

GRB 060218 は星の重力崩壊で生まれた 中性子星が駆動するジェットから生じたのか

(*astro-ph/0610867*)

第19回 理論懇シンポジウム 「理論天文学の進歩」
2006年12月25 - 27日 @立教大学

当真 賢二 (京大理)

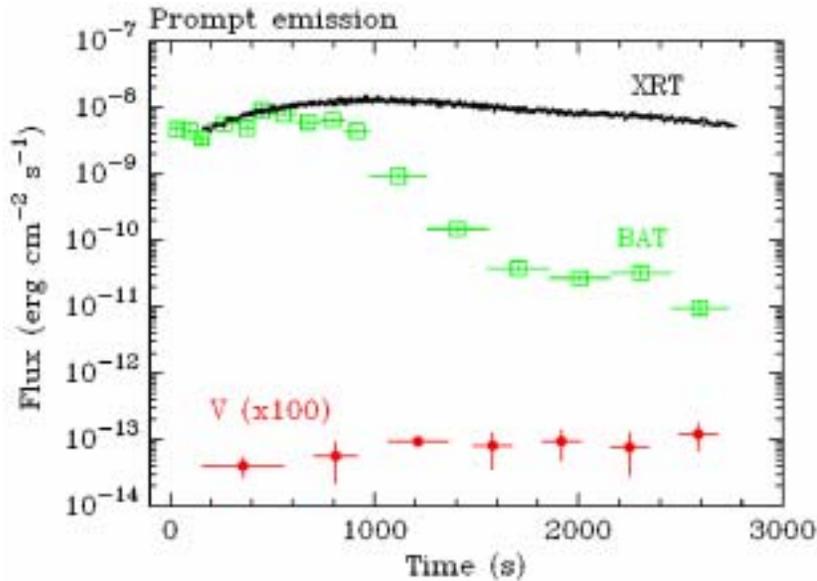
井岡 邦仁 (京大理)

坂本 貴紀 (NASA)

中村 卓史 (京大理)

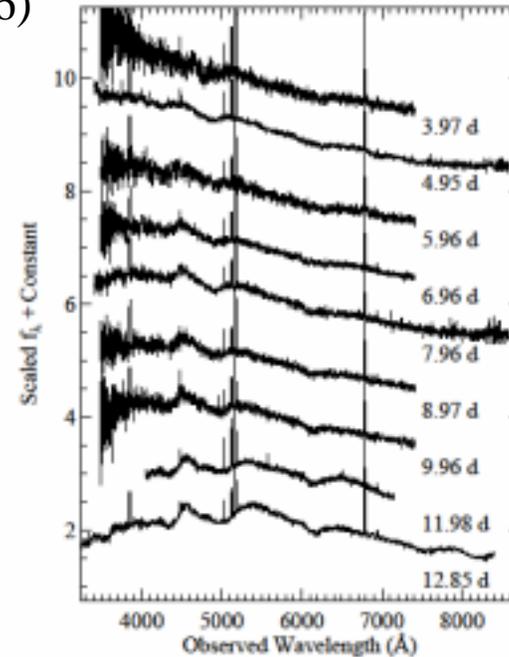
GRB 060218

(Campana et al. 06; Kaneko et al. 06)



- ・2006年2月18日に検出されたバースト
- ・いままでに2番目に近かった ($z = 0.033$)
- ・非常に暗く、長かった
($L_{\gamma, \text{iso}} \sim 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$, $T \sim 10^3 \text{ s}$)
- ・熱的成分が検出された
- ・通常と異なるX線残光

(e.g., Modjaz et al. 06; Pian et al. 06; Mirabal et al. 06)



・可視残光から超新星成分が検出された！
起源は星の崩壊か。

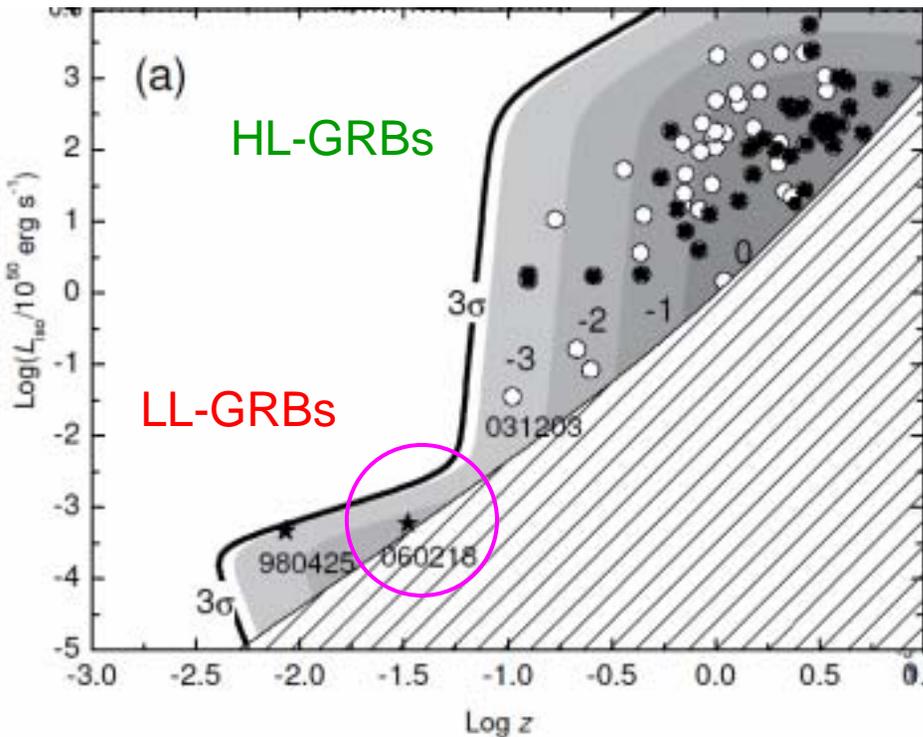
・詳しい解析から (Mazzali, Deng, Nomoto et al. 06)

$$E_{k, \text{SN}} \simeq 10^{51} \text{ erg}, \quad M_{\text{ej}} \simeq 2M_{\odot}$$

ブラックホールでなく中性子星ができた(?)

Low-luminosity GRBs

(Liang et al. 06; Soderberg et al. 06; Pian et al. 06; Sollerman et al. 06)



LL-GRB の発生頻度は
HL-GRB より高い可能性が
ある！



LL-GRB は通常の HL-GRB
とは異なる種族であるかもし
れない。

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

$$R_{HL, \text{ local}} \sim 1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \quad (\text{e.g., Guetta et al. 04})$$

LL-GRB 060218 の電波残光

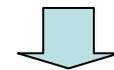
(Soderberg et al. 06; Fan, Xu & Piran 06)

標準的なシンクロトン衝撃波モデル

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

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

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

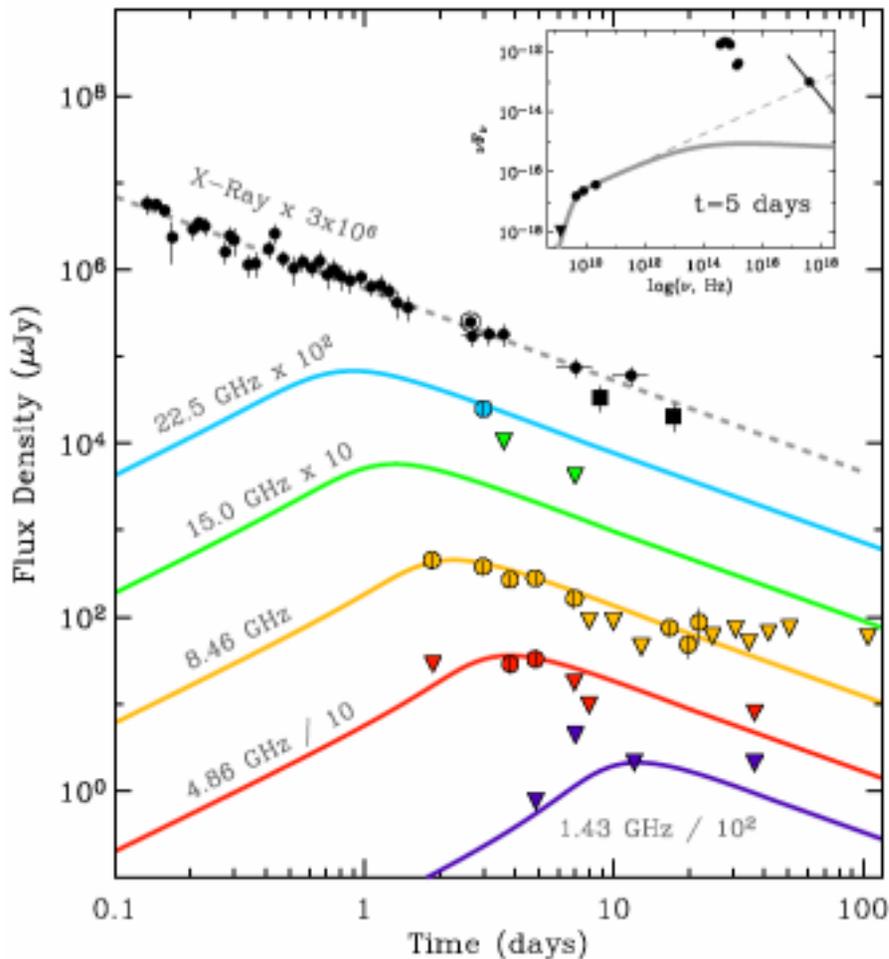


$$\Gamma \approx 2t_d^{-3/8}$$

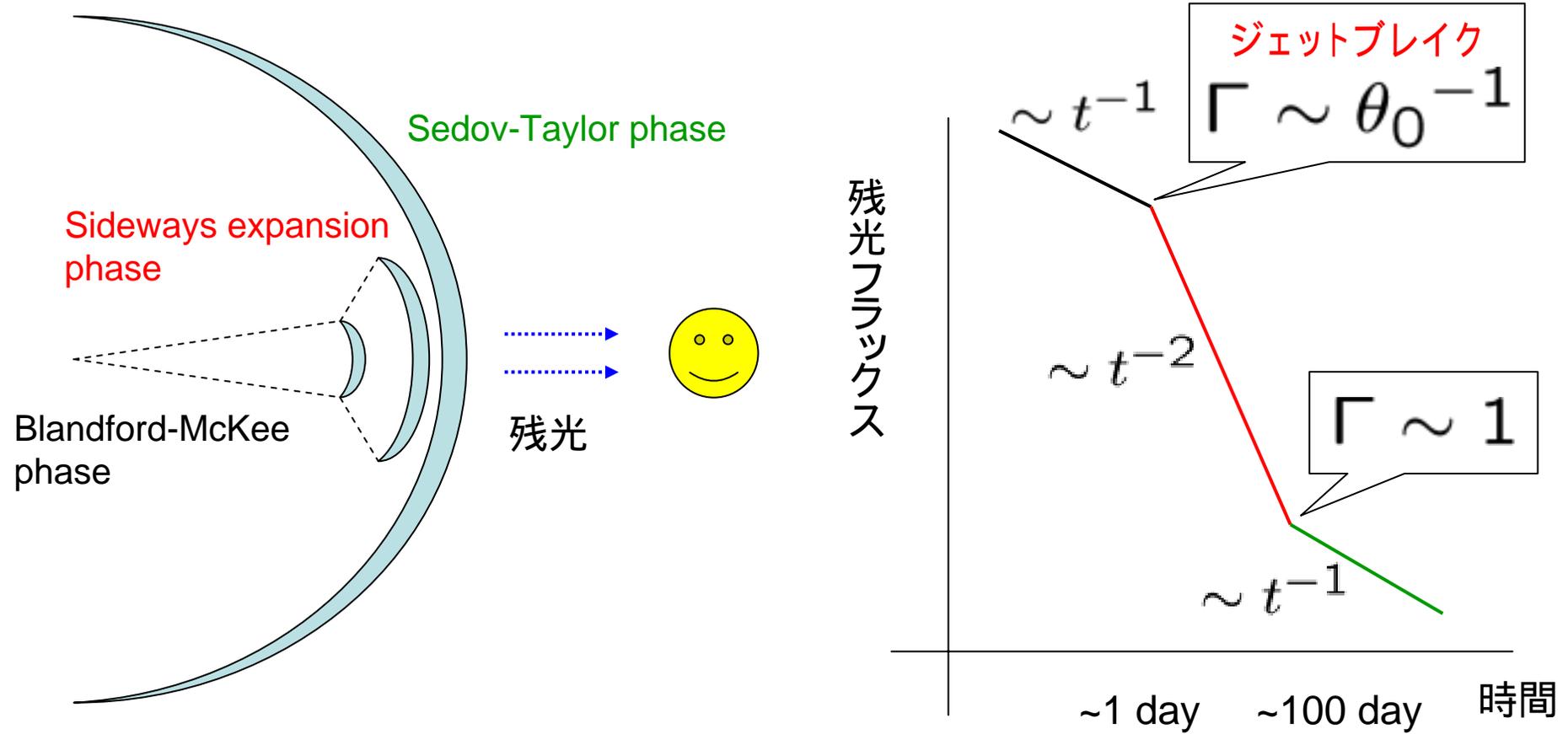
もしジェットであれば、6日後までにライトカーブが折れ曲がるはず(ジェットブレイク)

しかし、ジェットブレイクがない！

ジェットではなかったのか？



ジェットブレイク



残光のライトカーブに折れ曲がり観測される。
ジェットである。

LL-GRB collapsar jet ? (1/2)

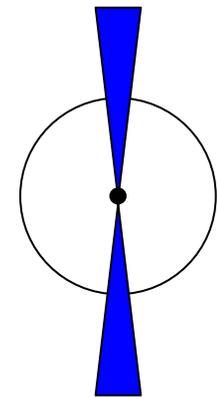
SNe	LL-GRBs	HL-GRBs
Spherical outflow	Spherical outflow ???	Jet
Non-relativistic	Mildly-relativistic	Highly-relativistic

球対称爆発ですべての物質を相対論的
することはできない。

コラプサーモデル

解放される重力エネルギー: $G \frac{M_c^2}{R_b} \sim 10^{53}$ erg

星の静止エネルギー: $M c^2 \sim 10^{54}$ erg



新種族 LL-GRBs は全く別の爆発機構をもつのか??

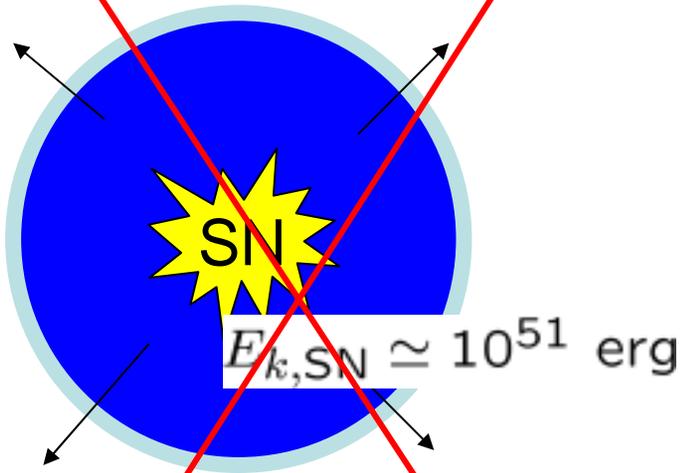
(Soderberg et al. 06; Fan, Xu & Piran 06; Liang et al. 06; Wang et al. 06)

LL-GRB collapsar jet ? (2/2)

(Gorosabel et al. 06)

SN shock が密度の薄い星の外層を掃いて
球対称の相対論的フロー成分ができる？

(Soderberg et al. 06; Campana et al. 06)

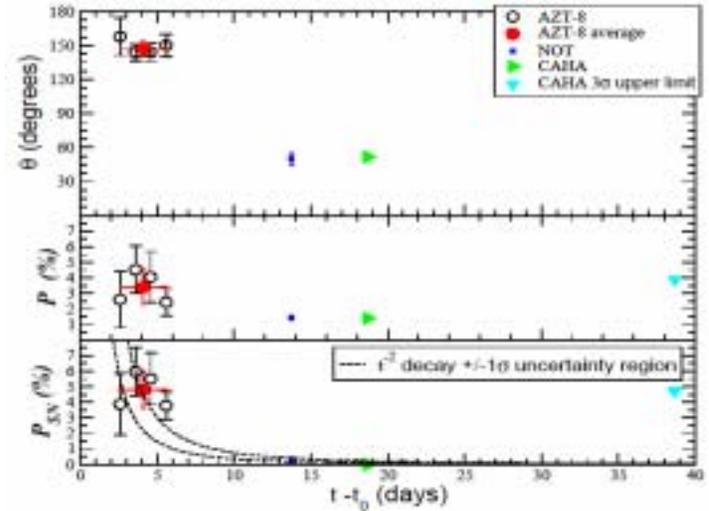


ガンマ線、残光のエネルギー

$$E_{\gamma,iso}, E_{k,iso} \simeq 10^{50} \text{ erg}$$

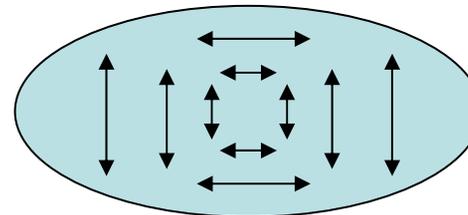
をもつ相対論的成分は作れない！

(Tan, Matzner, & McKee 01)



超新星成分から偏光が検出
されていた！！

photosphere



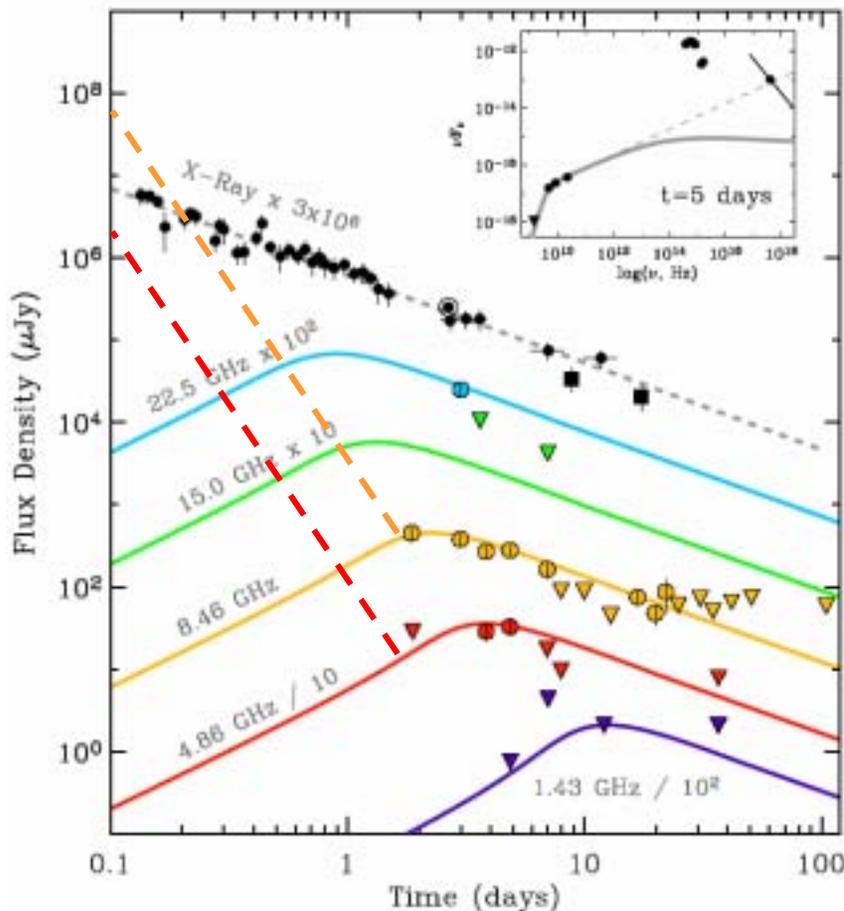
ジェットを強く
示唆する。

球対称でなければ正味の偏光が残る

ジェットであり得る (1/2)

(Toma et al., astro-ph/0610867)

GRB 060218 の電波残光はジェットブレイク後の非相対論的段階であると解釈できる！



標準シンクロトン衝撃波モデルでの非相対論的段階 (e.g., Livio & Waxman 00)

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

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

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

非相対論的段階に移行するタイムスケールは

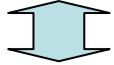
$$\beta = \frac{2}{5c} \left(\frac{E_k}{nm_{pt}^3} \right)^{1/5} \sim 1$$

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

観測と合う。

ジェットであり得る (2/2)

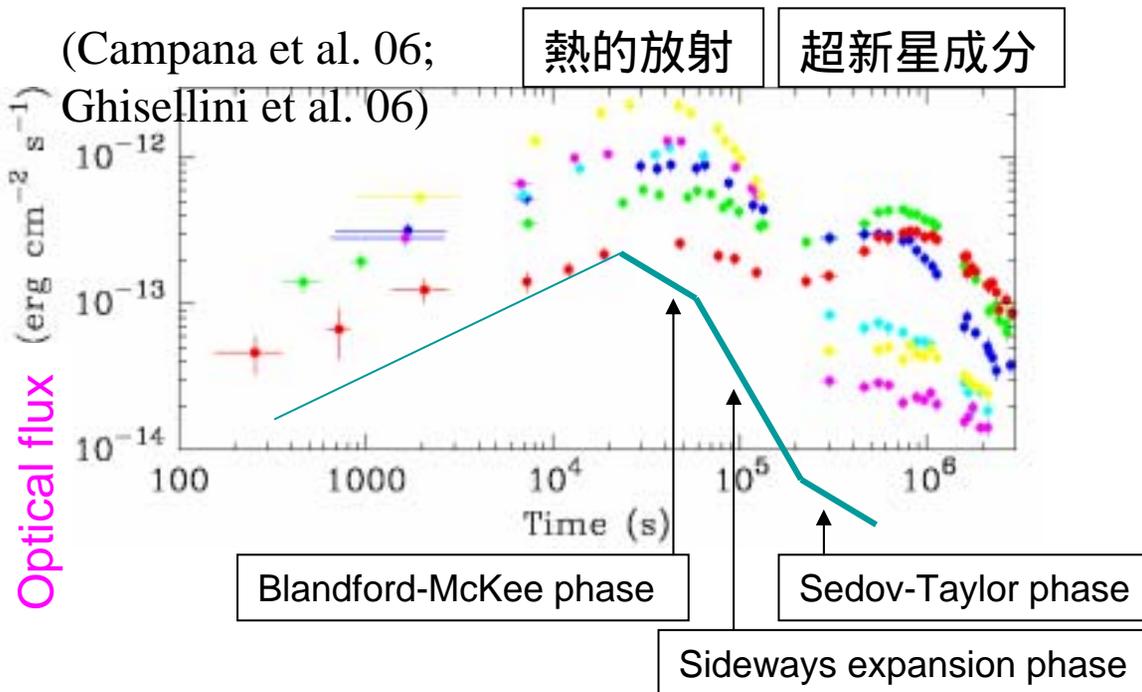
$$E_{\gamma,iso} \simeq 6 \times 10^{49} \text{ erg}$$



$$E_{k,iso} = 2E_k/\theta_0^2 \simeq 4 \times 10^{48} \theta_0^{-2} \text{ erg.}$$

現実的なガンマ線放射効率を得るには、 $\theta_0 < 0.3$ が望ましい。

一方で、あまりに θ_0 が小さいと、前の時刻で可視残光が明るくなりすぎて、観測と矛盾してしまう。



$$\theta_0 \left(\frac{t_s}{t_j} \right)^{1/2} \simeq 1.$$

$$\Gamma_0 \left(\frac{t_j}{t_{dec}} \right)^{-3/8} \simeq \theta_0^{-1}.$$



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

観測を説明するジェットモデル

コラプサーモデル (1/2)

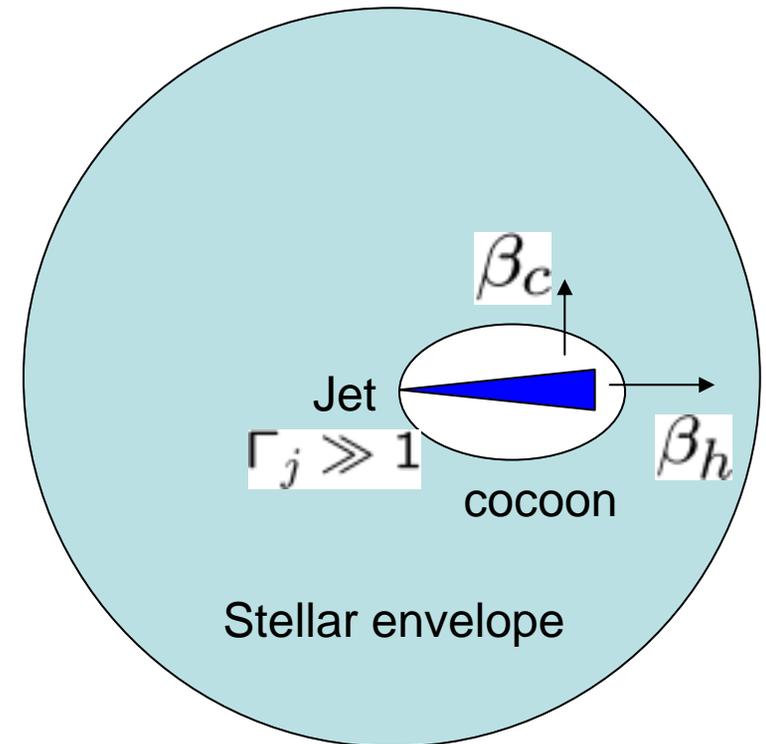
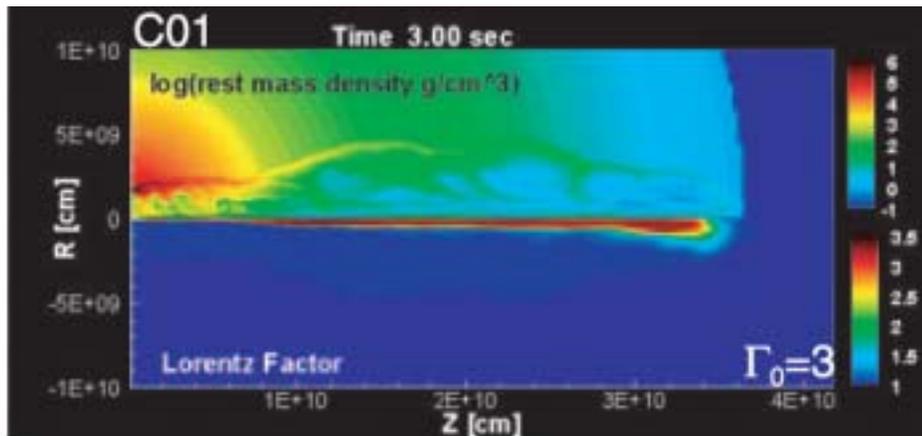
$$\theta_0 \simeq 0.3, L_j \sim 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$$



典型的なGRB

$$\theta_0 \sim 0.1$$
$$L_j \sim 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$$

という広く弱いジェットが星を突き破ることができるのか？



(e.g., Mizuta et al. 06; Umeda et al. 05;
Zhang et al. 04,03; Aloy et al. 00)

相対論的なジェットが星を突き破る条件:

(Matzner 03)

$$\beta_h > \beta_c$$

コラプサーモデル (2/2)

圧力のつりあい

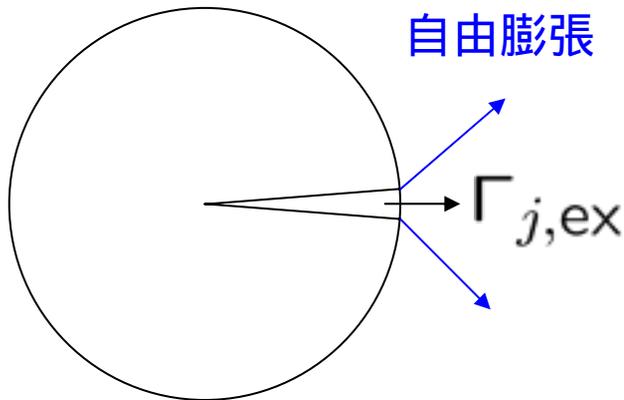
縦方向: $w_j \Gamma_j^2 \beta_j^2 \left(\simeq \frac{L_j}{\pi r^2 \theta^2 c} \right) = \rho_a c^2 \beta_h^2$

横方向: $p_c \left(\sim \frac{E_{in}}{3V_c} \right) = \rho_a c^2 \beta_c^2$

ブレイクアウト時 ($r = R$)

$$\theta_{br} < 0.03 \left(\frac{L_{j,45}}{R_{11}^2 \rho_a} \right)^{1/6}$$

Hot jet である！



$$\theta_0 \sim \Gamma_{j,ex}^{-1},$$

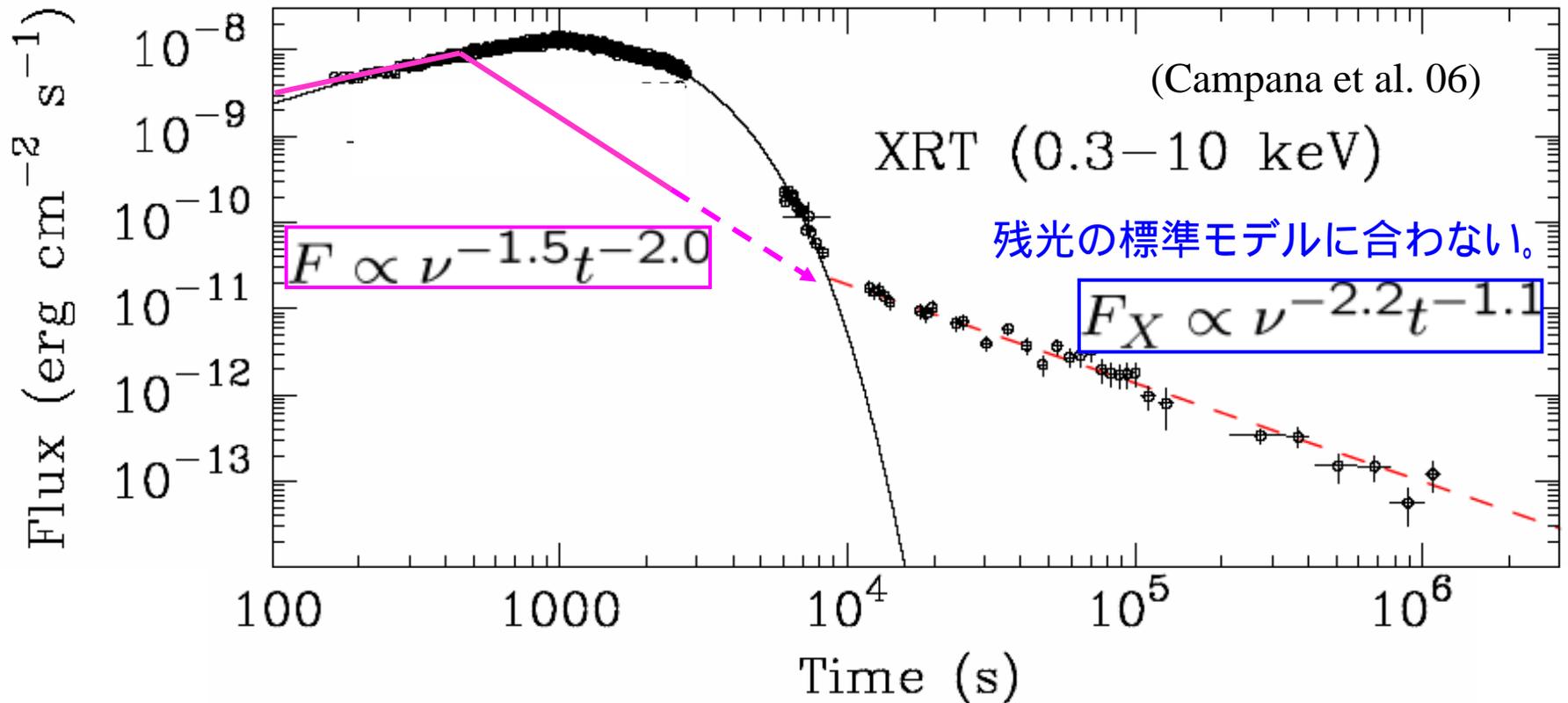
⇒ $\Gamma_{j,ex} \sim 3$ であればよい。

星内で熱エネルギーが卓越していれば、ジェットは星外で自由膨張し、広い開角を得ることができる！

⇒ GRB 060218 はコラプサージェットモデルで説明できる！

プロンプト放射の非熱的成分

GRB 060218 のプロンプト放射の観測データを独自に解析した。



プロンプト放射が滑らかに10日以上も続いている？

通常と異なる中心エンジンを示唆。中性子星か？

$$B \sim 10^{16} \text{ G}$$
$$P \sim 10(t/\tau)^{1/2} \text{ ms}$$

まとめ

- ・ LL-GRB は通常の HL-GRB より発生頻度が高い可能性があり、別の種族であるかもしれない。
- ・ LL-GRB 060218 は通常の HL-GRB と同様にコラプサージェットモデルで説明することができることを示した。
- ・ 独自にプロンプト放射のデータ解析を行い、それが通常の HL-GRB と異なり、滑らかに10日以上も続いているという示唆を得た。



LL-GRBs = 中性子星が駆動するコラプサージェット
HL-GRBs = ブラックホールが駆動するコラプサージェット

- ・ (マグネターによる?) プロンプト放射機構は明らかでない。
通常の GRB の放射機構の解明にも役立つかもしれない。