

素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第13回

“中心エンジンにまつわる今後の展望”



長瀧天体ビッグバン研究室

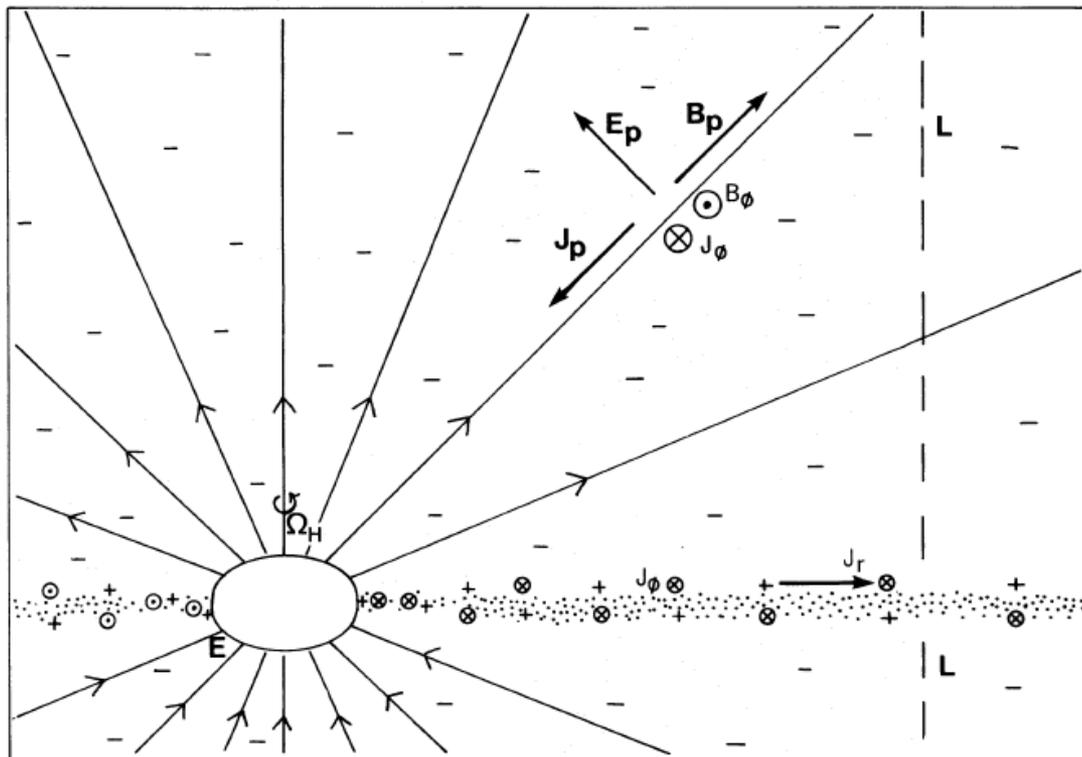
理化学研究所
准主任研究員

長瀧 重博

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」
共催：理化学研究所 iTHESプロジェクト 2014年11月27日-28日、理研和光キャンパス

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・ズナジェック過程

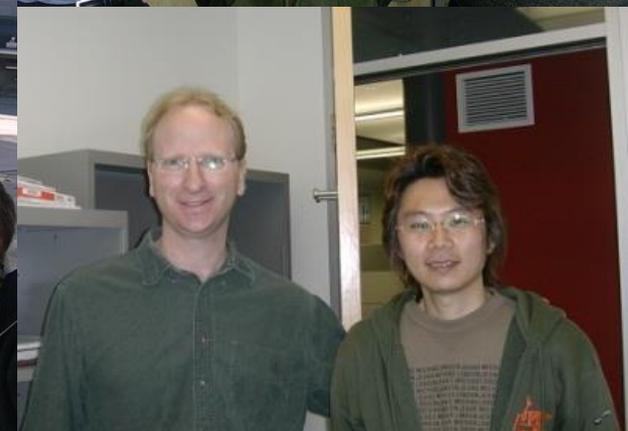
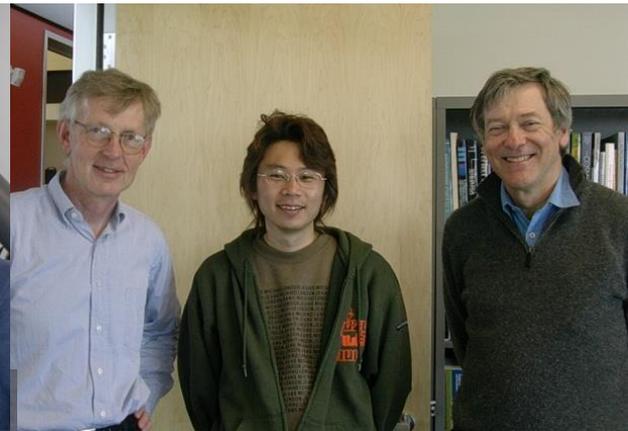
Blandford and Znajek (1977)



2005年カナダの会議
左: Roger Blandford氏
右: 私

ゆっくり回転している電磁場が、それより速く回転しているブラックホールに
吸い込まれることによりエネルギーの流れとしては外向きになる。
ブラックホールの回転エネルギーが効率よく引き抜かれる。

2006年、スタンフォード大学(KIPAC)で一般相対論的磁気流体(YAMATO)コード開発スタート



Blandford-Znajek 効果の数値シミュレーション

2D計算。Grid Size = (300,300)

$[r_+ < r < 230]$, $[0 < \theta < \pi]$

Initial Condition:

B_r のみをBZ Mono-Pole解(0次)のものを入れる。

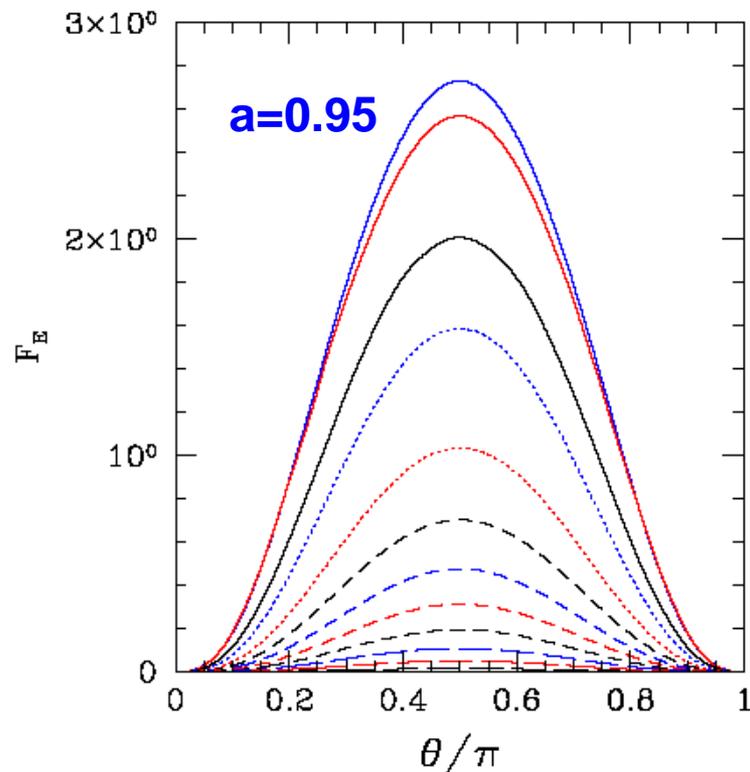
$T=200$ ($c=G=M=1$ 単位系) 追う。

Final Stageにて、Fluxを評価。

$$\dot{E} = 2\pi \int_0^\pi d\theta \sqrt{-g} (-T^r_t)$$

$$= \frac{c^2 \pi}{32} a^2 \int_0^\pi d\theta \sin^3 \theta$$

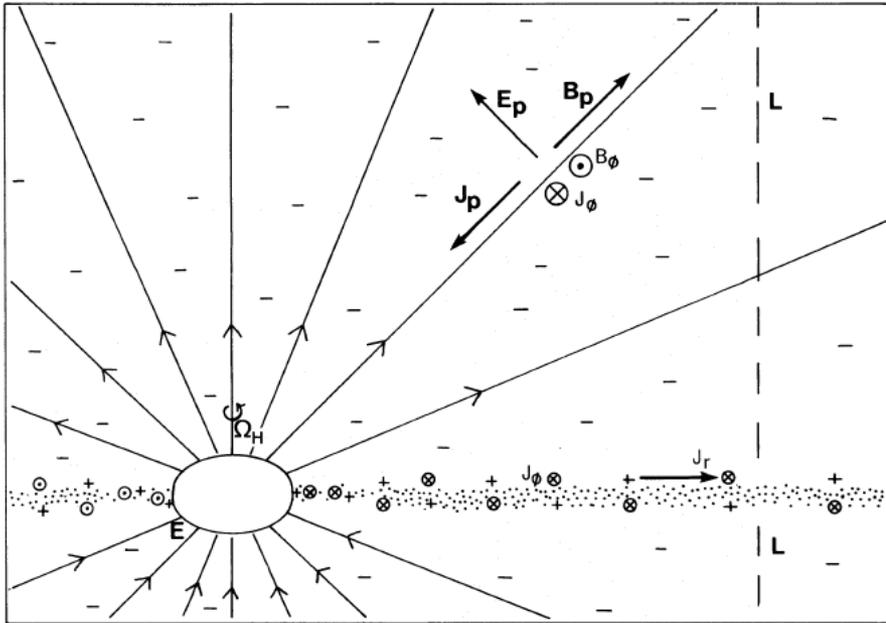
Analytical Prediction (for $a \ll 1$)



いろいろな a (回転度)に対する
Poynting Fluxの角度依存性.

現代ではBlandford-Znajek効果は数値計算で見えている。

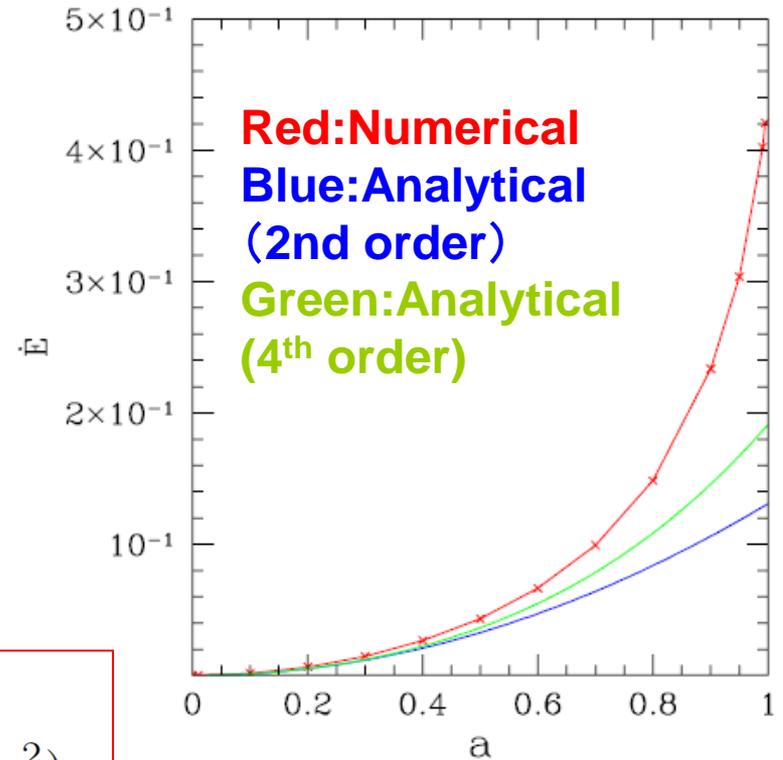
Blandford and Znajek 1977
Tanabe and S.N. PRD 2008



(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: Amplitude of B-Field. **a:** Kerr-Parameter.



This solution can be used to check the validity of numerical codes.
Numerical Simulation is necessary for large a and different B-fields.

§ 中心エンジン研究の現状

エンジン問題に入る前に： 我々のゴールはガンマ線バーストの完全理解

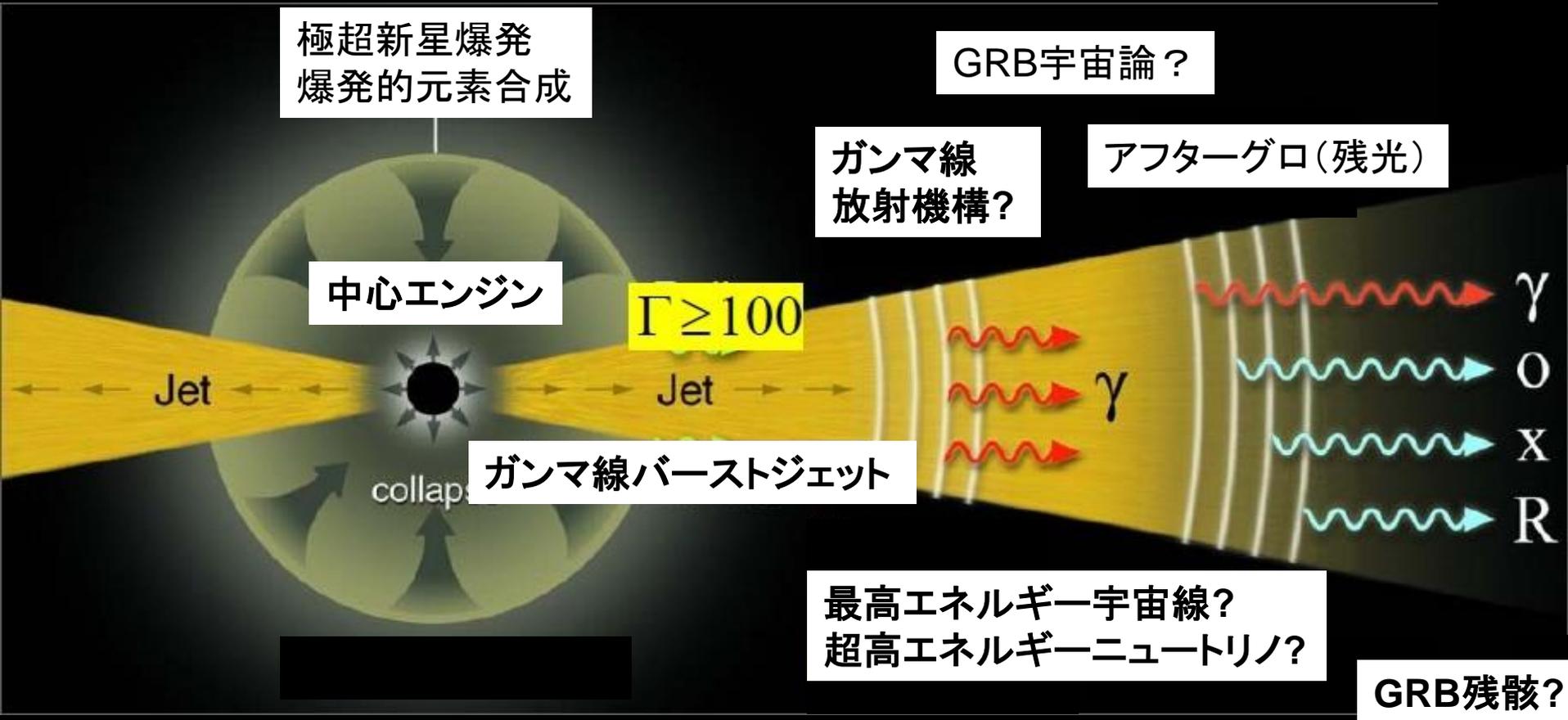
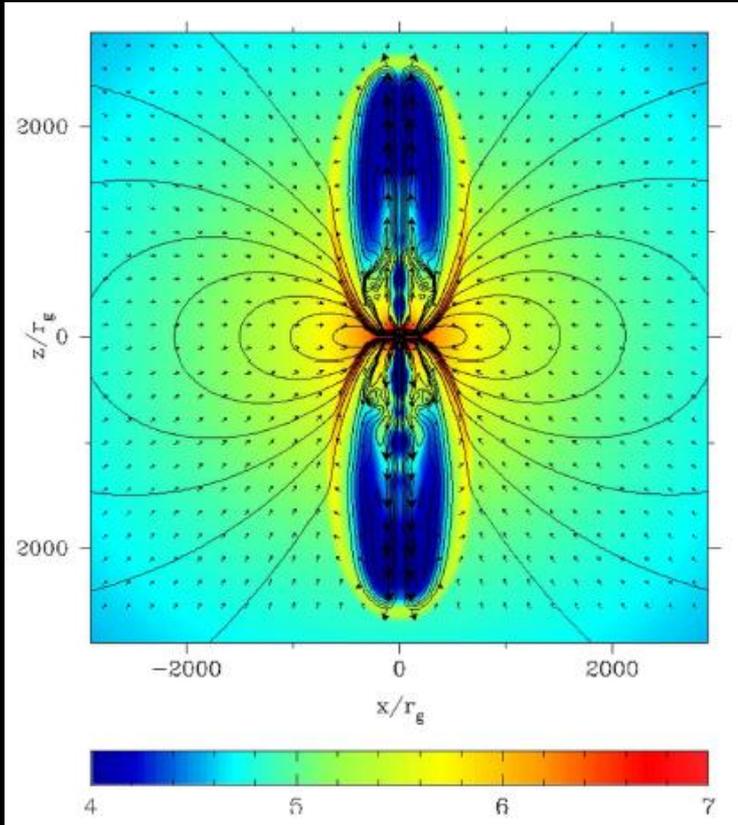
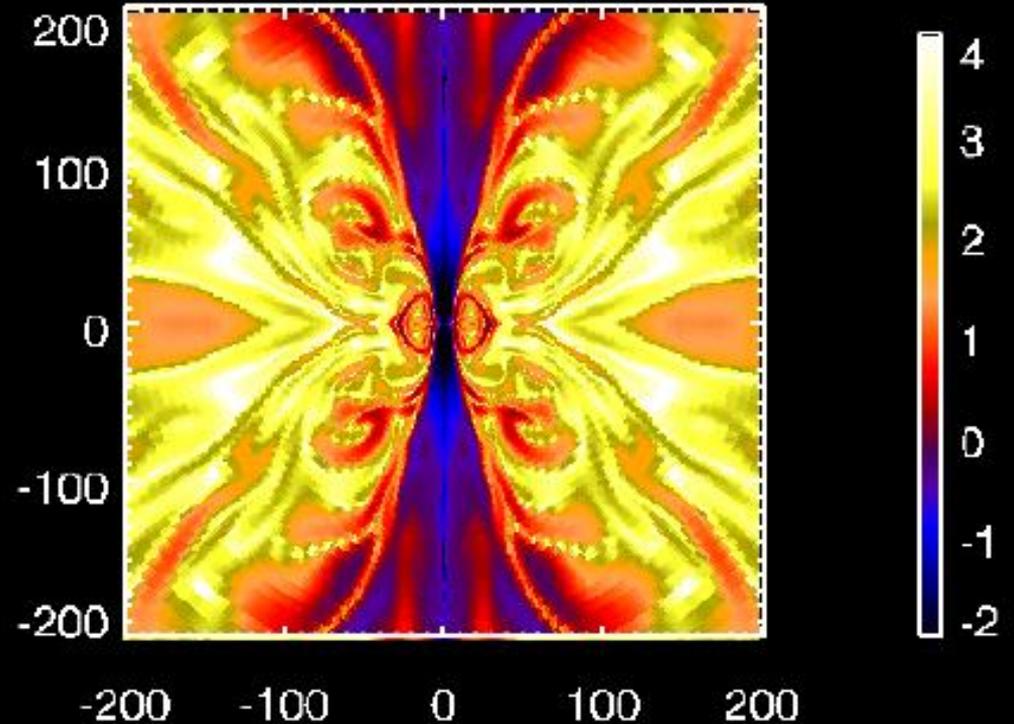


Figure from P. Meszaros: Modified by S.N.

BZ-コラプサーの数値シミュレーション例 (2次元軸対称)



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。

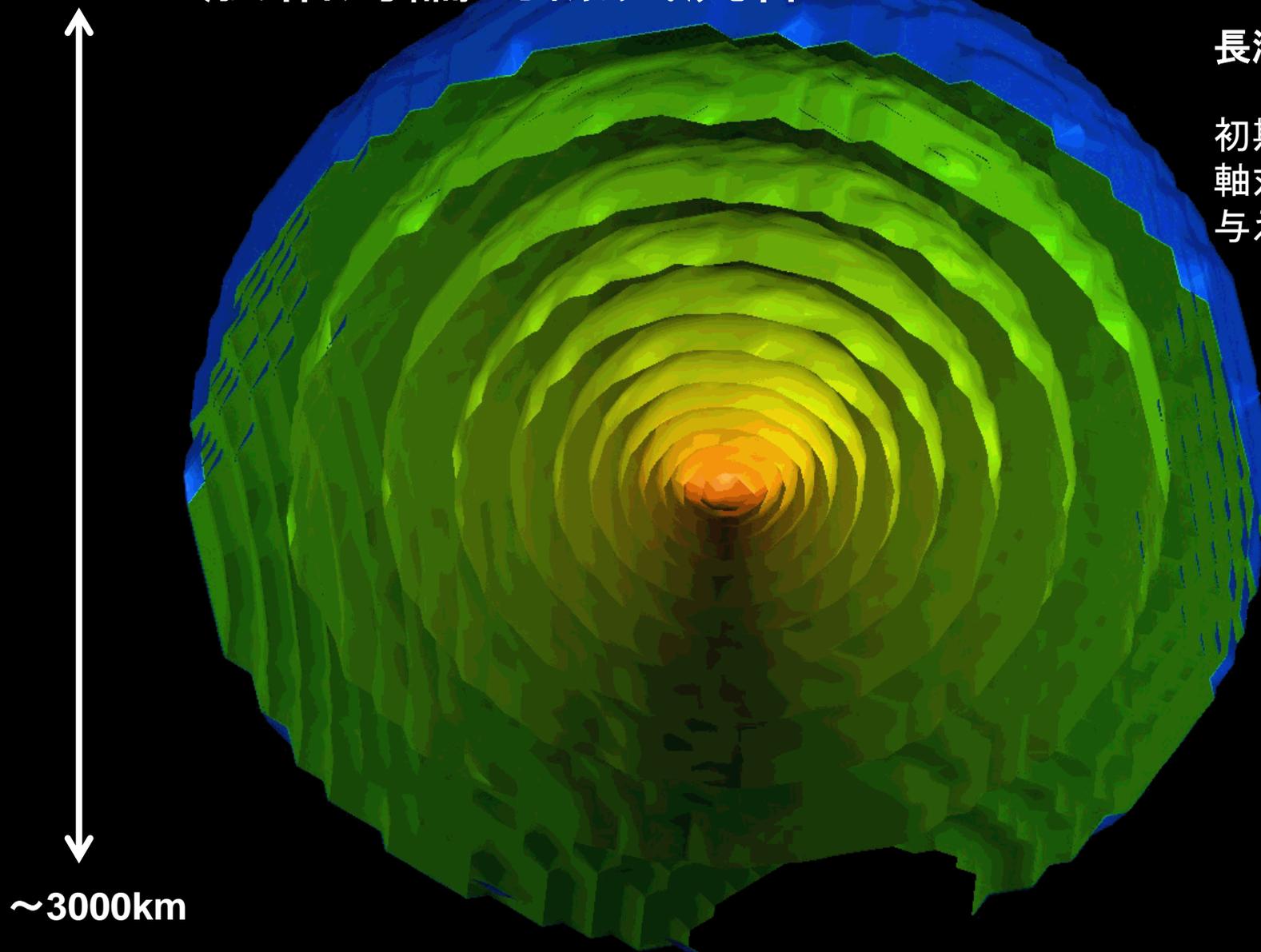


長瀧 2009
2次元一般相対論的磁気流体計算
熱圧力と磁気圧力の比
ブラックホールの回転エネルギーを
引き抜き、ジェットが駆動されている。

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。

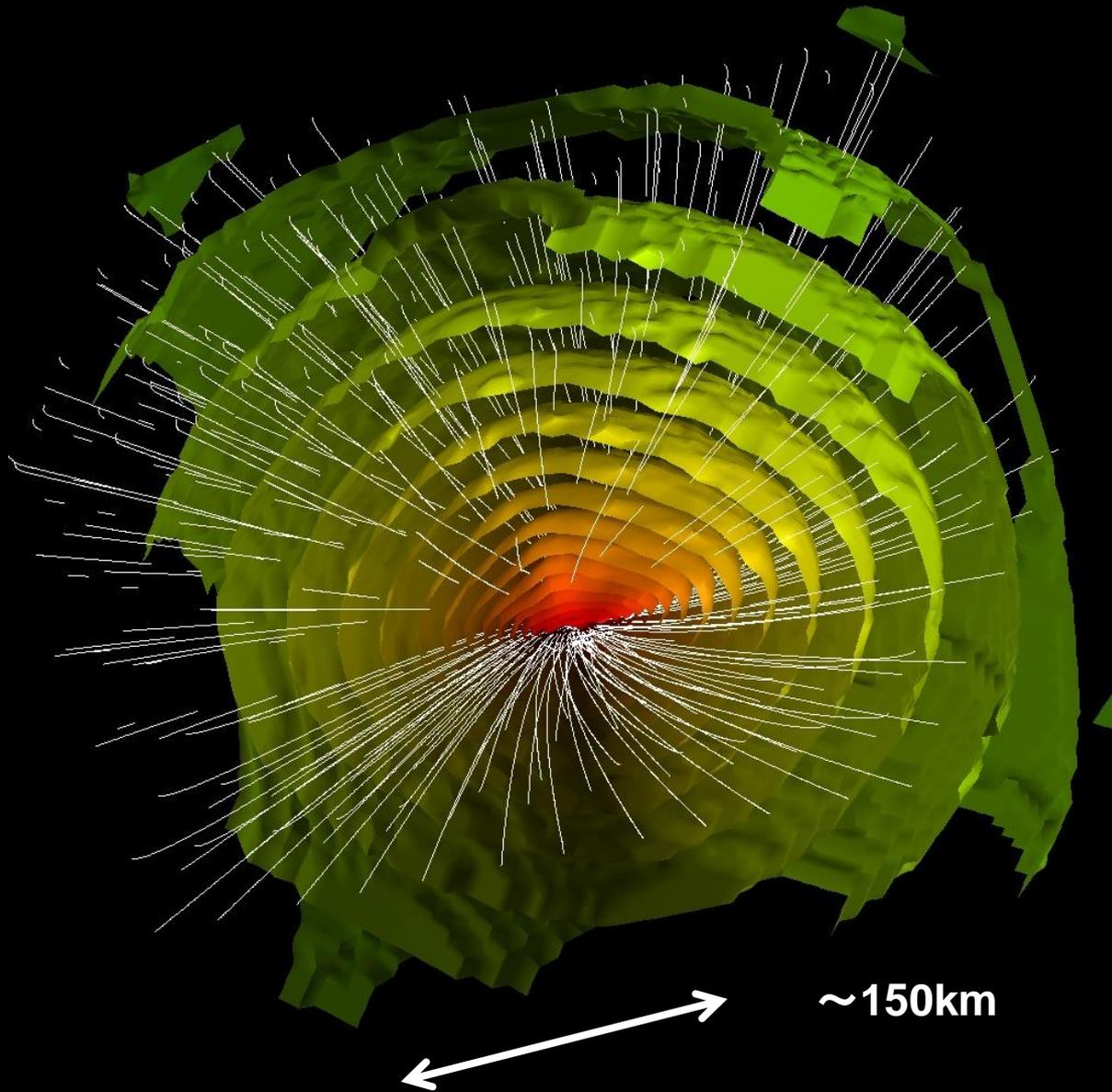


~3000km

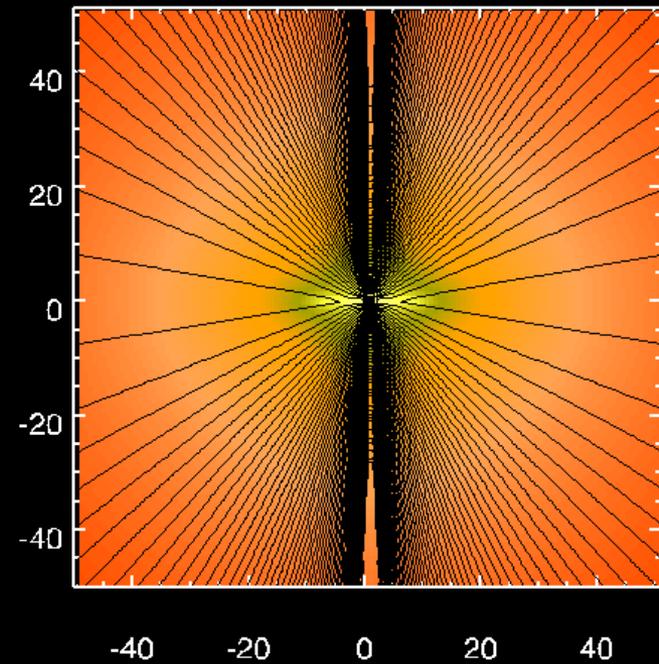
T~0.8秒

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)



~150km



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。

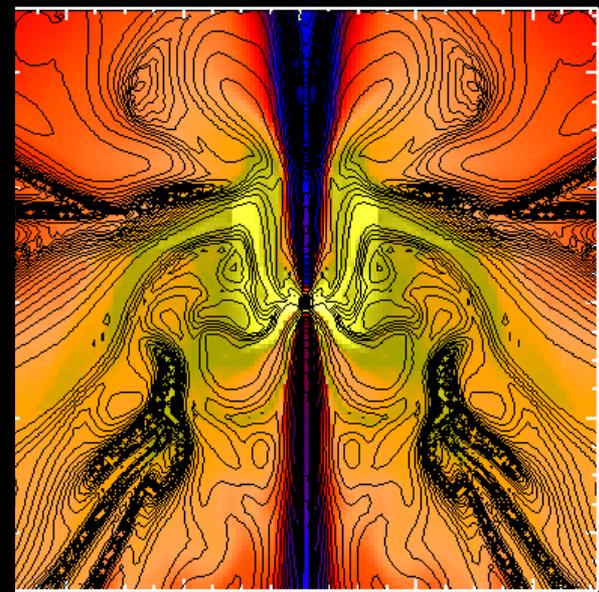
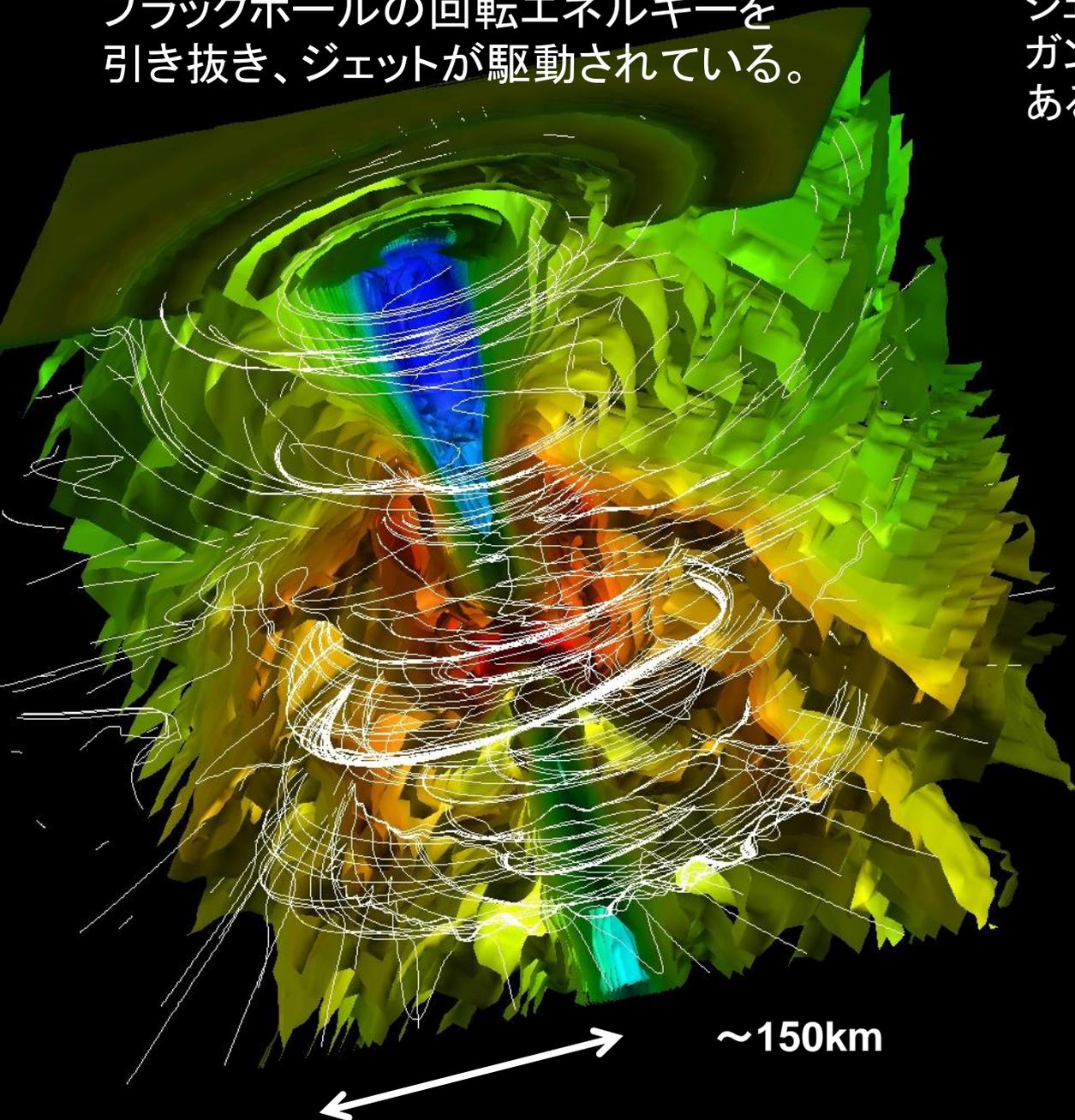
ジェットのエネルギーとしては
ガンマ線バーストの1/10程度で
あるなど、まだ課題もある。

$T \sim 0.9$ 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)

←→ ~ 150 km

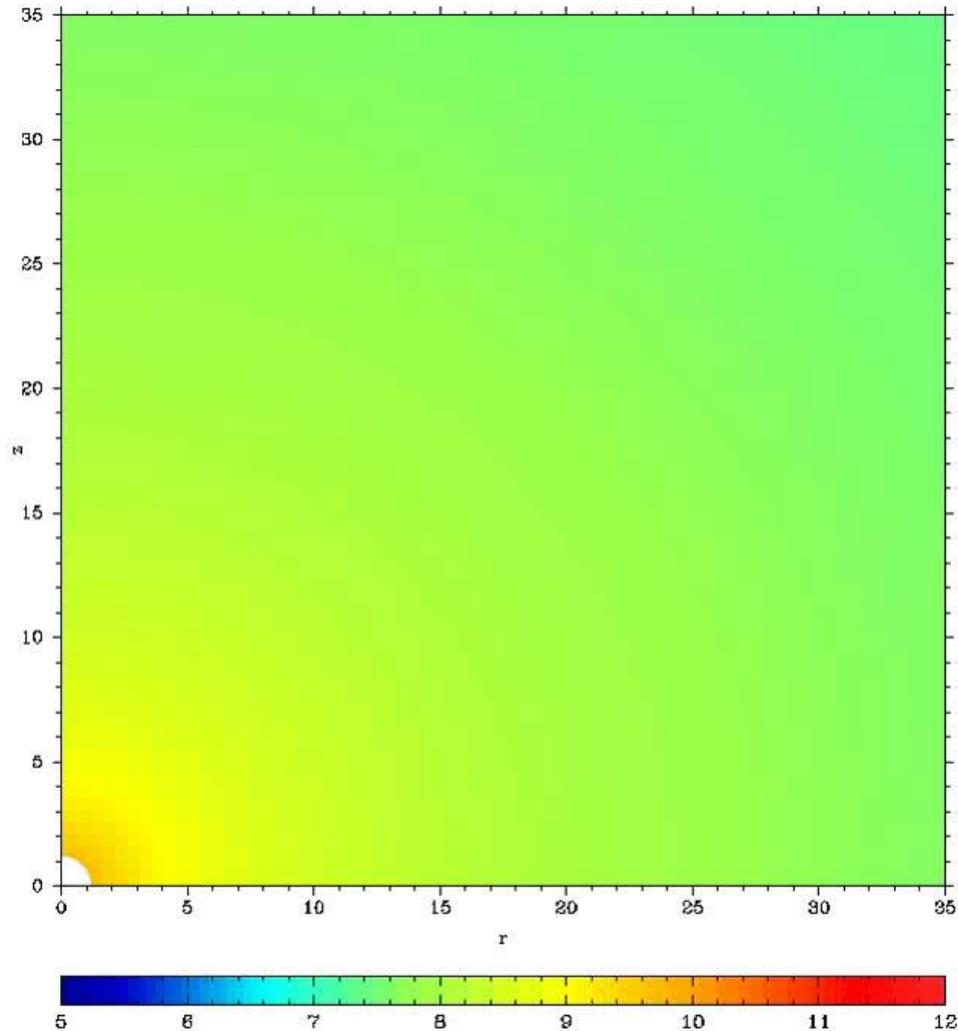


-40 -20 0 20 40

BZ-コラプサーのシミュレーション例

COLLAPSEAR

t = 85.9



M. Barkov
(RIKEN)

回転軸

色は密度
線は磁力線

赤道面

§ 中心エンジンの展望

宇宙最大爆発・ガンマ線バースト 爆発メカニズム解明への挑戦

目的

- 手に取るように、宇宙最大爆発の全貌を解明する。
- 一般の方にも平易な言葉で宇宙最大爆発を説明出来るところまで理解を深める。

手段

- この究極的な現象を理解するためには、更にコードを改良し、**究極コード**に仕上げる必要がある。
- 宇宙最大爆発を次世代スーパーコンピュータ上で実現。

究極コードへのロードマップ

二大柱 非常に難しい課題だが、是非理研で挑戦したい。

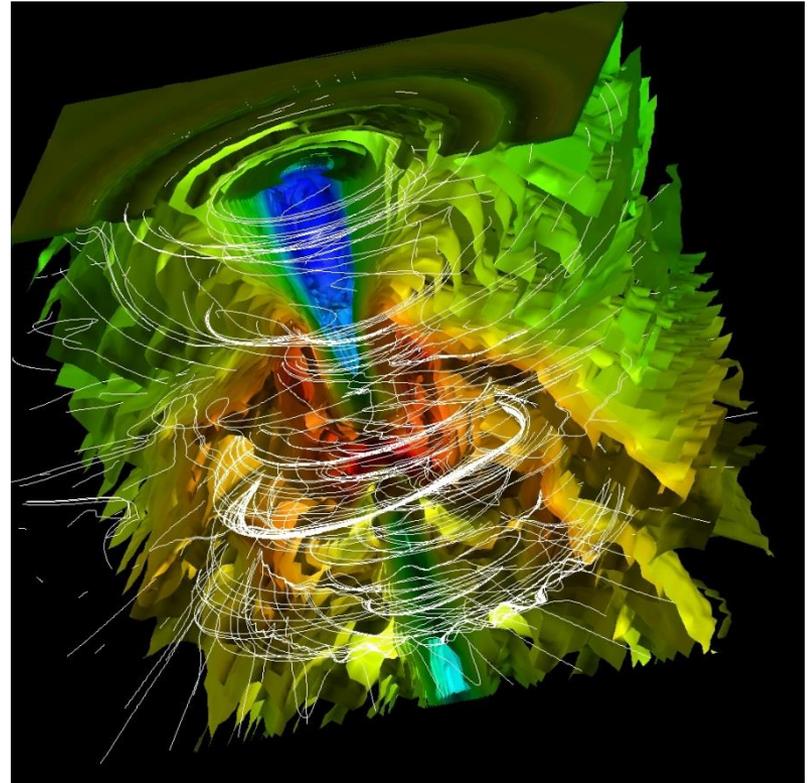
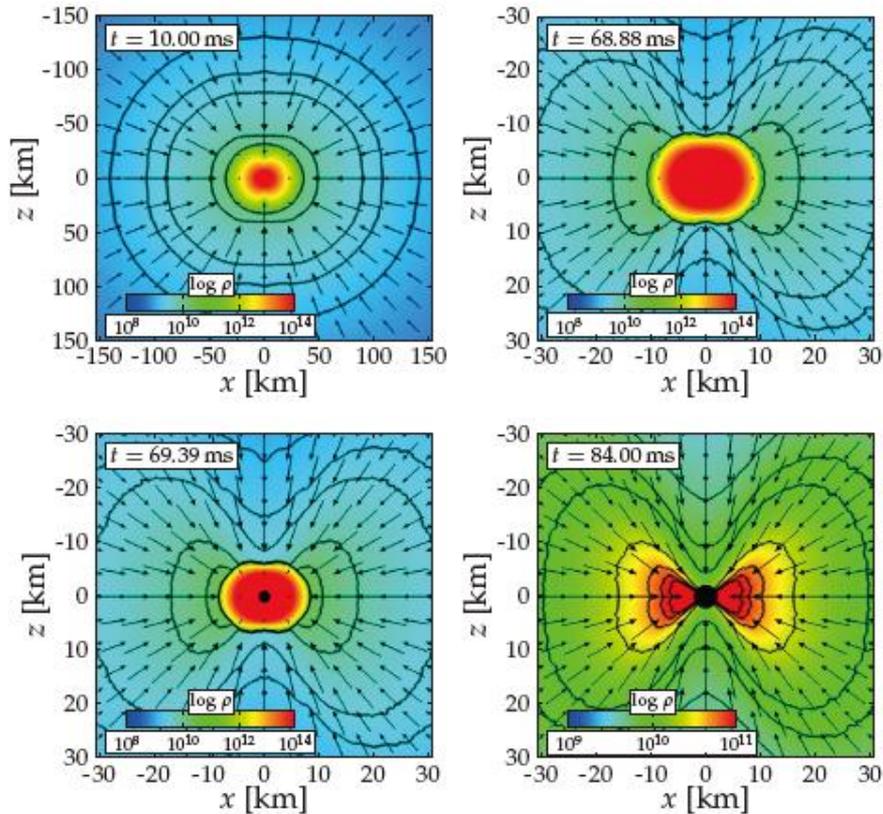
- 一般相対論的重力場(時空構造)の時間発展を追うためのアインシュタイン方程式ソルバーの導入。
- 現実的高密度状態方程式(圧力の正確な計算)やニュートリノ輸送など、微視的物理の導入。

期待される成果

- ブラックホール形成過程を正確に追えるようになる。
- 重力波・ニュートリノ信号の予言。
- 他分野への波及効果？

～究極コードでブラックホール形成の瞬間を捉える～

状態方程式、ニュートリノもダイナミクスに大きな影響



アインシュタイン方程式を解く2次元流体コードによる、大質量星中心でのブラックホール形成過程シミュレーション。Ott+ 2011

注: 彼等のコードが究極コードという訳ではない。

YAMATOコードによるガンマ線バーストジェット形成過程シミュレーション。ブラックホールは出来たものとして、中心に置いている(時空構造を固定)。

長瀧 2012

星に於けるブラックホール形成と 宇宙創成の関係は？

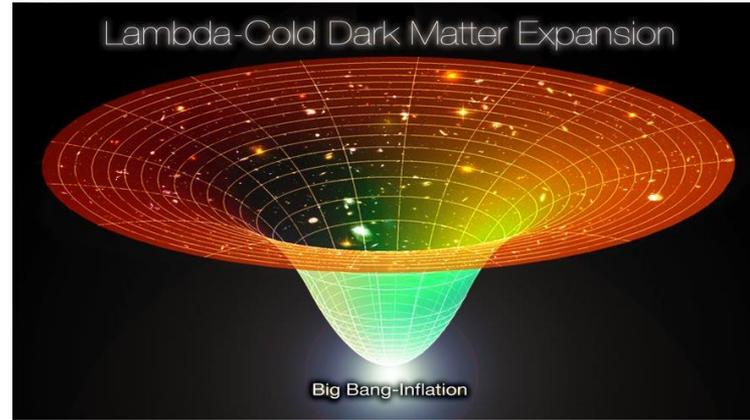
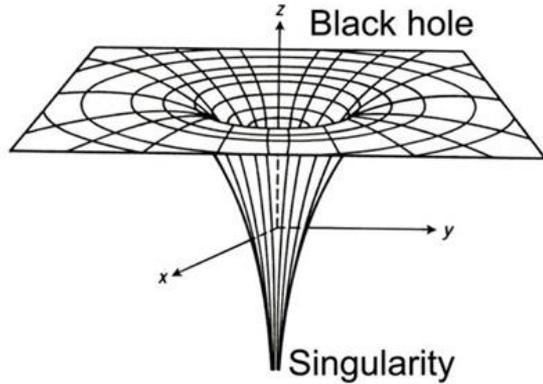
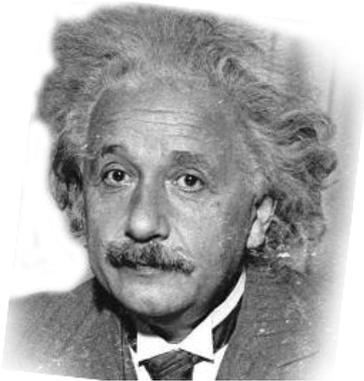


Figure from Universetoday



A. Einstein



S. Hawking



E. Witten



Izanagi and Izanami
Kobayashi Eitaku,
1885.

インフレーション理論は中性子星の研究から産まれた。

Mon. Not. R. astr. Soc. (1981) 195, 467–479

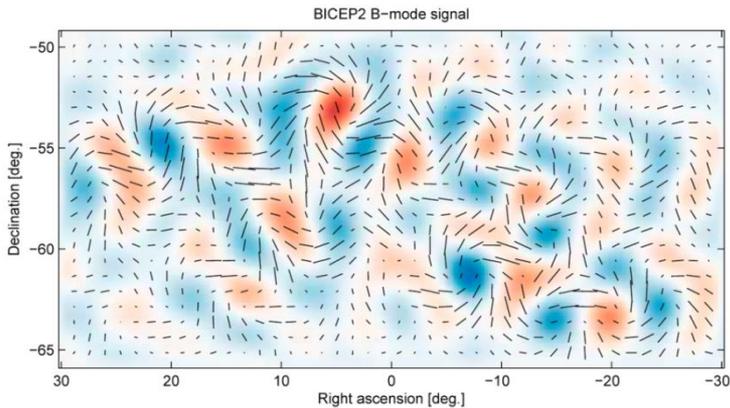
First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe

Katsuhiko Sato *Nordita, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen ϕ , Denmark^{*} and Department of Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan[†]*

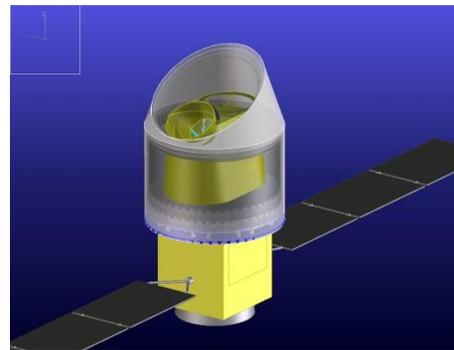
Received 1980 September 9; in original form 1980 February 21



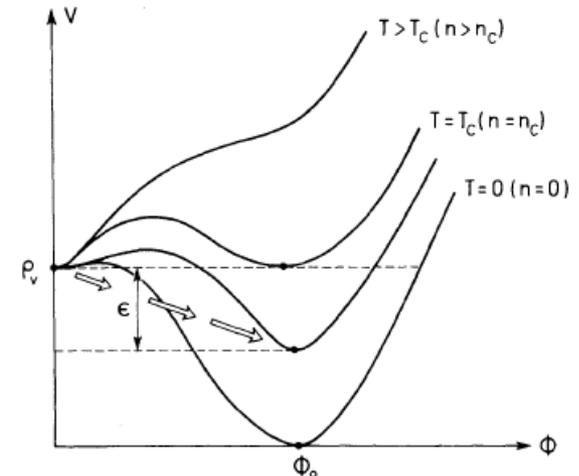
Sato, Guth, Linde, Starobinsky, Steinhardt



BICEP2, 2014



LiteBIRD HPより



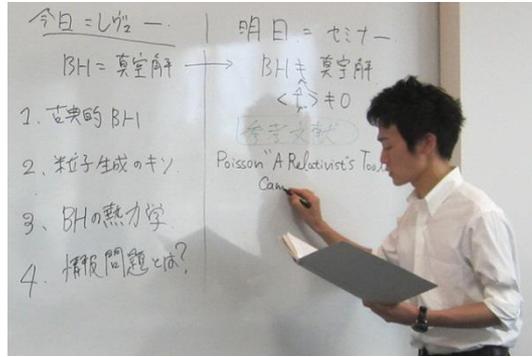
理論科学連携研究推進グループ (iTHES) (FY2013-FY2018)



Tetsuo Hatsuda
Group Director



S. Nagataki
A Team Leader



Y. Yokokura & A. Tanaka
New iTHES Postdocs
(FY2015-)



iTHES-Kavli IPMU 04/Dec/2013



リスペクトしすぎない。

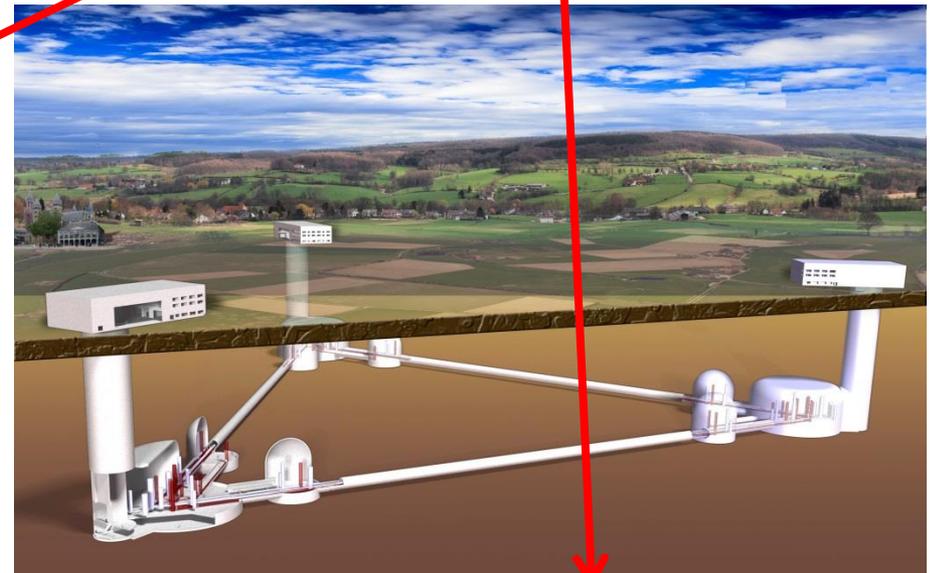
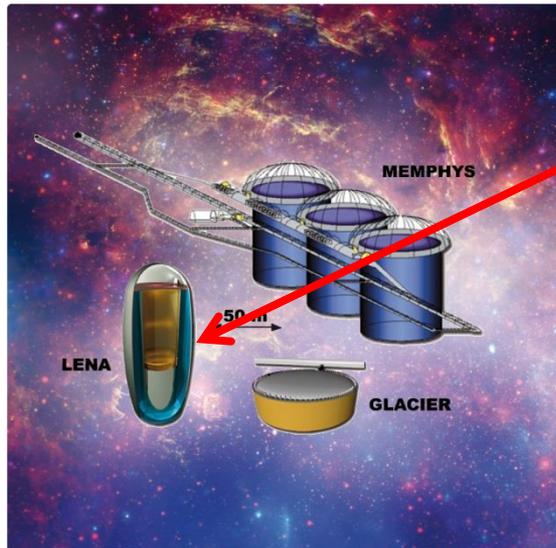
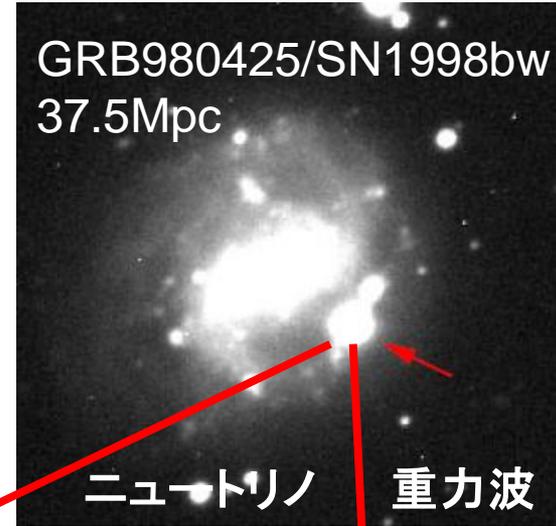


プロ転向後、一流の選手を尊敬しすぎて自分のプレーができなかったが、メンタルが強くなった。
(錦織圭選手、2014年11月、ATP ファイナルツアーでのインタビュー)

究極コードで重力波・ニュートリノ信号の予言

ガンマ線バースト・極超新星からの重力波・ニュートリノ信号を理論的に計算出来るようになる。

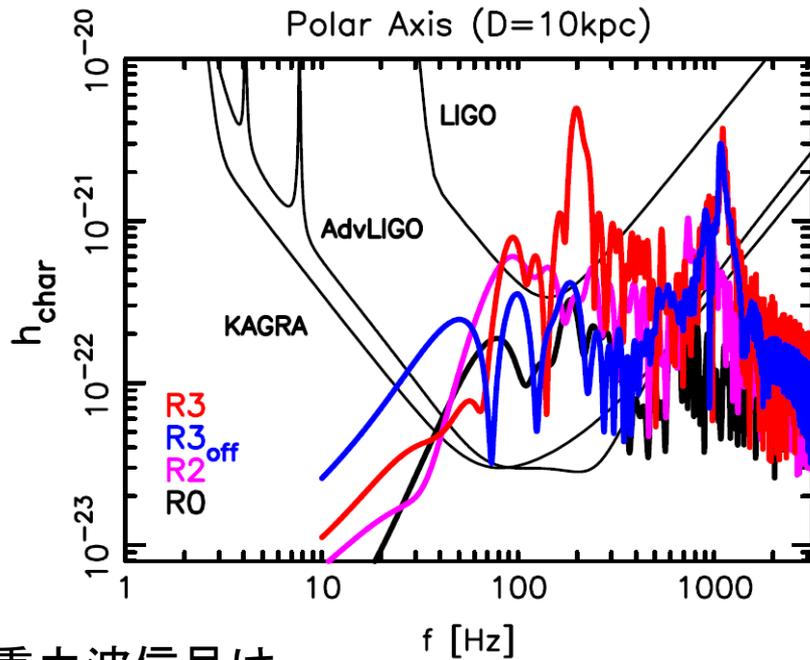
信号を捉えることで、理論の検証にもなる (マグネター? コラプサー?)。



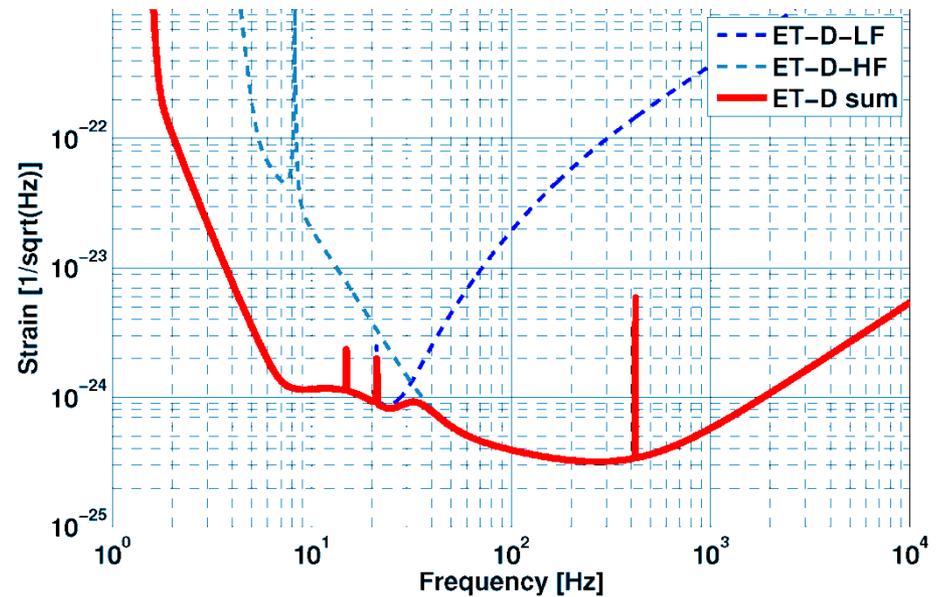
Einstein Telescope (ET HPより)

次世代重力波検出器 Einstein Telescope

KAGRA, ALIGO, LIGO

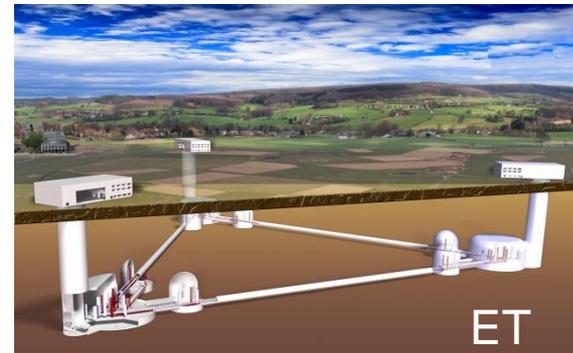


Einstein Telescope

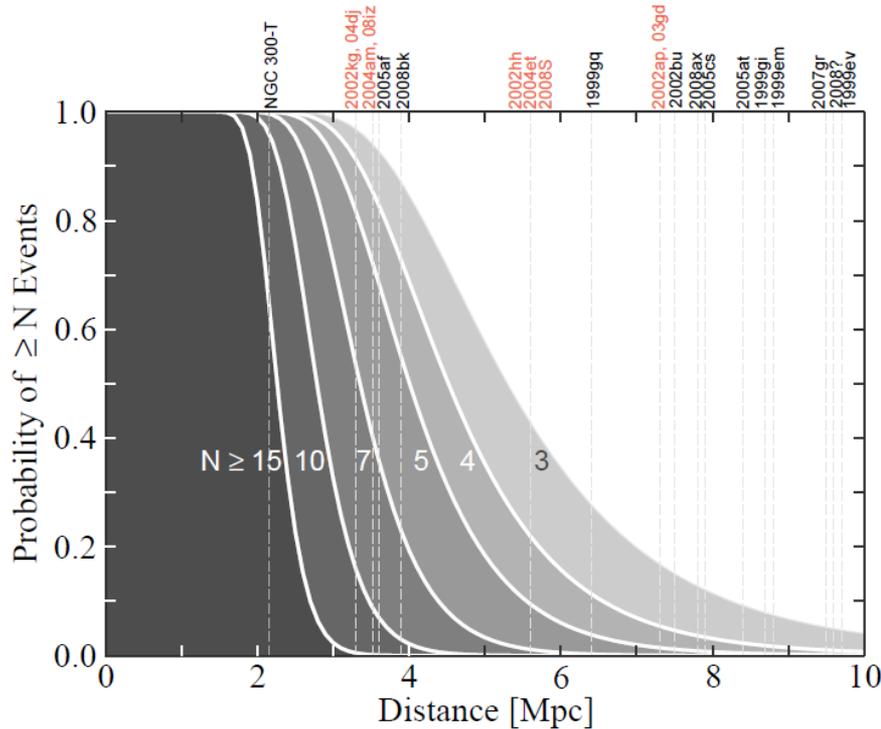


重力波信号は
超新星爆発計算に
よるもの。

重力波振幅 h は
距離の-1乗。



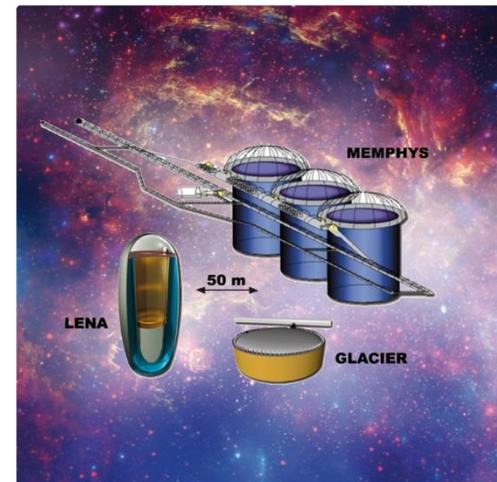
次世代Megatonニュートリノ検出器 LAGUNA/Deep-TITAND



左図は重力崩壊型超新星に対するDeep-TITAND (5Megaton)の感度。LAGUNAは1Megaton。

単純にガンマ線バーストニュートリノが超新星の10倍のスペクトルなら距離は $\sqrt{10}$ ~3倍程度。

		32 kton (SK)	0.5 Mton (HK)	5 Mton (Deep-TITAND)
10 kpc	(Milky Way)	10^4	10^5	10^6
1 Mpc	(M31, M33)	1	10	10^2
3 Mpc	(M81, M82)	10^{-1}	1	10



LAGUNA (ヨーロッパ)
Deep-TITAND (日本)

§ 元素合成の展望

我々のゴールはガンマ線バーストの完全理解

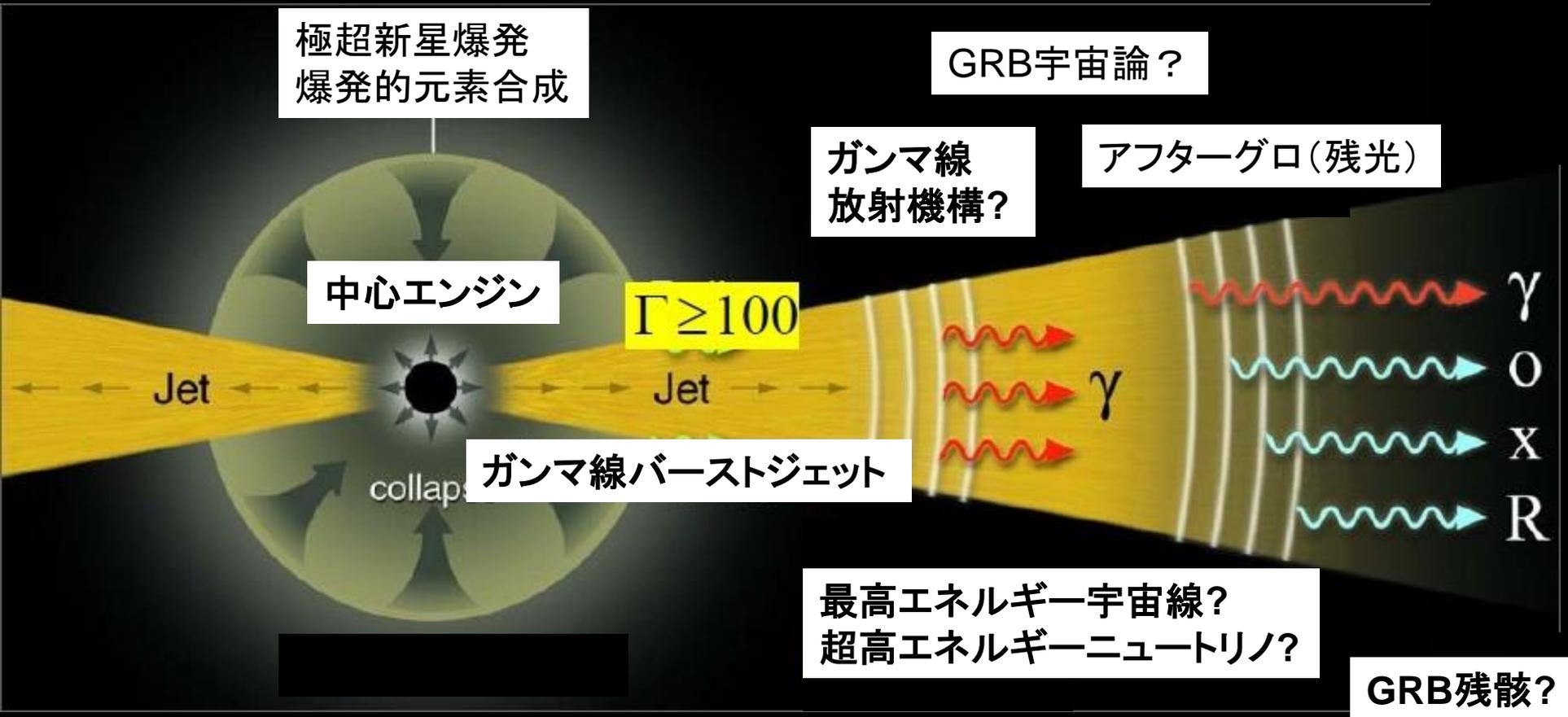
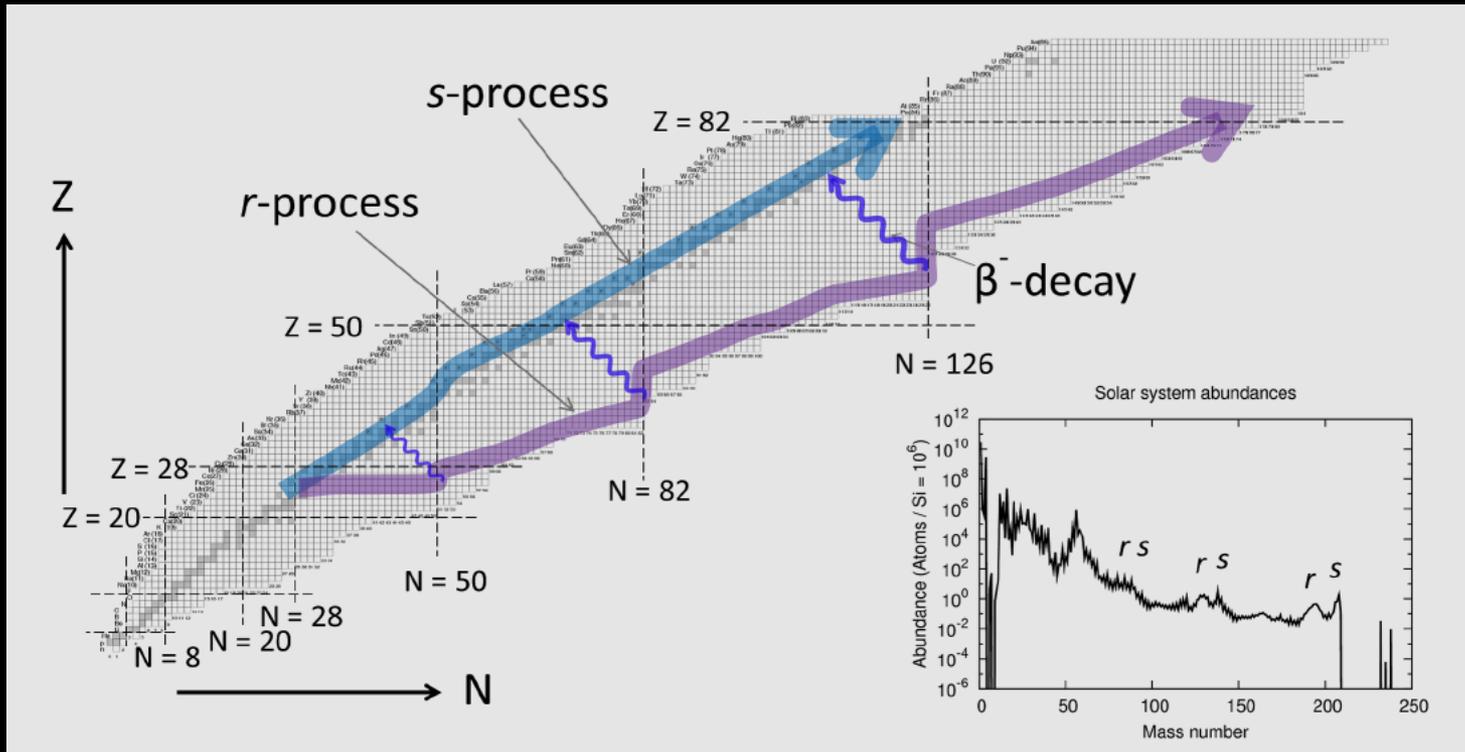


Figure from P. Meszaros: Modified by S.N.

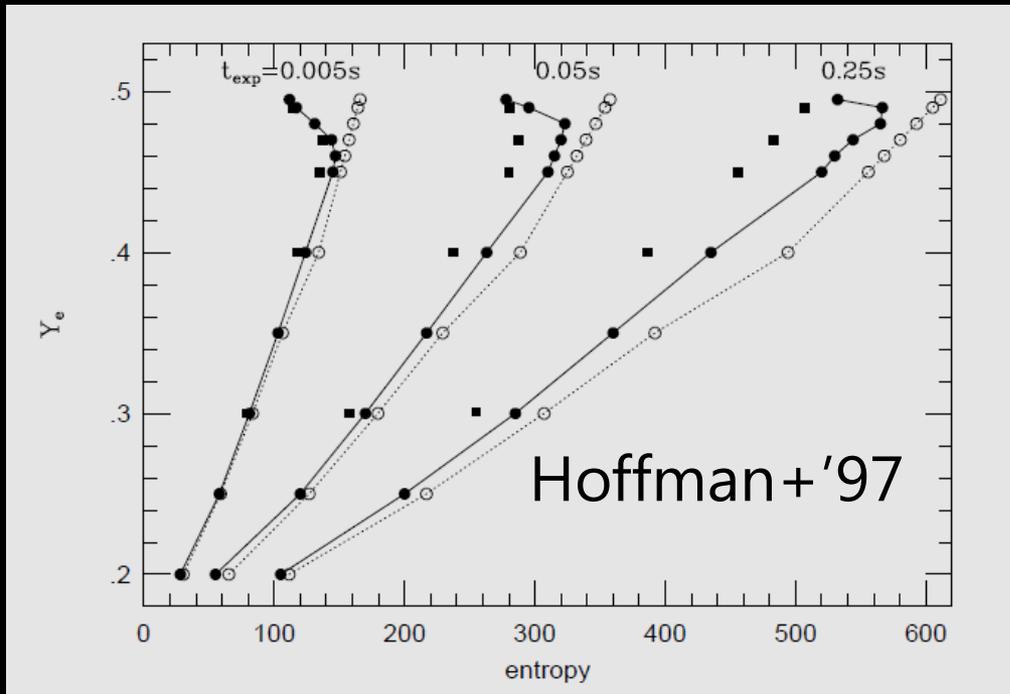
The *r*-process Nucleosynthesis



- Rapid neutron capture (*r*-process) : explosive environment
- Slow neutron capture (*s*-process) : AGB stars, massive star

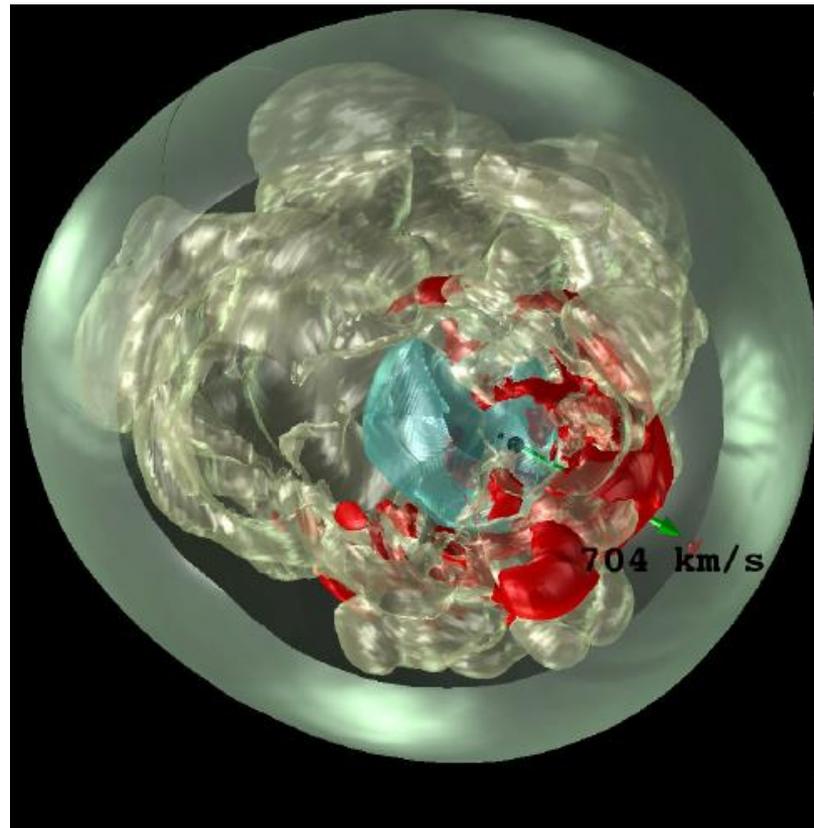
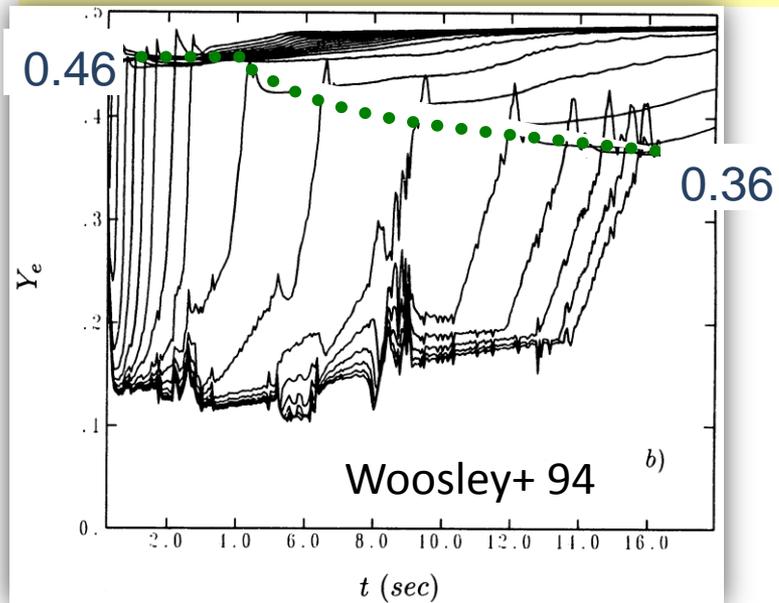
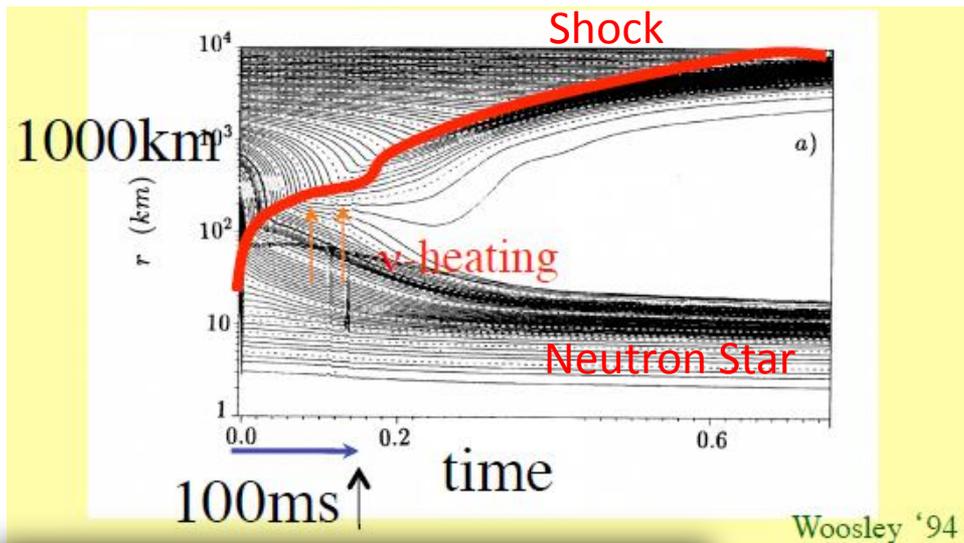
r-process成功のために必要な物理量

- Electron fraction Y_e 中性子の割合が高い
- Entropy per Baryon $S \propto T^3/\rho$ 種核に対して中性子、陽子の数多い
- Dynamical (expansion) timescale t_{exp} 非平衡



中性子数が多く、
エントロピーが高く、
速い膨張が
r-processの成功に
重要。

有力候補 I: 重力崩壊型超新星

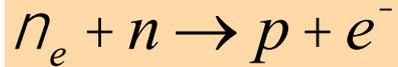


最新のシミュレーションでは
そうでもない。
A. Wongwathanarat
(RIKEN)

一核子あたりのエントロピー～400 Kbとも言われていた。

最近の傾向: あまり中性子多くない...

❖ Y_e is determined by



❖ equilibrium value is

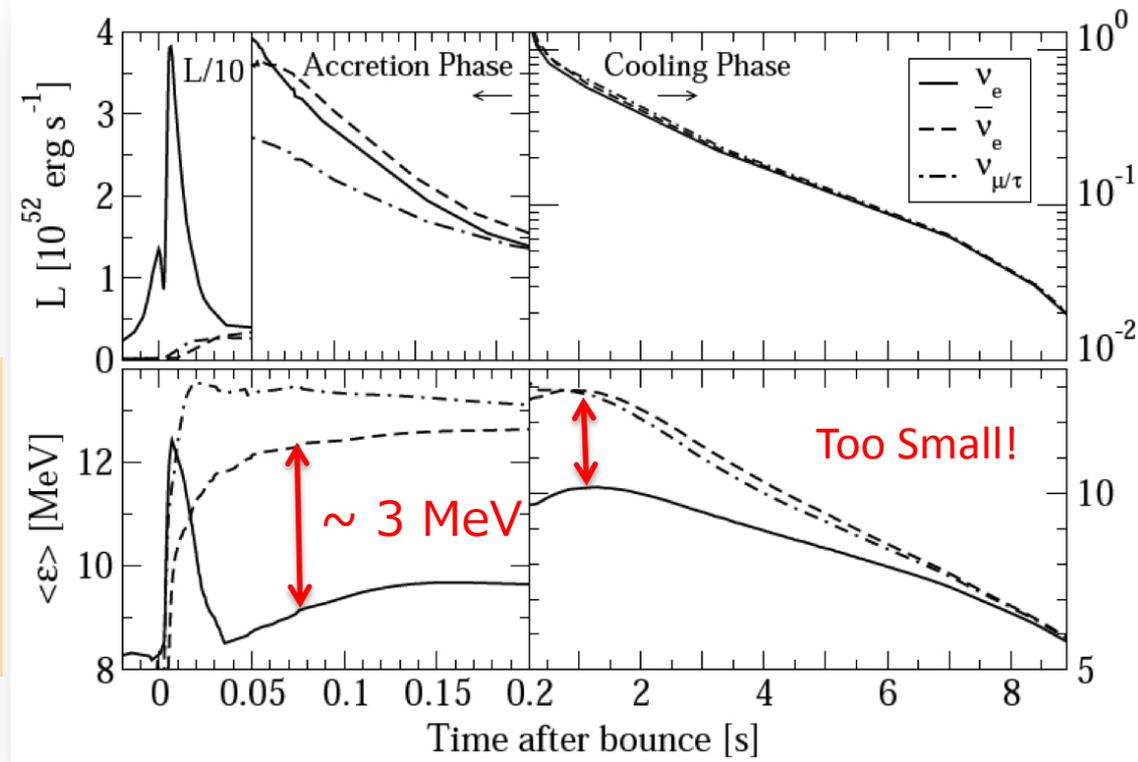
$$Y_e \sim \left[1 + \frac{L_{\bar{n}e}}{L_{ne}} \frac{e_{\bar{n}e} - 2D}{e_{ne} + 2D} \right]^{-1},$$

$$D = M_n - M_p \approx 1.29 \text{ MeV}$$

❖ for $Y_e < 0.5$ (i.e., n-rich)

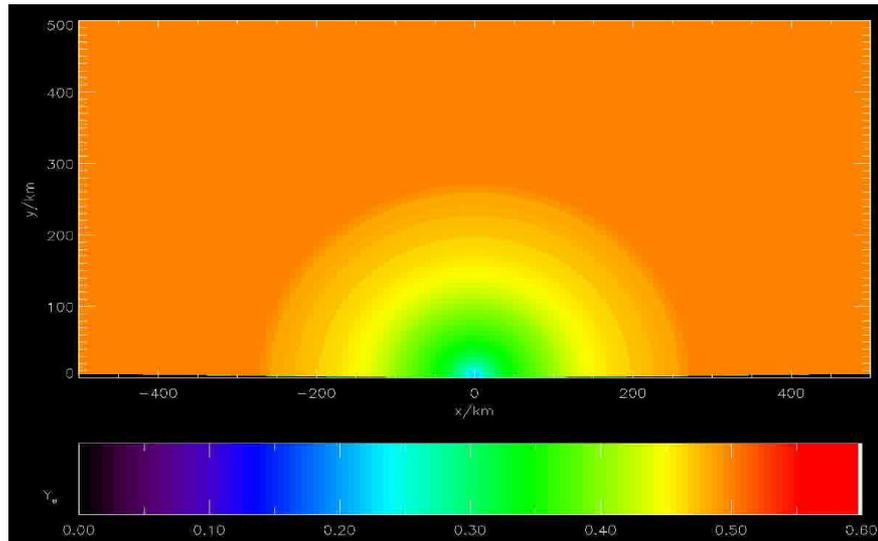
$$e_{\bar{n}e} - e_{ne} > 4D \sim 5 \text{ MeV}$$

$$\text{if } L_{\bar{n}e} \approx L_{ne}$$



self-consistent explosion of a $9 M_{\odot}$ star
Hüdepohl+2009

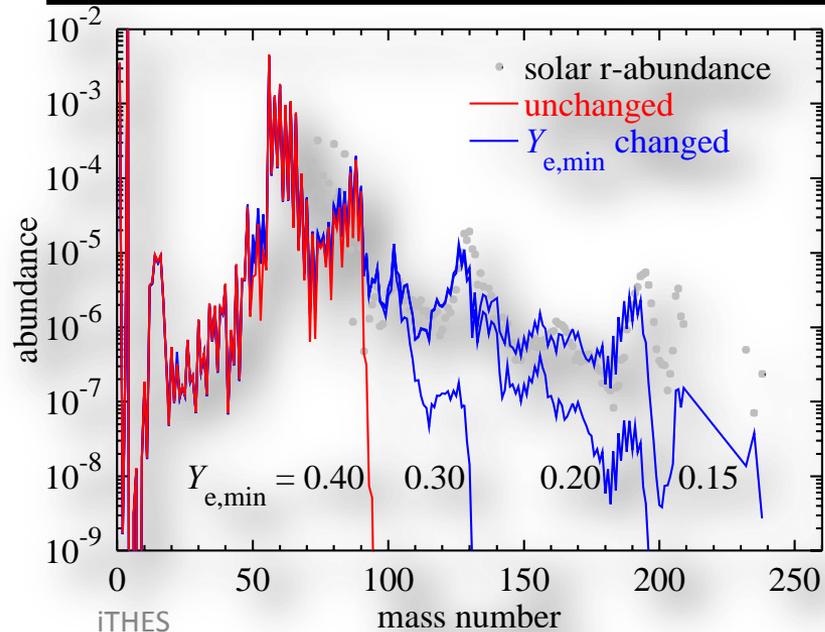
近年の超新星元素合成計算結果...



Wanajo, Janka, Muller 2011.



S. Wanajo
(RIKEN)

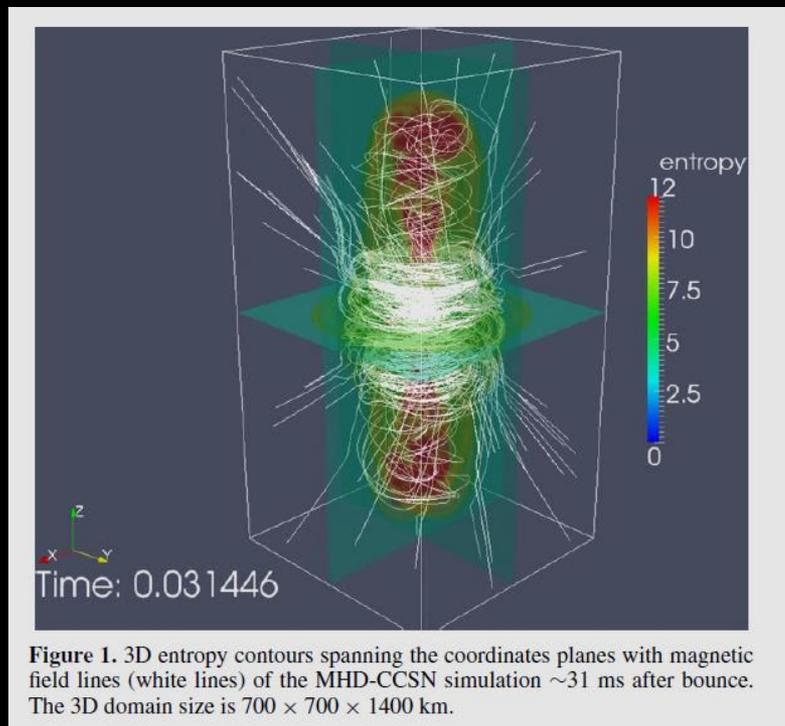


first study of nucleosynthesis based on 2D, general relativistic, neutrino transport simulations of supernovae.

❖ no r-process because of the modest n-richness (ν 's convert

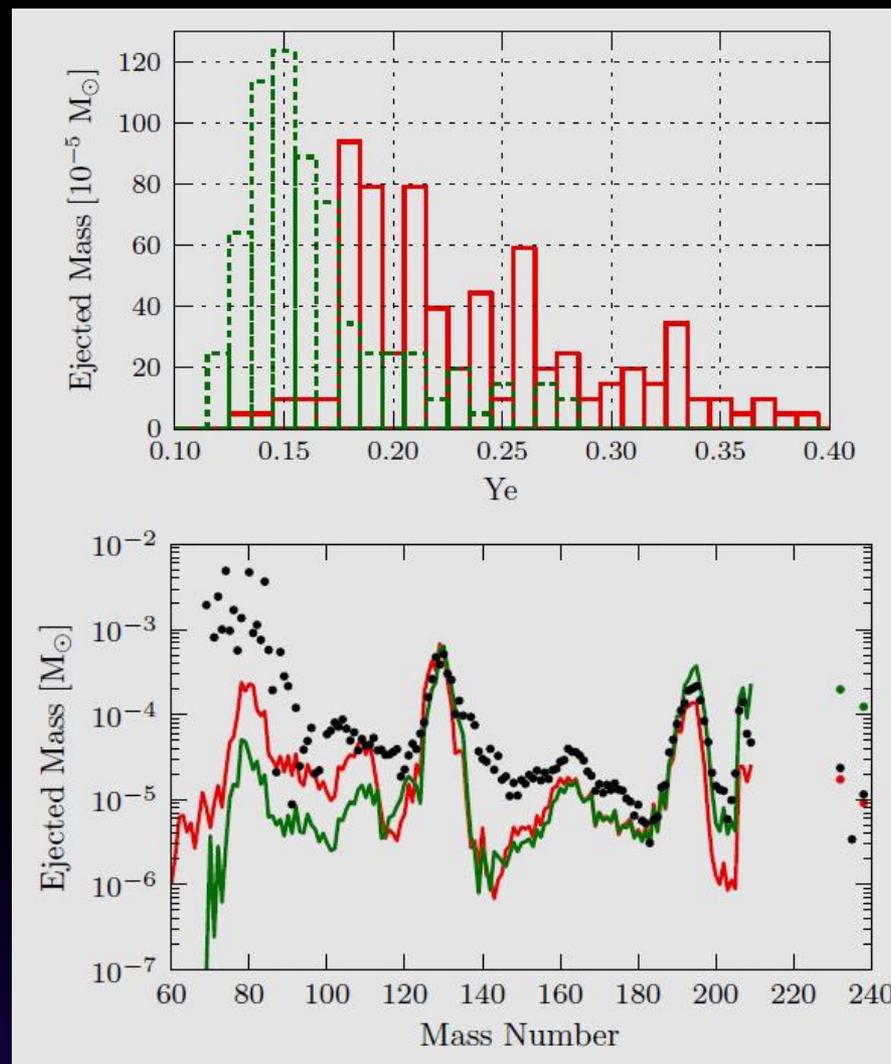
n to p, resulting in $n/p \sim 1$)

有力候補 II: マグネターでの r -process



Winteler+12 (Basel)

このシミュレーションは非相対論的コードなので、ガンマ線バーストジェットは出来ない。



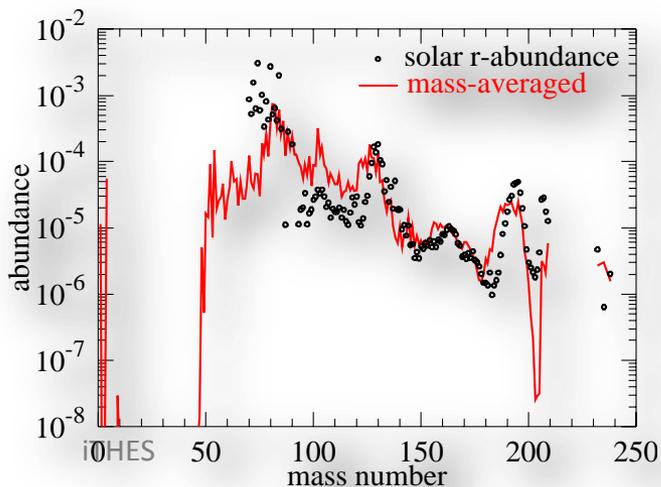
有力候補 III: 中性子星合体でのr-process



S. Wanajo
(RIKEN)



- First nucleosynthesis study based on 3D, general-relativistic, neutrino transport simulations of neutron star mergers.

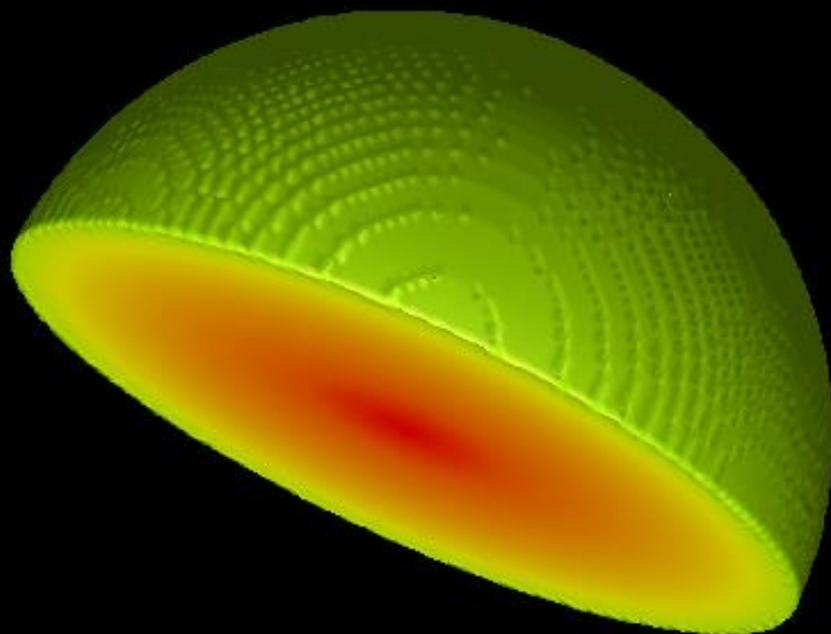


- First result that reproduces the full A -range (=90-240) of the solar r-process distribution.

ガンマ線バーストジェットはどうか？



J. Matsumoto (RIKEN)



$$L_{\text{jet}} = 10^{51} \text{ erg/s}$$

$$\gamma_{\text{jet}} = 5$$

$$h_{\text{jet}} = 41$$

$$\theta_{\text{jet}} = 0$$

$$r_{\text{jet}} = 10^8 \text{ cm}$$

一核子あたりのエントロピー

- 重力崩壊型超新星 $\sim 100 \text{ Kb}$.
- ガンマ線バーストジェット $\sim 100000 \text{ kb}$.

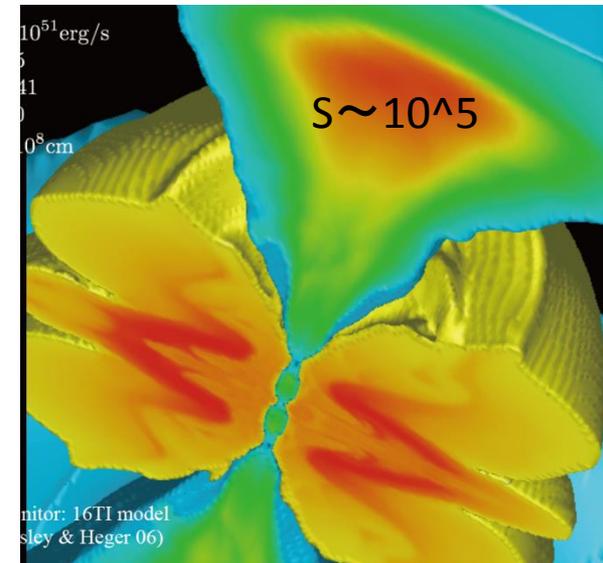
ガンマ線バーストはエネルギーが大きだけでなく密度が低い
ため、一核子あたりのエントロピーが膨大になる。

ジェット中心軸から離れるにつれて、一核子あたりの
エントロピーは低くなるはず。

ある適当な角度領域にてr-processが起こる？



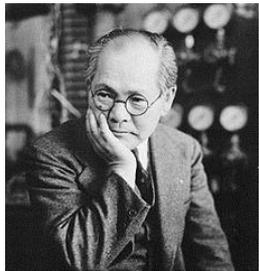
松本氏によるシミュレーション



RIBF (Radioactive Isotope Beam Factory) in RIKEN



**New Nuclei: $Z=113$ & $A=278$ has been found by RIBF.
The State-of-the-Art Nuclear Reaction Data can be Provided.**



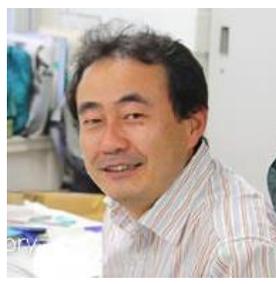
Y. Nishina



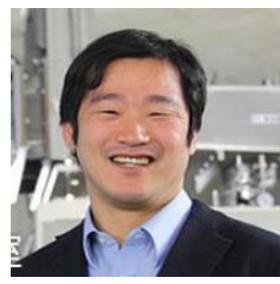
H. Yukawa



S. Tomonaga



H. Sakurai



T. Uesaka



H. Ueno



K. Morita

§ 放射機構の展望

我々のゴールはガンマ線バーストの完全理解

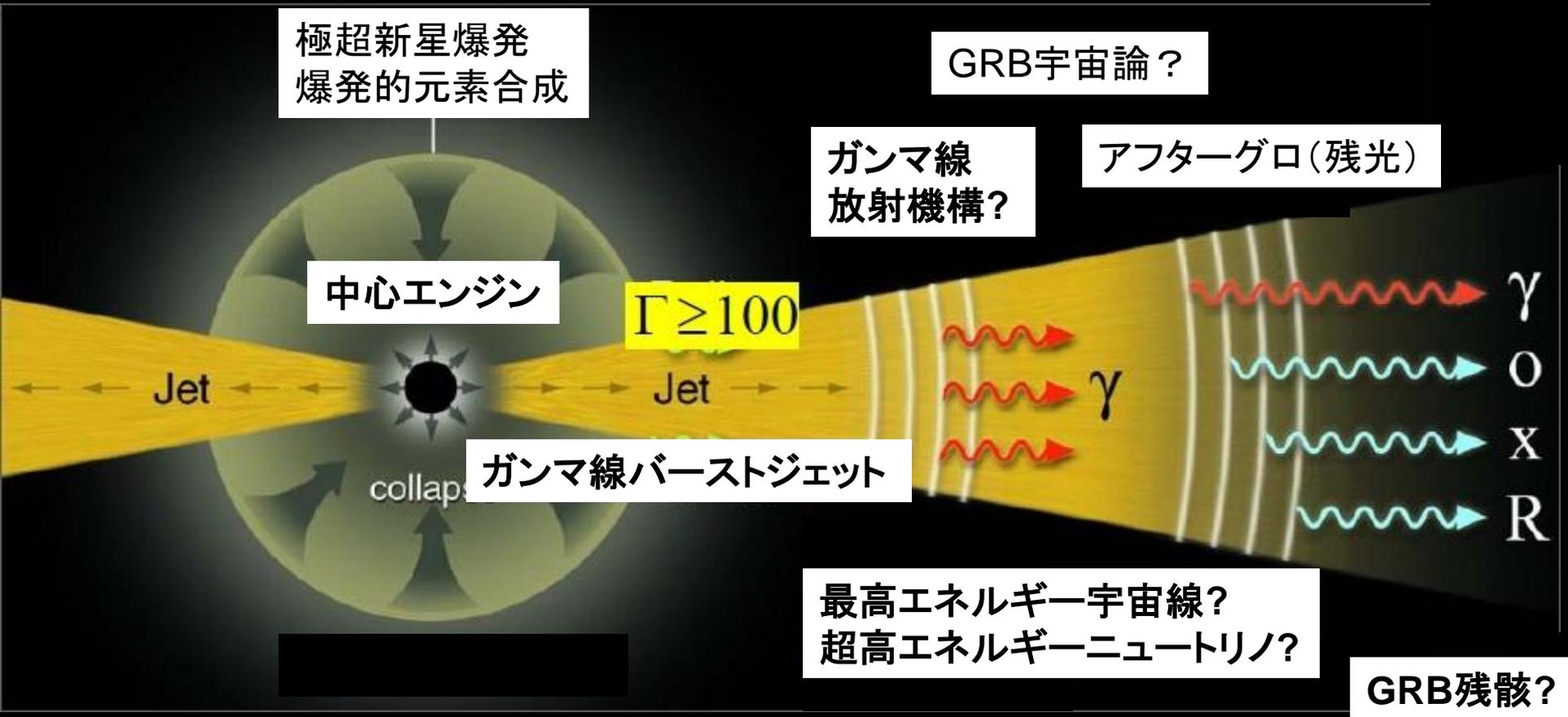
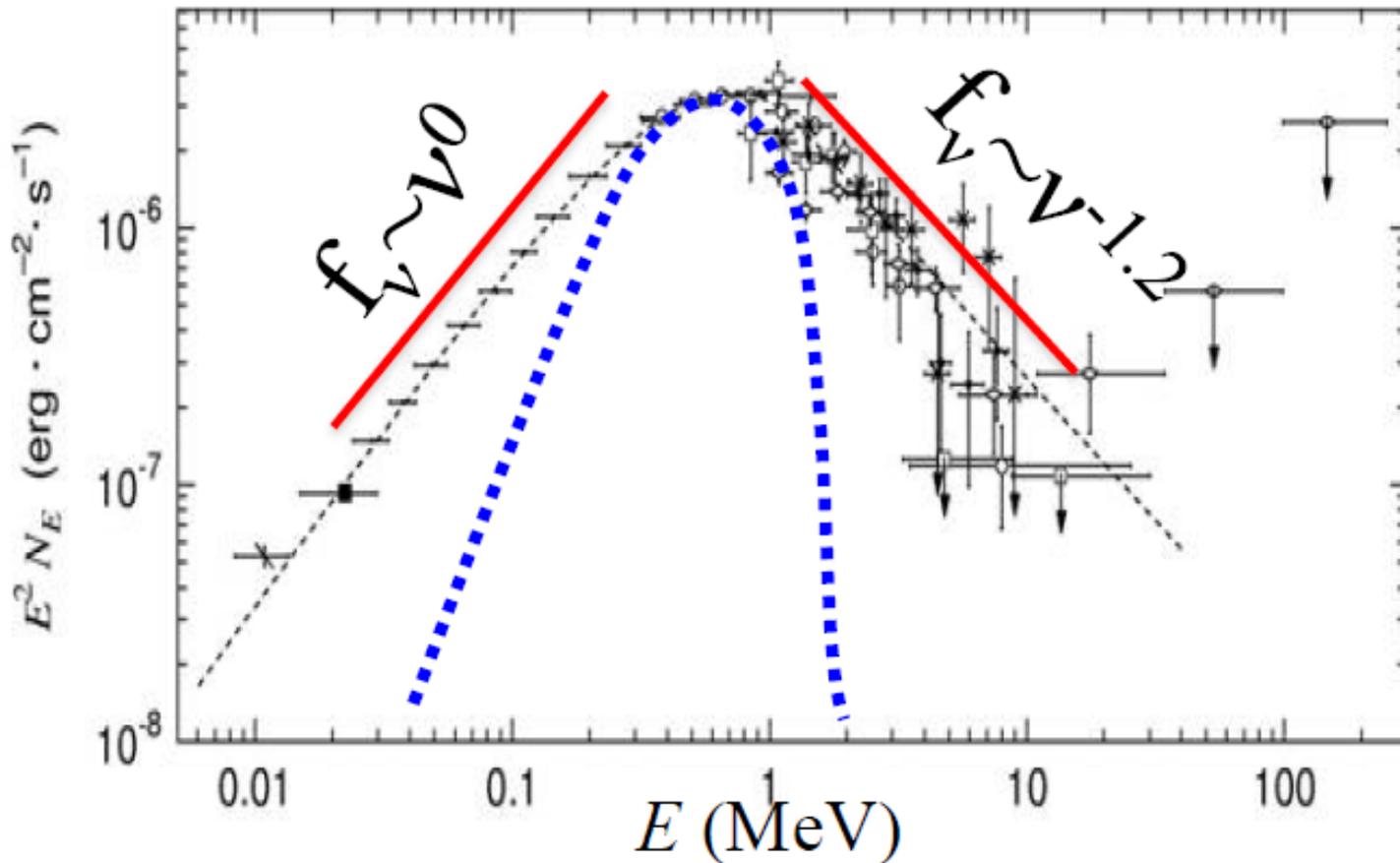


Figure from P. Meszaros: Modified by S.N.

ジェットを出しただけでは足りない。

- ジェットが多量のガンマ線に変わらないとガンマ線バーストにならない。
- ジェットのエネルギーの50%程がガンマ線に転化していなければならないという報告もある
(Zhang et al., 2007a; Fan and Piran, 2006)。
- ガンマ線バーストの典型的スペクトルは単純な放射機構(シンクロトロン放射など)で説明不可。

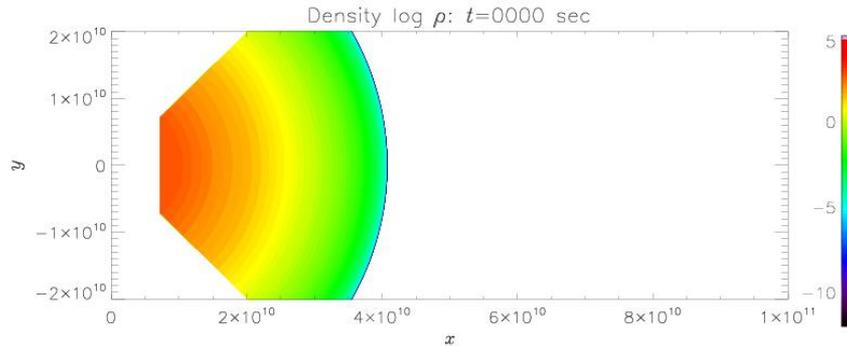
スペクトルは非熱平衡的。



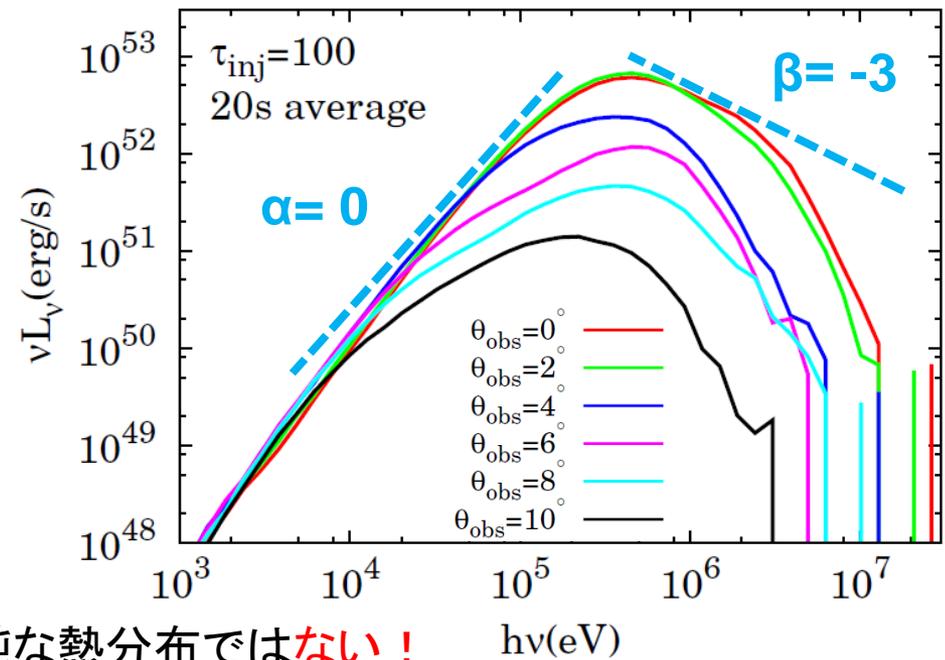
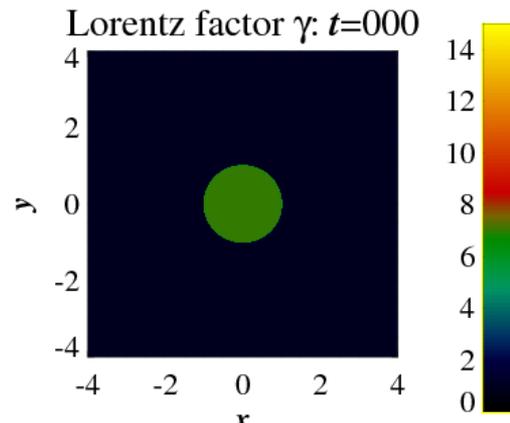
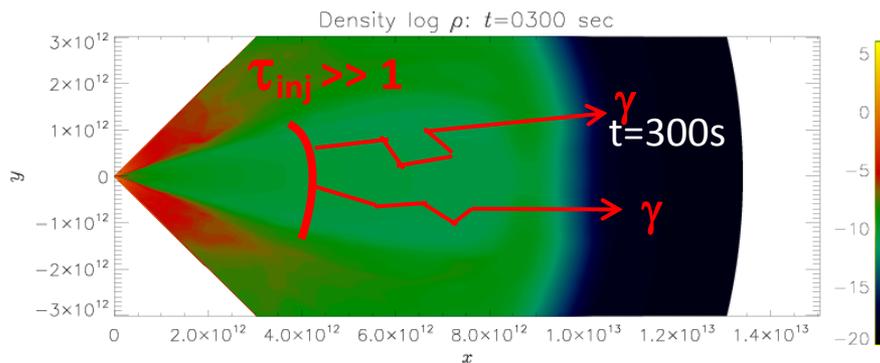
典型的なガンマ線バーストエネルギーースペクトル例。
青は一温度のプランク分布(熱分布)でのフィット。

自然に非熱的か (Preliminary) ?

ガンマ線バーストジェット中の熱的ガンマ線伝搬計算するとすごいことに。



右: 伊藤氏 (ガンマ線伝搬計算)
左: 松本氏 (ジェットシミュレーション)

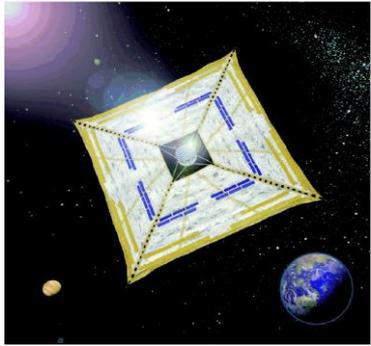


単純な熱分布ではない!

hν(eV)

偏光も自然に説明出来る？

Ito et al. 2014



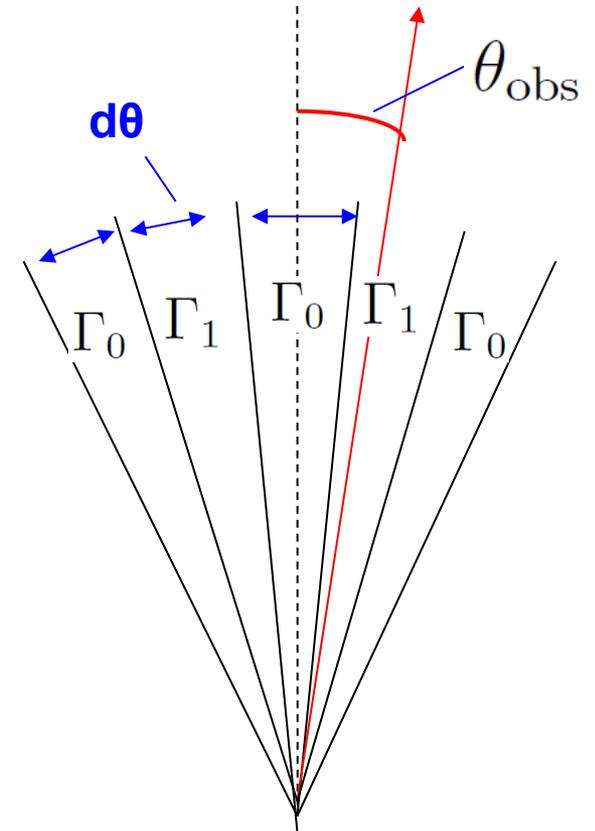
$$\Gamma_0=400 \quad \Gamma_1=100$$

$$d\theta \sim 0.2^\circ$$

観測者

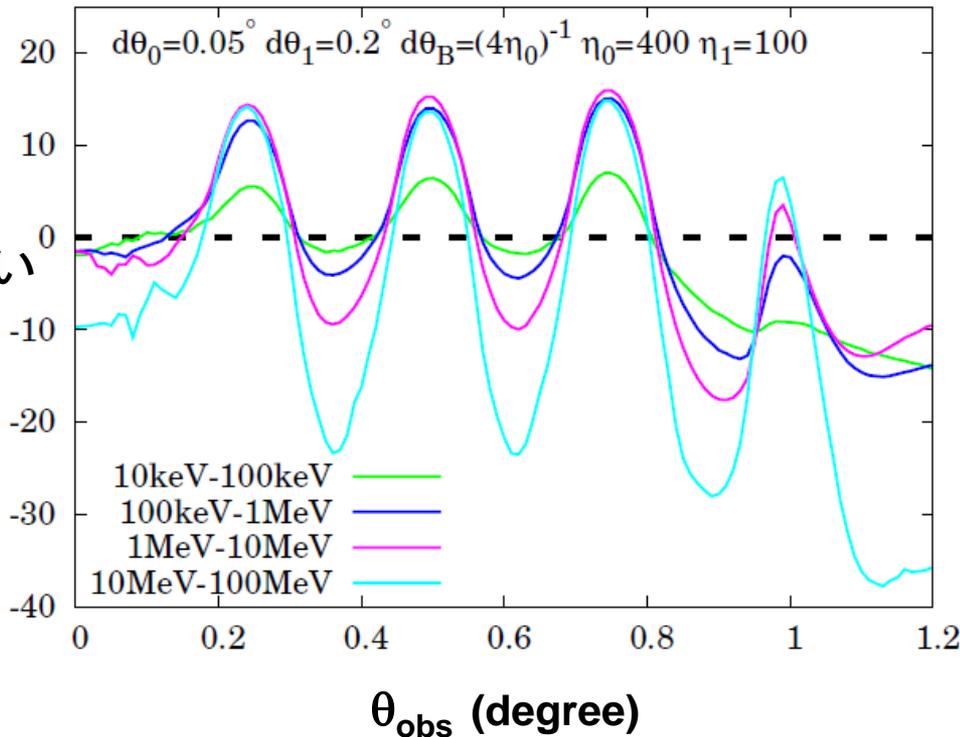
IKAROS, Japan (2010-)

伊藤氏 (RIKEN)



伊藤氏が採用したモデル

ガンマ線
偏光の度合い
(%)



完