
グループ発表 天体核研究室

「低光度ガンマ線バーストの起源」 D2 当真賢二

「宇宙ひもを重力レンズで探る」 D3 須山輝明

2006年度物理学第二教室教室発表会 @第四講義室

天体核研究室の大雑把な研究グループ

天体物理学

中村、犬塚、井岡、山田

PD: 町田、石津、三浦

D3: 道越

D2: 井上(剛)、当真

D1: 廣瀬 M2: 武藤

M1

佐藤、筒井、富康、野口、
村主

宇宙論

中村、田中、早田

D3: 須山 D2: 横山

D1: 泉 M2: 棚橋、村田

重力

中村、田中、早田、井岡

D2: 吉川 D1: 雁津

M2: 井上(博)

低光度ガンマ線バーストの起源

～中性子星からの相対論的ジェット～

参考文献

2005年度教室発表会 学問の流れ

井岡邦仁 「ガンマ線バースト:ブラックホールの誕生」

2006年度物理学第二教室教室発表会@第四講義室

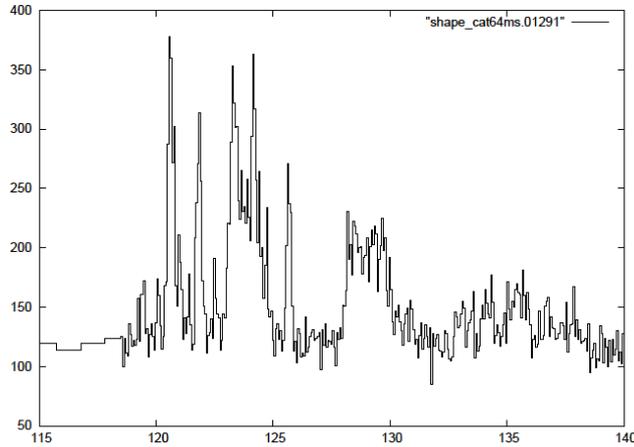
天体核研究室 D2 当真賢二

イントロダクション

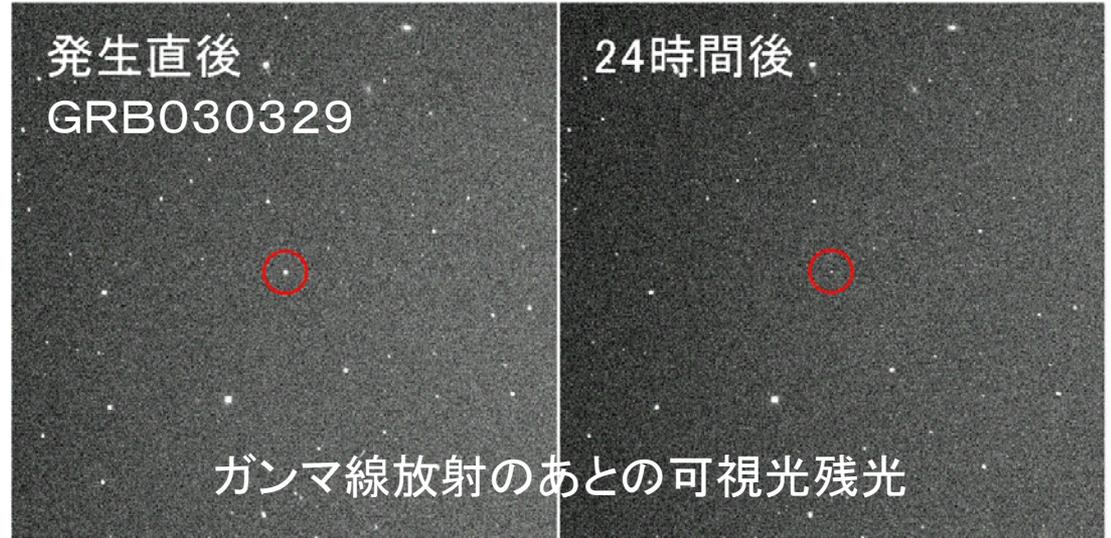
ガンマ線バースト (GRB)

1日に2, 3発、天空上のどこかで起こる爆発現象

ガンマ線光子のカウントレート



時間[s]



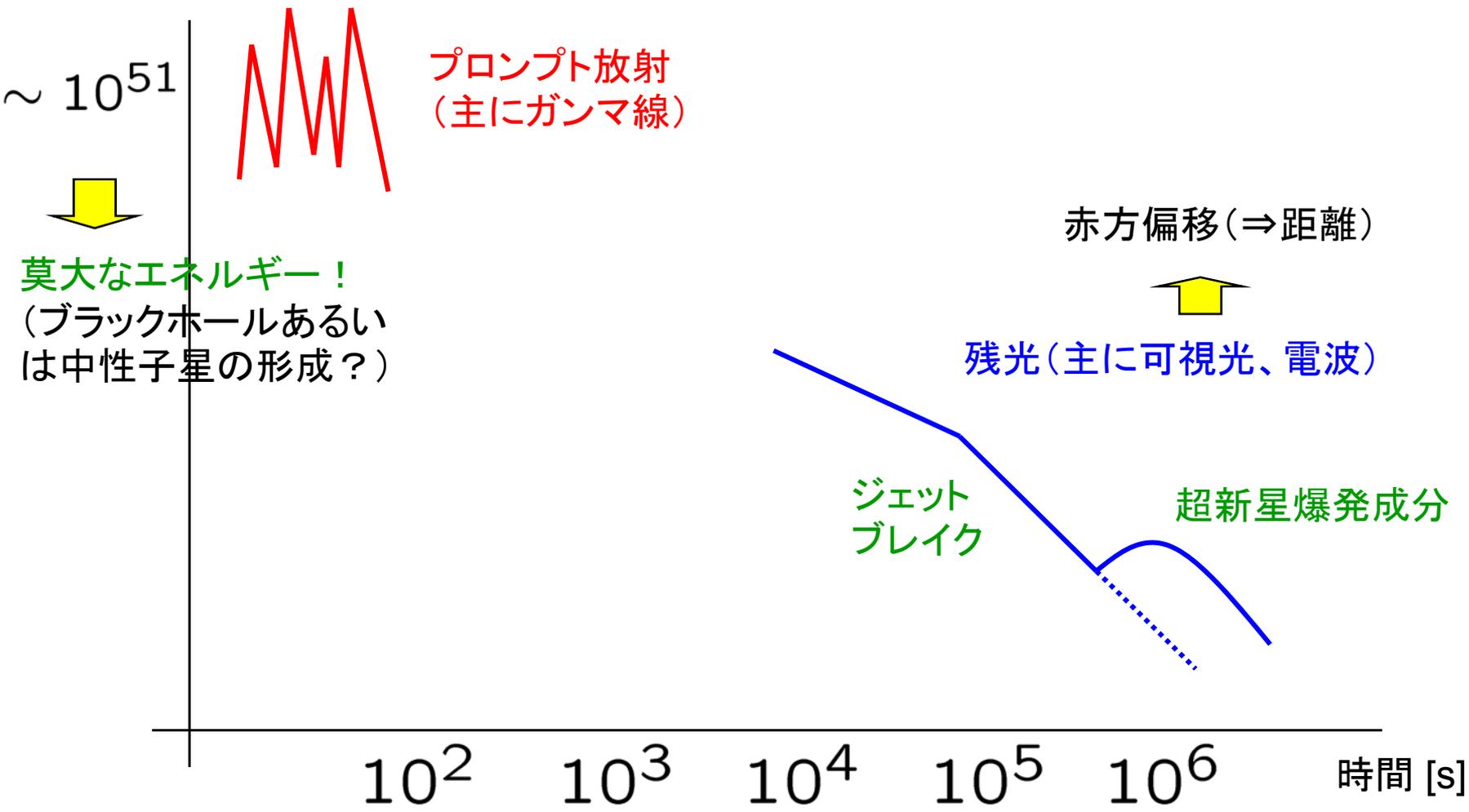
(日本のガンマ線バースト専門衛星HETE-2のウェブページより)

その爆発までの距離は典型的に**100億光年**。
宇宙**一明るい現象**である(太陽が一生かけて放出するエネルギーを数十秒で放出する)。

発見から40年来いまだ起源がはっきりしない謎の天体現象。

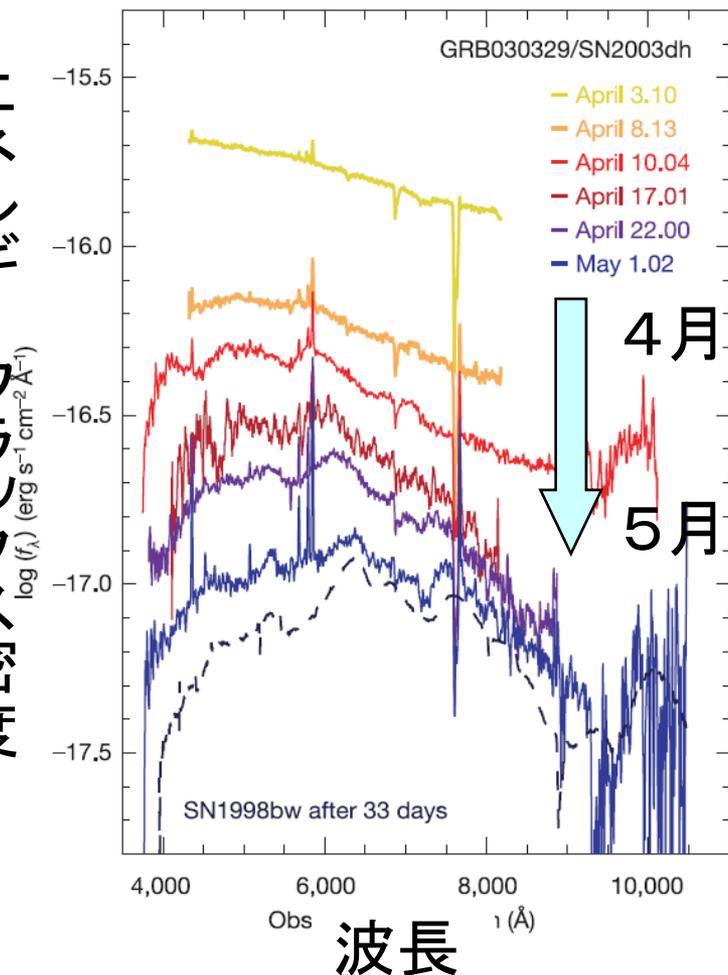
典型的な観測結果

光度 [erg/s]



最新のSwift衛星が明らかにし始めた時間領域

エネルギーフラックス密度



いくつかのイベントでは、可視光の残光から超新星爆発(星の最期)の兆候が観測される。

残光のシンクロトン放射のパワーロウスペクトルが減衰し、超新星爆発特有のスペクトルが現れる。

ガンマ線バーストの起源は星の最期に関連している！

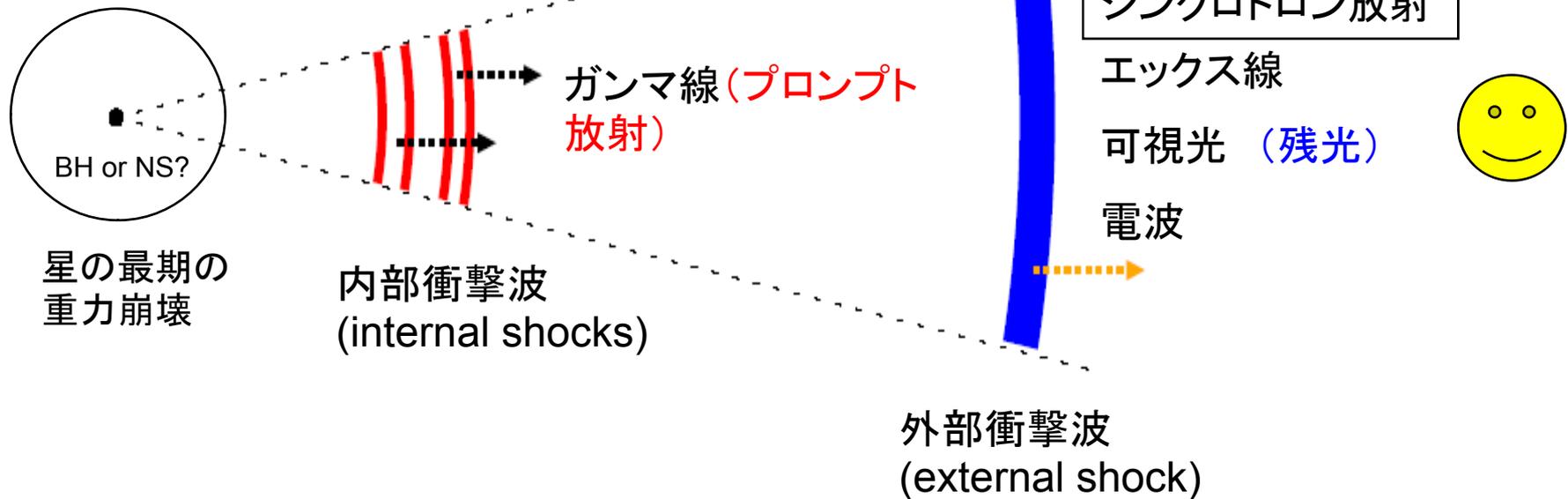
(Hjorth et al. 03; Stanek et al. 03)

標準的な理論モデル

(e.g., Rees & Meszaros 94; 97)

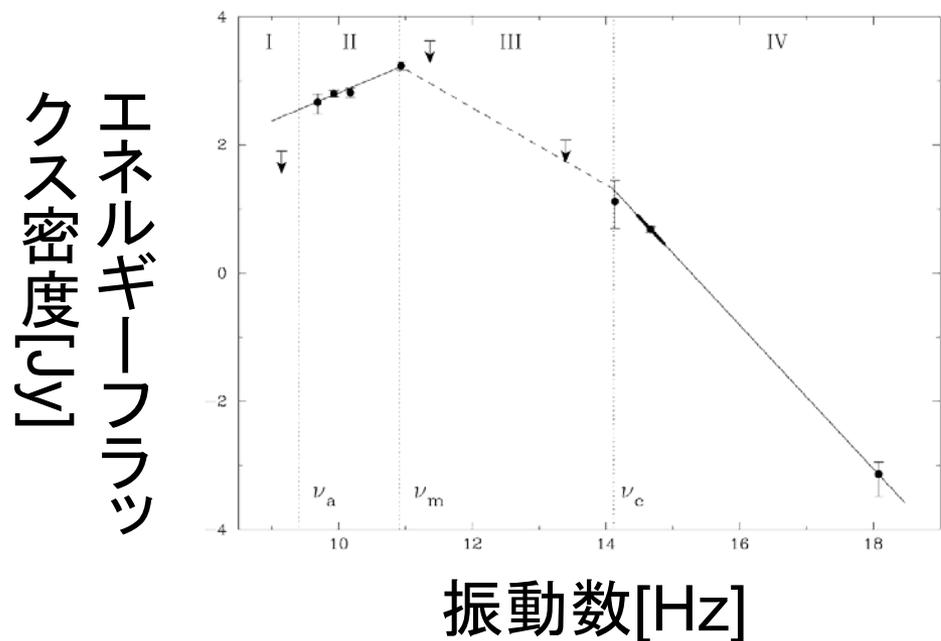
10-10³秒間の超相対論的なプラズマ流

$$\Gamma \geq 100$$



運動エネルギー ⇒ 内部エネルギー ⇒ 輻射エネルギー

残光に対する外部衝撃波シンクロトンモデルの成功



(Galama et al. 98)

理論の予測スペクトルが観測と見事に一致！

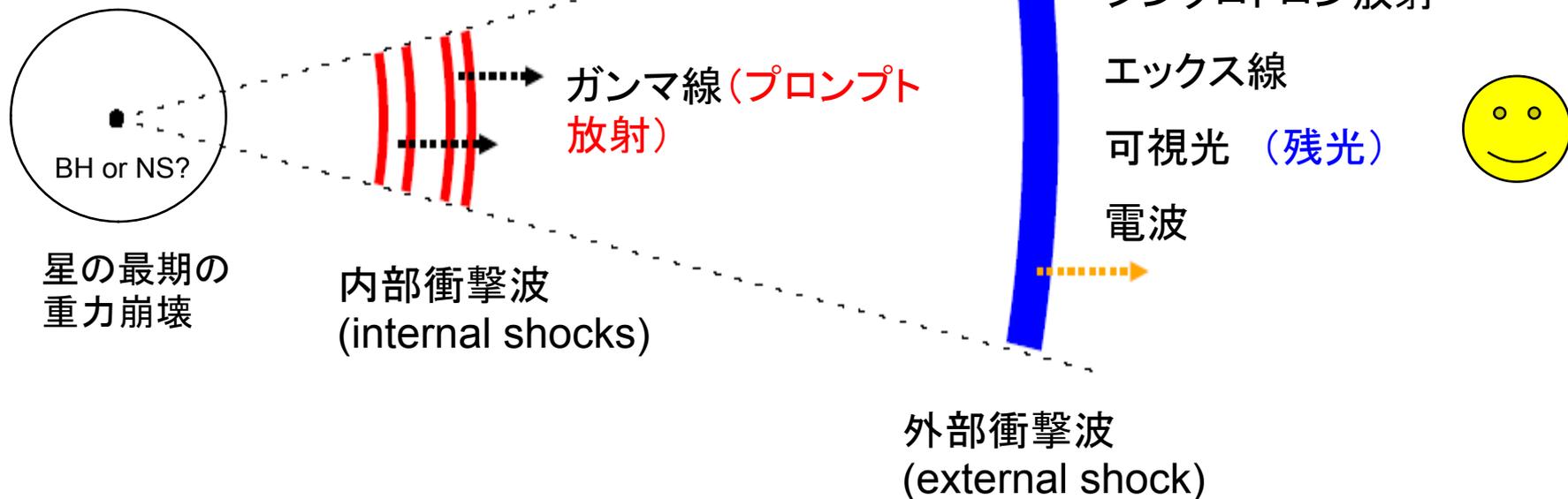
$$E_{k,iso} \sim 10^{52} \text{ erg}, \quad n_{ISM} \sim 1 \text{ cm}^{-3}, \quad \epsilon_e \sim 10^{-1}, \quad \epsilon_B \sim 10^{-2}$$

標準的な理論モデル

(e.g., Rees & Meszaros 94; 97)

10-10³秒間の超相対論的なプラズマ流

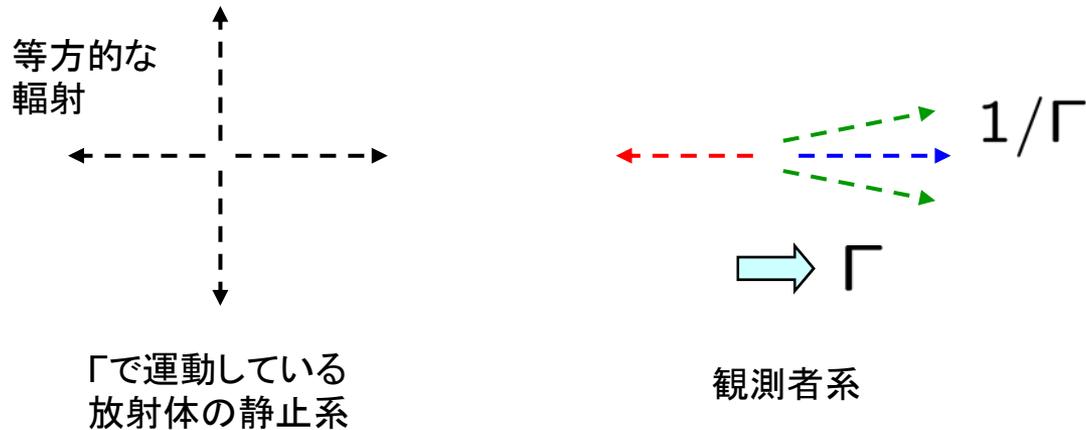
$$\Gamma \geq 100$$



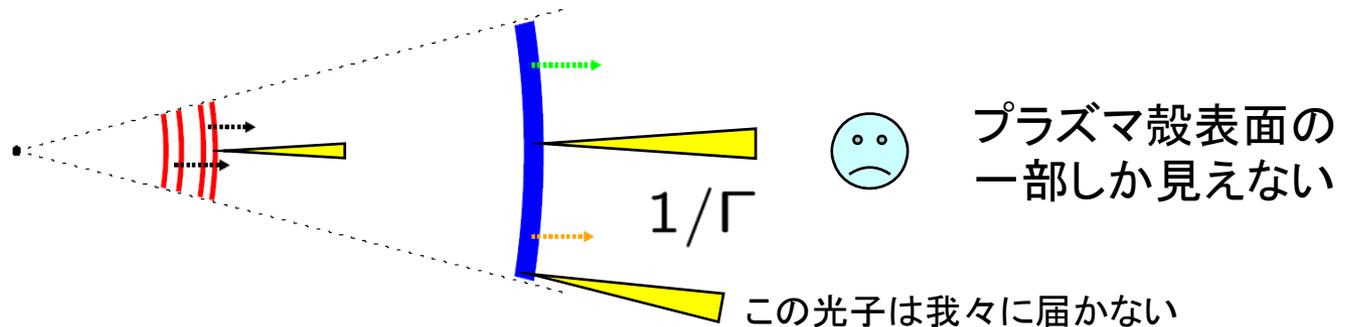
噴き出すプラズマ流は等方的ではなくジェット状であると
考えられている。

そもそもプラズマ流が球対称なのかジェット状なのか直接的には観測できない。

ビーミング効果 (特殊相対論的効果)



$$\Gamma > \theta_j^{-1}$$



なぜジェットであると考えられるのか

$$E_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{53} \text{ erg}, \Gamma \geq 100 \rightarrow \text{Jets}$$

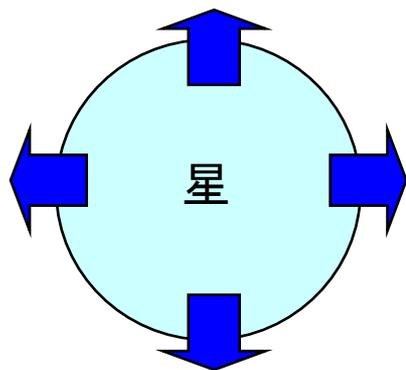
星の崩壊でブラックホールあるいは中性子星
ができたときに開放される重力エネルギー

$$E = G \frac{M_c}{R_c} \simeq 3 \times 10^{53} \text{ erg}$$

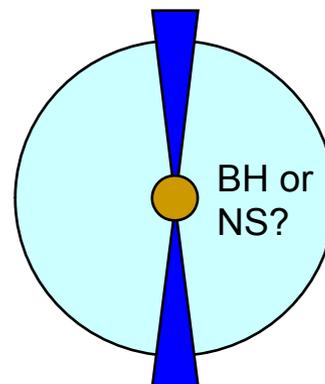
→ エネルギー的にジェットが望ましい。 $E_{\gamma} \sim E_{\gamma, \text{iso}} \theta_j^2 \sim 10^{51} \text{ erg}$

星の静止エネルギー

$$M_{\odot} c^2 \sim 10^{54} \text{ erg}$$



星の物質を球対称
に飛ばそうとすると
フローは必ず非相
対論的になる。
= 超新星爆発

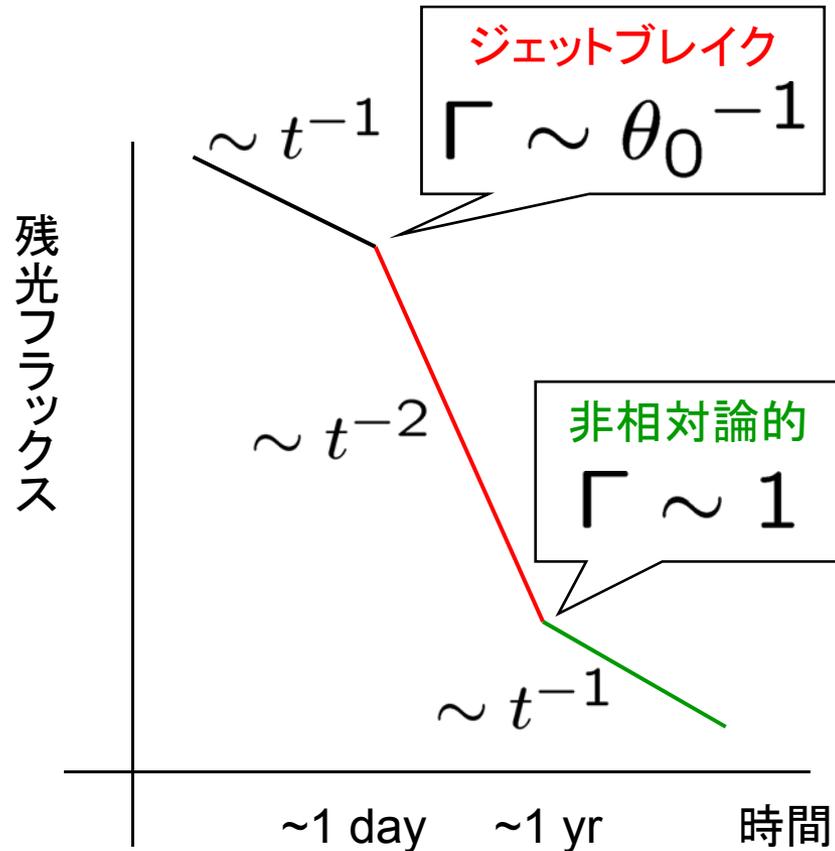
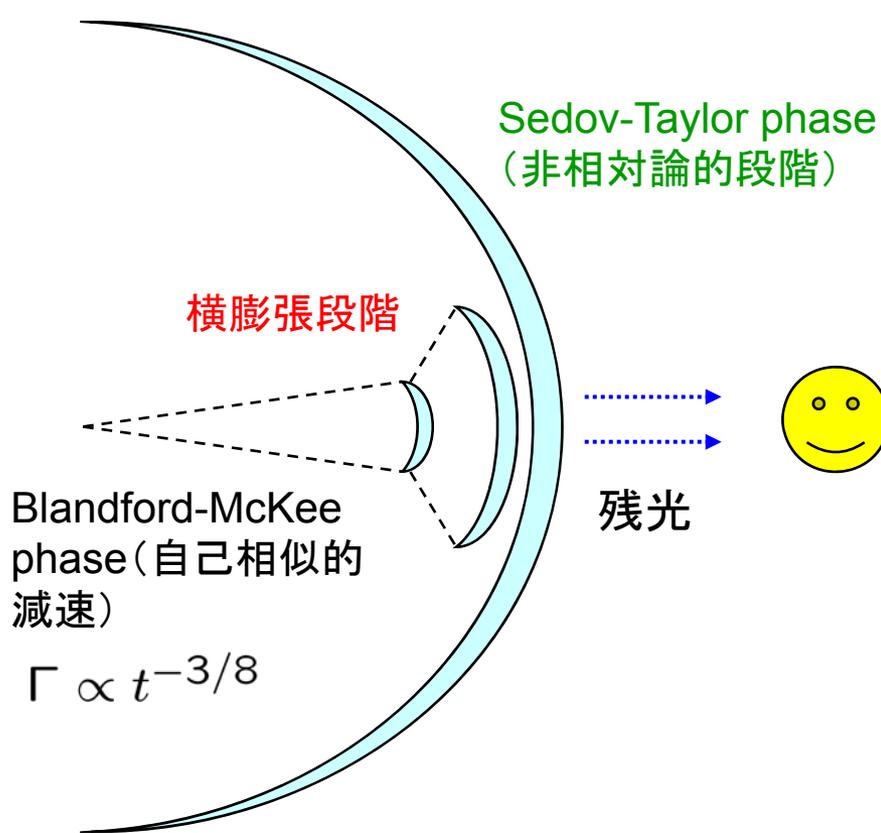


コラプサージェット
モデル

(Woosley 93)

→ 少ない物質をジェット状に飛ばすのが望ましい。 $E_{\gamma} \sim \Gamma (10^{-5} M_{\odot} c^2)$

ジェットブレイク



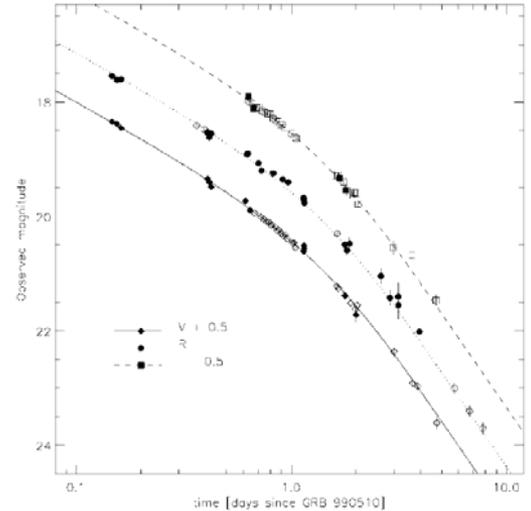
$$\theta \simeq \theta_0 + \frac{c_s \tau}{ct} \approx \theta_0 + \Gamma^{-1}$$

横方向への自由膨張

$$\theta_0 \simeq 0.1 \left(\frac{t_j}{1 \text{ day}} \right)^{3/8} \left(\frac{n}{E_{k, \text{iso}, 52}} \right)^{1/8}$$

典型的な観測結果

(Harrison et al. 99)

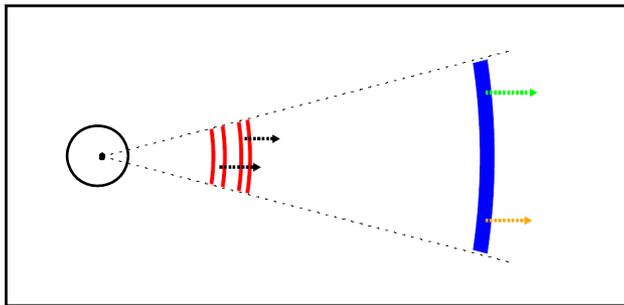


光度 [erg/s]

$\sim 10^{51}$



プロンプト放射
(主にガンマ線)



残光(主に可視光、電波)

ジェット
ブレイク

超新星爆発成分

10^2

10^3

10^4

10^5

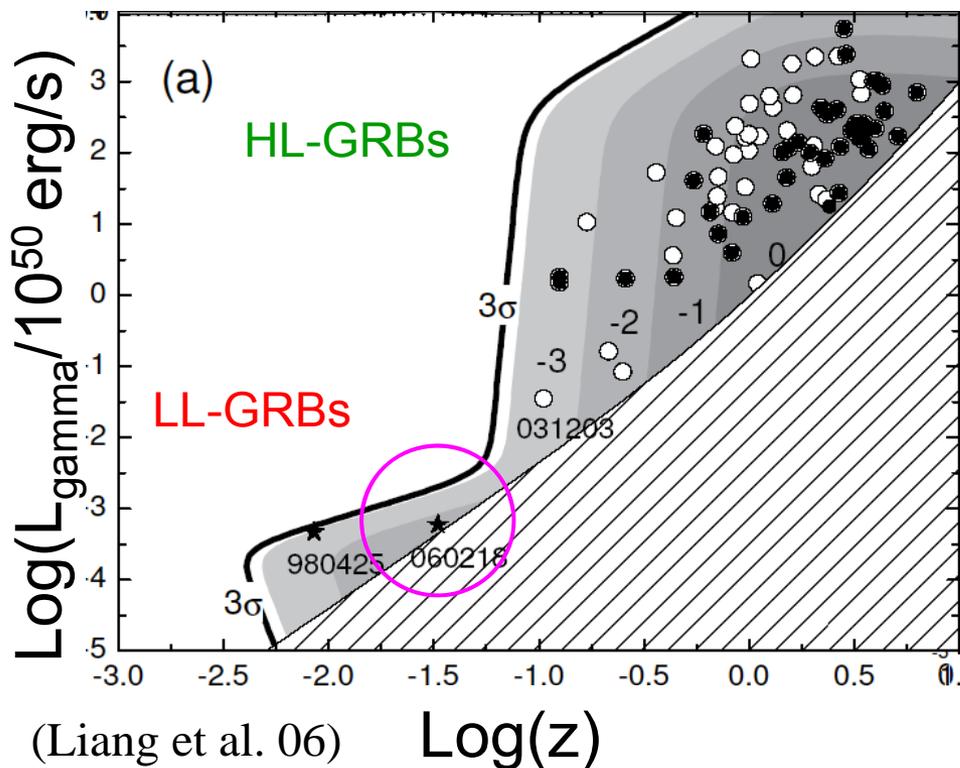
10^6

時間 [s]

最新のSwift衛星が明らかにし始めた時間領域

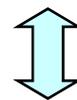
低光度ガンマ線バーストとジェットモデルの危機

低光度ガンマ線バースト (Low-Luminosity GRB)



我々の近傍での発生率

$$R_{\text{HL}} \sim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$



$$R_{\text{LL}} \sim \frac{1 \text{ yr}^{-1}}{(200 \text{ Mpc})^3}$$
$$\sim 10^2 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$

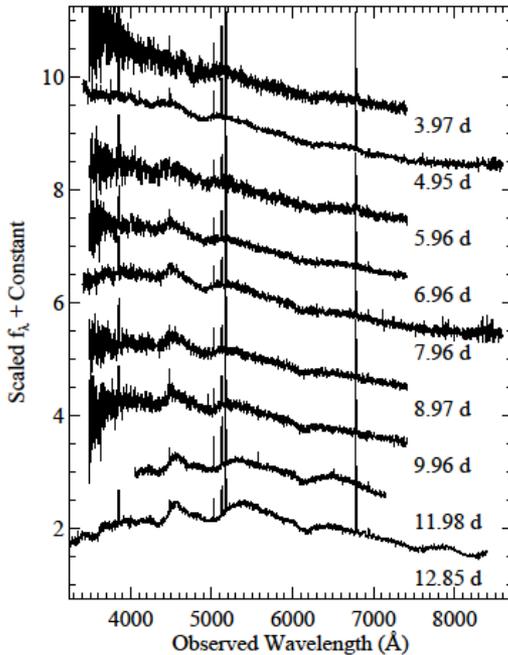
LL-GRB の発生頻度は通常のHL-GRB より高く、別のGRB種族を形成しているのではないか。

(Soderberg et al. 06; Pian et al. 06; Sollerman et al. 06; Stanek et al. 06; Ghisellini et al. 06a; Kaneko et al. 06; Amati et al. 06; Stratta et al. 06; Dai et al. 06; Wang et al. 06; Murase et al. 06; Gupta & Zhang 06)

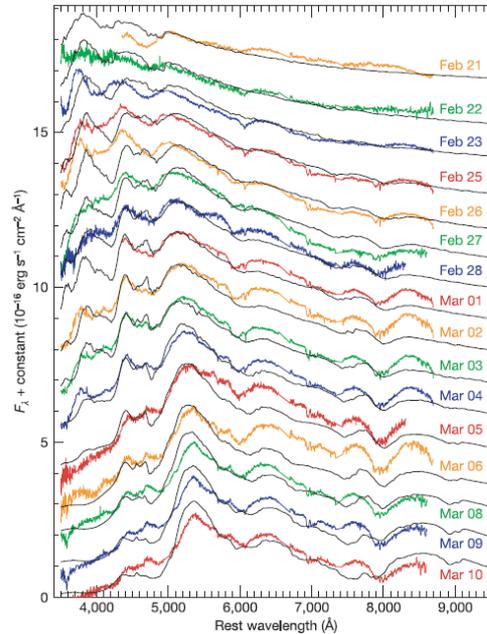
LL-GRB 060218

超新星爆発を伴うガンマ線バースト

数日後の可視光残光のスペクトル変化と
モデルフィッティング



(Modjaz et al. 06)



(Mazzali, Deng, Nomoto et al. 06)

モデルフィッティングの結果

$$E_{k,\text{SN}} \simeq 2 \times 10^{51} \text{ erg}$$

$$M_{\text{ej}} \simeq 2M_{\odot}$$



いままでのSN-GRBs

$$E_{k,\text{SN}} \simeq 3 \times 10^{52} \text{ erg}$$

$$M_{\text{ej}} \simeq 10M_{\odot}$$

親星の質量が小さかった。⇒このバーストの親星はブラックホールでなく中性子星に崩壊したのではないか。

ジェットモデルの危機

外部衝撃波シンクロトンモデル

$$F_{\nu a < \nu < \nu_c} \propto t^{-\frac{3}{4}p + \frac{3}{4}} \quad \Rightarrow \quad p \simeq 2.1$$

$$E_{k,iso} \sim 10^{50} \text{ erg}, \quad n \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

$$\epsilon_e \sim 10^{-2}, \quad \epsilon_B \sim 10^{-3}$$

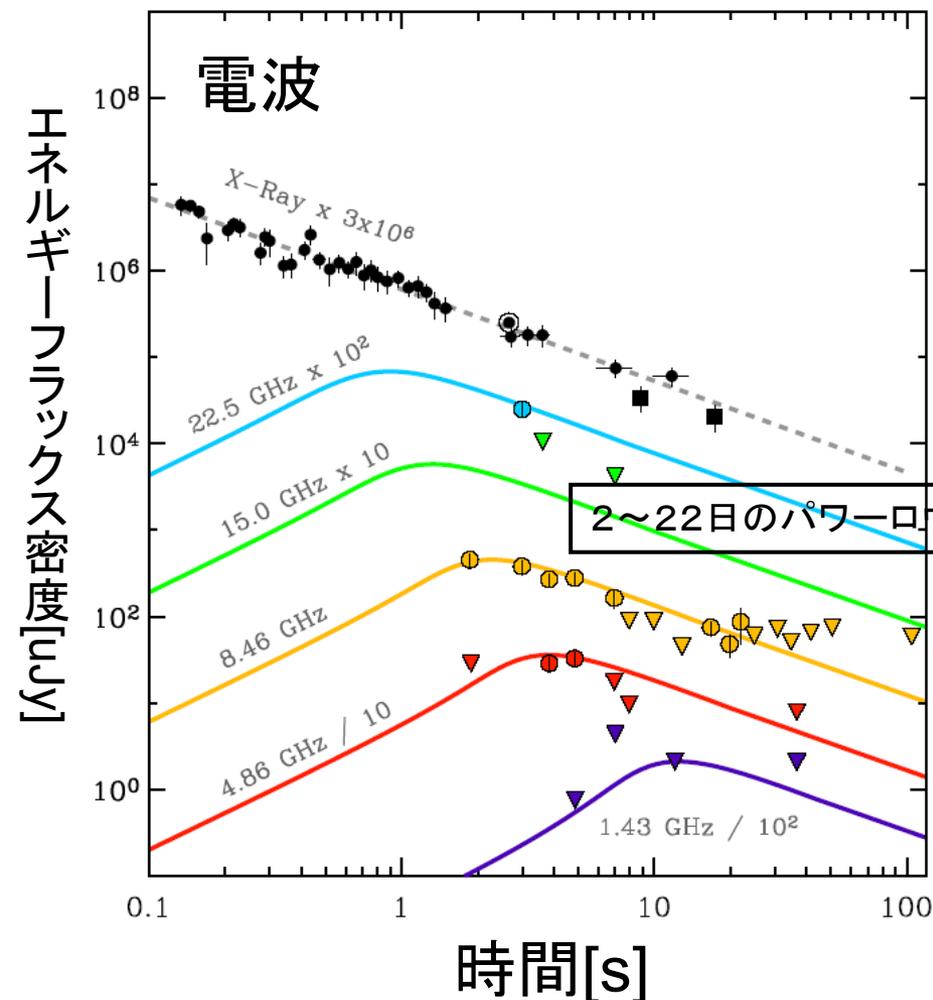
$$\Gamma \approx 2t_d^{-3/8}$$

もしジェットであれば、6日後までに
ジェットブレイクが起こるはずである。

ところが、ブレイクがない！

低光度GRBはジェットではない？

相対論的な球対称アウトフローは可能なのか？



(Soderberg et al. 06;
Fan, Xu & Piran 06)

060218残光のジェットモデル

(Toma et al. 07)

060218の電波残光は外部衝撃波の非相対論的段階だと解釈することができる。

標準モデルの非相対論的段階

(e.g., Livio & Waxman 00)

$$F_{\nu a < \nu < \nu_c} \propto t^{-\frac{3}{2}p + \frac{21}{10}} \quad \Rightarrow \quad p \simeq 2.0$$

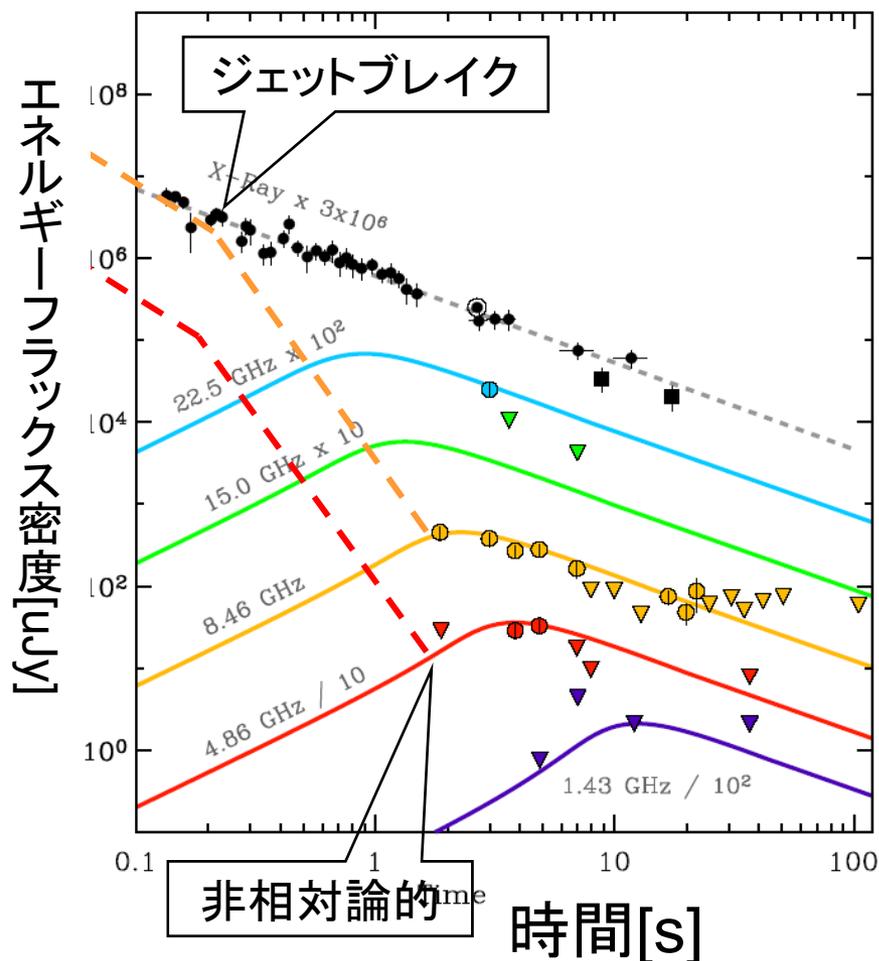
$$E_k \simeq 10^{48} \text{ erg}, \quad n \simeq 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

$$\epsilon_e \simeq 10^{-1}, \quad \epsilon_B \simeq 10^{-1},$$

非相対論的段階へ移行する時間スケール

$$t_s \simeq 2 \times 10^5 \text{ s} \left(\frac{E_{k,48}}{n_2} \right)^{1/3}$$

観測と合う。



可視光の情報から

$$\theta_0 \simeq 0.3, \quad \Gamma_0 \simeq 5$$

まとめ

- ・通常のガンマ線バーストは星の重力崩壊でできたブラックホールが駆動する相対論的ジェットから生じると考えられている。
- ・低光度ガンマ線バースト060218の起源は星の重力崩壊でできた中性子星が駆動する相対論的ジェットで説明できる。

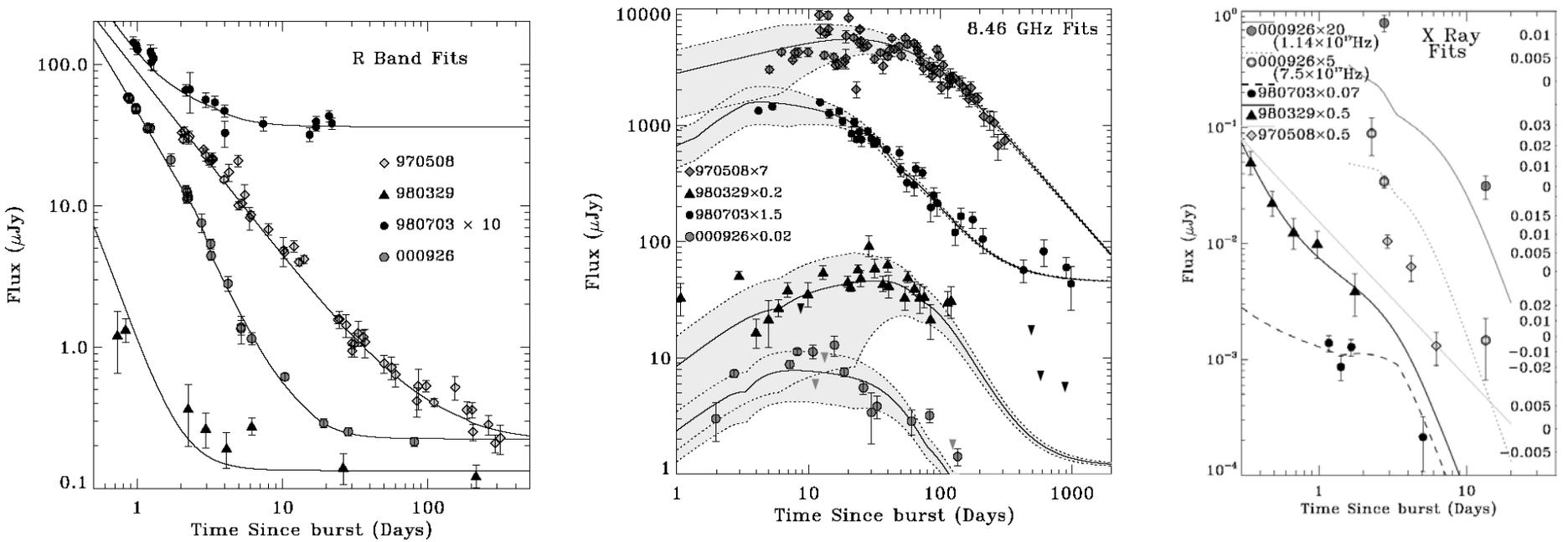
相対論的ジェットは他に活動銀河核、X線星などにも存在し、そのメカニズムは宇宙物理学における大きな謎の一つである。

重力エネルギー(or回転エネルギー)をどのようにして運動エネルギーに転換するのか(少量の物質に与える); 輻射圧? 磁気遠心力? イベントホライズン?

今回の研究で相対論的ジェットはブラックホール特有の現象ではないということが示唆される。



残光のモデルフィッティングの例



GRB	χ^2	dof	t_{cm}^a	t_{jet}	t_{NR}	E^b (t_{cm})	E (1 day)	θ_{jet} (rad)	n (cm^{-3})	$A(V)$ (Host)	p	ϵ_e	ϵ_B (%)
970508	596	257	0.082	183	203	$3.7^{+0.1}_{-0.1}$	1.6	$0.84^{+0.03}_{-0.03}$	$0.20^{+0.01}_{-0.02}$	$0.14^{+0.02}_{-0.02}$	$2.1223^{+0.003}_{-0.0008}$	$0.342^{+0.008}_{-0.01}$	$25.0^{+0.6}_{-2}$
980329	115	90	6.1	0.12	70	126^{+6}_{-6}	170	$0.036^{+0.002}_{-0.004}$	20^{+5}_{-5}	$1.9^{+0.2}_{-0.1}$	$2.88^{+0.1}_{-0.2}$	$0.12^{+0.02}_{-0.02}$	17^{+3}_{-3}
980703	170	147	1.4	3.4	50	$11.8^{+0.8}_{-2}$	13	$0.234^{+0.02}_{-0.007}$	28^{+4}_{-3}	$1.15^{+0.08}_{-0.06}$	$2.54^{+0.04}_{-0.1}$	$0.27^{+0.03}_{-0.03}$	$0.18^{+0.04}_{-0.03}$
000926	138	93	3.4	2.6	79	12^{+2}_{-2}	15	$0.162^{+0.007}_{-0.004}$	16^{+3}_{-3}	$0.022(<0.037)^c$	$2.79^{+0.05}_{-0.04}$	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$	$2.2^{+0.5}_{-0.6}$

1日後の可視光・電波・X線の残光がよく説明できる。(e.g., Yost et al. 03; Panaitescu & Kumar 01)