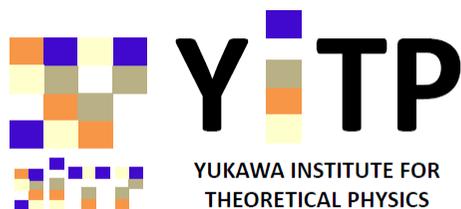


ガンマ線バースト中心エンジンの 3次元シミュレーション

京都大学 基礎物理学研究所

長瀧 重博



2012年12月11日 NAOJ

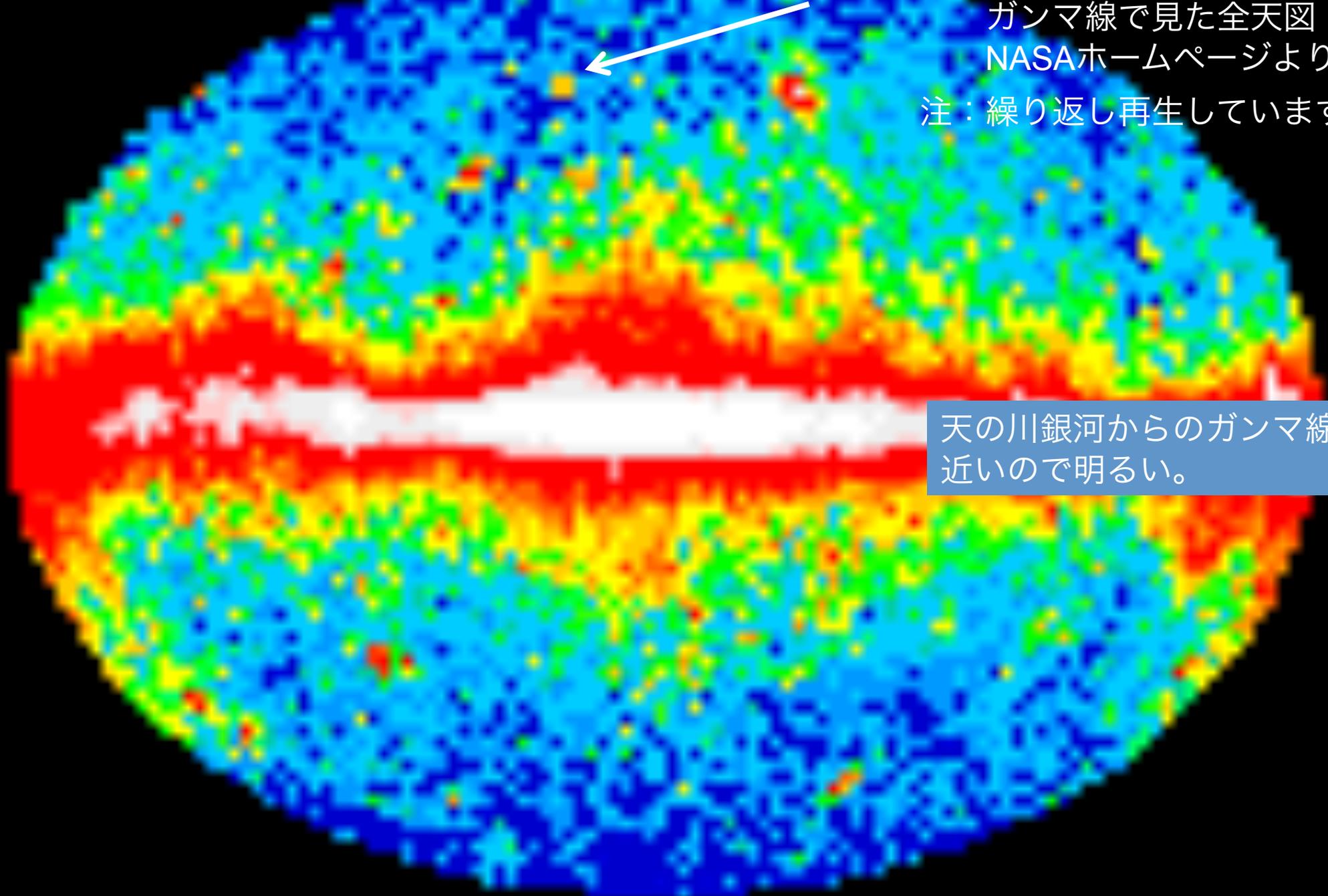
§ イントロダクション

ガンマ線バースト



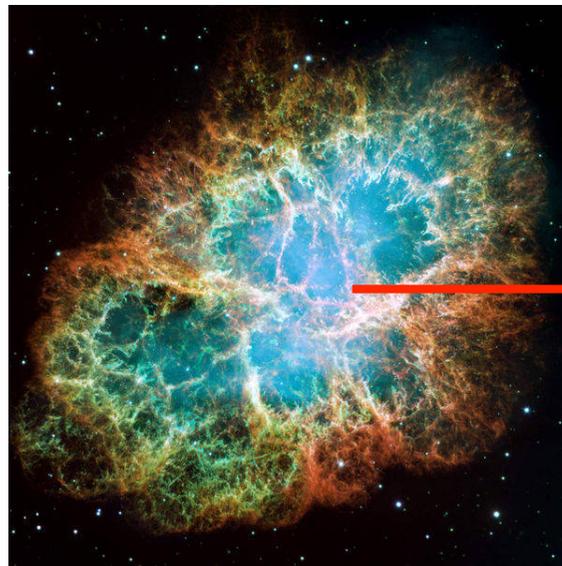
ガンマ線で見えた全天図
NASAホームページより。
注：繰り返し再生しています

天の川銀河からのガンマ線。
近いので明るい。

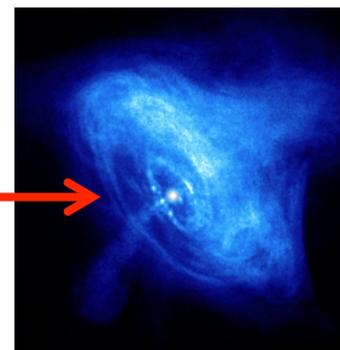


ガンマ線バーストの爆発機構（中心エンジン）はどのようなものか？

- ガンマ線バーストを発生する超新星の多くは通常の超新星以上に巨大爆発である（超新星爆発の標準理論では説明できない）。
- 標準理論：中性子星形成とニュートリノ風による爆発



超新星爆発の例：かに星雲



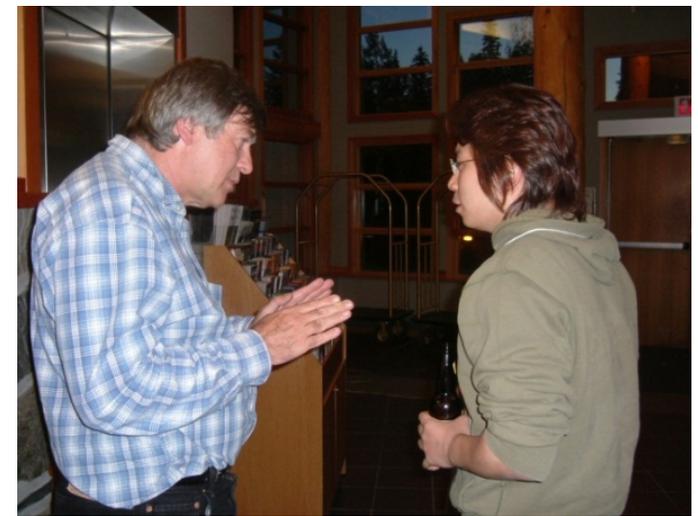
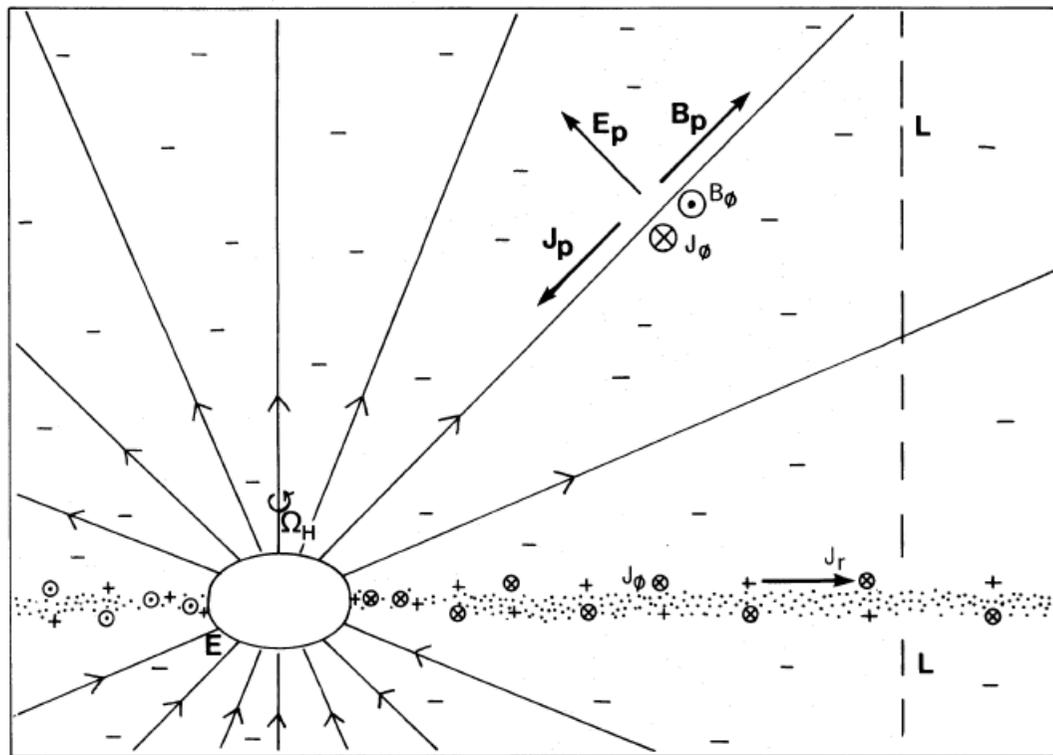
かに星雲の中で見つかった中性子星

一つの仮説: ブラックホール形成

- もし星が潰れて中心にブラックホールが出来たなら、その回転エネルギーは巨大になりうる。
- そのエネルギーを利用できれば、巨大爆発現象を説明出来るだろう。

回転しているブラックホールからエネルギーは引き出せる: ブランドフォード・ズナ ジェット機構

Blandford and Znajek (1977)



2005年カナダの会議
左: Roger Blandford氏
右: 私

回転しているブラックホールのまわりに電磁場が張り巡らされていると、ブラックホールの回転エネルギーが引き抜かれる (一般相対論効果)。 但し解析式では限定的な状況しか扱えない。

§ これまでの私の研究

～爆発メカニズムに関する理論的研究～

YAMATOコードの開発とそれを用いた数値シミュレーション
YukAwa institute's **MAgnetO**-hydro (**YAMATO**) code

大和

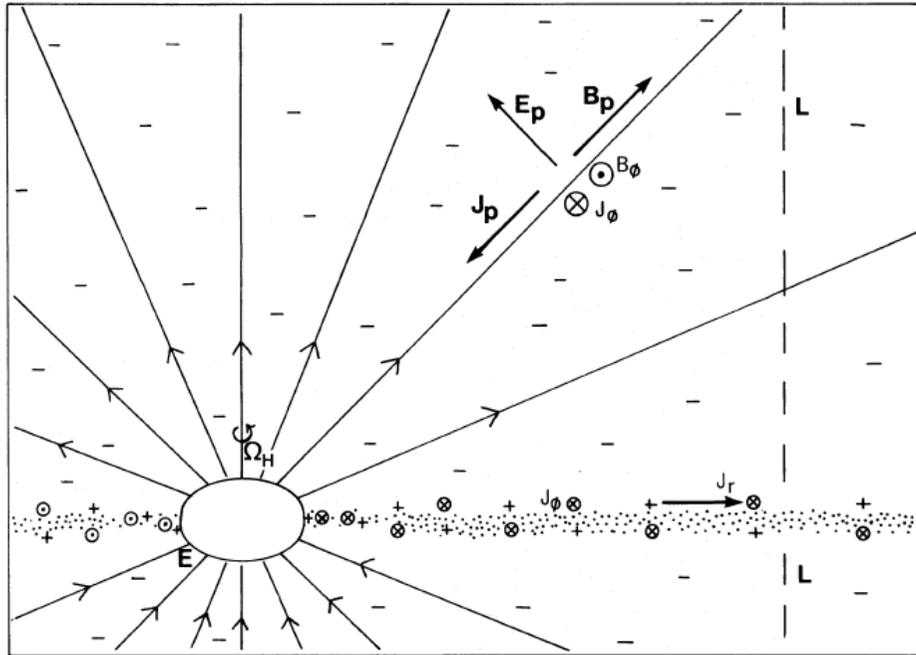
研究の着眼点

- 宇宙最大爆発なので、とてつもないことが起こっている筈。
- 星の中心にブラックホールが形成されたのではないかと仮説を立てる。
- ブラックホールの回転エネルギーを引き抜く、ブランド フォード・ズナジェット機構に注目。
- 原論文は限定的な状況にのみ適用可能なので（後述）、そのままではガンマ線バーストに適用出来ない。
- 数値シミュレーションコードを開発し（広い適用範囲）、ガンマ線バーストに於けるブラックホール回転エネルギー引き抜き効果を検証する！

私の研究成果

- 一般相対論的磁気流体 (YAMATO) コードを開発し、ガンマ線バースト研究に応用。
- 世界でも先駆的なガンマ線バースト爆発機構の数値シミュレーションを実現 (国際会議招待講演は20+2回)。
- ブラックホール回転エネルギーの引き抜き効果により、ジェット (ガンマ線バースト) の噴出を確認。2次元計算 (世界で2グループ)、3次元・初期条件軸対称計算 (世界初)。
- 世界初のガンマ線バースト3次元計算により、不安定

ブランドフォード・ズナジェック効果は数値計算で見えている。

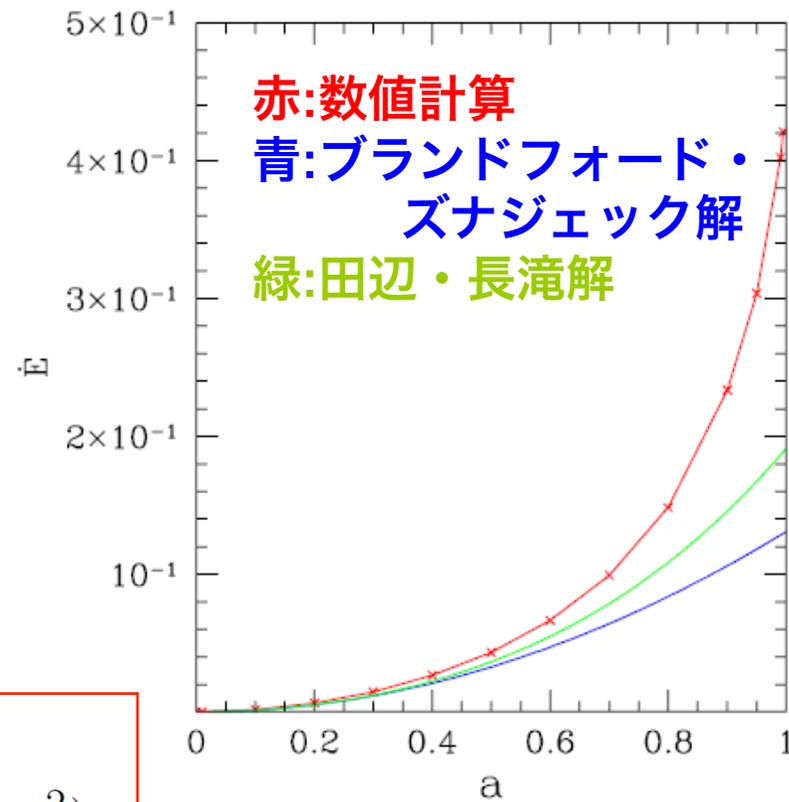


(Split-) Monopole Solution.

$$\dot{E} = \frac{C^2 \pi a^2}{24 M^2} + \frac{\pi C^2 a^4}{1080 M^4} (56 - 3\pi^2)$$

C:磁場の振幅. a: カーパラメーター.

Blandford and Znajek 1977
Tanabe and S.N. PRD 2008



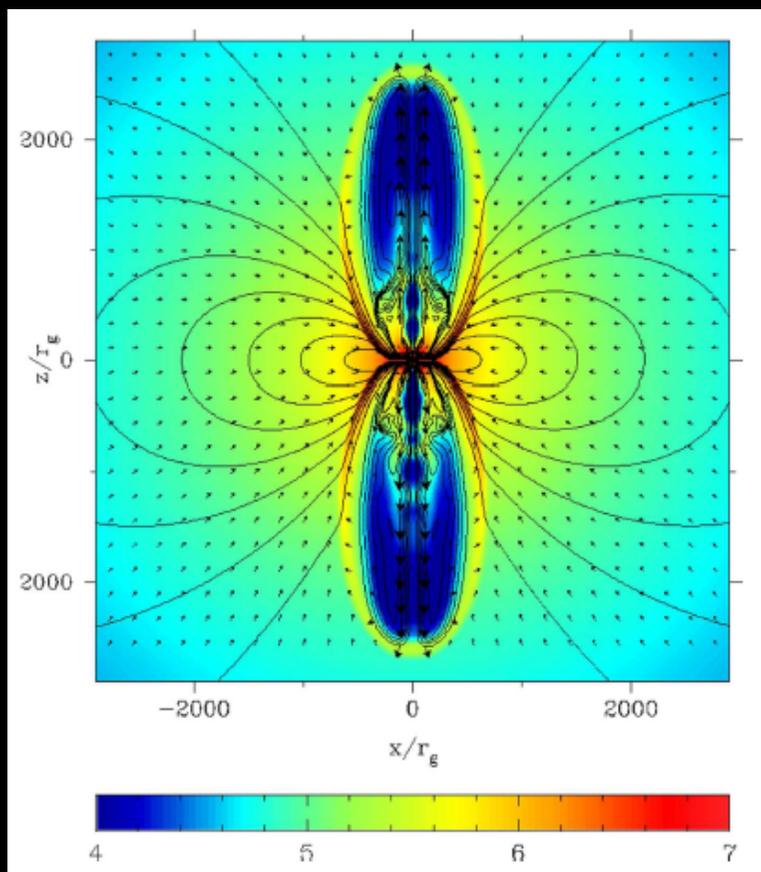
ブラックホールの回転 (スピニング)

単位時間にブラックホールから抜け出るエネルギー

今や、この解は数値計算コードのチェックのひとつに使われている。
大きいカーパラメータ、違う磁場構造のためには数値シミュレーションが必要。

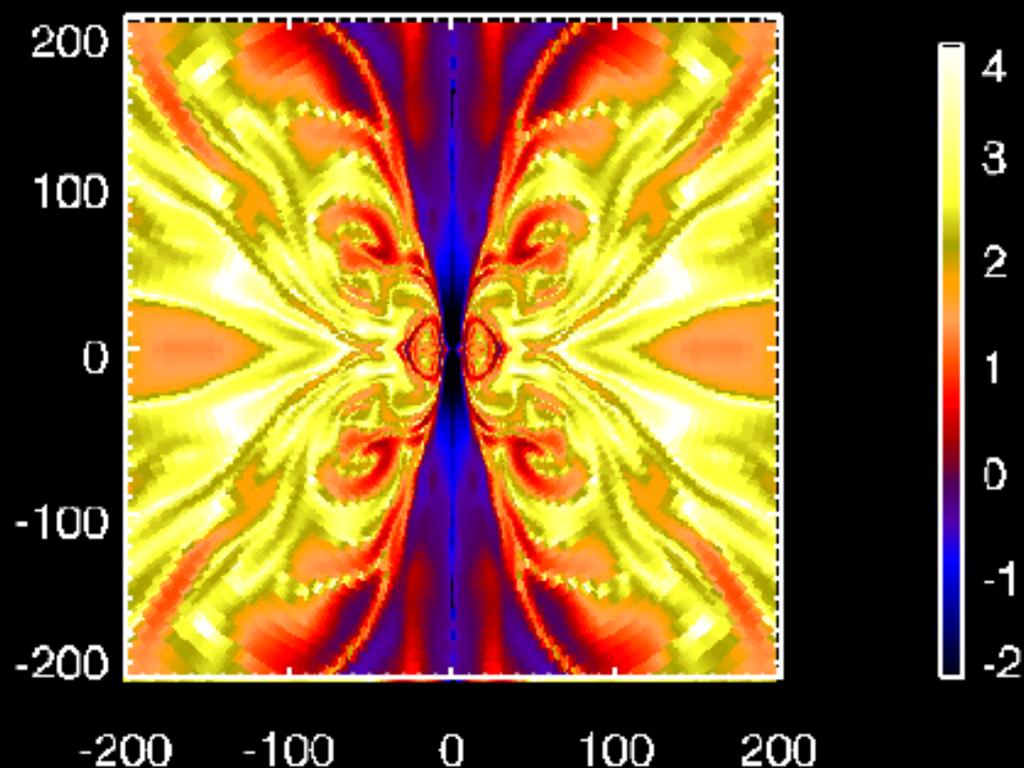
世界のガンマ線バースト爆発機構の 数値シミュレーション例 (2次元軸

対称系)



Barkov and Komissarov 2008
2次元一般相対論的磁気流体計算
密度分布

このジェットが後にガンマ線バーストになる。

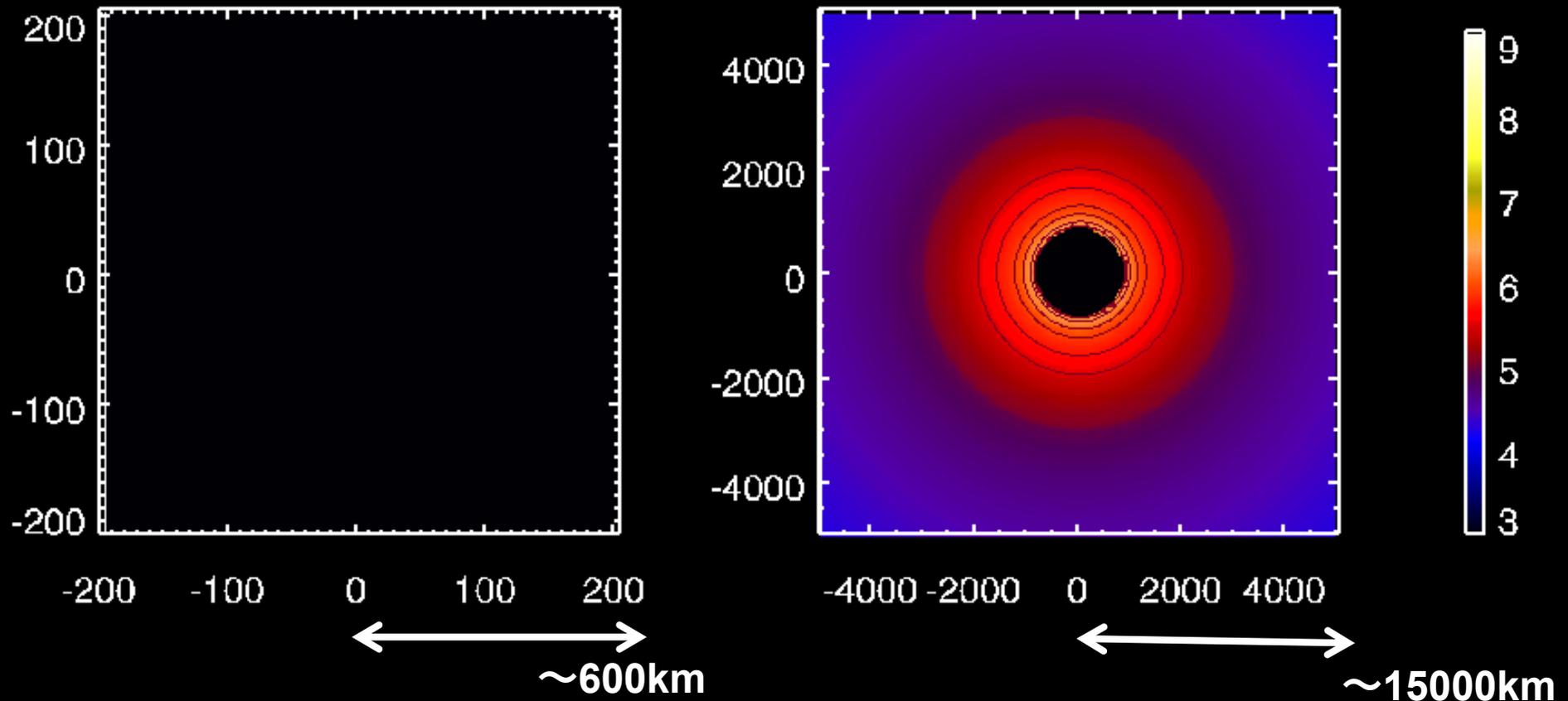


長瀧 2009

2次元一般相対論的磁気流体計算
熱圧力と磁気圧力の比

ブラックホールの回転エネルギーを
引き抜き、ジェットが駆動されている。

Nagataki 2009 シミュレーション例

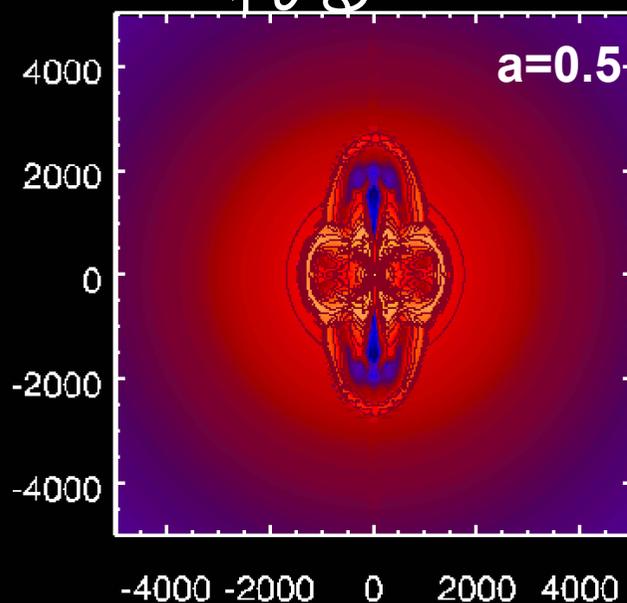
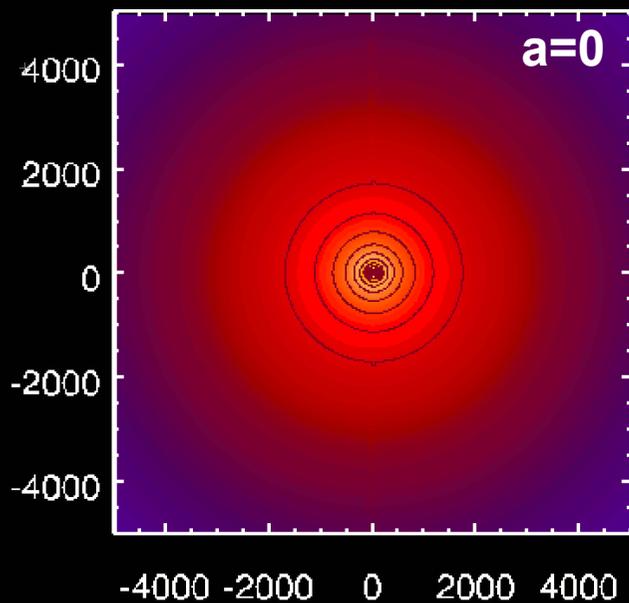


ログスケールで描いた密度分布 (g/cc)

C=G=M=1 単位系

時間は $T \sim 100000 (GM/c^3)$ 程度追った。

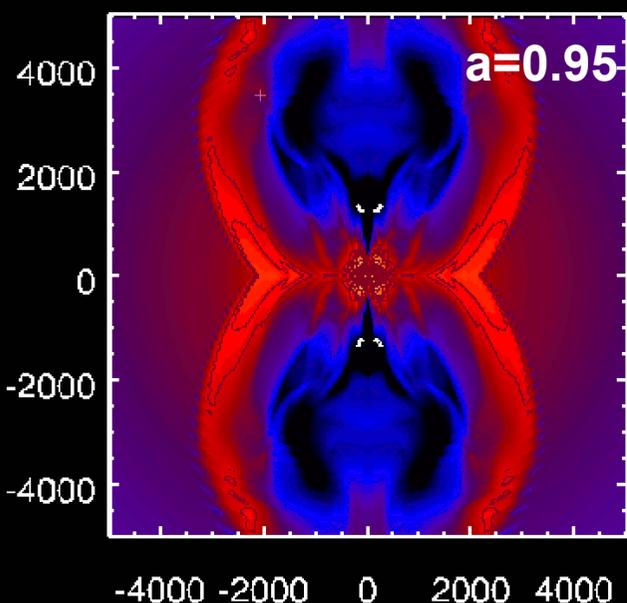
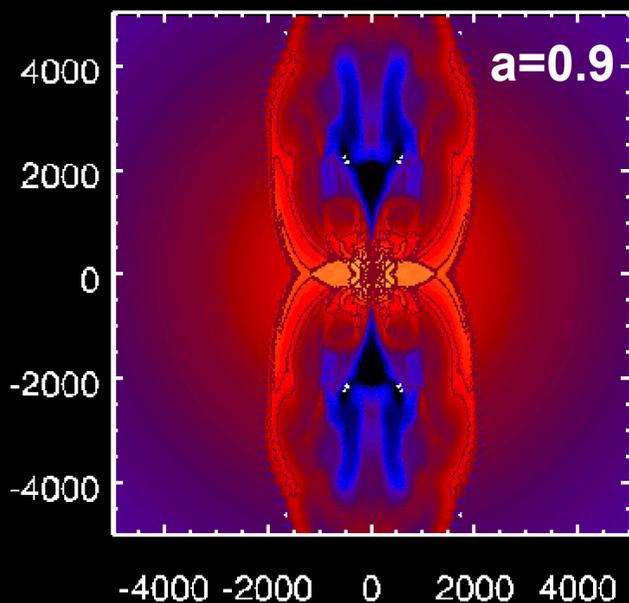
ブラックホールの回転が速いと強いジェットが駆動される



S.Nagataki 2011

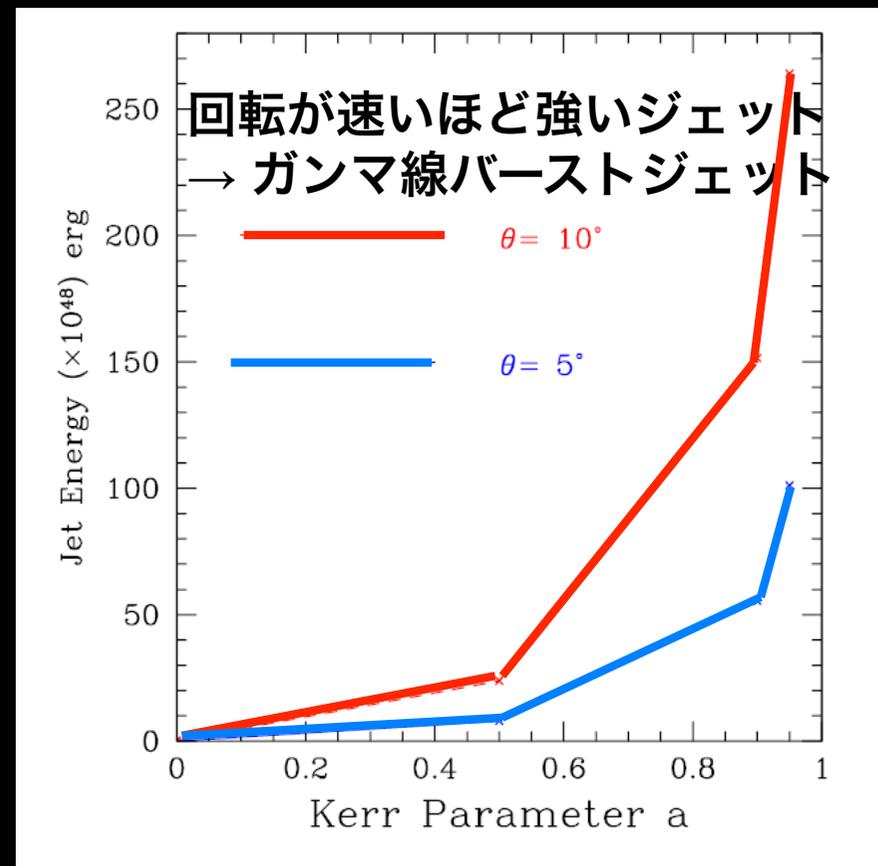
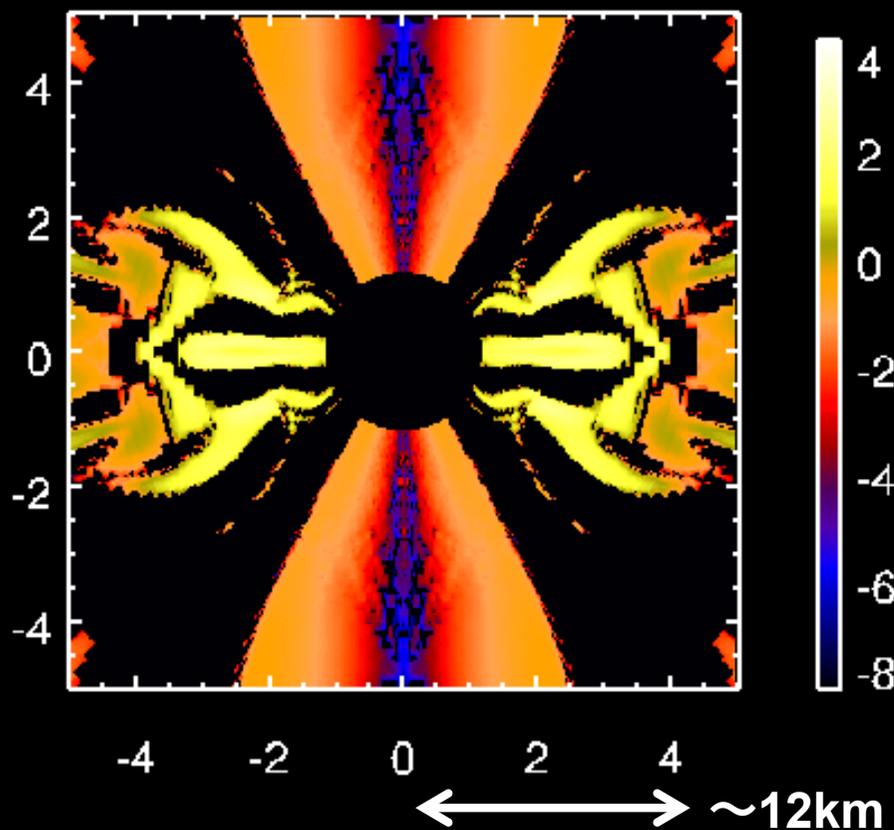
密度分布。
同じ時間でのスナップ
ショット。

←→ ~15000km



ブランドフォード・ズナジェット機構の確認 & ジェットのエネルギー

S.Nagataki 2011



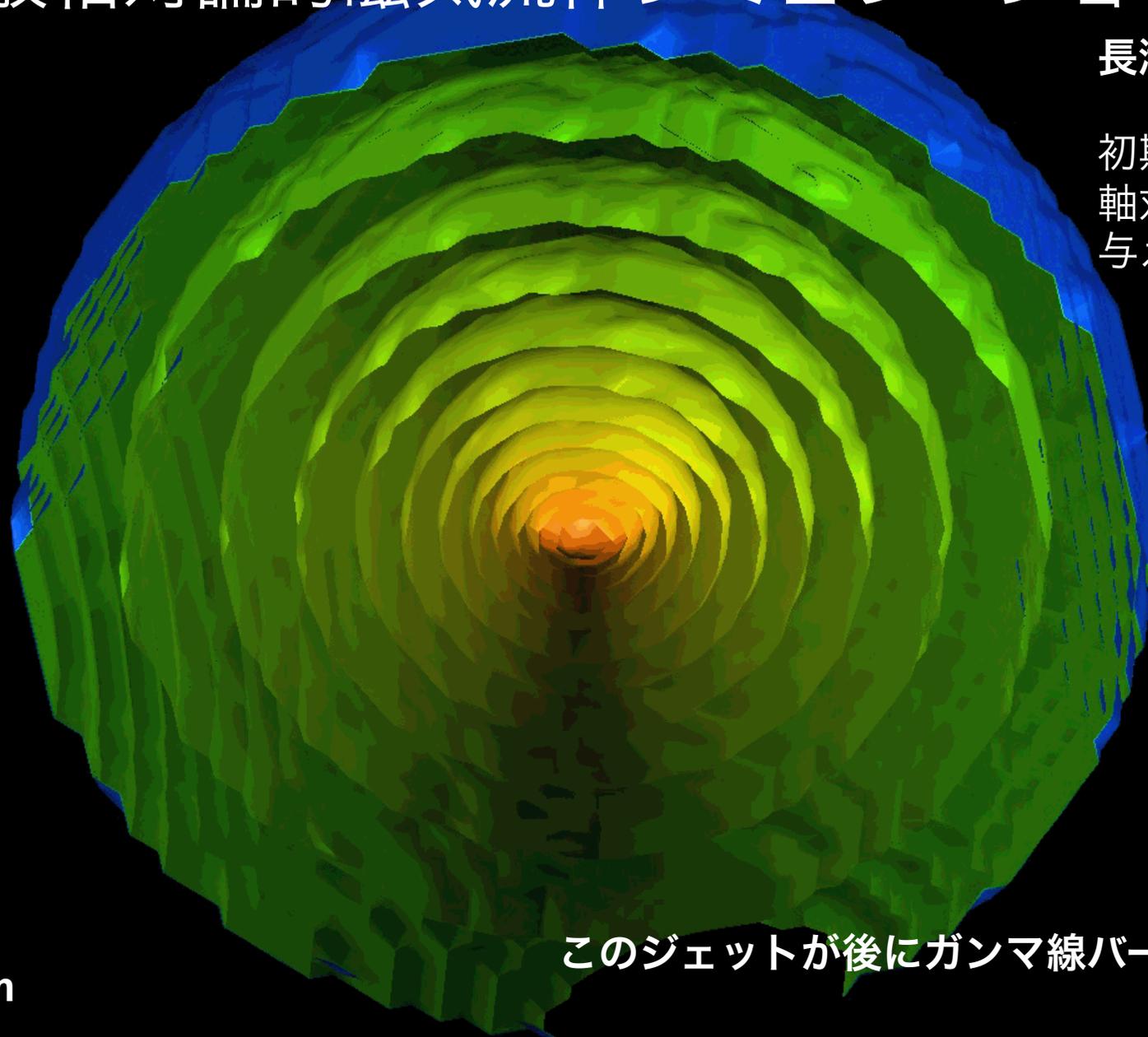
1.576秒に於けるブランドフォード・ズナジェットフラックス分布。単位は 10^{50} erg/s/sr (ログスケール)。
 $a=0.95$ 。

1.575秒に於けるジェットのエネルギー
 $a=0, 0.5, 0.9, 0.95$ 。

世界初のガンマ線バーストの3次元 一般相対論的磁気流体シミュレーション例

長瀧 2012

初期条件は
軸対称分布を
与えた。



~3000km

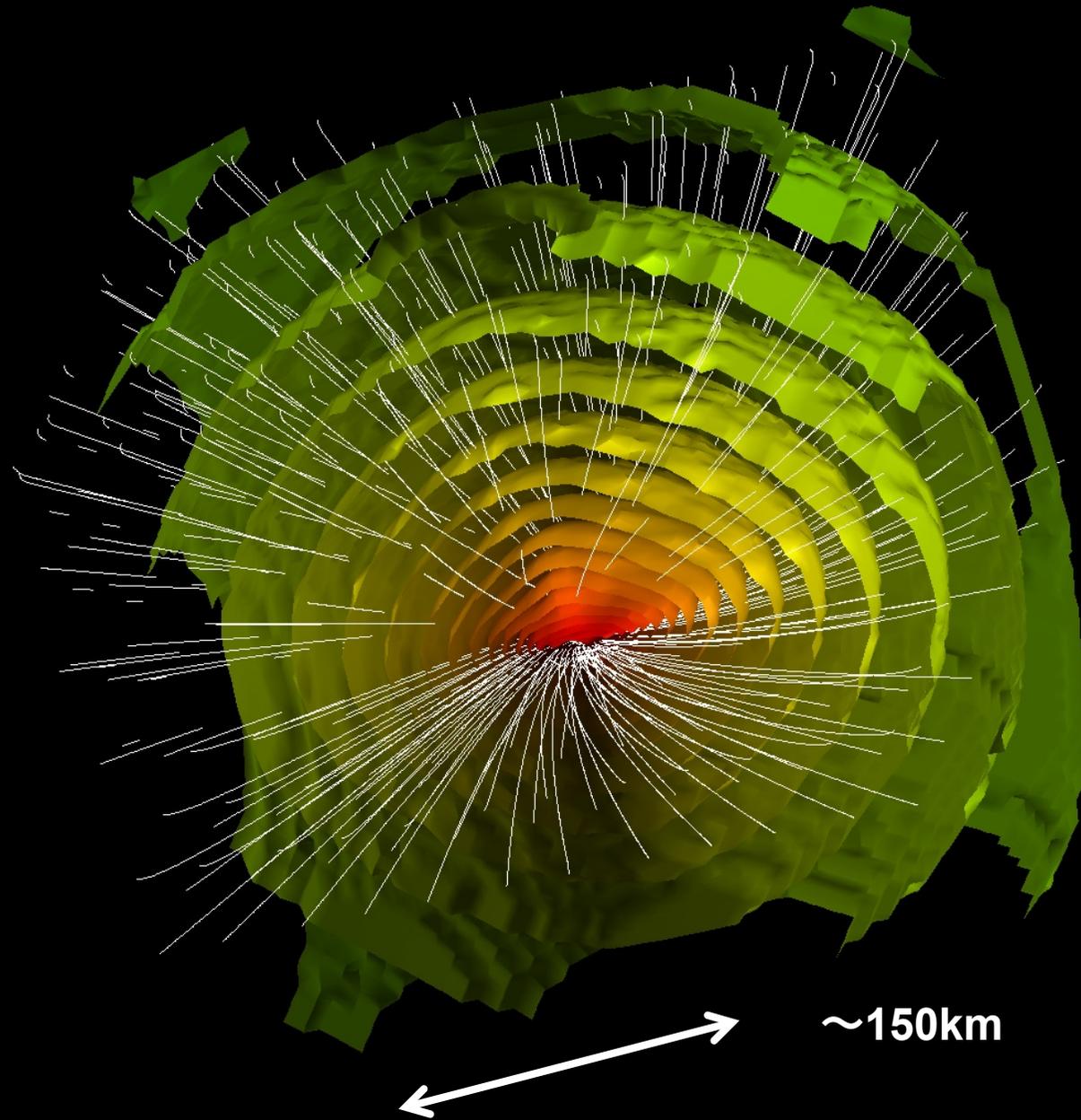
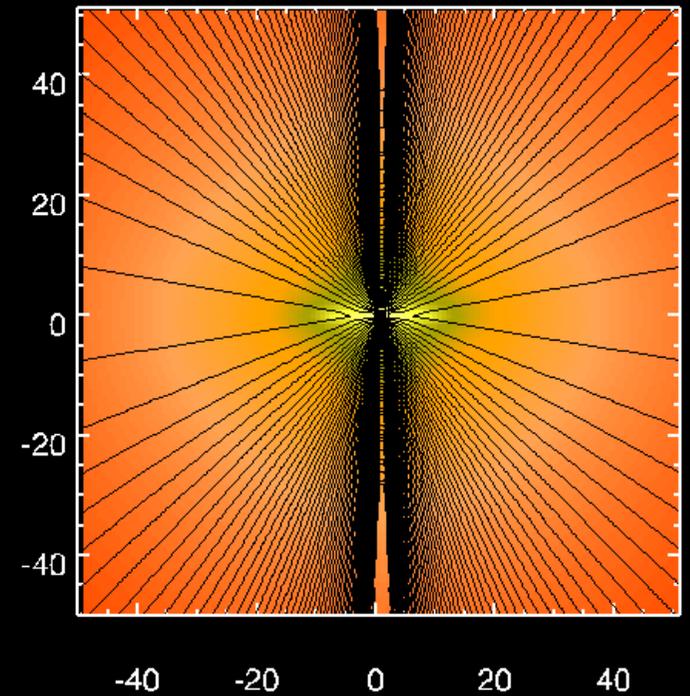
このジェットが後にガンマ線バーストになる。

$T \sim 0.8$ 秒

左図：密度分布（色）と
磁力線（白線）

下図：子午面に於ける密度
分布（色）と磁力線（黒線）

↔ ~ 150 km



↔ ~ 150 km

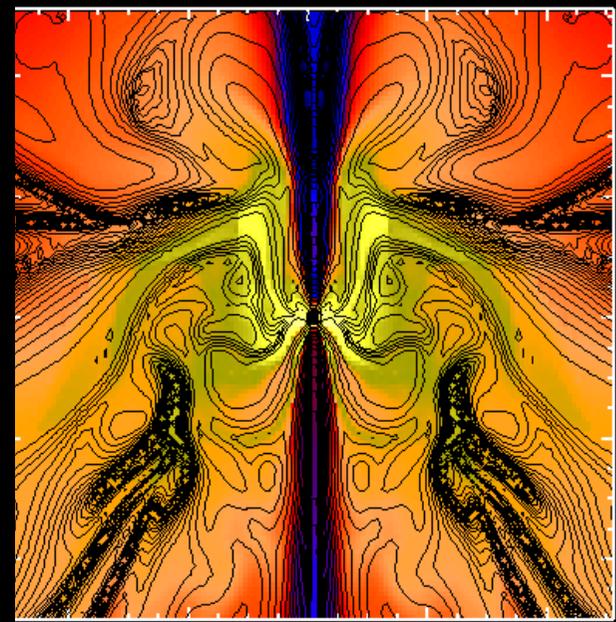
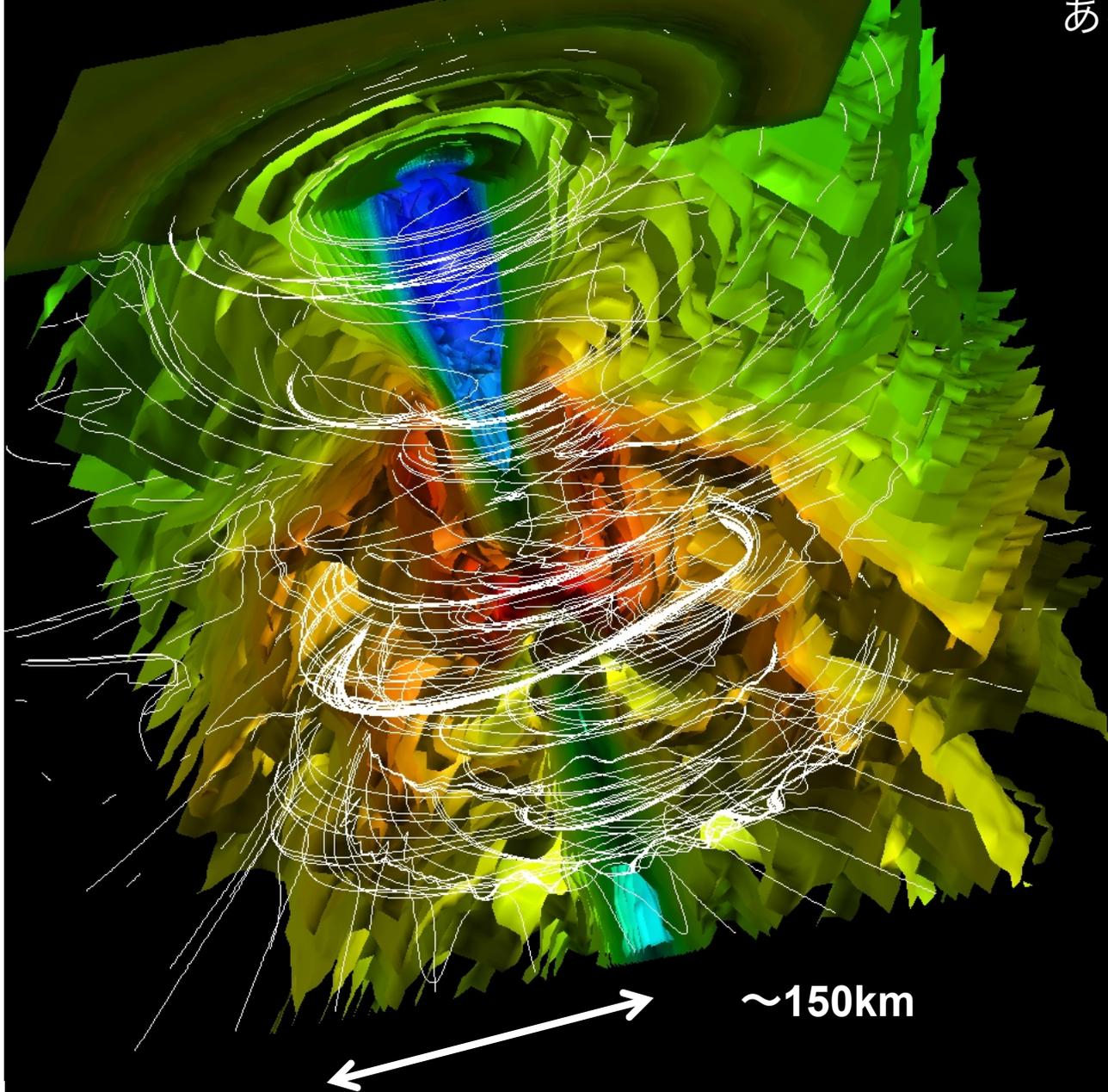
ブラックホールの回転エネルギーを
引き抜き、ジェットが駆動されている。

ジェットのエネルギーとしては
ガンマ線バーストの1/10程度で
あるなど、まだ課題もある。

T~0.9秒.

左図：密度分布（色）と
磁力線（白線）

下図：子午面に於ける密度
分布（色）と磁力線（黒
線）
←————→ ~150km

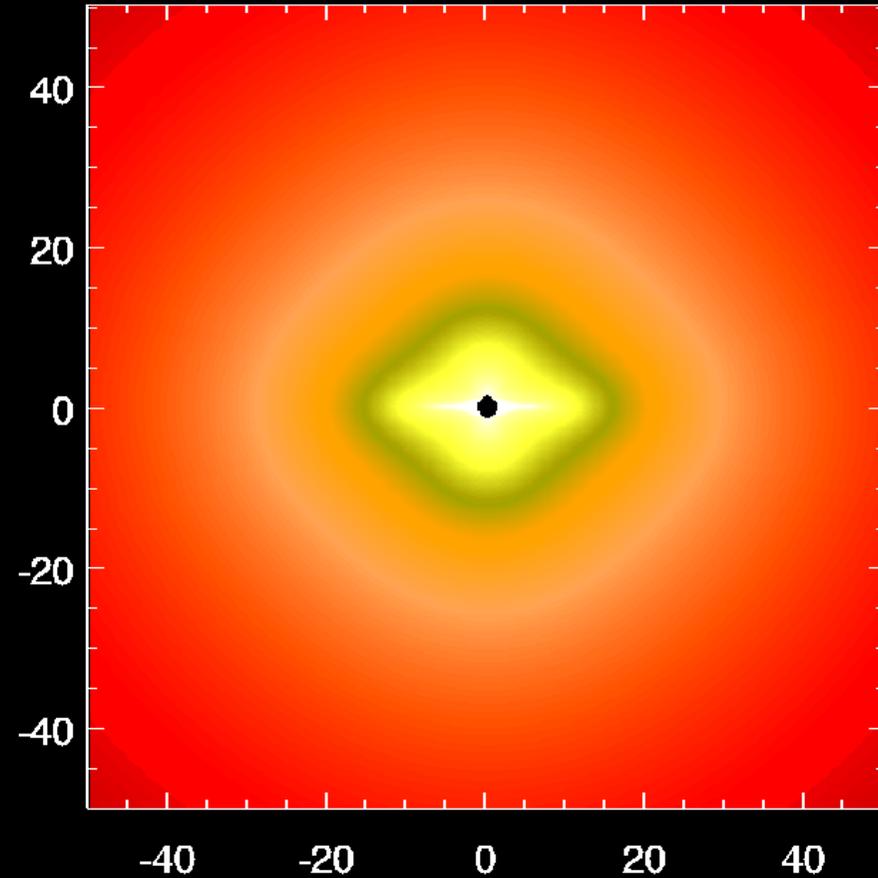
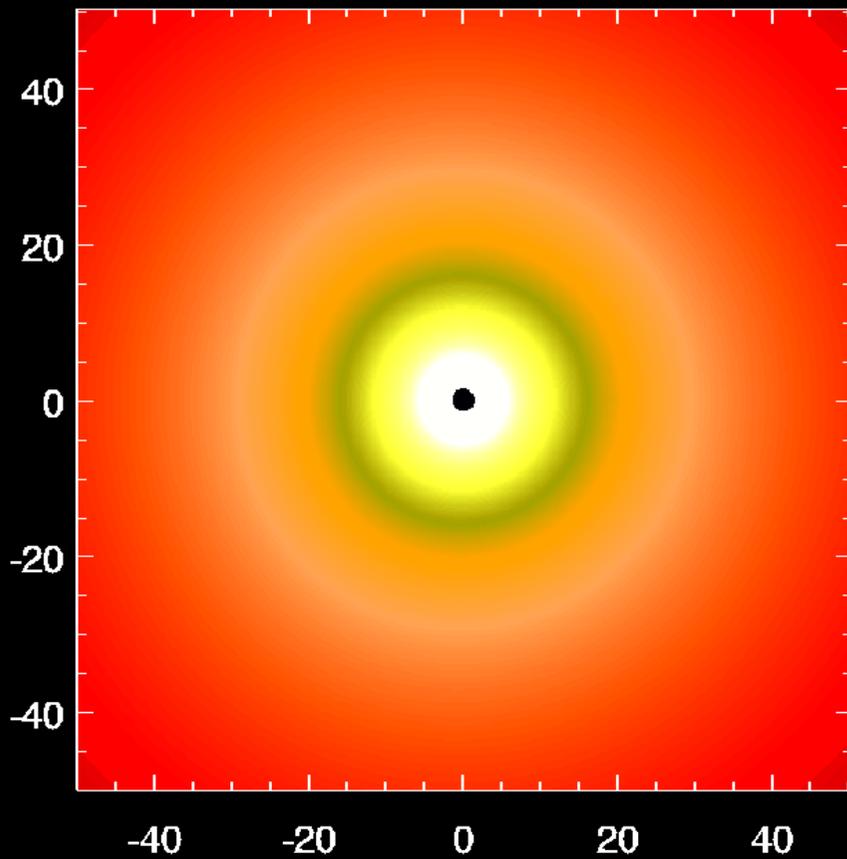


-40 -20 0 20 40

3次元一般相対論的磁気流体計算：予想外の新展開 密度に1%の揺らぎを与えるとダイナミクスが大きく変わる

長瀧 2012

←→ ~150km



赤道面に於けるスライス

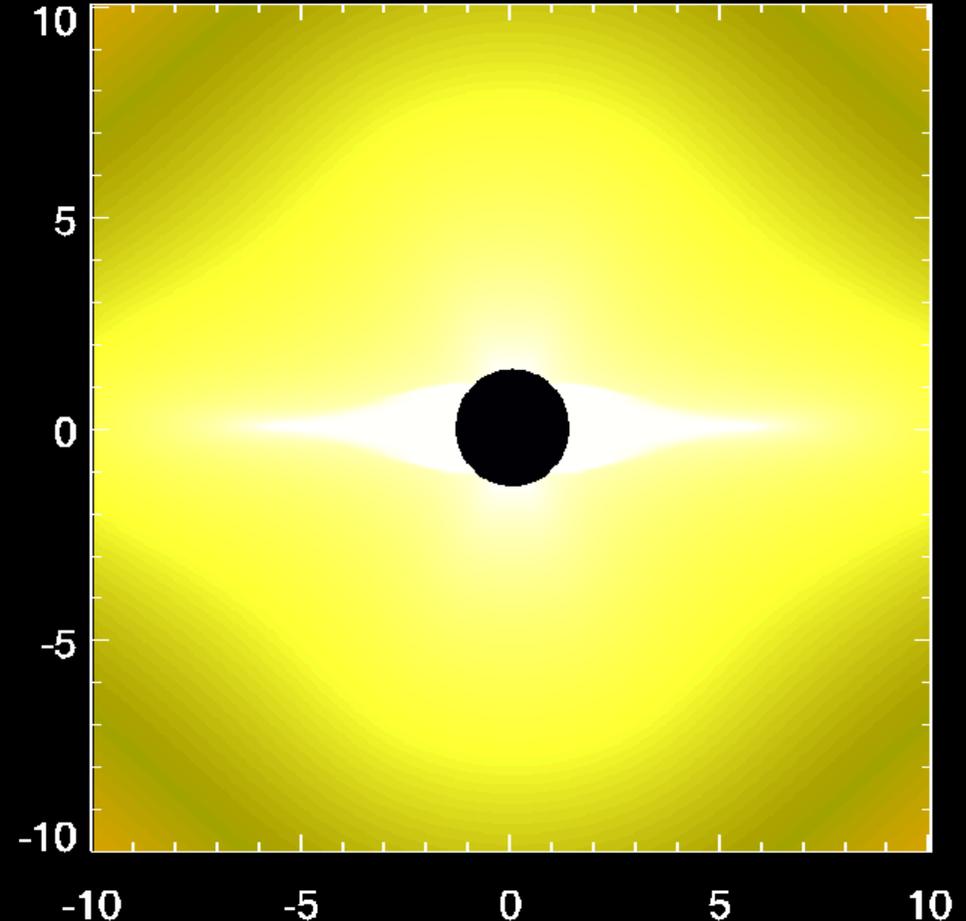
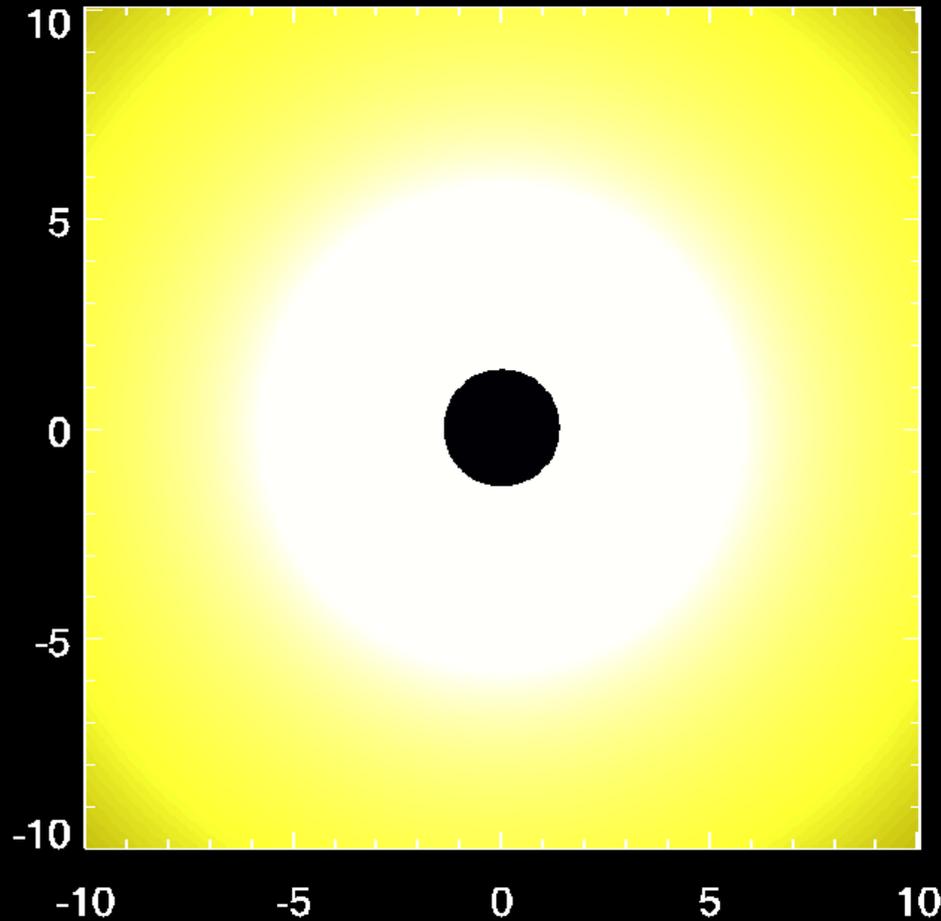
子午面に於けるスライス

注：図は2次元面に投影（スライス）しているが、シミュレーションは3次元

超新星成分の形成と関係か？

長瀧 2012

~30km ←→



赤道面に於けるスライス 子午面に於けるスライス

注：図は2次元面に投影（スライス）しているが、シミュレーションは3次

最近の超新星・ガンマ線バーストに関する代表的論文

- ガンマ線バースト放射、残光に関する理論研究：

Xu, 長瀧, Huang, ApJ 2011, 2012

- ガンマ線バースト起源の最高エネルギー宇宙線に関する理論研究：

水田, 長瀧, 青井, ApJ 2010

Calvez, Kusenko, 長瀧, PRL 2010

- ガンマ線バースト起源の高エネルギーニュートリノに関する理論研究：

村瀬, 長瀧, PRL 2006

村瀬, 長瀧 PRD 2006

He, Liu, Wang, 長瀧, 村瀬, Dai, ApJ 2012

- 超新星残骸に関する理論研究：

Lee, Ellison, 長瀧, ApJ 2012

様々な角度から、ガンマ線バースト現象の理解に挑戦。

長瀧超新星・ガンマ線バースト研究室（仮称）

初期メンバー

- 長瀧重博（准主任研究員）
- 伊藤裕貴（科研費PD）
- 小野勝臣（科研費PD）
- Jirong Mao (JSPS PD)
- Alexey Tolstov (JSPS PD)

**初期メンバーに加え、
現在PD4名程度公募中。**

基礎科学特別研究員（PD）： 3年。月額48万7千円。研究費年100万円。通勤手当、住宅手当

国際特別研究員（外国人PD）：ほぼ同上。

大学院生リサーチアソシエイト（博士課程）：最長3年。月額16万4千円。通勤手当。

その他のPD制度もある。

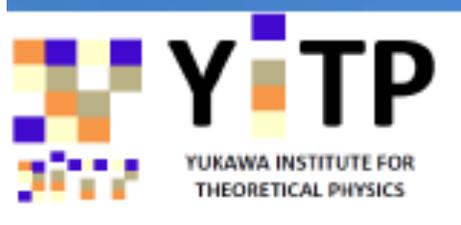
JSPS（日本人・外国人PD）の受け入れも可能。

Supernovae and Gamma-Ray Bursts in Kyoto, 2013

Oct.14-Nov.15, 2013.

2 Weeks for Conferences & 3 Weeks for Workshops.

- Conference for SNe: Oct.28-Nov.1, 2013.
- Conference for GRBs: Nov.11-15,2013.
- 3-Week Workshop (Seminars in the Morning, and Free Discussions in the Afternoon).



<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ws/2013/sngrb/SN-GRB2013.html>

Organizers: S.Nagataki (Chair), M.Ando (NAOJ), K.Asano (TIT), T.Hatsuda (RIKEN, U. Tokyo), K Iida (Kochi), K. Ioka (KEK), N. Itagaki (YITP), Y. Ito (YITP), T. Kajino (NAOJ), N. Kawai (TIT), K. Kiuchi (YITP), K. Kotake (NAOJ), T. Kunihiro (Kyoto), S. Lee (YITP), K. Maeda (IPMU), J. Mao (YITP), A. Mizutani (KEK), M. Nakahata (U. Tokyo), J. Nakamura (Hiroshima), M. Ono (YITP), K. Ohta (Kyoto), K. Omukai (Kyoto), A. Ohnishi (YITP), Y. Sekiguchi (YITP), M. Shibata (YITP), K. Sumiyoshi (Numazu), Y. Suwa (YITP), H. Suzuki (Tokyo U. of Science), T. Takiwaki (NAOJ), N. Tominaga (Konan), T. Totani (Kyoto), T. Tsuru (Kyoto), H. Umeda (U. Tokyo), S. Yamada (Waseda), D. Yonetoku (Kanazawa), A. Yoshida (Aoyama Gakuin)

まとめ

- ブラックホール形成仮説に基づく一般相対論的磁気流体シミュレーション。
- 2次元軸対称・3次元初期条件軸対称モデルでジェット形成（ブラックホール回転エネルギー引き抜き効果）。
- 3次元計算にて1%程度の揺らぎに対して不安定（超新星成分と関連があるかもしれない）。
- 超新星・ガンマ線バースト研究室2013年度スタート。
- 超新星・ガンマ線バースト国際会議2013年・京都。