

HETE-2 衛星と Fermi 衛星を用いたガンマ線バーストのスペクトラルラグの研究



東京工業大学
河合研究室
有元誠



2009/03/17

博士論文発表会@愛媛大学

OUTLINE

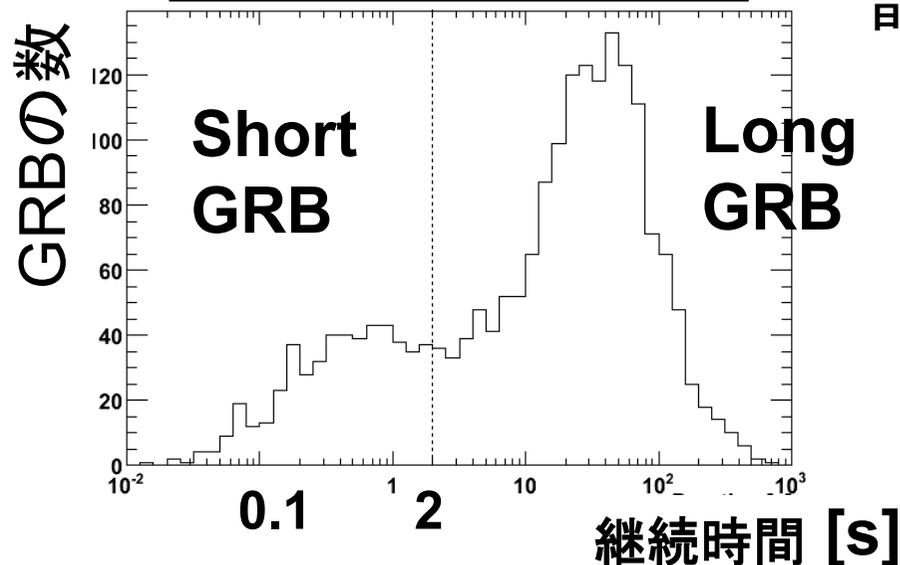
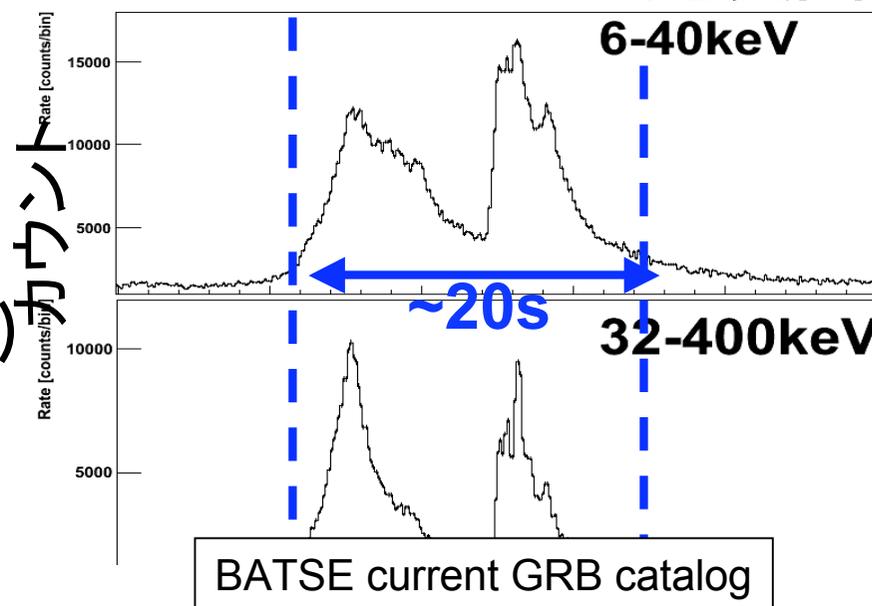
- Spectral lagとは？
- HETE-2衛星による観測(X線帯域)
- Fermi衛星による観測(ガンマ線帯域)
- まとめ

ガンマ線バースト (GRB) とは？

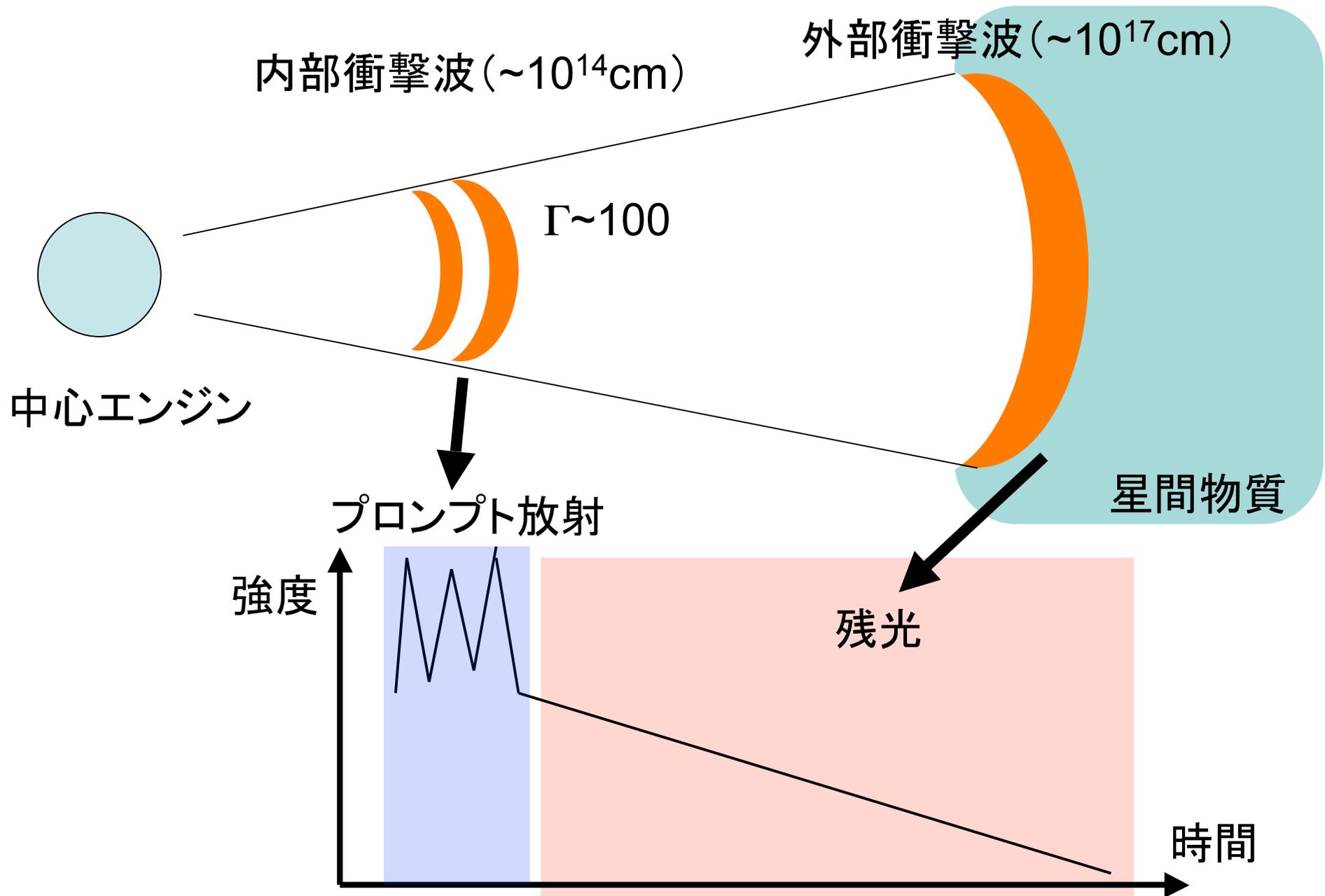
- ・ 宇宙の遠方 (~100億光年)
- ・ 継続時間：数s ~数10s
- ・ keVからMeVの放射
- ・ 全天で最大の爆発現象
~ 10^{53} erg (等方放射を仮定)
= 太陽静止質量の~1/10

- ・ 時間が経つほど Soft に
 - **Hard-to-soft evolution**
- ・ エネルギー低→継続時間大 (Fenimore et al. 1995)
- ・ Short GRB と long GRB
- ・ 本体の放射のあと残光を伴う (こともある)

GRB 030329の光度曲線



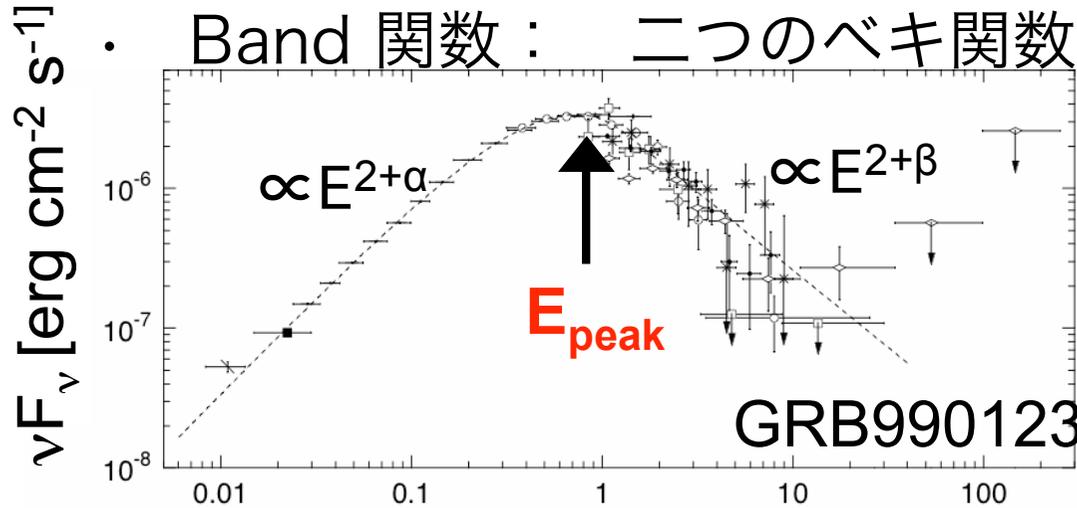
ガンマ線バーストのモデル



GRBのスペクトル

GRBのプロンプト放射のスペクトル: Band 関数で良く合う

- Band 関数: 二つのベキ関数を滑らかに繋いだもの

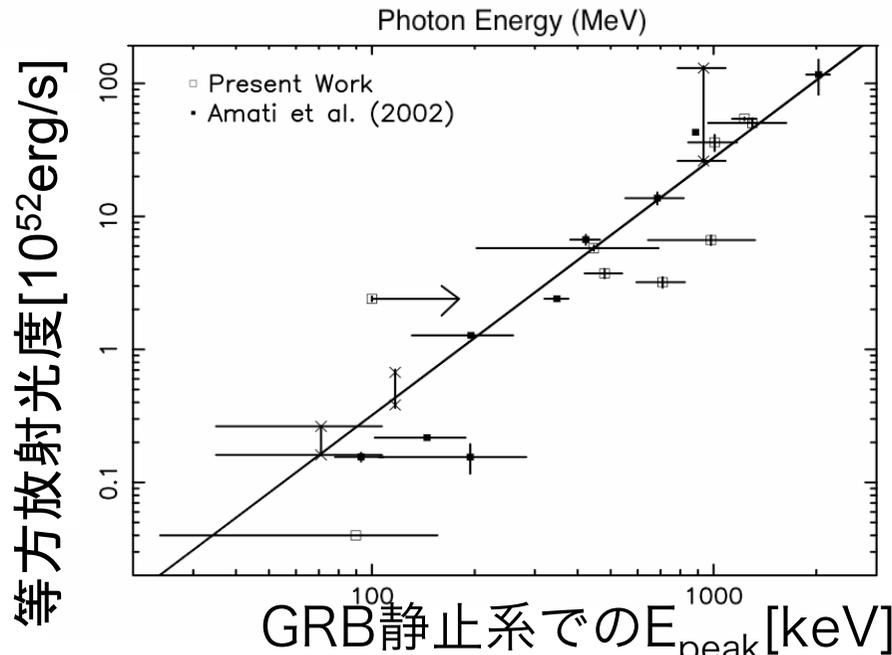


低エネルギー光子指数: α
 高エネルギー光子指数: β

Typical α : ~ -1

Typical β : ~ -2.5

(Preece 1998)



光度と E_{peak} の間に相関

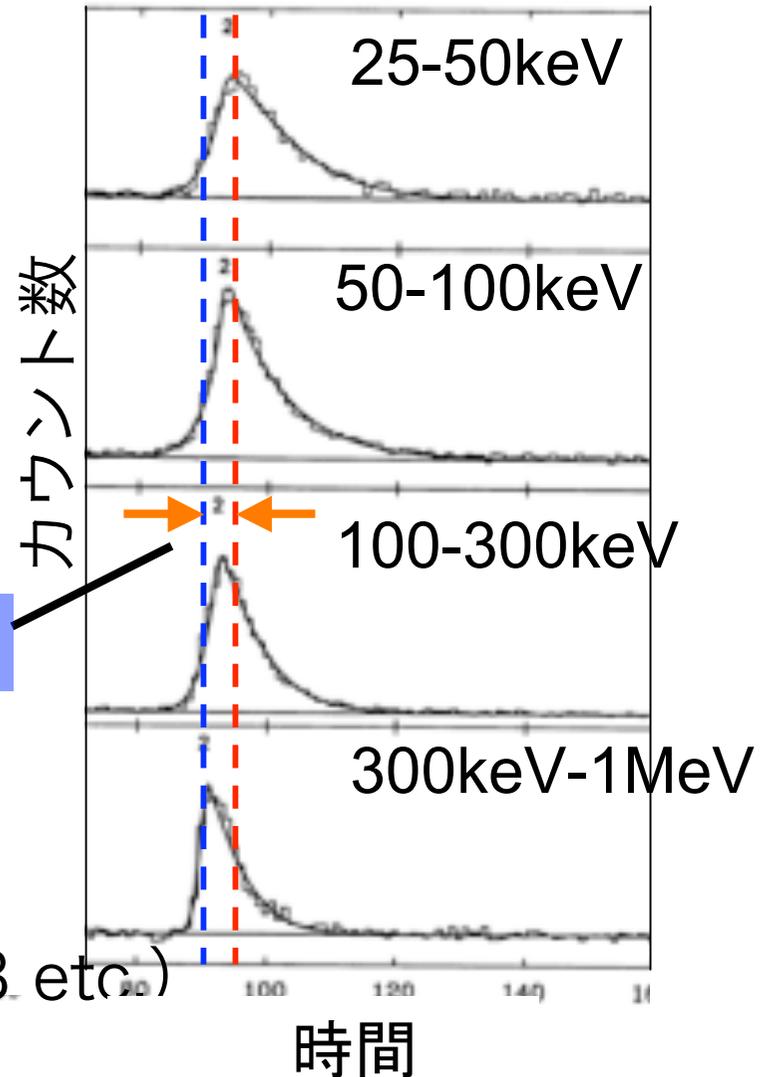
$$L_{iso} \propto E_{peak}^{1.8}$$

→ Yonetoku 関係

ガンマ線バーストの Spectral lag

BATSE検出器 (CGRO衛星)
で捉えたGRB

- ガンマ線バースト (GRB) のプロンプト放射に注目
- 高エネルギーの放射が低エネルギーの放射に対して先行 (Norris et al. 1996 etc)



相対論的な内部衝撃波

Spectral lag

- ◆ 幾何学的効果?
(Lu et al. 2006 etc.)
- ◆ 衝撃波の発展による効果?
(Daigne & Mochkovitch 2003 etc.)

ビーミング効果：

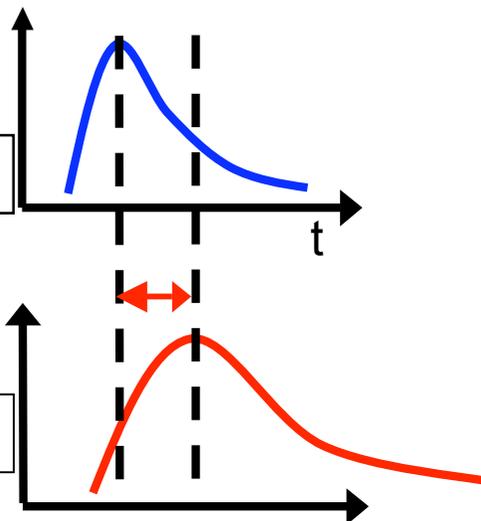
正面 ⇒ ビーミング大 ⇒ E 大

オフセット ⇒ ビーミング小 ⇒ E 小

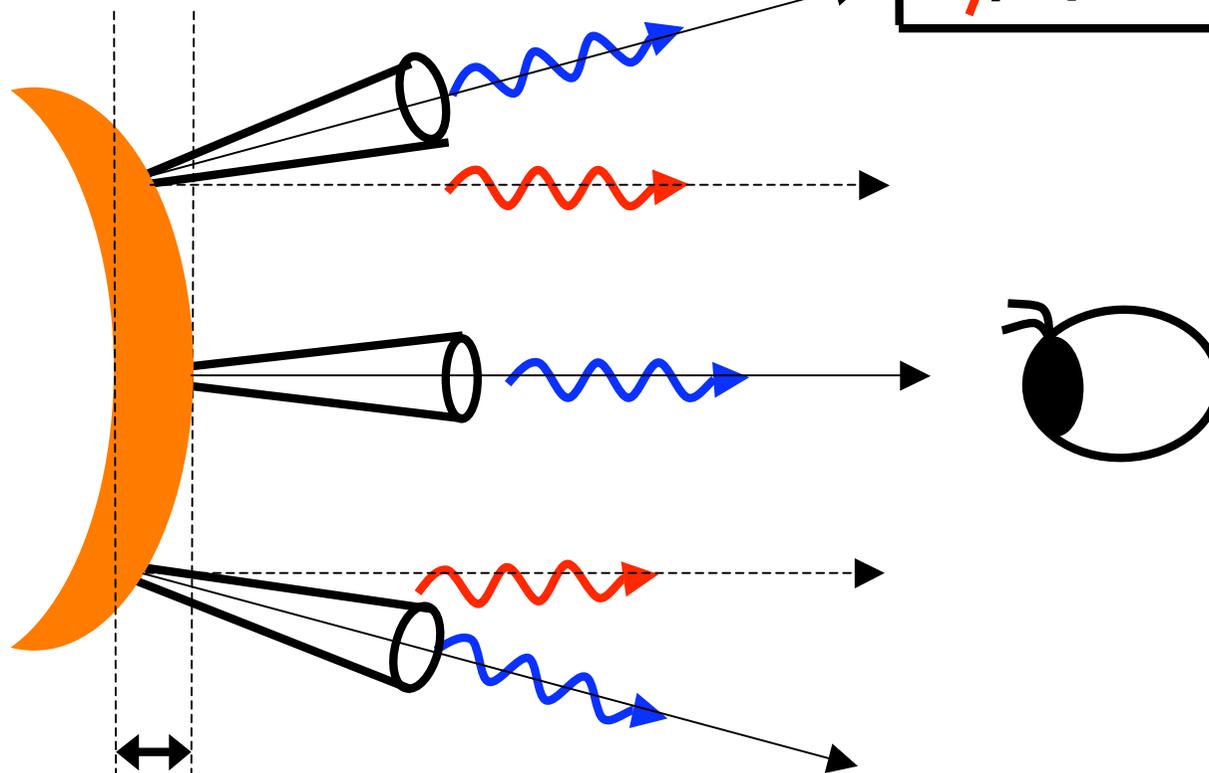
⇒ 幾何学的効果
(Curvature effect)

高エネルギー

低エネルギー

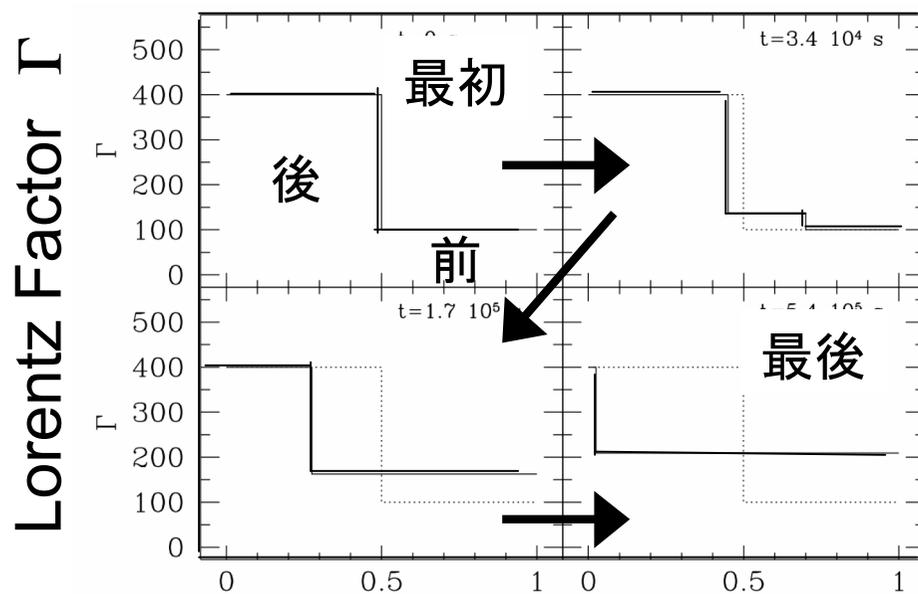


相対論的ビーミング
開口角： $\theta \sim 1/\Gamma$

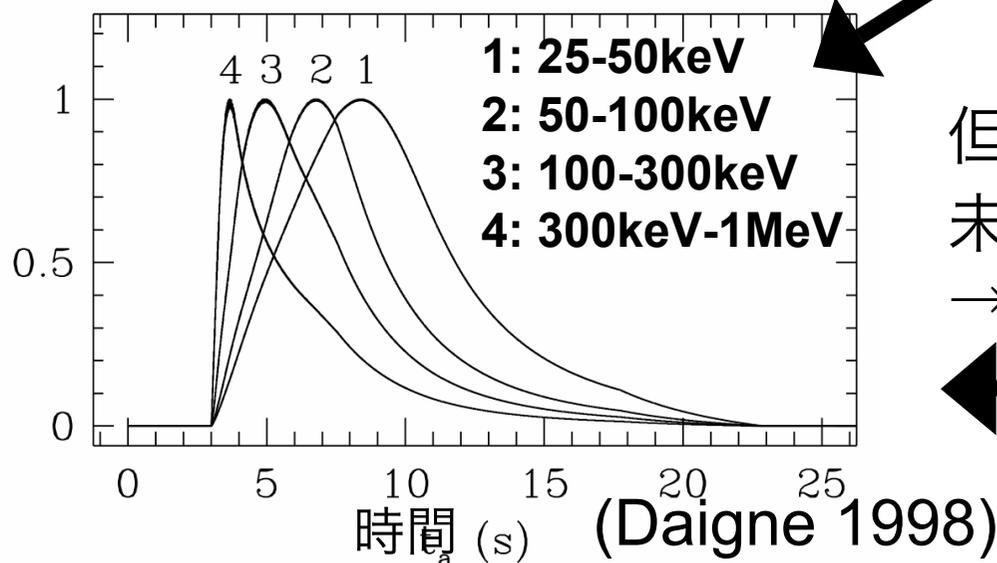
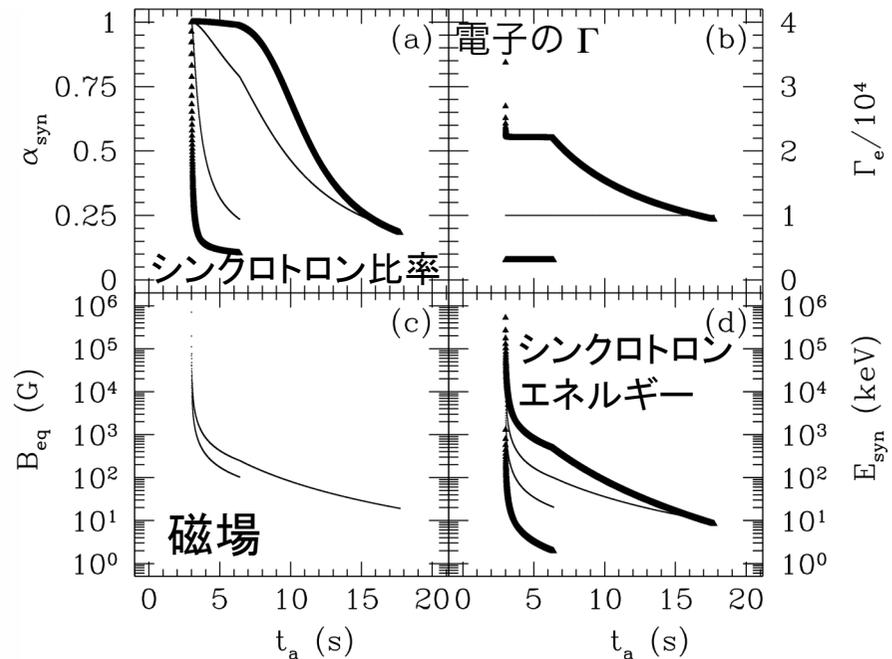


衝撃波の発展のスケール ⇒ シェルを横切る時間
(Hydrodynamical effect) (Next slide)

Hydrodynamical effect



ある Γ の質量/総質量



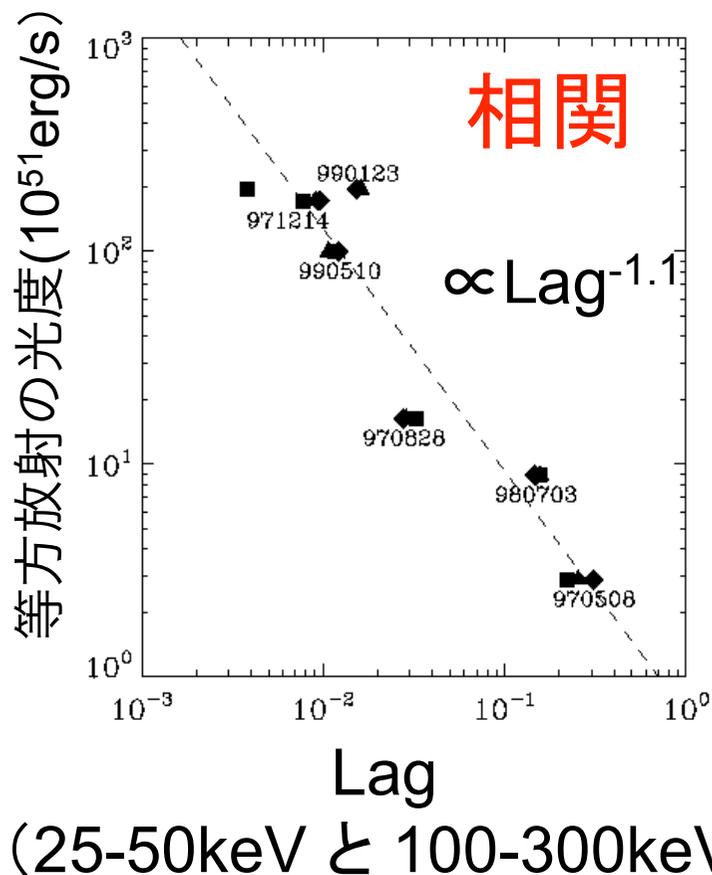
但し**本当の**シェルの Γ 分布は未知

→モデルにかなり依存

幾何学的効果は比較的シンプル

これまでの観測 (1)

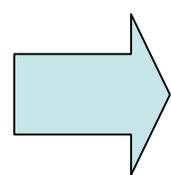
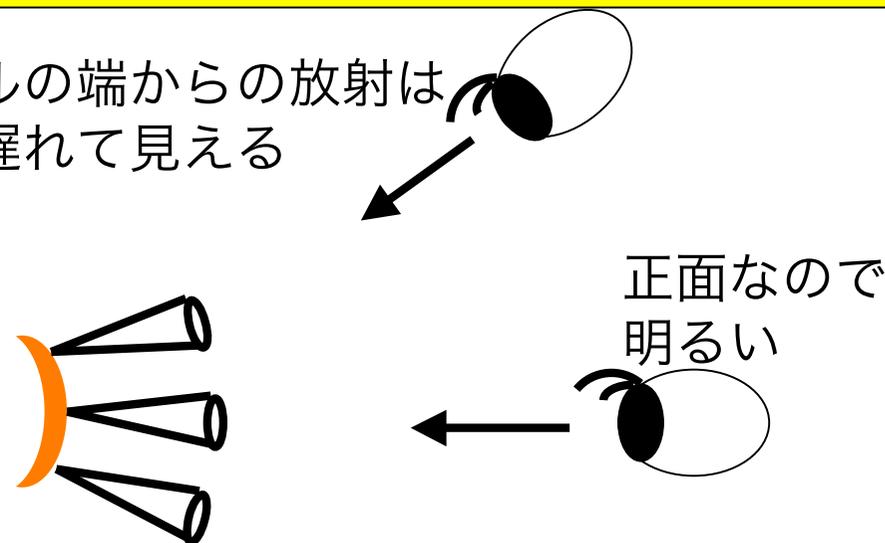
-BATSEによる観測 (25keV - 1MeV)



-パルス全てで相関を取って lag を評価 (Norris et al. 2000)

ジェットの見込み角が変わることで説明可(幾何学効果: loka et al. 2001)

シェルの端からの放射はより遅れて見える

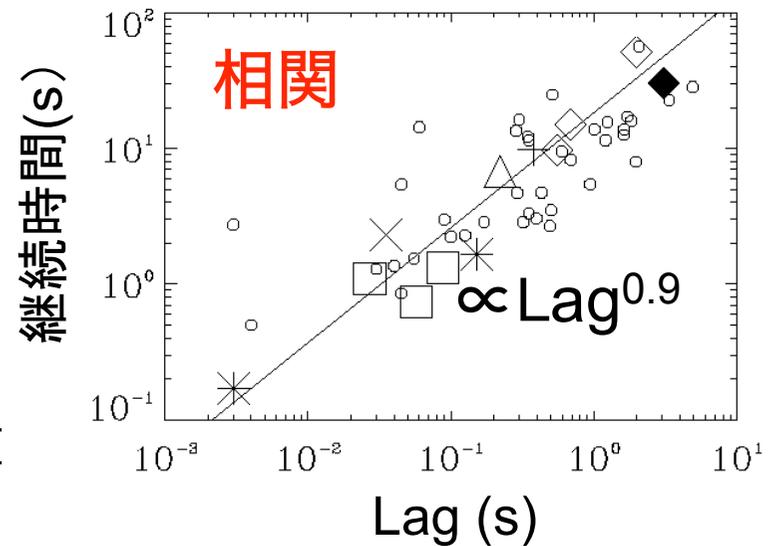
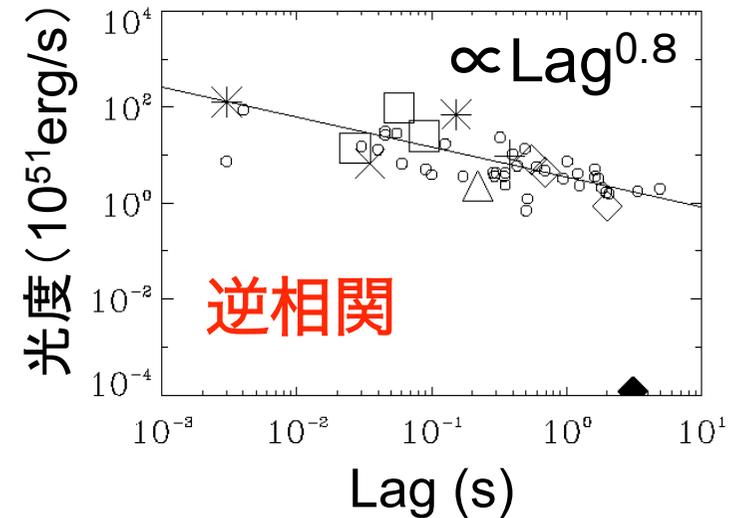
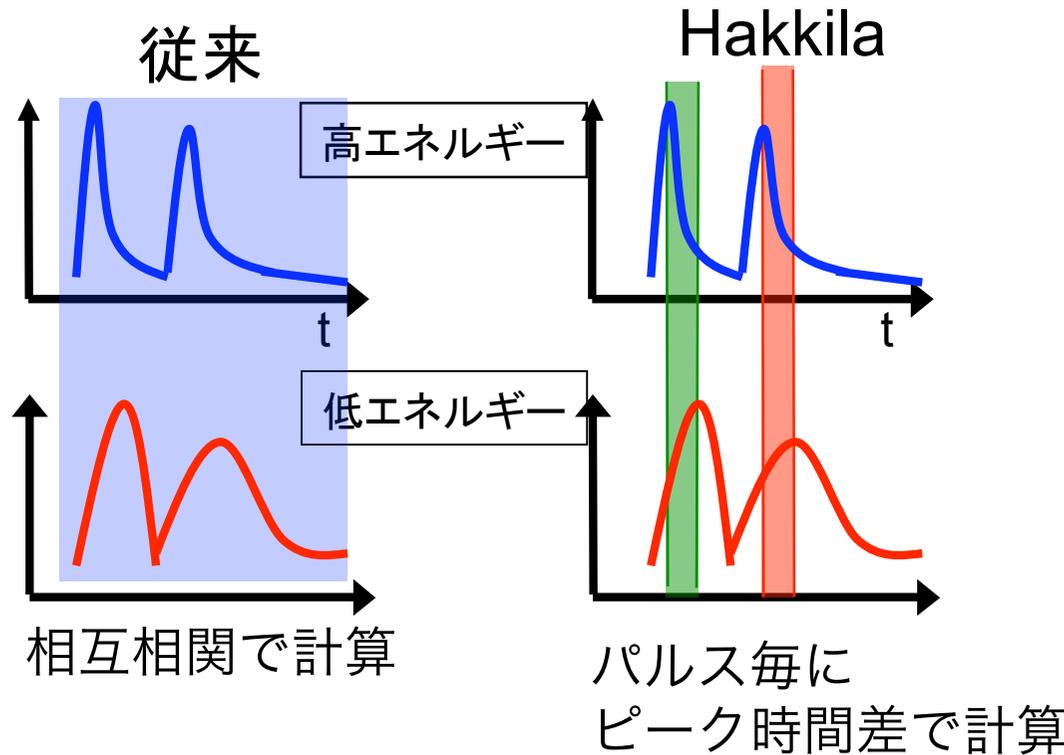


Lagさえ分かれば距離が決まる!?
(残光観測なしでプロンプト放射だけでよい)

これまでの観測 (2)

-パルスそれぞれのLagを評価:
(Hakkila et al. 2008)

Lag = ピークからピークまでの時間差

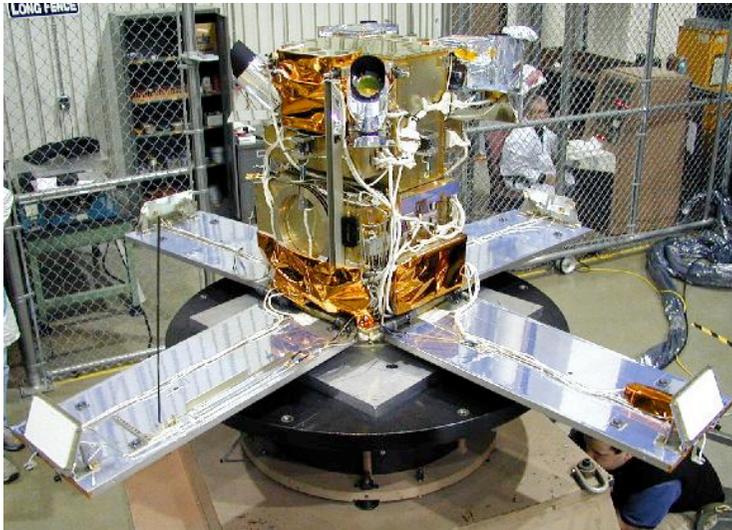


25-50 keV と 100-300 keV

Lagはバースト全体というより、
一つ一つのパルスに固有の現象

HETE-2による研究

- 2000 - 2006年打ち上げ

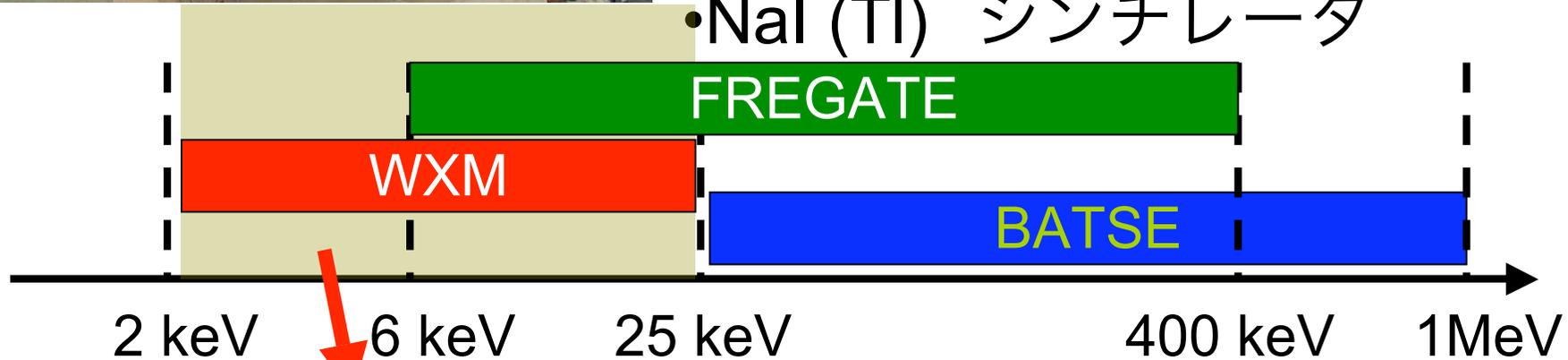


WXM (Wide-field X-ray Monitor)

- 2-25 keV
- Coded mask を使った位置決め

FREGATE (FREnch GAMMA TElescope)

- 6-400 keV
- NaI (TI) シンチレータ



BATSE (25keV-1MeV) より低いエネルギー
(2-25 keV) でLagの研究が可能

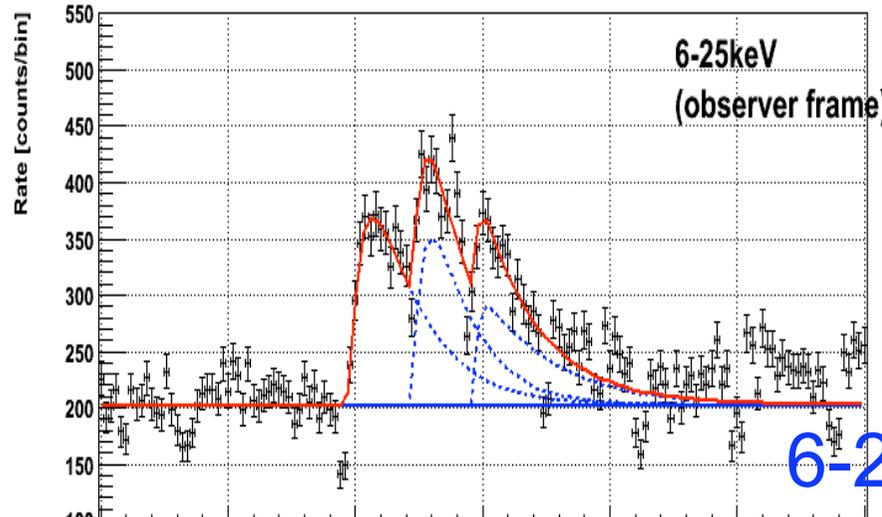
本論文の狙い

- Lag をGRBの距離指標として用いる事が可能か？
- 個々のGRBの Lag は、幾何学的モデルで説明可能か？

パルスフィッティング(Lag計算)

GRB050408

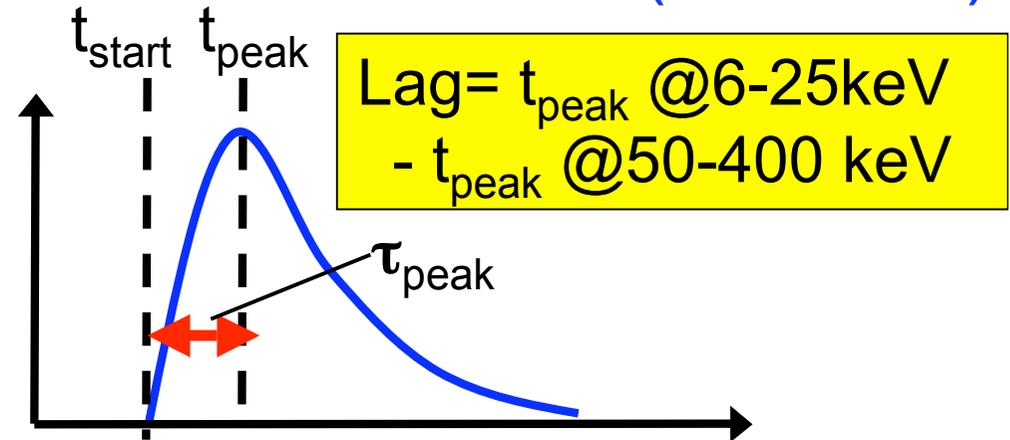
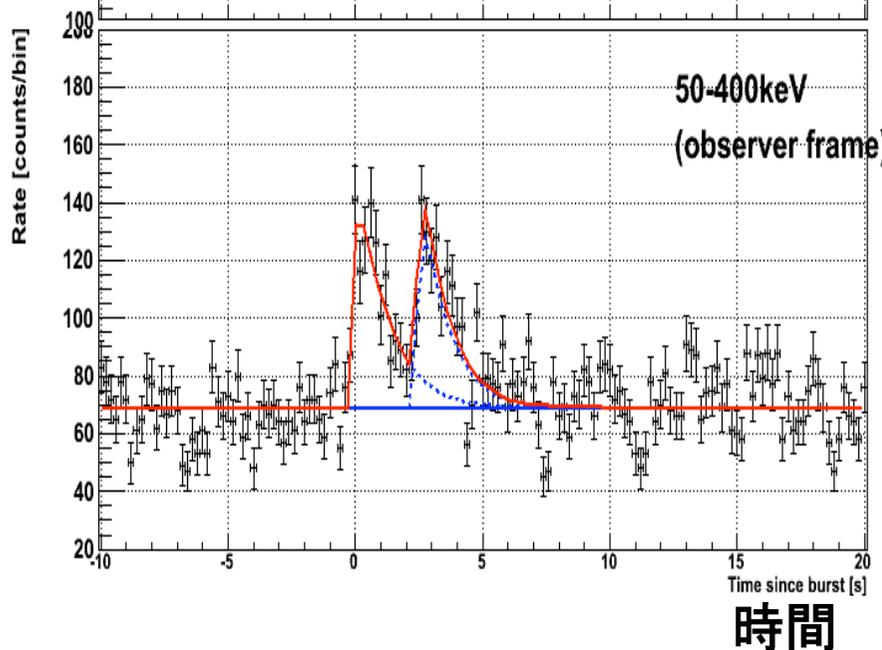
フィッティング関数(Norris et al. 2005)



$$I(t) = A\lambda \exp(-\tau_1 / (t - t_{start}) - (t - t_{start}) / \tau_2) \quad t > t_{start}$$
$$= 0 \quad t < t_{start}$$
$$\tau_{peak} = (\tau_1 / \tau_2)^{1/2}, \lambda = (\tau_1 / \tau_2)^{1/2} \quad (\tau_1: \text{rise}, \tau_2: \text{decay})$$
$$t_{peak} = \tau_{peak} + t_{start}$$

パラメータは4つ

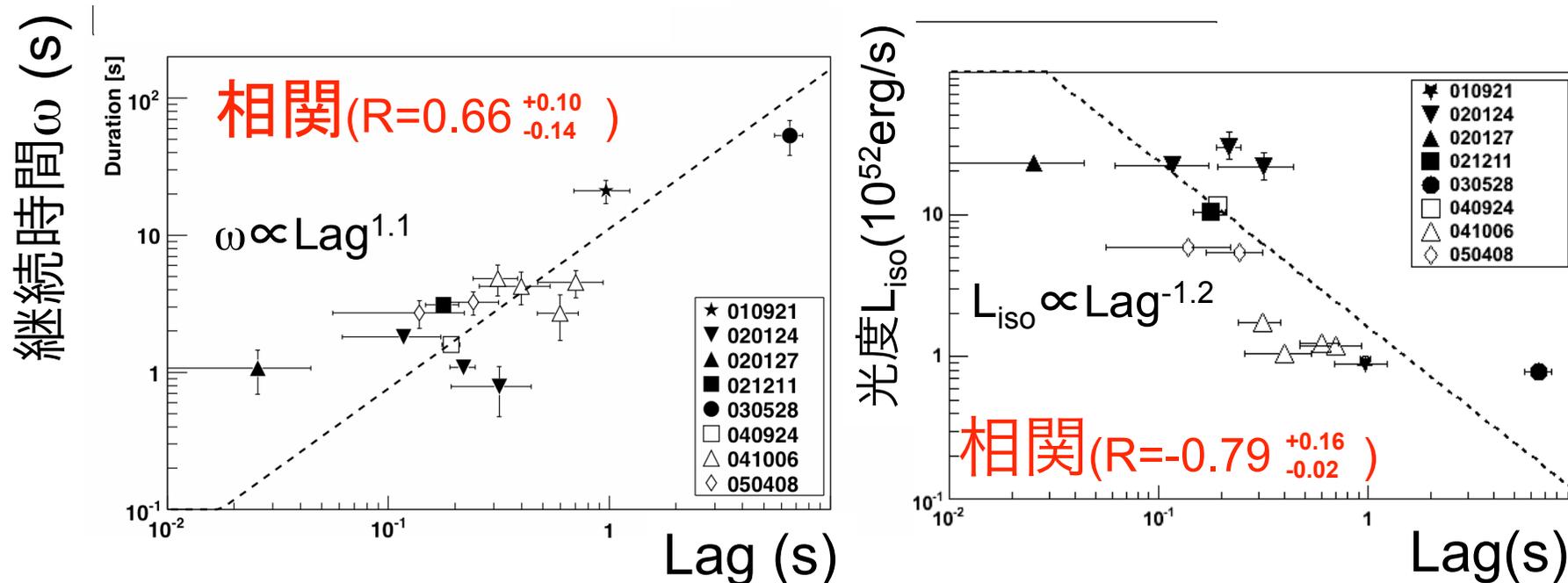
6-25keV と 50-400keV (観測者系)



- 8 GRBs with known redshift
- 1.5 σ 以上のものだけを選択
- FREGATEのみを使用

結果

6–25 keV と 50–400 keV のLag (観測者系)

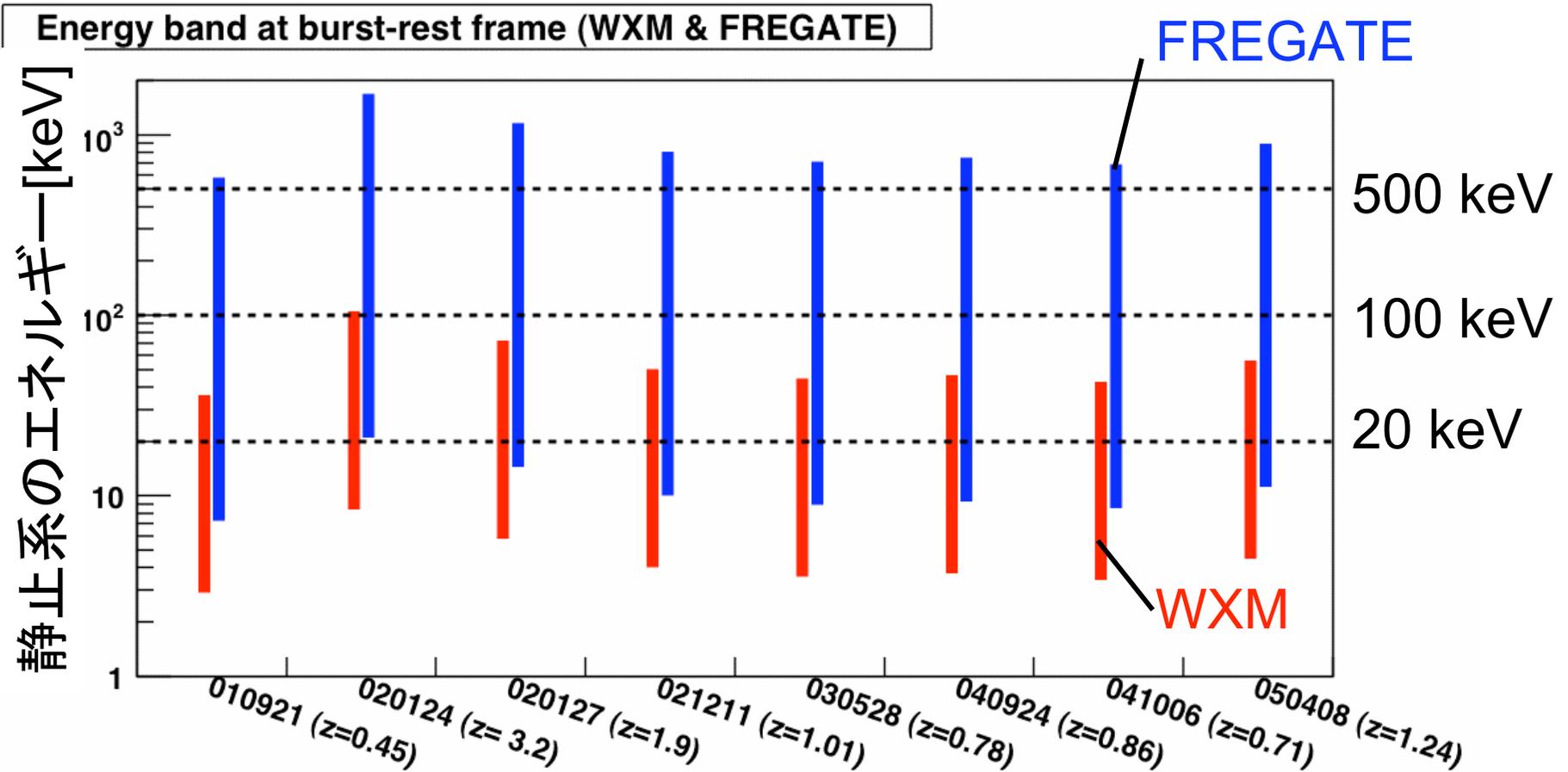


- Lagと継続時間、光度の関係は“25 keV”より低い帯域でも成立 (Lagは広帯域で普遍的な現象)。
- パルス毎に成立

しかし、エネルギーバンドが観測者系で共通 (宇宙論的効果含む)

➡ GRBの静止系で共通した帯域のLag計算

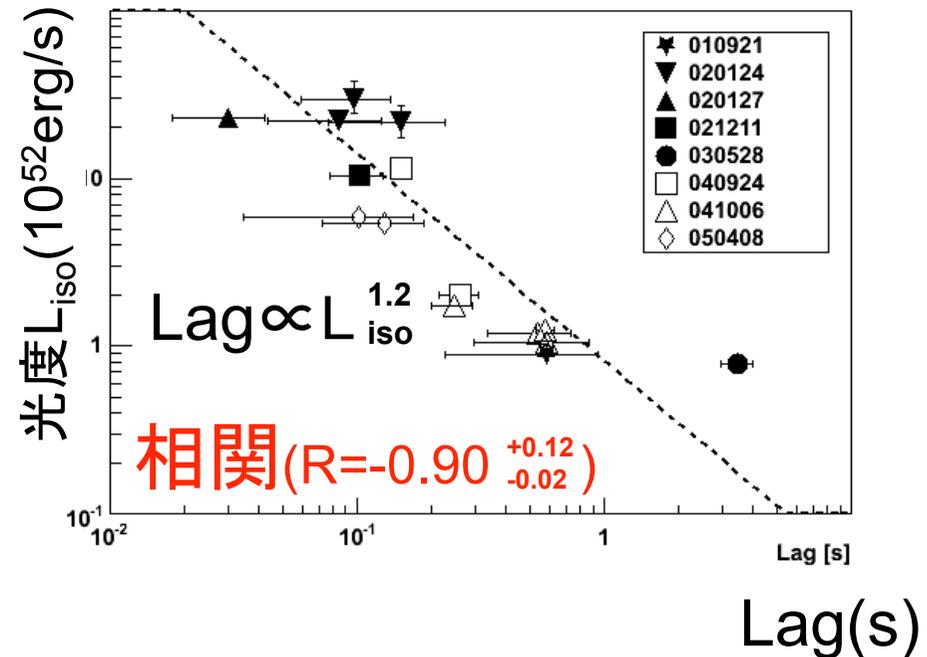
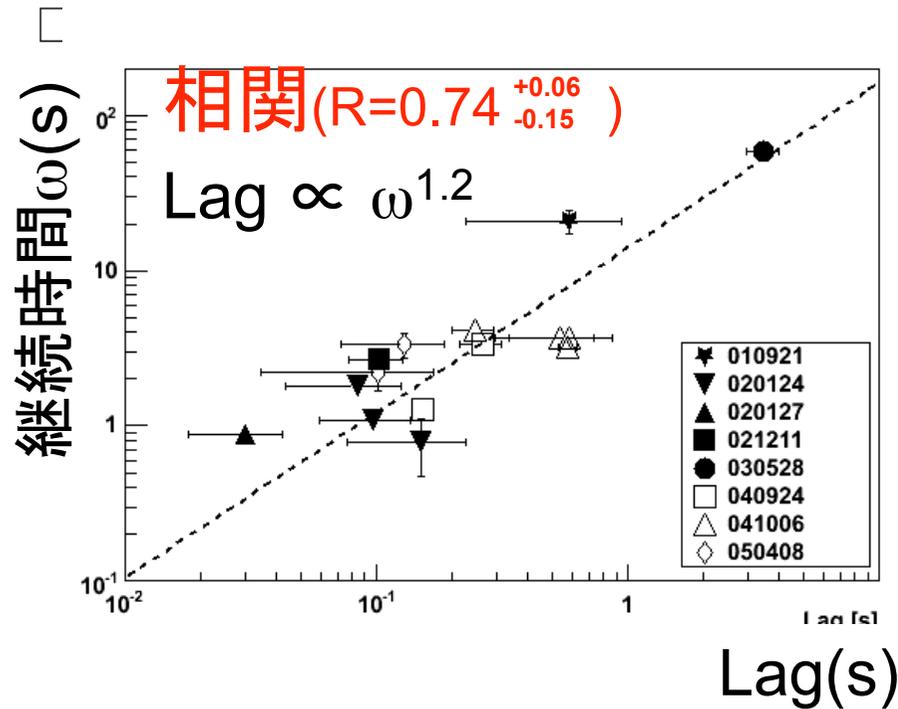
GRBの静止系



- 20-100 keV と 100-500 keV を採用

結果2

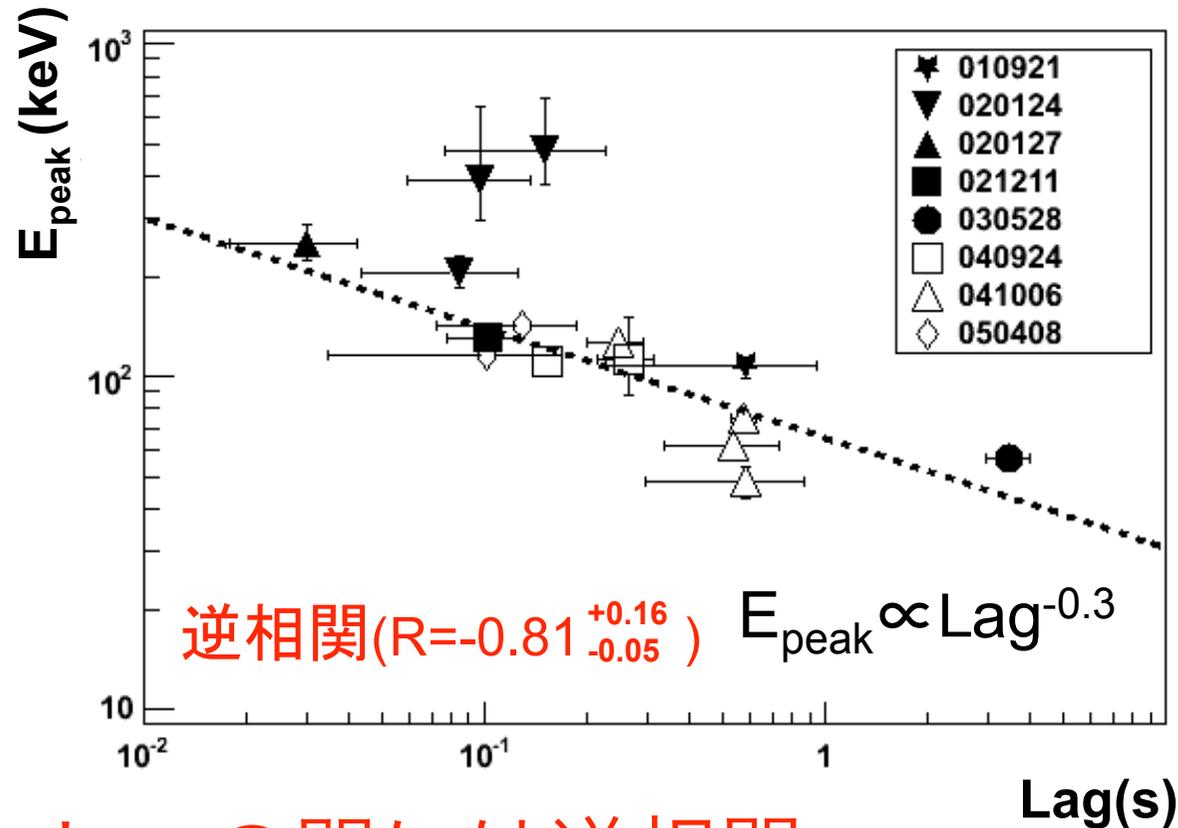
- GRBの静止系で共通なバンドでの lag
(20-100keV と 100-500keV: 静止系)



観測者系と同様にLagと継続時間、光度に
相関が成立

ほかのパラメータ(E_{peak})についてはどうか？

結果3

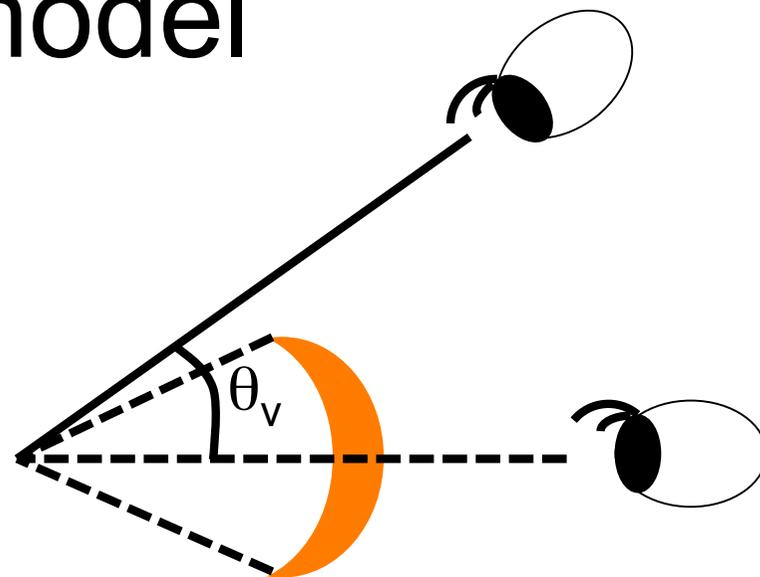
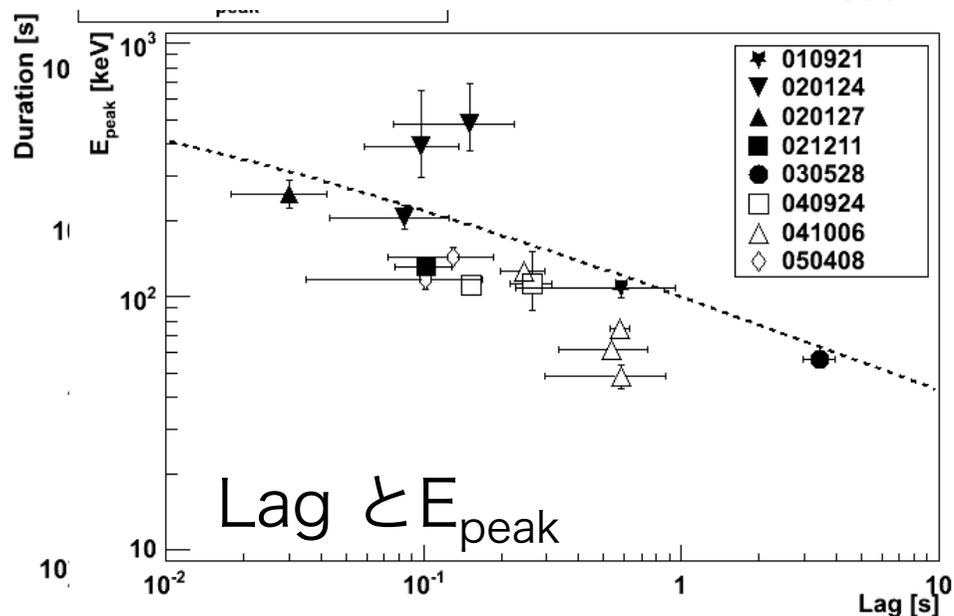
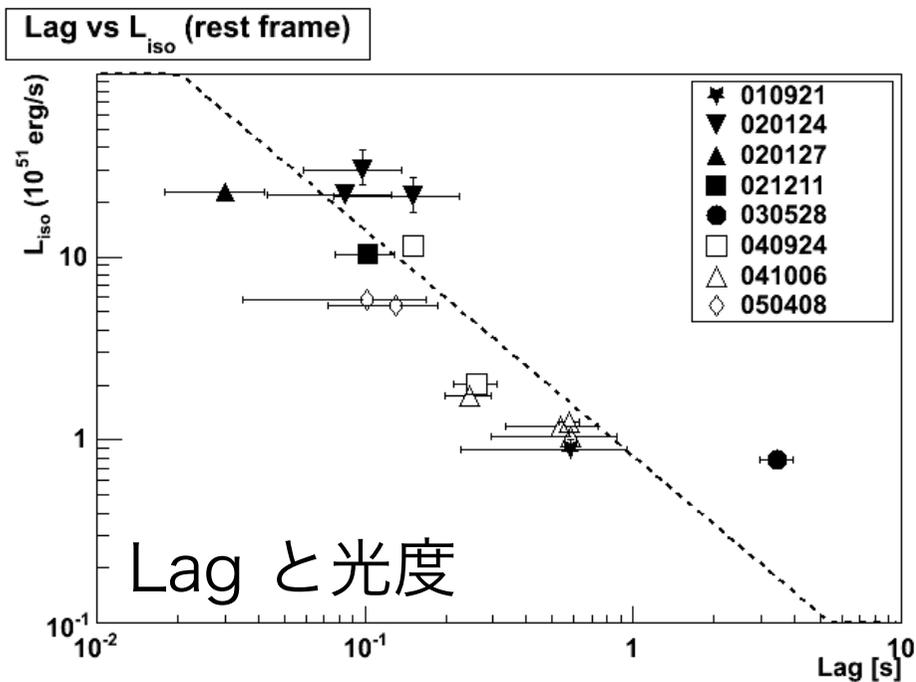


E_{peak} と lag の間には逆相関

◆ Lag-光度、Lag-継続時間、Lag- E_{peak} 関係は **off-axis model** で説明可能か？

◆ Yonetoku 関係 (光度- E_{peak} 関係) と consistent ?

Off-axis model



Ioka+ 2001

•Lag -光度関係から $\Gamma\theta_v$ 依存性が決まる

• $\Gamma\theta_v$ 依存性 \Rightarrow [Lag-継続時間
Lag- E_{peak}]

Off-axis model で
うまく説明可！！

Discussion

Yonetoku 関係

E_{peak} と光度の間に相関 ($L \propto E_{\text{peak}}^{1.8}$)

ここで Lag の Systematic error を導入 ($\sigma_{\tau} = 0.05$ s)

- $L \propto \text{Lag}^{-1.59 \pm 0.28}$ (our result)

From Yonetoku relation

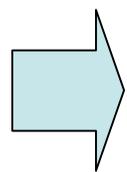
$$-E_{\text{peak}} \propto \text{Lag}^{-1.59/1.80} \\ \propto \text{Lag}^{-0.88}$$

Consistent !!



HETE result

$$E_{\text{peak}} \propto \text{Lag}^{-0.76 \pm 0.17}$$



赤方偏移依存のLag-光度関係(Tsutsui et al.

2008)は必要とされない

$$L_{\text{iso}} \propto (1+z)^{2.5} \text{Lag}^{-0.3}$$

詳細に議論するためには、より多くの統計が必要

→ 今後の天文衛星の観測(Swift & Fermi)に期待

Swift : 赤方偏移決定 + Fermi: E_{peak} 決定

本論文の狙い

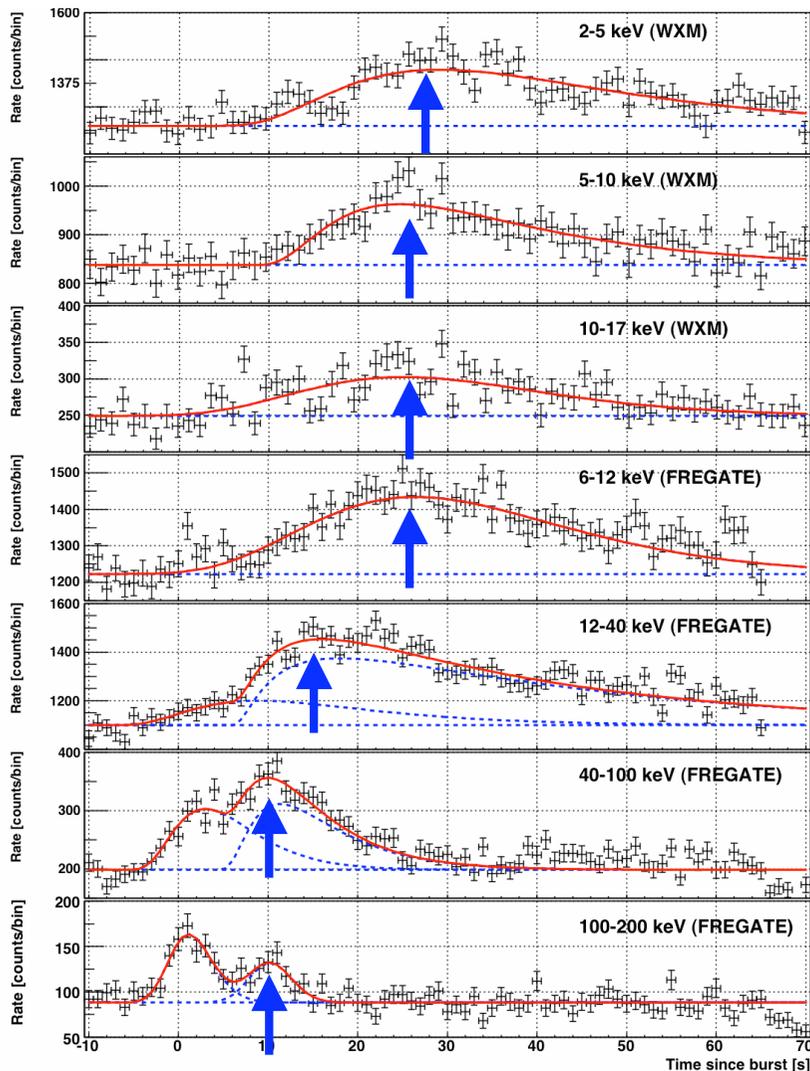
- ・ Lag をGRBの距離指標として用いる事が可能か？

- ・ 個々のGRBの Lag は、幾何学的モデルで説明可能か？

WXM(2-25 keV)の観測結果も加えた解析

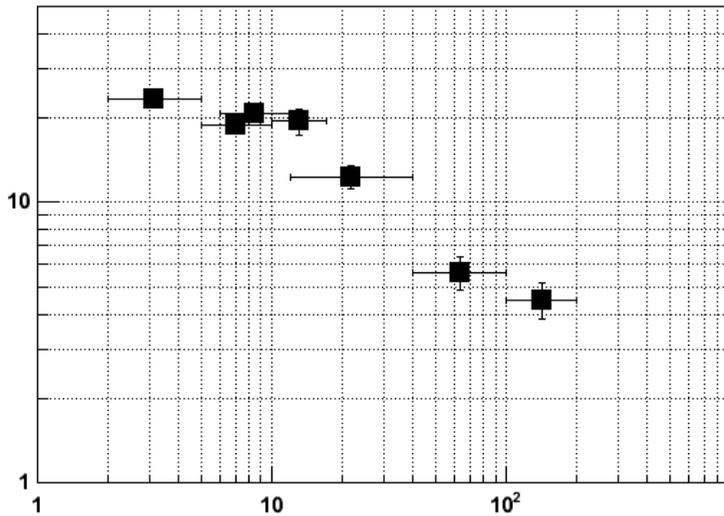
Lag のエネルギー依存度

GRB030528



2nd pulse に対応するもの
だけプロット

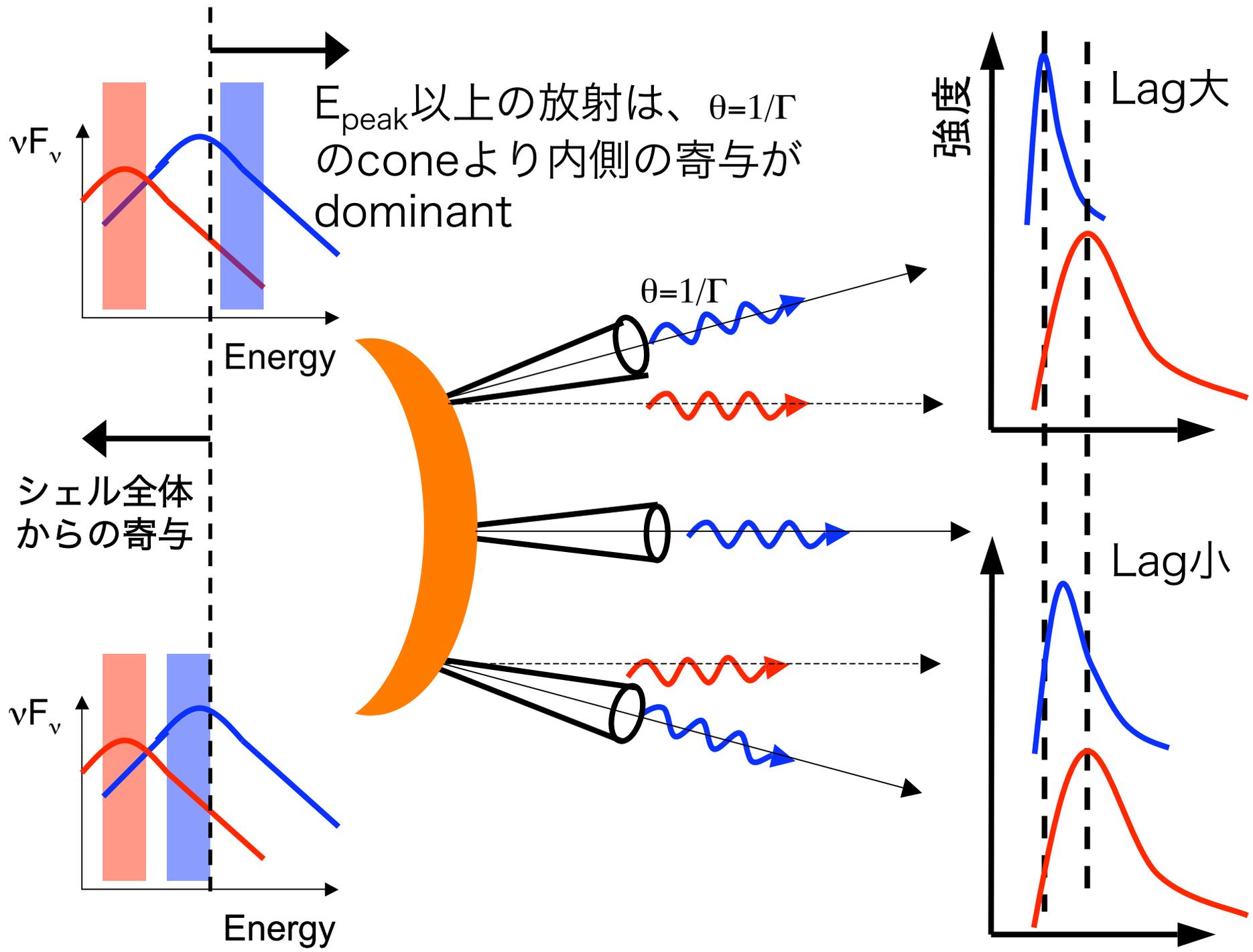
Peak time [s]



静止系でのエネルギー

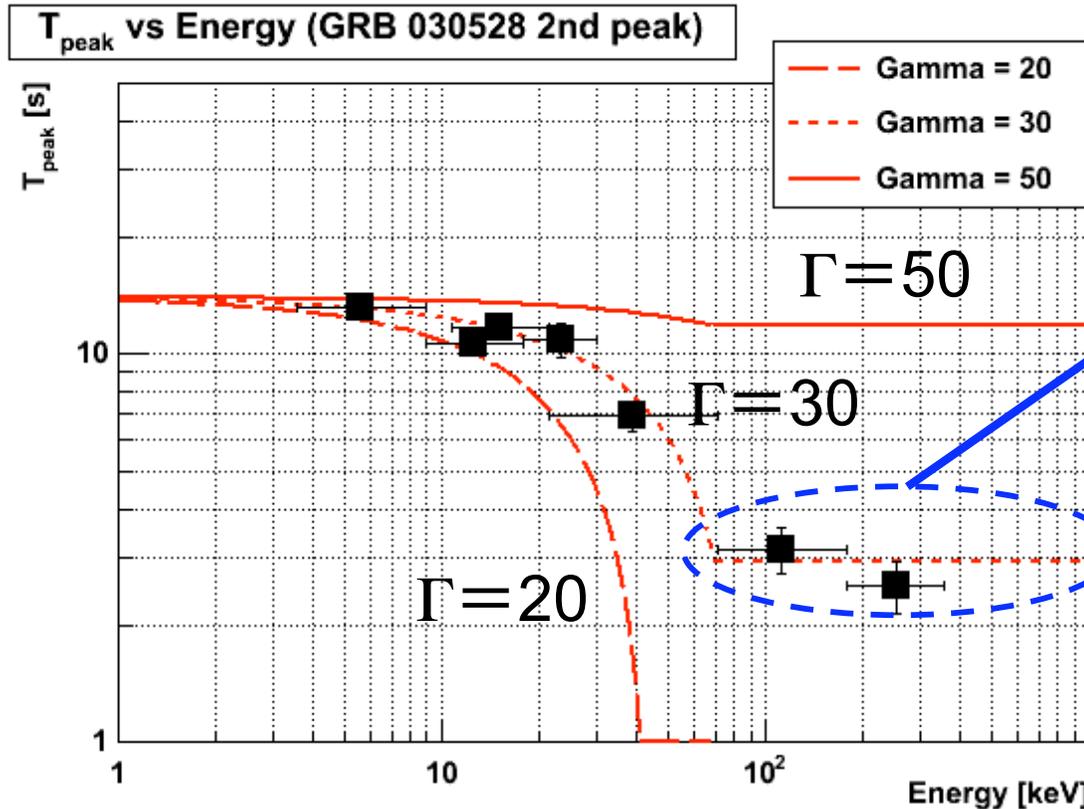
これらの Peak time の分布は
幾何学的なモデルで説明可能か？

用いたモデル: Lu et al. 2006
Curvature effect を詳細に計算
(based on the on-axis model)



幾何学効果

幾何学モデル(Lu et al. 2008; on-axis model)
の重ね合わせ



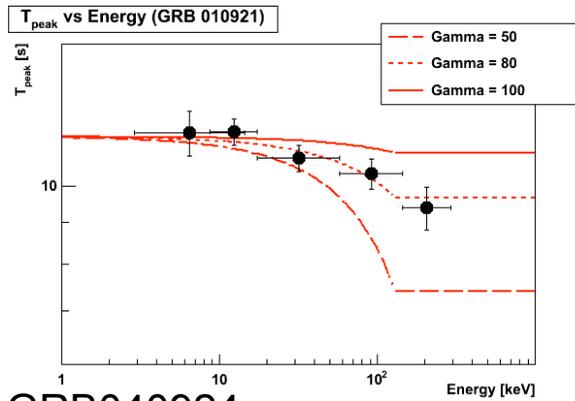
E_{peak} より上のエネルギーでは、 $\theta \sim 1/\Gamma$ より内側しか放射が見えないため

- Γ に大きく依存
($\text{Lag} \propto \Gamma^{-2}$)

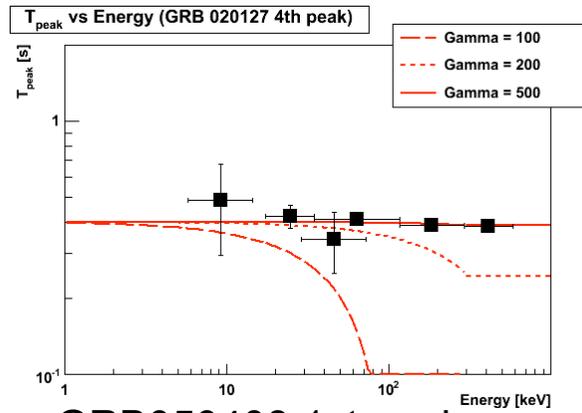
→全体の6割のパルスもCurvatureでうまく説明可能

他の例

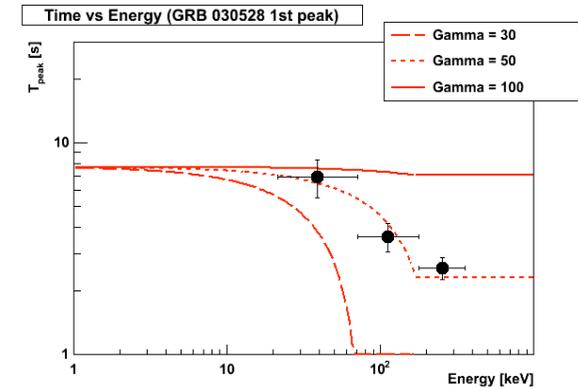
GRB010921



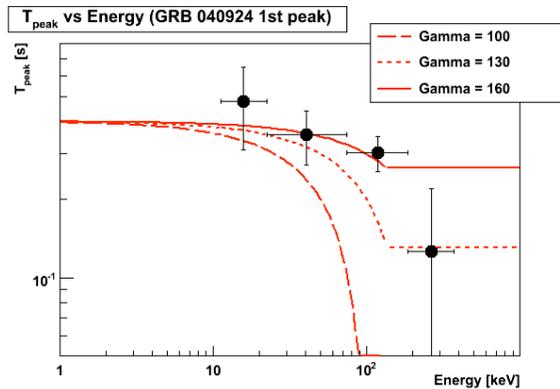
GRB020127



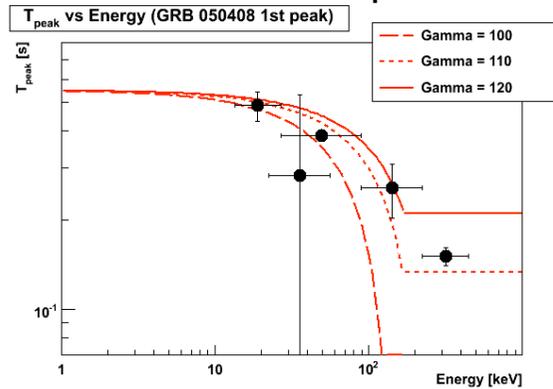
GRB030528 1st peak



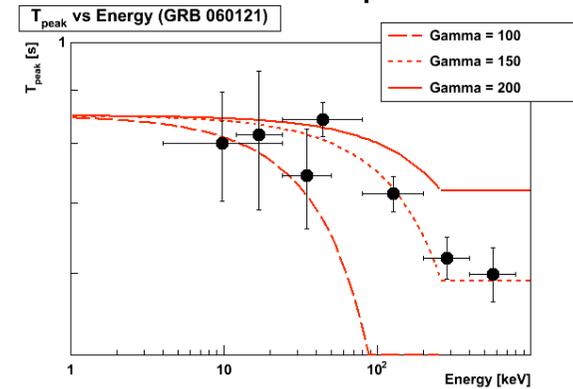
GRB040924



GRB050408 1st peak



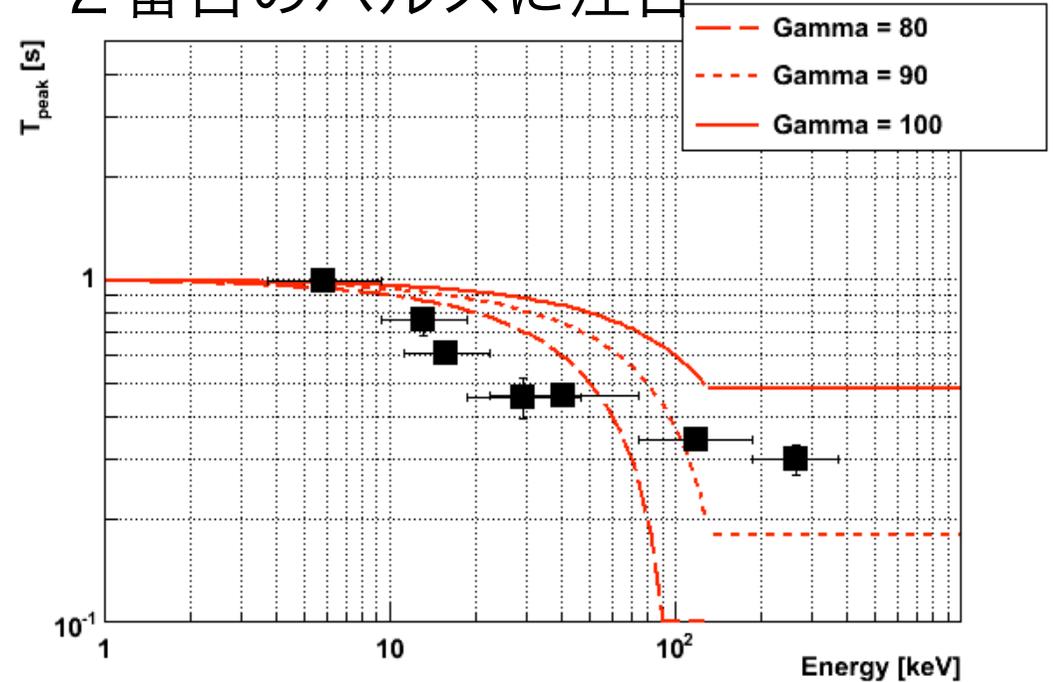
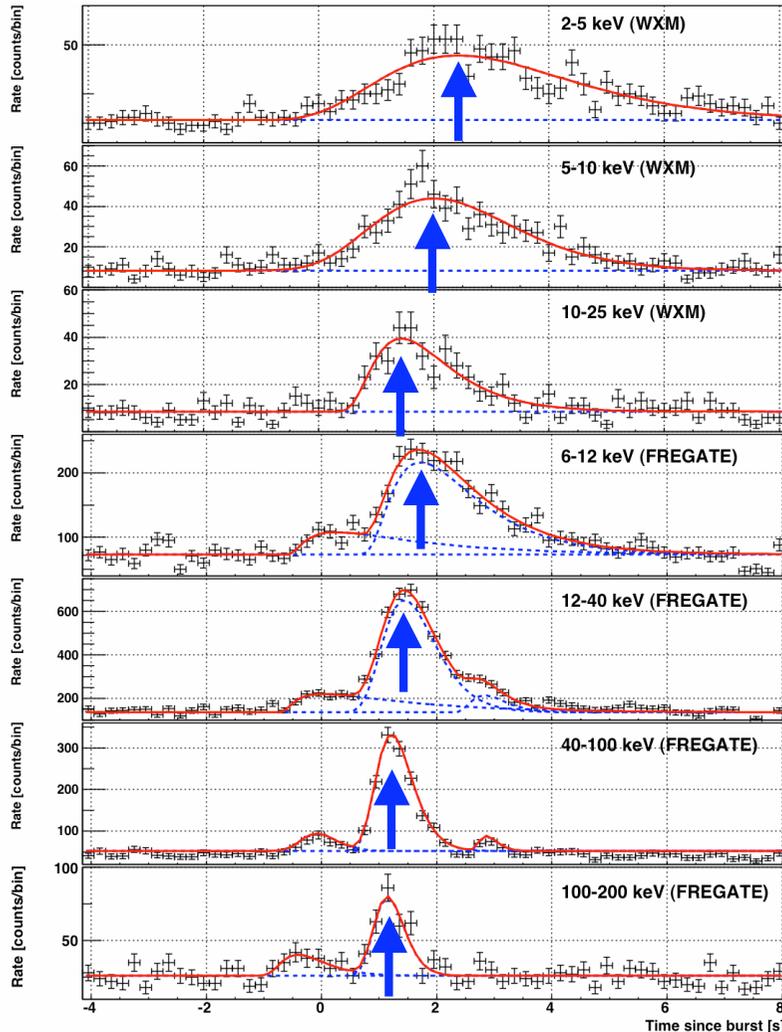
GRB060121 2nd peak



Other effect ?

GRB040924

2 番目のパルスに注目

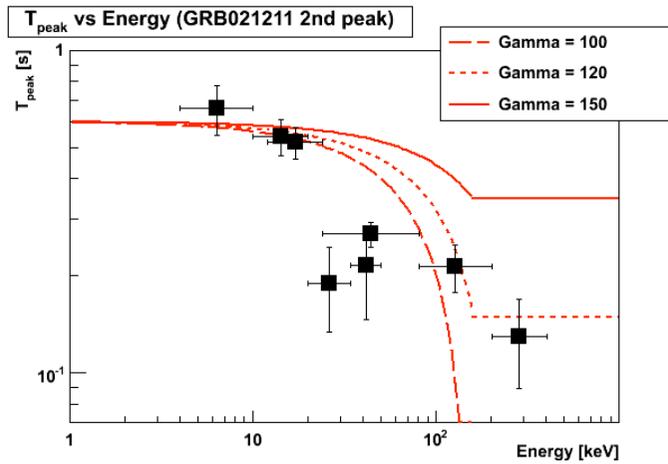


- スペクトルはBandで良く合っている
- Curvature effect ではうまく説明できない

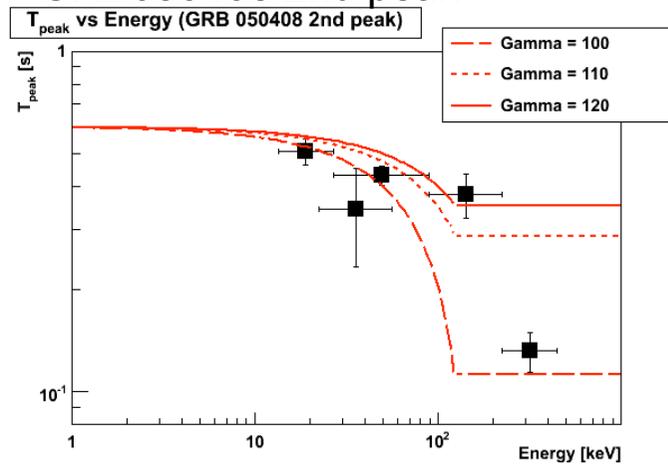
➡ Hydrodynamical effectなどが卓越している可能性

ほかの例

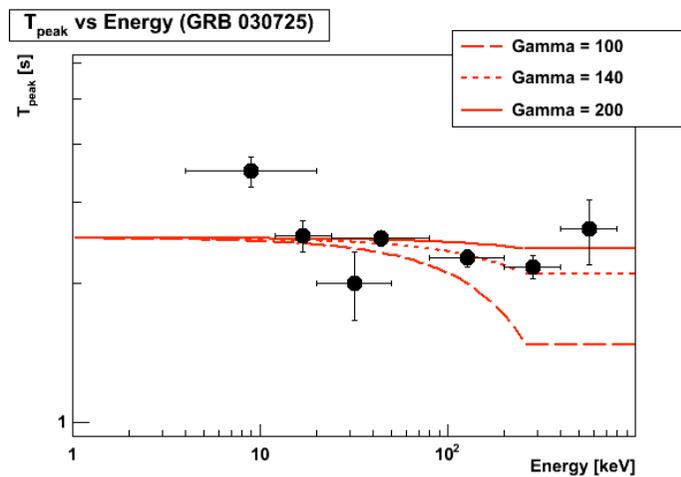
GRB021211



GRB050408 2nd peak



GRB030725



HETEのまとめ

全体のGRBのパルス

- BATSEで認められたLag関係（継続時間、光度）
→低エネルギー（6-25keV）まで成り立つことを検証（静止系においても同様）
- これらの関係はoff-axis model でうまく説明される
- Lag-光度関係は、Yonetoku関係と無矛盾(HETEのデータ)
 - 赤方偏移依存したLag-光度関係は必要とされない
 - 今後の観測により統計が増える事で、詳細に議論可能
- いずれにせよ、距離指標の応用の可能性有り

個々のGRBのパルス

- Lagのエネルギー依存はCurvature effect でうまく説明可能
- “初めて”観測データを用いてモデルの妥当性を示した
- 少数のパルスを説明するためにはCurvature effect 以外の効果(Hydrodynamical effectなど)が必要。