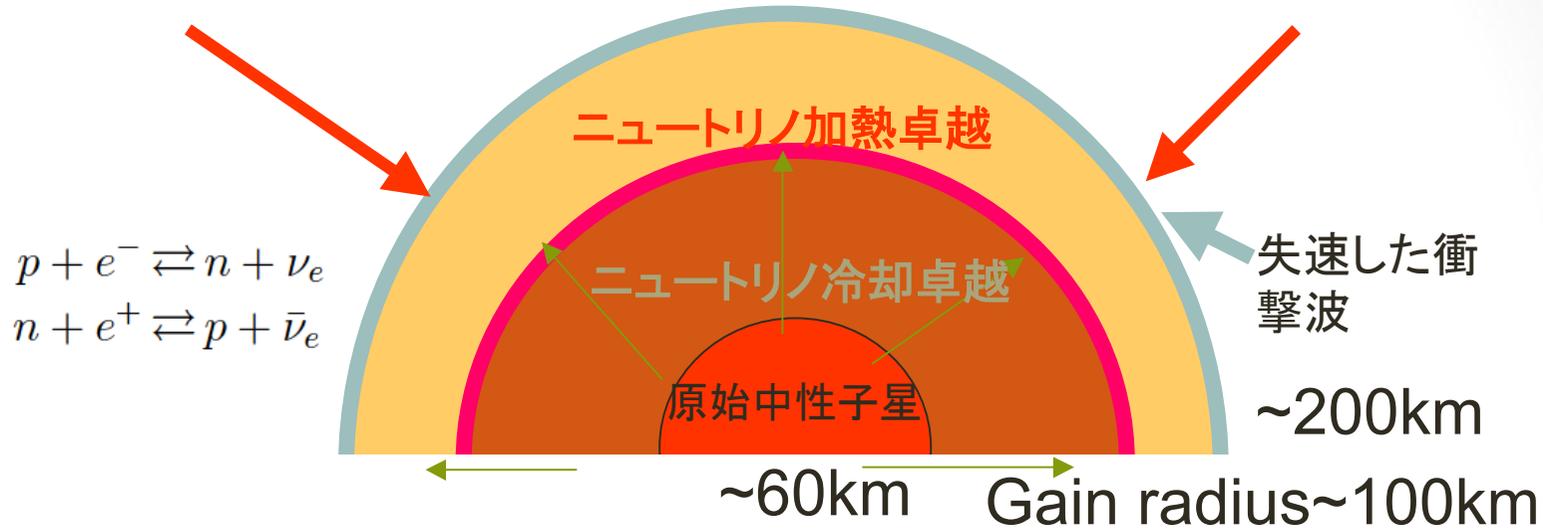


CfCAキユーー成果報告

# 超新星爆発パート

滝脇知也 固武慶

# 超新星の標準的爆発機構



Advection time scale:  
 ニュートリノ加熱領域を通過する時間

$$\tau_{\text{adv}}(t) = - \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} \frac{1}{v_r(r, t)} dr$$

>

Heating time scale:  
 ニュートリノ加熱領域での加熱時間

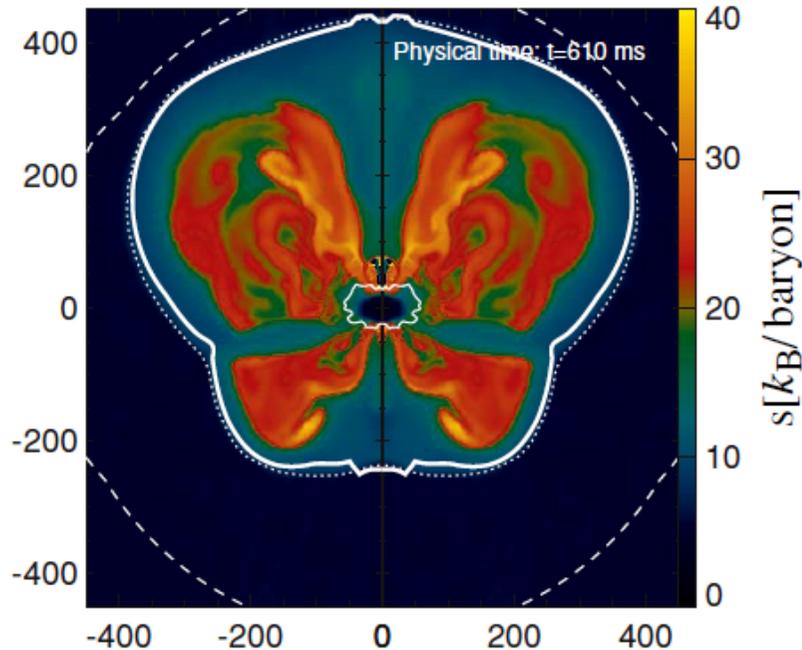
$$\tau_{\text{heat}}(t) = \frac{4\pi \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} \epsilon_{\text{bind}}^{\text{shell}}(r, t) \rho(r, t) r^2 dr}{4\pi \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} Q(r, t) r^2 dr}$$



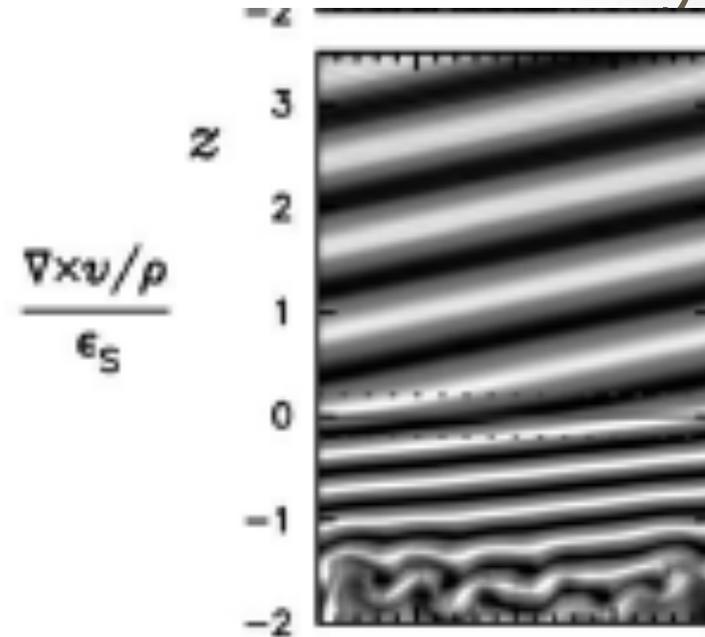
ニュートリノ加熱爆発

# SASI

## Standing Accretion Shock Instability



Marek and Janka 2009



Guilet et al. 2010

SASI: 衝撃波は球状の形状を保ってられない不安定性。

Advective acoustic cycleで渦と音波が衝撃波内で反射、増幅される

**流体の非球対称的な運動とニュートリノ輸送がこの問題を解く鍵**

# 先行研究と我々のメソッド

## ○先行研究

2Dでニュートリノ輸送をきちんと解く (Marek & Janka 2009, Suwa et al. 2010) or

3Dでニュートリノ光度を仮定する (Iwakami et al 2008, Nordhaus et al. 2010)

## ○本研究

ニュートリノ輸送を解いた上で3D計算をすることに成功。

## Method

流体: ZEUSMP 3次元球座標 非保存系 (or 保存系) 人工粘性

自己重力: 球対称重力 or ICCG or スペクトル法

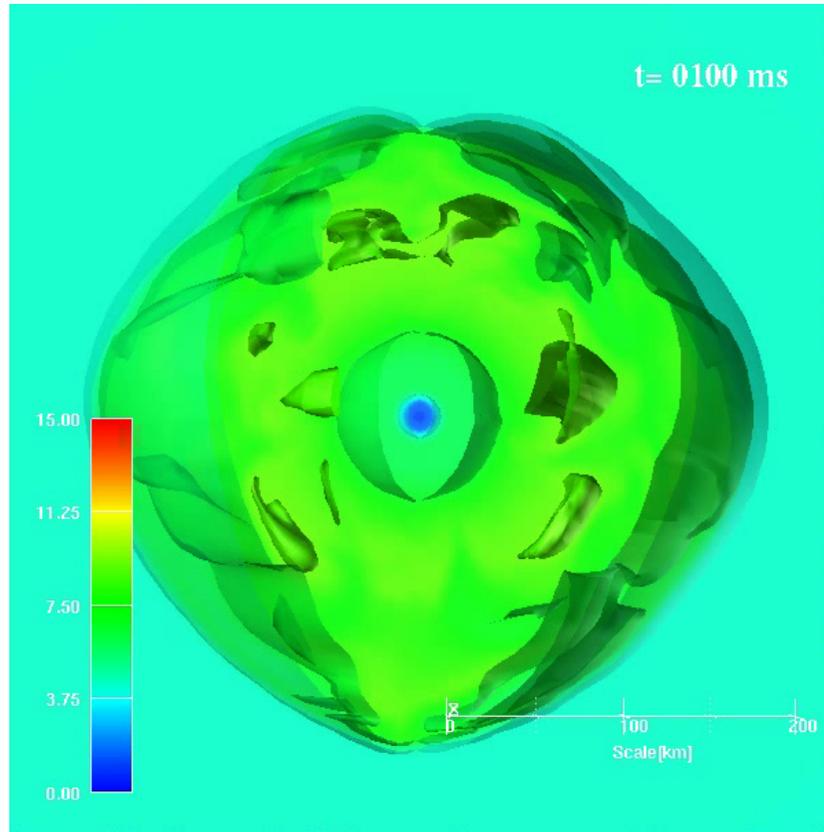
状態方程式: Lattimar and Swesty

マルチエネルギーニュートリノ輸送: IDSA(20bin)

Grid: 300(r)x64(theta)x32(phi)-256並列

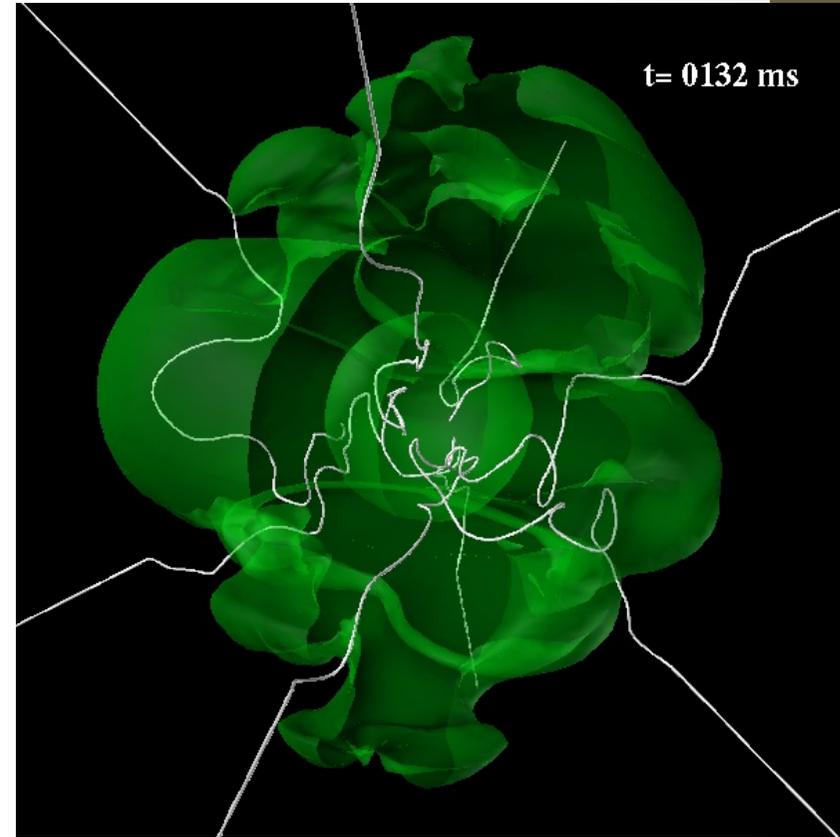
天文台CRAY XT4で2月計算コストがかかる

# 流体の運動



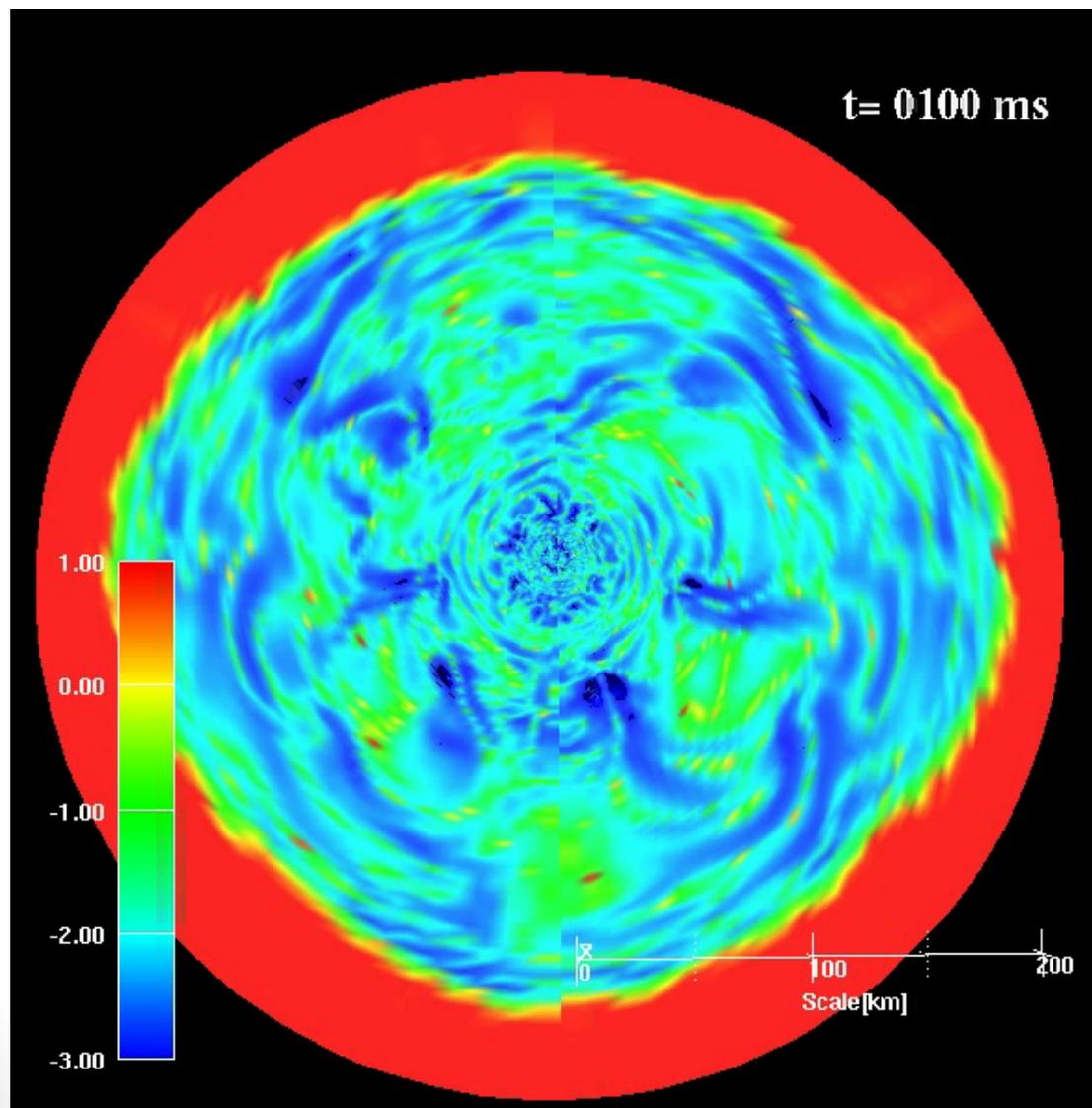
エントロピー

親星は無回転のZAMSで1.3太陽質量の星。  
バウンスから100ms後、SASIがnon-linearになっているフェイズに着目。  
衝撃波のところで流線が曲げられ回転しながら中心に向かって降着していく。



流線

# SASIの再現

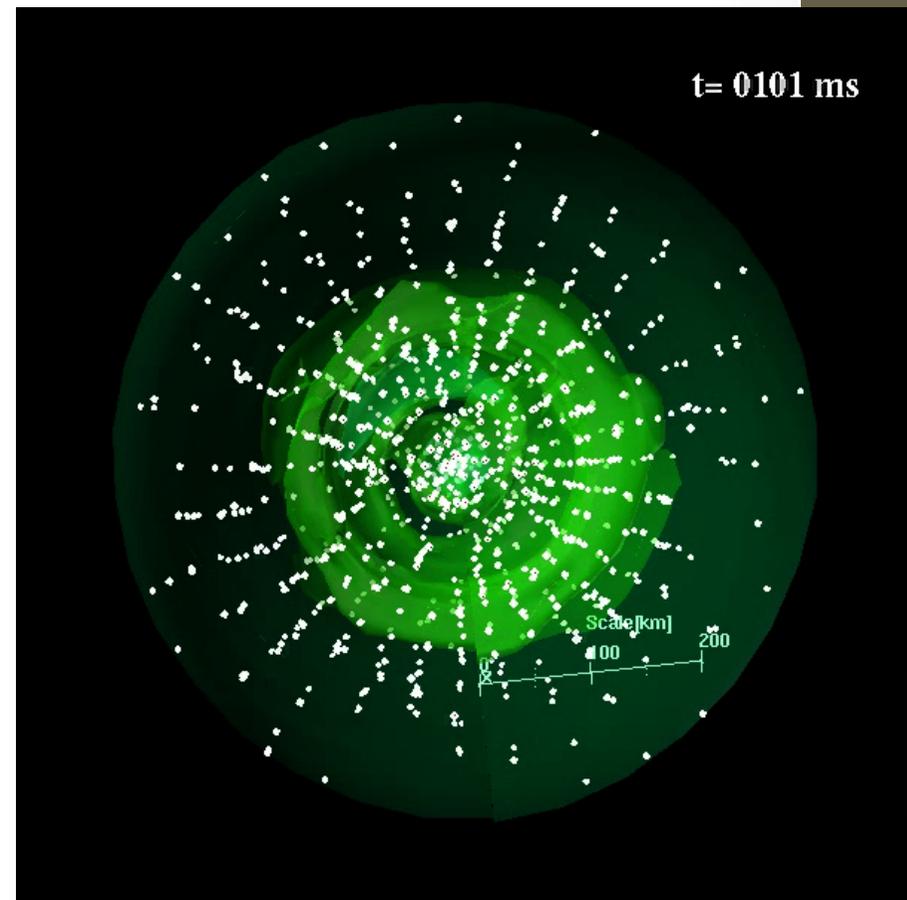
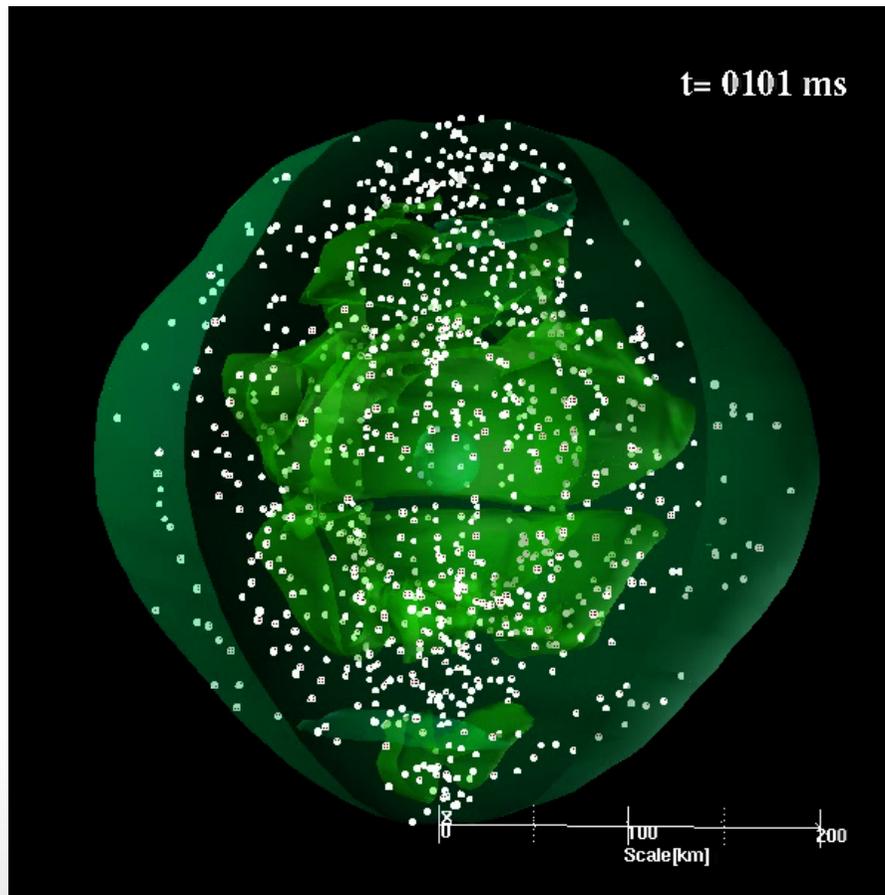


速度の絶対値  
で規格化した  
rot v

SASIの  
advection-  
acoustic cycle  
の縞模様が見  
える

# Tracer Particle

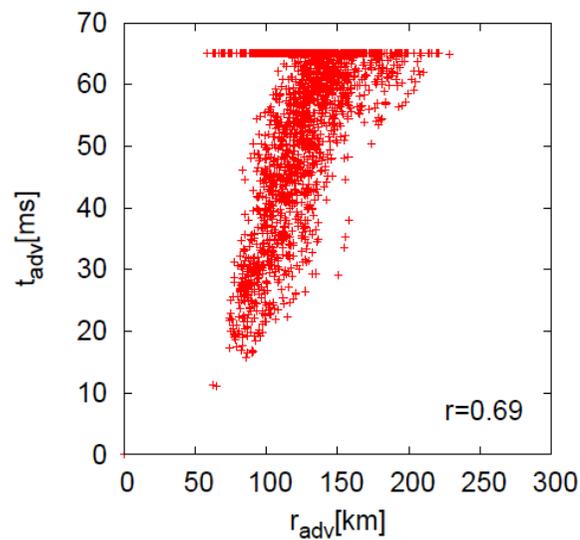
Tracer particleの運動を追った。



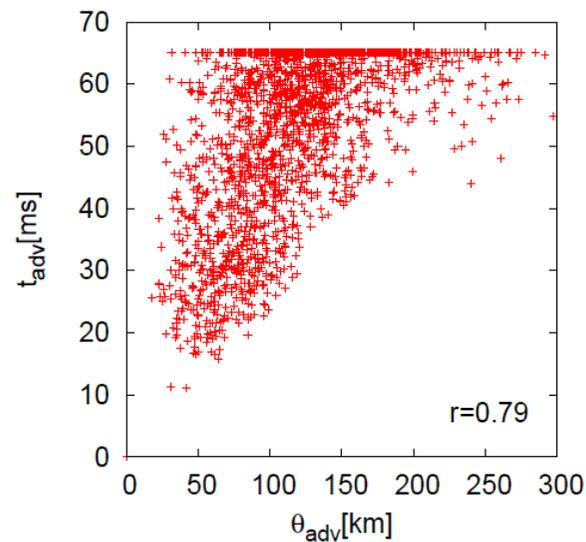
# Advection time vs advection direction

Advection timeとradial advection, polar advection, azimuthal advectionの相関。

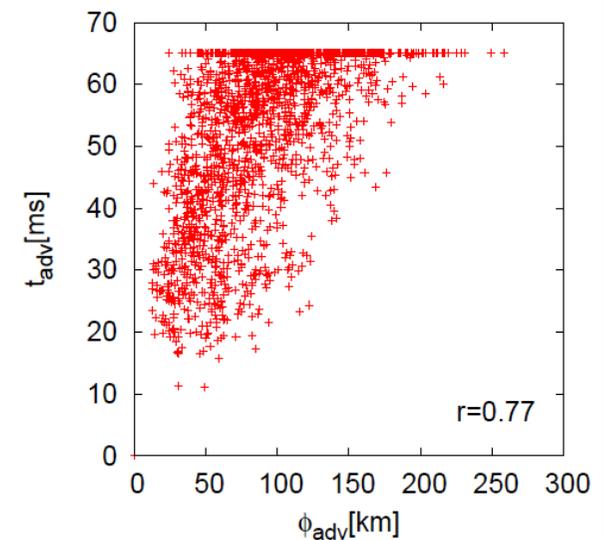
$$r_{\text{adv}} = \int |v_r| dt$$



$$\theta_{\text{adv}} = \int |v_\theta| dt$$



$$\phi_{\text{adv}} = \int |v_\phi| dt$$



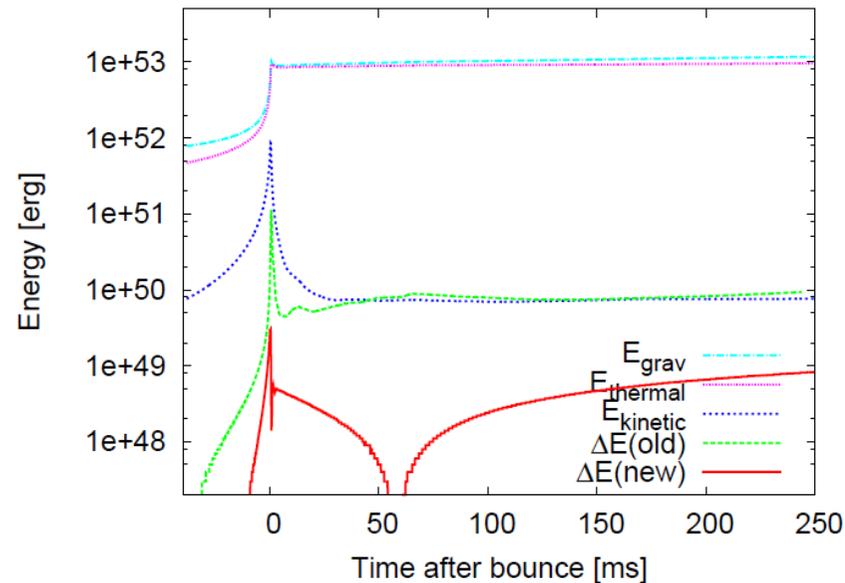
特に $\theta, \phi$ 方向に強い相関があり、advection timeが長い粒子は $\theta$ 方向、 $\phi$ 方向に長く運動していることがわかる。

=> 3Dは爆発にポジティブか？

# 精密計算へ

定性的なことはわかってきたが、超新星爆発の成否を定量的に評価するには計算精度をあげる必要がある。

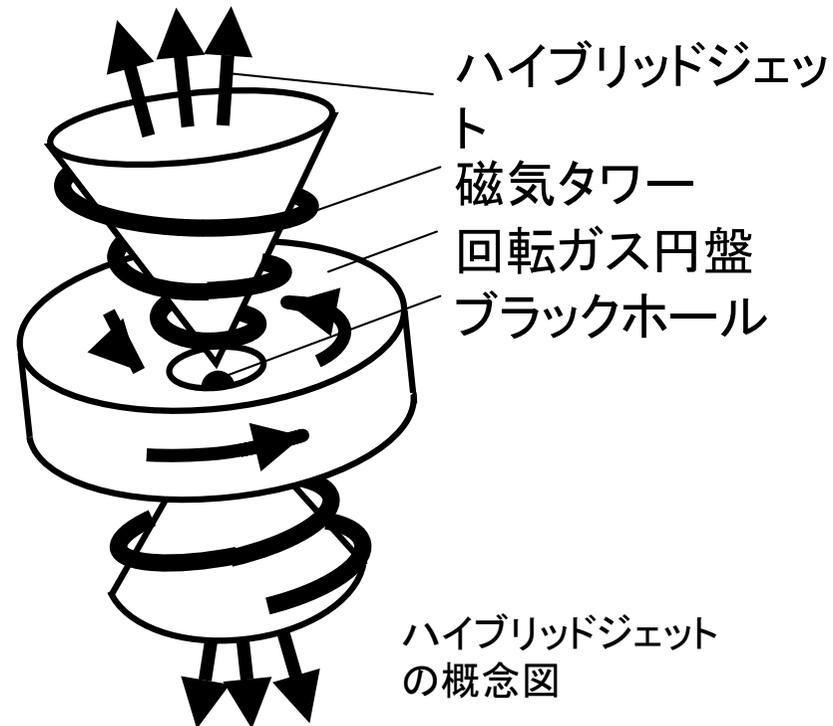
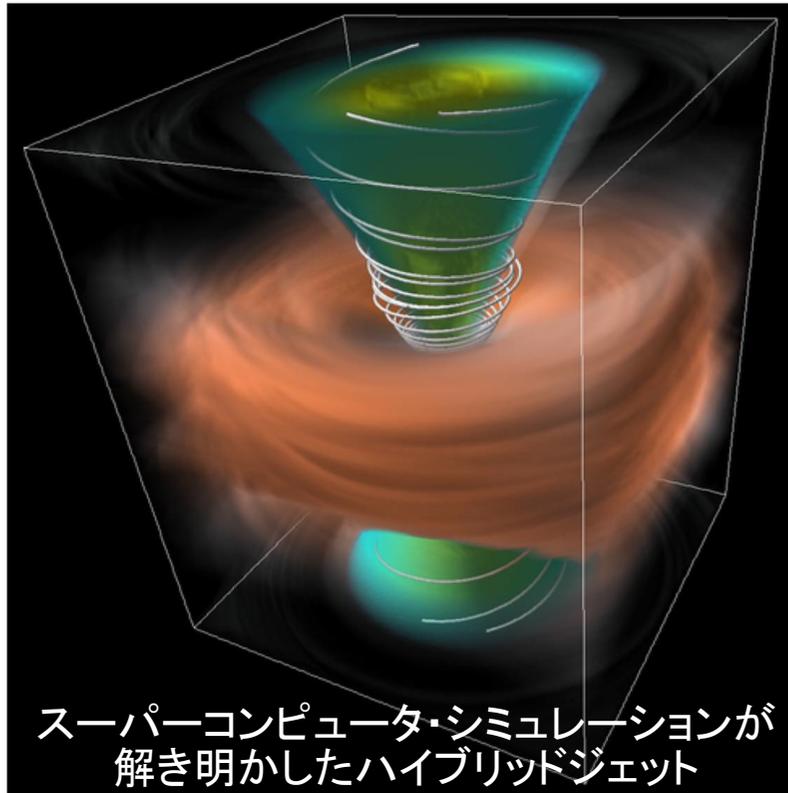
- 非保存系から保存系へ



重力はソースタームだがMueller et al. 2010の取り扱いにより自己重力系でもエネルギー保存がよくなる。

- 重力のポワソン方程式の改善  
スペクトラル法を用いることにより、重力の部分の計算速度が数十倍改善
- Xニュートリノの取り扱い  
今回はXニュートリノ冷却はなし  
Leakage版は完成している。  
FLD, M1-Closureによる取扱いは調整中。

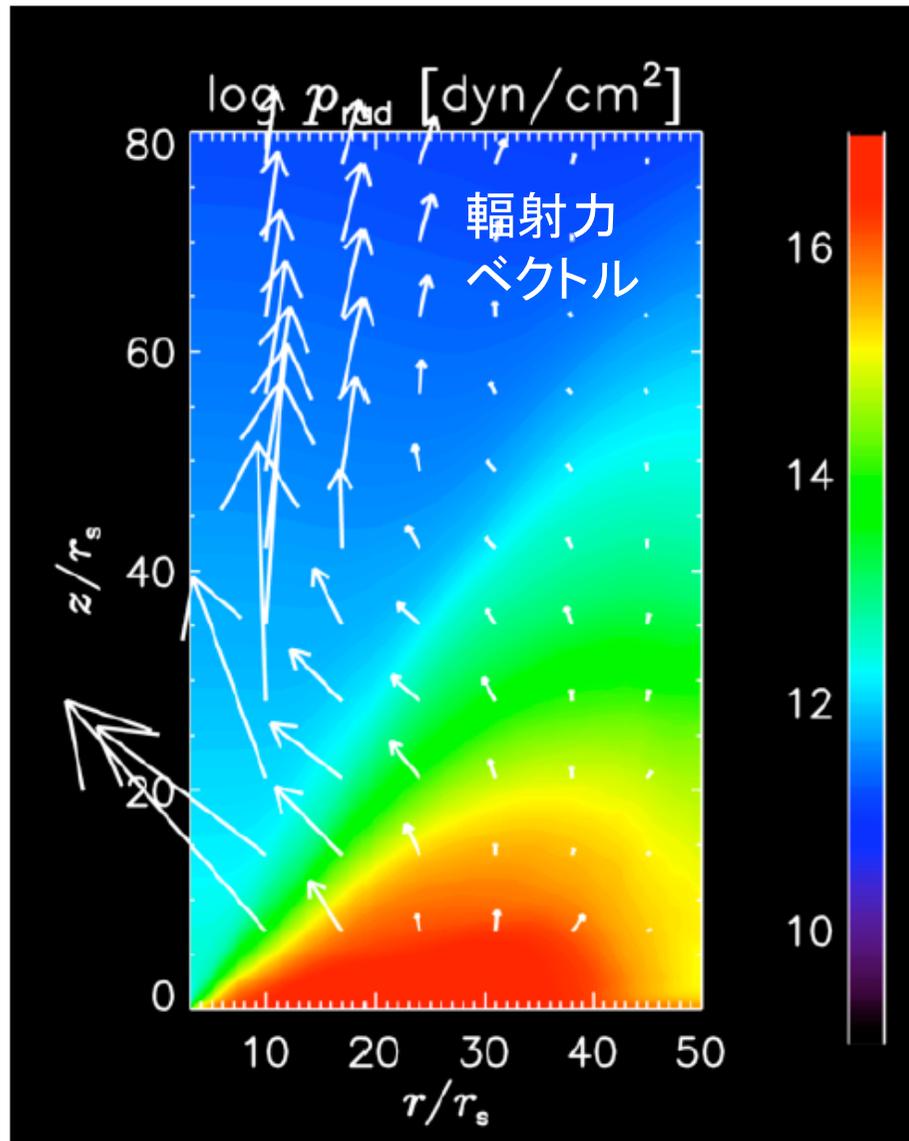
# ハイブリッド・ブラックホールジェット -大局的輻射磁気流体計算による新型ジェット-



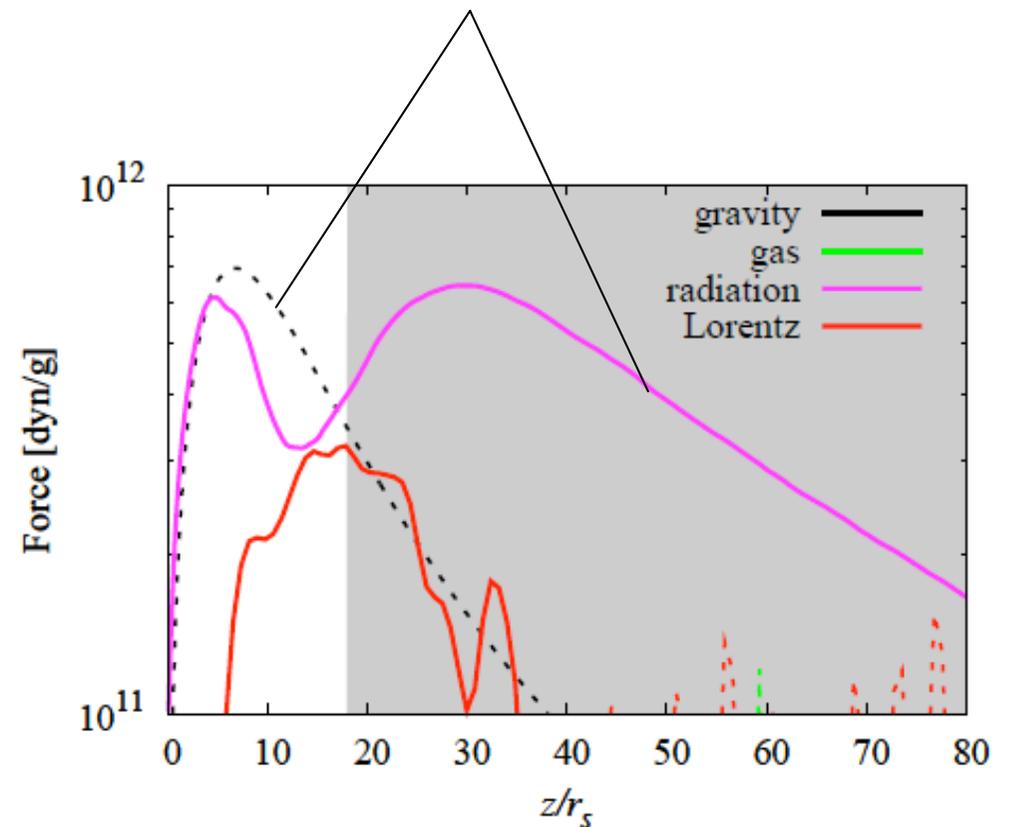
世界で初めてブラックホール周囲の円盤+ジェットの輻射磁気流体シミュレーション (CfCAのスーパーコンピュータ Cray XT4を約2週間使用) を実行し、輻射圧で加速し磁気タワーで細く絞られたジェットが発生することを発見した。これは、パワフルなジェットを説明できる最有力モデルである。

この成果は、読売新聞をはじめ確認できただけで15紙、および多数のwebニュース、ニュートンおよび日経サイエンスでも紹介された。

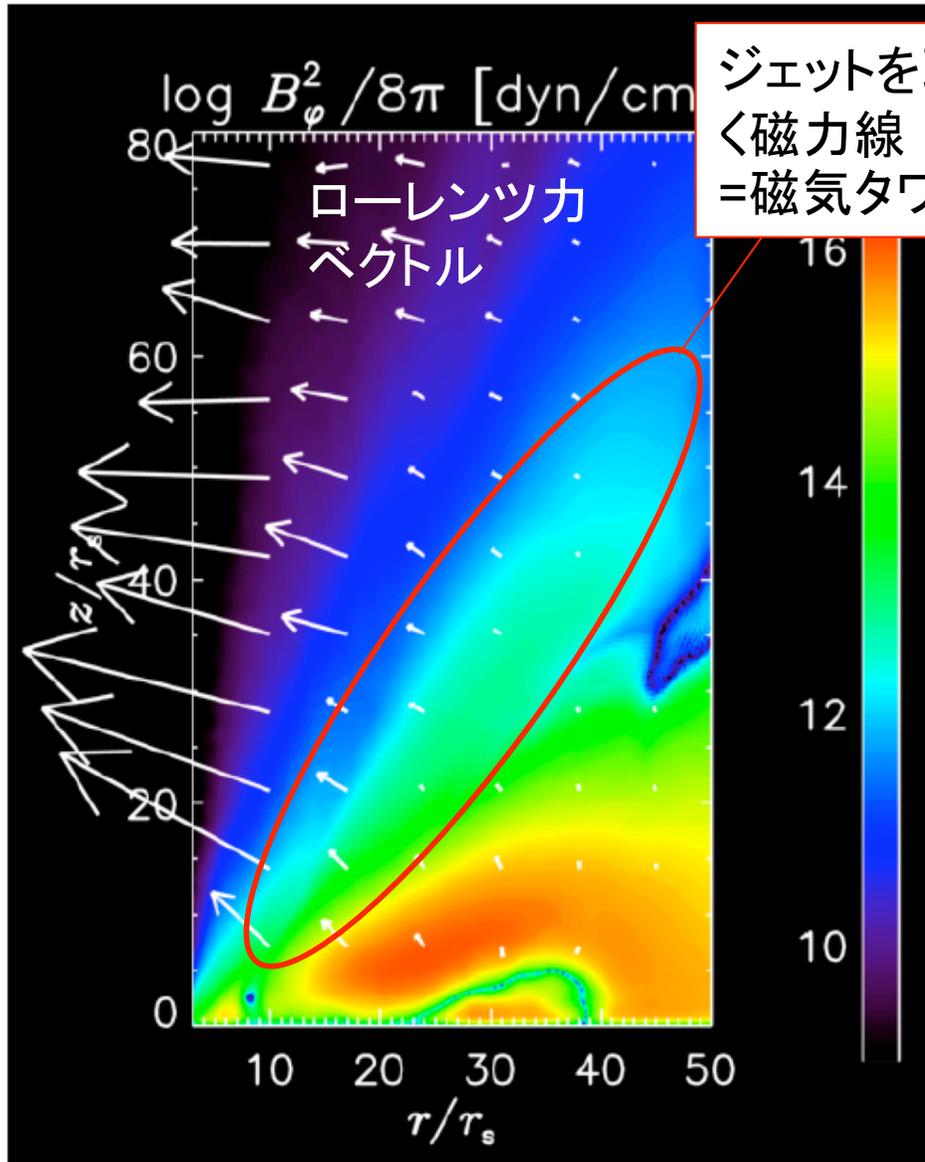
# 加速メカニズム=輻射力



輻射流体計算と同様に、輻射力(>>重力)で加速している！

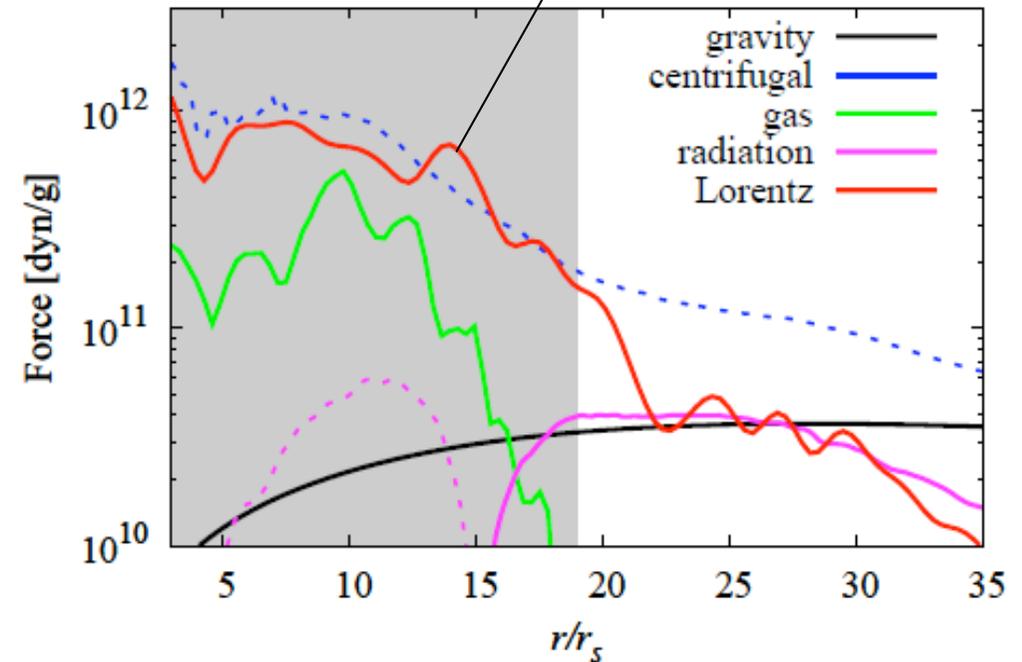


# 収束メカニズム＝ローレンツ力



ジェットを取り巻く磁力線  
＝磁気タワー

ローレンツ力で収束している  
(磁気圧と磁気テンションは同程度)



# 高橋博之

- **H.R.T.**, Y. Masada, “Stability of [Magnetorotational-Instability](#)-Driven Accretion Disks”, accepted for publication in ApJ
- **H.R.T.**, E. Asano, R. Matsumoto, “Relativistic Expansion of Magnetic Loops at the Self-Similar Stage II: [Magnetized Outflows interacting](#) with the Ambient Plasma”, submitted to MNRAS
- **H.R.T.**, K. Kotake, N. Yasutake, “[Magnetic Field Decay](#) Due to Wave-Particle Resonances in the Outer Crust of Neutron Stars”, accepted for publication in ApJ
- **H.R.T.**, T. Kudoh, Y. Masada, J. Matsumoto, “Scaling of the Reconnection Rate in Relativistic [Magnetic Reconnection](#)”, to be submitted to ApJ.
- **H.R.T.**, Y. Masada, “Stability of [MRI](#)-Driven Accretion Disks”, to be submitted to AIP conf.
- **H.R.T.**, T. Kudoh, Y. Masada, J. Matsumoto, “Numerical Study of Relativistic [Magnetic Reconnections](#)”, accepted for publication in AIP conf.

# 1. 相対論的磁気リコネクションにおける エネルギー変換効率

HRT., T. Kudoh, Y. Masada, J, Matsumoto '11

## Sweet-Parker型磁気リコネクションの 先行研究

- 非相対論的な場合
  - 遅いエネルギー変換効率
- 相対論的な場合
  - 速いエネルギー変換 (Lyutikov & Uzdensky '03)
    - 高速アウトフローのためにローレンツ収縮が効率的に働く
  - 遅いエネルギー変換 (Komissarov '05)

## 相対論的抵抗性MHDシミュレーションに よってエネルギーの変換効率を決定する

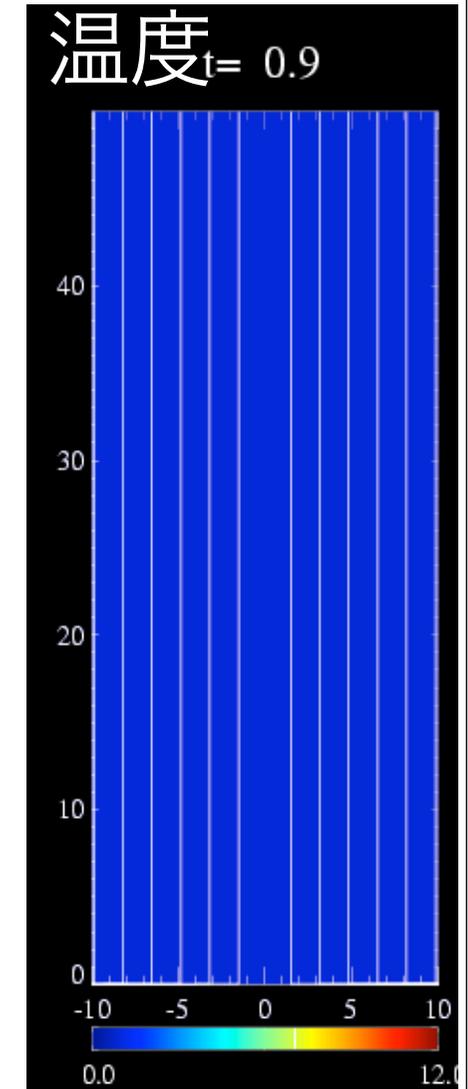
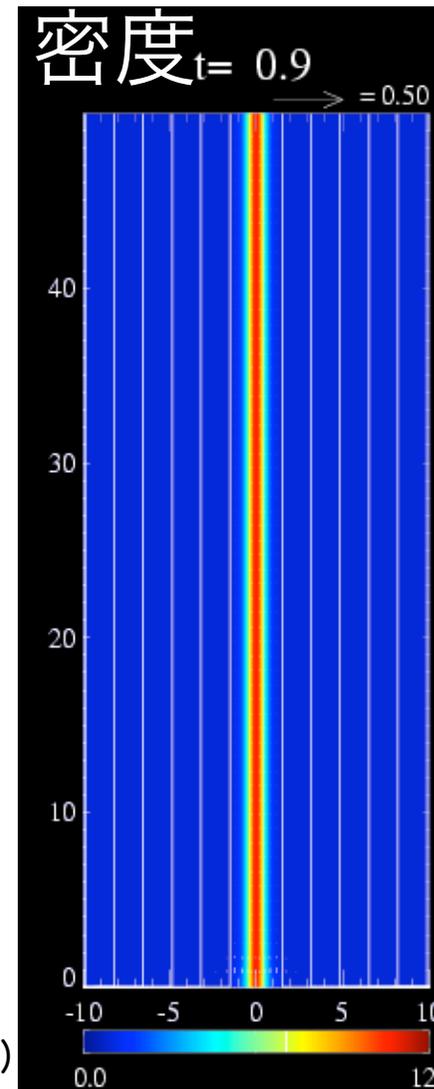
2次元X-Y平面

$(N_x, N_y) = (3000, 800)$ ,  $(L_x, L_y) = (50, 75)$

numerical flux: HLL (Komissarov)

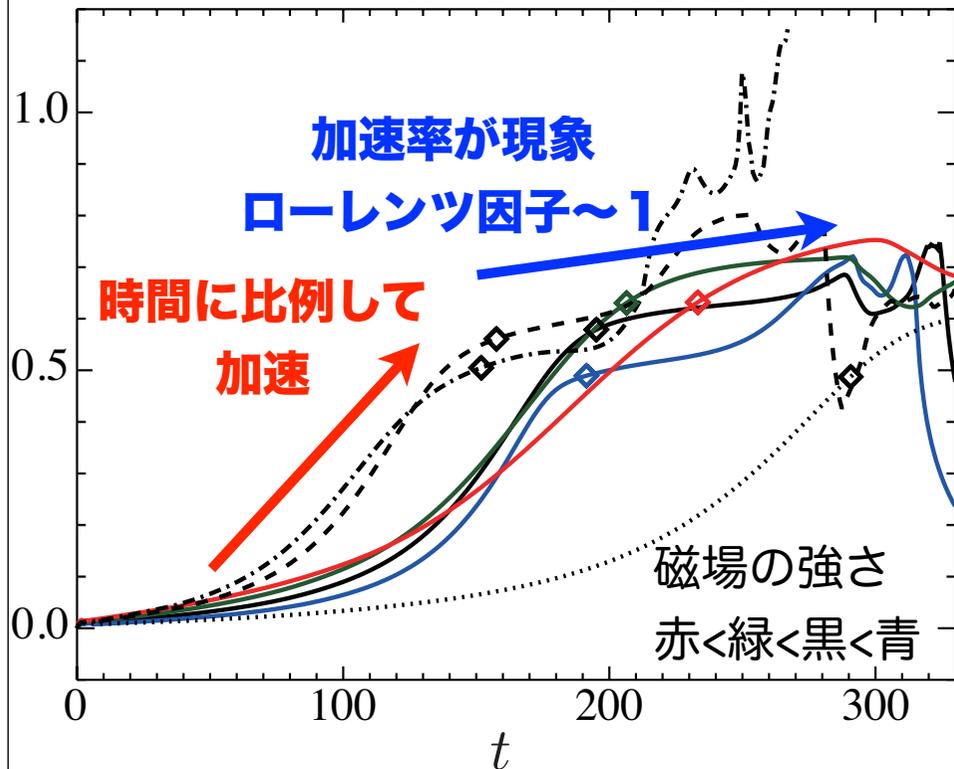
Ampere's law (stiff eqn.): 陰解法 (Palenzuela '09)

divergence cleaning (Munz '00, Dedner et al.'02, Komissarov '07)

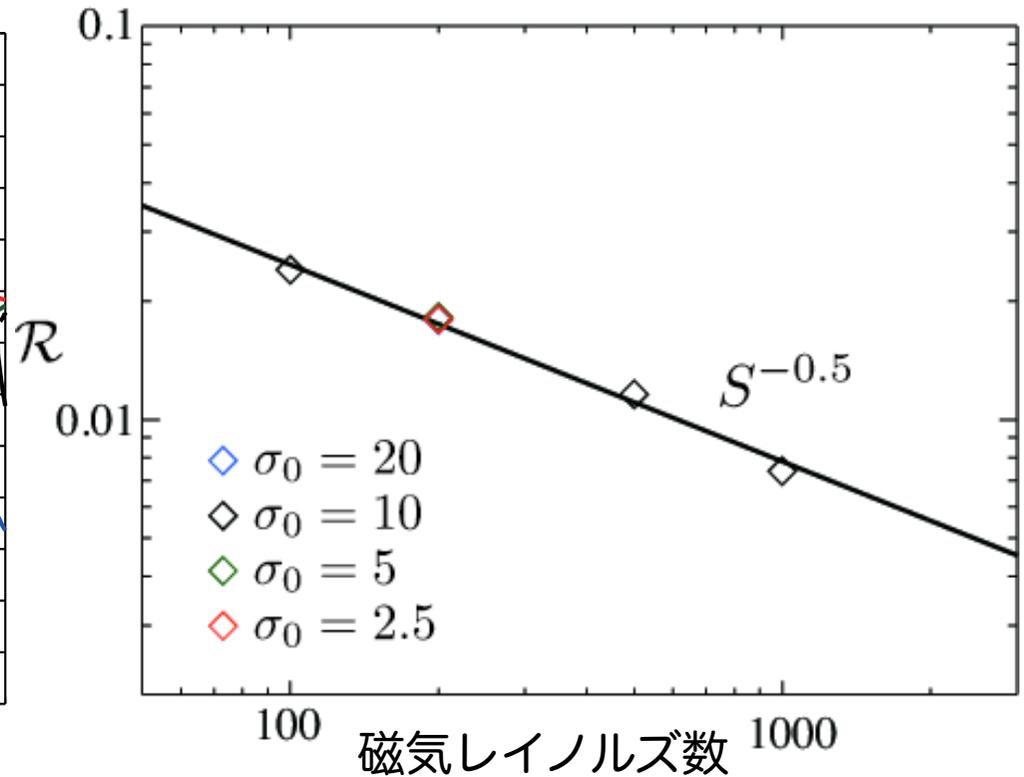


# アウトフロー速度の時間発展

(アウトフロー4元速度) / (アルヴェーン4元速度)  
の最大値の時間発展



エネルギー変換効率

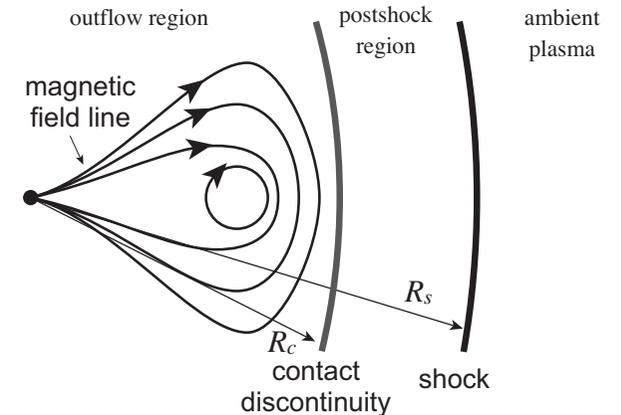


- 磁気(自由)エネルギーを増加させてもアウトフロー速度はほぼ一定値で $\gamma \sim 1$
- エネルギー変換効率は磁気エネルギーによらず、非相対論的な場合と同じ
- オーム散逸によって磁気エネルギーは熱エネルギーに変換されたため速いアウトフローは作られず、ローレンツ収縮も効かないためにエネルギー変換効率も小さい

# 2. マグネターフレアにおける 磁気ループの自己相似的成長

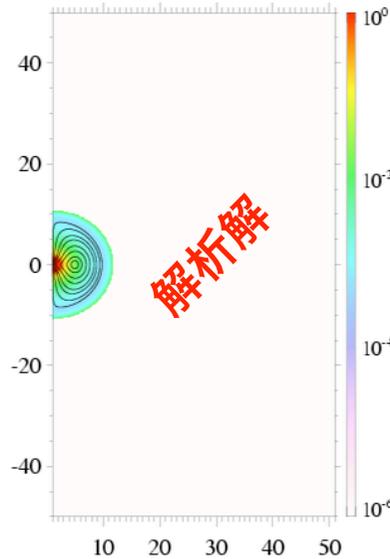
SGR flareを模擬した衝撃波と接触不連続面を伴う

相対論的CMEの自己相似解 (HRT. E. Asano, R. Matsumoto '11)

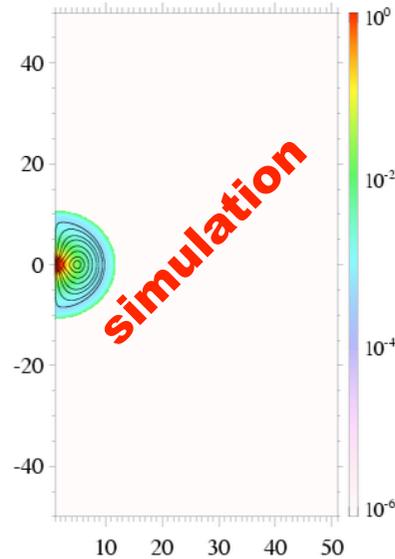


圧力

T= 11.0

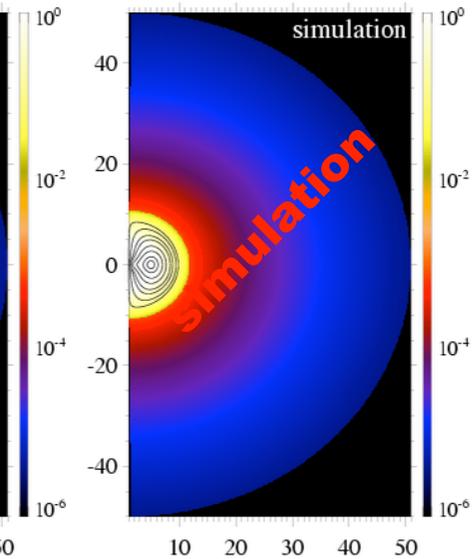
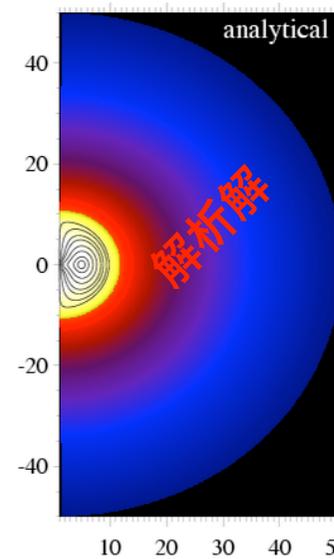


T= 11.0



密度

T= 11.0



○衝撃波のローレンツ因子はambient plasma  $r_{am}$ の密度分布に依存  $\rho_{am} \propto r^{-\alpha}$

$$\Gamma_s \propto r^{-\frac{\alpha-3}{2}} \quad a>3\text{のとき加速的膨張}$$

○光球面の温度

$$T_{ps} \simeq 10 \left( \frac{\Gamma_s}{10} \right)^{-1.4} \left( \frac{R_s}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1.3} \text{ keV} \quad \text{観測の値にほぼ一致}$$

# 3. 中性子星における磁気散逸

HRT. K, Kotake, N, Yasutake '11

マグネター：磁気エネルギー散逸によって活動 (e.g., Wood & Thompson '06)

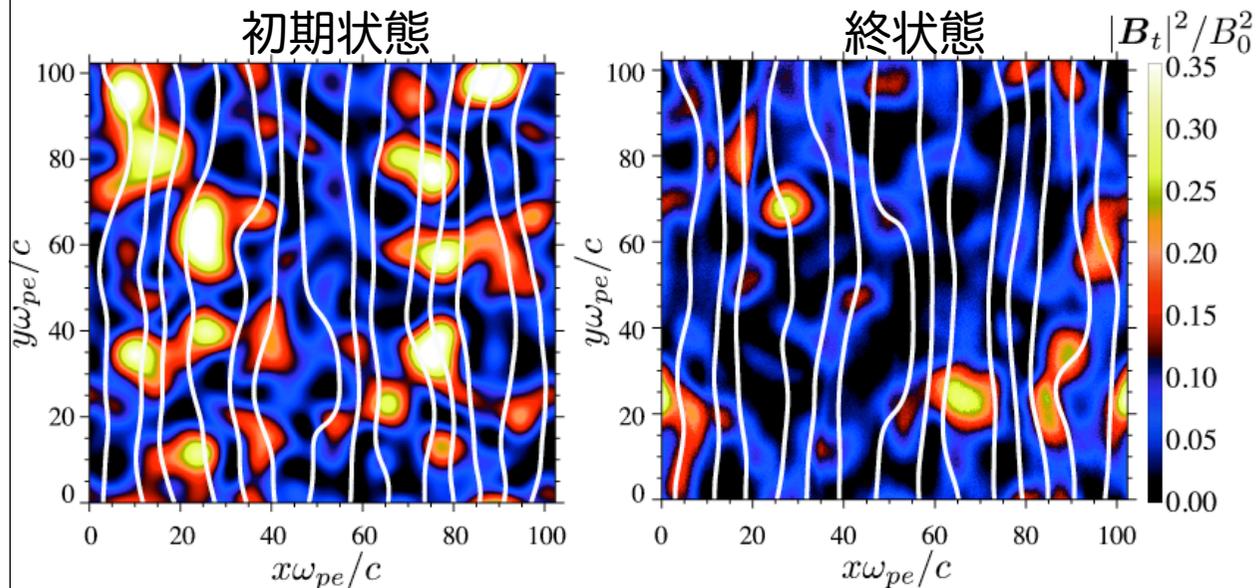
中性子星：磁場の強さは時間とともに減少( $\sim$ Myr) ? (e.g., Bhattacharya '92)

## 磁気エネルギー散逸の起源は？

- 中性子星クラスト内部でHall乱流によって磁気エネルギーのカスケード (Goldreich Reisenegger '92)
- outer crustでは無衝突スケールが存在 (Sternin & Yakovlev '06)

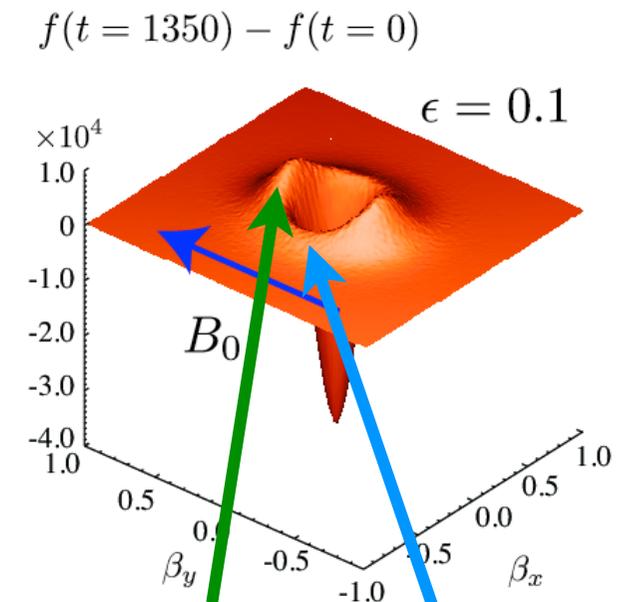
## 2D Particle-In-Cellを用いた乱流シミュレーション

乱流磁場のエネルギー



**whister (Hall)乱流によって  
磁気エネルギーはカスケード**

初期状態からの粒子分布関数のずれ



**Landau damping + サイクロトロン共鳴  
によって磁気エネルギーが非等方に散逸**

# 今後の研究

## 相対論的散逸性輻射磁気流体コード

相対論的散逸性磁気流体+0, 1次モーメント輻射輸送方程式

### 基礎方程式(理想磁気流体の場合)

$$\partial_t D + \nabla \cdot (D\mathbf{v}) = 0,$$

$$\partial_t E_t + \nabla \cdot \mathbf{F}_t = 0,$$

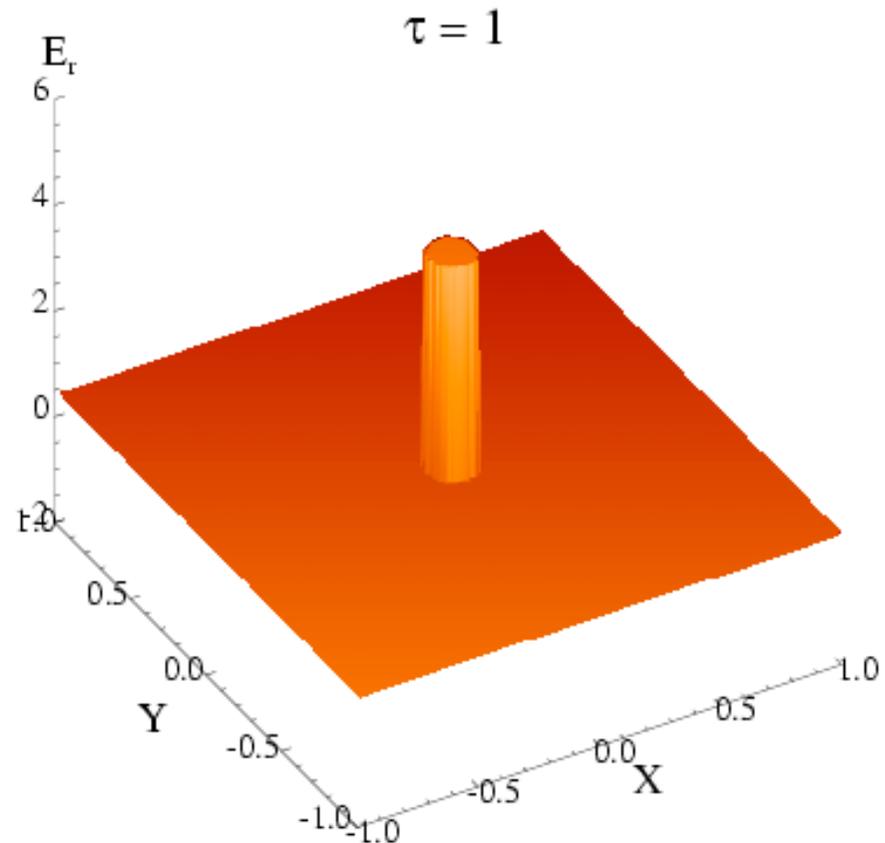
$$\partial_t \mathbf{F}_t + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_t = 0,$$

$$\partial_t \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0,$$

$$\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} = 0,$$

$$\partial_t E_r + \nabla \cdot \mathbf{F}_r = S_E$$

$$\partial_t \mathbf{F}_r + \nabla \cdot \mathbf{P}_r = S_F,$$



今後このコードを用いてBH降着円盤や磁気リコネクションのシミュレーションを行う

CfCAユーザーズミーティング 2010/1/11-12@三鷹

カテゴリ XT-4 cfcaキュー

# 渦巻銀河ダイナミクス

国立天文台 CfCA 研究支援員

馬場淳一

お世話になっている方々：

和田桂一(鹿児島大), 斎藤貴之(国立天文台),

藤井通子(鹿児島大/ライデン大), 牧野淳一郎(国立天文台),

天の川創成プロジェクト

M74 HST

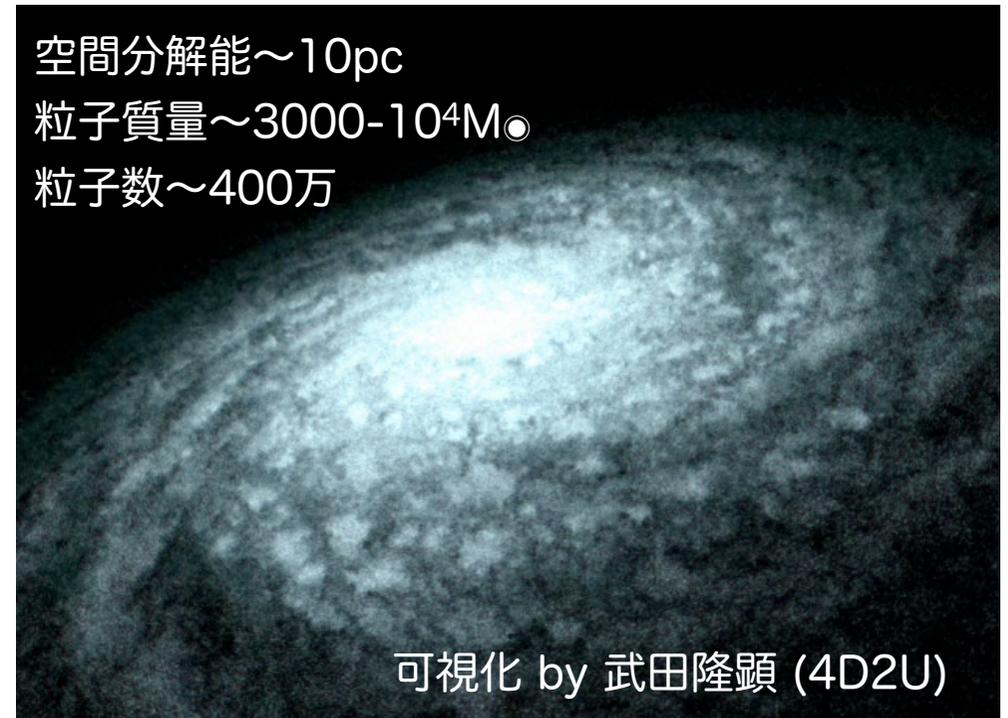
# 研究内容

天の川銀河や近傍円盤銀河に存在する渦状腕構造，棒状構造に代表される非軸対称構造を，星，低温ガス，星形成領域などの多成分複合系ダイナミクスの観点から明らかにする。

- 渦状腕の形成維持メカニズム
- 中心領域へのガス供給，活発な星形成活動など。

恒星系の重力多体系ダイナミクス + 多相星間ガス(自己重力，低温冷却，星形成，超新星加熱)のダイナミクス  
with ASURAコード

空間分解能 $\sim 10\text{pc}$   
粒子質量 $\sim 3000-10^4 M_{\odot}$   
粒子数 $\sim 400\text{万}$



可視化 by 武田隆顕 (4D2U)

# 本年度の研究成果

## ▶ 棒渦巻銀河の3000万體計算 (XT-4 128コア)

-分子雲や星団を分解.

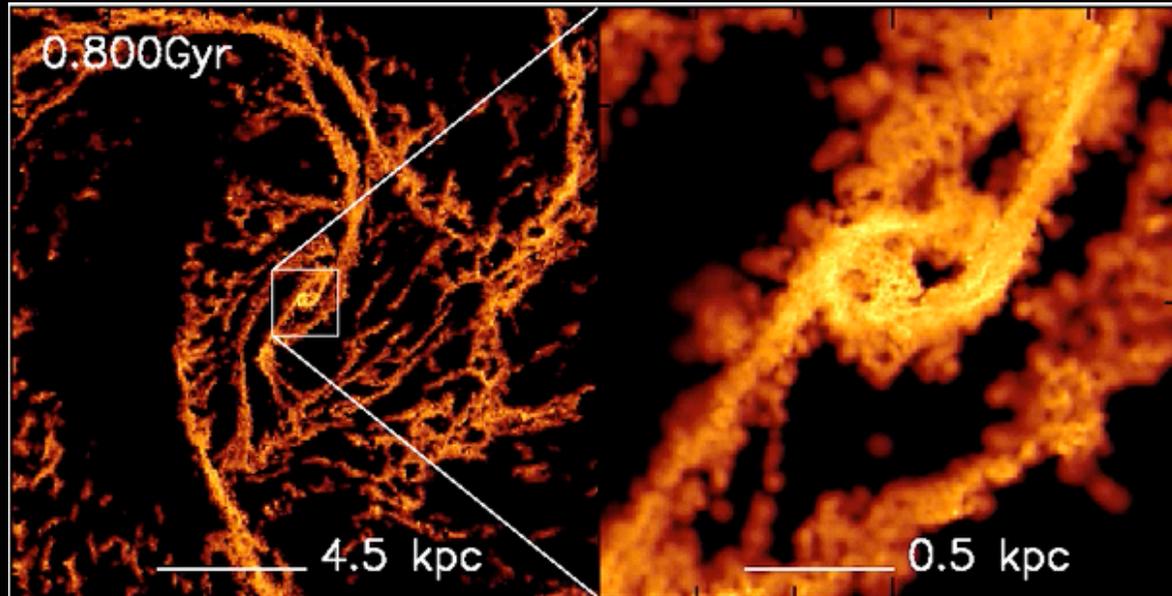
-中心領域へのガス供給, 星団形成に着目した解析が進行中

## ▶ 渦状腕構造のダイナミクス (XT-4 64コア)

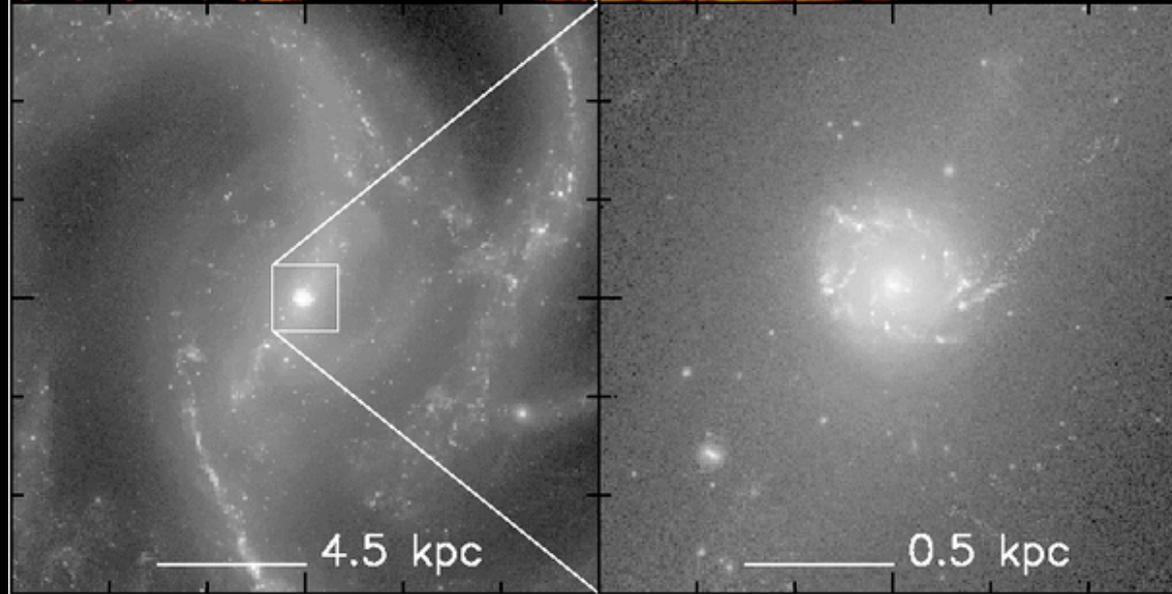
-渦状腕の形成維持機構: Baba et al. (執筆中)

-渦状腕と星間ガスの相互作用: Wada, JB, & Saitoh (近日投稿)

低温ガス円盤  
(面密度)



恒星系円盤  
(Bバンド輝度)



考慮する物理

恒星系ダイナミクス+多相星  
間ガス(自己重力, 低温冷却, 星形  
成, 超新星加熱)ダイナミクス

計算:

ASURA ver. 2

XT-4 128コア

分解能:

$m_{\text{sph}} < 1000 M_{\odot}$

$\varepsilon = 5 \text{ pc}$

- ダストレーンからの間欠的なガス供給→ガス円盤との接点で星形成
- Nuclear Ring 星団の潮汐破壊 ( $r_{\text{tid}} \sim 10 \text{ pc}$ )
- SFR  $\sim 1-5 M_{\odot}/\text{yr}$ ,  $\Sigma_{\text{gas}} \sim 100 M_{\odot}/\text{pc}^2$

# 本年度の研究成果 (執筆・投稿準備中)

## ▶ 渦状腕構造のダイナミクス (XT-4 64コア)

-Baba et al. (執筆中) : 恒星系ダイナミクス

-Wada, JB, & Saitoh (投稿予定) : 恒星系+多相ガスダイナミクス

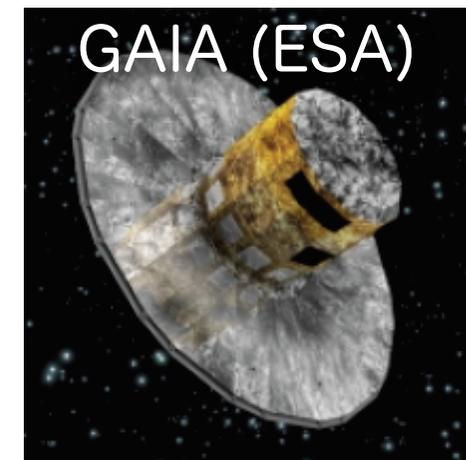
### ◆ 研究背景

-密度波理論は線形・定常(剛体回転)・連続体

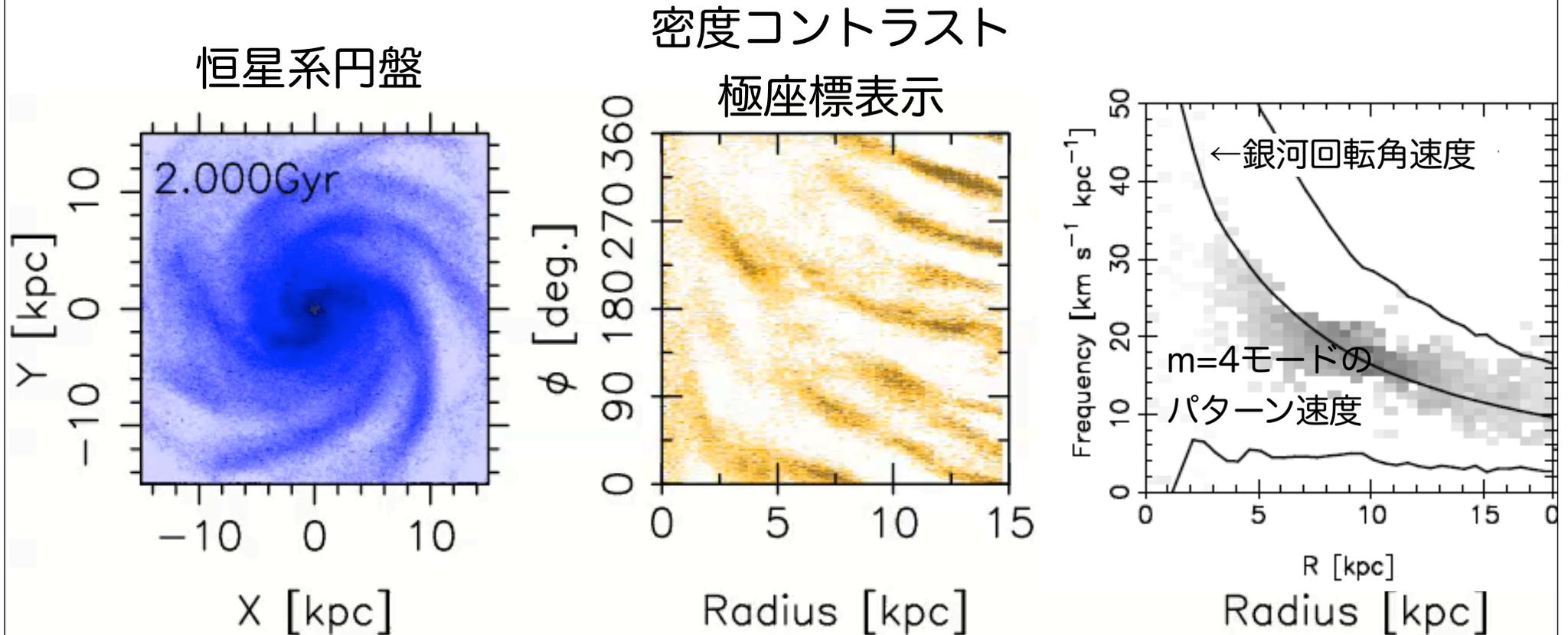
-天の川銀河内の星の6次元位相空間データ

(GAIA, JASMINE etc)

→非線形・非定常・重力多体系としての渦状腕の  
知見(理論)が必要(N体シミュレーションが必須)



# 渦状腕ダイナミクス

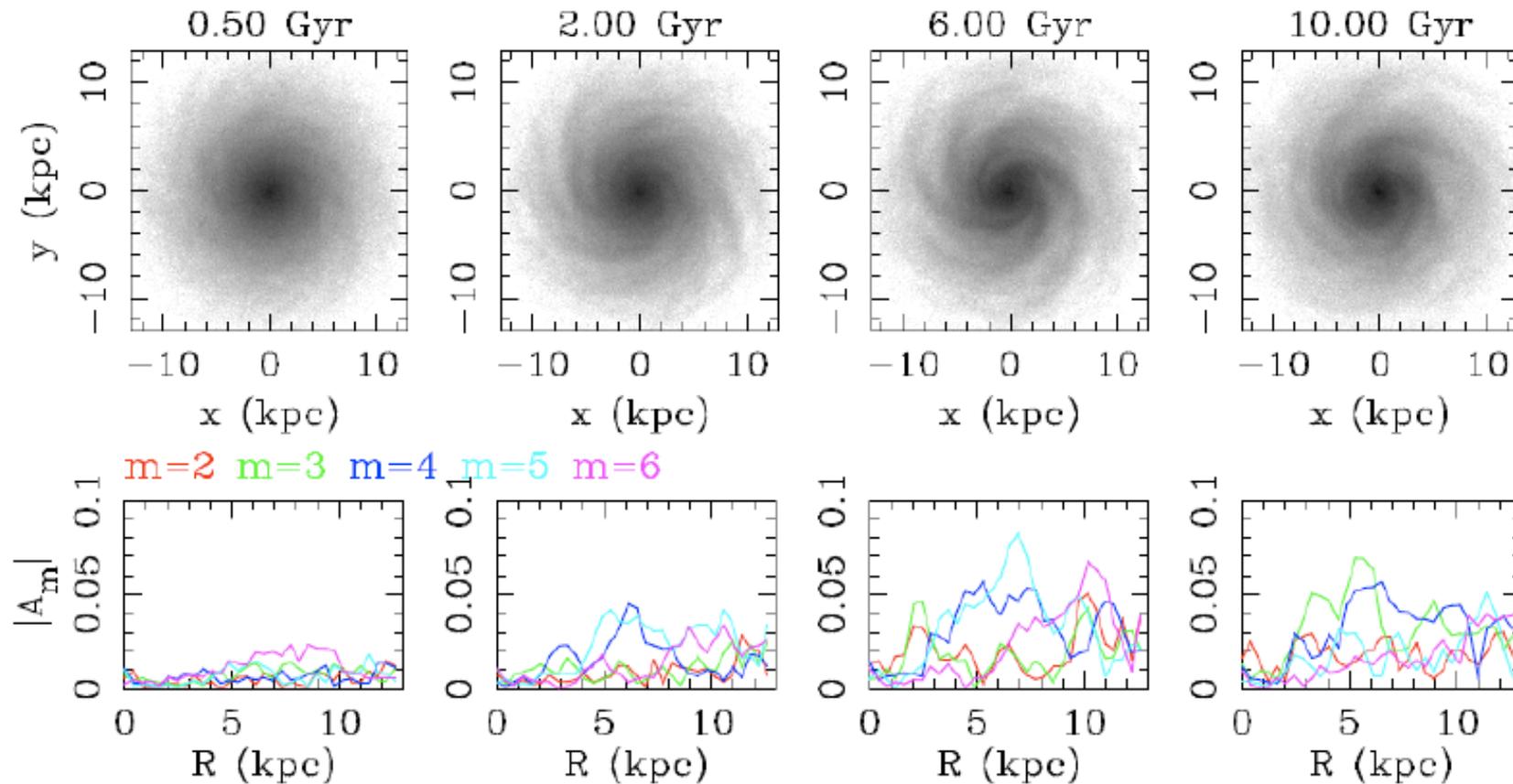


銀河回転周期(～数100Myr)で生成・消滅, 合体・分裂を繰り返すダイナミカルな構造.

局所的な粗密が差動回転により引き伸されて増幅 (Swing Amplification; Toomre 1981).

# 渦状腕変動の持続性

ガスなし恒星系円盤のシミュレーション (3D,  $N=300M$ ,  $e=10pc$ )



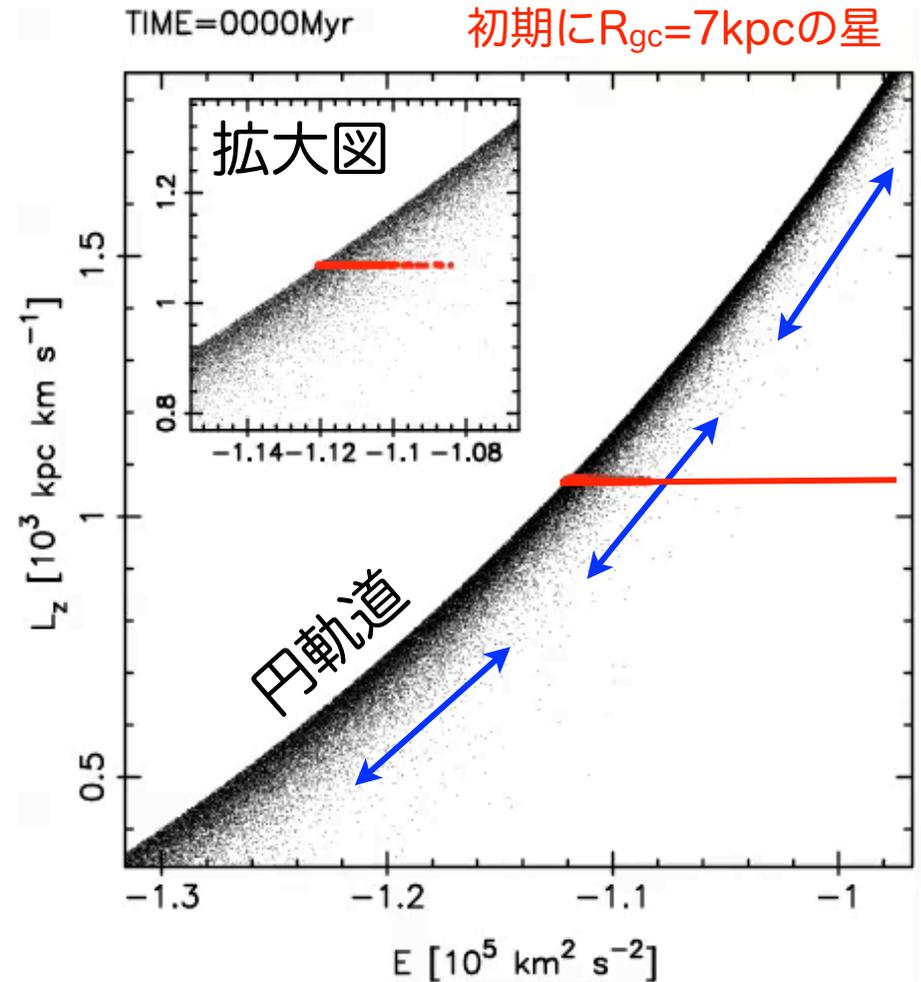
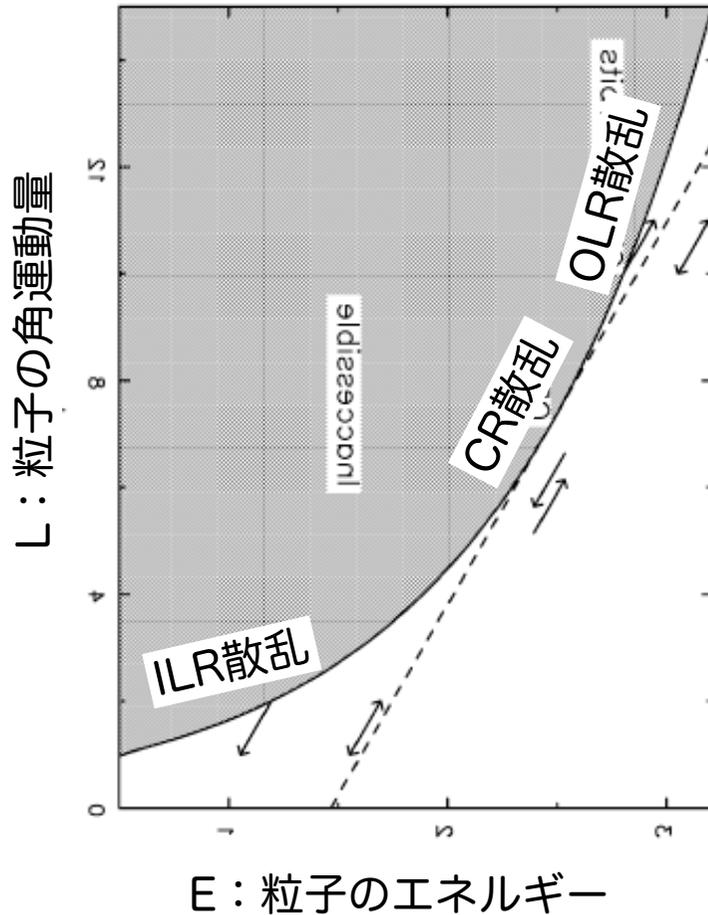
大粒子数の数値計算によって、初期のQ値や粒子数によっては、ガスによる冷却効果がなくとも非常に長い時間に渡り非定常なスパイラル構造が存在する。

# 恒星系渦状腕の維持機構

粗密は必然的に  $\Omega_{sp} \sim \Omega_{rot}$  なので、星の散乱はCR散乱  
 → 散乱後にランダムエネルギー(Q)をあまり増さない。

Lynden-Bell & Kalnajs (1972)

Sellwood & Binney (2002)



Baba et al. (執筆中)

# 渦状腕形態の多様性の再現

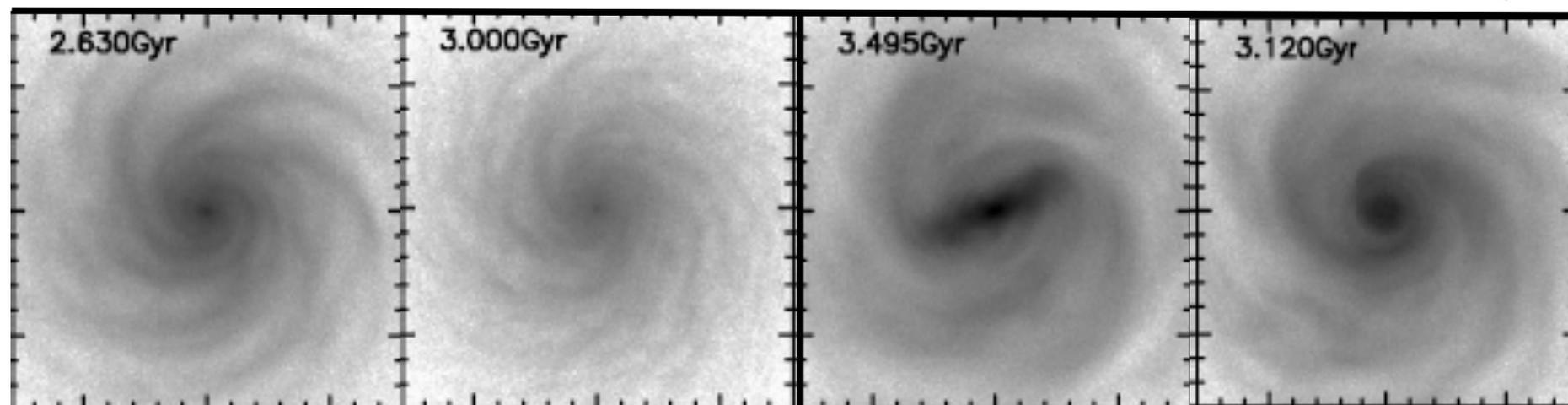
- 恒星系円盤(ガスなし)の3D N体シミュレーション (64コア)
- ディスク-ダークマター質量比, バルジ(外場)の有無により, 多様な渦状腕形態を再現.

Multi-arm

Flocculent

Barred

Grand-design



渦状腕形態によりそのダイナミクスや星の運動変化がどのように異なるのか, 渦状腕の形成維持との関係を解析中.

# まとめ

◆渦巻銀河・棒状渦巻銀河の恒星系＋多相星間ガスの3次元シミュレーション with ASURA

◆棒状銀河の高分解能N体/SPHシミュレーション

-分解能： $m_{\text{SPH}} < 1000 M_{\odot}$  ( $N > 3000$ 万體),  $\epsilon = 5 \text{ pc}$

-中心領域のガス円盤と周辺での星形成領域を再現

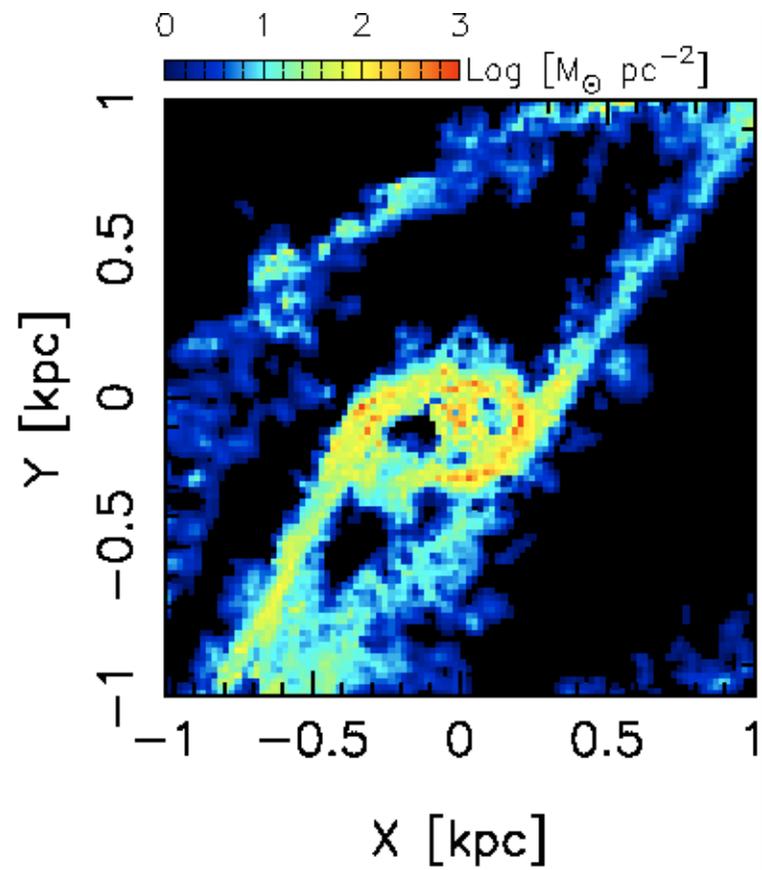
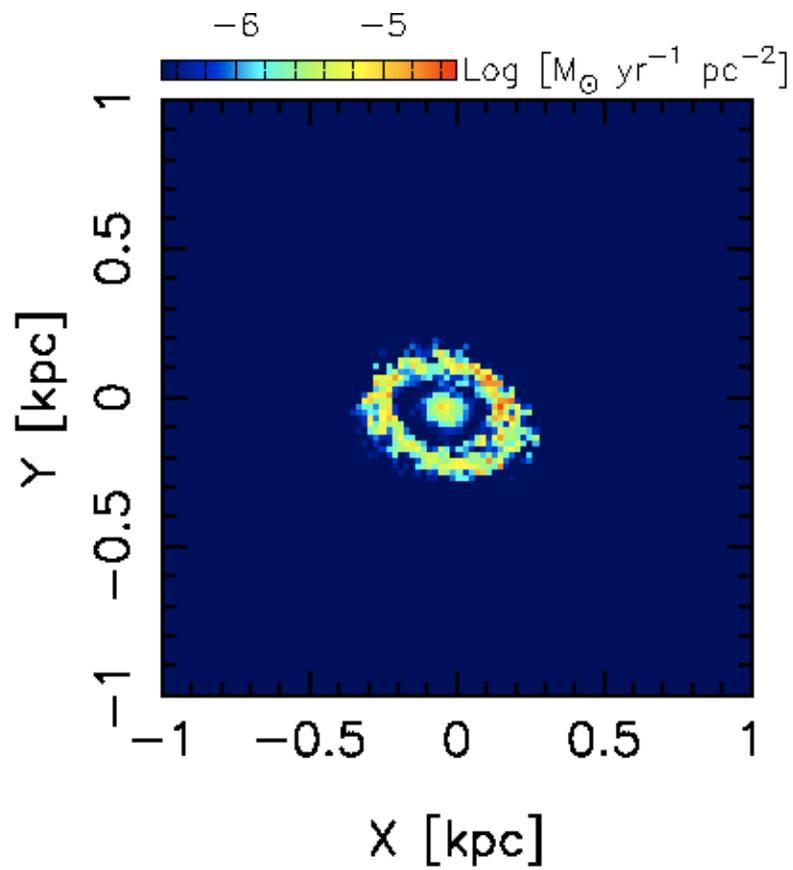
◆渦巻銀河ダイナミクス

-線形・定常・連続体としての古典的な渦状腕の描像(密度波)から非線形・非定常・重力多体系として渦状腕の理解へ.

-渦状腕形態の多様性の再現

将来的にはシミュレーションデータ(with 疑似観測)を公開し、観測データの解釈の際などに役立ててもらいたい.

おしまい



星形成率( $<0.5\text{kpc}$ ) $\sim 1-5M_{\odot}/\text{yr}$

# 本年度の研究成果 (執筆・投稿準備中)

## ▶ 棒渦巻銀河の3000万體計算 (XT-4 128コア)

- 恒星系 + 多相星間ガス (自己重力, 低温冷却, 星形成, 超新星加熱) の大局的ダイナミクス with ASURA (Saitoh et al. 2008 etc).

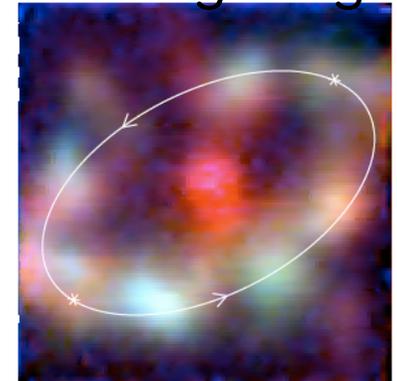
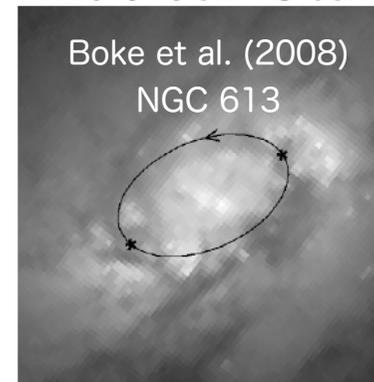
- 分解能:  $m_{\text{sph}} \sim 1000 M_{\odot}$ ,  $\varepsilon = 5 \text{ pc}$

### ◆ 研究背景

- 天の川銀河や棒渦巻銀河の中心領域では比較的活発な星形成活動
- Nuclear Ringの星種族の観測
- ALMAの稼働により低温ガスの運動や物理状態も明らかに
- 先行研究: 棒状ポテンシャル中での等温ガス (多相ガスやSF, SNなし)

→ 観測と比較可能な現実的な理論シミュレーションを

### Nuclear Star-Forming Ring



### Nuclear Spiral

