

初代星とガンマ線バースト

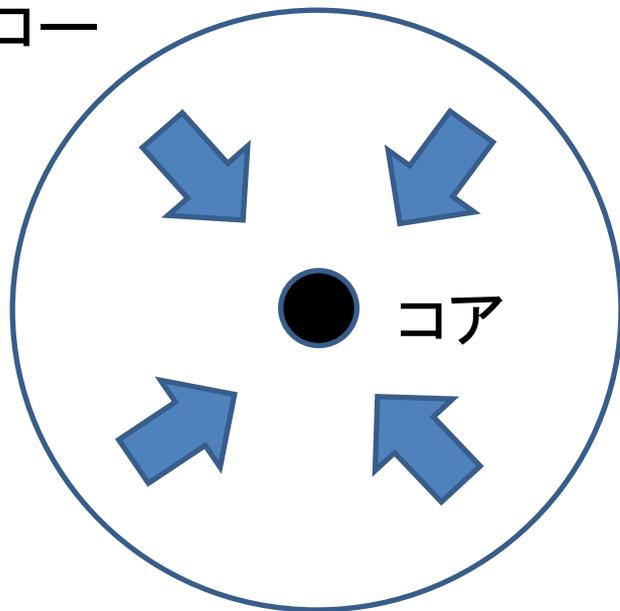
當真賢二
(TOMA Kenji)

東北大学 学際科学フロンティア研究所
東北大学 理学研究科天文学専攻

「初代星・初代銀河研究会」@鹿児島大学 2014年1月22-24日

初代星形成

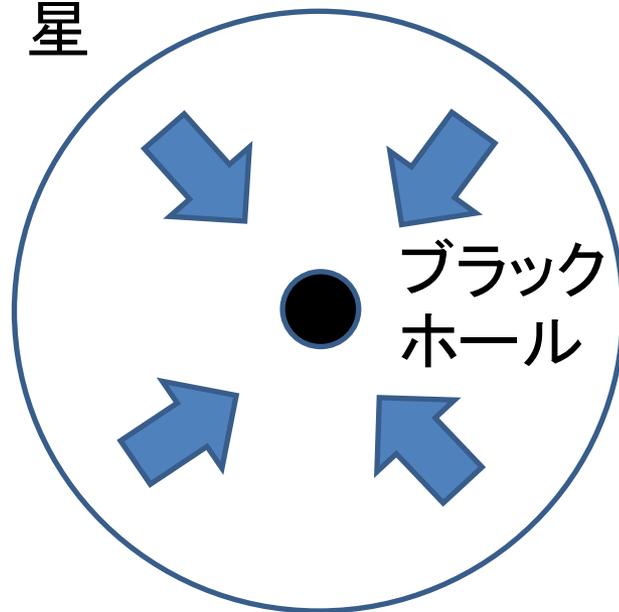
ハロー



初期条件？素過程？
(回転、乱流、磁場、、、)
[cf. 町田さん講演]

星の崩壊 ⇒ ガンマ線バースト

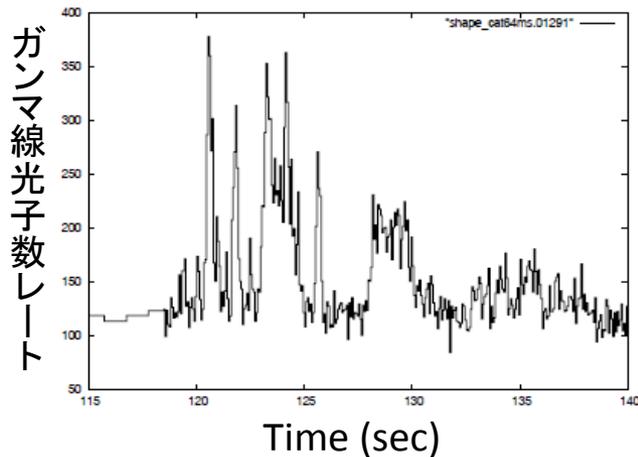
星



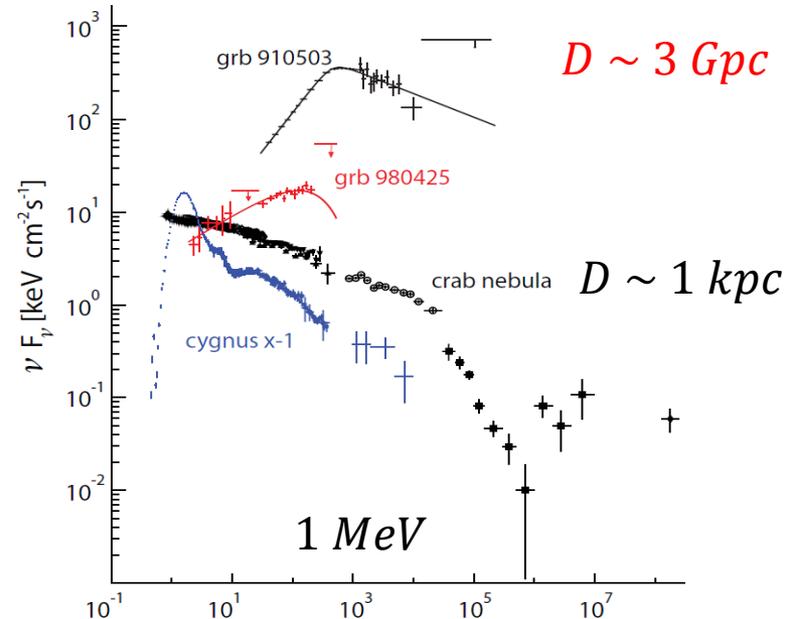
初期条件？？素過程？？
(回転、乱流、磁場、、、)

Gamma-Ray Bursts (GRBs)

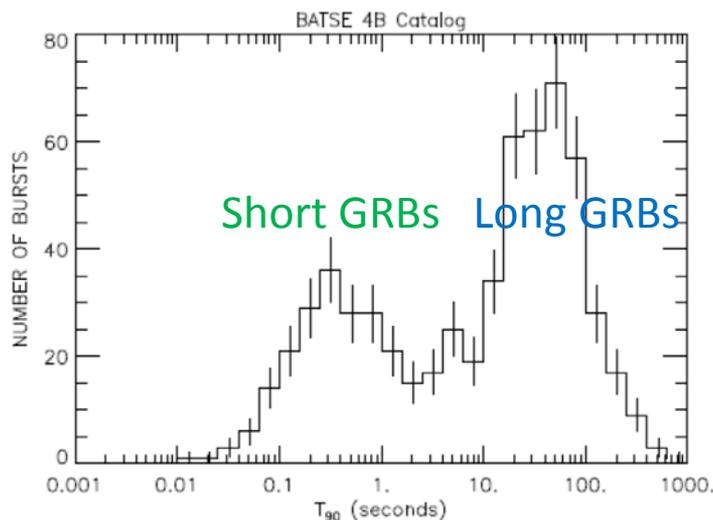
バーストの光度曲線



バーストのエネルギースペクトル



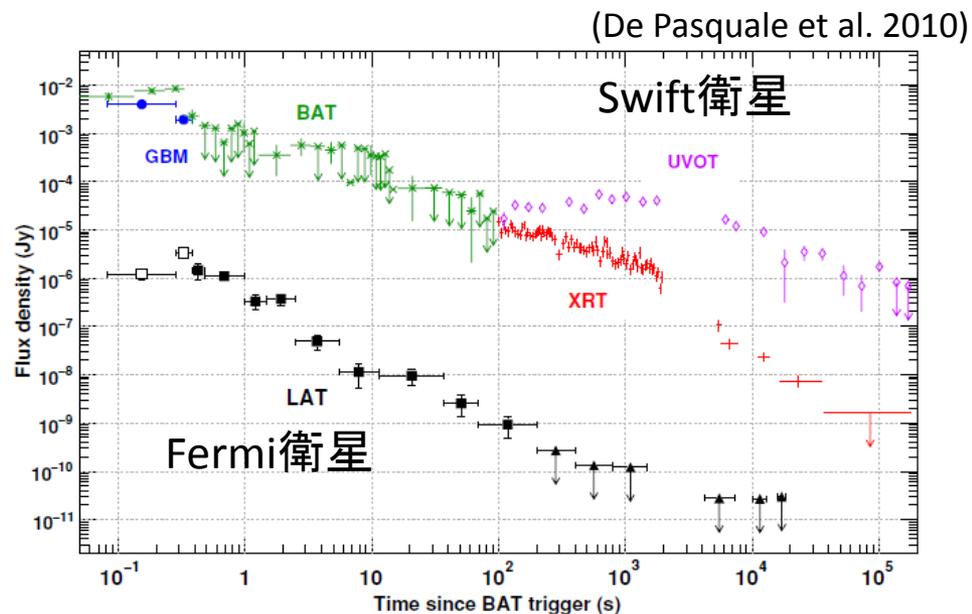
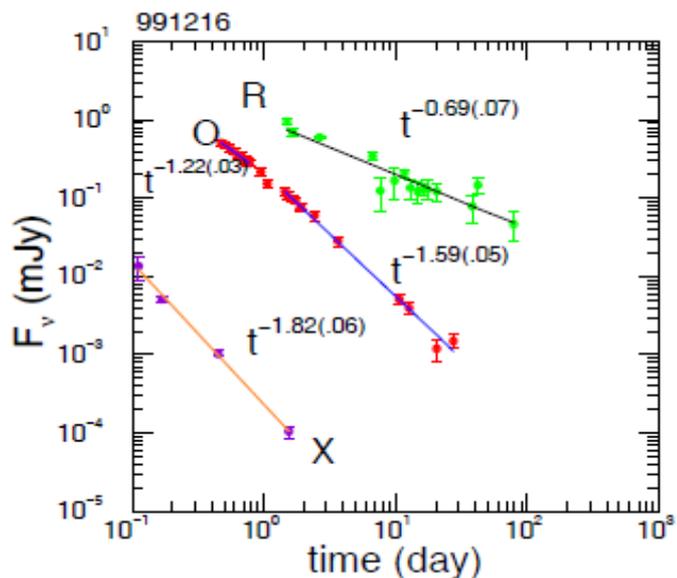
バースト継続時間の分布



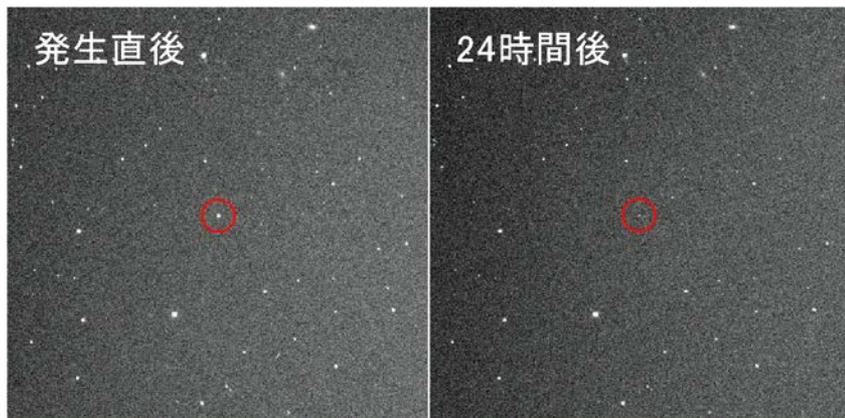
- 1日に約1個観測される
- $z \sim 0.0085 - 8.2$ (9.4?)
- $E_{iso} \sim 10^{49} - 10^{55}$ erg

$\longleftrightarrow M_\odot c^2 \simeq 2 \times 10^{54}$ erg

残光 (Afterglows)

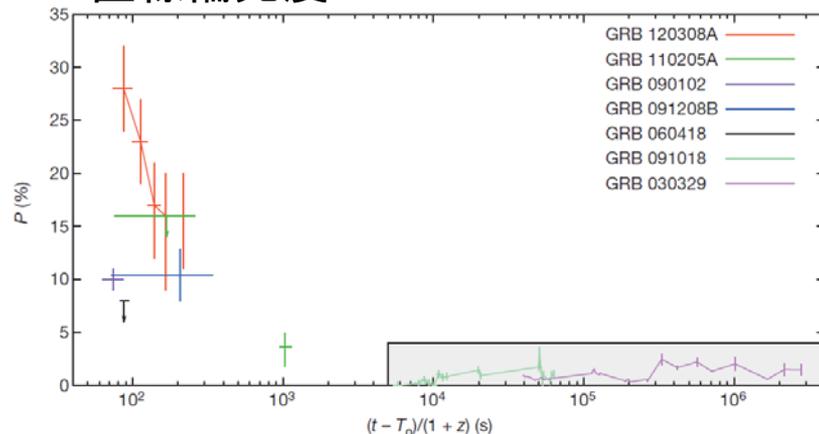


残光の画像(可視)



©HETE2

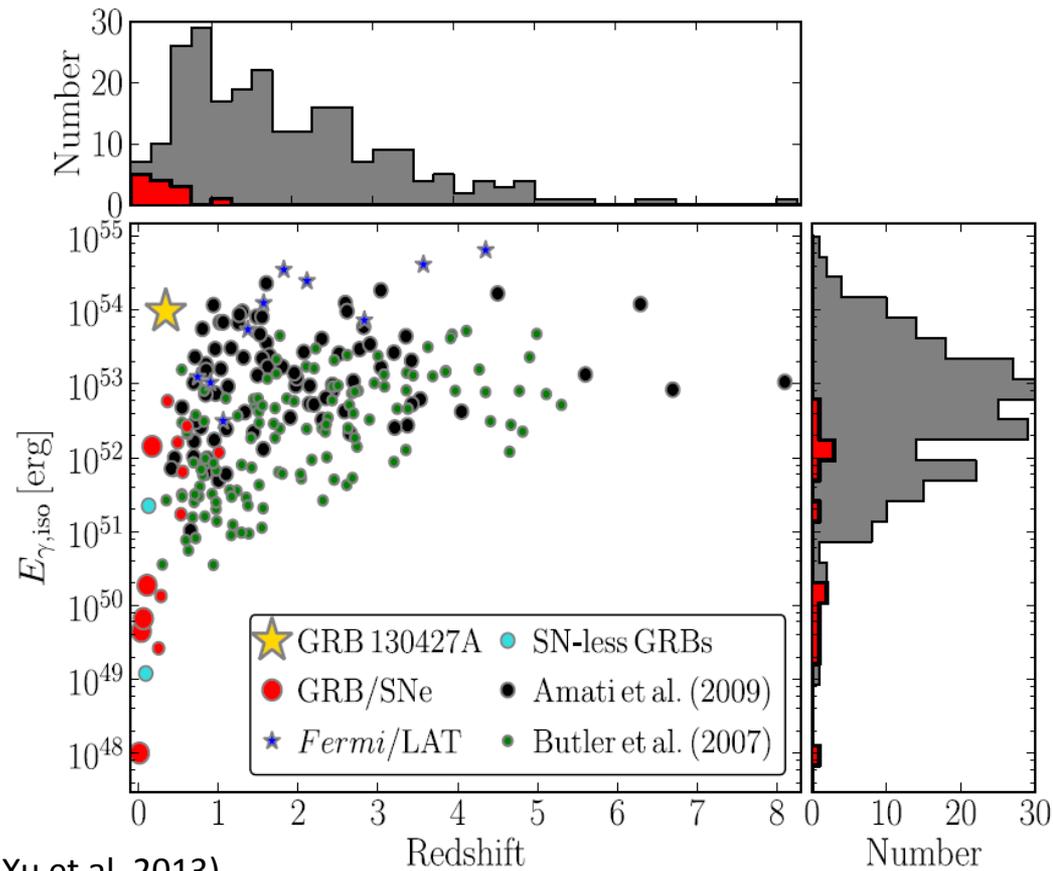
直線偏光度



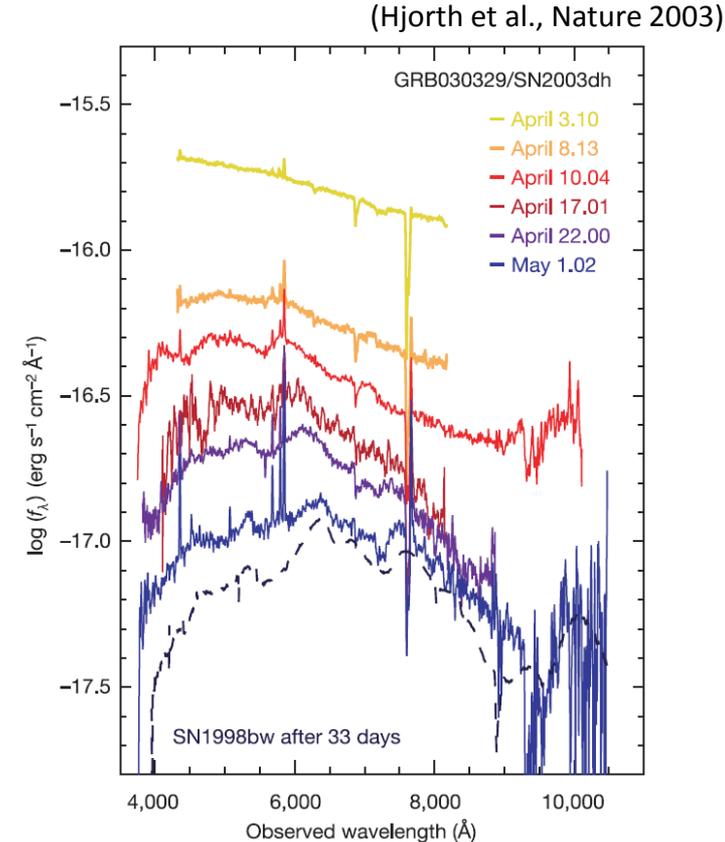
(Mundell et al., Nature 2013)

Long GRBs の起源

- Hosts = star forming galaxies
- Association with Type Ibc SN



(Xu et al. 2013)



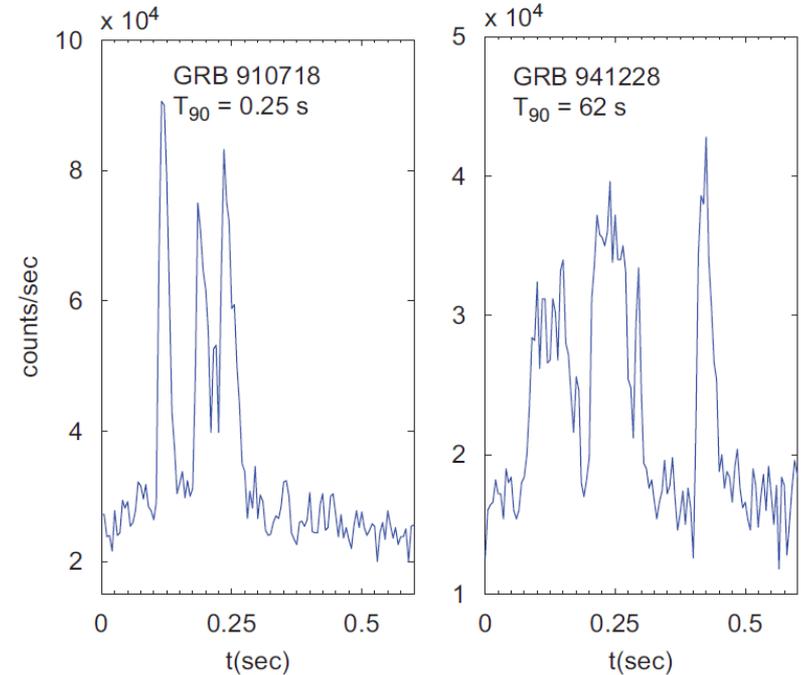
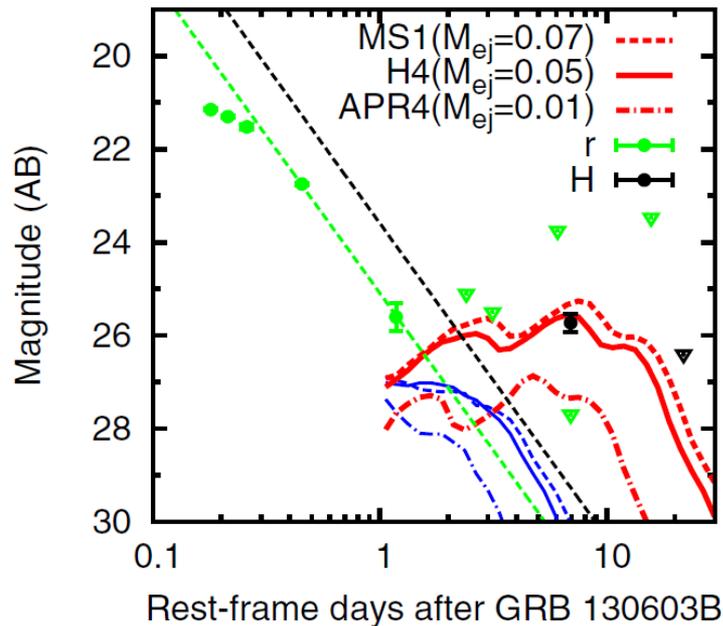
$$M_{ej} \sim 10M_{\odot}, E_K \sim 10^{52} \text{erg}$$

(Mazzali et al. 2003)

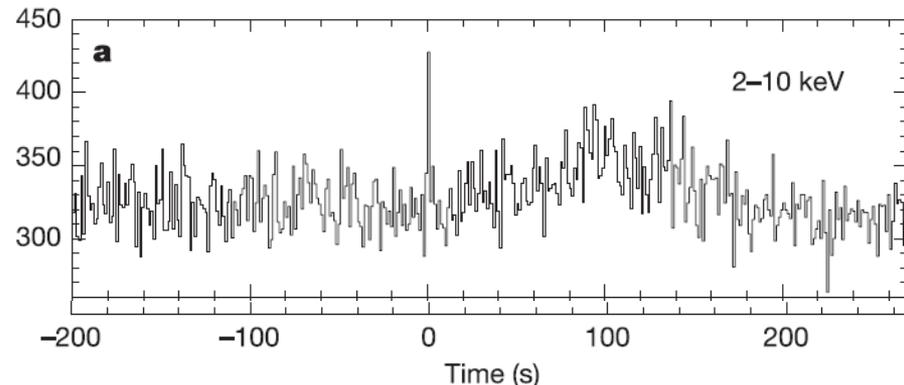
Short GRB の起源？

- Hosts = including early-type, and “no host” cases
- No SN association discovered
- Compact star binary merger?
- 重力波観測が重要

(Hotokezaka et al. 2013)



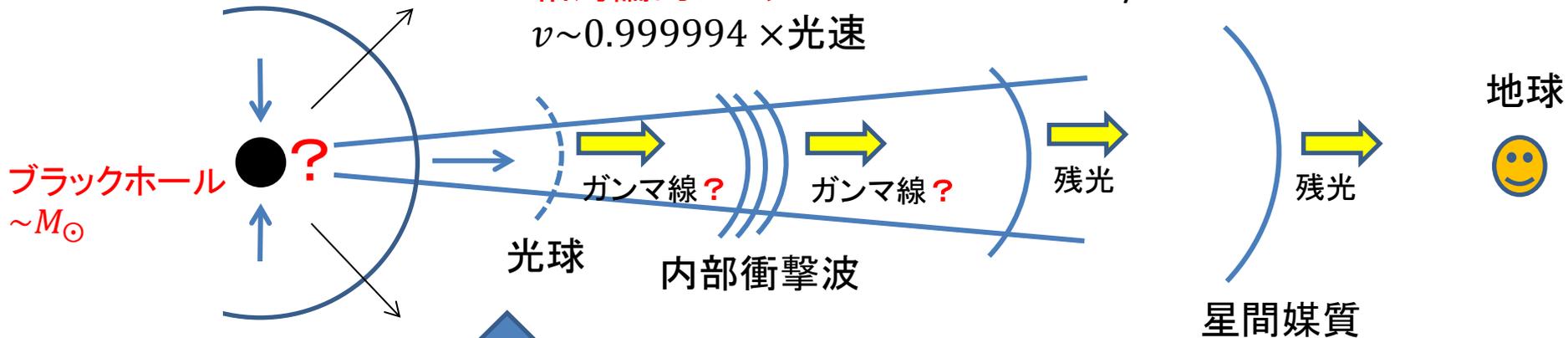
Extended emission



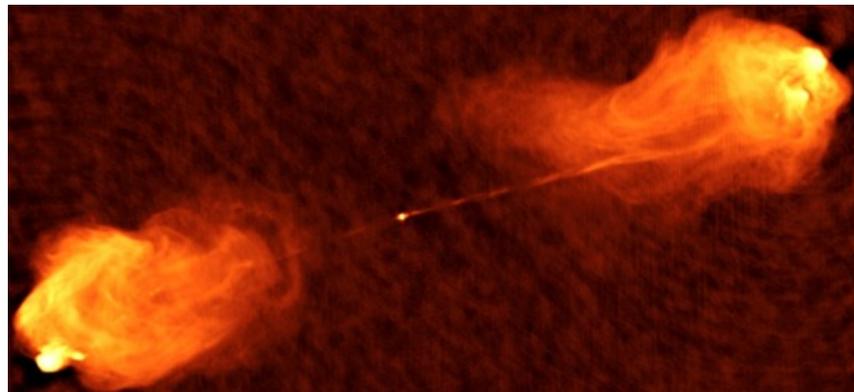
理論的枠組(Paradigm)

(Paczynski,
Rees, Meszaros,
Piran, ...
1980~)

特異な大質量星
の超新星爆発?



活動銀河核ジェットの小スケール版



©NRAO

超新星残骸の相対論的速度版

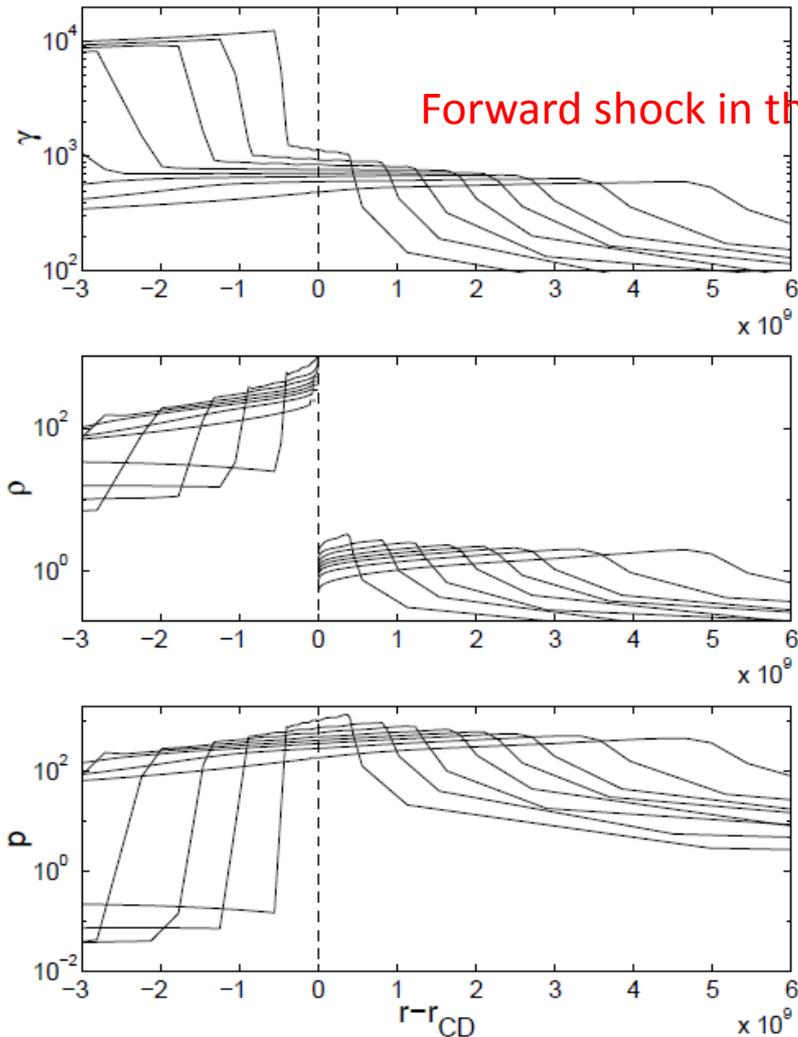


©NASA

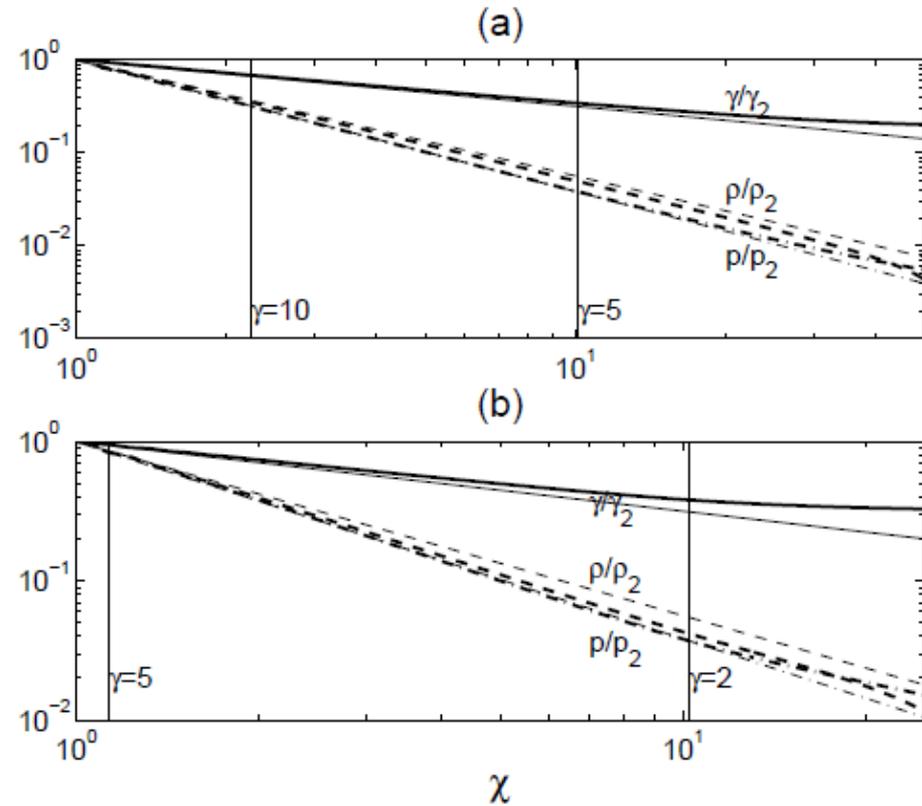
外部衝撃波

Reverse shock in the jet

Forward shock in the ISM



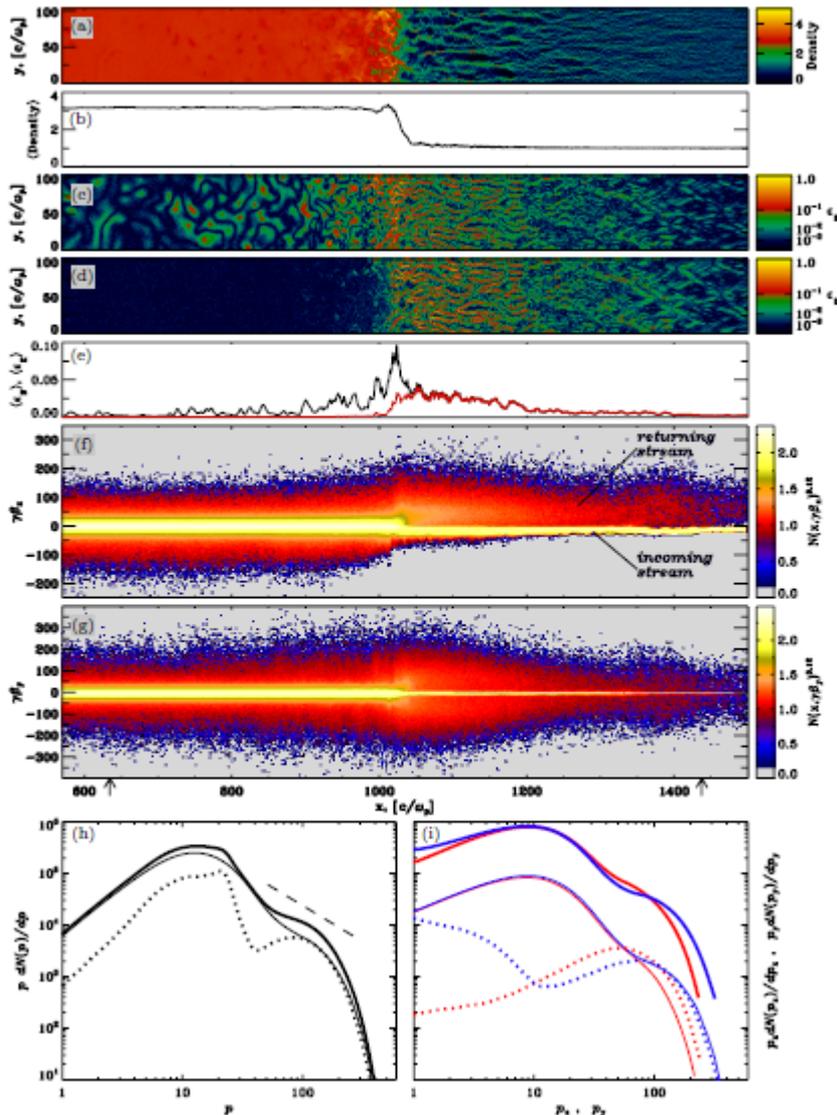
Blandford-McKee phase
(相対論的なSedov-Taylor phase)



$$\chi(t, r) \equiv 1 + 8\Gamma^2(1 - r/R).$$

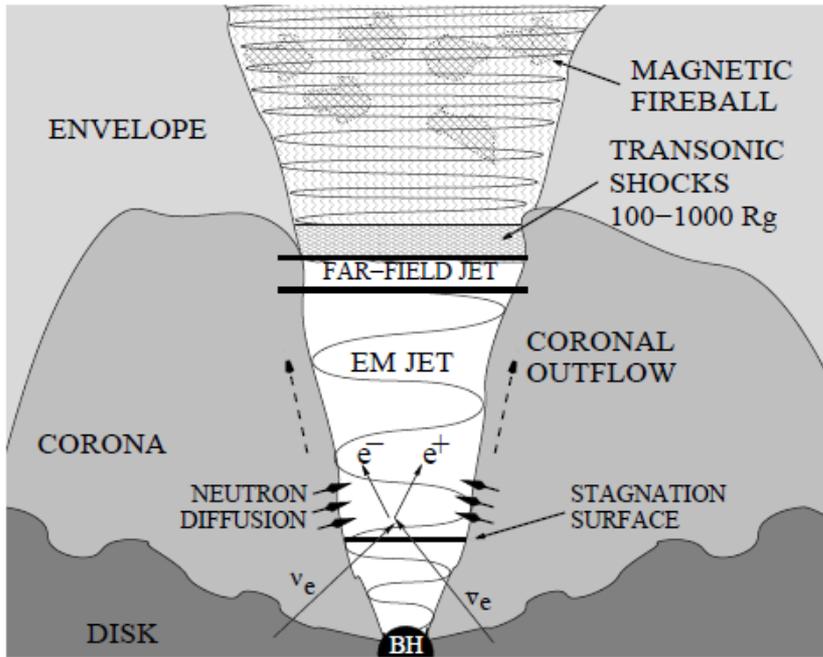
(Kobayashi, Piran & Sari 1999)

“無衝突”衝撃波、粒子加速、非熱的放射



- プラズマ慣性長スケール～電磁流体スケールの物理
- 無衝突でいかにshockができるのか、粒子はいかに高エネルギーを獲得するか
- ガンマ線バーストは最高エネルギー宇宙線、高エネルギーニュートリノの放射源か
- ガンマ線はいかに生成されるか

相対論的ジェット: 2大駆動モデル



- $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightarrow e^- + e^+$ (fireball model)

$$\frac{L_j}{\dot{M}c^2} \sim 0.01 \left(\frac{M_{BH}}{3M_\odot} \right)^{-\frac{3}{2}} \left(\frac{\dot{M}}{M_\odot s^{-1}} \right)^{\frac{5}{4}}$$

(Zalamea & Beloborodov 2011)

- 電磁場駆動ジェット (Blandford-Znajek process)

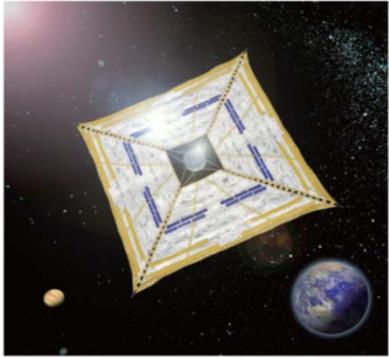
AGN jetsの観測も
高い効率を示唆

$$\frac{L_j}{\dot{M}c^2} \sim 0.1 - 1, \text{ even larger}$$

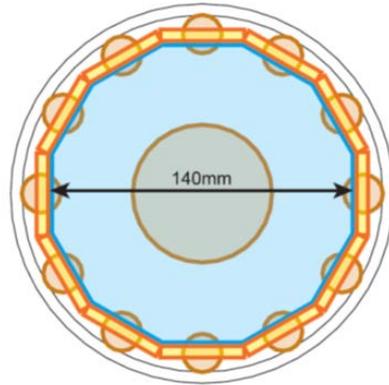
(e.g. McKinney, Tchekhovskoy & Blandford 2012)

(いかにブラックホールからエネルギーを抜くのか; cf. KT & Takahara 2014, submitted)

ガンマ線偏光の検出

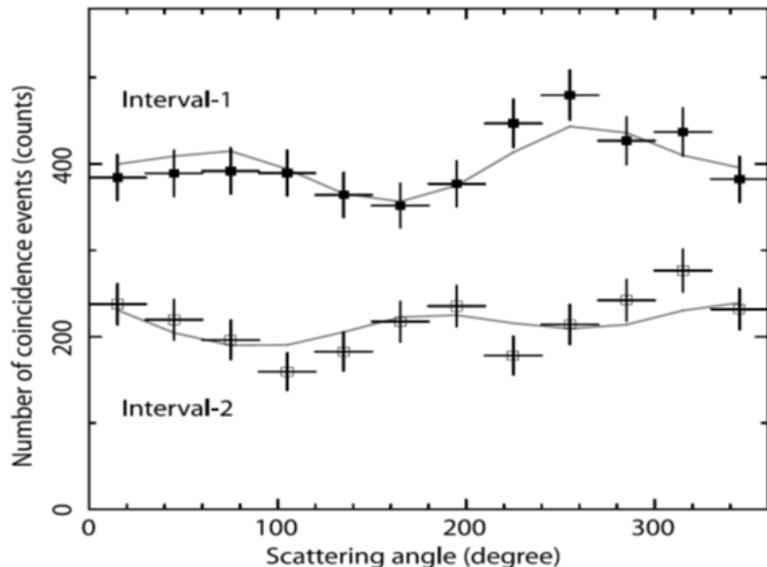


IKAROS (Courtesy of JAXA)



GAP

- GRB 100826A ($T \sim 100s$):
 $P = 27 \pm 11\%$; $P > 6\%$ at 2σ ;
 $P > 0\%$ at 2.9σ (PA rotated)
- GRB 110301A ($T \sim 10s$):
 $P = 70 \pm 22\%$; $P > 31\%$ at 2σ ;
 $P > 0\%$ at 3.7σ
- GRB 110721A ($T \sim 10s$):
 $P = 84 \pm 16 - 28\%$; $P > 35\%$ at
 2σ ; $P > 0\%$ at 3.3σ



電磁場駆動ジェットを示唆

初代星起源のガンマ線バースト

1. ガンマ線バーストは起こりえるか？
2. 残光はどう光るのか？
3. それらは観測できるか？
4. 観測からredshiftを決められるか？
5. 観測から初代星起源と同定できるか？
6. 頻度は？

通常のGRBのモデル

- ジェット生成には、降着円盤が必要

Kerr BH ($a=1$)の最内安定円軌道の半径 $R_{ISCO} = \frac{GM_{BH}}{c^2}$

Kepler回転 $j = R^2\Omega = \sqrt{GM_{BH}R}$

$$R > R_{ISCO} \Rightarrow j > \frac{GM_{BH}}{c} \simeq 10^{16} \left(\frac{M_{BH}}{3M_{\odot}} \right) cm^2 s^{-1}$$

大きい角運動量を持った部分が必要

- 大部分のパルサーは誕生時に周期が10ミリ秒以上

$$j_{PSR} \simeq 6 \times 10^{14} \left(\frac{10ms}{P} \right) cm^2 s^{-1} \quad \text{上に比べて非常に小さい}$$

GRBを起こせるほど大きい角運動量を持つ星に進化するのは稀

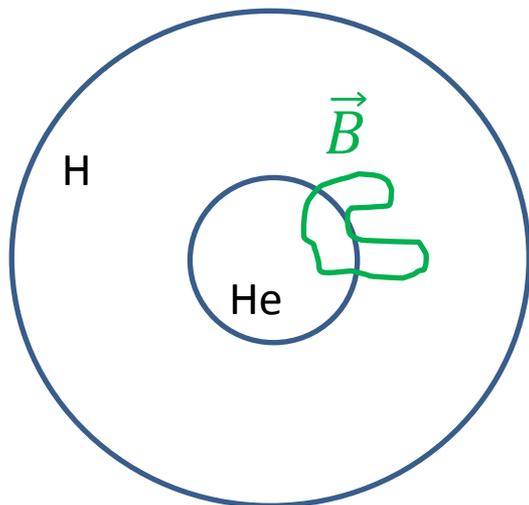
通常の大質量星の進化

- Single star
- 赤色巨星を経てType II SNを起こす
- 乱流磁場による角運動量輸送 (Spruit 2002)
- Wind mass lossによる角運動量ロス

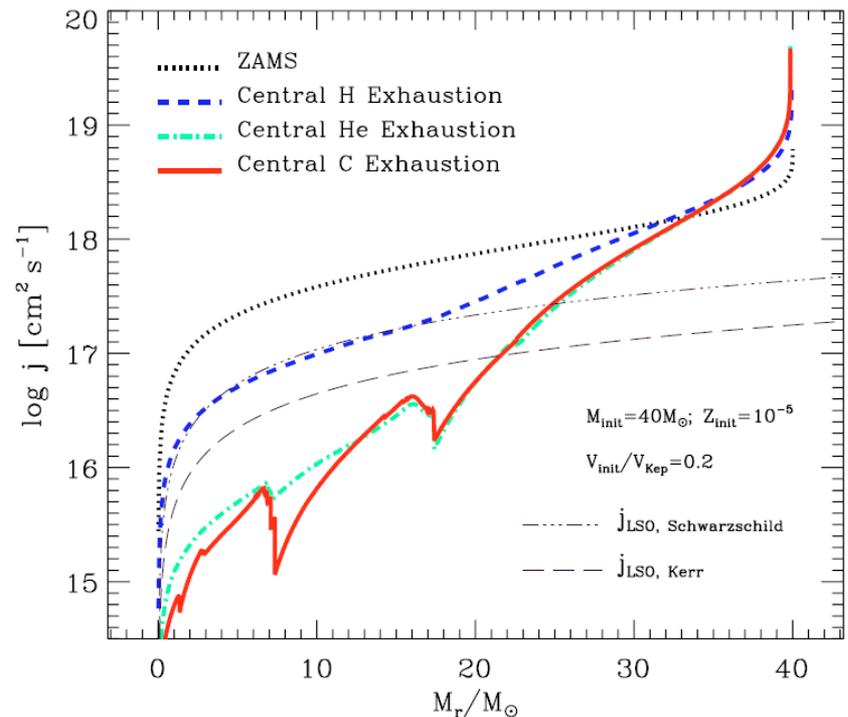
⇒ コアの減速

Typical pulsarsと合致。

GRBは起こせない



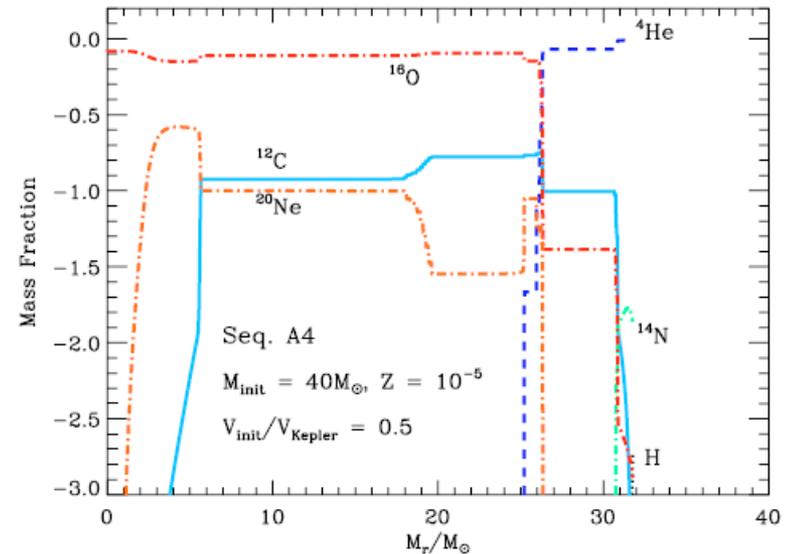
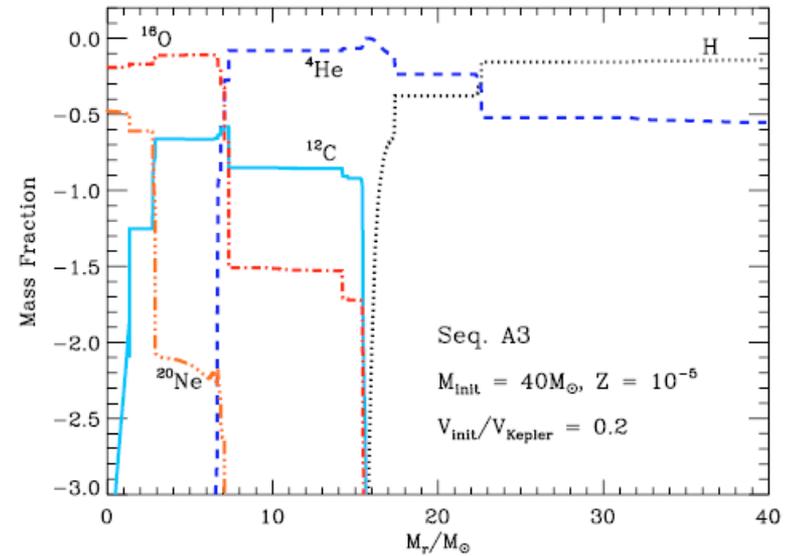
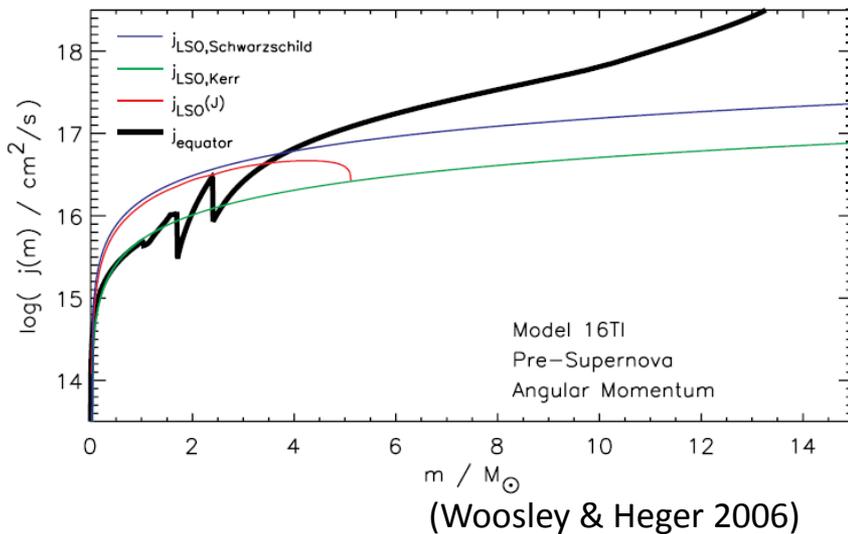
1次元計算の結果



(Yoon & Langer 2005)

回転が速い星の進化

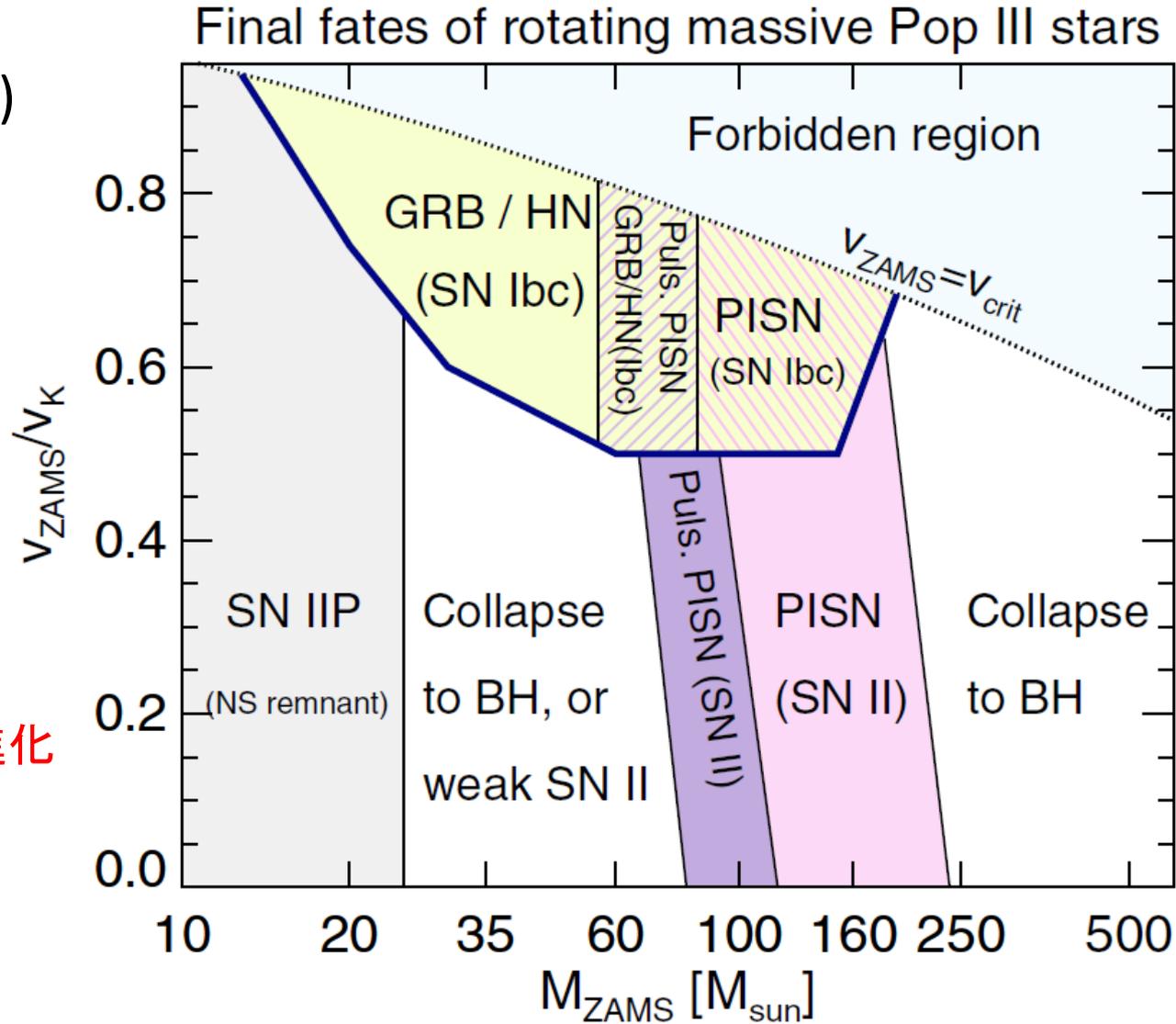
- Chemically homogeneous \Rightarrow no H envelope
- さらに low metallicity であれば low mass loss (keep angular momentum)
- \Rightarrow 非常に速く重いコア、GRB を起こせる



(Yoon & Langer 2005)

初代星の進化モデル

- Yoon et al. (2012)
- Spruit dynamo
- CNO line wind + decretion mass loss



やはりGRBは一様化学進化の場合でのみ起こりうる

バーストの性質

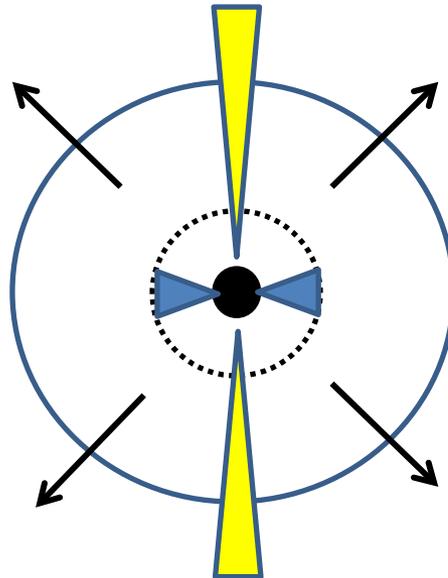
- **Total gamma-ray energy** \sim gravitational energy * efficiency

$$E_{\gamma} \sim \epsilon_{\gamma} \eta M c^2 \simeq 10^{52} \epsilon_{\gamma} \left(\frac{\eta}{0.01} \right) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg}$$

- **Duration** \sim accretion timescale

$$T \sim \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{R_d^3}{GM_{BH}}} (1+z) \simeq 30 \left(\frac{0.1}{\alpha} \right) \left(\frac{R_d}{10^9 \text{ cm}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3M_{\odot}}{M_{BH}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1+z}{3} \right) \text{ sec}$$

総質量 $\sim 15M_{\odot}$
半径 $\sim 10^{10} \text{ cm}$



超新星成分、disk wind?
 $\sim 10M_{\odot}$

ブラックホール $\sim 3M_{\odot}$

円盤で落下 *a few* $\times M_{\odot}$?

初代星GRBの同定？

- Total gamma-ray energy \sim gravitational energy * efficiency

$$E_\gamma \sim \epsilon_\gamma \eta M c^2 \simeq 10^{52} \epsilon_\gamma \left(\frac{\eta}{0.01} \right) \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ erg}$$

- Duration \sim accretion timescale

$$T \sim \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{R_d^3}{GM_{BH}}} (1+z) \simeq 30 \left(\frac{0.1}{\alpha} \right) \left(\frac{R_d}{10^9 \text{ cm}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3M_\odot}{M_{BH}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1+z}{3} \right) \text{ sec}$$

$$M \sim 10^3 M_\odot, M_{BH} \sim 300 M_\odot, R_d \sim 10^{11.5} \text{ cm}, z \sim 20$$

$$E_{\gamma, iso} \sim 10^{57} \left(\frac{10^{-2}}{\theta_j^2} \right) \text{ erg}, T \sim 1 \text{ day}$$

High-z, super-energetic,
ultra-long GRB が初代星
GRBの可能性大

(Komissarov & Barkov 2010; Meszaros & Rees 2010; KT, Sakamoto & Meszaros 2011)

もちろん、残光解析でno metalと分かれればよい。

Detectability

- 通常の場合

$$E_{\gamma,iso} \sim 10^{53} \text{ erg}, T_r \sim 10 \text{ sec} \Rightarrow L_{\gamma,iso} \sim 10^{52} \text{ erg s}^{-1}$$

- Pop III very massive starの場合

$$E_{\gamma,iso} \sim 10^{57} \text{ erg}, T_r \sim 10^4 \text{ sec} \Rightarrow L_{\gamma,iso} \sim 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$$

通常より1ケタ明るい程度

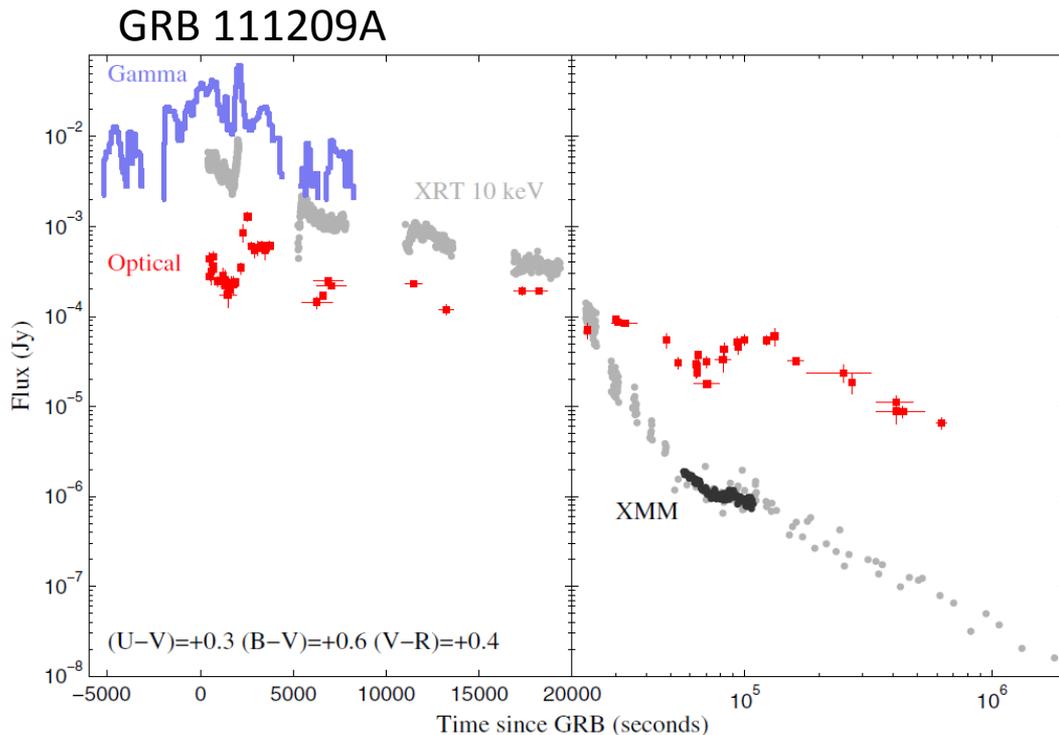
$z \sim 20$ で、スペクトルピークが $\sim 30 \text{ keV}$ と仮定すると

$$\dot{N}_{\gamma} \sim \frac{L_{\gamma,iso}}{4\pi d_L^2 (30 \text{ keV})} \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Swift BATで検出できる。

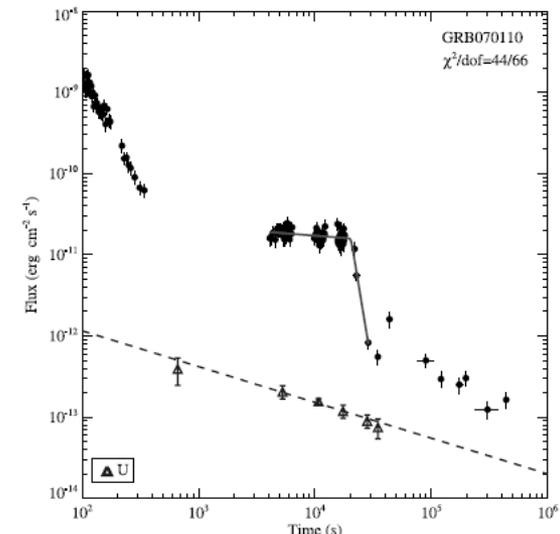
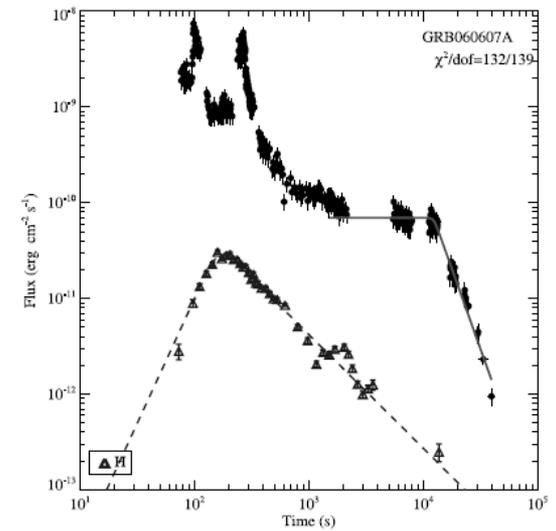
より暗いバーストを预言するモデルでは、 $z \sim 20$ のバーストを検出するのは難しい (Suwa & Ioka 2011; Nakauchi et al. 2012)

Ultra-long GRBs



10000秒続くバーストを初めて検出？
 ⇒ H envelopeを持った大質量星起源？
 (Gendre e tal. 2013)

$$E_{\gamma,iso} \cong 6 \times 10^{53} \text{ erg}$$

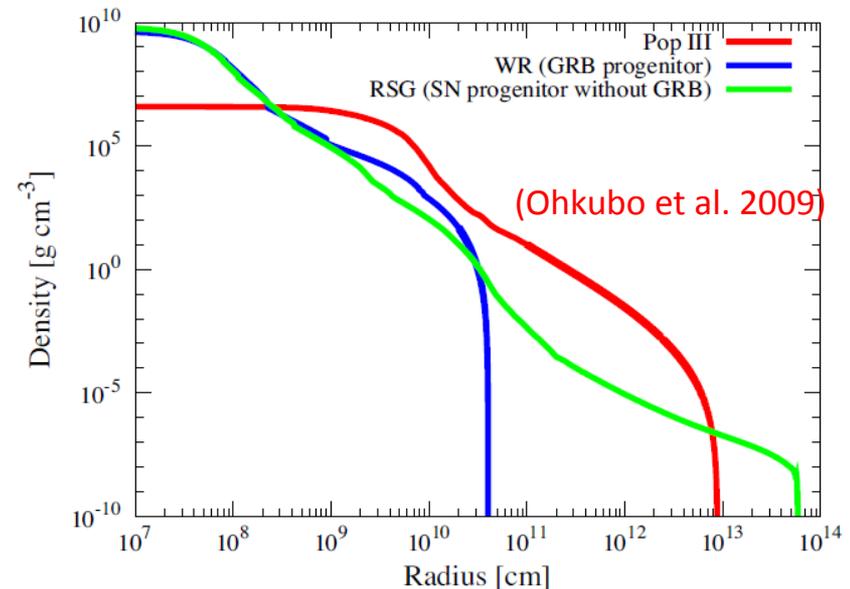
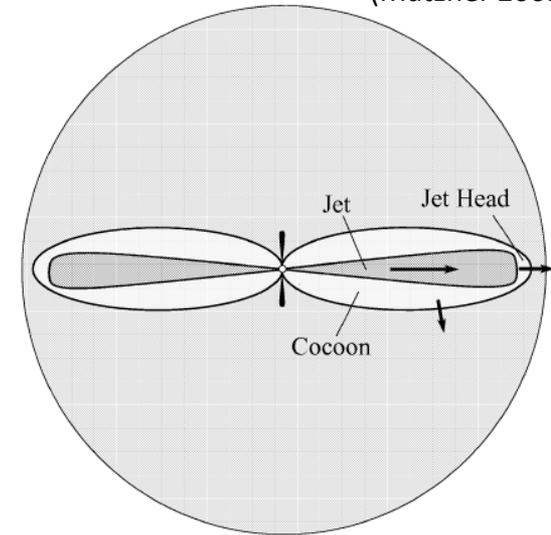


しかし以前から長時間継続エンジンの示唆がある

星内のジェット伝播

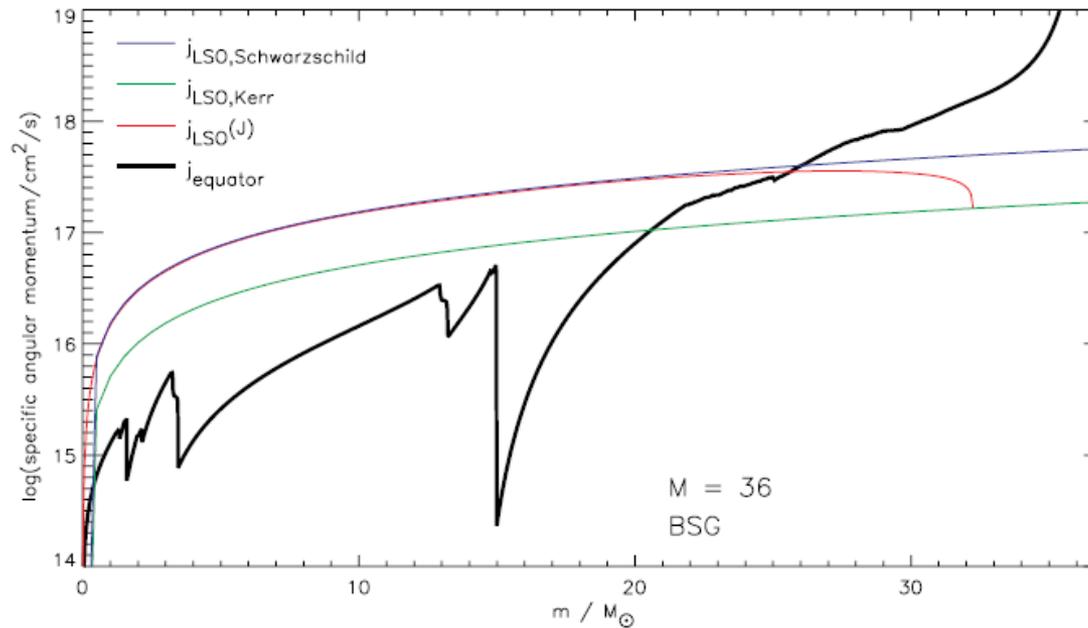
- もし星がH envelopeを持っていれば、ジェットが星を突き破れるかという問題が生じる
- それでもジェットは星を突き破れる (Suwa & Ioka 2011)
- コクーン放射がJWSTで $z \sim 15$ まで検出できる (Kashiyama et al. 2013)
- しかし、ここまで議論したように、H envelopeを持つ星はジェットを作ることができない (Yoon et al. 2012)

(Matzner 2003)



低速回転星からのジェット

(Woosley & Heger 2012)



星の大部分はブラックホールに落下。残りのH envelope 部分がdisk, jetを作ることができる。

$$\dot{M}c^2 \sim 10^{50} \text{erg s}^{-1} \quad \Rightarrow \quad L_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{50} \text{erg s}^{-1}$$

それほど明るくはないが、数は多いだろう。

残光の性質

- 爆発直前の周囲の密度プロファイル？

(Wang, Bromm et al. 2012)

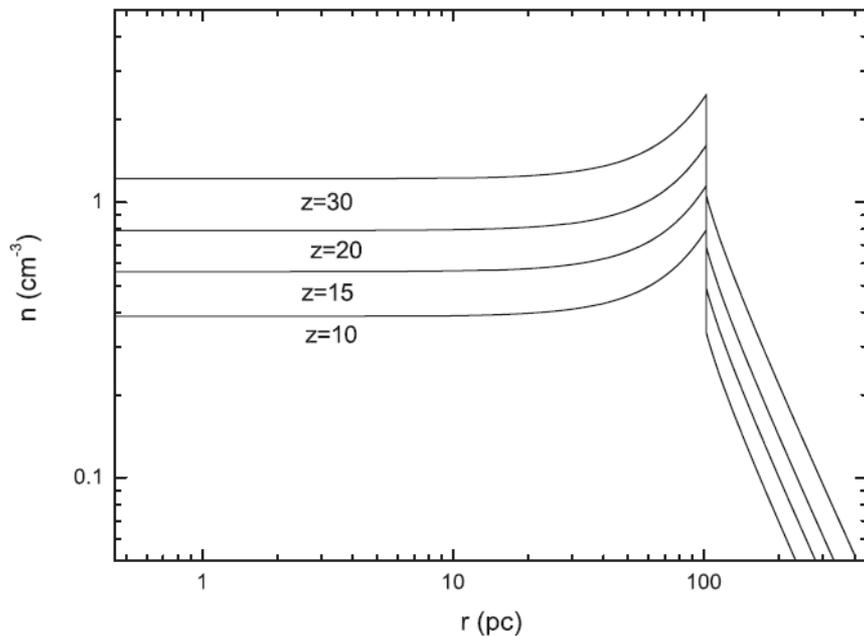


Figure 1. Minihalo circumburst environment. Shown is the hydrogen number density vs. distance from the central Pop III star at the moment of its death, 3 Myr after it was born. The density profiles are given by the Shu solution for different redshifts, as labeled. Typical circumburst densities are $\sim 1 \text{ cm}^{-3}$, with smaller values at lower redshifts. The redshift trend reflects the shallower minihalo potential wells at later times.

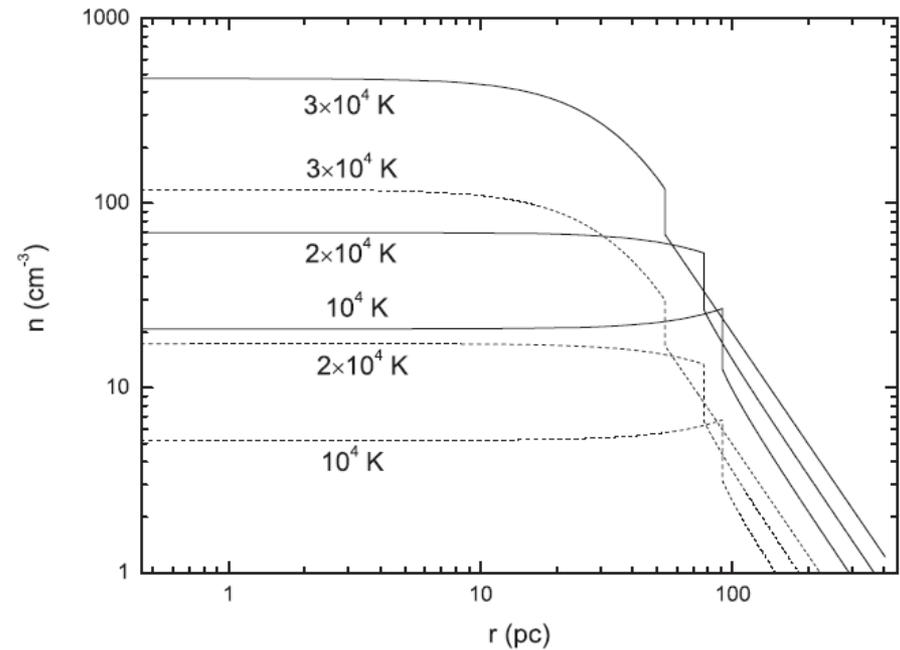
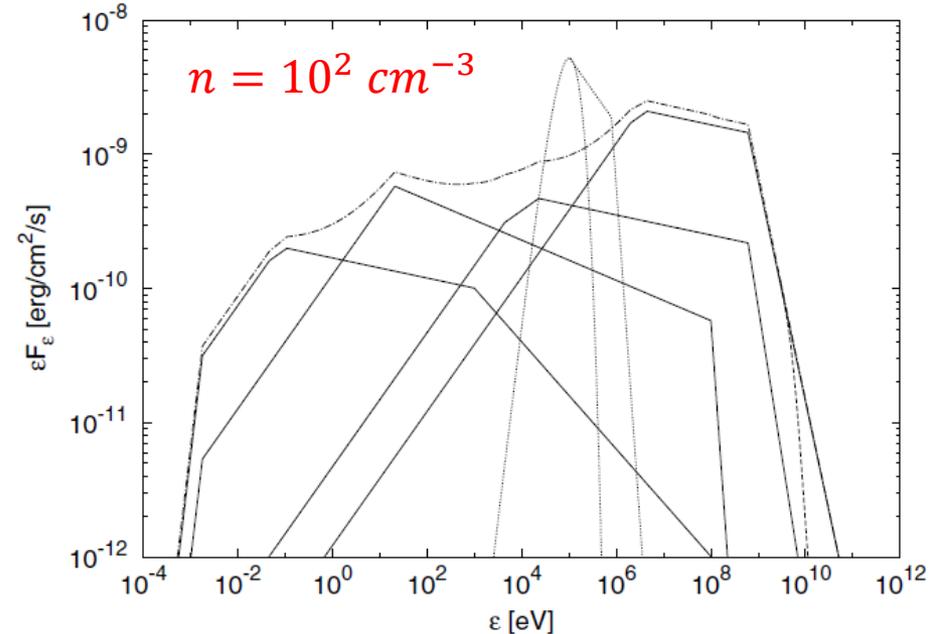
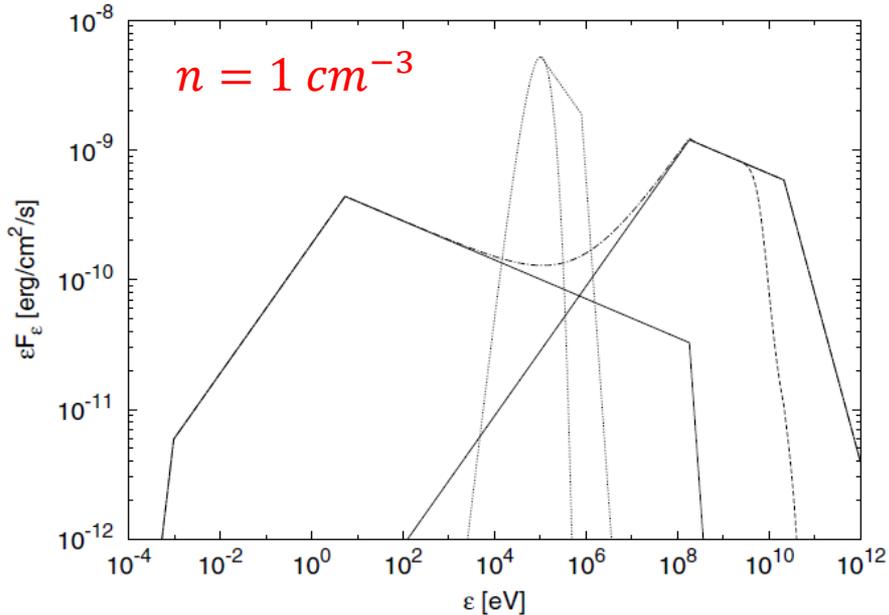


Figure 2. Atomic-cooling-halo circumburst environment. The density profiles are again calculated from the Shu solution, evaluated at $t = 3 \times 10^6$ yr after source turn-on. The collapse redshift is here indirectly given by the virial temperature, as labeled. We show the case of photoheating from only a single Pop III star (solid lines), and that from a stellar cluster (dotted lines). The resulting densities again exhibit a nearly uniform inner core, but overall values are much higher than in the minihalo case (see Figure 1).

残光の性質

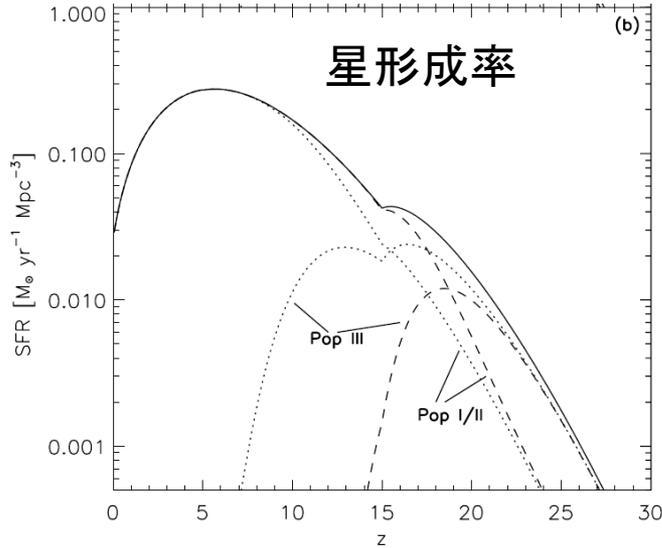
$$E = 10^{57.6} \text{ erg}, T = 10^5 \text{ sec}, \epsilon_B = 0.01, \epsilon_e = 0.1, z = 20$$



- Easily detected by Swift XRT ($> 6 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and by Fermi LAT ($> 3 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- $L_{iso} \propto E_{iso} T^{-1} \propto M M_{BH}^{1/2} R_d^{-3/2}$
- 残光の観測から、total energy, ambient medium densityが推定できる
- Opt-IR observationからredshiftを決められる

Event rate

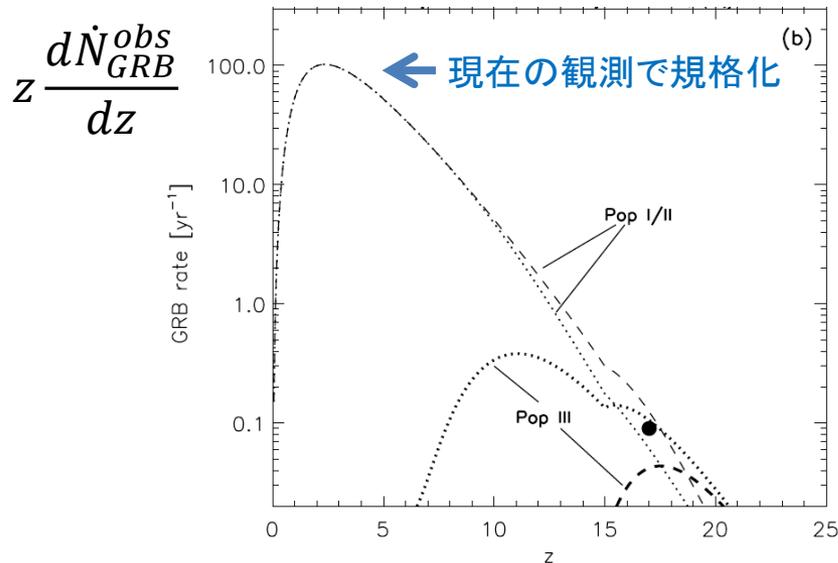
(Bromm & Loeb 2006)



$$\frac{d\dot{N}_{GRB}^{obs}}{dz} = \psi_*(z) \eta_{GRB}(z) P(z) \frac{1}{1+z} \frac{dV}{dz},$$

↑
星形成率

Press-Schechter formalismから導出



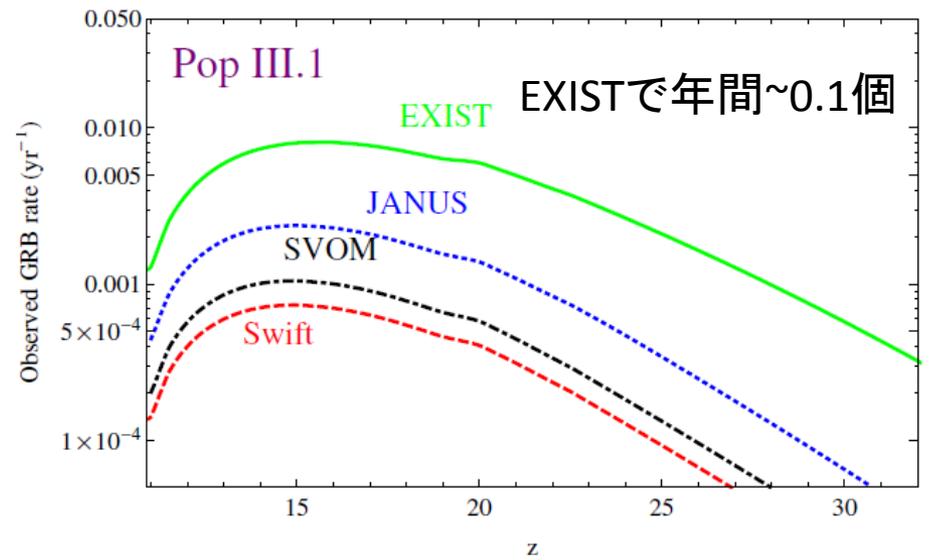
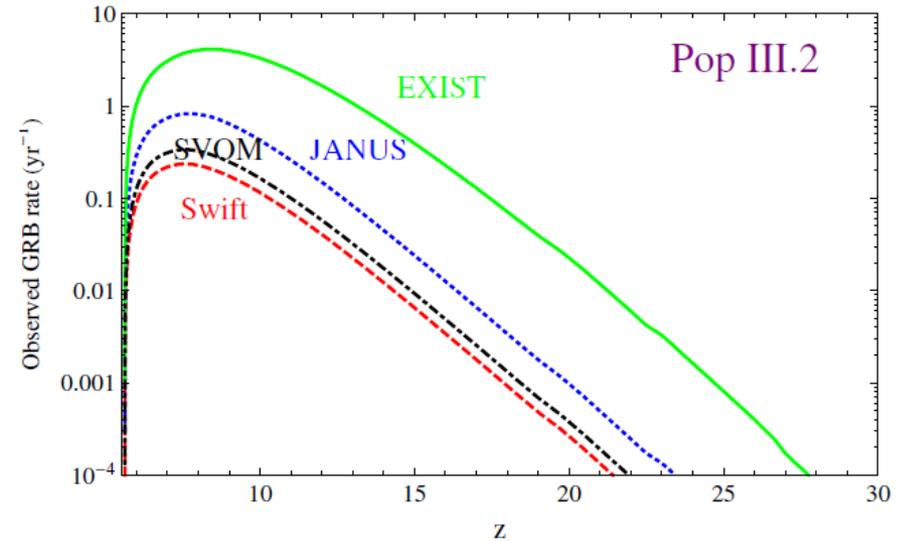
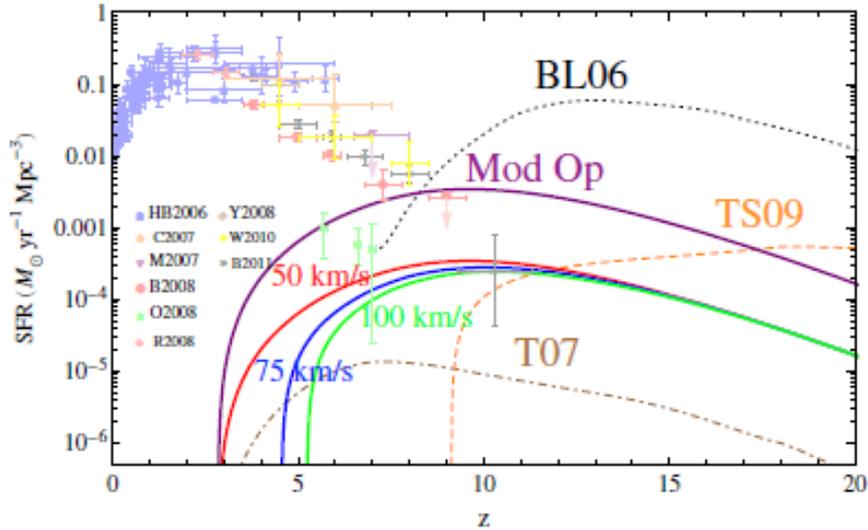
Pop III starがvery massiveであり、super-energeticだとすると、 $z \sim 20$ において

$$R_{BAT} \sim z \frac{d\dot{N}_{GRB}^{obs}}{dz} \sim 0.1 \text{ yr}^{-1}$$

(KT, Sakamoto & Meszaros 2011)

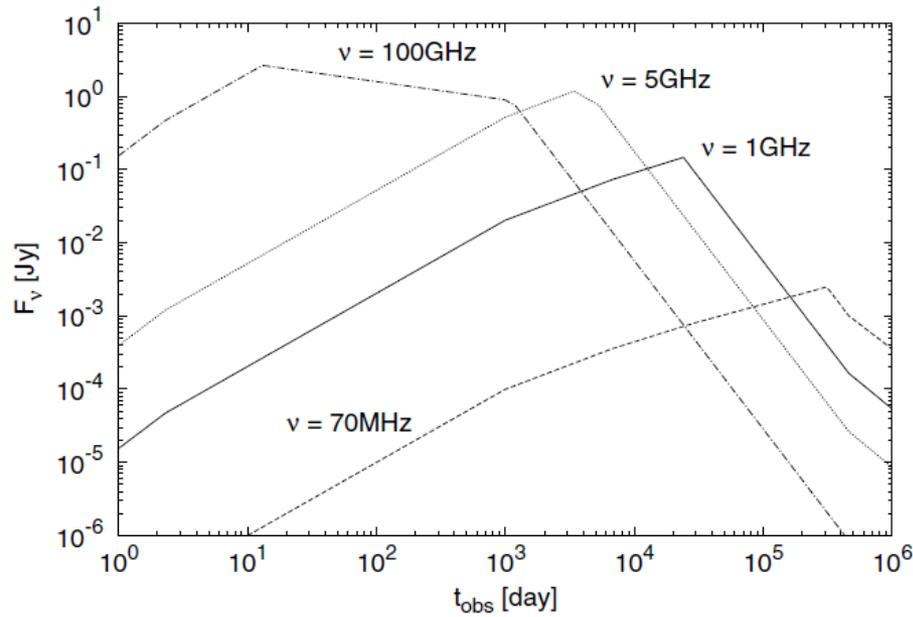
Event rate

(de Souza, Yoshida & Ioka 2011) Pop III.2 rate



- より現実的な星形成効率
- Radiation, metal enrichmentの効果を考慮

明るい電波残光



$$E = 10^{57.6} \text{ erg}, T = 10^5 \text{ sec}, \epsilon_B = 0.01, \epsilon_e = 0.1$$

$$n = 1 \text{ cm}^{-3}, z = 20$$

- VLAによるFIRST survey (1.4 GHz, >6mJy, ~1/5 sky)

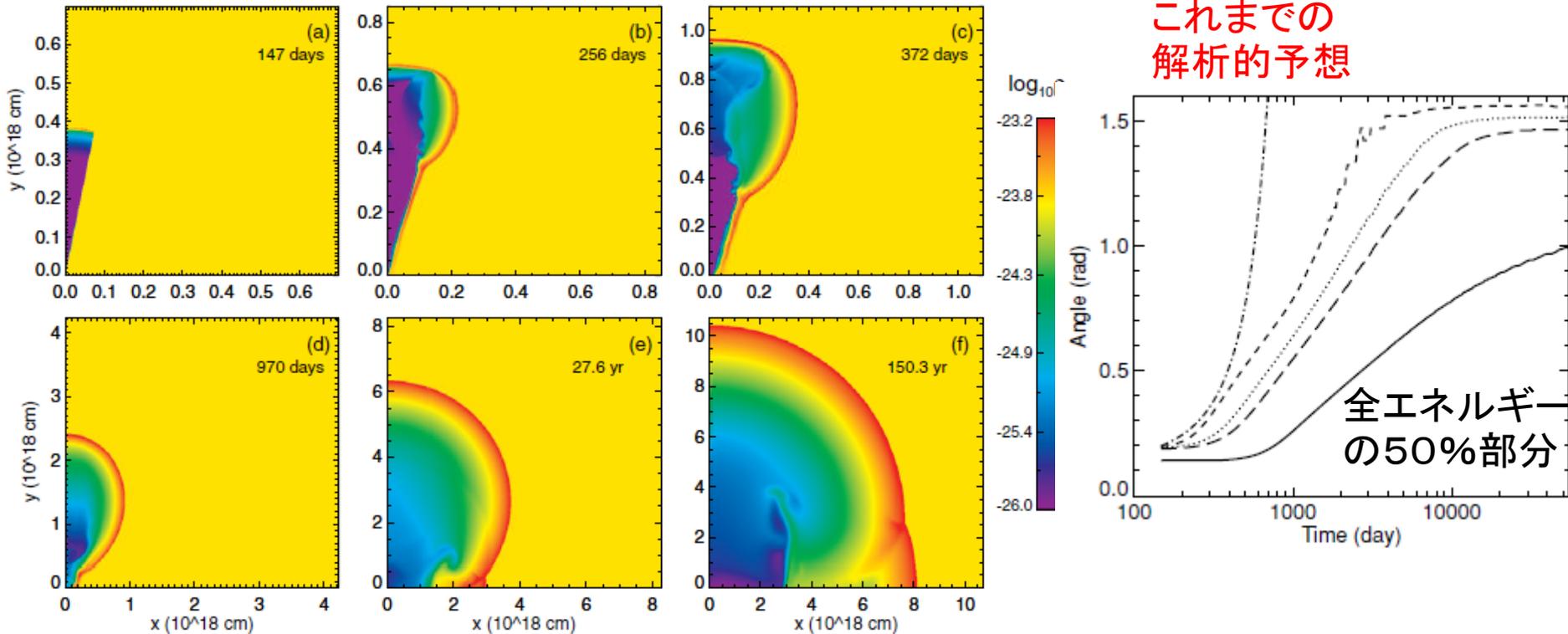
$$N_{FIRST} \sim 60 \left(\frac{R_{w,4\pi}}{1 \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{t_{r,obs}}{300 \text{ yr}} \right)$$

- 電波サーベイデータの再解析で見つかるかもしれない
- GHz帯で見つかった場合、どうやってredshiftを決めるか??

- 21cm吸収線がギリギリ検出可能 = LOFARによるサーベイで検出、さらにredshift決定

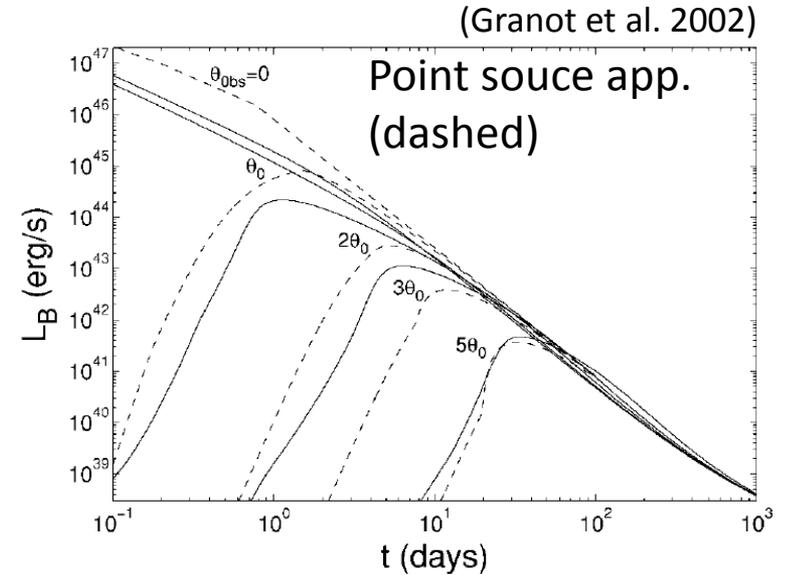
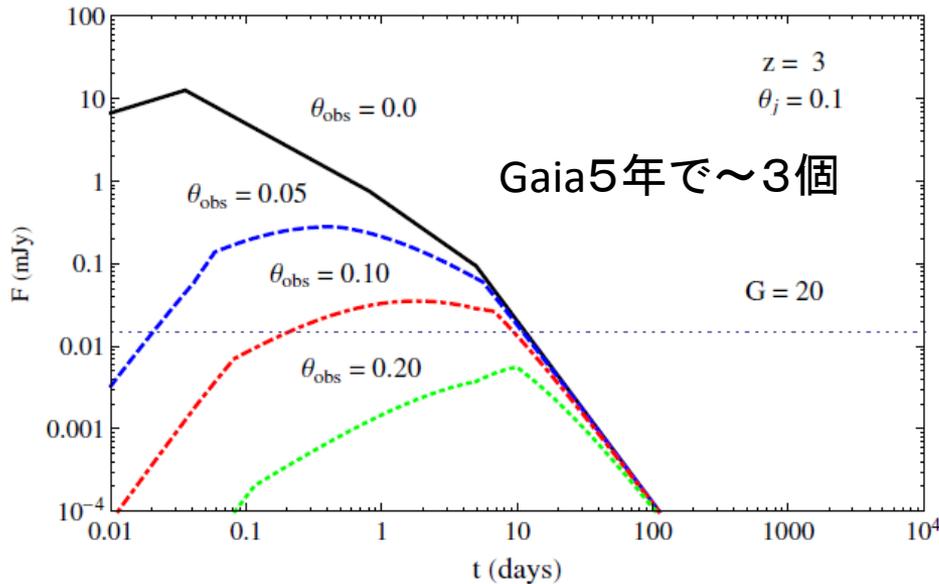
$$N_{21cm} \sim 1 \left(\frac{R_{w,4\pi}}{1 \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{t_{r,obs}}{850 \text{ yr}} \right) \left(\frac{\Omega}{50 \text{ deg}^2} \right)$$

Sideways expansion

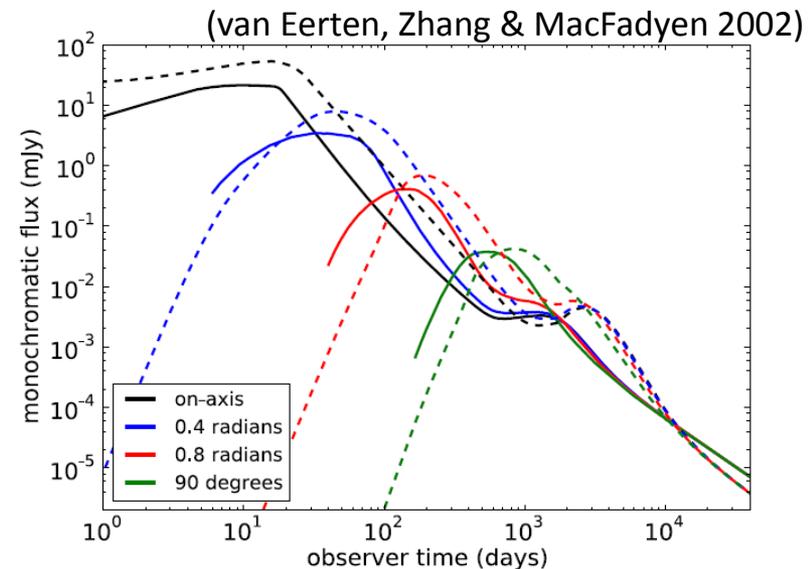


- 最近の高精度の流体計算では、ジェットは $\gamma \sim \theta_j^{-1}$ から sideways expansionしない (Zhang & MacFadyen 2009)
- Off-axis afterglowの予測には注意が必要

Off-axis Afterglows



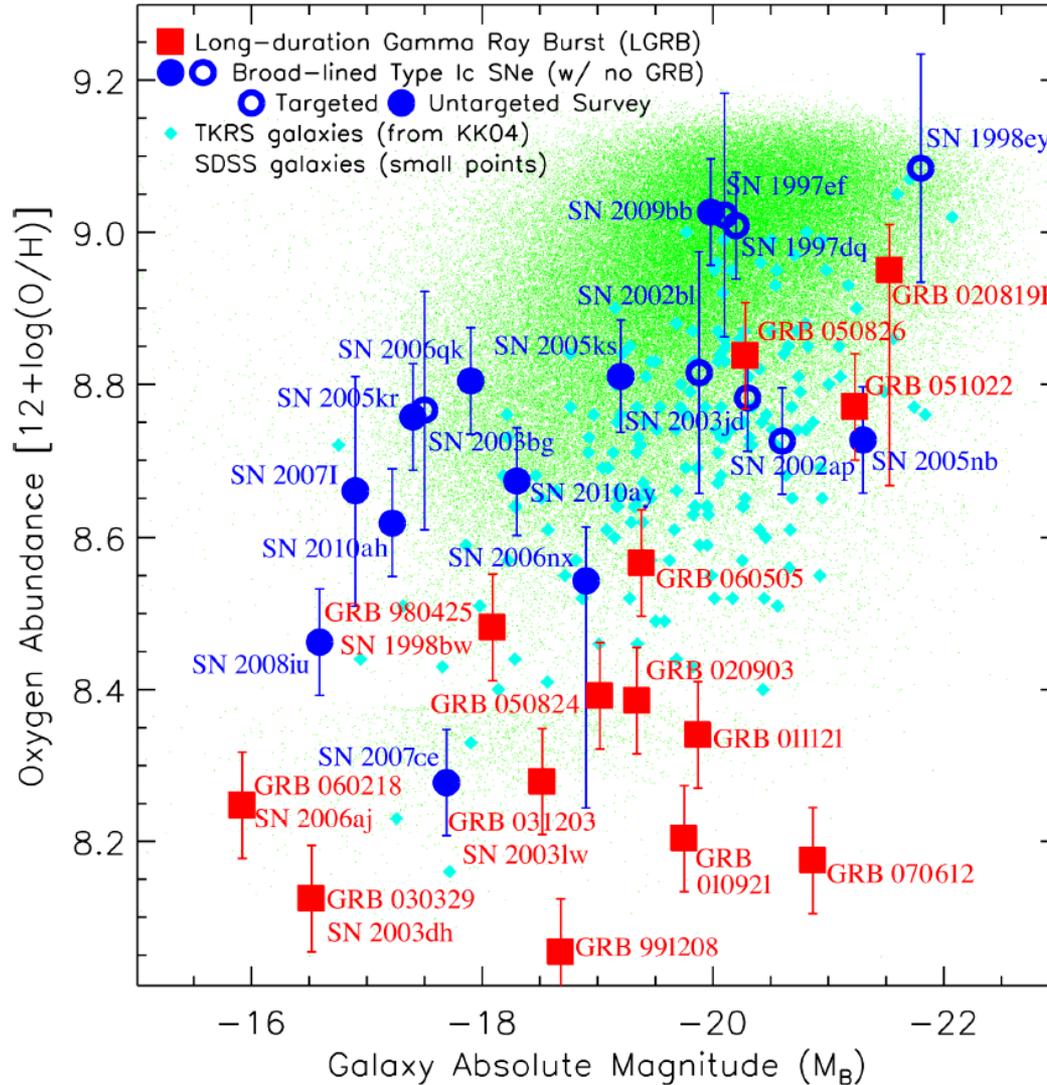
- Point source近似 (e.g., de Souza et al. 2012) はフラックスを過小評価する
- 「 $\gamma \sim \theta_j^{-1}$ になるとすべてのoff-axis observersが観測できる」(Macpherson et al. 2013) とするのはフラックスを過大評価している



Summary

- 星がガンマ線バーストを起こすには、崩壊前のコアが高速回転している必要がある。
- 高速回転星が、一様化学進化を経て、ガンマ線バーストを起こすことができる。
- 初代星ガンマ線バーストの検出頻度は低いと予想。
- $E_{\gamma,iso} > 10^{57} \text{ erg}, T \sim 1 \text{ day} \Rightarrow \text{Very massive star origin}$
- 残光は周辺媒質の状態のプローブとなる。
- 残光は電波望遠鏡、JWSTなどで観測できるが、数が少ない上、他の天体とどう区別できるかが問題

Host Metallicity



(Graham & Fruchter 2013)

High-z 天体としての役割

- 残光の吸収線 → IGMの電離度、金属量、組成
- 星形成史
- 赤外線背景放射
- **初代星**
- 宇宙の状態方程式
- 基礎対称性の検証 (KT, Mukohyama, Yonetoku et al. 2012)

