

IACTによるガンマ線バーストの観測研究

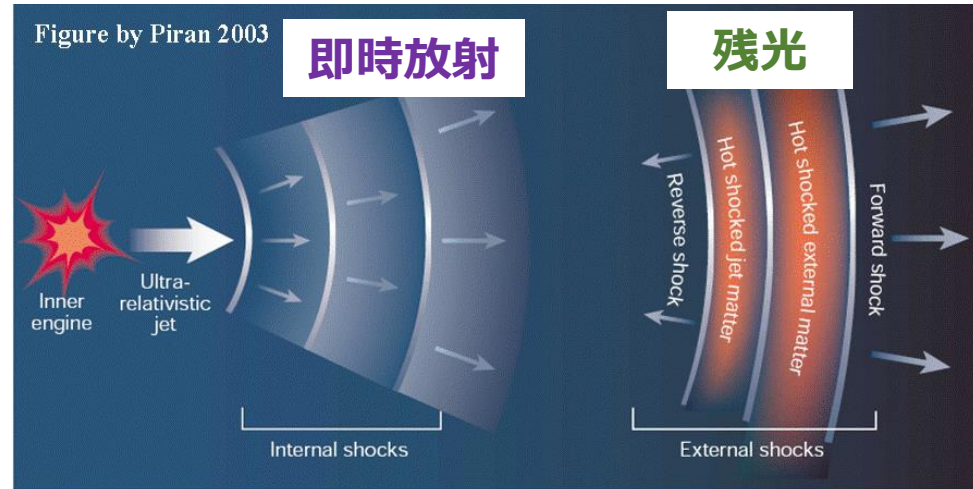
寺内 健太
(京大理学部 宇宙線研究室)

第五回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会

2022/03/22

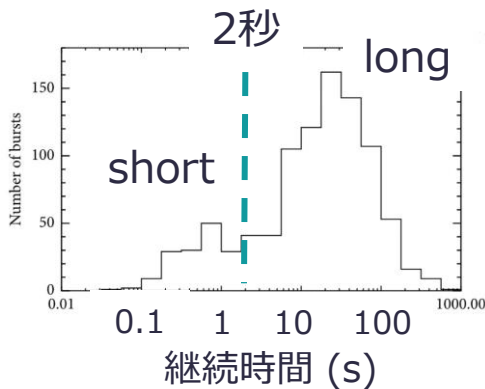
ガンマ線バースト (GRB)

- 宇宙論的距離で発生する宇宙最大の爆発現象
- 中心天体の一部は大質量星の重力崩壊
または中性子星連星合体
- 発生機構や放射機構は未だ不明

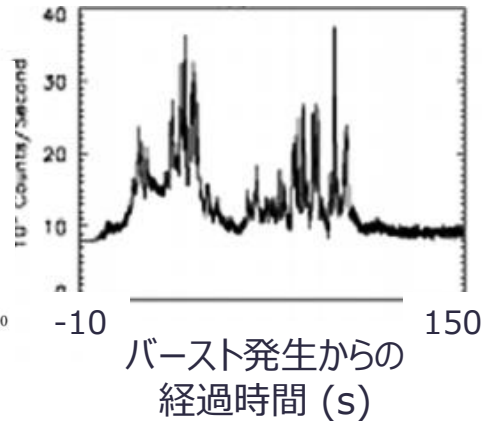


<即時放射>

- 主に keV-MeV帯で観測される
- 継続時間は数ミリ秒から数百秒
(2秒を境目に二種族に分類される)
- 激しい時間変動

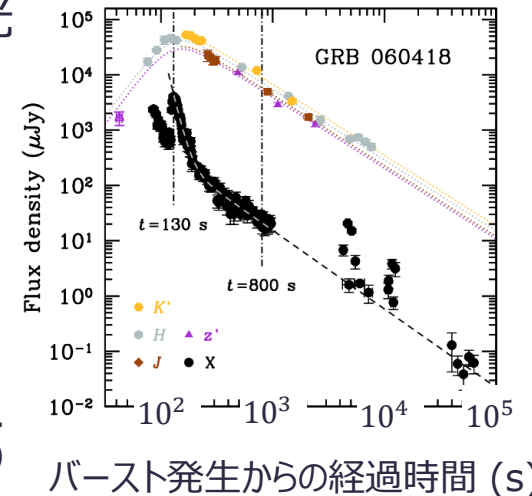


Fishman G and Meegan C (1995)



<残光>

- X線、可視光、電波、GeV以上で観測される
- 継続時間は数時間から数日
- 冪乗に減光

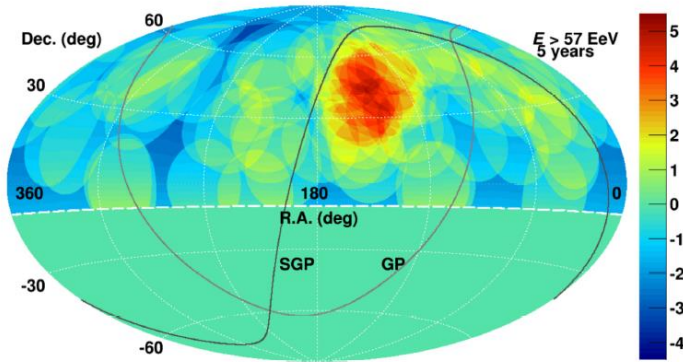


Molinari et al. (2007)

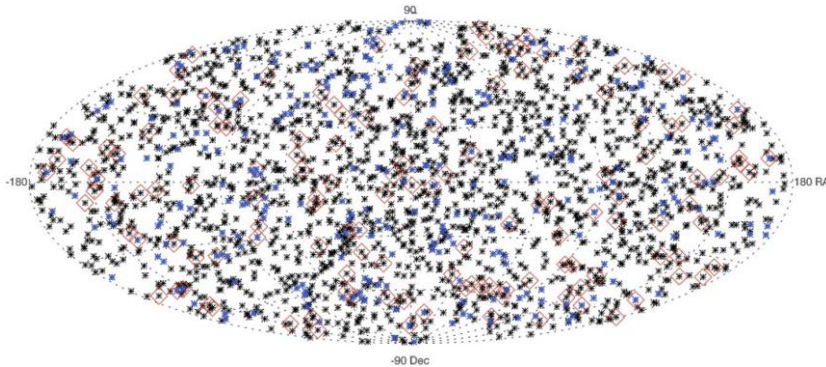
UHECRの加速天体としてのGRB

<到来方向>

R.U. Abbasi et al. (2014)

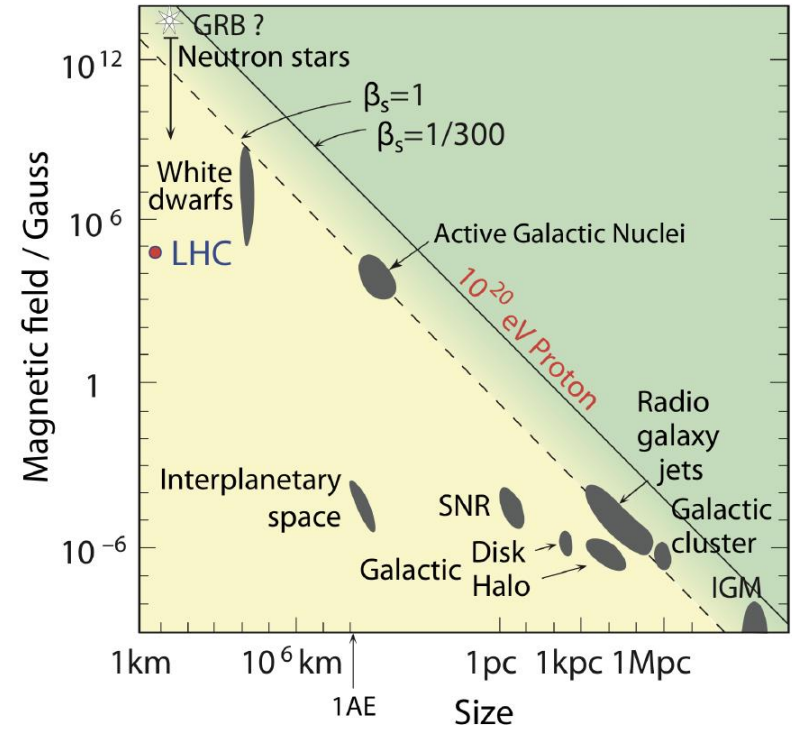


E. Bissaldi et al. (2019)



<最大加速エネルギー>

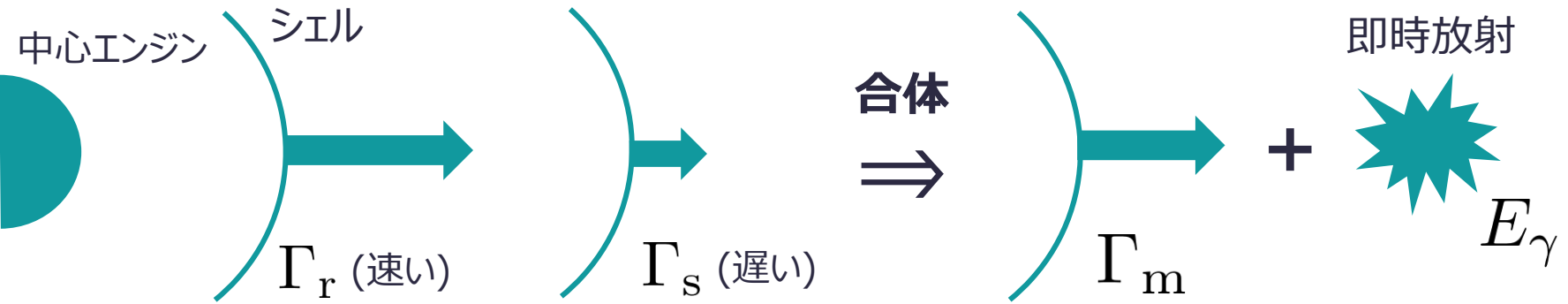
A. M. Hillas (1984)



$$E_{\max} \leq \gamma Ze B r_L$$

**(十分条件を満たすのかを検証するには)
GRBのEnergeticsを深く理解する必要がある**

内部衝撃波モデルと変換効率



Wang et al. (2015)

即時放射でジェット運動エネルギーから放射エネルギーに変換された効率 $\approx 1 - 2(\Gamma_r/\Gamma_s)^{-\frac{1}{2}}$

変換効率を上げるにはシェルのローレンツ因子の比が大きい必要がある

\Rightarrow 理論的に変換効率は 1 % ほど

変換効率を観測的に求めるには次の二つが必要:

① 即時放射の放射エネルギー $E_\gamma \Rightarrow$ 放射強度 + 天体距離

② 残光初期のジェットの運動エネルギー E_k

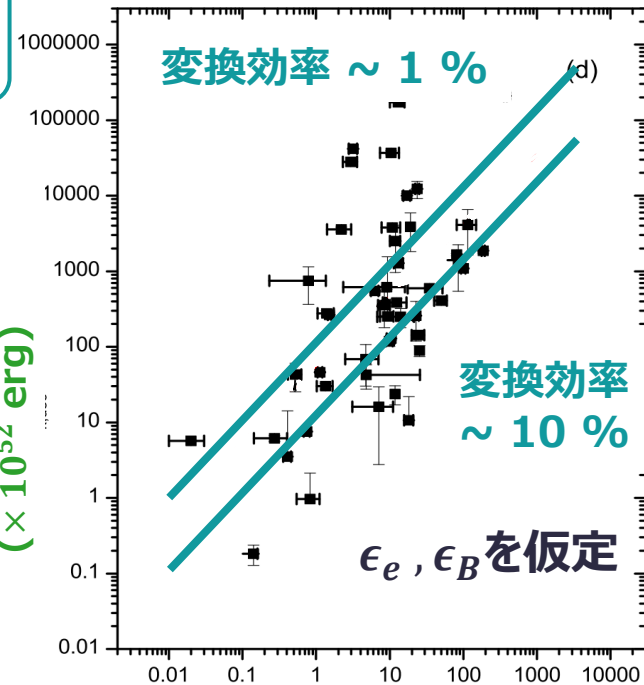
\Rightarrow X線放射強度 + 加速電子に変換されたエネルギー ϵ_e
+ 磁場増幅に変換されたエネルギー ϵ_B

ϵ_e : 典型的に 0.1

ϵ_B : $10^{-1} - 10^{-5}$

ϵ_B の不定性が大きい

残光のジェット運動エネルギー ($\times 10^{52}$ erg)



即時放射のエネルギー ($\times 10^{52}$ erg)

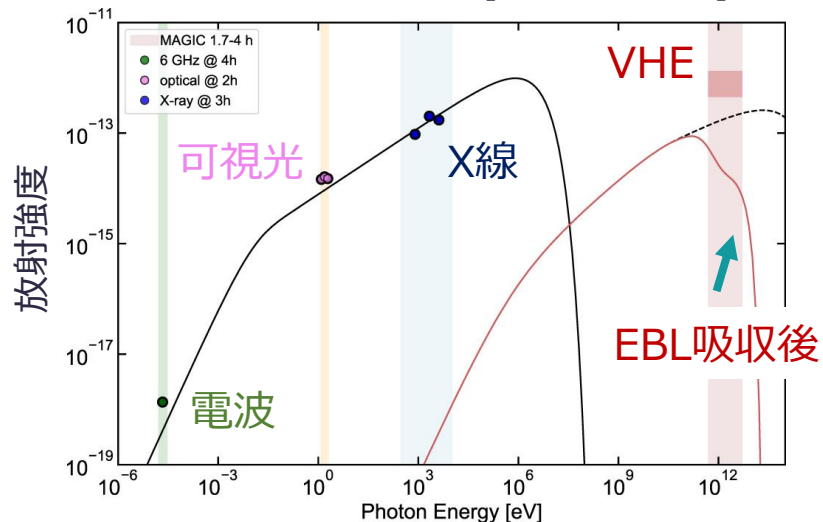
残光におけるVHEガンマ線の放射機構

* VHE ... 10 GeV 以上

- スペクトルがかけるものは3例しか存在しない
- 基本的には逆コンプトン放射によって解釈される
 - Fermi 衛星(0.1 - 10 GeV) のデータだけでは不十分
- 同じGRBであっても論文によって様々な解釈が存在
- 可視赤外背景光(EBL)による吸収の補正が必要:



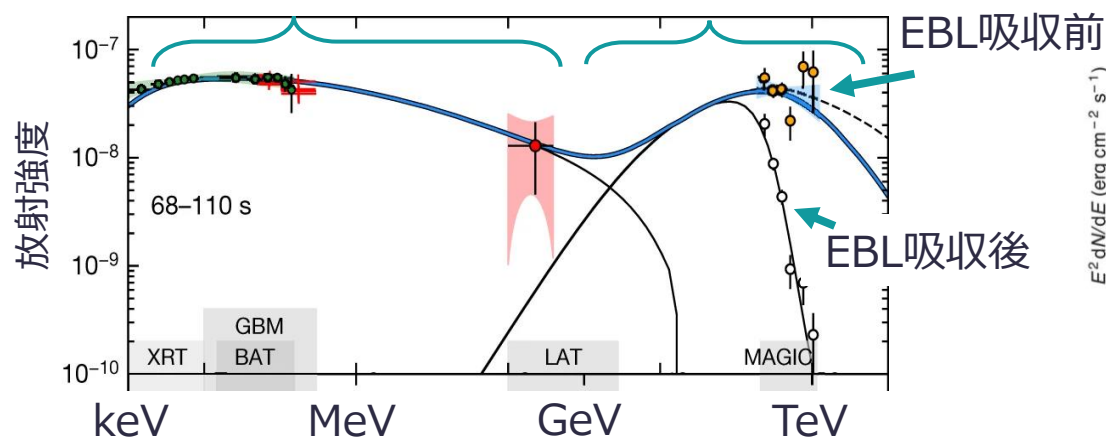
GRB160821B (short, 3 σ)



MAGIC Collaboration (2020)

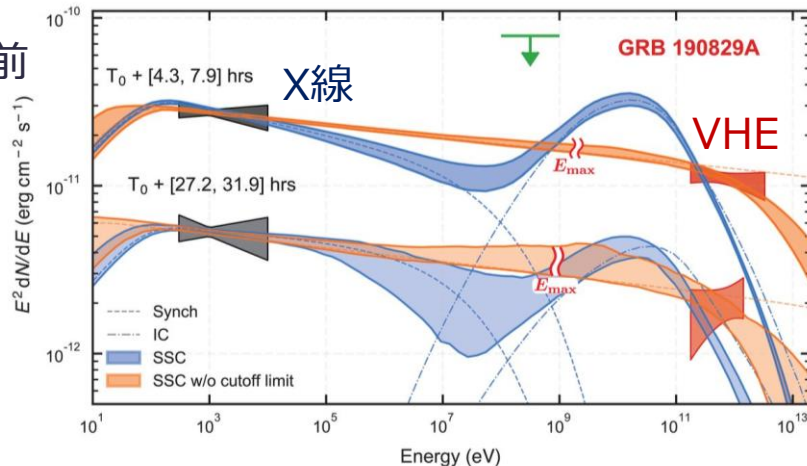
GRB190114C (long)

シンクロトロン放射 逆コンプトン放射



MAGIC Collaboration (2019)

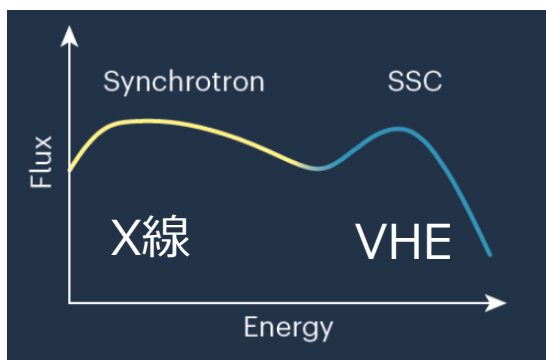
GRB190829A (long)



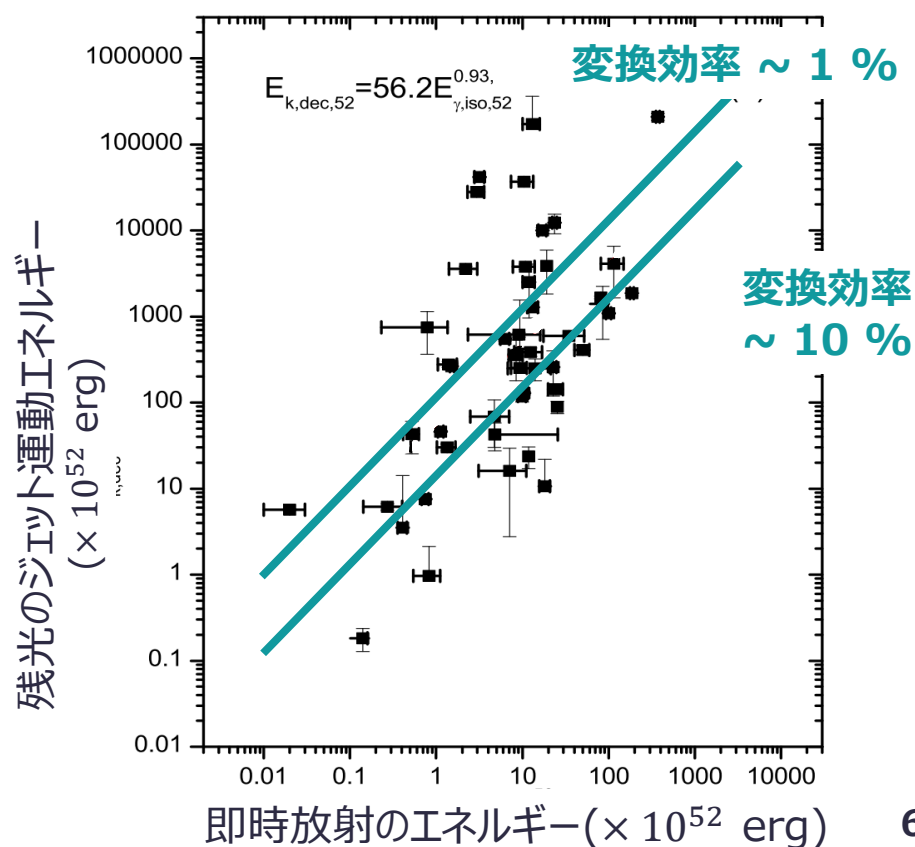
H.E.S.S. Collaboration (2021)

VHEガンマ線の活用方法

$$\frac{\text{VHE放射強度}}{\text{X線放射強度}} \approx \frac{\text{逆コンプトン放射強度}}{\text{シンクロトロン放射強度}} \approx \sqrt{\frac{\text{加速電子に変換されたエネルギー } \epsilon_e}{\text{磁場増幅に変換されたエネルギー } \epsilon_B}}$$



Wang et al. (2015)

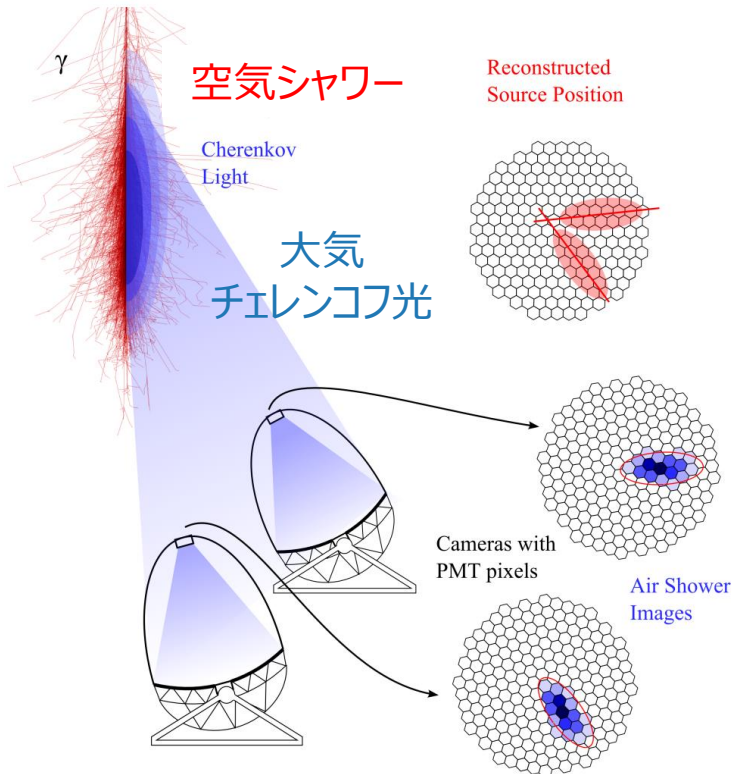
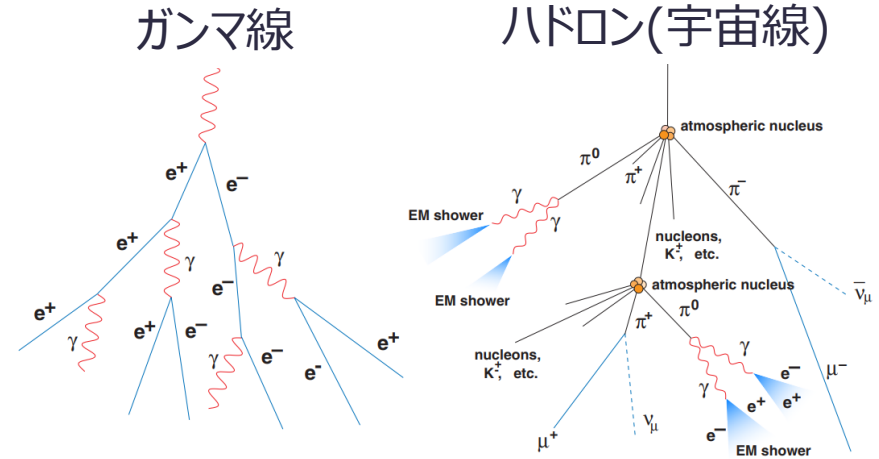
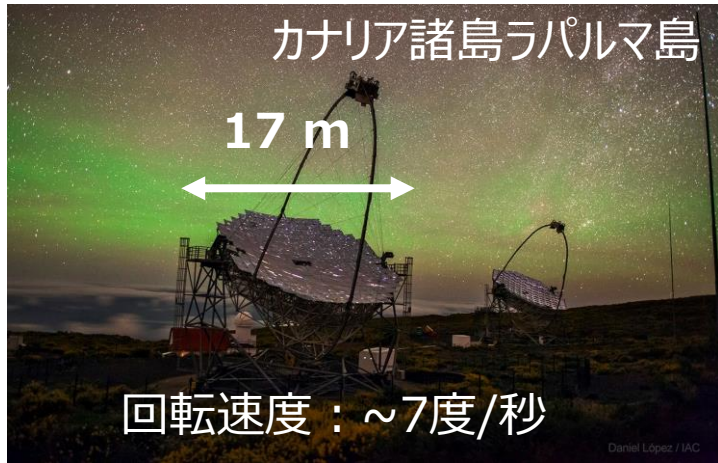


VHEガンマ線の強度を観測することで
 ϵ_B および残光初期におけるジェットのエネルギーの
 不定性を軽減

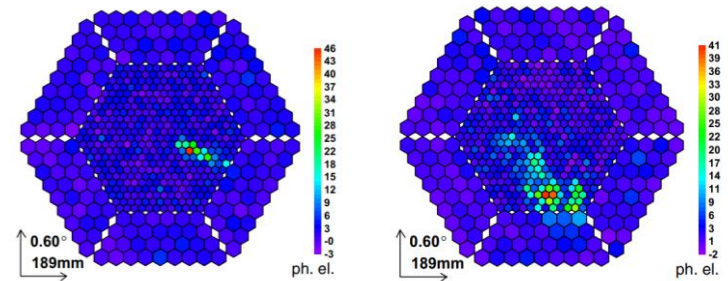


**変換効率による内部衝撃波モデルの検証を
 より強固に**

MAGIC 望遠鏡 (50 GeV – 30 TeV)



シャワーイメージ



ガンマ線由来

ハドロン由来
(背景事象)

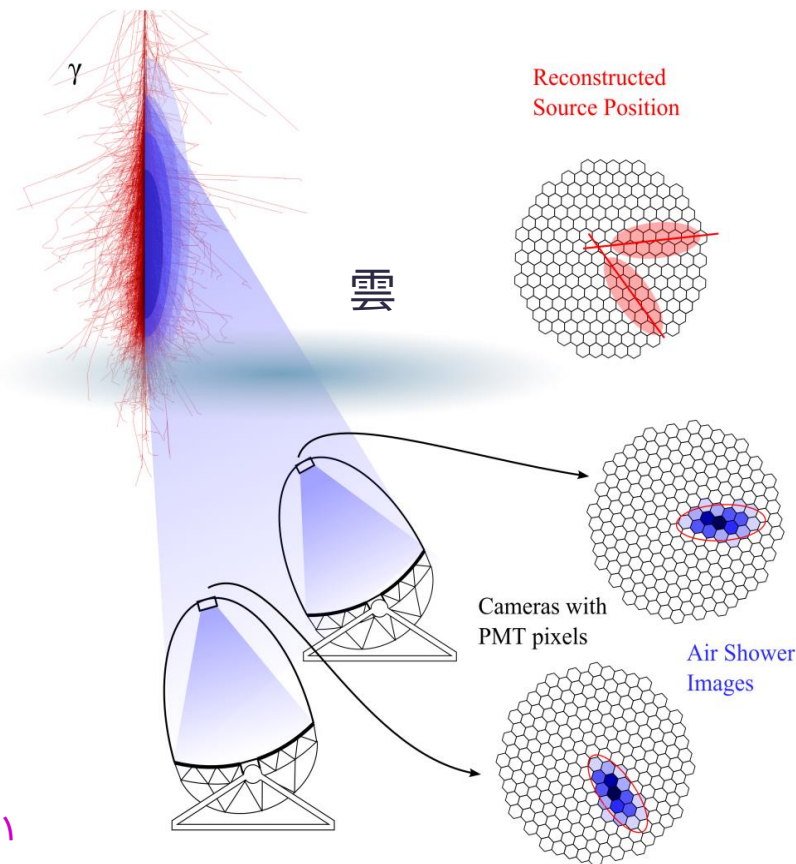
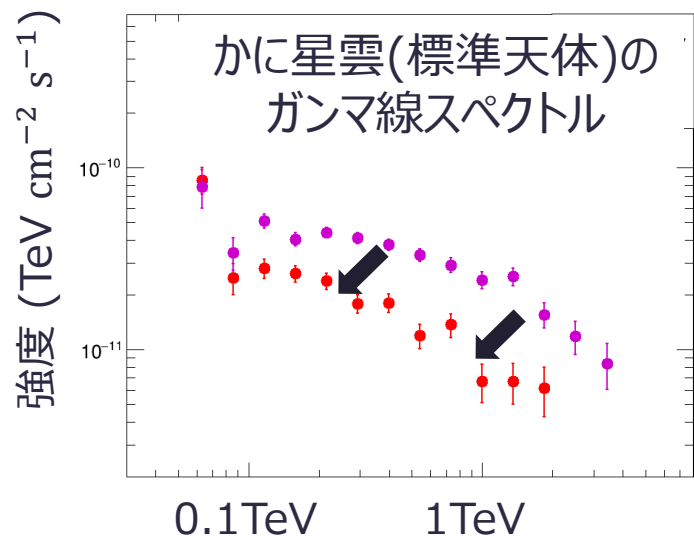
機械学習を用いて
シャワーイメージの特徴量から
ガンマ線事象とハドロン事象を弁別

大気透過度によるエネルギー不定性

- 大気チェレンコフ光を観測するため、大気透過度による影響を強く受ける
(シャワー光量 \downarrow \rightarrow ガンマ線エネルギー \downarrow)
- ガンマ線スペクトルにも影響が生じる



LIDAR



大気透過度が高い
~ 80 %

大気透過度が低い
~ 30 %

大気透過度が高いときと比べてフラックスが
約2,3倍小さく見積もってしまう

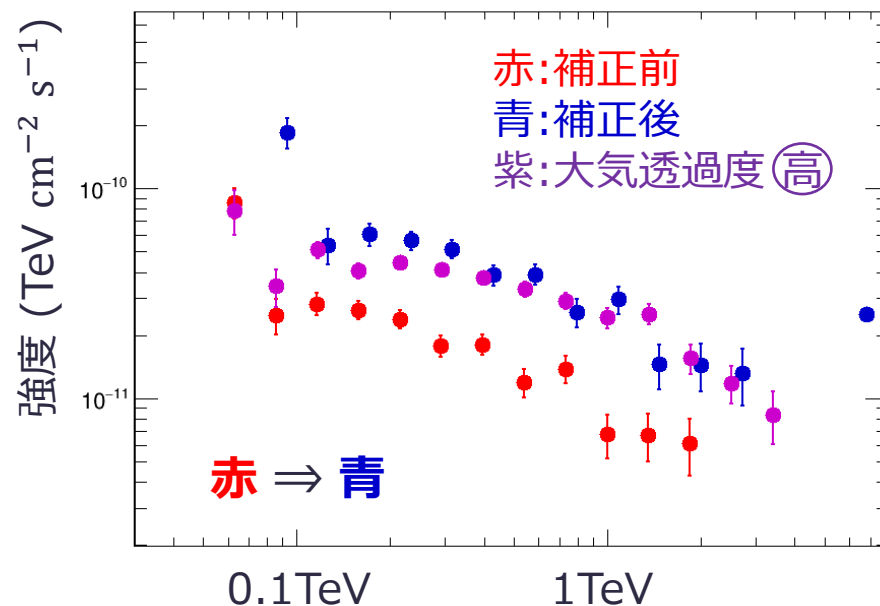
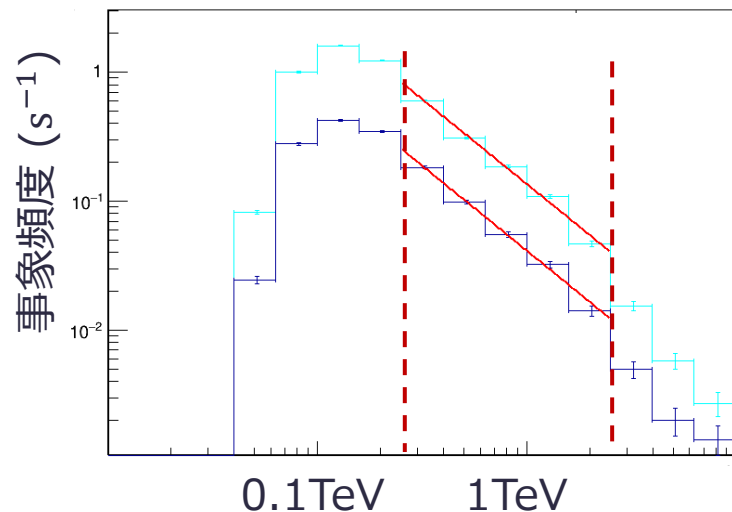
ハドロン背景事象頻度を用いたエネルギー不定性の評価

- ハドロン背景事象頻度のエネルギー分布からエネルギースケールの不定性を評価
 - あるエネルギー範囲におけるレートの積分量を用いてエネルギースケールのずれを算出

- かに星雲のガンマ線スペクトルを 23 %の精度で補正できることを確認

**観測データのみを用いて
大気透過度によるエネルギー不定性を評価
できることを確認**

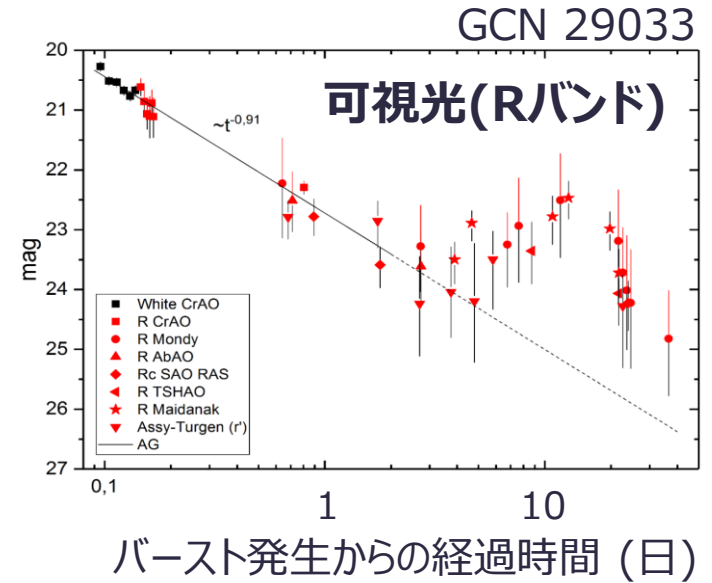
大気透過度：高、低



GRB201015A & GRB201216C

★GRB201015A

- Swift 衛星 BAT (15 - 350 keV) により検出
 - 継続時間: 9.8 ± 3.5 s
 - 即時放射のエネルギー $E_\gamma = 1.1 \times 10^{50}$ erg
- 赤方偏移 $z = 0.426$
- バースト後から約5日後に可視光での増光検出
 - ➔ 超新星(SN)の証拠

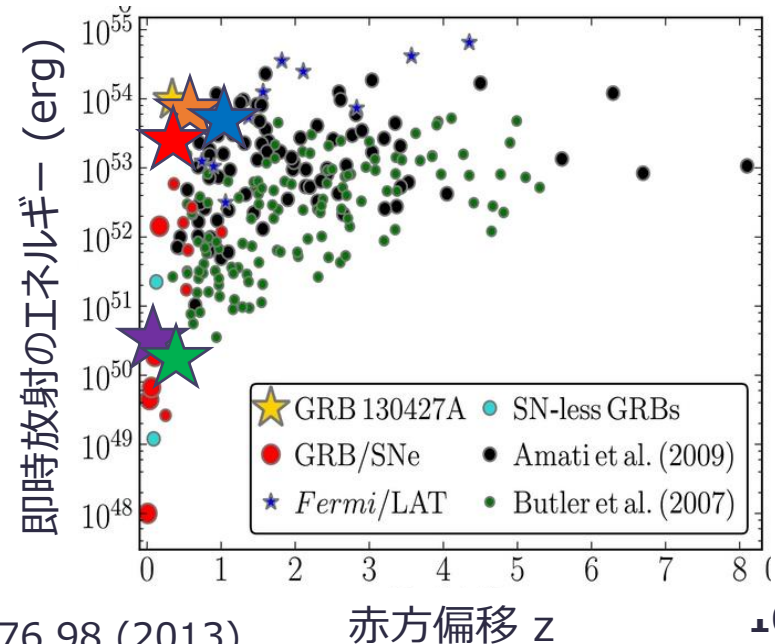


★GRB201216C

- Swift 衛星 BAT (15 - 350 keV) により検出
 - 継続時間: 48 ± 16 s (15 - 350 keV)
 - 即時放射のエネルギー $E_\gamma = 4.7 \times 10^{53}$ erg
- 赤方偏移 $z = 1.1$
- 可視光での増光は未検出

これまで検出された VHE-GRB:

- ★ GRB180720B ($z = 0.65$)
- ★ GRB190114C ($z = 0.42$)
- ★ GRB190829A ($z = 0.078$)



MAGIC望遠鏡によるVHEガンマ線観測

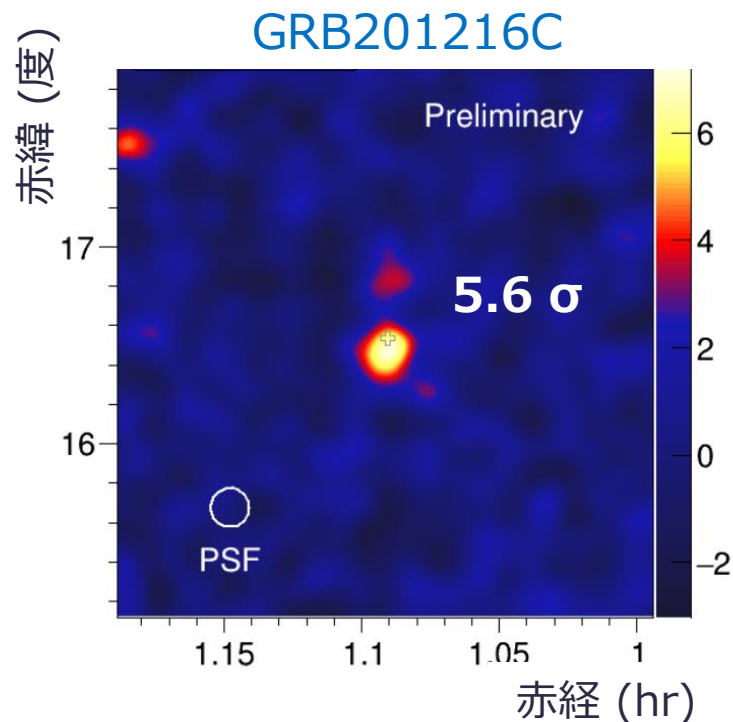
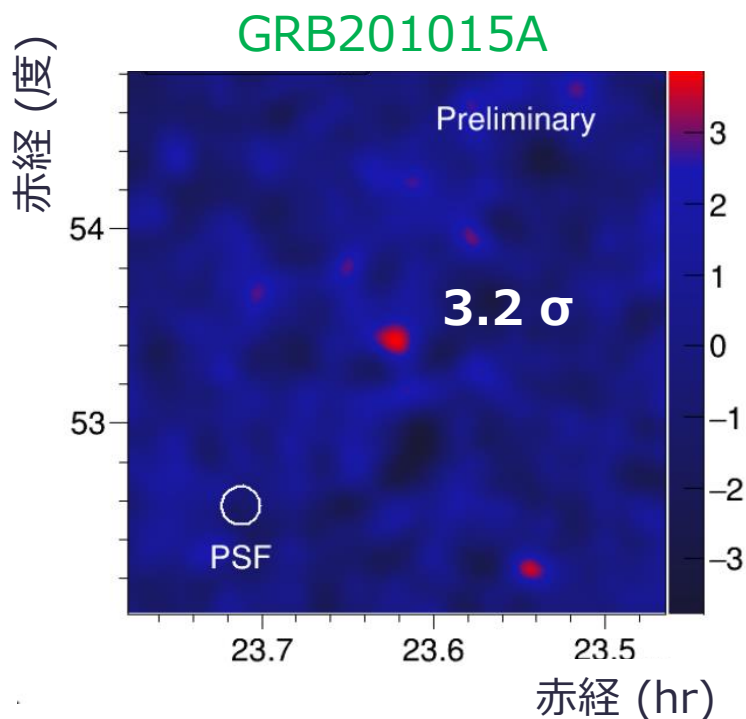
GRB201015A

- バーストから 33 秒後に観測開始 (計3.4時間観測)
- ガンマ線放射の兆候 (3.2σ)

LIDARによる
大気透過度の情報なし

GRB201216C

- バーストから 56 秒後に観測開始 (計2.2時間観測)
- ガンマ線放射の検出 (5.6σ)
- 大気チェレンコフ望遠鏡で検出された、VHEガンマ線を放つ天体としては最遠方 ($z = 1.1$)

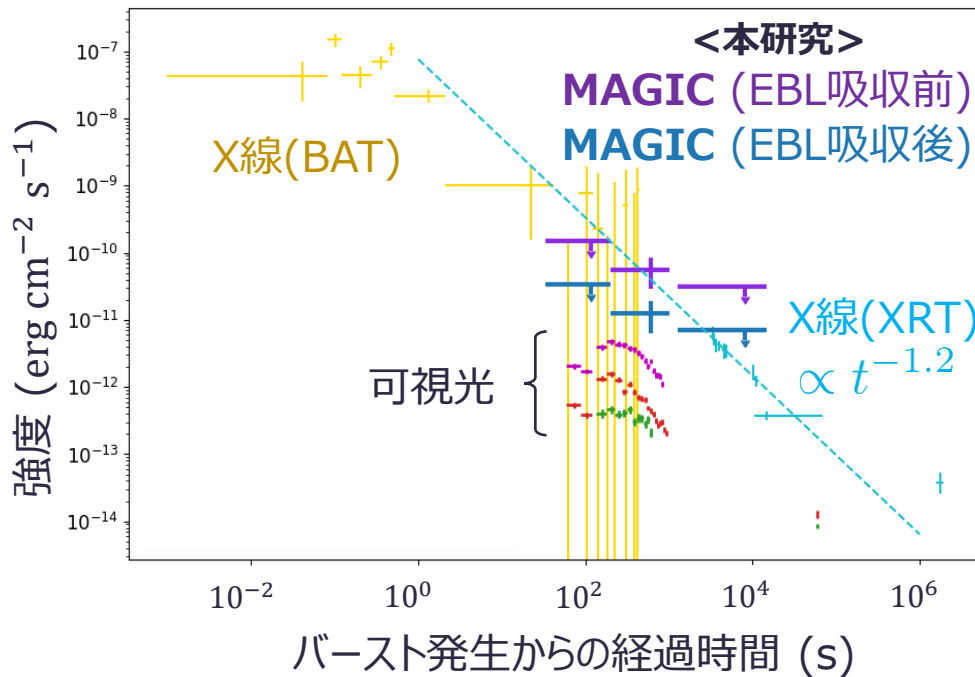


多波長での強度変動

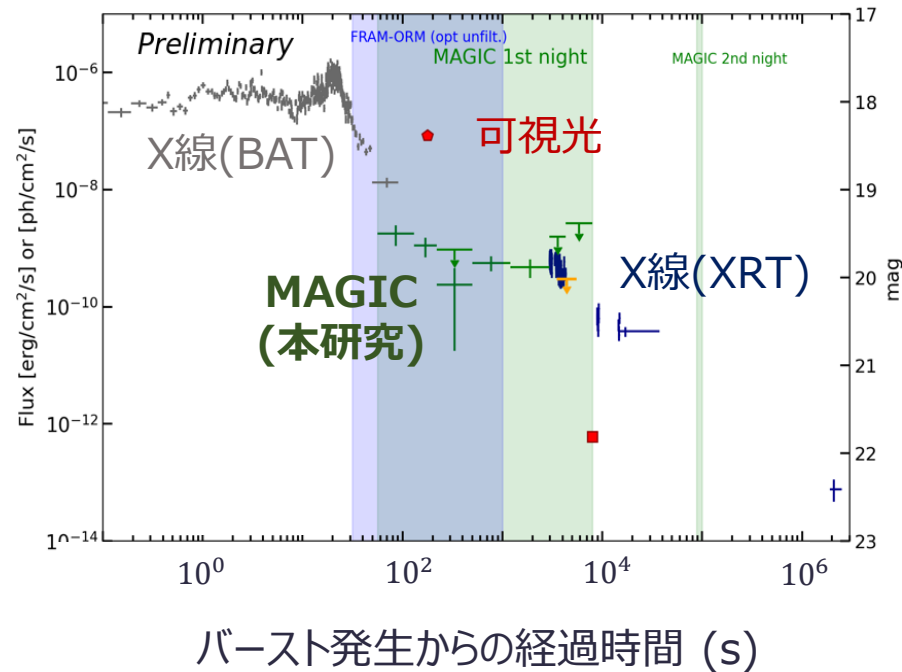
可視光でのピーク ⇒ 残光の開始

(統計的に有意ではないが)
VHEガンマ線残光の開始を捉えた可能性

GRB201015A



GRB201216C



背景事象頻度を用いた
 エネルギー不定性の評価手法によると
 エネルギースケールのずれは約8% (MAGIC本来の系統誤差は約10%)

多波長スペクトル

X線とVHEガンマ線のピーク光度比から
磁場増幅の割合 ϵ_B の値を制限:

$$\epsilon_B = 10^{-1} - 10^{-3}$$



シンクロトロン放射
+
シンクロトロン自己コンプトン放射



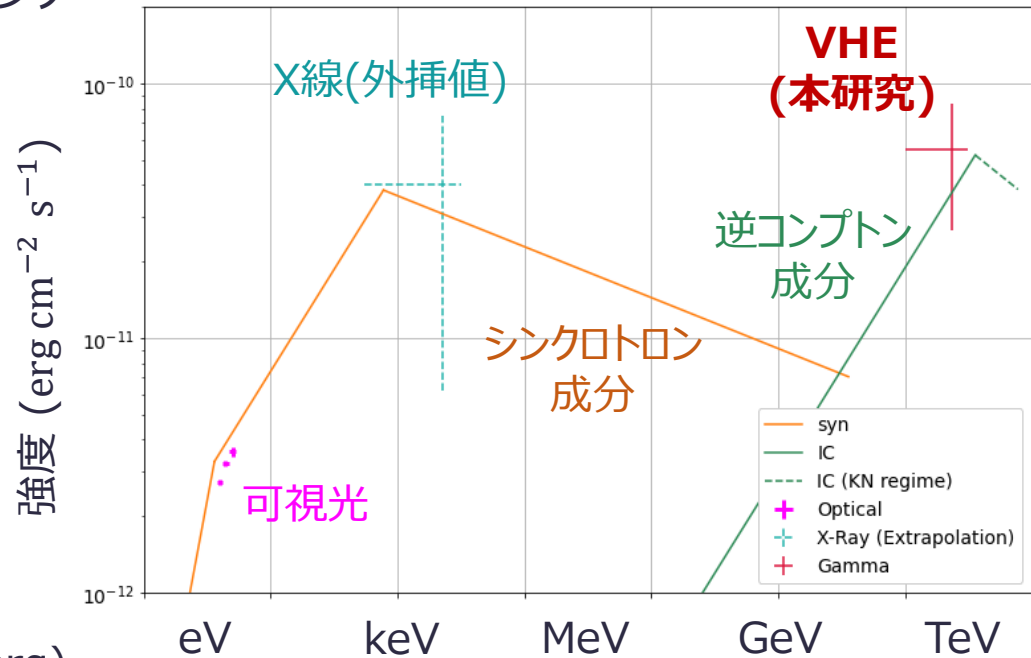
$$\epsilon_B = 10^{-2} - 10^{-3}$$

(1.4 - 1.8 G)

残光初期のジェットの運動エネルギーは
 $E_k = (3 - 10) \times 10^{51}$ erg
と見積もられた

でモデリング

バースト発生から 200 - 1000 秒後におけるスペクトル



$$\frac{\text{VHE放射強度}}{\text{X線放射強度}}$$

$$\approx \sqrt{\frac{\text{加速電子に変換されたエネルギー } \epsilon_e}{\text{磁場増幅に変換されたエネルギー } \epsilon_B}}$$

(即時放射の放射エネルギー $E_\gamma = 1.1 \times 10^{50}$ erg)

VHEガンマ線を放つGRBの即時放射における変換効率

変換効率：即時放射でジェット運動エネルギーから放射エネルギーに変換された効率

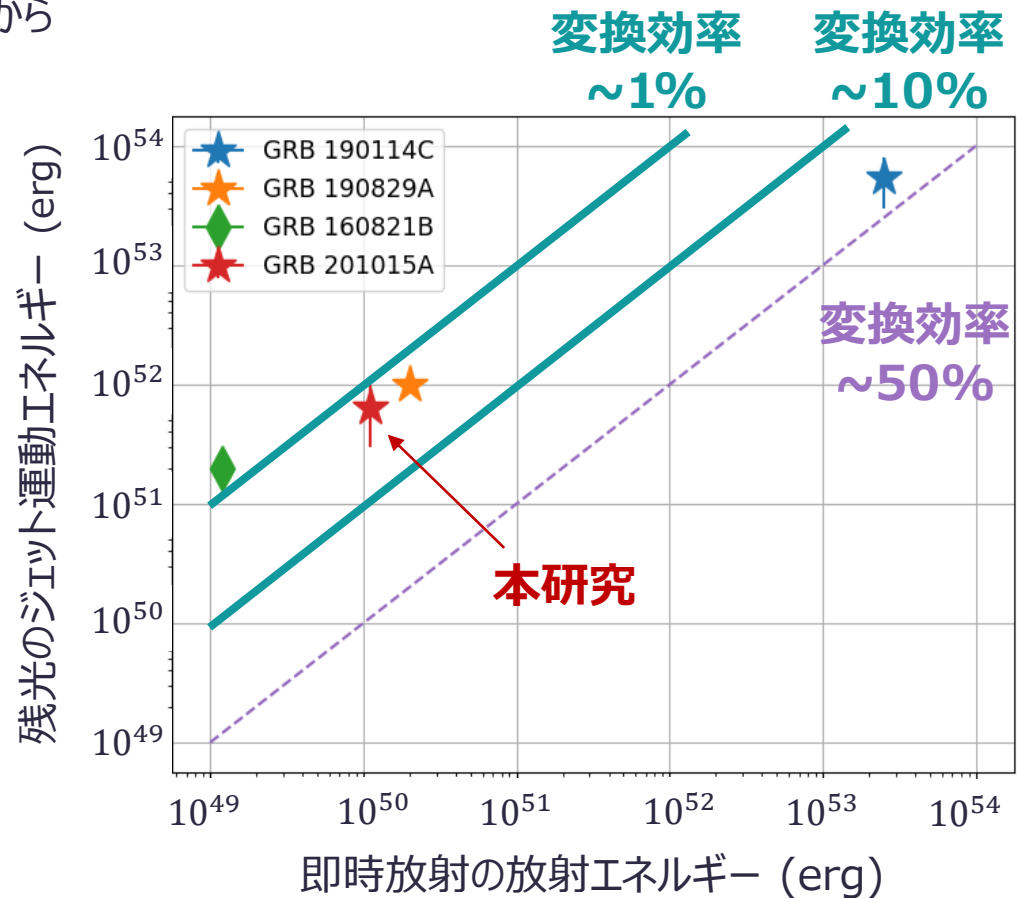
GRB201015Aの変換効率は 1 - 3 %

GRB190829A や GRB160821B と同様に変換効率は悪い傾向を示す (内部衝撃波モデルで説明可能)

GRB190114C (変換効率: ~30 %) とそれ以外のVHE-GRB とで即時放射の放射機構が異なる可能性 (ex. 光球、磁気再結合)

即時放射が暗いほど変換効率は悪くなることの示唆

系統的な研究にはもっとサンプル数が必要



VHEガンマ線を放つGRBの即時放射における変換効率

変換効率：即時放射でジェット運動エネルギーから放射エネルギーに変換された効率

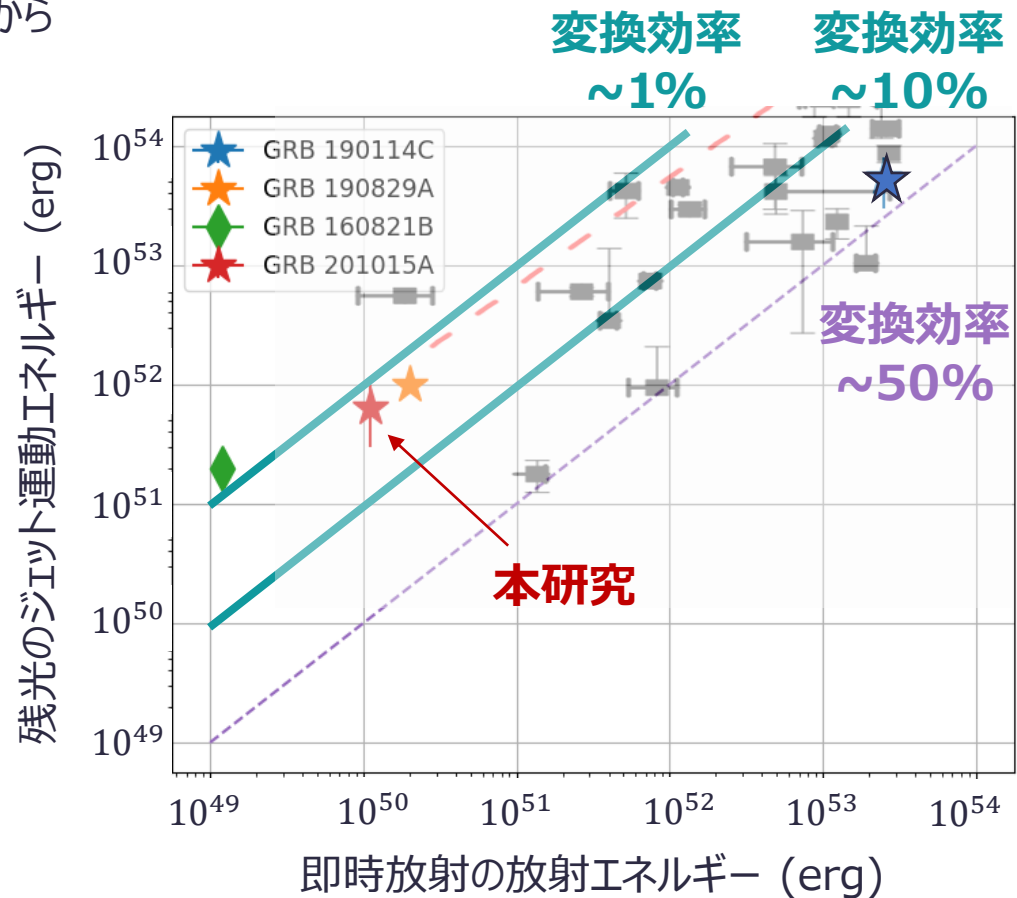
GRB201015Aの変換効率は 1 - 3 %

GRB190829A や GRB160821B と同様に変換効率は悪い傾向を示す (内部衝撃波モデルで説明可能)

GRB190114C (変換効率: ~30 %) とそれ以外のVHE-GRB とで即時放射の放射機構が異なる可能性 (ex. 光球、磁気再結合)

即時放射が暗いほど変換効率は悪くなることの示唆

系統的な研究にはもっとサンプル数が必要



まとめ・展望

まとめ

- 背景事象頻度を用いた大気透過度によるガンマ線エネルギー不定性の評価手法の開発
- MAGIC望遠鏡を用いて **GRB201015A** と **GRB201216C** を観測
 - VHEガンマ線を観測することで磁場増幅に変換されたエネルギーの割合の不定性を $\epsilon_B = 10^{-2} - 10^{-3}$ まで軽減
 - **GRB201015A** は即時放射でジェットの運動エネルギーから放射エネルギーに変換された効率が 1 - 3 % だと分かった
 - **GRB201216C** は大気チェレンコフ望遠鏡で検出された、VHEガンマ線を放つ天体としては最遠方 ($z = 1.1$)

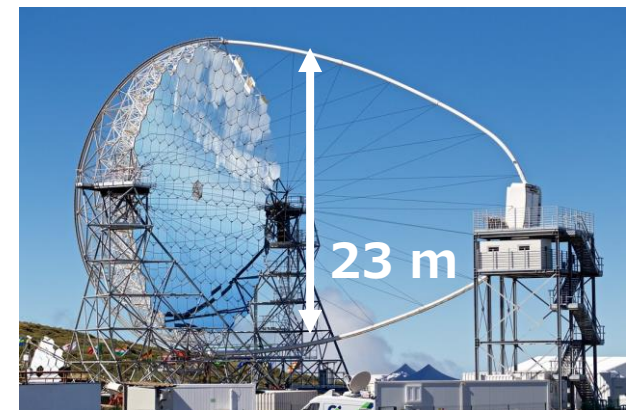
展望

VHEガンマ線を放つガンマ線バーストを系統的に研究するには、サンプル数がより必要

➔ **次世代チェレンコフ望遠鏡アレイ CTA**

低エネルギー閾値(20 GeV)・高速回転(9度/秒)が特徴の大口徑望遠鏡LSTを用いてガンマ線バーストの即時観測を行う

大口徑望遠鏡 LST 初号機



詳しい展望：時間依存性を考慮した有意度計算

General expression of Li&Ma:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= P(N_{on} | \langle N_{on} \rangle) P(N_{off} | \langle N_{off} \rangle) \\ &= \frac{e^{-(\bar{s}+\bar{b})T_{on}} ((\bar{s}+\bar{b})T_{on})^{N_{on}}}{N_{on}!} \frac{e^{-\bar{b}T_{off}} (\bar{b}T_{off})^{N_{off}}}{N_{off}!}\end{aligned}$$



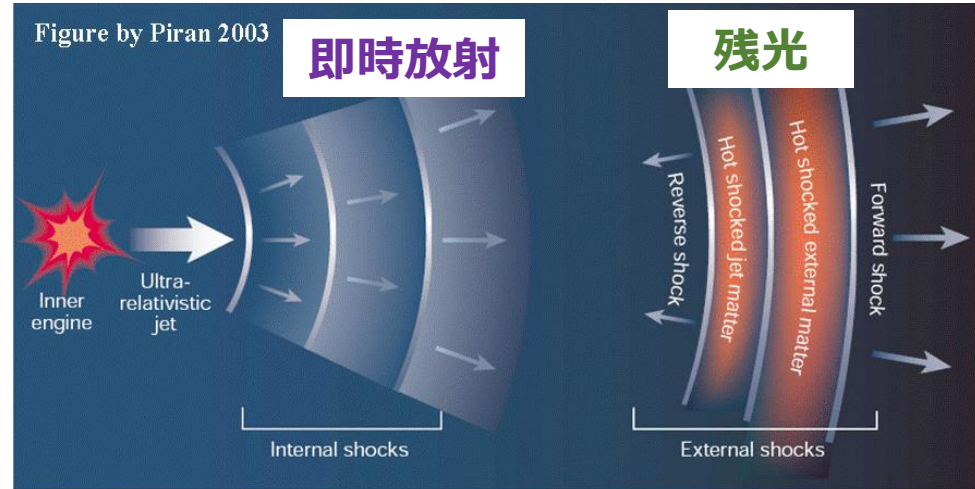
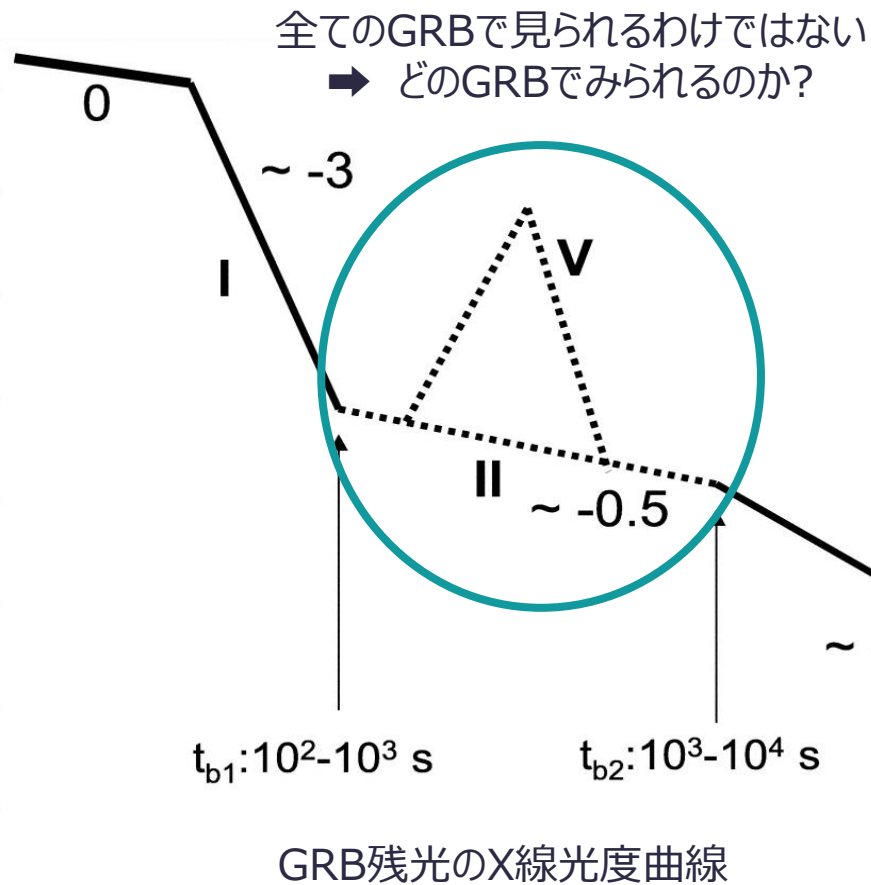
1. Time dependence of photon flux (counts)
2. Time dependence of instrument response



**Dedicated method to detect
transient sources**

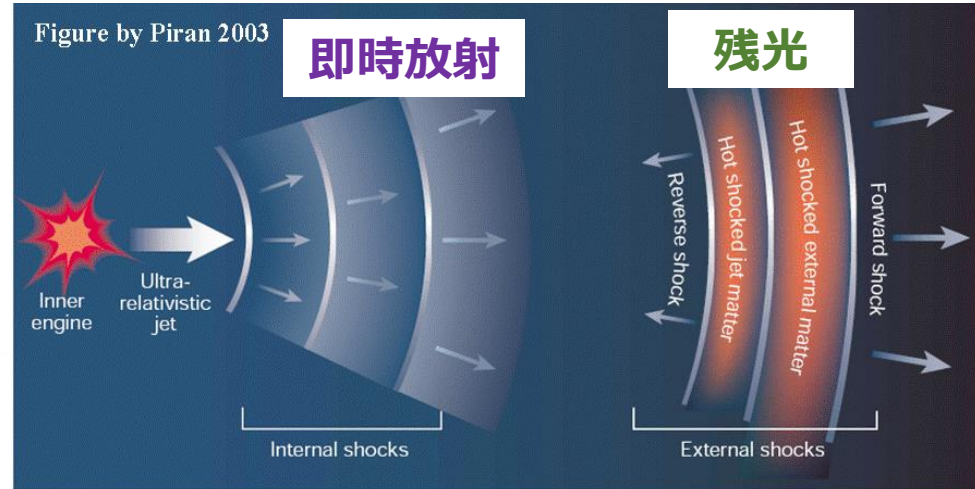
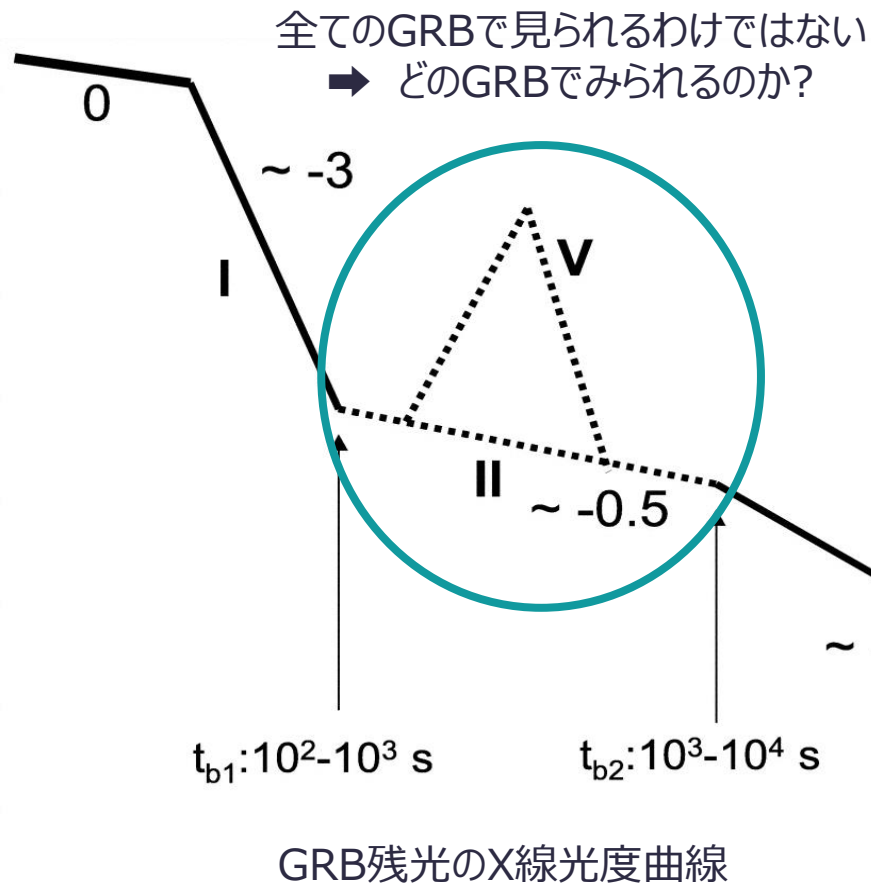
➔ More samples

詳しい展望： External Shock Model の検証



標準的な External Shock Model で
 X-ray Lightcurve がどこまで説明できるのか?

詳しい展望： External Shock Model の検証



可視光・電波・ガンマ線のデータから
 External Shock のパラメータを決定

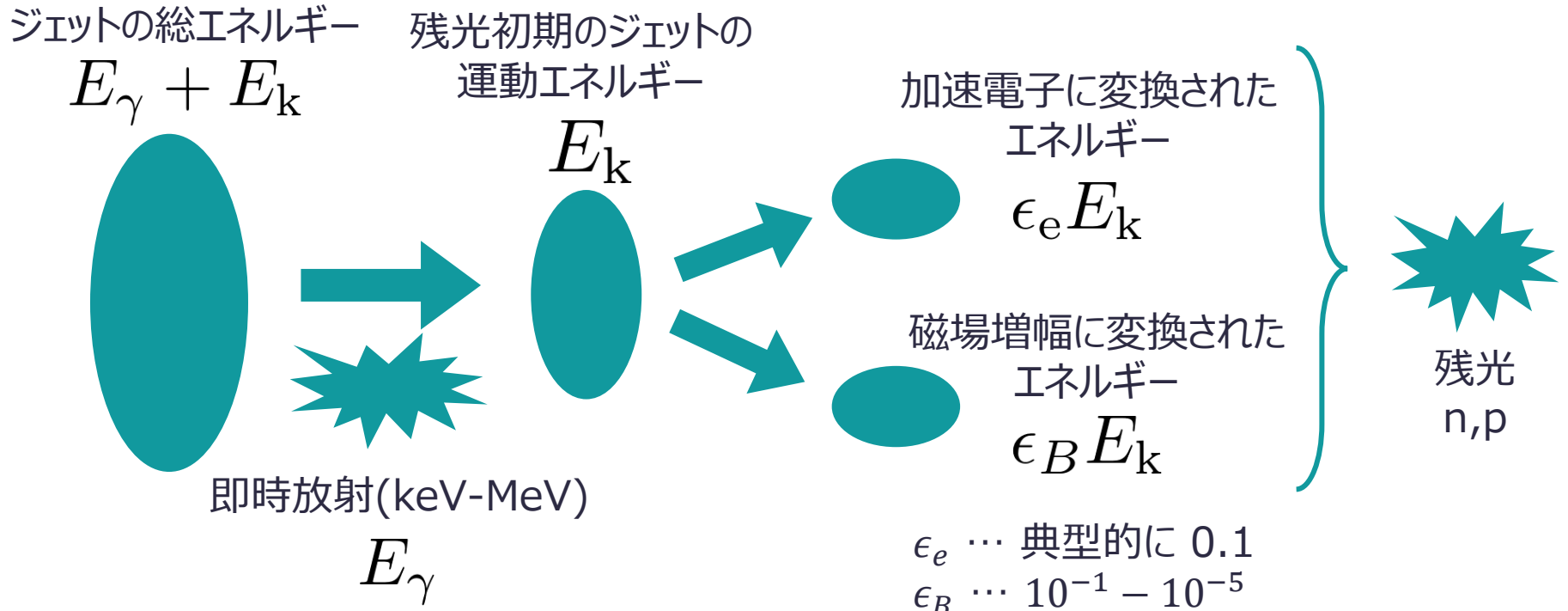
→ X線LCとの残差を検証

Backup

エネルギー収支

n : 星周物質の密度 (cm^{-3})

p : 注入された電子の冪指数



変換効率 \dots ジェットの総エネルギーのうち即時放射で放射された割合 $\frac{E_\gamma}{E_\gamma + E_k}$

内部衝撃波モデルと変換効率



Wang et al. (2015)

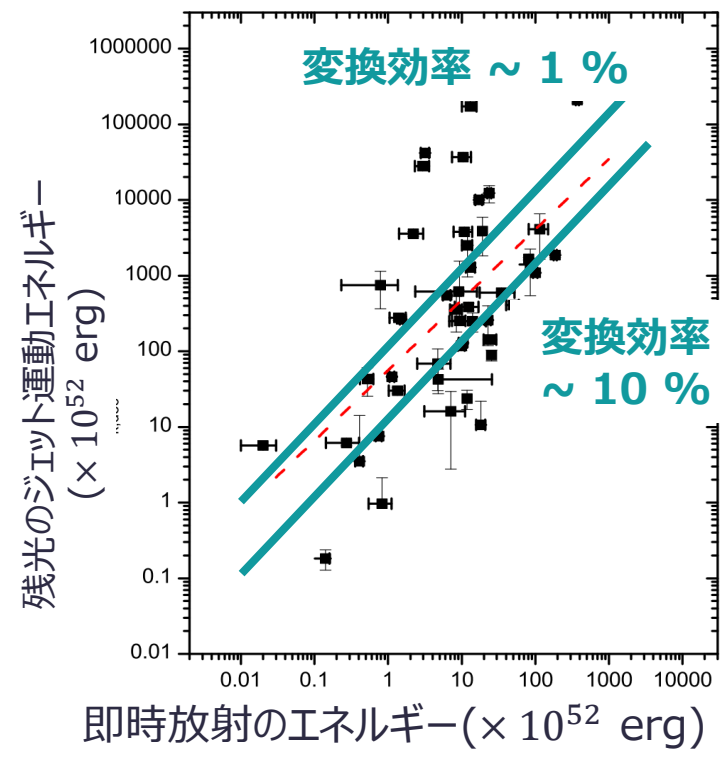
$$(\text{変換効率}) \approx 1 - 2\sqrt{\Gamma_s/\Gamma_r}$$

変換効率を上げるにはシェルローレンツ因子に大きな分散が必要

⇒ 理論的に変換効率は 1% ほど

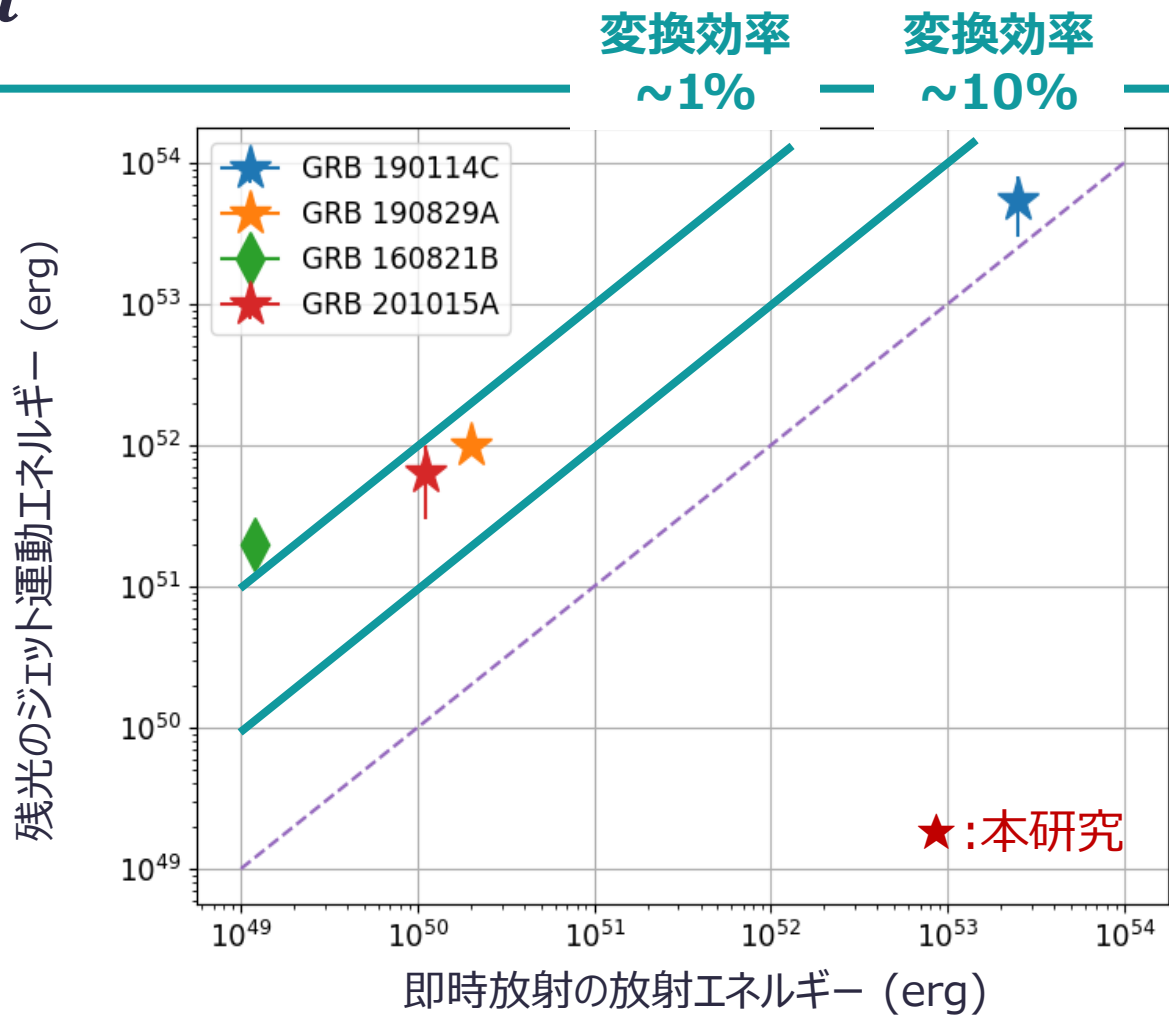
一方、観測から示唆される変換効率には数十%を超えるものが見つかった

X線残光のフラックスから残光時の運動エネルギーを算出
 しかし、 ϵ_e や ϵ_B は仮定しているため解析の不定性が残る



VHE GRB の $\epsilon_e, \epsilon_B, n$

n : 星周物質の密度 (cm^{-3})



- GRB190114C: $\epsilon_e = 0.07, \epsilon_B = 8 \times 10^{-5}, n = 0.5$
 GRB190829A: $\epsilon_e = 0.39, \epsilon_B = 8.7 \times 10^{-5}, n = 0.09$
 GRB160821B: $\epsilon_e = 0.5, \epsilon_B = 1 \times 10^{-6}, n = 0.1$
 GRB201015A: $\epsilon_e = 0.1, \epsilon_B = 10^{-2} - 10^{-3}, n = 0.1 - 1$

注入電子分布 ～急速冷却 & 遅緩冷却～

残光ではシンクロトロンによる冷却が強いケース(fast cooling)と弱いケース (slow cooling) を考える

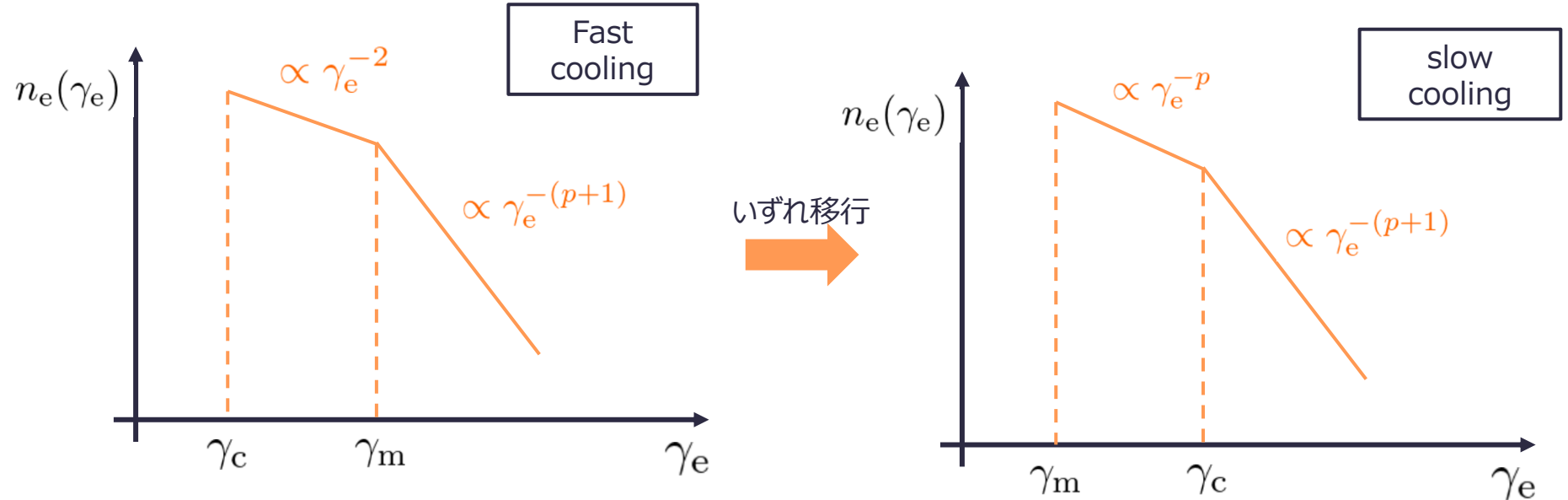
$$\varepsilon_{m,c} = \frac{\Gamma}{1+z} \frac{3\hbar e B'}{2m_e c} \gamma_{m,c}'^2 \quad B' = \sqrt{8\pi\varepsilon_B U'_d} = \Gamma \sqrt{32\pi\varepsilon_B n_{ex} m_p c^2}$$

初期には Γ も大きく、磁場も強いので fast cooling となる

γ_m : 電子注入時の最低ローレンツ因子
 γ_c : 電子の冷却が効き始めるローレンツ因子

電子のエネルギー空間における連続の式 :

$$\frac{\partial}{\partial \gamma_e} [\dot{\gamma}_e n_e(\gamma_e)] = \dot{n}_{inj} \propto \gamma_e^{-p} \quad (\gamma_e > \gamma_m)$$



残光スペクトル： 外部衝撃波モデル

$$\varepsilon_m \simeq \frac{\Gamma}{1+z} \frac{3\hbar e B'}{2m_e c} \gamma_m'^2$$

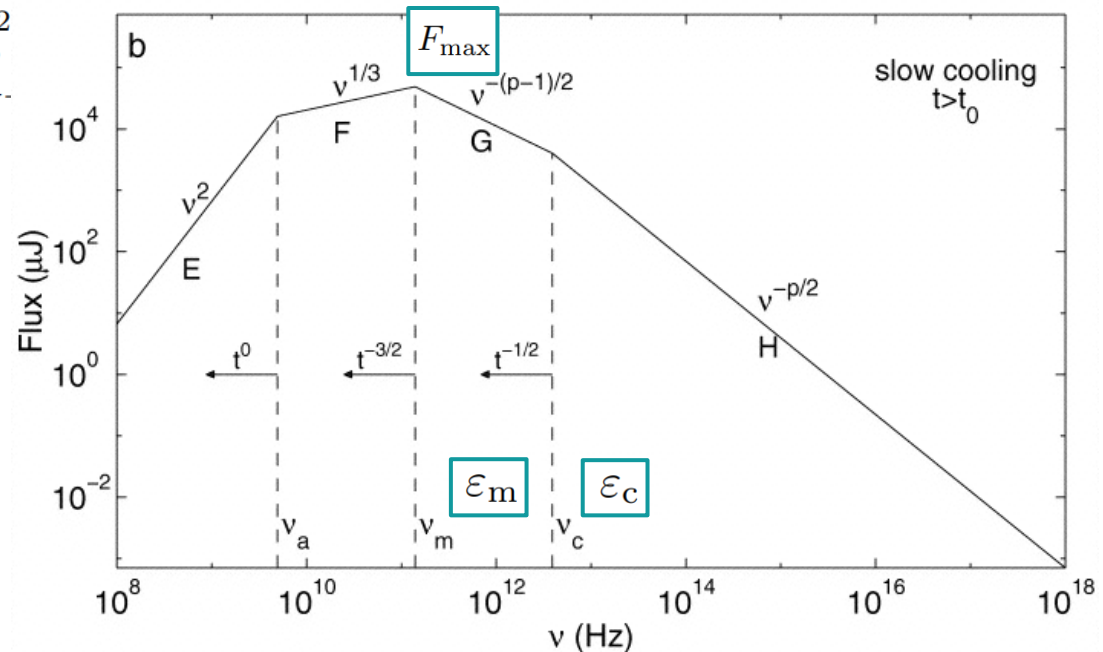
$$\simeq 0.28(1+z)^{\frac{1}{2}} f_{1/6}^2 \eta^{-2} \epsilon_{e,-1}^2 \epsilon_{B,-1}^{\frac{1}{2}} E_{52}^{\frac{1}{2}} t_h^{-\frac{3}{2}} \text{ eV}$$

F_{\max} : 個数フラックスの最大値

$$\varepsilon_c \simeq 3.1(1+z)^{-\frac{1}{2}} \epsilon_{B,-1}^{-\frac{3}{2}} E_{52}^{-\frac{1}{2}} n_0^{-1} t_h^{-\frac{1}{2}} \text{ eV}$$

$$F_{\max} \simeq (1+z) \frac{N_e}{4\pi D_L^2} \frac{\sqrt{3}e^3 B'}{16\hbar m_e c^2} \Gamma$$

$$\simeq 1.4 \times 10^{-11} (1+z) \eta \epsilon_{B,-1}^{\frac{1}{2}} E_{52} n_0^{\frac{1}{2}} D_{28}^{-2} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ eV}$$

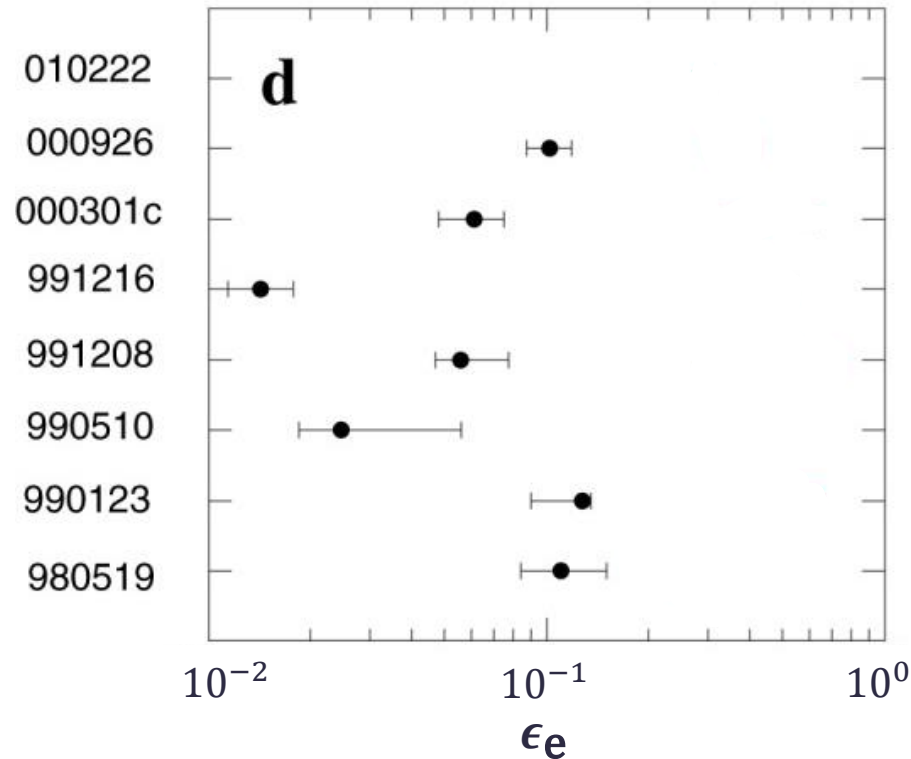


ϵ_e の値がとる範囲

Yost et al. (2003)

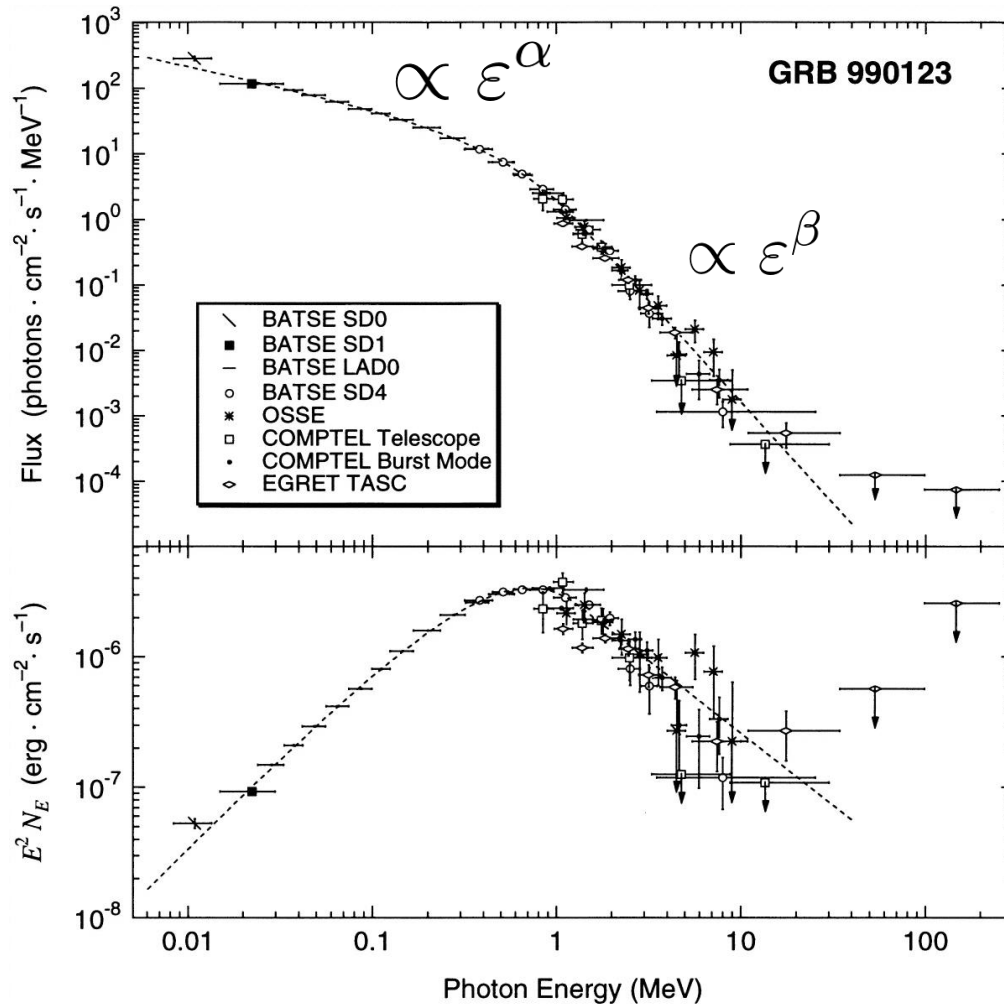
GRB	χ^2	dof	t_{cm}^a	t_{jet}	t_{NR}	E^b (t_{cm})	E (1 day)	θ_{jet} (rad)	n (cm^{-3})	$A(V)$ (Host)	p	ϵ_e	ϵ_B (%)
970508	596	257	0.082	183	203	$3.7^{+0.1}_{-0.1}$	1.6	$0.84^{+0.03}_{-0.03}$	$0.20^{+0.01}_{-0.02}$	$0.14^{+0.02}_{-0.02}$	$2.1223^{+0.003}_{-0.0008}$	$0.342^{+0.008}_{-0.01}$	$25.0^{+0.6}_{-2}$
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}	$0.022^{(<0.037)^c}$	$2.79^{+0.05}_{-0.04}$	$0.15^{+0.01}_{-0.01}$	$2.2^{+0.5}_{-0.6}$

Panaitescu & Kumar (2003)



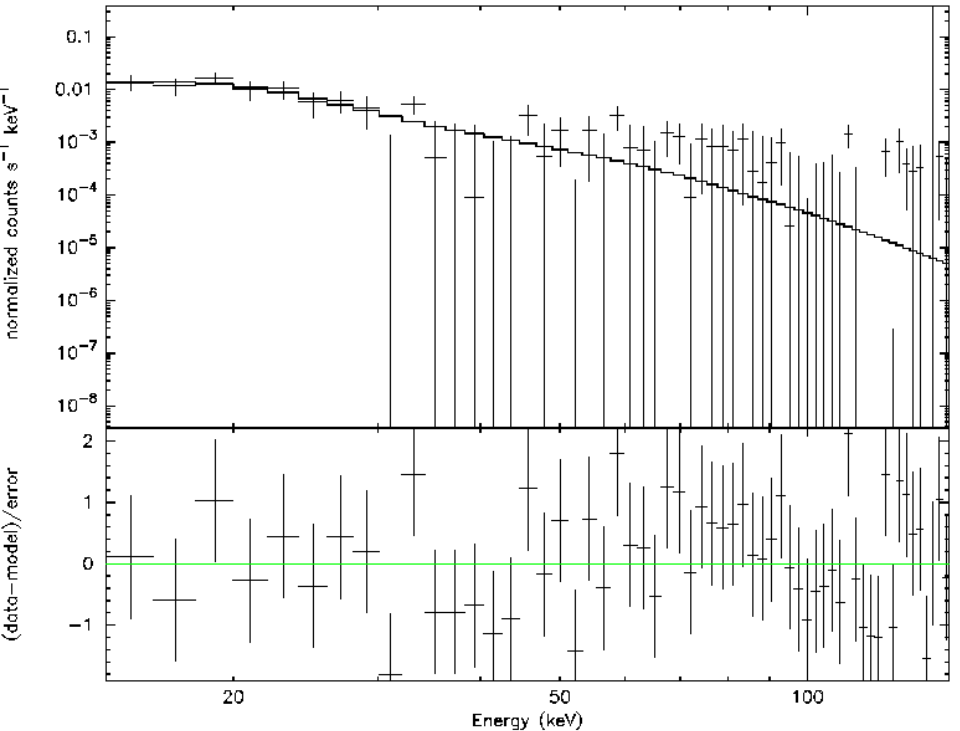
バンド関数

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100\text{keV}} \right)^\alpha \exp \left(- \frac{(2+\alpha)E}{E_{\text{pk}}} \right) & E \leq \frac{\alpha-\beta}{2+\alpha} E_{\text{pk}} \\ A \left(\frac{(\alpha-\beta)E_{\text{pk}}}{(2+\alpha)100\text{keV}} \right)^{\alpha-\beta} \exp(\beta - \alpha) \left(\frac{E}{100\text{keV}} \right)^\beta & E > \frac{\alpha-\beta}{2+\alpha} E_{\text{pk}} \end{cases}$$



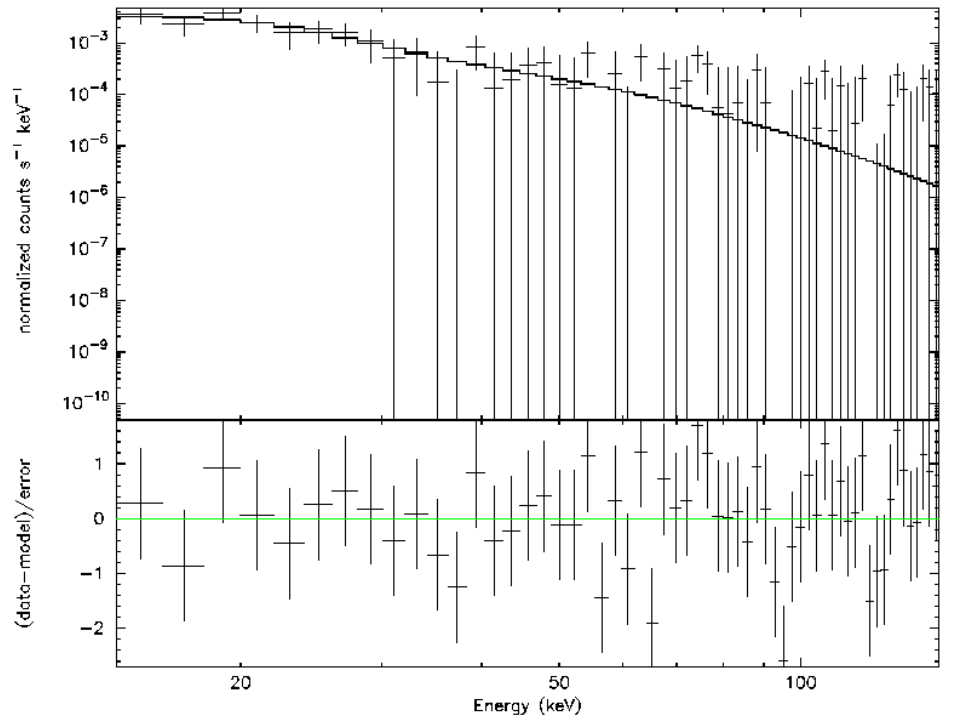
GRB201015A: 即時放射のスペクトル (BAT)

0.084 – 1.084 s



バンド関数の低エネルギー冪指数 = **3.4**
ピークエネルギー : 16 keV

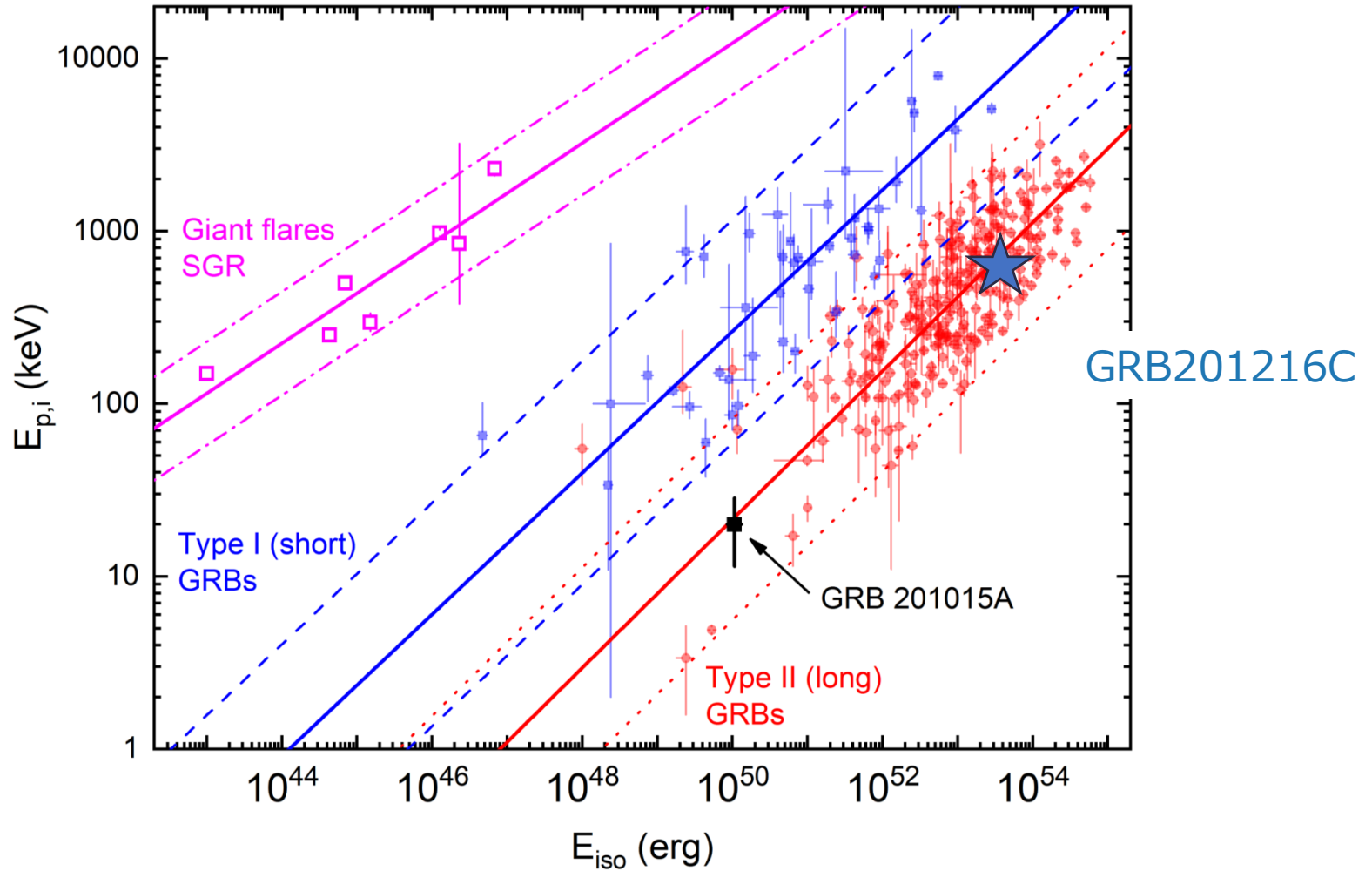
0.016 – 10.352 s



バンド関数の低エネルギー冪指数 = **-1.5**
ピークエネルギー : 7.8 keV

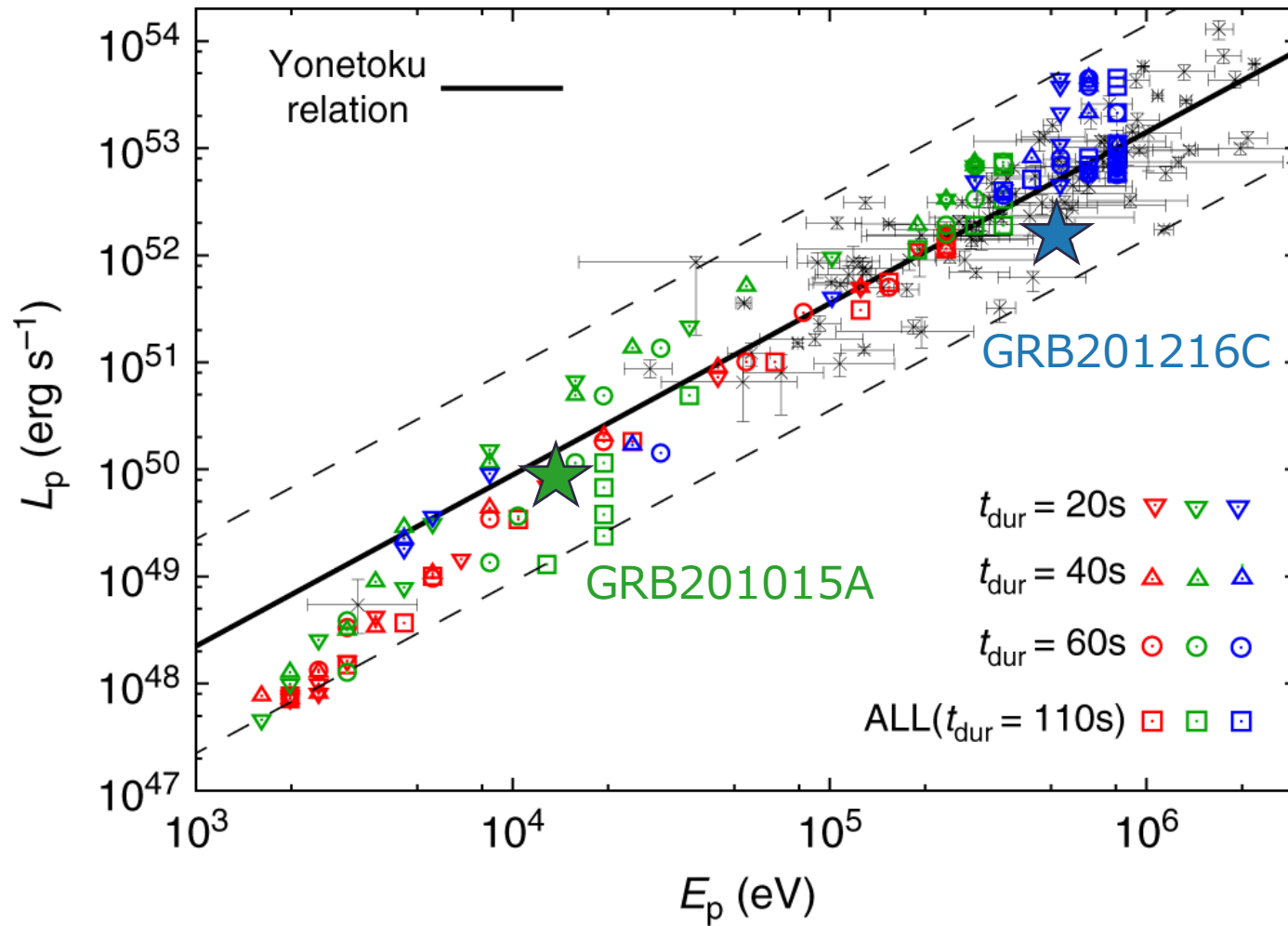
Amati 関係

Minaev et al., 2020 (GCN 28668)



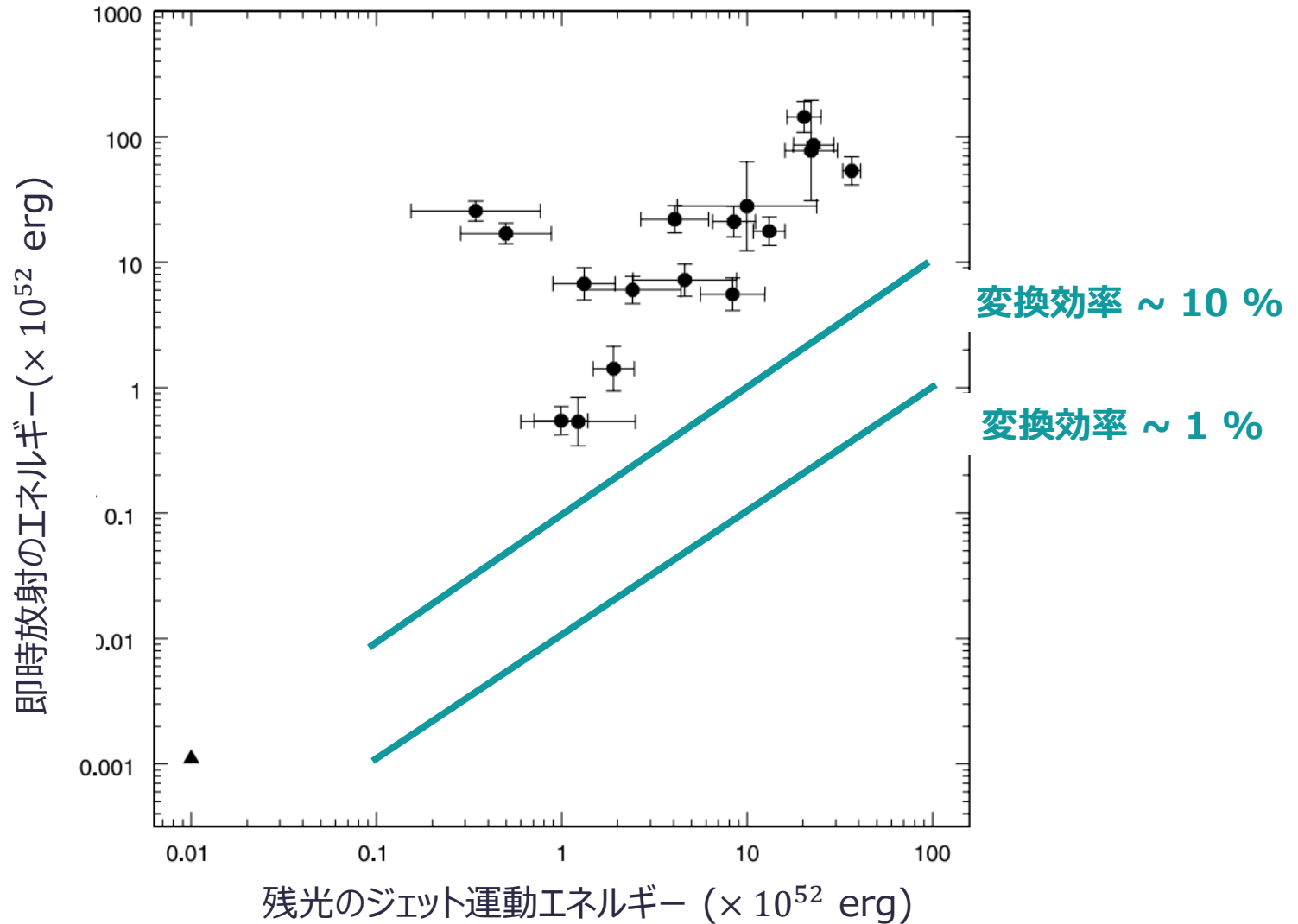
Yonetoku 関係

Hirota et al. (2019)

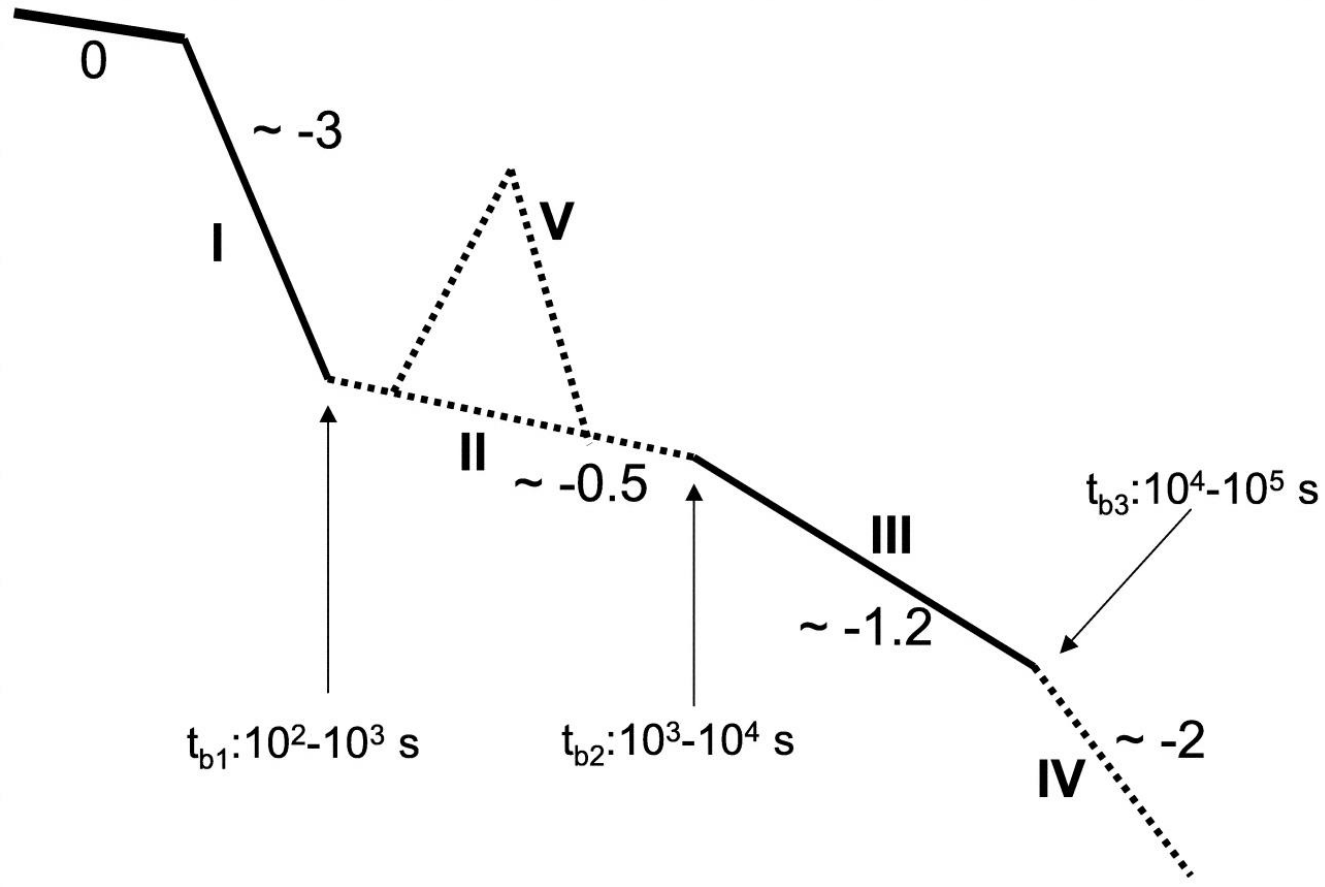


E_γ VS E_k (他の例。ただし古い)

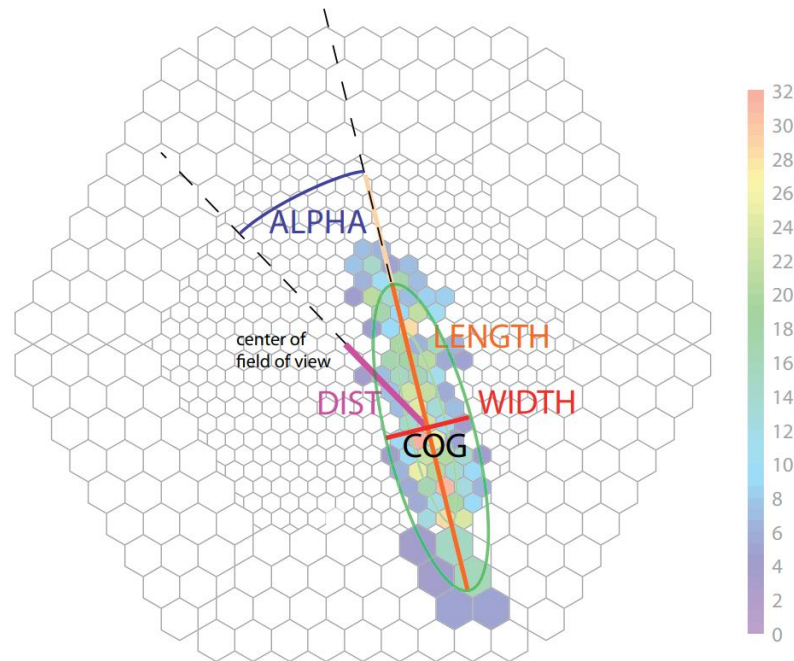
Lloyd-Ronning and Zhang (2004)



X線残光の振舞い



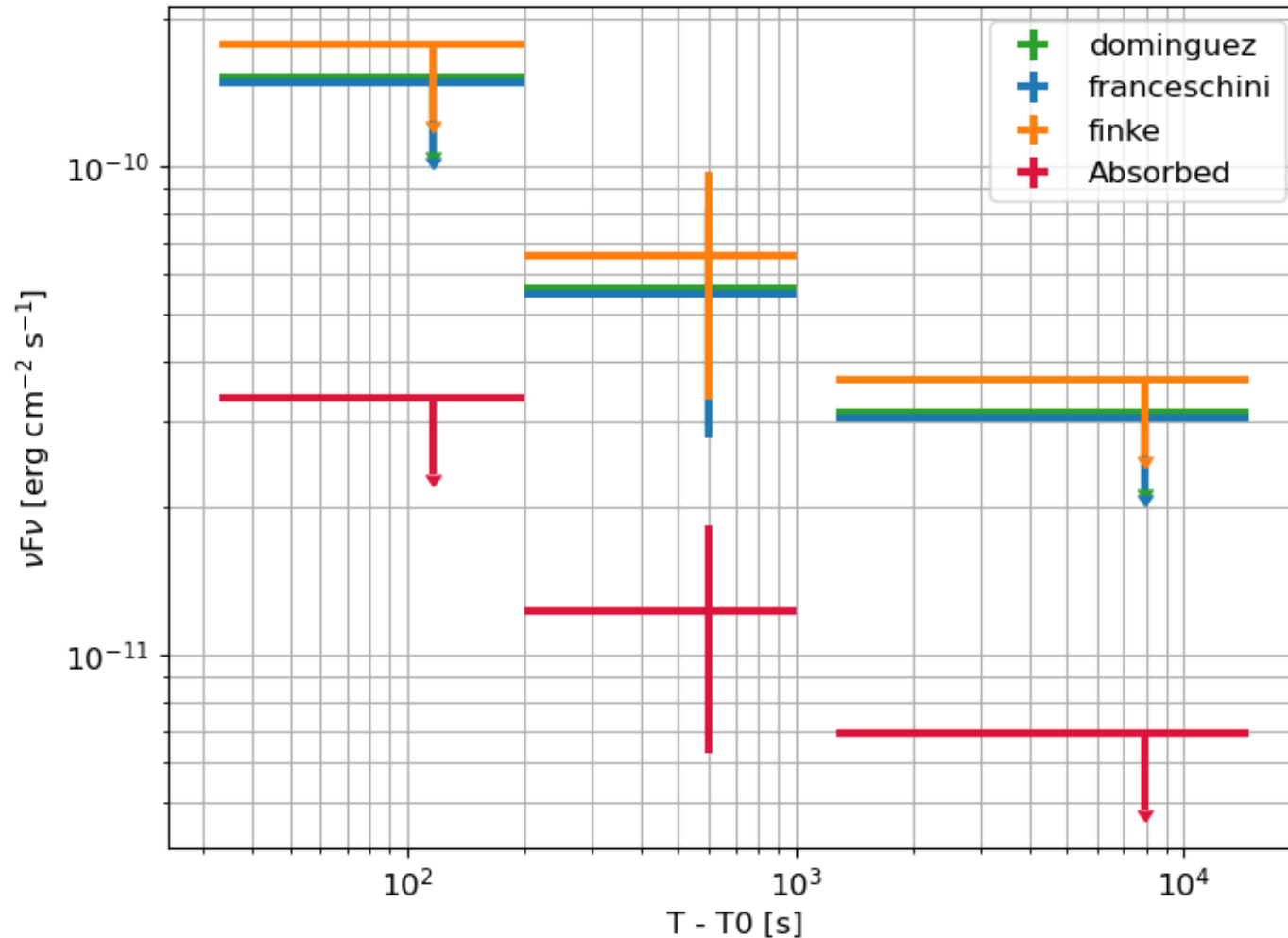
Hillas パラメータ



SIZE	楕円内に含まれる総電荷量
WIDTH	楕円の短軸方向の電荷の二乗平均平方根
LENGTH	楕円の長軸方向の電荷の二乗平均平方根
CoG (Center of Gravity)	楕円内の電荷重心
DIST	COG から視野中心までの距離
ALPHA	視野中心と COG を結ぶ線と楕円の長軸が成す角
IMPACT	シャワーの到来位置から視野中心までの同一平面上の距離
MaxH	シャワーの最大発達光度
LEAKAGE	カメラの最外縁のピクセルに含まれる電荷量
PGrand	楕円の長軸方向に沿った到達時間の傾き

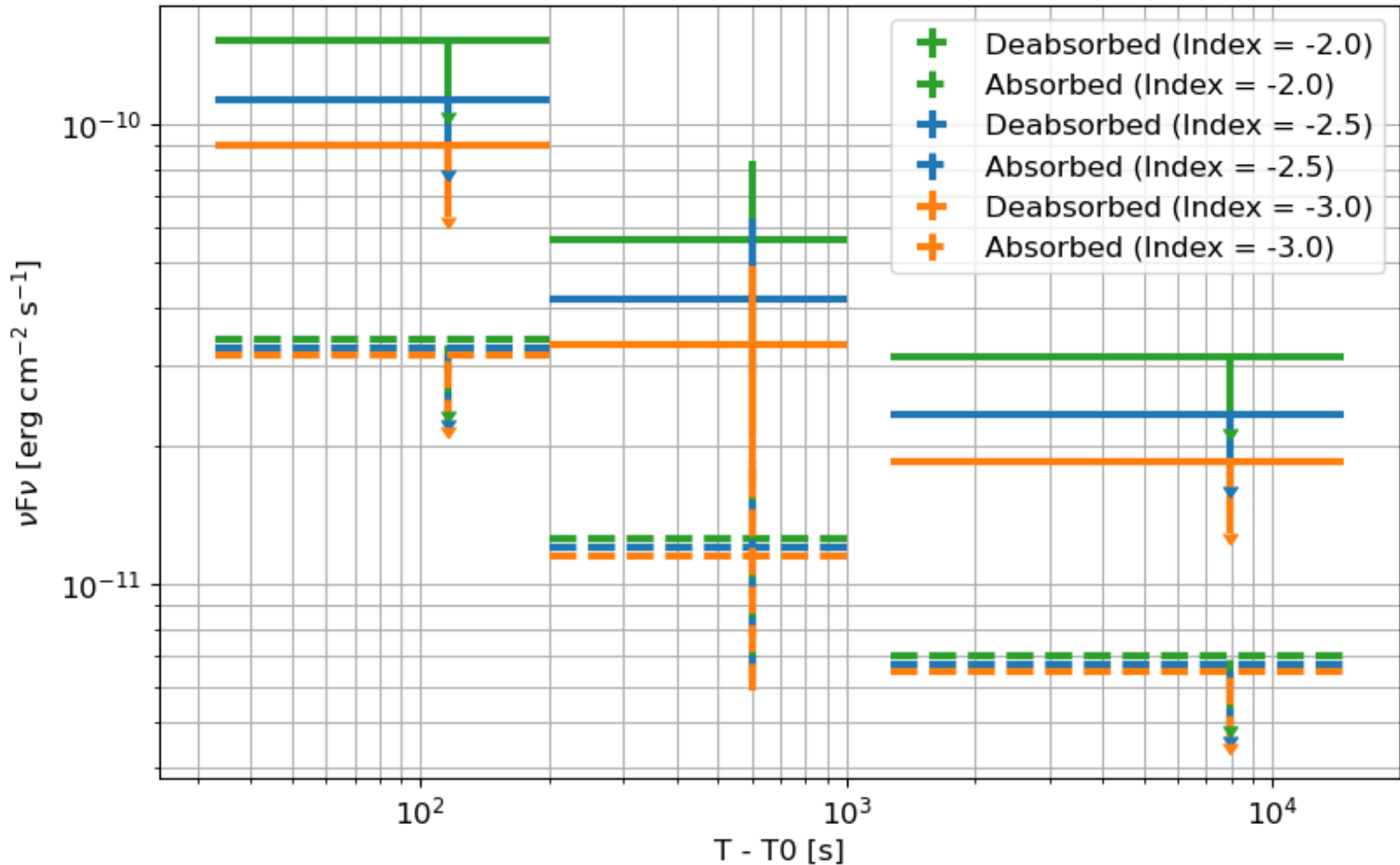
GRB201015A: MAGIC VHE強度変動

使用する EBL モデルによる系統誤差
(冪は -2.0 で固定)



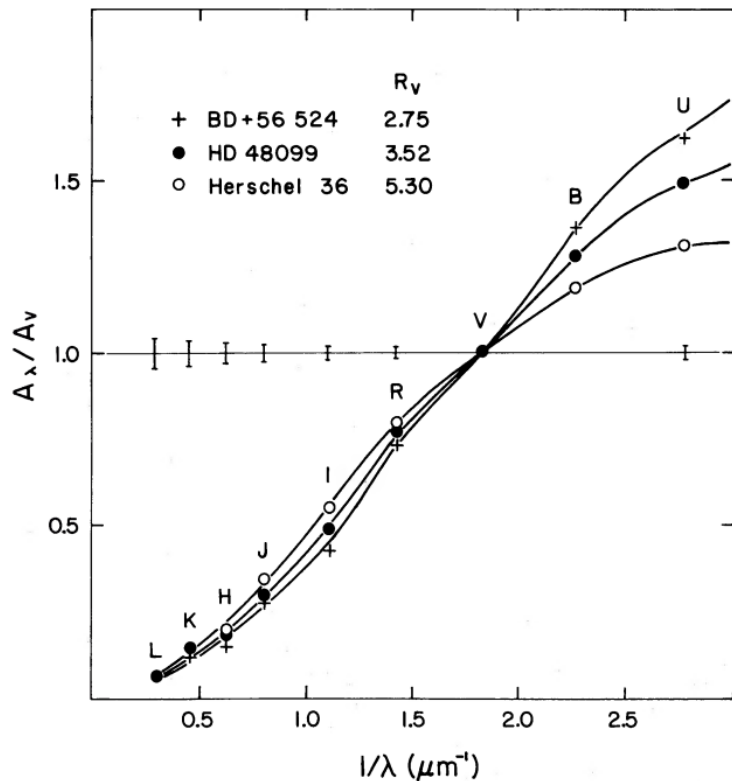
GRB201015A: MAGIC VHE強度変動

仮定する光子数スペクトルの冪指数による系統誤差
(使用する EBL モデルは Dominguez et al. (2011) で固定)



Optical の Extinction の補正 : 方法

Cardelli, Clayton, and Mathis (1989)



$$\langle A(\lambda)/A(V) \rangle = a(x) + b(x)/R_V$$

$$R_V = A(V)/E(B-V)$$

Optical/NIR: $1.1 \mu\text{m}^{-1} \leq x \leq 3.3 \mu\text{m}^{-1}$ and $y = (x - 1.82)$;

$$a(x) = 1 + 0.17699y - 0.50447y^2 - 0.02427y^3 + 0.72085y^4 + 0.01979y^5 - 0.77530y^6 + 0.32999y^7; \quad (3a)$$

$$b(x) = 1.41338y + 2.28305y^2 + 1.07233y^3 - 5.38434y^4 - 0.62251y^5 + 5.30260y^6 - 2.09002y^7. \quad (3b)$$

R_V は平均的な 3.1 を採用

