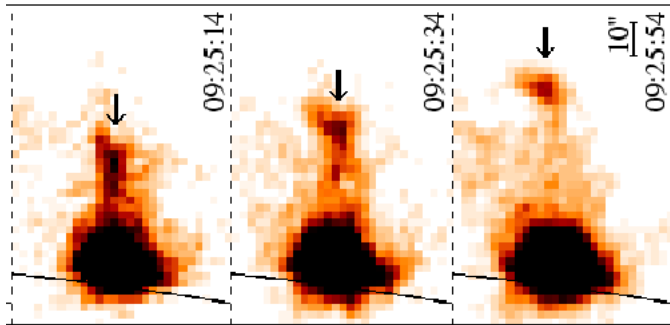


磁気流体モデルに基づく
理論シミュレーション研究

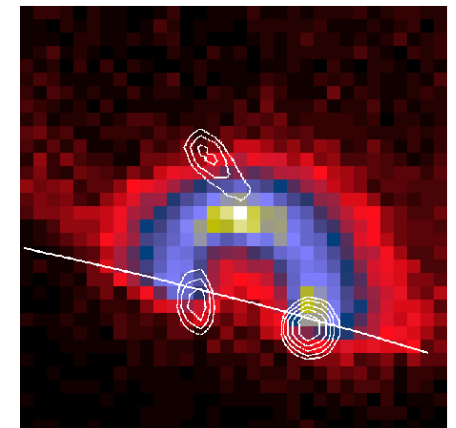
太陽表面の爆発現象：フレア



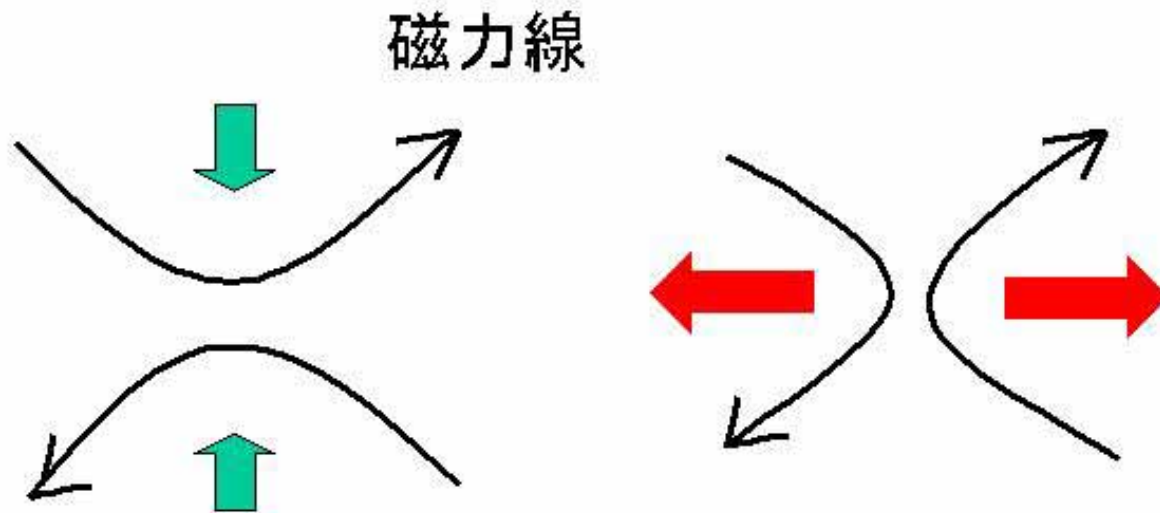
太陽表面の爆発現象： 太陽フレアの磁気リコネクションモデル



太陽フレアモデル (柴田ら)



磁気リコネクションとは？

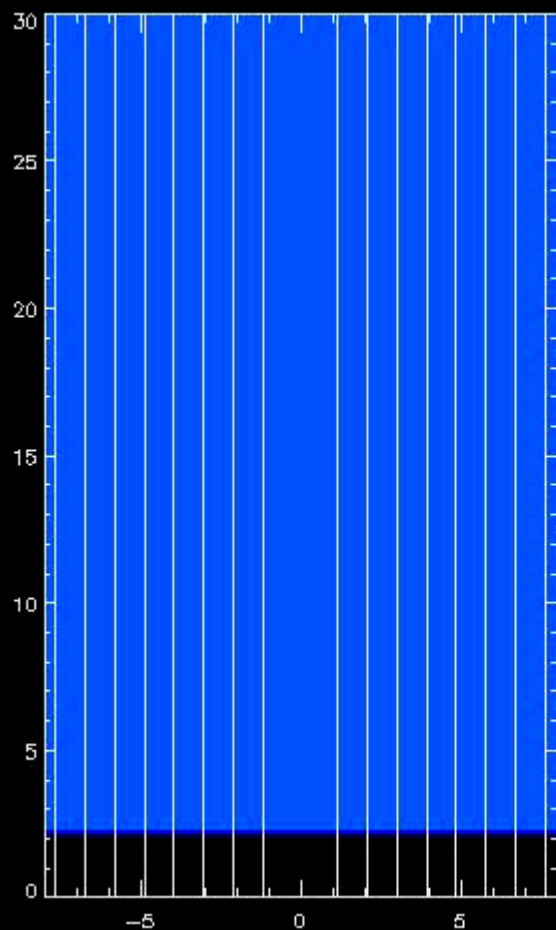


「磁力線つなぎかえ」

「磁力線再結合」とも呼ばれる

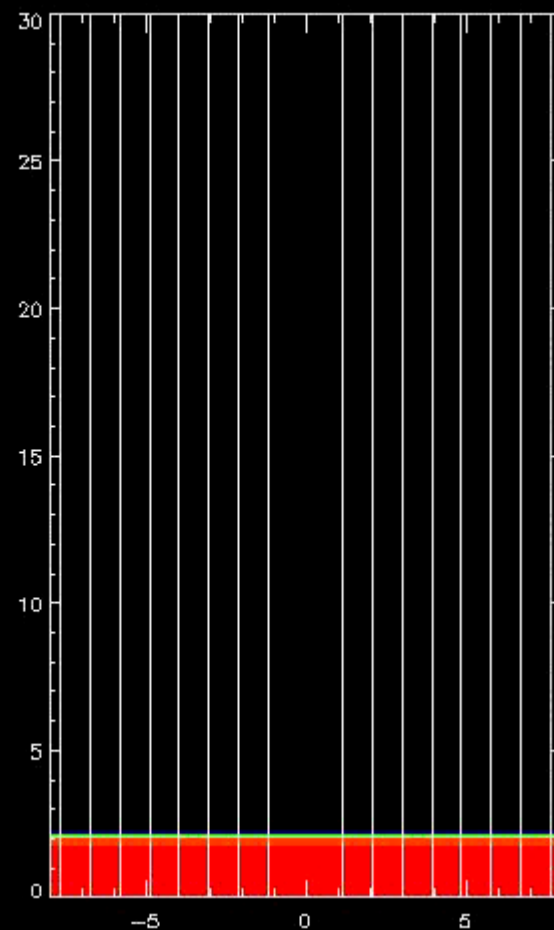
**部分領域で発生する磁気リコネクション
(エネルギー解放) が系全体の進化に影響**

太陽フレアの数値実験



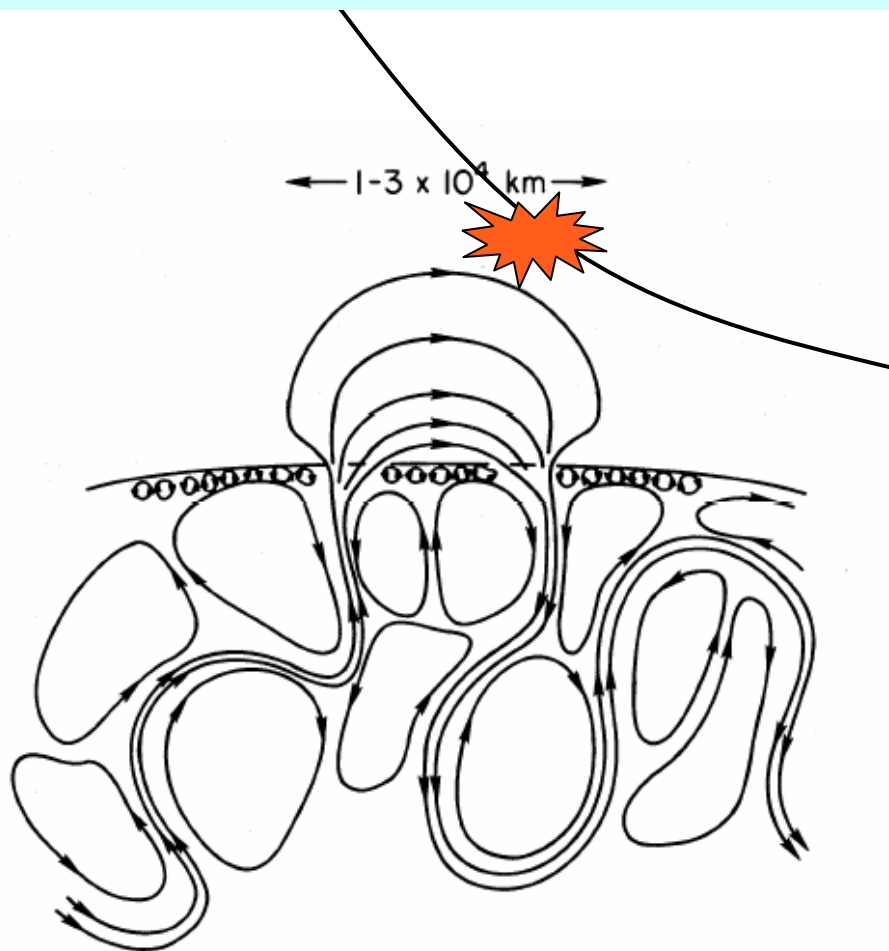
Temperature

Time = 0.00



磁気リコネクションによる磁気エネルギー解放と熱伝導による太陽表面の加熱を考慮したシミュレーション (横山、柴田)

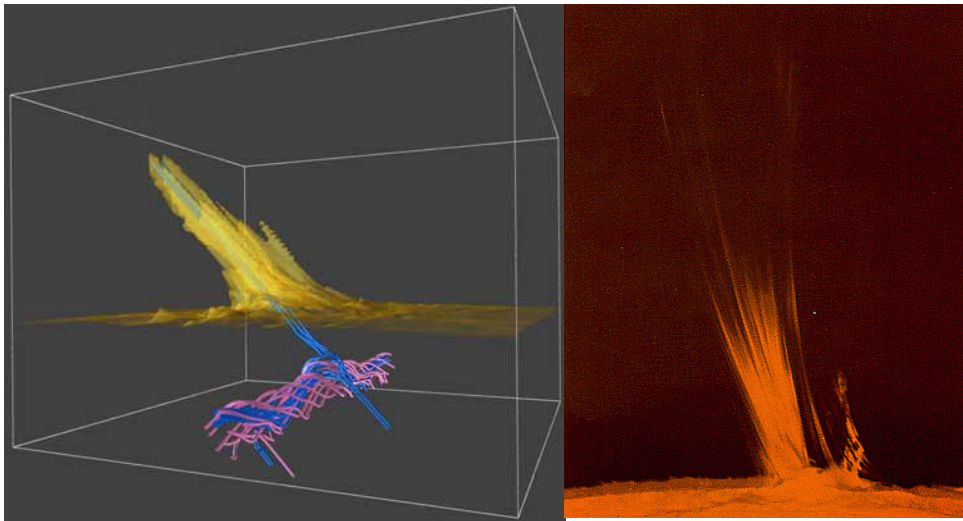
地球シミュレータを用いた浮上磁場の 3次元MHD数値実験



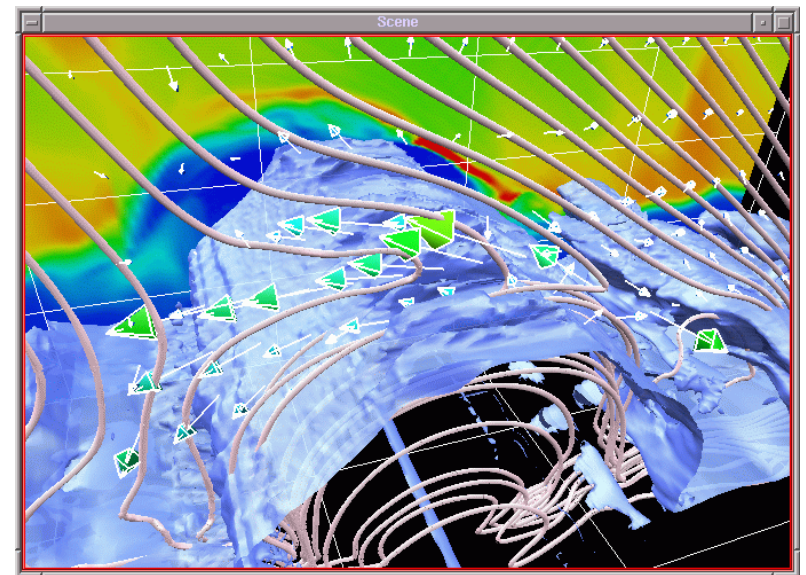
2006年打ち上げ予定の
Solar-B 衛星の観測
ターゲット

太陽内部とコロナの磁気流体的結合

- ・ 浮上磁気ループとコロナ磁場相互作用の3次元シミュレーションを実施



Miyagoshi et al. 2005

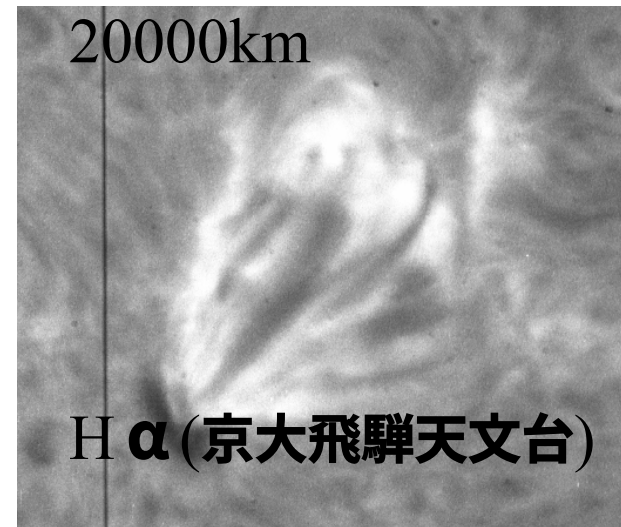


Isobe et al. 2005

浮上磁場領域の観測

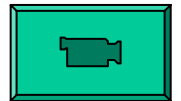
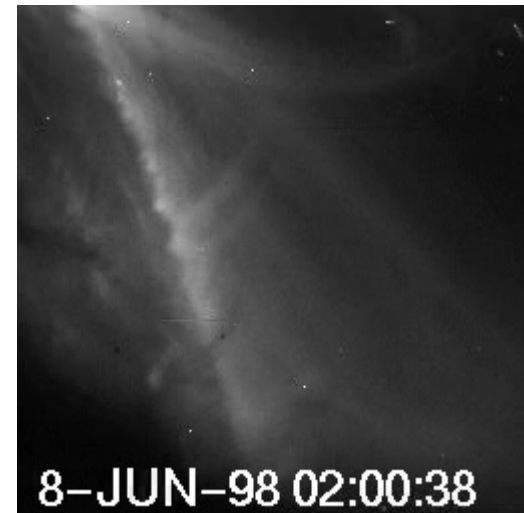
• $H\alpha$ (彩層)

- 極性の異なる黒点をつなぐ筋模様 (アーチフィラメント)
- 双極で出現する黒点をつなぐ磁気ループに対応



• EUV (遷移層～コロナ)

- 明るいループ ($T=10^6\text{K}$) と暗いループが交互に存在 ($T=10^4\text{K}$)
=> 非一様なコロナ加熱?
- ジェット、フレアの発生 => コロナ磁場とのリコネクションを示唆



EUV (TRACE)

計算モデル：太陽内部とコロナを含めた 初の大規模3次元シミュレーション

- 3次元MHD方程式、圧縮性、電気抵抗あり

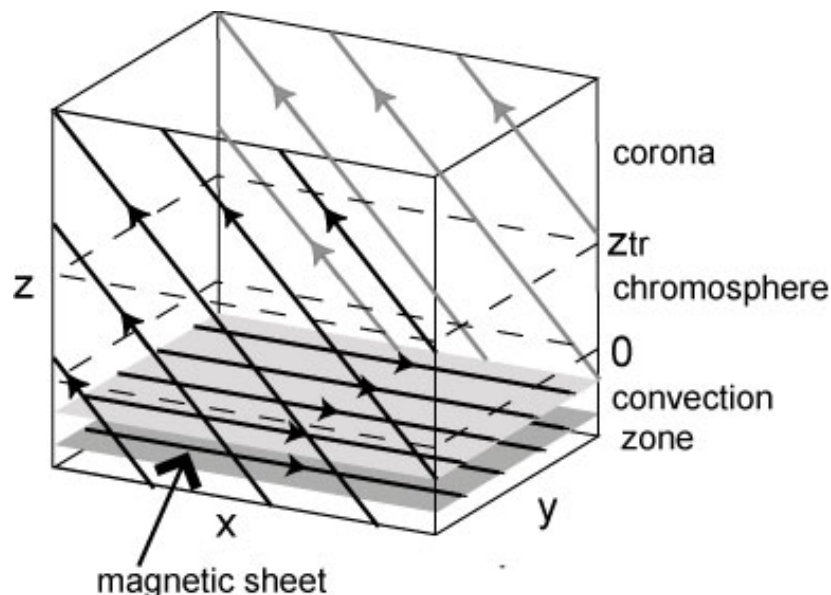
- 異常抵抗モデル
$$\eta = \begin{cases} \eta_0 & \text{for } v_d < v_c, \\ \eta_0 + \eta_1 (v_d/v_c - 1)^2 & \text{for } v_d \geq v_c, \end{cases}$$

 $v_d = J/\rho$: ion-electron drift velocity

- 初期条件：上部対流層－光球／彩層－コロナ
(密度比 $> 10^7$)

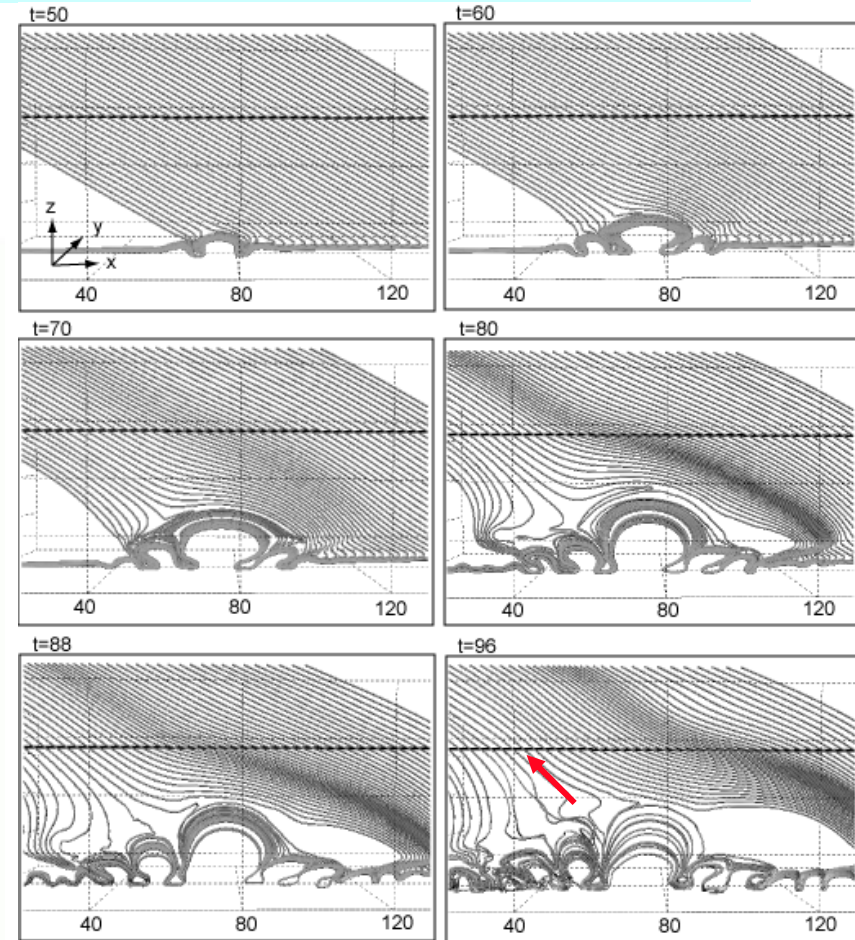
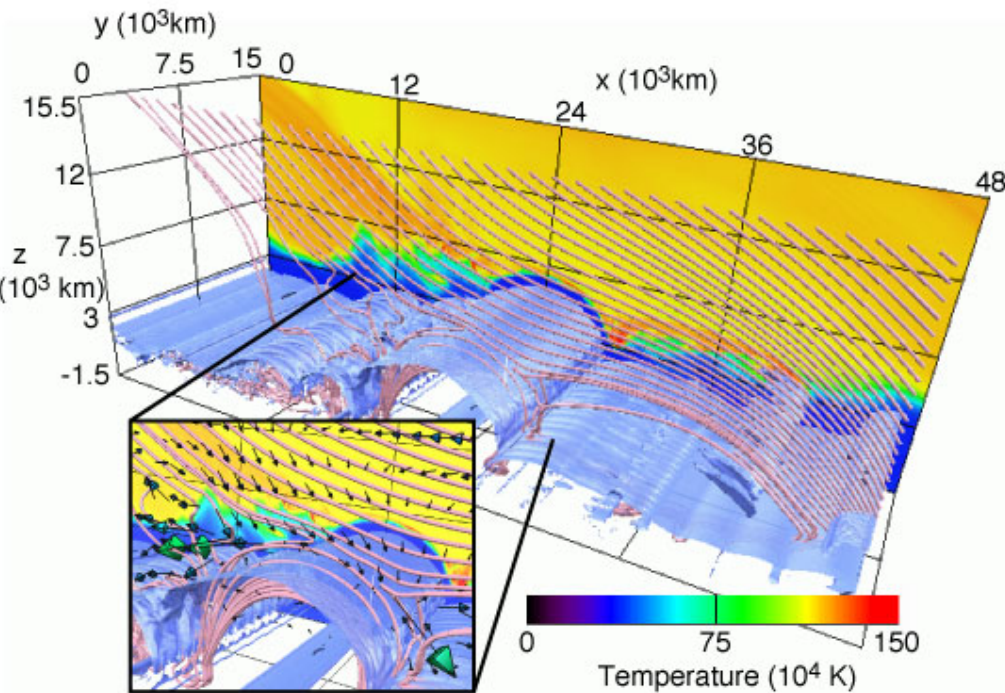
- 対流層中に磁気シート＋コロナ磁場

- メッシュ数：800x400x620
(電流シート、衝撃波を分解)



シミュレーション結果: over view

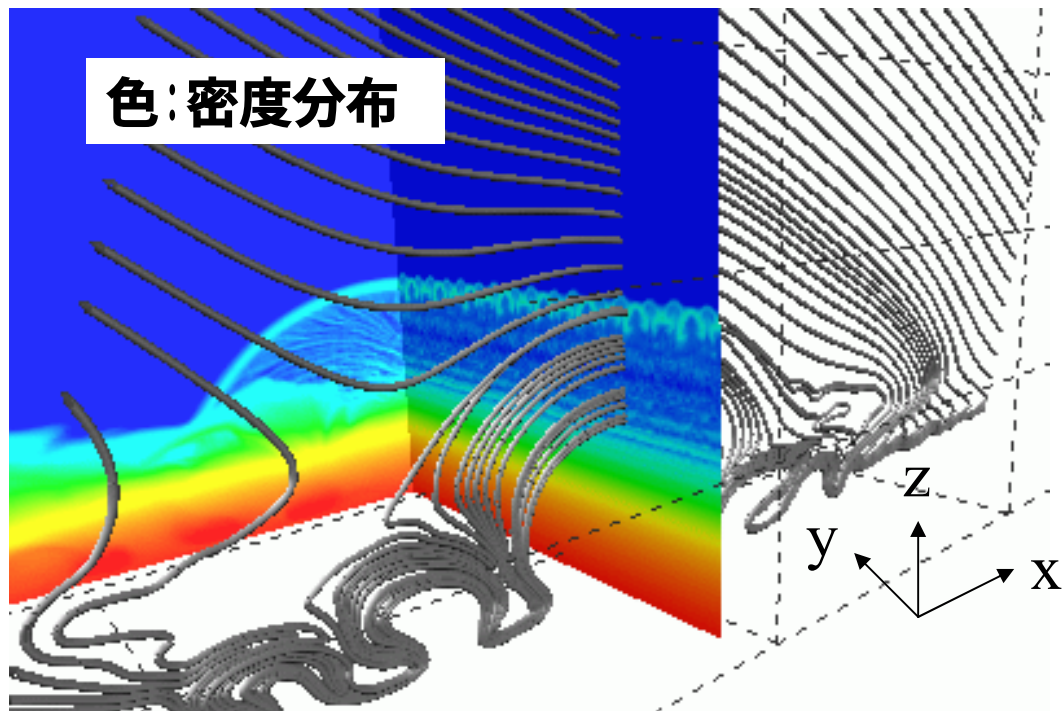
磁力線+磁場等値面 (青) + 温度分布
 $t=96$



- 磁気浮力で上昇=>コロナ磁場とリコネクション
- =>ジェット発生、加熱

磁力線時間発展

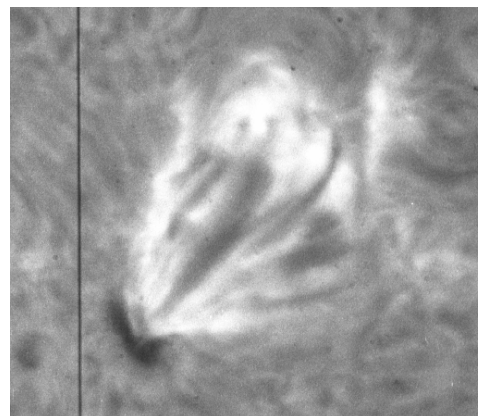
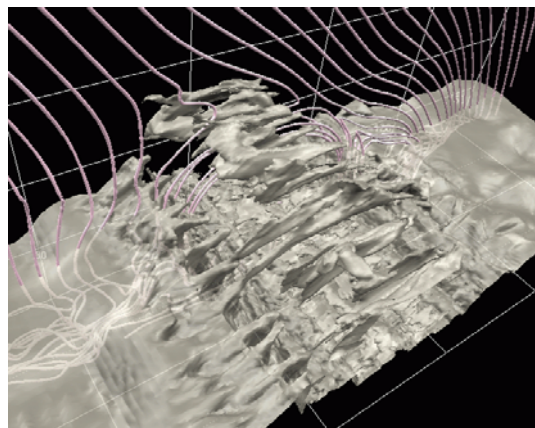
レイリー・テイラー不安定による構造形成



・浮上磁場の頂上: top-heavyになる=>レイリー・テイラー不安定

・磁場を曲げる方向は安定化=>フィラメント構造

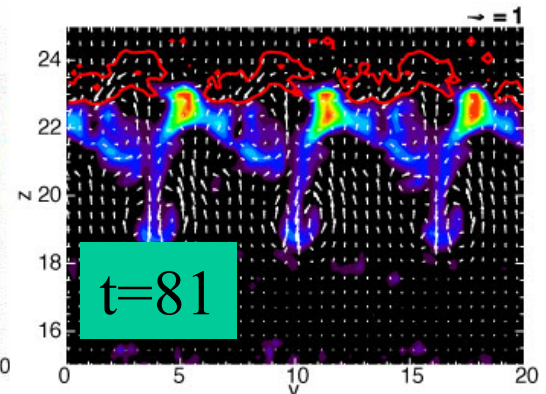
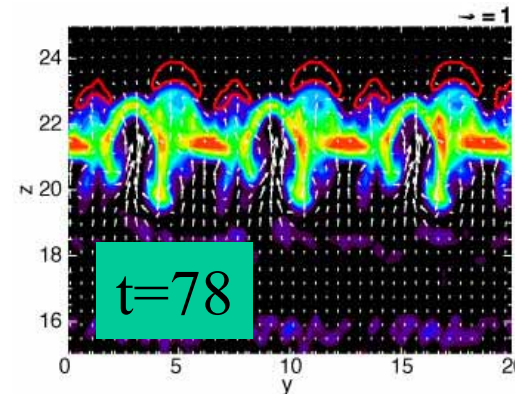
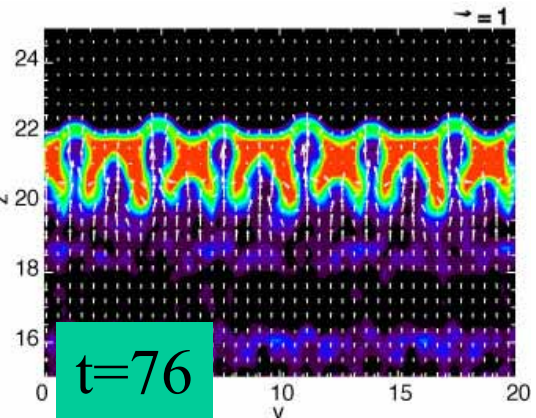
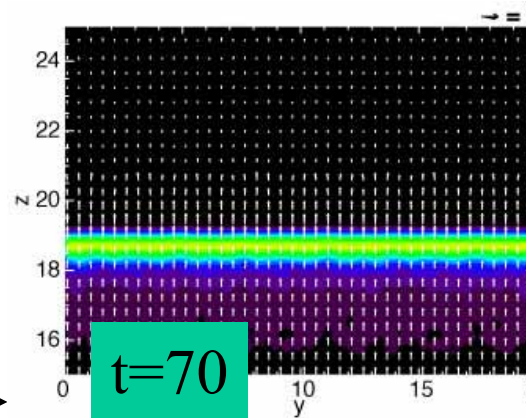
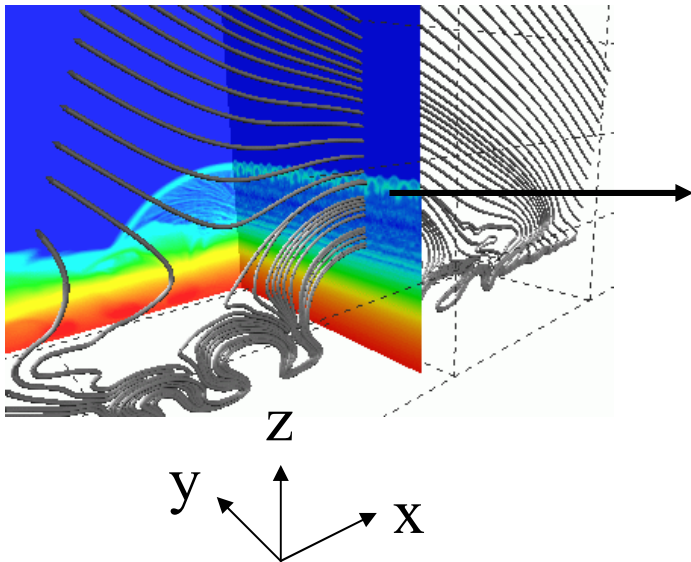
密度等値面



H α アーチ
フィラメント

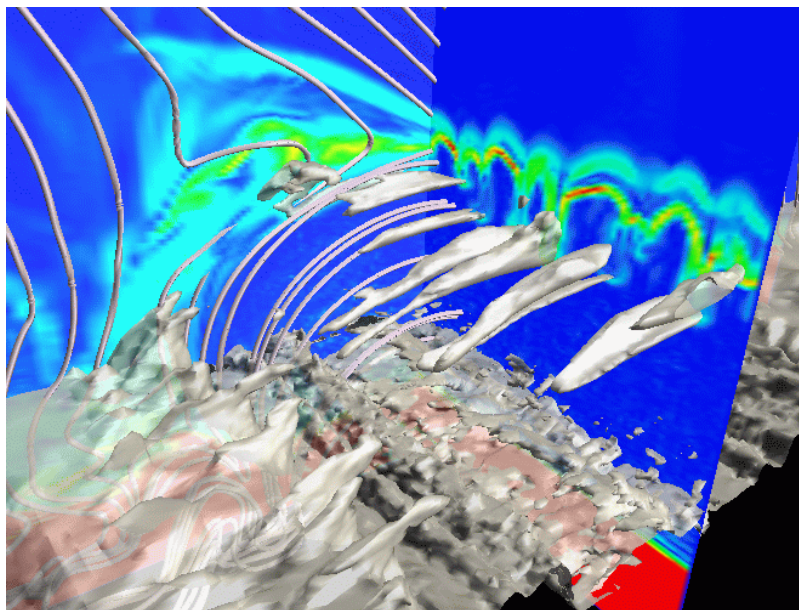
レイリー・テイラー不安定の時間発展

浮上磁場中央部の yz 平面における
密度の時間変化. $\Rightarrow$

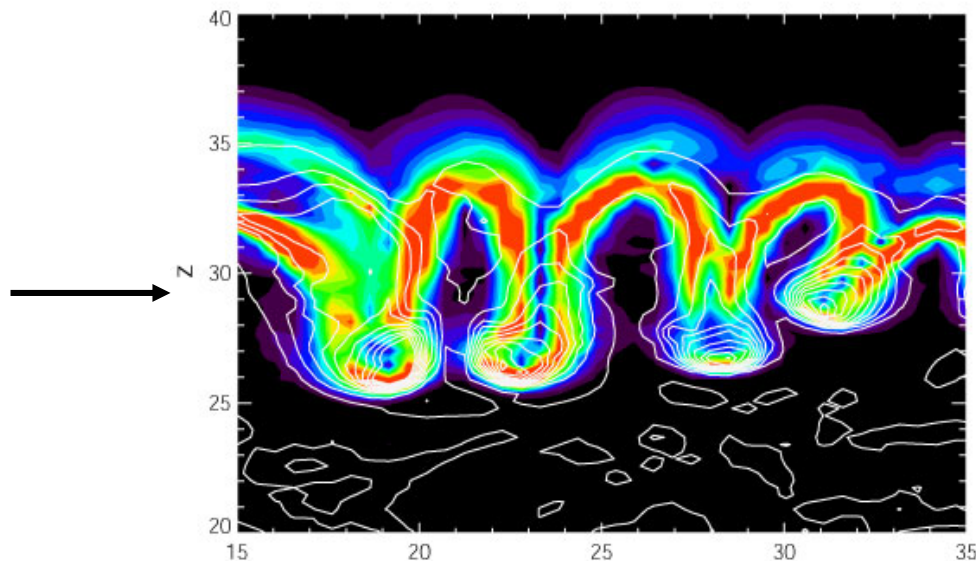


- ・小さい構造が先に発展 (線形段階)
- ・非線形効果で大きな構造ができる
- ・マッシュルーム構造を形成

フィラメント状電流シートの形成

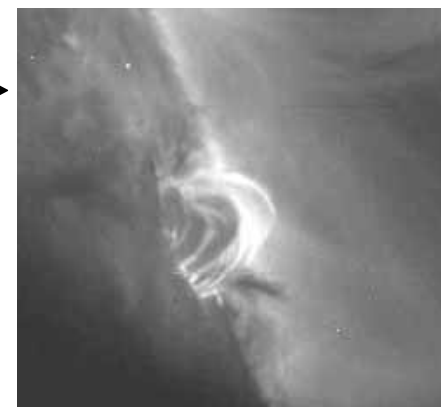


密度等値面と電流分布

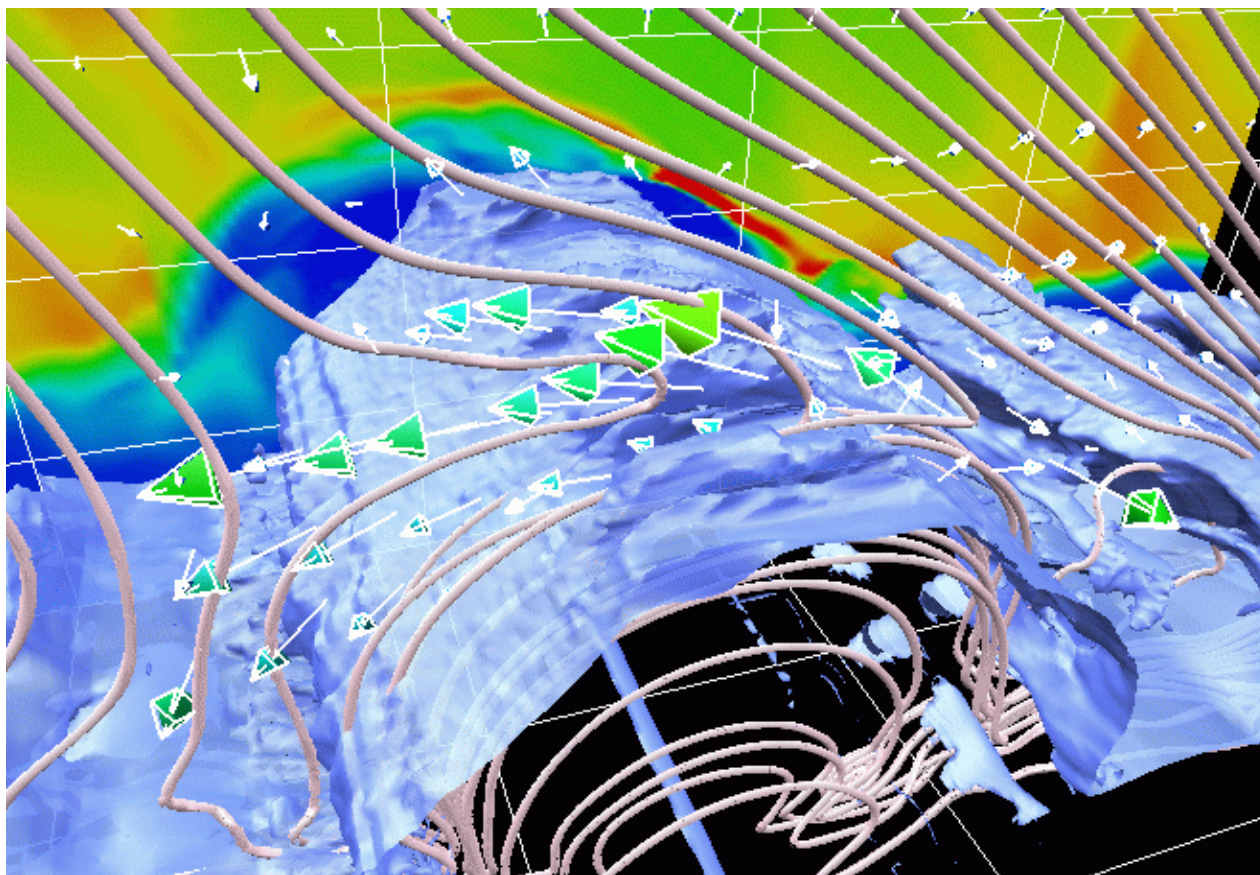


電流密度 (カラー) とガス密度分布 (コントア) の断面

- ・レイリー・テイラー不安定による磁場の変形=>密度の大きいフィラメント周囲に電流シート形成
- ・電流シートの散逸=>非一様なコロナ加熱？

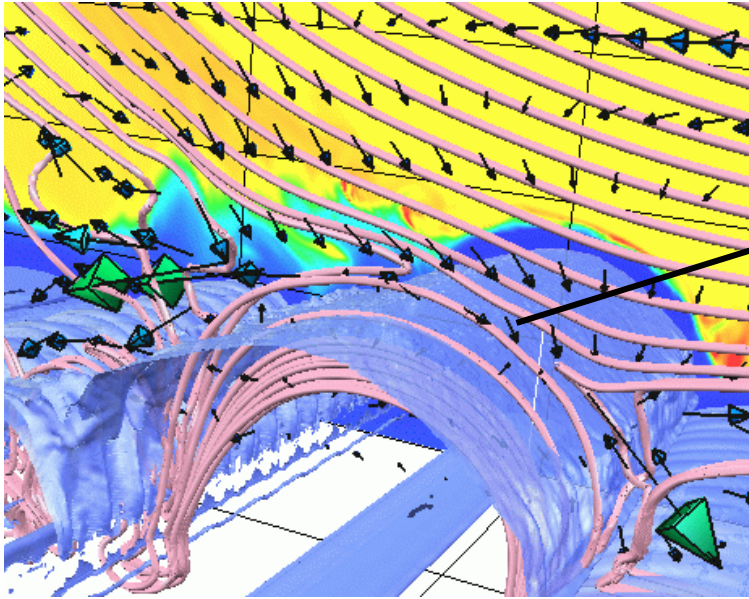


3次元フィラメント構造の中で リコネクションはどのようにおきるか？

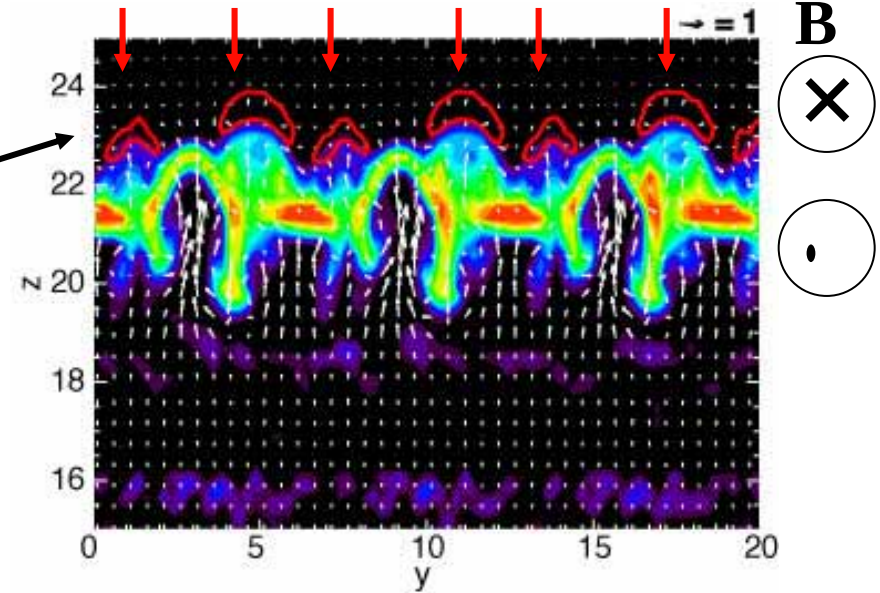


磁場等値面 (青)、磁力線、速度場、温度分布 (側面)

パッチ状リコネクション



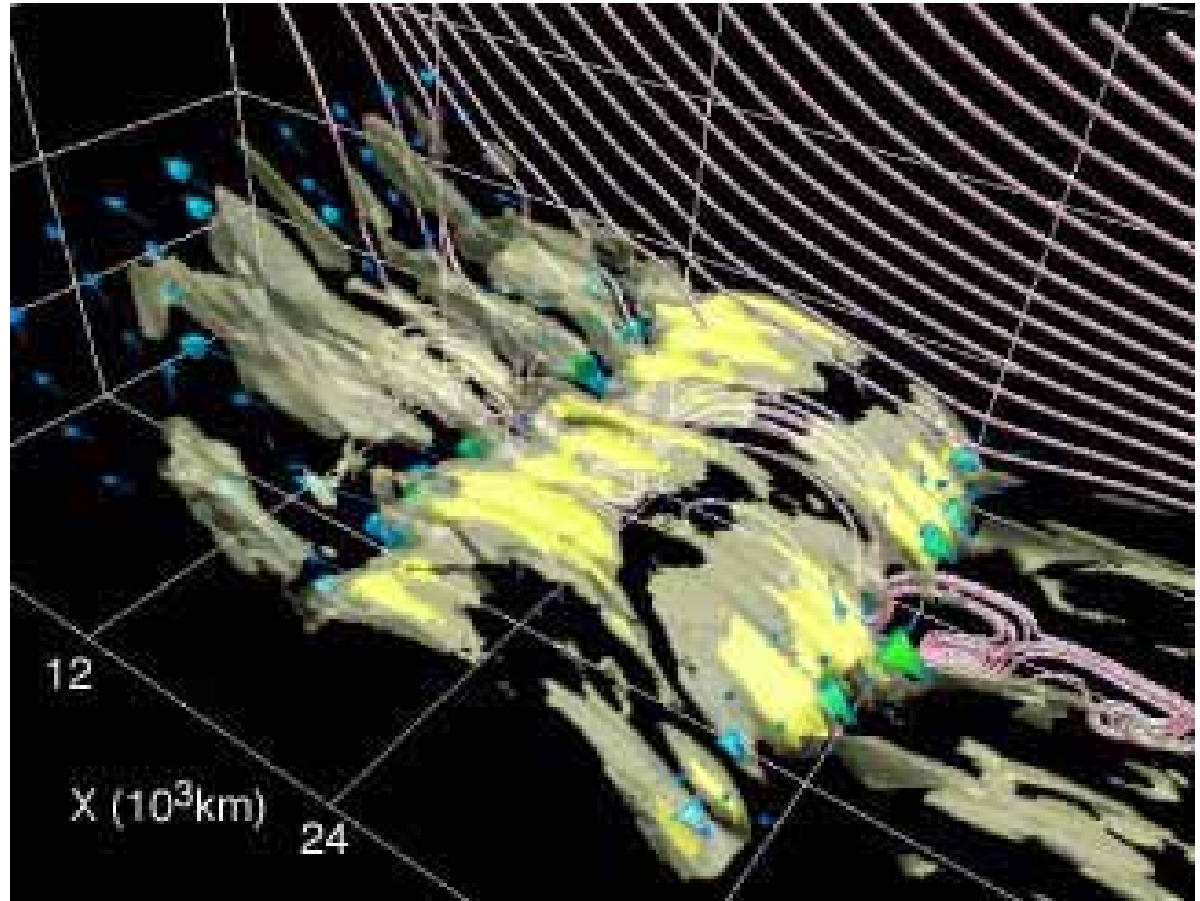
異常抵抗分布



- ・レイリー・テイラー不安定による上昇部分＝電流大、ガス密度小
⇒ 異常抵抗が局所的に発生
⇒ 速いリコネクションがパッチ状に起きる
- ・リコネクション点への流入流がさらにレイリー・テイラー不安定の発展を促進⇒非線形不安定

リコネクションジェット

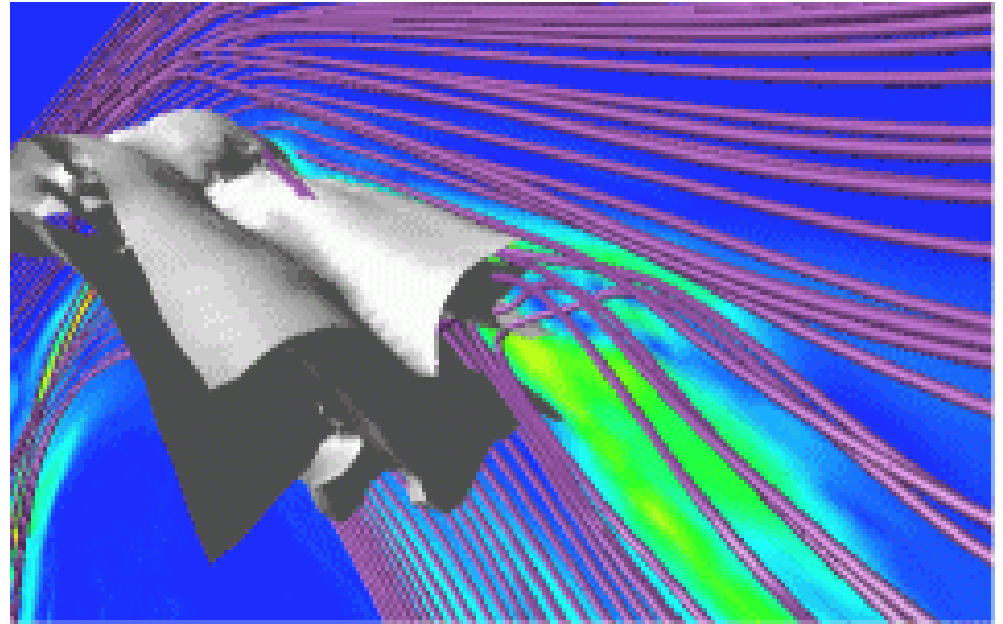
$|V|=6$ (黄色) と
 $|V|=12$ (半透明) の
等値面



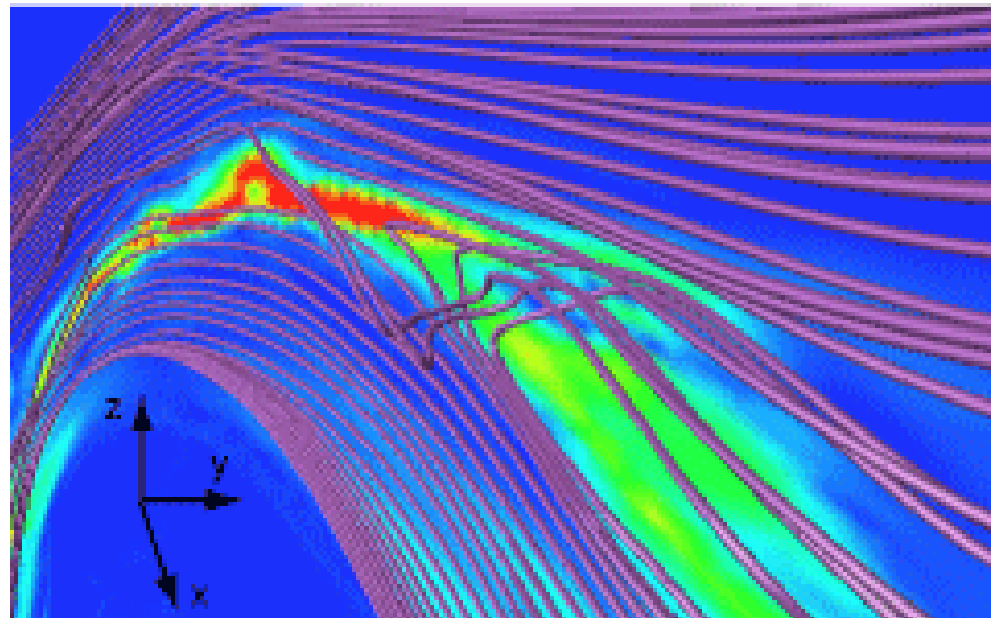
- ・リコネクションがパッチ状に発生するので、リコネクションジェットがいくつも出る

スローショックの構造： コーン状

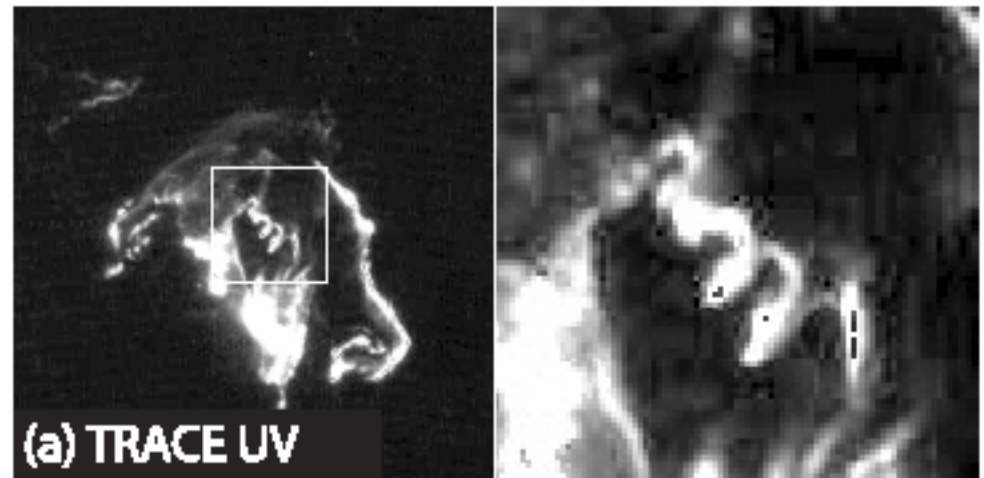
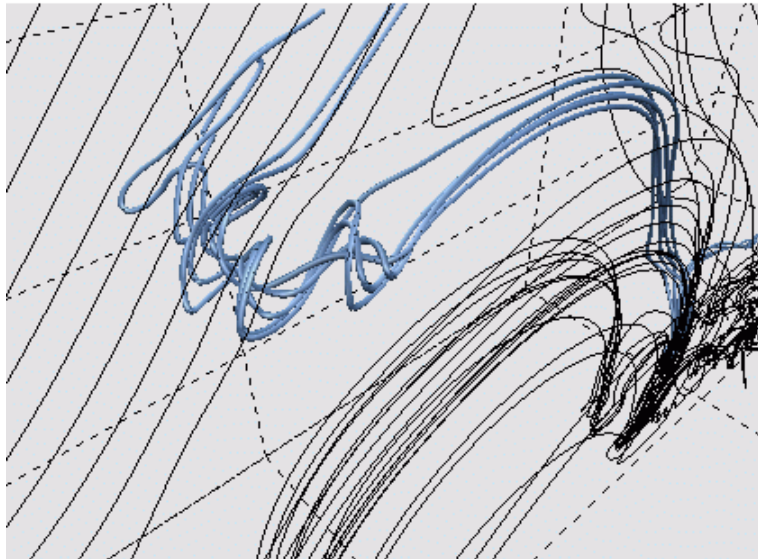
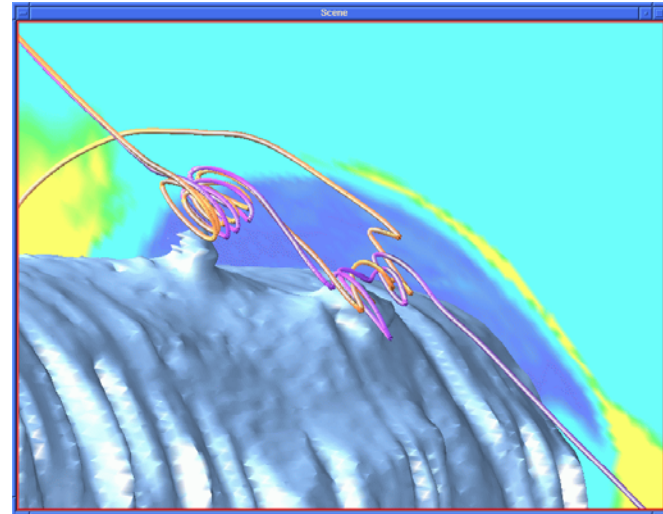
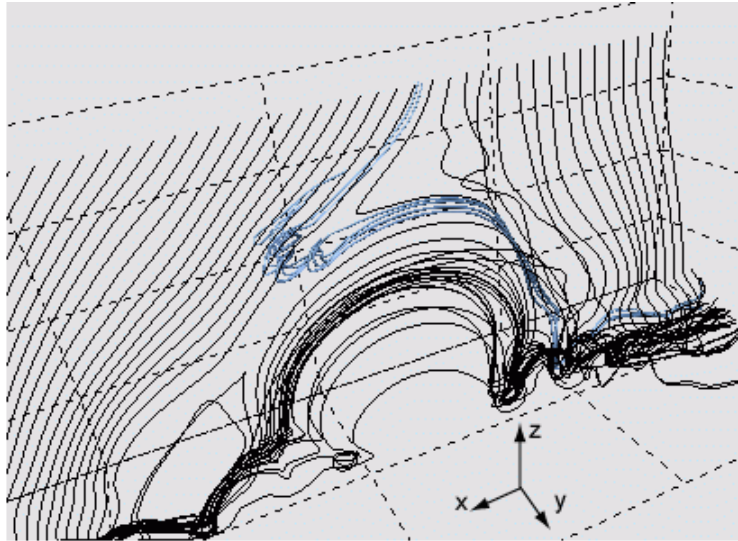
磁力線＋電流分布 (色)
＋電流等値面 (ショック面)



電流等値面無しの図



ヘリカルプラズマモード



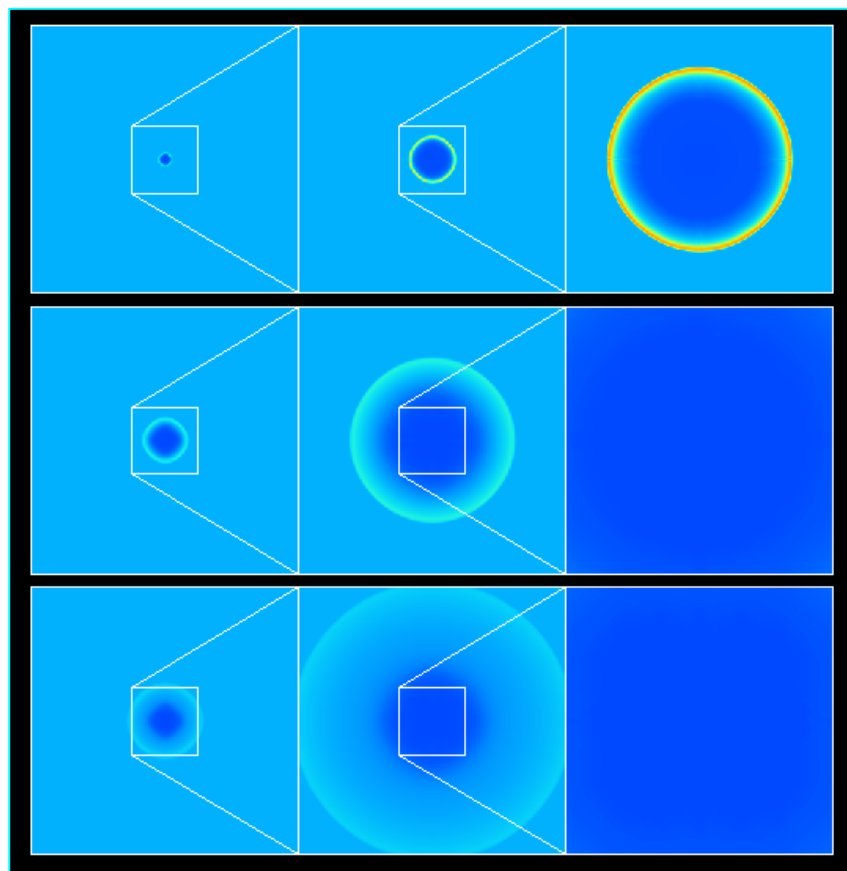
浮上磁場シミュレーションのまとめ

- レイリーテイラー不安定によるフィラメント構造形成
- フィラメント状電流シート形成、非一様なコロナ加熱
- レイリーテイラー不安定と異常抵抗のカップルによるパッチ状リコネクション (非線形不安定)
- 密度非対称なリコネクションではいつも起こる可能性あり。パッチ状リコネクションはユニバーサル？
- multiple jets発生、ヘリカルプラズモイド

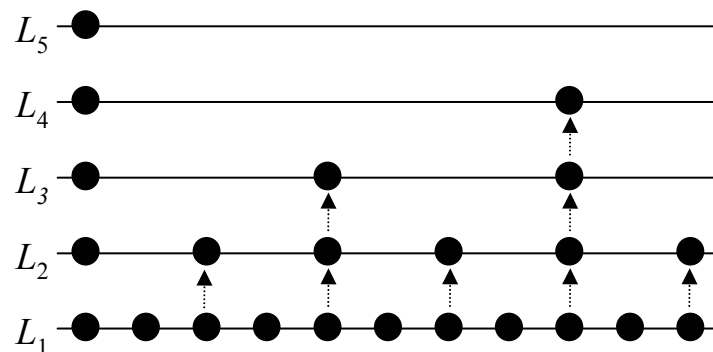
現在進行中のプロジェクト

- **多層格子シミュレーションコードの実装**
 - 多層格子流体コードAFD4
 - 磁気流体シミュレーションコードの多層格子化
- **降着円盤とジェットの数値実験**
 - ブラックホール降着円盤の時間変動
 - 降着円盤とジェットの連結シミュレーション
- **粒子・流体系結合シミュレーション**
 - Dark Matter + プラズマ (銀河・銀河団シミュレーション)
 - 高エネルギー粒子+プラズマ (ジェット中の非熱的粒子の生成)

多層格子流体コードAFD4の実装



Parallel Nested Grid



$$N_{\text{grid}} = 512 \times 512 \times 512$$

$$N_{\text{PE}} = 4 \times 4 \times 4$$

$$N_{\text{level}} = 5$$

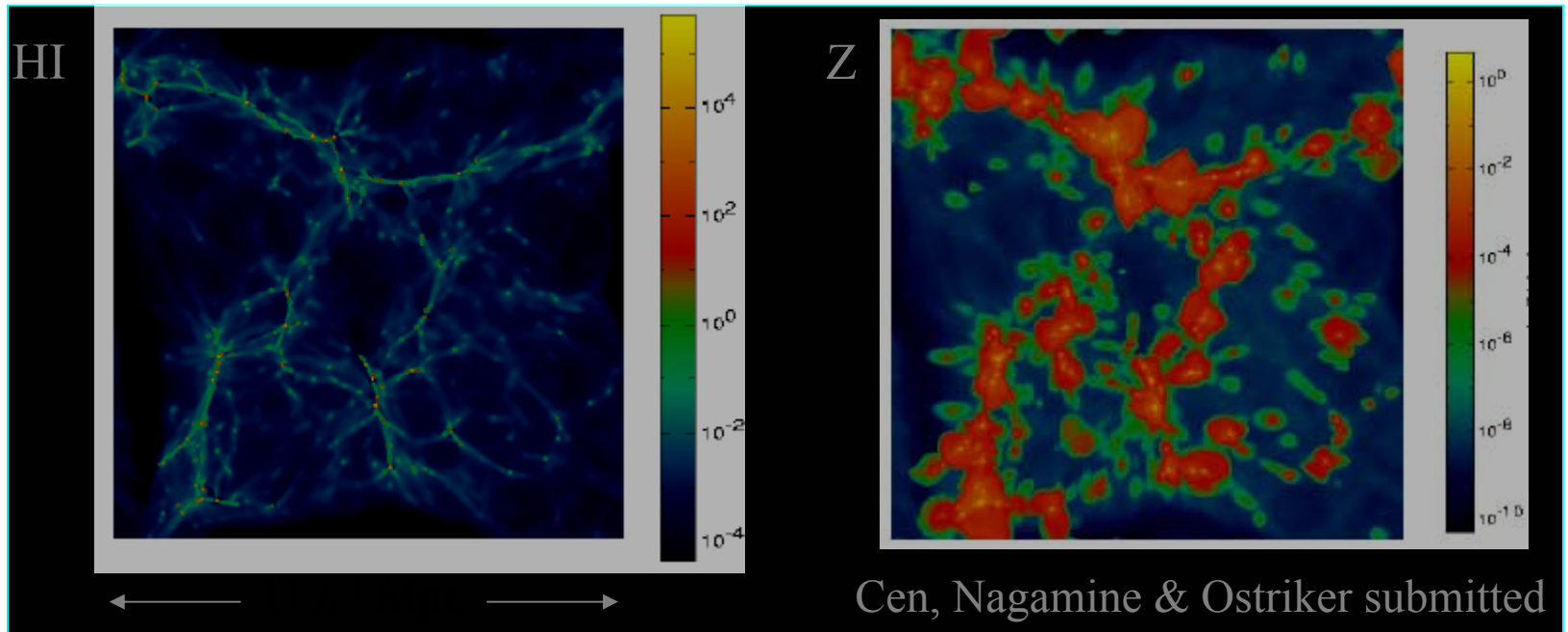
21 hydro step / 1 system step

15 mapping step / 1 system step

Elapsed time : 30.82 sec / system step

Communication time : 1.874 sec / system step

多層格子の必要性

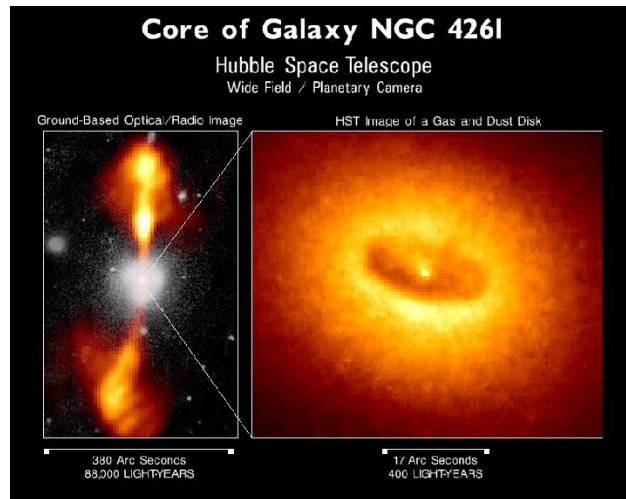


- How far from the production sites can metals be ejected into the IGM?
- How efficient mixing process of metals is?

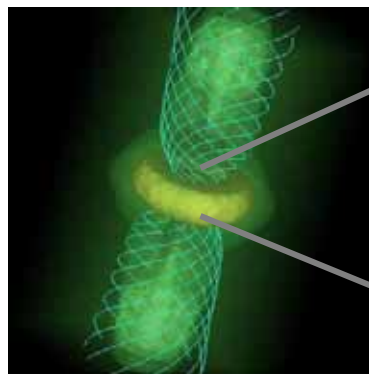


Resolution Problem

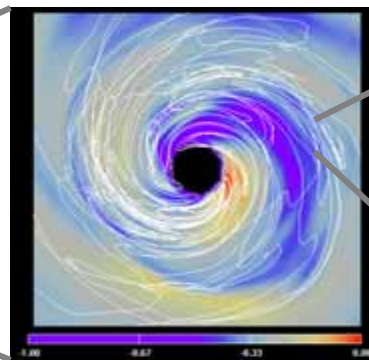
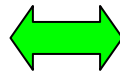
降着円盤とジェットのスミュレーション



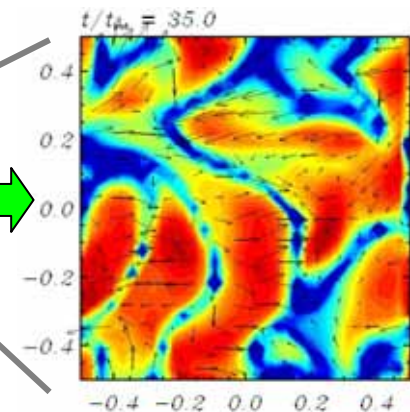
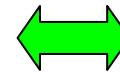
T.Matsudaらによる連星系ブラックホールシミュレーション



宇宙ジェット

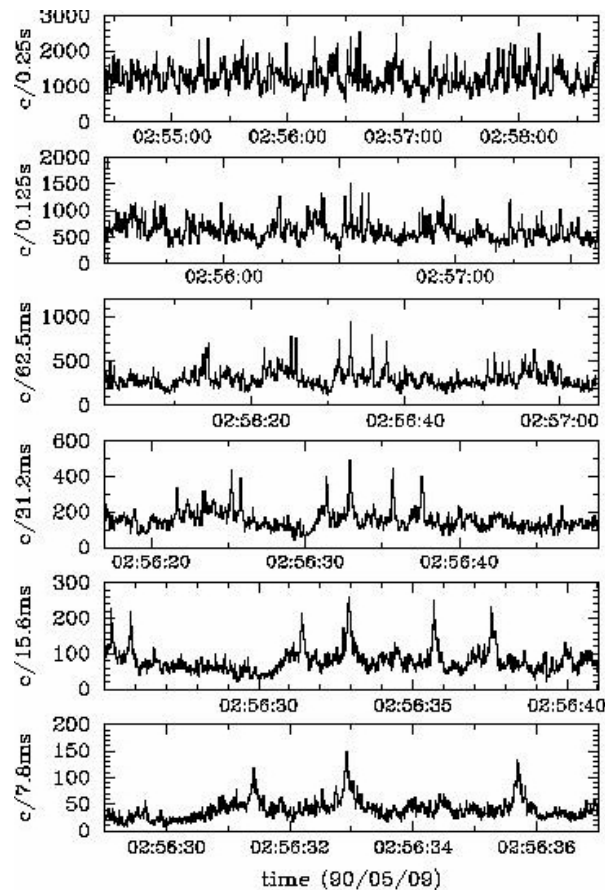


降着円盤

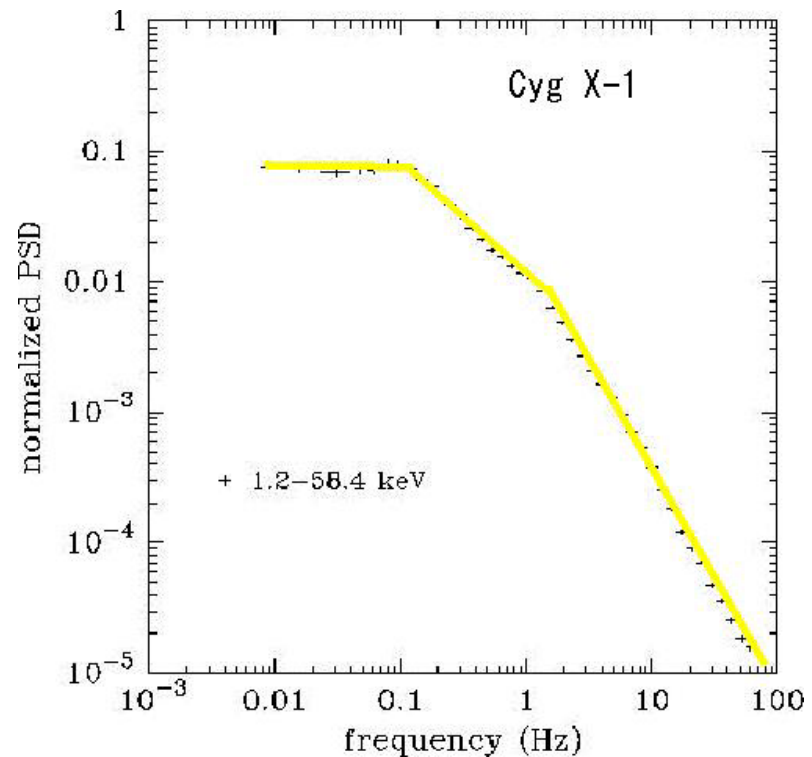


磁気乱流

ブラックホール候補天体のX線時間変動 フラクタル的時間変化とX線フレア

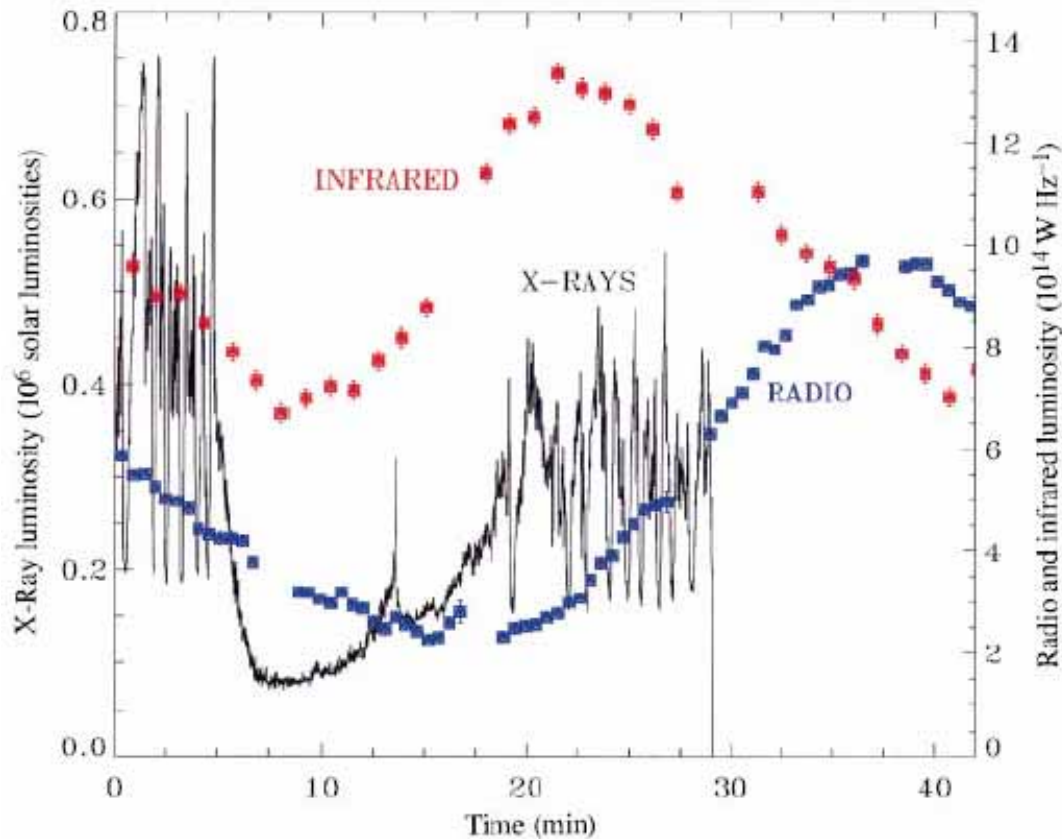


Negoro (1995)

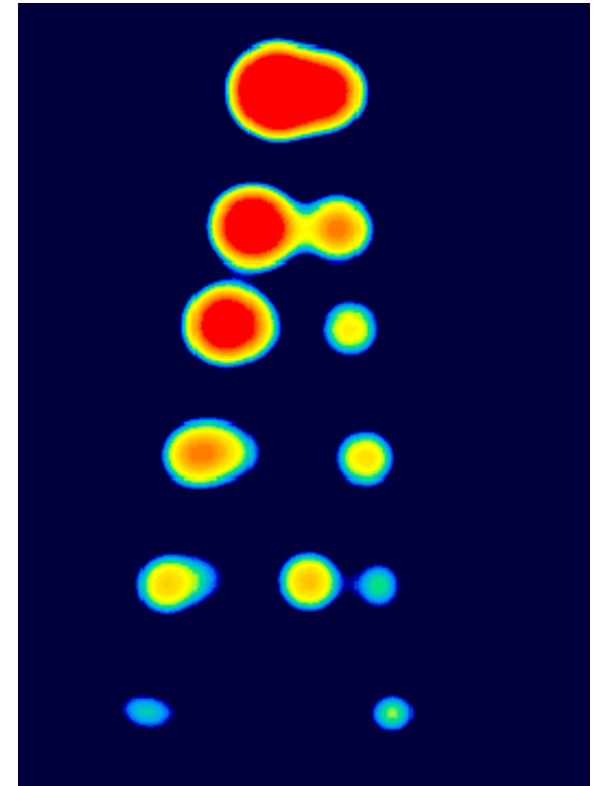


Cyg X-1の時間変動 (左図) と
時間変動のパワースペクトル (上図)

ブラックホール候補天体の状態遷移 マイクロウェーサー GRS1915+105

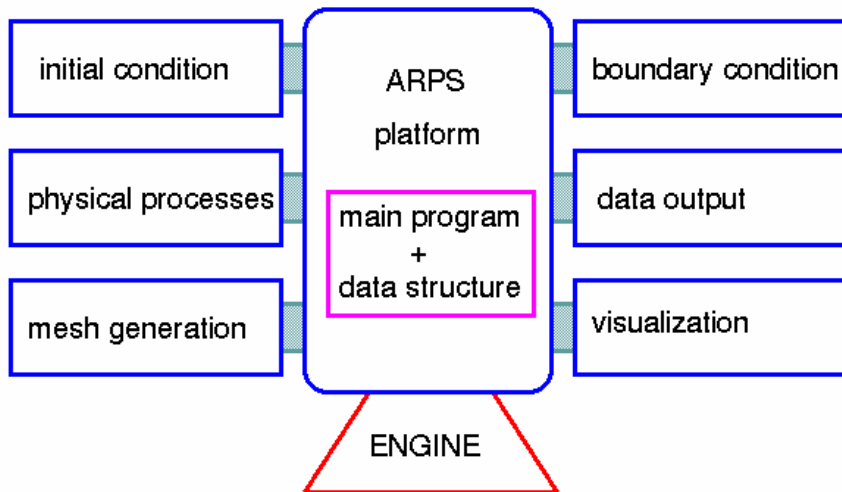


Time variation in X-ray, IR, and Radio (Mirabel and Rodriguez 1998)



Radio Map (Mirabel et al. 1994)

降着円盤シミュレータ (ACT-JST プロジェクト1999)



Astrophysical Rotating
Plasma Simulator (ARPS)

ブラックホール降着円盤の大局的 3次元MHDシミュレーション

(Machida and Matsumoto 2003 ApJ)

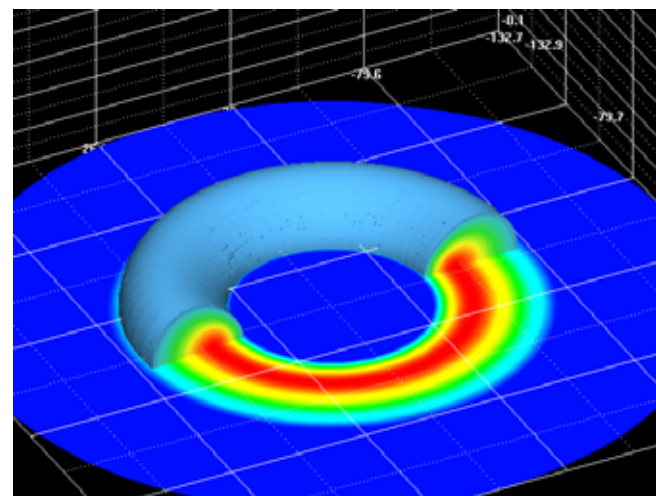
中心天体の重力ポテンシャル : $\Phi = -GM/(r-r_g)$

角運動量 : 初期に一定

$R=50r_g$ において

ガス圧/磁気圧 $= \beta = 100$

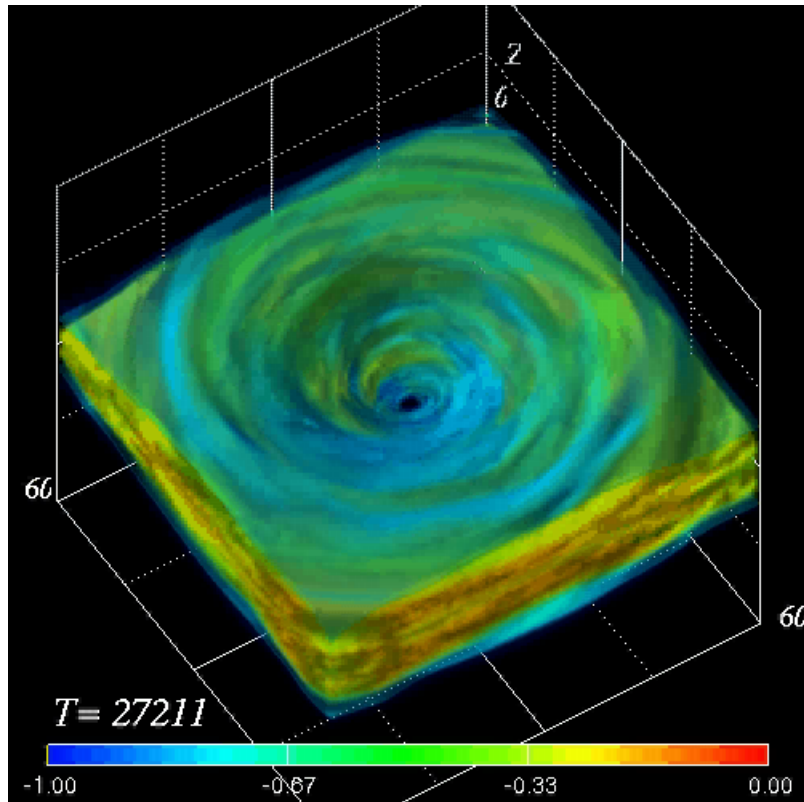
磁気レイノルズ数 $R_m = 2000, (J/\rho - v_c > 0)$



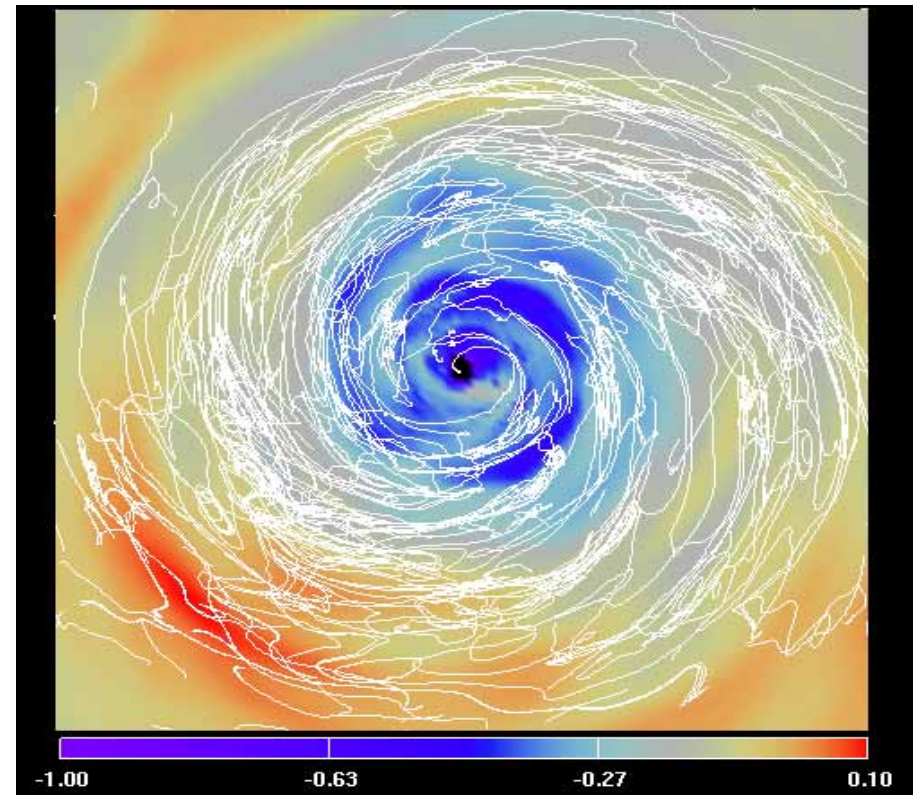
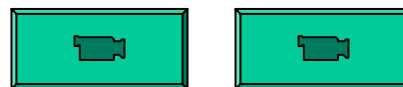
250*64*192mesh

異常抵抗 $\eta = (1/R_m) \max [(J/\rho) / v_c - 1, 0.0]^2$

降着円盤の形成

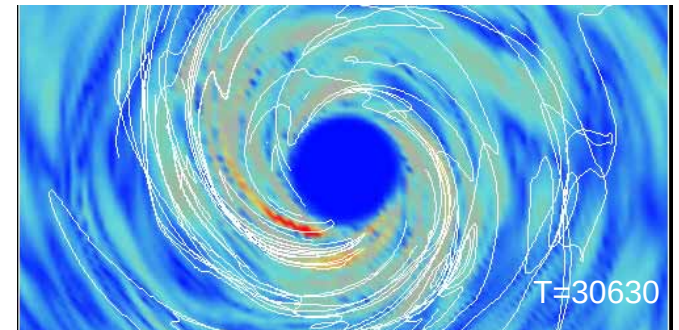
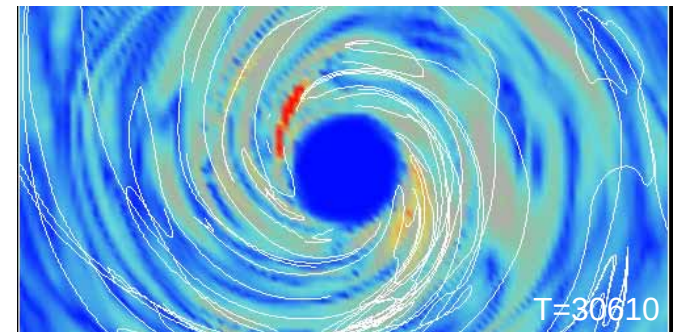
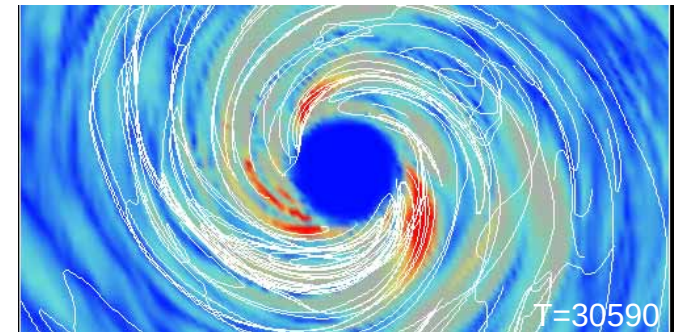
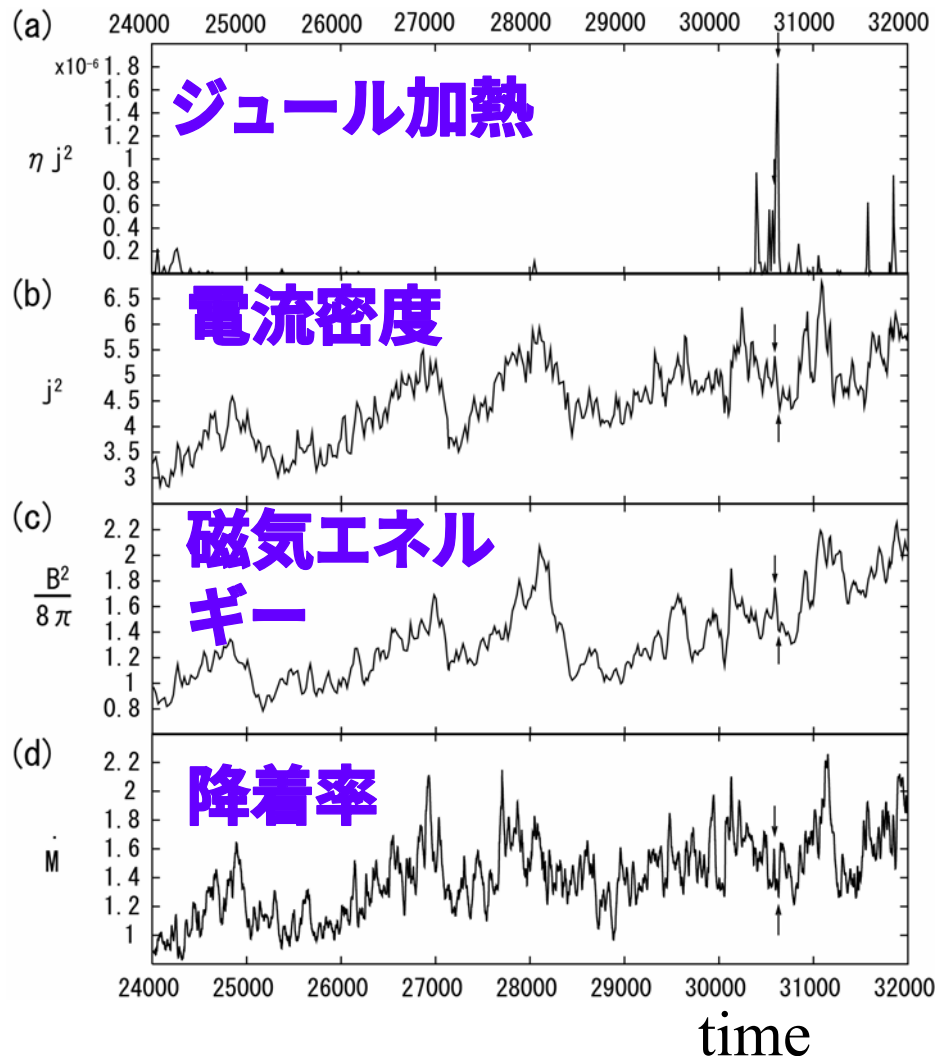


密度等値面



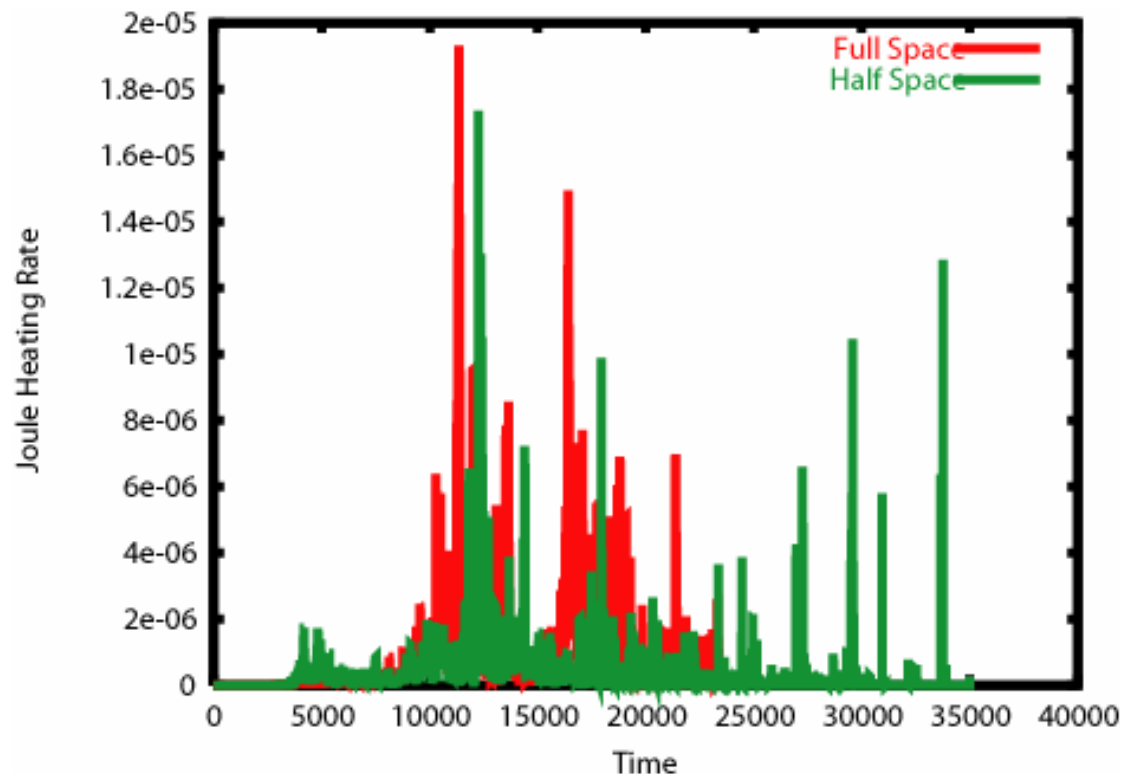
密度分布と磁力線

円盤内縁領域での磁気エネルギー解放



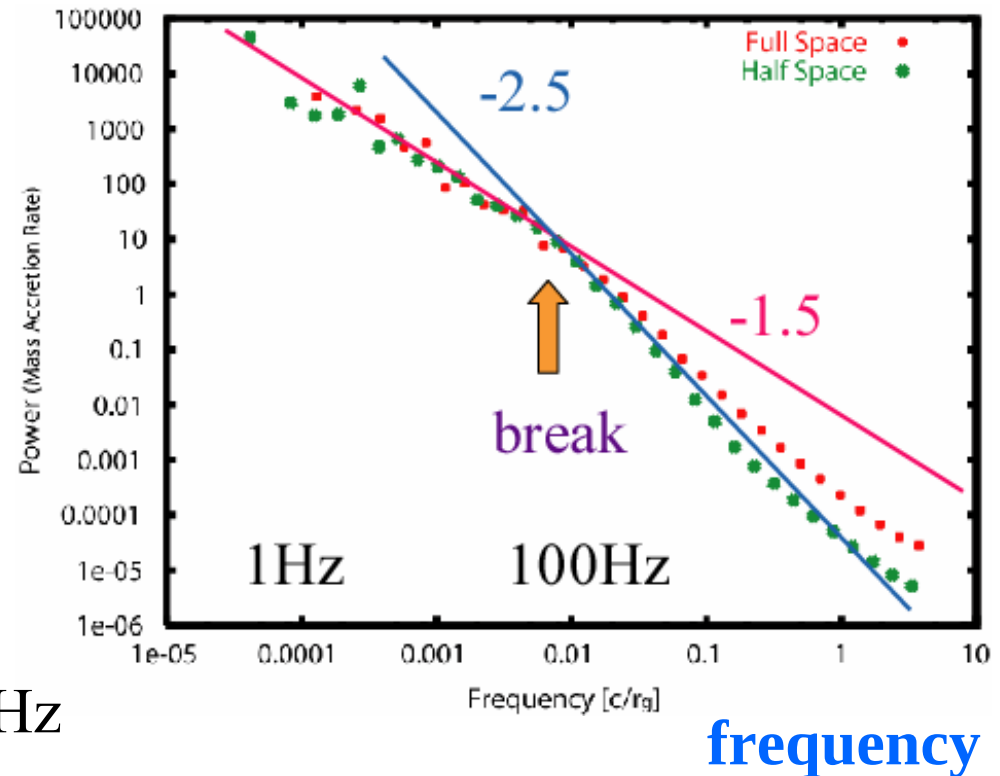
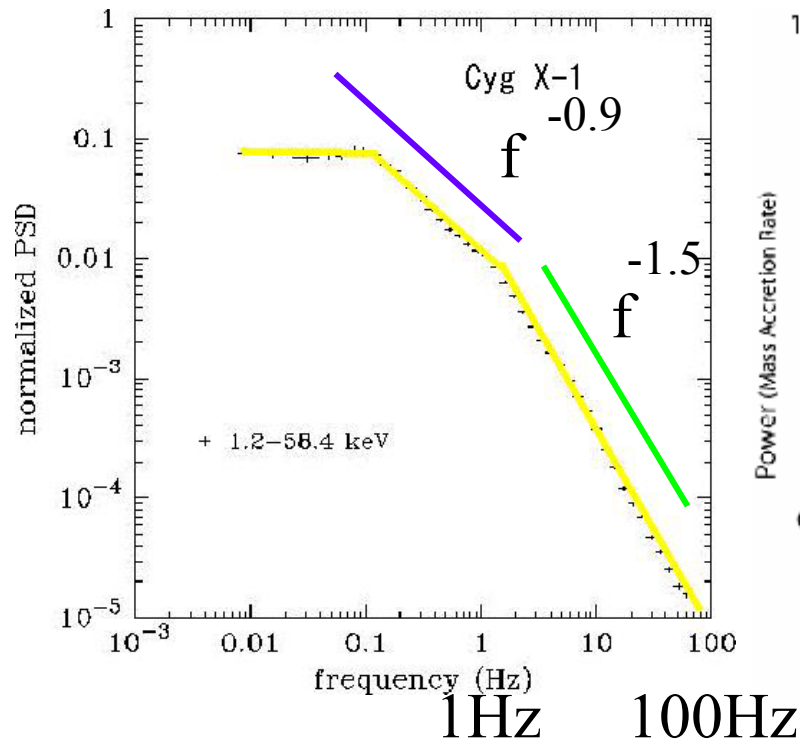
電流密度と磁力線の時間変化

間欠的大規模磁気エネルギー解放 現象 (フレア) の再現に成功



ジュール加熱率の時間変動

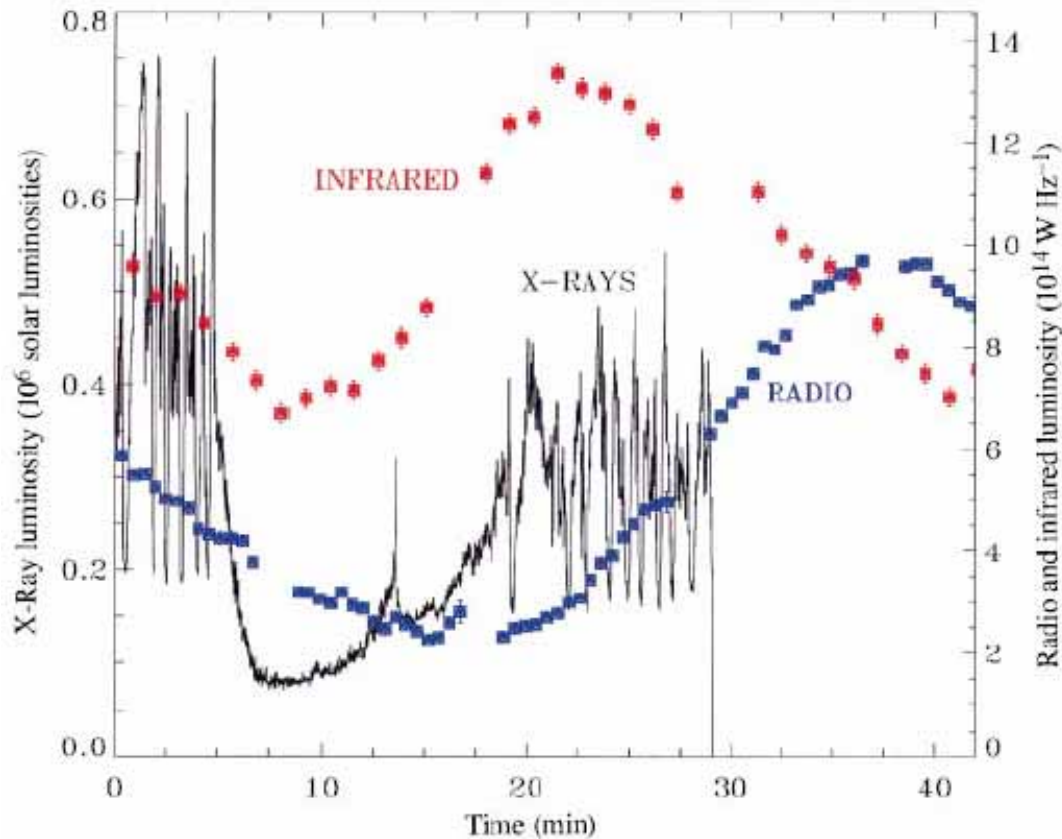
ブラックホール候補天体の時間変動パワースペクトル (PSD) を部分的に再現



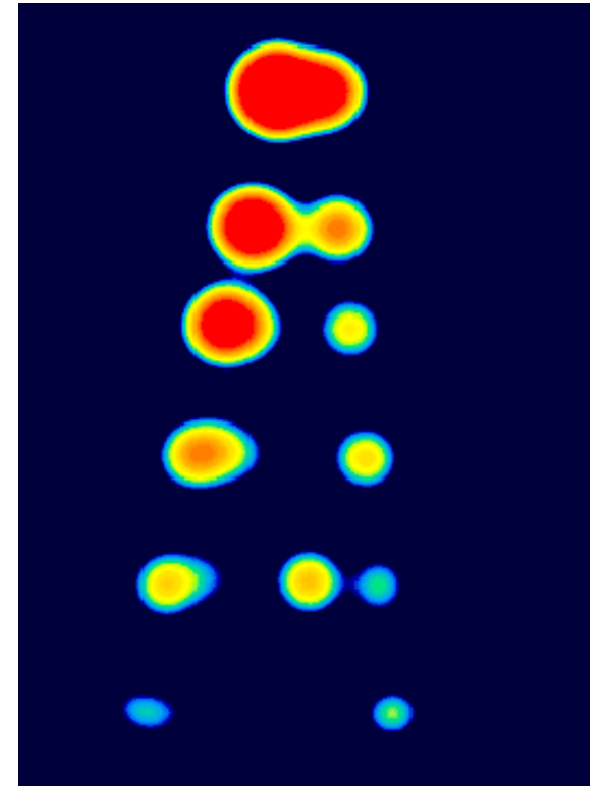
白鳥座X-1のX線時間変動の
パワースペクトル (PSD)

シミュレーション結果から求め
た降着率変化のPSD

さらに複雑な時間変動のメカニズム — 輻射効果を含めたシミュレーション —

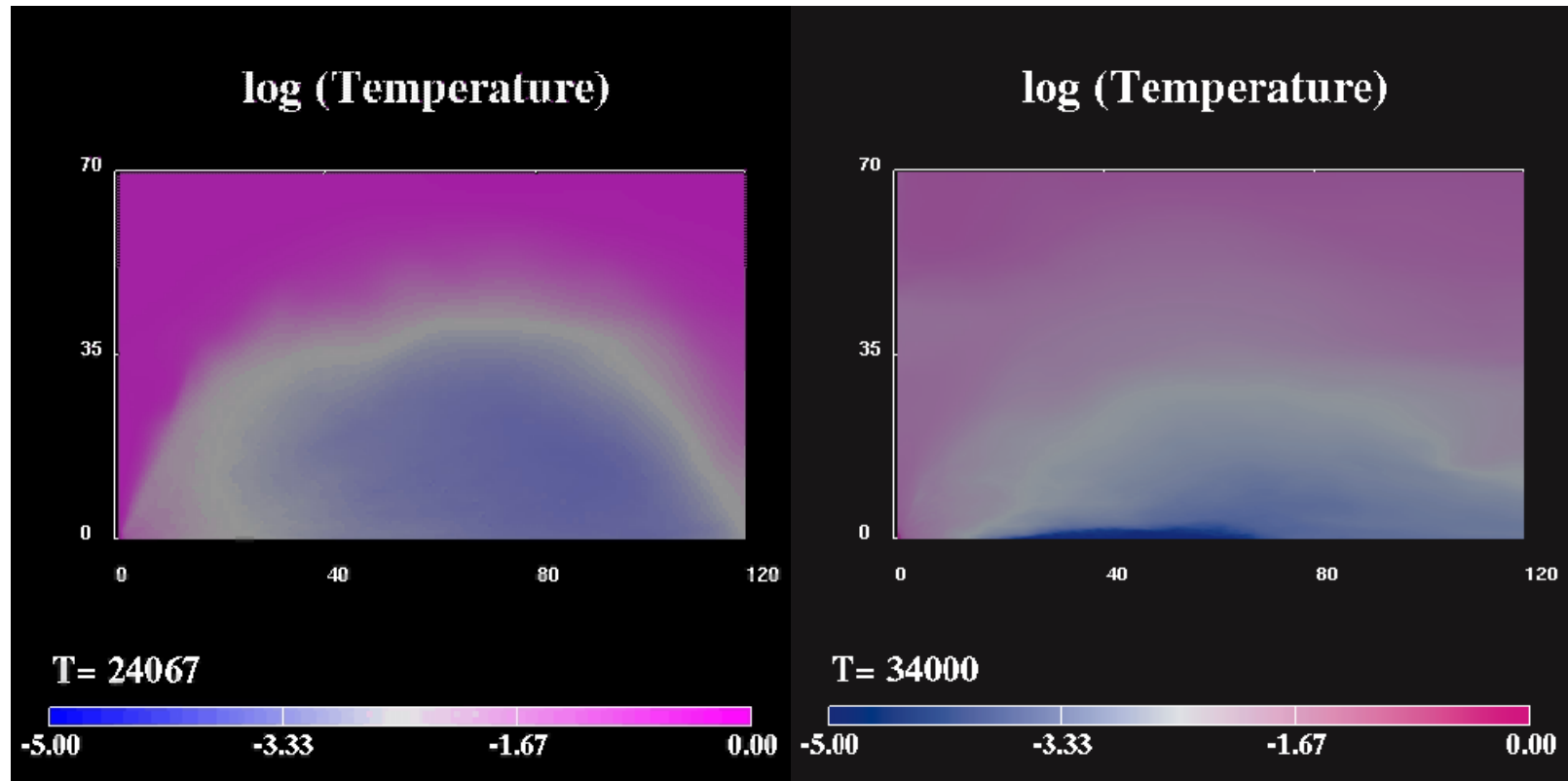


マイクロウェーサーの各種波長域
における時間変動 (Mirabel and
Rodriguez 1998)



状態遷移と連動した
ジェットの噴出

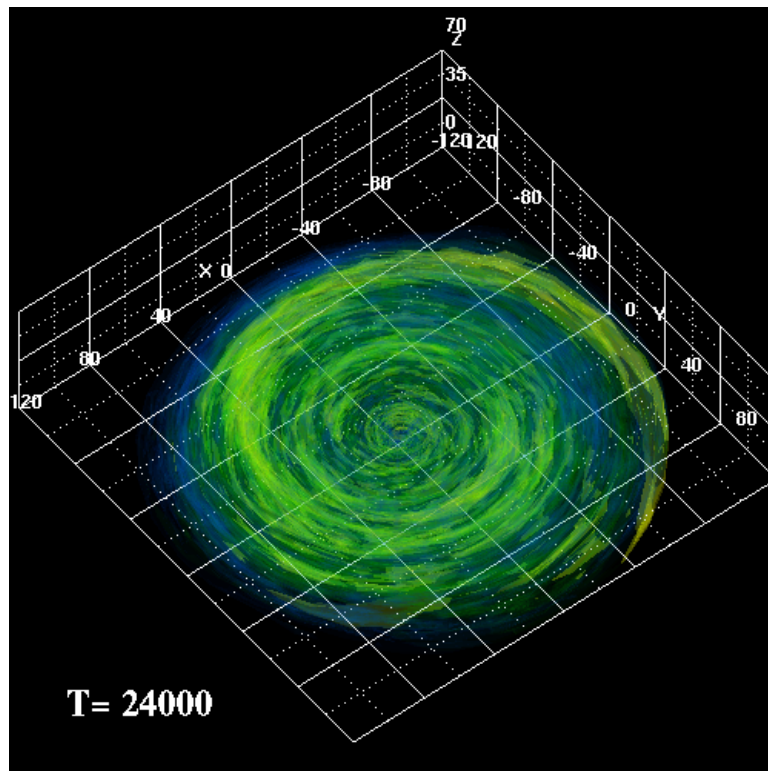
輻射冷却を含めたシミュレーション



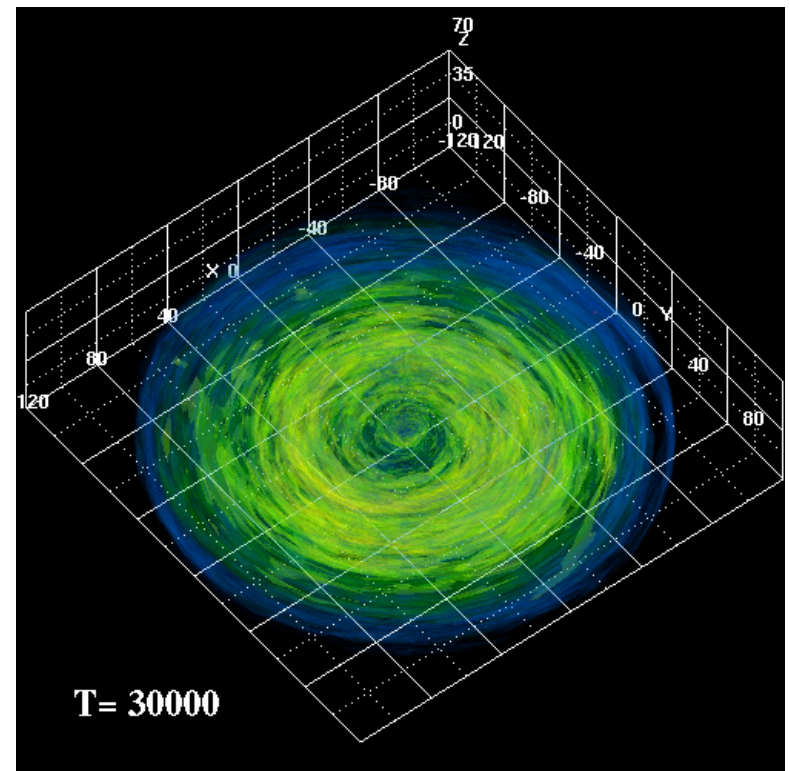
Before Transition

During Transition

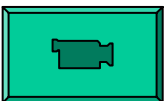
磁気圧で支えられた円盤の形成



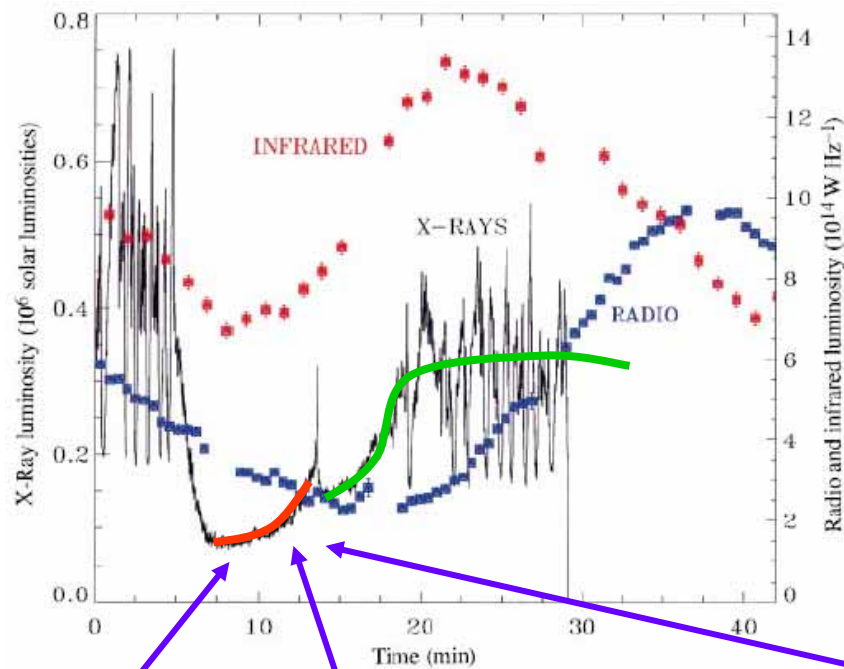
Before the transition



After the transition



マイクロウェーサーへの適用

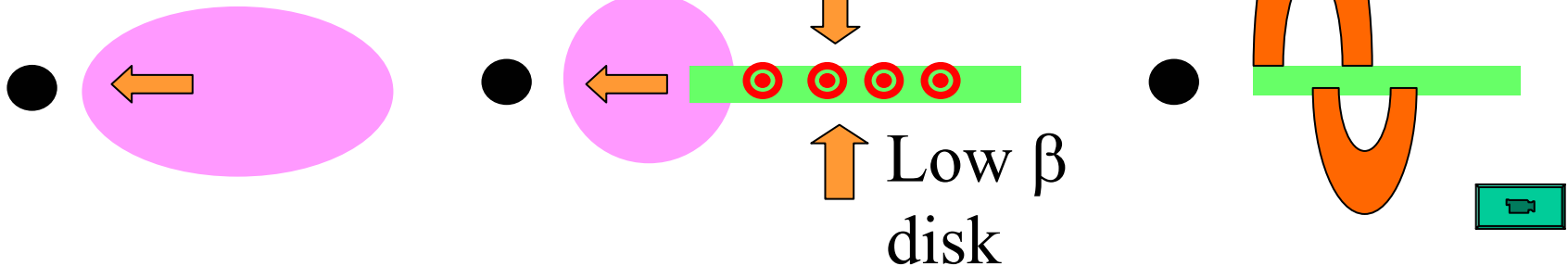


Ejection of
Plasmoids ?

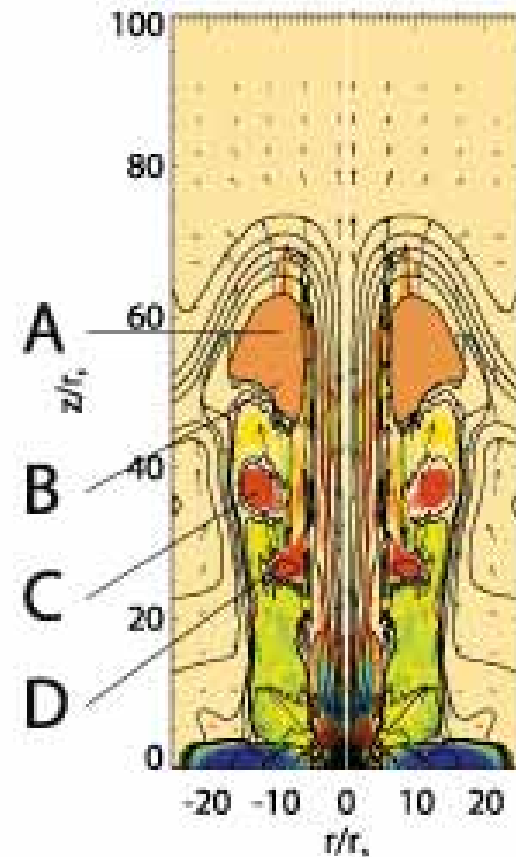
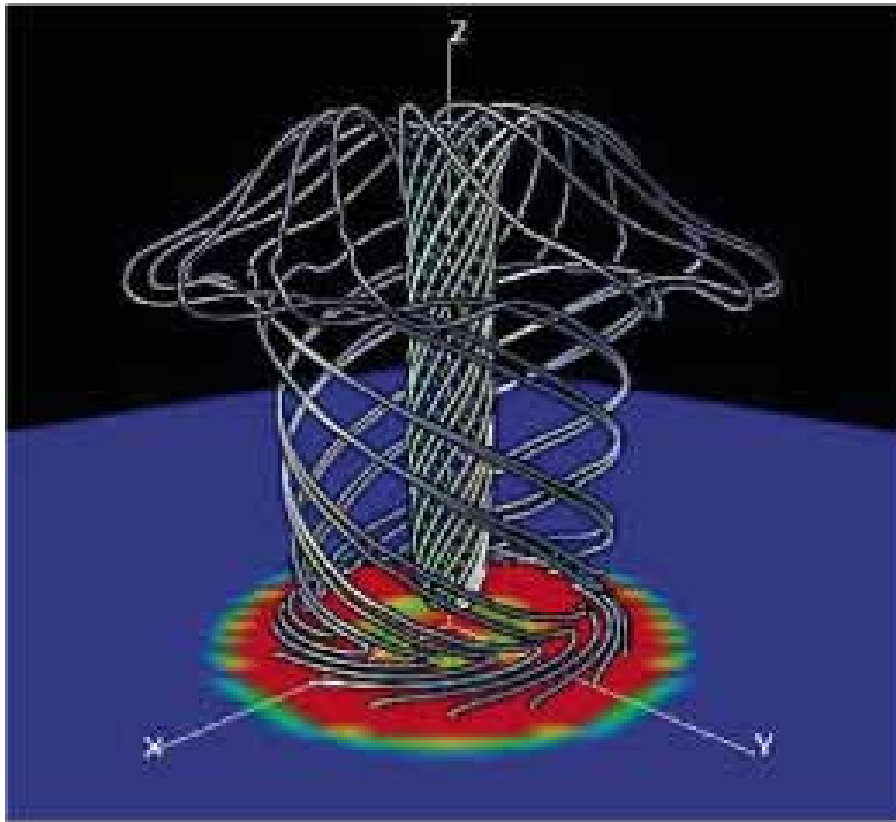
ADAF

Cool Down

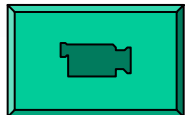
Low β
disk



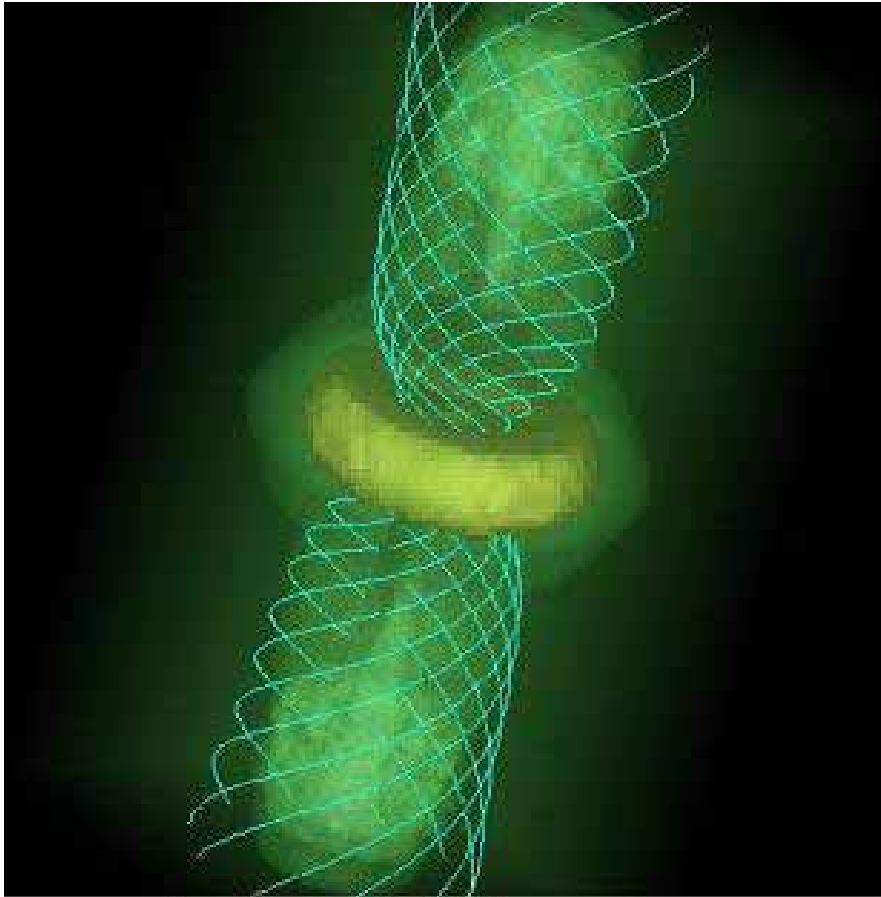
磁気タワージェットの形成と プラズモイド噴出



Kato, Hayashi, Matsumoto (2004)



降着円盤とジェットを同時に解く 高解像度シミュレーションが必要



円盤領域

- 256^3 メッシュ:
1000ノード時間
- 512^3 メッシュ:
10000ノード時間

ジェット領域

- 512^3 メッシュ
- 連結シミュレーション

まとめ

- 宇宙流体シミュレーションコードAFD2及び磁気流体コードCANSを地球シミュレータに実装して複数の階層（銀河＋超新星、太陽内部＋コロナ）を計算領域に含む3次元シミュレーションを実施した。
- ライマン α 輝線天体を再現
- 浮上磁場領域で観測されるアーチフィラメント、ジェットなどの形成機構を明らかにした。
- 今後、降着円盤とジェットの階層連結シミュレーション、粒子系とMHD系の結合シミュレーション、輻射流体シミュレーションなどを実施していきたい。