

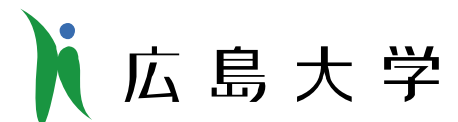
GRB 091208B 初期残光の 光度曲線と 可視偏光の考察

川端 弘治 広島大学



共同研究者

上原岳士 (広島大学)、當真賢二 (大阪大学)、
小松智之、山中雅之、笹田真人、伊藤亮介、大野雅功、
植村誠、大杉節 (広島大学)、
山崎了 (青山学院大)、中屋秀彦 (国立天文台)



可視初期残光の偏光によって何を探るのか

残光の輻射機構

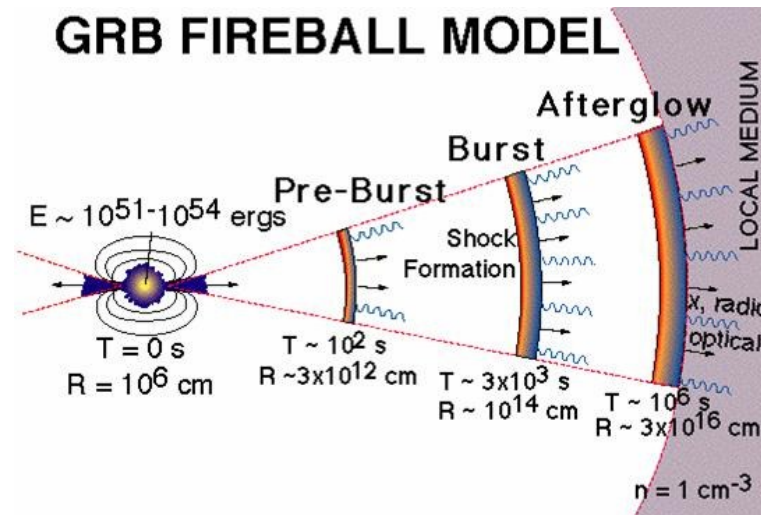
外部衝撃波・内部衝撃波領域におけるシンクロトロン輻射

プロンプト放射の輻射機構

継続時間が ~ 100 秒を超えるGRB
可視・近赤外輻射への寄与

- ・衝撃波領域の磁場構造
- ・幾何と運動(減速に伴うビーミング効果の変化)
- ・無衝突衝撃波のmicrophysics
- ・Optical flash(reverse shock)、prompt emission では数10%に及ぶ偏光?

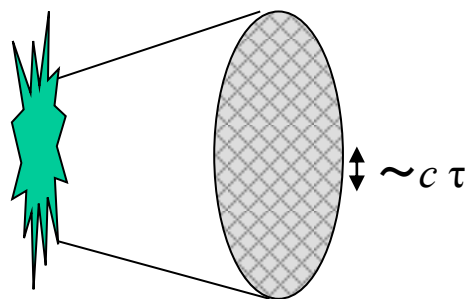
Lazatti (2006)



GRB残光の偏光：モデルとその予想

コヒーレントな磁場を持つパッチの集合

Gruzinov & Waxman (1999)



Local rest frame での磁場 coherent length

$l \sim c\tau$ (τ : shockからの固有時間)

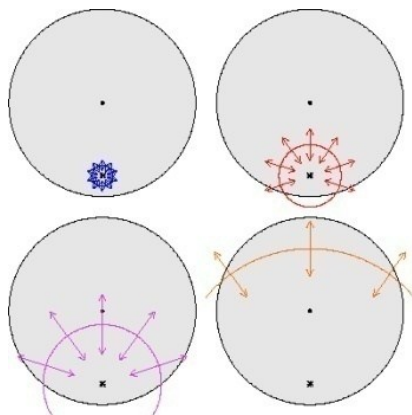
→ Coherentなパッチの数 ~ 50

→ 偏光度 $\sim 60\% / \sqrt{50} \sim 10\%$

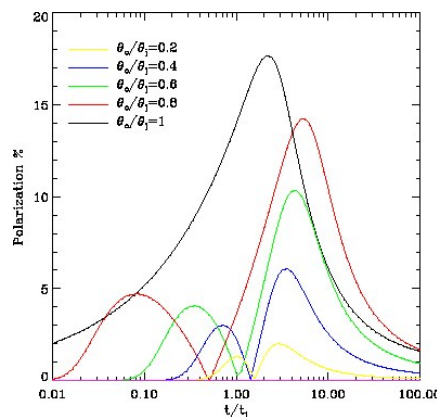
種磁場の起源は？

常に数%の偏光度
偏光度・方位角がゆるやか(且つランダム)に時間変化

圧縮磁場のタンジェンシャル方向の輻射と視線からわずかに反れたジェットの見かけ効果 (Sari 1999; Rossi+ 2004)



偏光度



爆発からの時刻 (t_{jet} で規格化)

ジェットブレイクまわりで偏光が大きく時間変化、方位角は一定もしくは $\pm 90^\circ$ 反転
初期は偏光小

過去のGRB残光の偏光観測

比較的良い精度での偏光の変化を追った観測例は3つのみ (GRB 020813, 021004, 030329)

ただし、いずれも爆発数時間後

GRB 020813以外は光度曲線が異常 (Lazzati 06)

初期残光 (<10³秒) の観測例は2つのみ

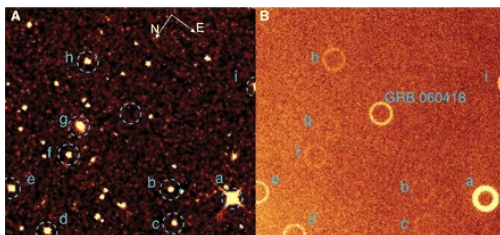
GRB 060418: Upper-limit 8%

(トリガーの203秒後から観測; Muldell+ 2007, Science)

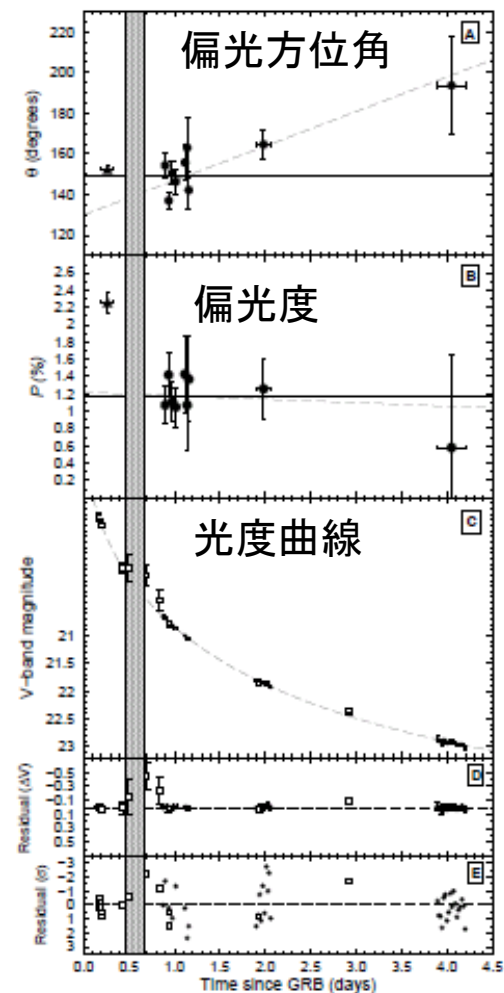
GRB 090102: 10.2 ± 1.3%

(トリガーの161秒後-optical flash中-から観測; Steele+ 2009, Nature)

明るい残光なら時間変化も追い易いのでは



GRB 060418 Liverpool
2m/RINGO Mundell+ 07



GRB 020813 Keck/VLT
Gorosabel+ 04

観測機器



広島大学
1.5mかなた望遠鏡

1.5m望遠鏡(方位軸速度5度/秒)と
1露出型偏光撮像器 HOWPol
を組み合わせた初期残光の偏光観測

- ✓ Swift/BATの位置誤差をカバーする広視野
- ✓ 1露出でストークスパラメーターを導出可
- ✓ 常時スタンバイ、アラートに即応



HOWPol

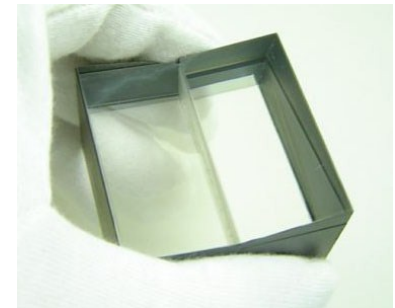
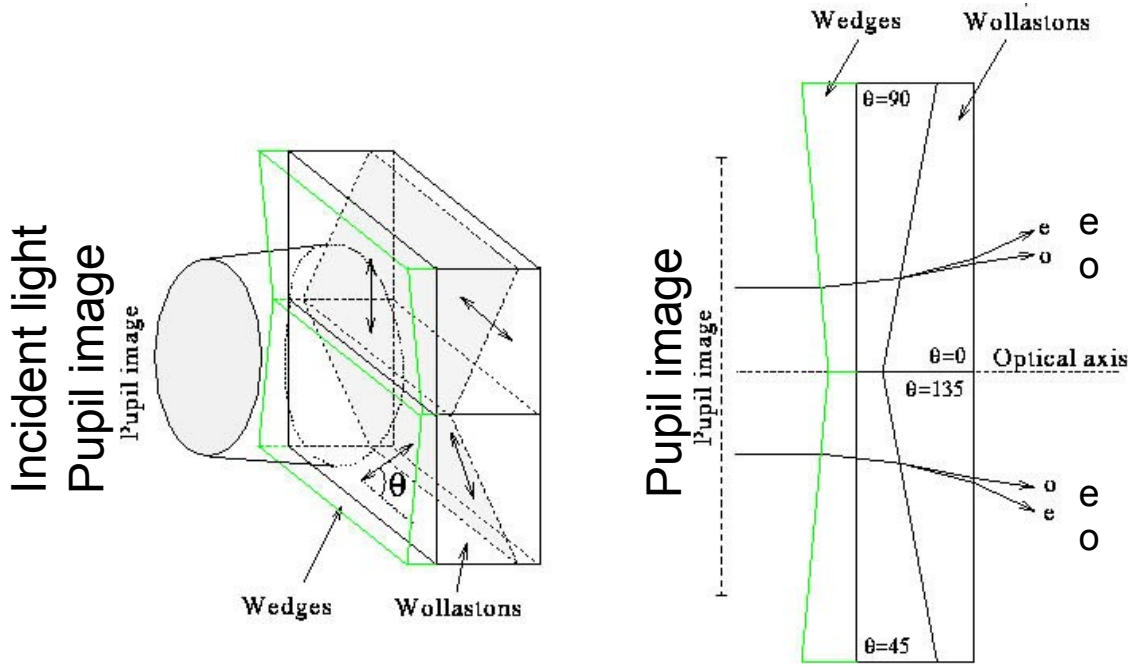
2005年開発開始 2009年5月よりGRB対応の観測を開始

波長域	450nm-1050nm (HPK製完全空乏型CCD)
観測モード	広視野撮像 (15' circle) 偏光撮像 (1露出型、4露出型) 広視野タイプ: 7×7分角視野 狭視野タイプ: 1×15分角視野(15分角Φ可) 分光 ($\lambda / d_\lambda \sim 400$)

Double wedged Wollaston prism

通常、Stokes I , Q , U パラメーターを導出するためには半波長板・偏光素子の方位角を回転させて撮影した2-4枚の露出を必要とする。

しかし、`Double wedged Wollaston prism' (Oliva 1997) を瞳像位置に置けば、一回の露出で I , Q , U パラメーターを導出可能となる。



狭視野型
MgF₂+SiO₂

広視野型
Rutile

Oliva 1997, A&AS, 123, 589

→ 1露出で偏光を測定

偏光測定精度： 器械偏光補正の完全性

ナスミス焦点にあるため $p \sim 4\%$ の器械偏光の補正が必要

$$Q = P \cos(2\theta_{instr} + \theta_0) + Q_0$$

φ : 緯度 H : 時角

$$U = P \sin(2\theta_{instr} + \theta_0) + U_0$$

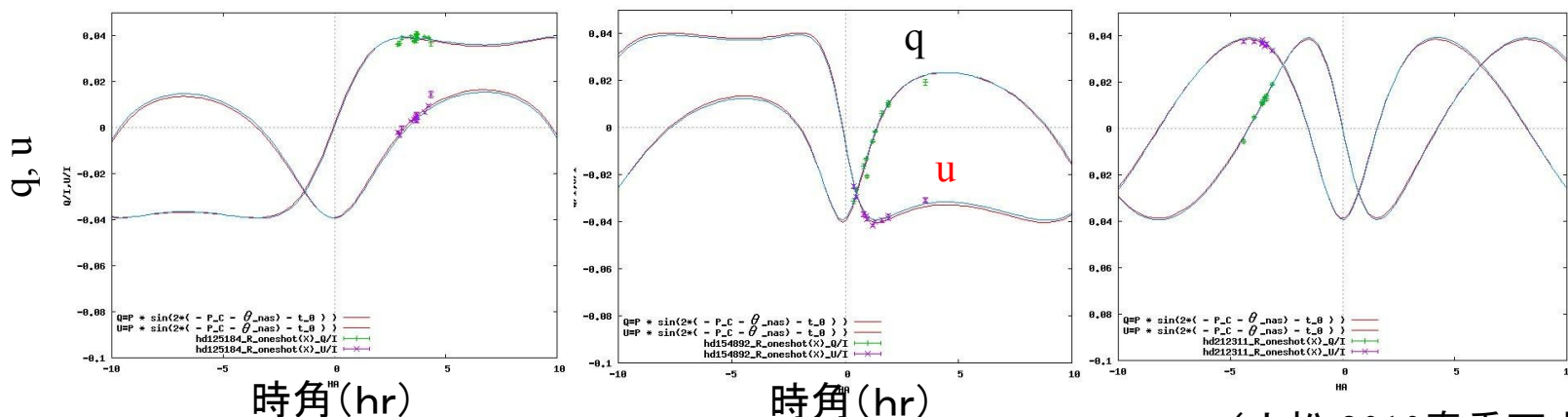
δ : 赤緯

$$\theta_{instr}(H) = \cos^{-1}(\sin\phi \sin \delta + \cos\phi \cos \delta \cos H) - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\sin H / \tan\phi \cos \delta - \sin \delta \cos H)$$

HD 126184 ($\delta = -07^\circ$)

HD 154892 ($\delta = +16^\circ$)

HD 212311 ($\delta = +58^\circ$)



(小松 2010春季天文学会)

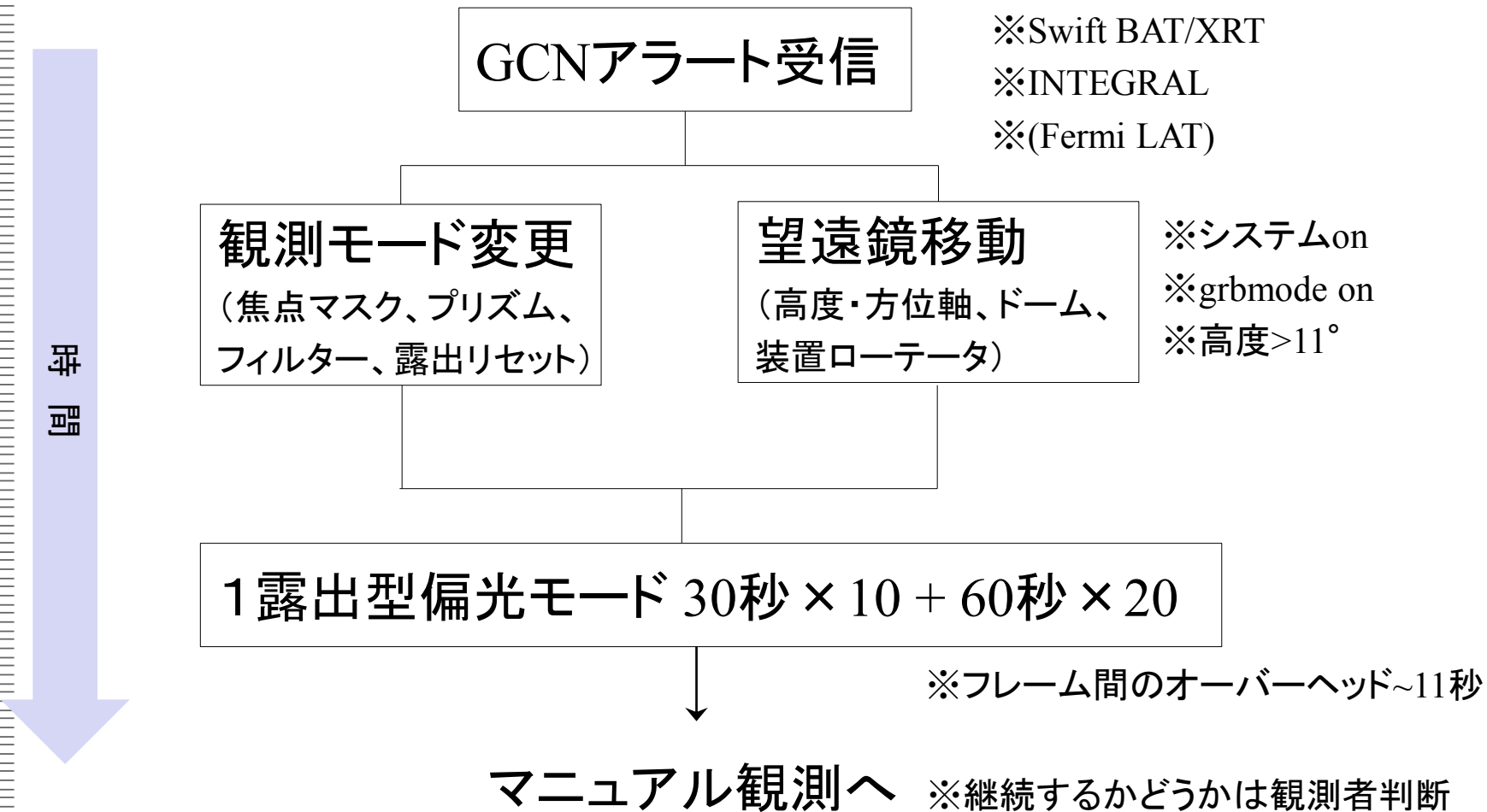
フィットしたモデル曲線からのずれ

$\sigma = 0.15\%$ (4露出型) 0.3% (1露出型)

任意の δ の天体に対し、 $\Delta p < 0.5\%$ 精度で補正可

かなた1.5m望遠鏡 GRB即応観測モード

2009年5月～ HOWPoi(ナスミス焦点)による偏光観測



これまでに行われた即応観測

GRB	T_1 受信時刻	T_2 露出開始	$T_2 - T_1$ (sec)	Obs Mode	z	OT? (GCN)	Our result	Comment
090529	14:29:18	14:30:46	88	Imaging	2.625	y	undetected	cloudy
090807	15:02:13	15:03:10	57	ImPol_Narrow	-	-	undetected	short burst
091104	8:57:06	8:57:51	45	ImPol_Narrow	-	-	undetected	
091208B	9:50:24	9:52:27	123	ImPol_Narrow	1.063	y	detected	obs 149s after trigger
100206	13:30:25	13:31:45	80	ImPol_Narrow	-	-	undetected	shutter trouble, short burst
100219	15:17:06	15:18:55	109	ImPol_Narrow	4.6667	y, faint	undetected	White=20.9 at 258s
100413	17:34:42	17:36:23	99	ImPol_Narrow	-	n	undetected	
100424	16:34:00	16:34:42	42	ImPol_Narrow	-	y, faint	undetected	White>21.2 at 128-2046s
100504	19:21:17	19:23:19	122	Grism	-	-	undetected	
100514	18:54:46	18:56:27	101	ImPol_Wide	-	-	undetected	instrument trouble
100526	16:48:01	16:49:48	107	ImPol_Wide	-	y	undetected	instrument trouble
100725B	11:24:52	11:26:39	107	ImPol_Wide	-	-	undetected	instrument trouble 2x2bin
100823	17:25:53	17:27:21	88	ImPol_Wide	-	-	undetected	instrument trouble 2x2bin
100901	13:35:08	13:40:00	292	ImPol_Wide	1.408	y	very faint	cloudy
100902	19:33:14	19:35:20	126	ImPol_Wide	-	y	undetected	instrument trouble
110106	15:25:43	15:27:39	116	ImPol_Wide	-	-	undetected	cloudy
110201	9:35:37	9:37:27	110	ImPol_Wide	-	-	undetected	R>14.5 at 51s MASTER II
110207	11:17:34	11:22:28	294	ImPol_Wide	-	-	undetected	V>17 at 747s TAROT
110312	18:05:02	18:06:34	92	ImPol_Wide	-	-	undetected	
110407	14:07:59	14:09:48	109	ImPol_Wide	-	y, faint	undetected	$g' > 19.3$ at 540s MITSuME
110411	19:34:32	19:35:44	72	ImPol_Wide	-	-	undetected	
110731	11:09:54	11:10:45	51	Impol_Narrow	-	y	undetected	cloudy; R=16.9 at 800 s
110915A	13:21:01	13:22:19	78	Impol_Narrow	-	-	undetected	V>19.35 at 616-5316 s

GRB 091208B

ガンマ線の特徴

T_{90} (15-350keV) = 14.9 ± 3.7 sec (GCN Rep. 266.1)

T_0 と T_0+8 sec の2回ピーク(前者の方が暗くソフト)

時間平均スペクトルは単純なべき乗 (1.74 ± 0.11)

X線残光の特徴

XRTの光度曲線(0.3-10keV)にバンプやミニ・フレア

T_0+156 sec で 1.6×10^{-10} erg/cm²/sec

光度曲線は broken power-law

$T_0+3.1 \times 10^5$ sec にジェット・ブレーク (?)

ブレーク前 $\alpha=1.1$ 、ブレーク後 $\alpha=2.3$

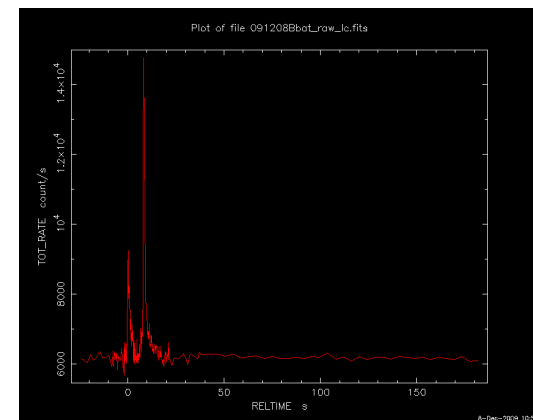
Best-fitスペクトルでの星間吸収 $(2.9 \pm 0.5) \times 10^{21}$ cm

可視残光

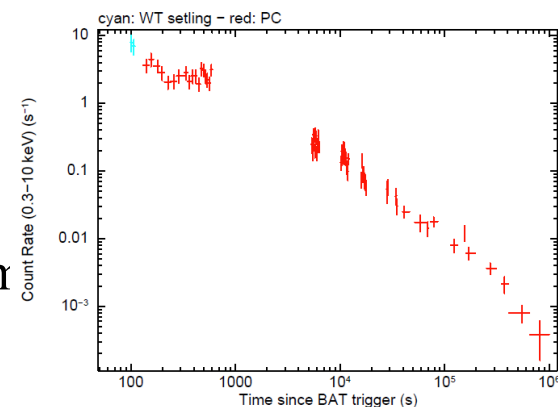
T_0+77 sec に $R=16.1$ 等の残光 (Nakajima+)

赤方偏移 $z = 1.063$ (Perley+)

$E_{\gamma,iso} > 2 \times 10^{52}$ erg (15-150keV) ¹⁰



ガンマ線光度曲線 (GCN Notice)



X線光度曲線 (GCN Rep. 266.1)

HOWPOI/かなた望遠鏡による観測

GCN Noticeを 09:50:23 UT に受信し自動起動

09:52:27(受信より123秒後、 T_0 の149秒後)に露出を開始

GRB残光の偏光観測開始例としては過去最早

1000秒以内の偏光観測例としては3例目

(Cf. Mundell+ 2007, Science; Steele+ 2009, Nature)

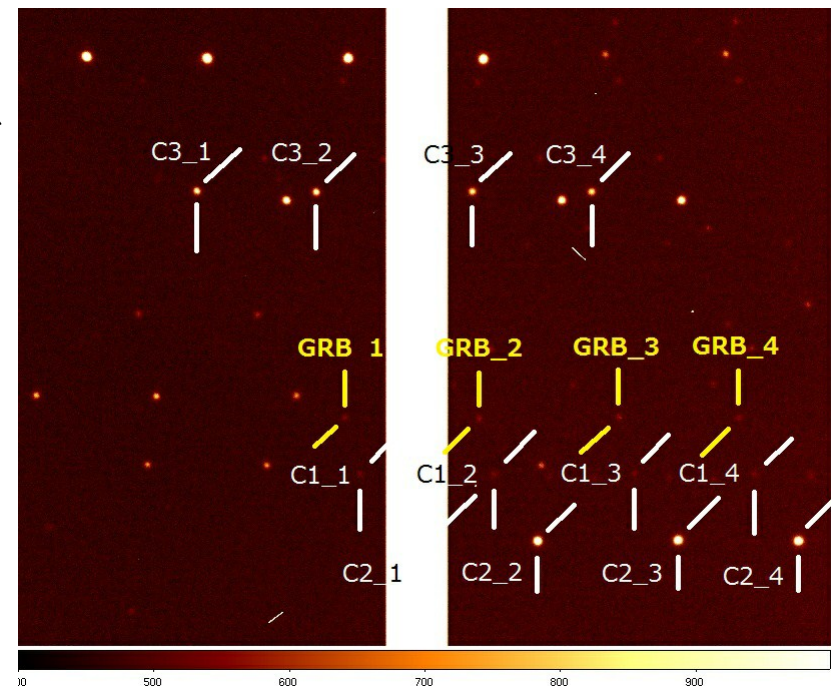
狭視野用1露出型ウォラストンプリズム
を使用

偏光較正精度 $\Delta p < 0.5\%$

星間偏光成分は無視可 ($< 0.5\%$)

Galactic ext. $E(B-V)=0.052$

(Schlegel+ 1998) $\rightarrow P_{\text{ISP}} < 0.5\%$

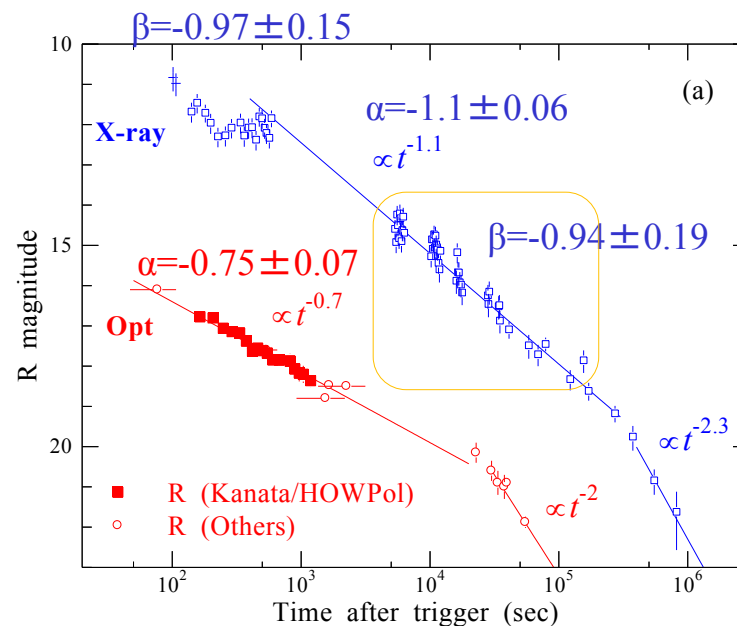


GRB 091208B: 可視・X線の光度曲線とSED 1

外部衝撃波モデル

$$F_\nu \propto t^\alpha \nu^\beta$$

(e.g., Sari et al. 1998)



$5 \times 10^3 \text{ s} < t < 3 \times 10^5 \text{ s}$ のX線強度

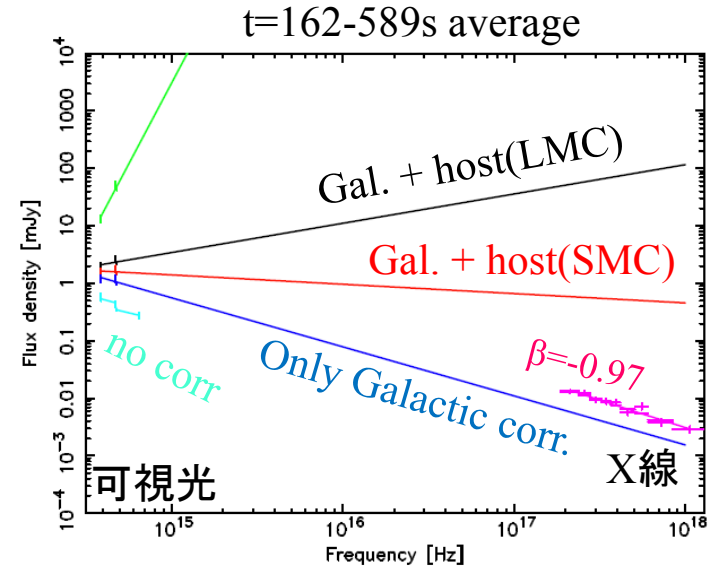
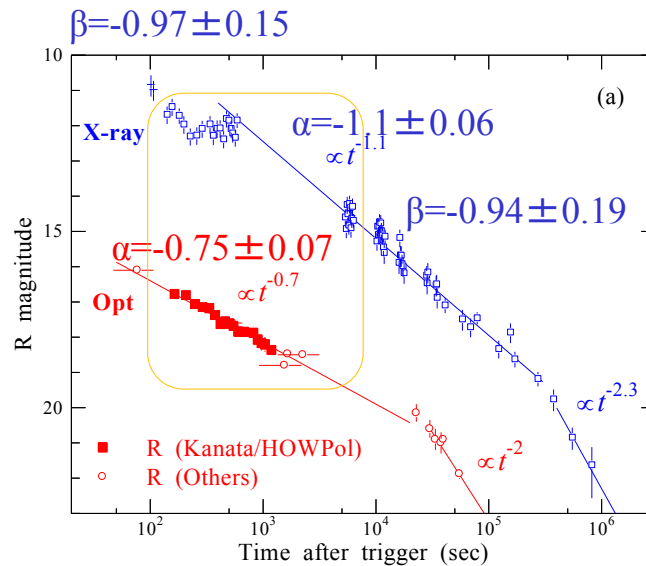
$$\alpha - 3/2\beta = 0.31 \pm 0.29$$

→ $v_m < v_X < v_c$ 、CSM $n \propto r^0$ 、($p \sim 2.5$) の場合、ないし

$v_X > v_c, v_m$ 、CSM $n \propto r^0, r^2$ 、($p \sim 2.1$) の場合の

closure relation (Zhang & Meszaros 2004) とコンシステント

GRB 091208B: 可視・X線の光度曲線とSED2



$t \sim 5 \times 10^3 \text{ s}$ の可視・X線強度

$$\alpha_O - \alpha_X = 0.35 \pm 0.13$$

$\rightarrow v_m < v_O < v_c < v_X$, CSM $n \propto r^0$ ($\alpha_O - \alpha_X = 1/4$) とコンシステント

X線: ダストによる吸収分は補正済み

$$\text{wabs (host)} : 0.873 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$$

$$\text{wabs (galactic)}: 0.048 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$$

$t \sim 300 \text{ s}$ の可視・X線強度

X線も可視も $v_m < v < v_c$ の範囲内にある同一起源の外部衝撃波モデルで説明可

SEDは「我々の銀河による吸収のみ」のモデルとコンシステント

X線のexcessはミニフレアetc.

GRB 091208Bの初期残光とその偏光

$t \sim 300$ s の可視・X線強度

X線も可視も $v_m < v < v_c$ の範囲内にある同一起源の外部衝撃波モデルで説明可

SEDは我々の銀河による吸収のみ (X線の excessはミニフレア etc.)

偏光とその変化

ガンマ線トリガーから150秒 - 700秒に亘り
、偏光度 $p \sim 10-11 (\pm 4)$ % のおおよそ一定の有意な偏光が存在した可能性

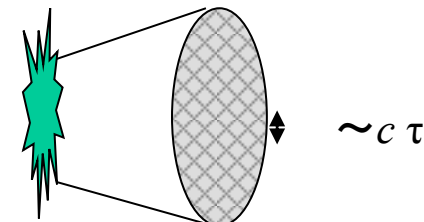
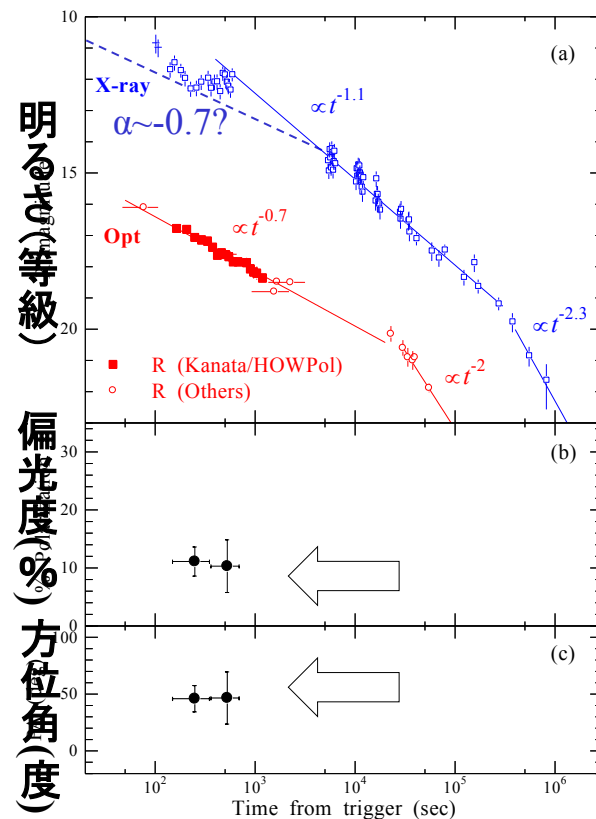
(保守的にはGRB 091208Bの偏光度のアップーリミットは15% = 平均 + 1σ)

シンクロトン放射モデルを支持

パッチモデル (Gruzinov & Waxman 1999; Sironi & Goodman 2007; Toma+ 2008)

磁場一様なパッチ数 $N \sim 50$ ($p/10\%$)

パッチサイズの時間変化 → モデル制限へ



まとめ

- 1.5mかなた望遠鏡(方位軸速度 5° /秒)
- 1露出型可視偏光撮像装置
- GRBアラートに即応(受信~90秒後より露出)

- GRB 091208B γ 線トリガー149s後より観測
- 初期光度曲線(可視光、X線)は外部衝撃波モデルで説明
- $p \sim 10 \pm 4\%$ の直線偏光 シンクロトロンモデル支持

期待される観測頻度

•Akerlof & Heather (2007) Statistics of 108 Swift GRBs

40%で光学残光 うちt=1000秒換算での等級が14等,16等,18等より明るいものがそれぞれ 0.9%,4.6%,16.7%

4年間観測を続ければ

➤1000秒後でも16等より明るいサンプルを1個/4年(偏光の時間追跡が可能)

➤200sで16等より明るいサンプルを3-4個(10分露出で1点の偏光測定)

→

年1個の偏光観測(1点)

4年間で時間変化(数点)を1例

仮定:

発見レート100個/年、高度係数0.33 (>20度)、夜間係数0.4、晴天係数0.4

