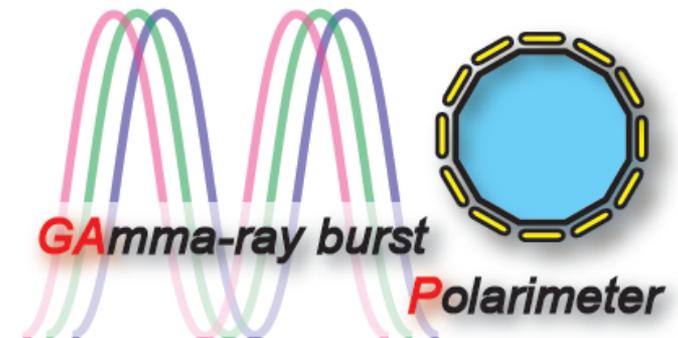


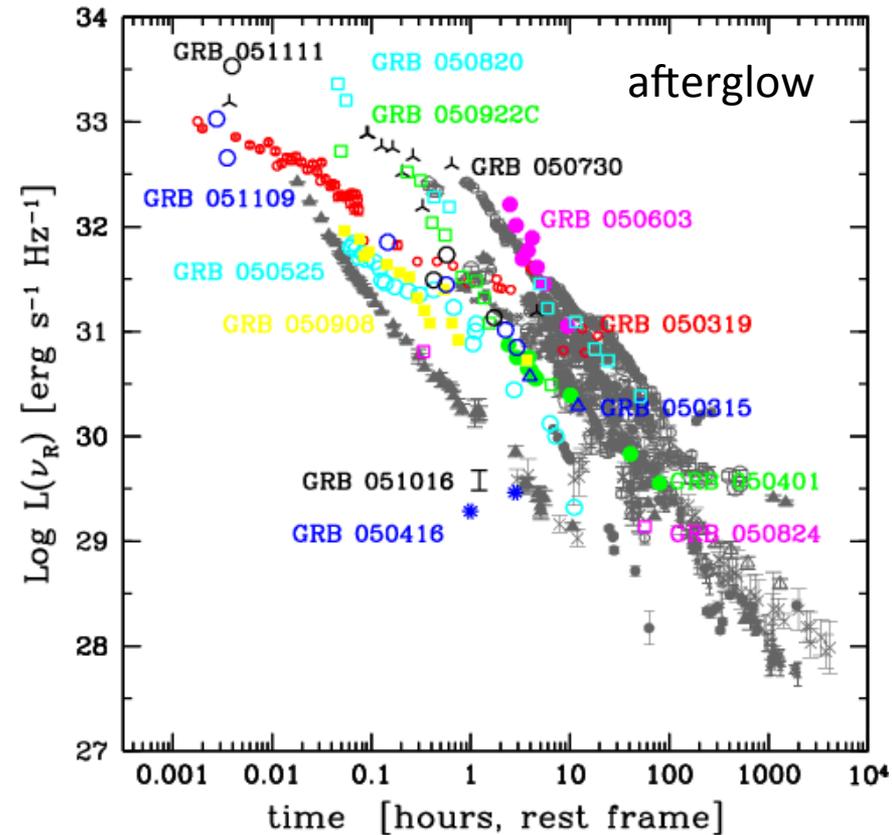
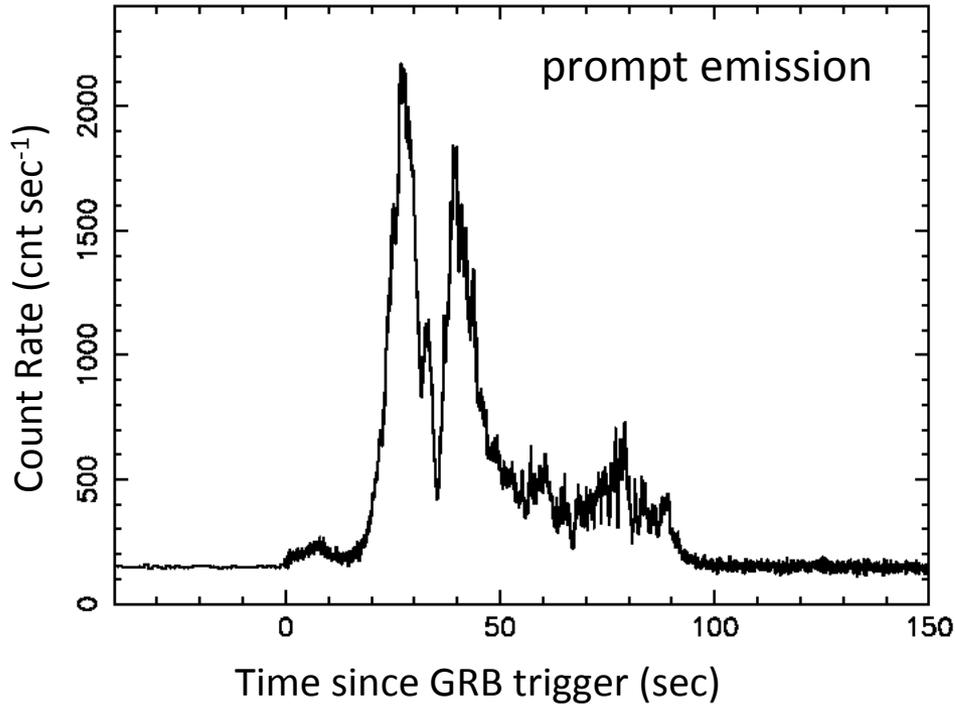
飛翔体搭載ガンマ線偏光検出器の開発と ガンマ線バーストの放射機構の研究

米徳大輔(金沢大学 理工研究域)

村上敏夫(金沢大)、郡司修一(山形大)、三原建弘(理研)、
当真賢二(大阪大)、IKAROS-GAP チーム

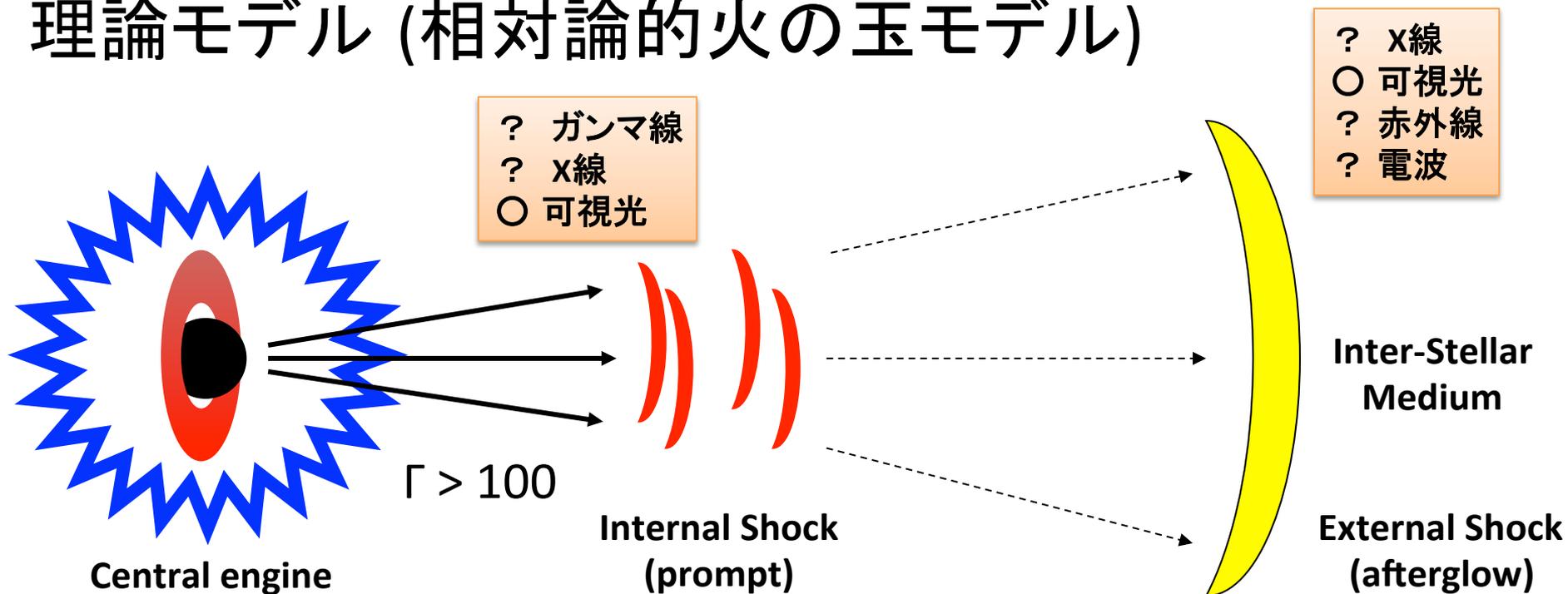


ガンマ線バースト (GRBs)



- 数秒～数100秒に渡る突発的ガンマ線放射
- 典型的なガンマ線エネルギーは数100keV (Fermi で GeV 放射も観測されている)
- 等方放射を仮定すると10⁵⁴ erg に達する**宇宙最大の爆発現象**
- 時間のべき関数で減光する残光を伴う
- 遠方宇宙で発生 (Swift 衛星時代の平均赤方偏移は $z \sim 2$) ²

理論モデル (相対論的火の玉モデル)

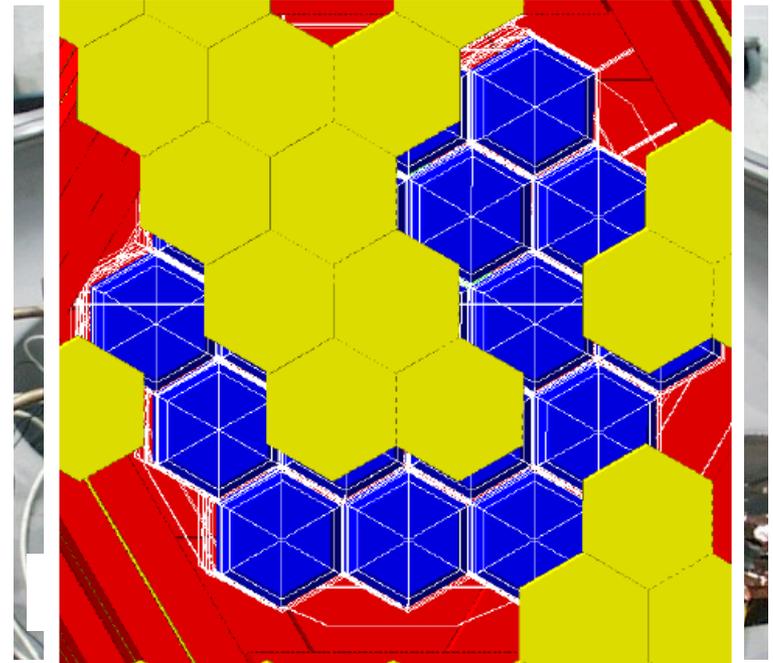
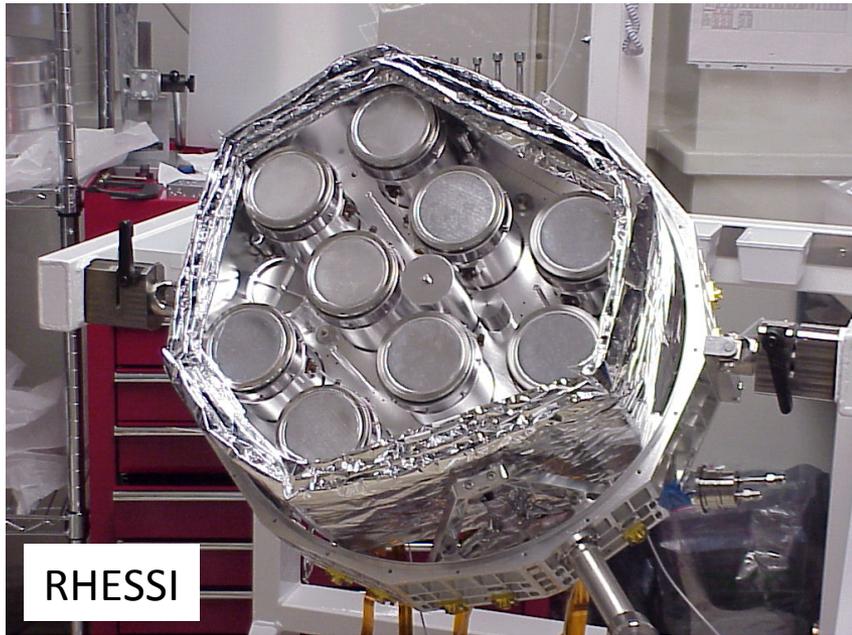


- ローレンツ因子 $\Gamma > 100$ (光速の99.99%以上)の相対論的ジェット
- 内部衝撃波(アウトフロー同士)の衝突: プロンプト放射
- 外部衝撃波(アウトフローと星間物質)の衝突: 残光

どちらも加速電子によるシンクロトロン放射で輝くという理論モデル

到来方向、時間変動、光子のエネルギー(スペクトル)
もうひとつの電磁波の性質である**偏光**に注目

過去の観測 – RHESSI & INTEGRAL –



RHESSI : GRB021206から、偏光度 $\Pi = 80 \pm 20\%$ で検出 (0.15 – 2 MeV)

→ コインシデンスが取れておらず、独立な解析からは検出できなかった。

INTEGRAL : $\Pi = 63 \pm 31\% (2\sigma)$ (100 – 350 keV)

→ 複雑なパターンのため検出器の系統誤差を定義できない。

幾何学的形状が簡単で、同期イベントを処理できることが重要

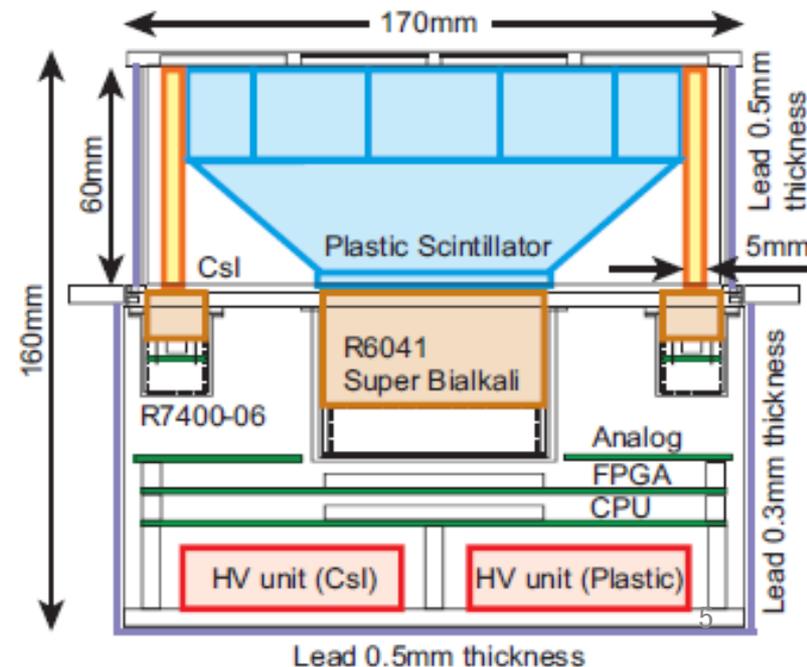
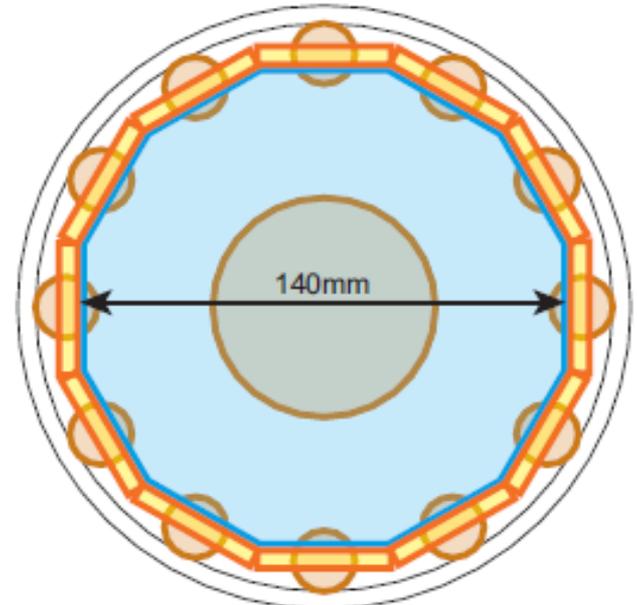
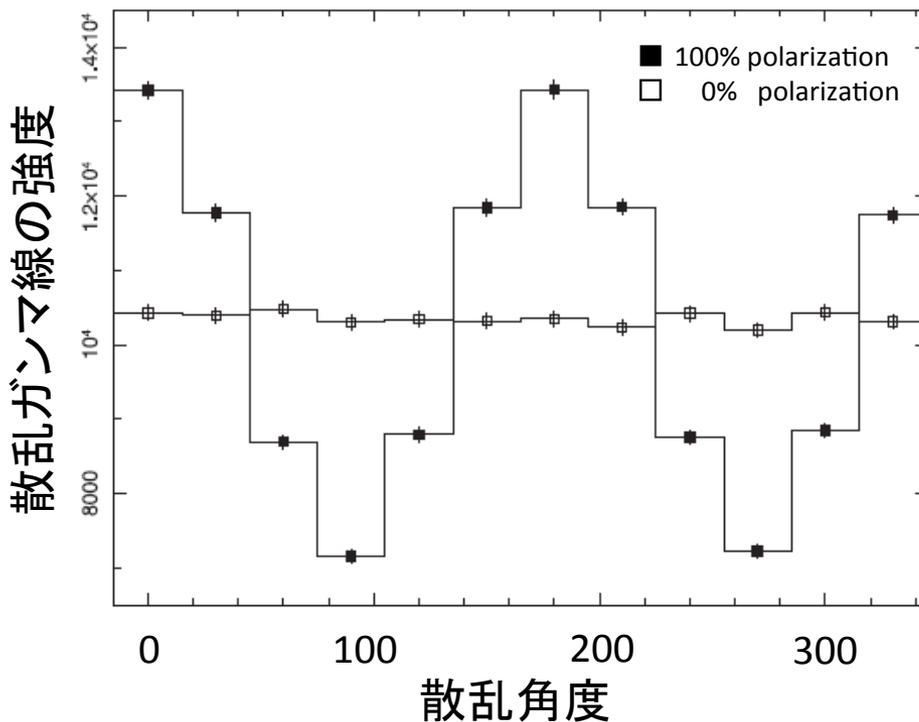
GAmma-ray burst Polarimeter

70 – 300 keV で偏光測定

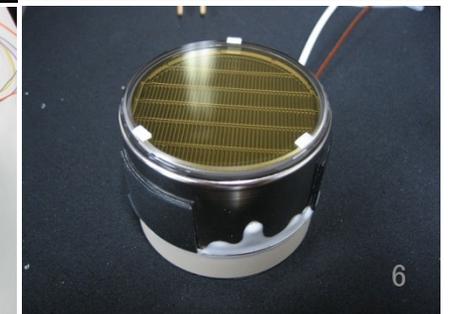
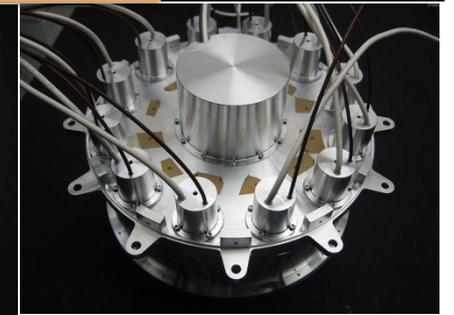
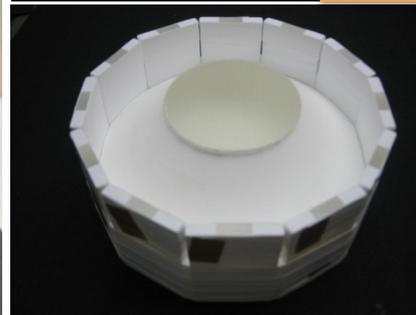
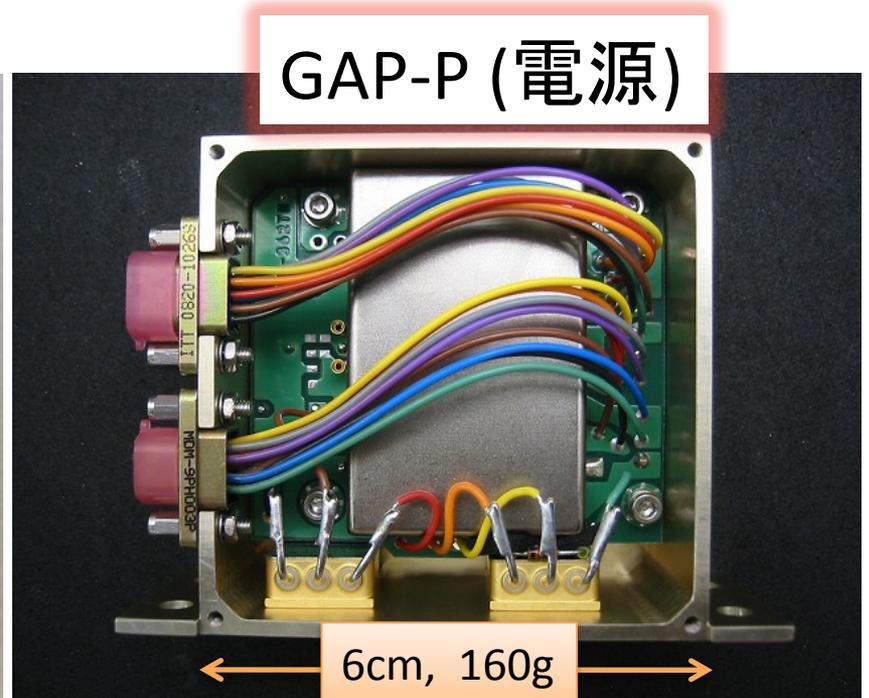
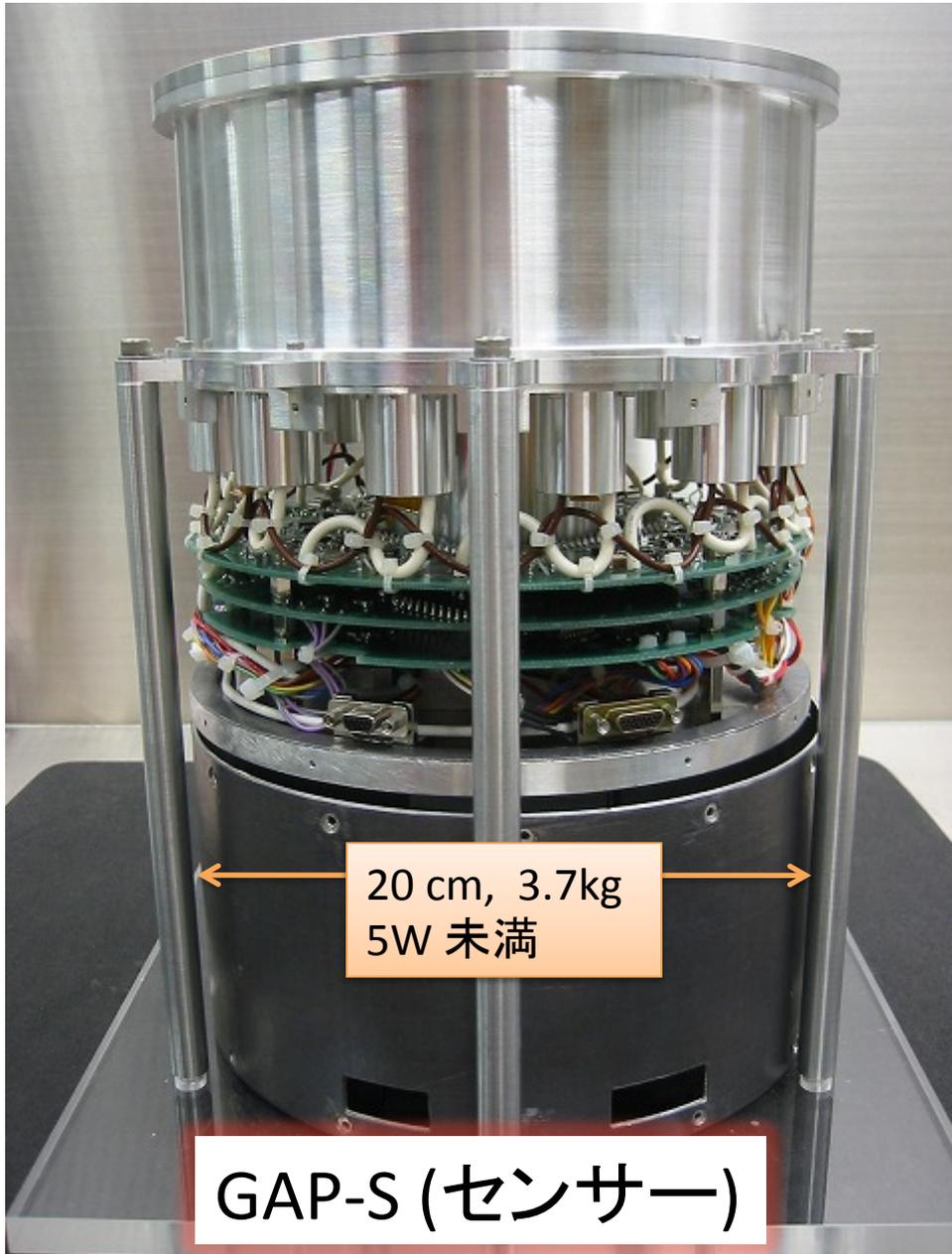
- コンプトン散乱の散乱異方性を測定
- 幾何学的な対称性が高い

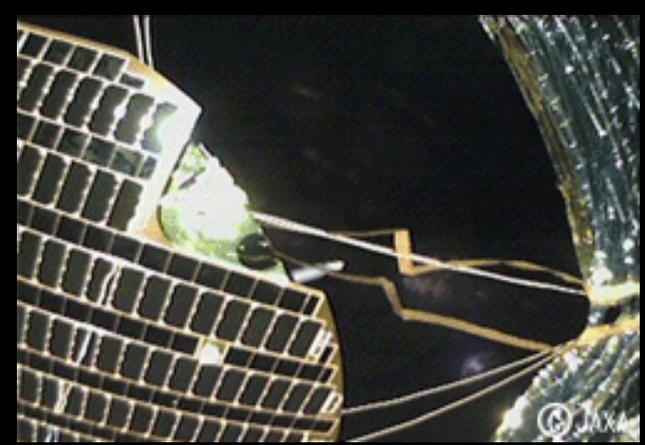
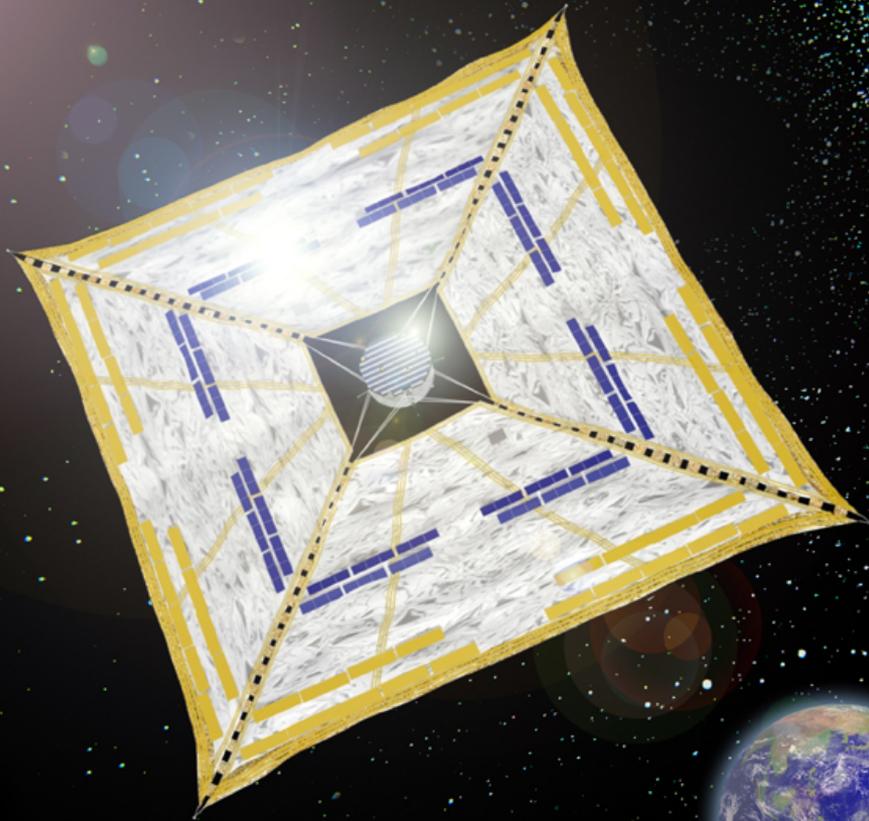
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{E^2}{E_0^2} \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)$$

r_0 : 古典電子半径
 E_0 : 入射光子のエネルギー
 E : 散乱光子のエネルギー



GAP フライトモデル





IKAROS

Launched
May 21, 2010

Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun 7

Data Samples

Konus, Fermi, Swift,
WAM, Integral, Mess.

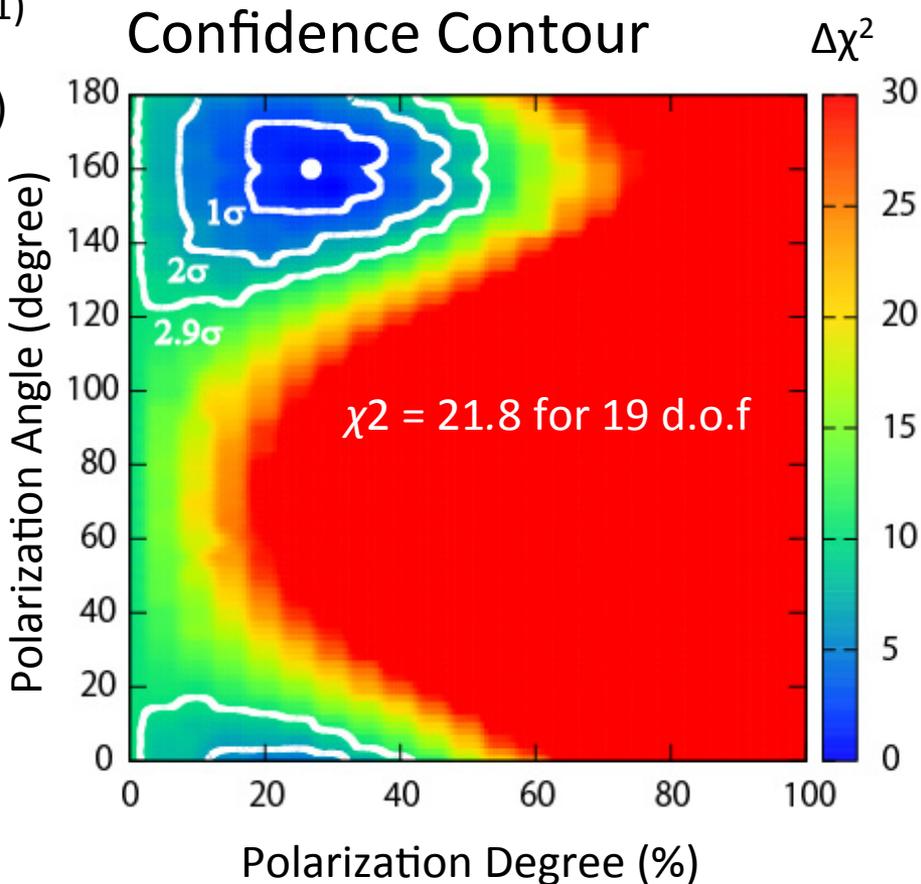
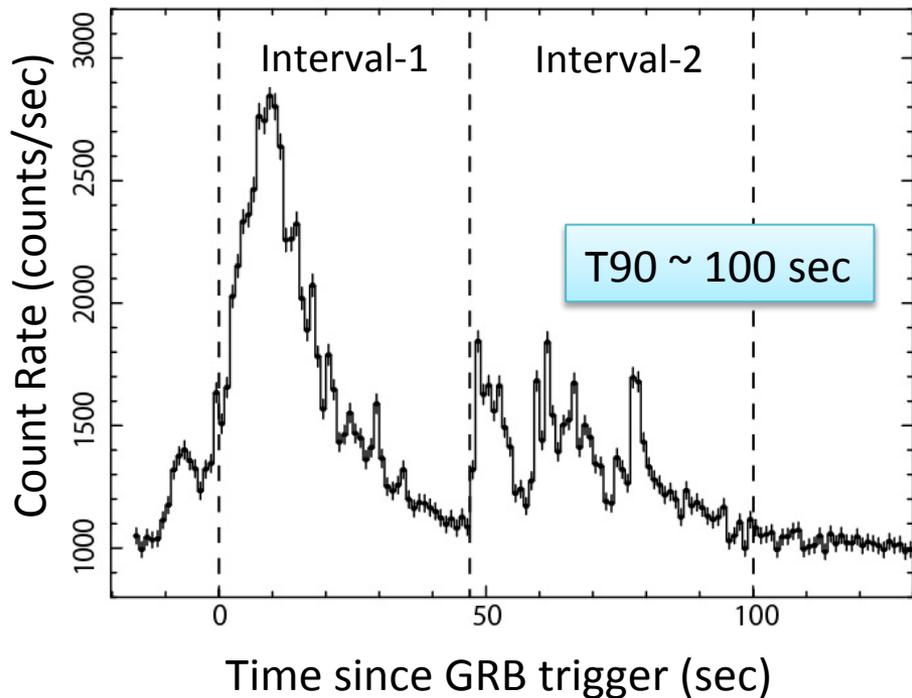
a : 10-1000 keV c : 20-5000 keV

b : 20-10000 keV d : 20-200 keV

No.	GRB	Fluence (erg/cm ²)	incident angle	Other Obs.	No.	GRB	Fluence (erg/cm ²)	incident angle	Other Obs.
1	100707A	^a 8.8×10 ⁻⁵	93	K,F,W, M	16	110124A		-	K,W
2	100715A		19	K,I,W,M	17	110301A	^a 3.7×10 ⁻⁵	48	K,F,W
3	100719B		145	K,F	18	110406A	^b 4.8×10 ⁻⁵	133	K,W,I,Sw
4	100722A		34	K,F	19	110423A		-	K
5	100804A		63	K,F	20	110428A	^a 2.3×10 ⁻⁵	109	K,F,W,Sw
6	100809A		-	K	21	110505?		-	?
7	100820A		34	K,F	22	110510?		-	?
8	100826A	^b 3.0×10 ⁻⁴	20	K,F,W, M	23	110514		-	K
9	101014A	^a 2.0×10 ⁻⁴	54	K,F	24	110604A	^c 3.1×10 ⁻⁵	43	K,W,Sw
10	101021A		41	K,F	25	110625A	^b 6.1×10 ⁻⁵	41	K,F,Sw
11	101113A		26	K,F	26	110708A	^d 2×10 ⁻⁶	67	K,F,Sw
12	101123A	^a 1.3×10 ⁻⁴	74	K,F,I,Sw	27	110715A	^b 2.3×10 ⁻⁵	88	K,W,Sw
13	101126A		62	K,F	28	110717B		25	F,K
14	101219A	^b 3.0×10 ⁻⁶	52	K,Sw	29	110721A	^a 3.5×10 ⁻⁵	30	K,F,I,M

GRB100826A Yonetoku et al. (2011)

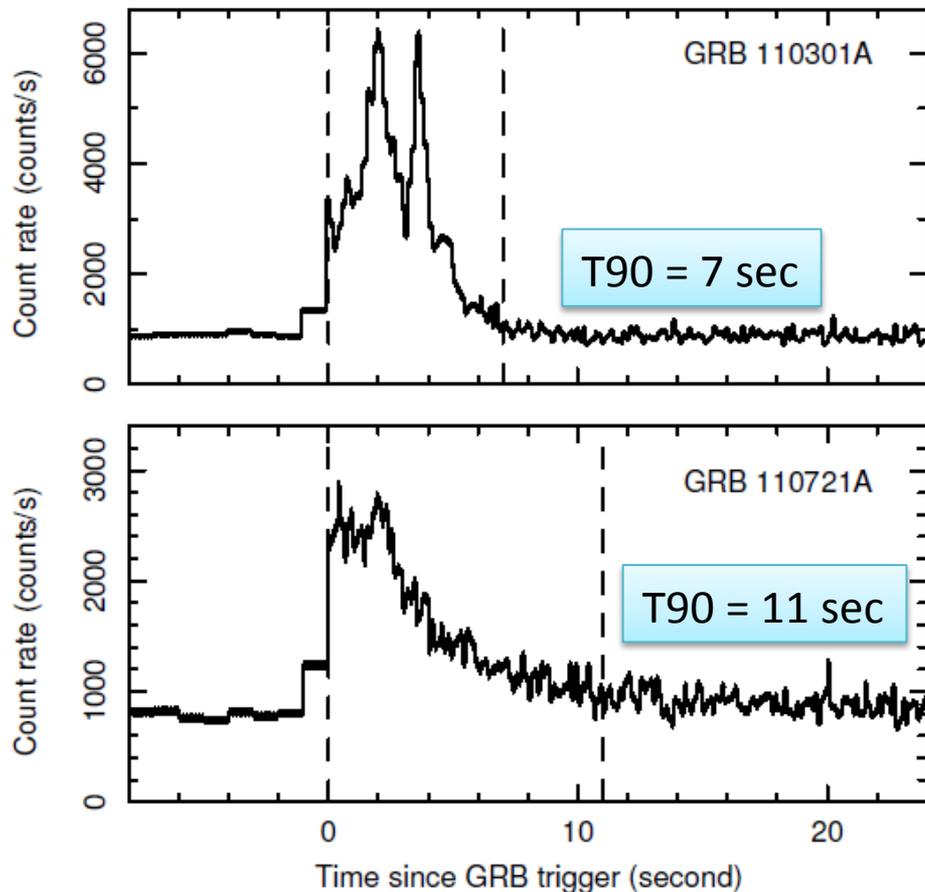
非常に明るいバースト ($F = 3.0 \times 10^{-4}$ erg/cm²)



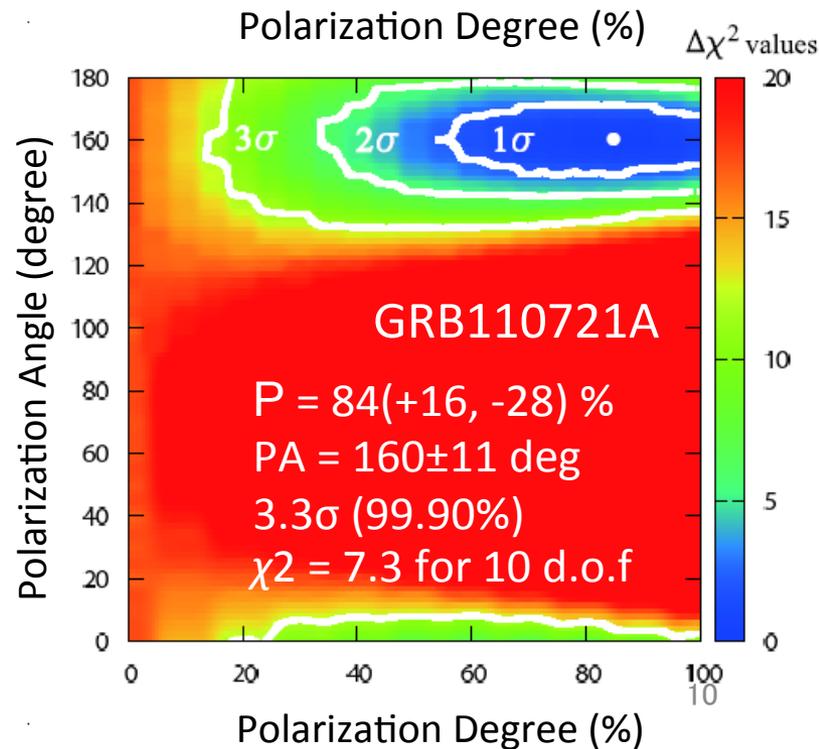
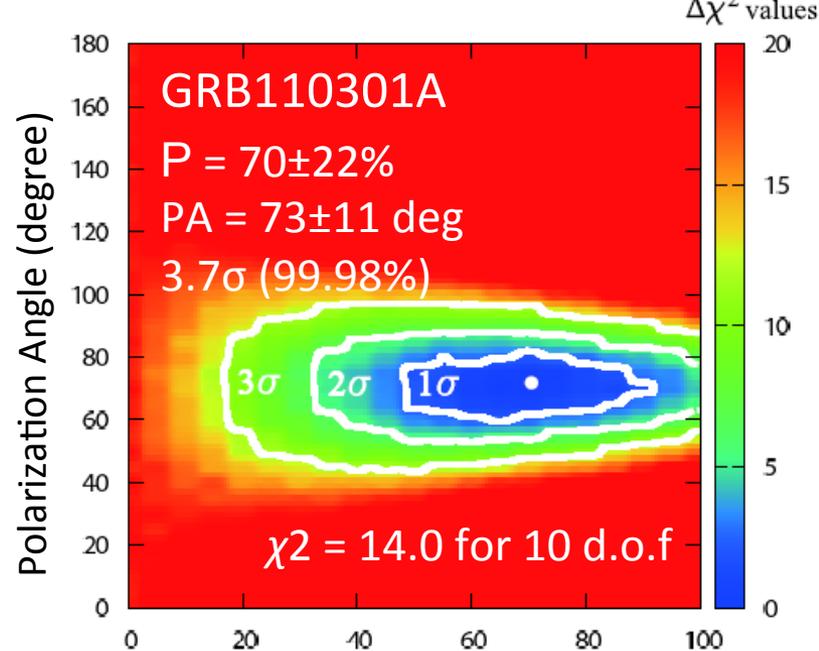
	偏光度 (検出器の系統誤差を含む)	偏光角
Interval-1	$P = 25 \pm 15\%$ (95.4% C.L.)	$PA = 159 \pm 18$ deg
Interval-2	$P = 31 \pm 21\%$ (89.0% C.L.)	$PA = 75 \pm 20$ deg
同時解析	$P = 27 \pm 11\%$ (99.4% C.L.)	

有意性
3.5 σ
(>99.96%)

GRB110301A & GRB110721A



- 高い有意度で偏光を検出
- 時間分割して解析を行ったが、偏光角の変化は確認できなかった



解析結果のまとめ

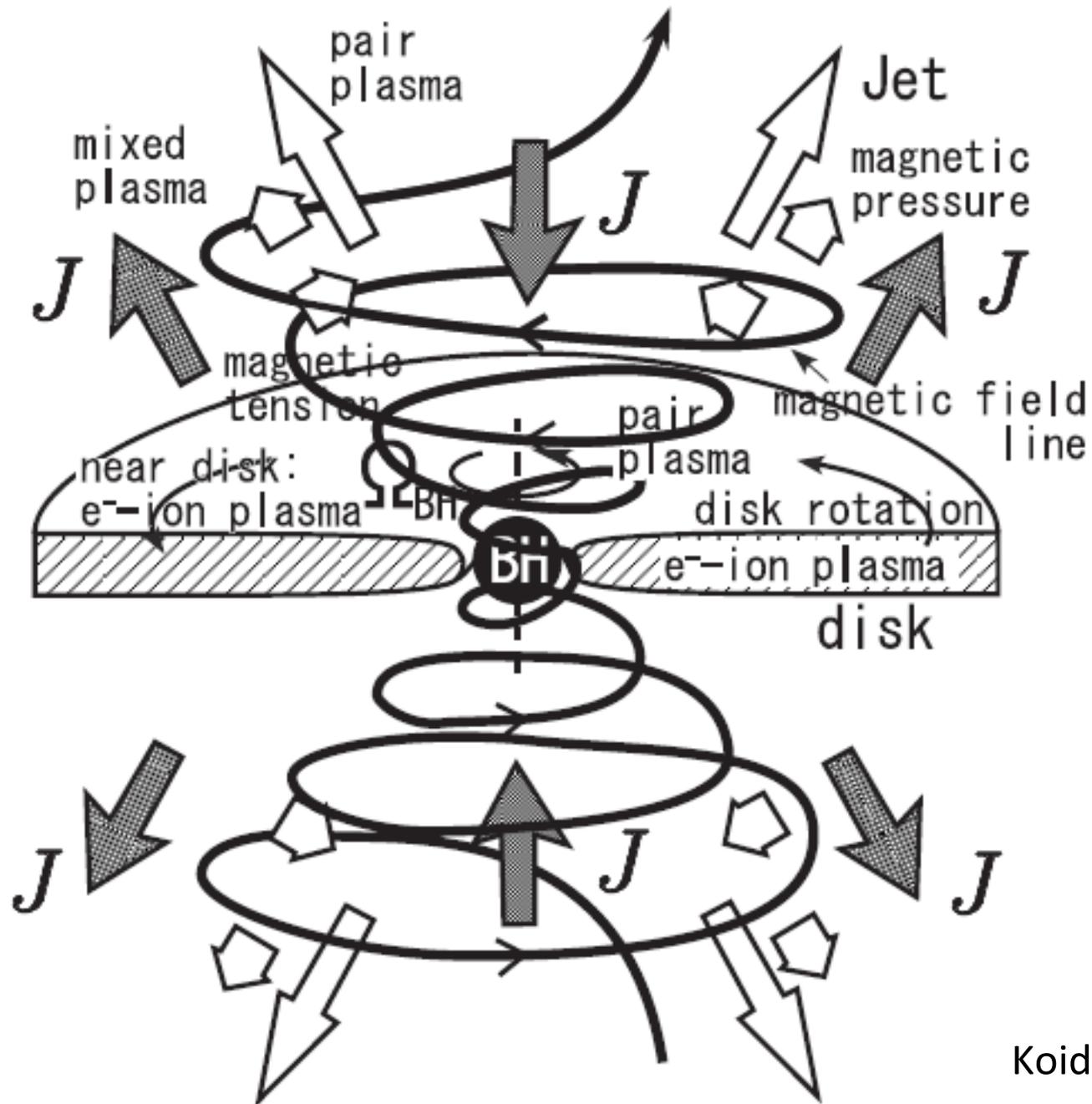
^a 前半と後半の継続時間をたして平均をとった 101/2 sec

GRB	偏光度 Π (%)	継続時間 T (sec)	入射角 θ ($^{\circ}$)	E_p (keV)	fluence (erg cm $^{-2}$)	flux (photon cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
100826	27 \pm 11	50.5 ^a	20	606 $^{+134}_{-109}$	2.94 \times 10 $^{-4}$	9.03
110721	84 $^{+16}_{-28}$	11	30	375.5 $^{+26.5}_{-23.6}$	3.43 \times 10 $^{-5}$	6.71
110301	70 \pm 22	7	48	106.80 $^{+1.85}_{-1.75}$	3.35 \times 10 $^{-5}$	75.59
110825	< 47	12	29	233.6 $^{+21.9}_{-19.9}$	5.06 \times 10 $^{-5}$	6.16
110625	< 56	27	41	190 $^{+17}_{-14}$	6.09 \times 10 $^{-5}$	8.21
100715	< 83	30	19	-	-	-
101014	< 71	30	54	181.40 $^{+5.66}_{-5.44}$	1.88 \times 10 $^{-4}$	3.74
101123	-	17	74	476 $^{+11}_{-11}$	1.28 \times 10 $^{-4}$	4.28

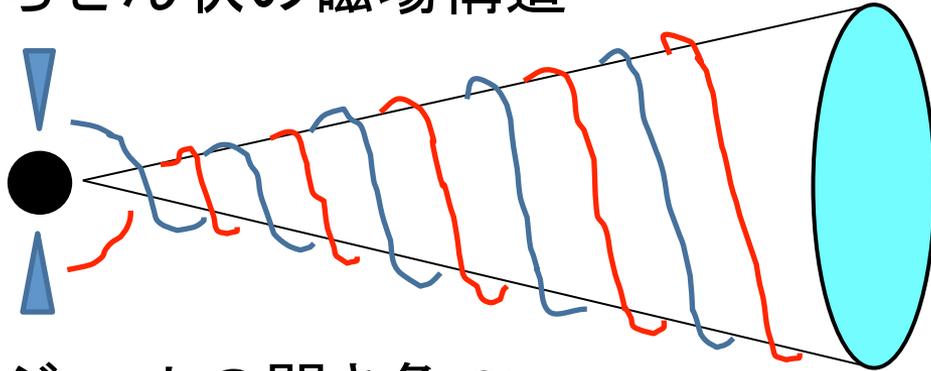
- GRB100826Aでは前半と後半で偏光角の変化あり (99.9% 信頼度)
- GRB110721A、GRB110301Aでは偏光角の変化なし

偏光している
偏光角の変化の有無

同時に説明できる
放射モデルが好ましい



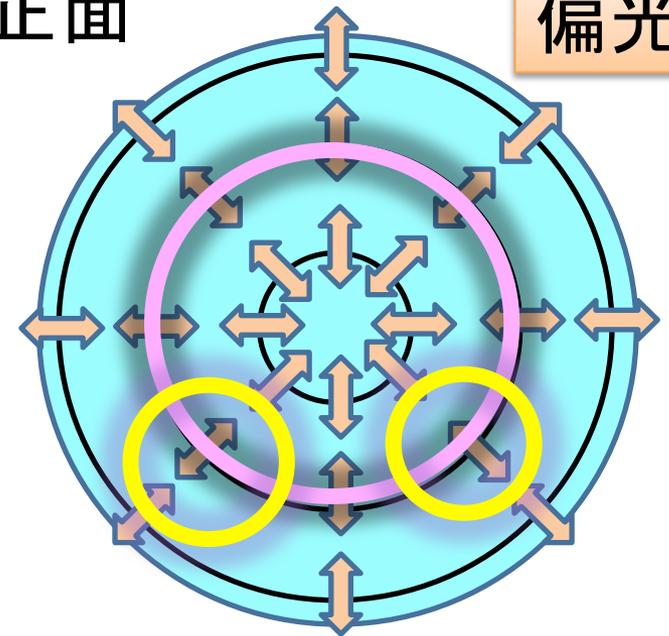
ジェットを駆動するための
らせん状の磁場構造



ジェットの開き角 θ_j
相対論的ビーミング効果 $1/\Gamma$

正面

偏光

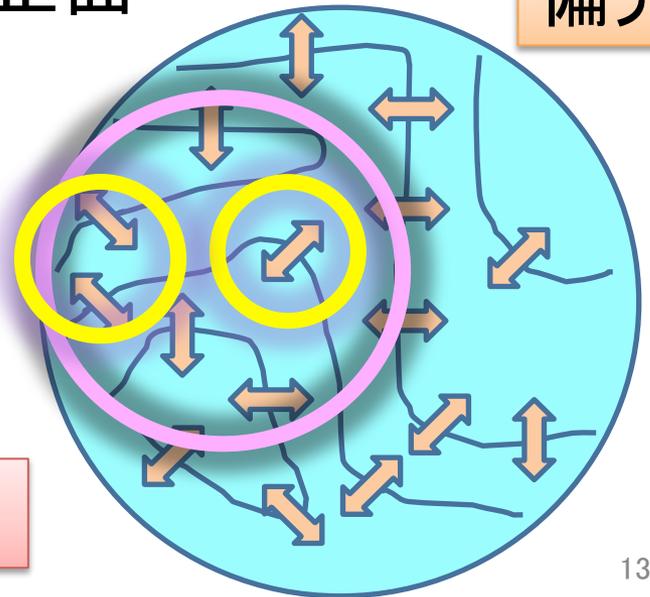


ジェット全体ではランダムだが、
局所的には穏やかに揃った磁場

偏光角の時間変化は、
 $1/\Gamma$ よりも小さなスケールのパッチが
存在すると良い。

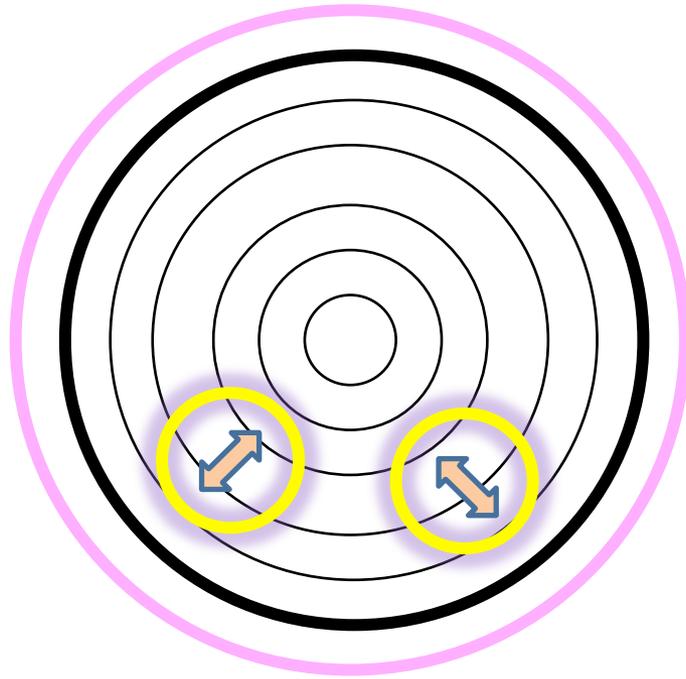
正面

偏光



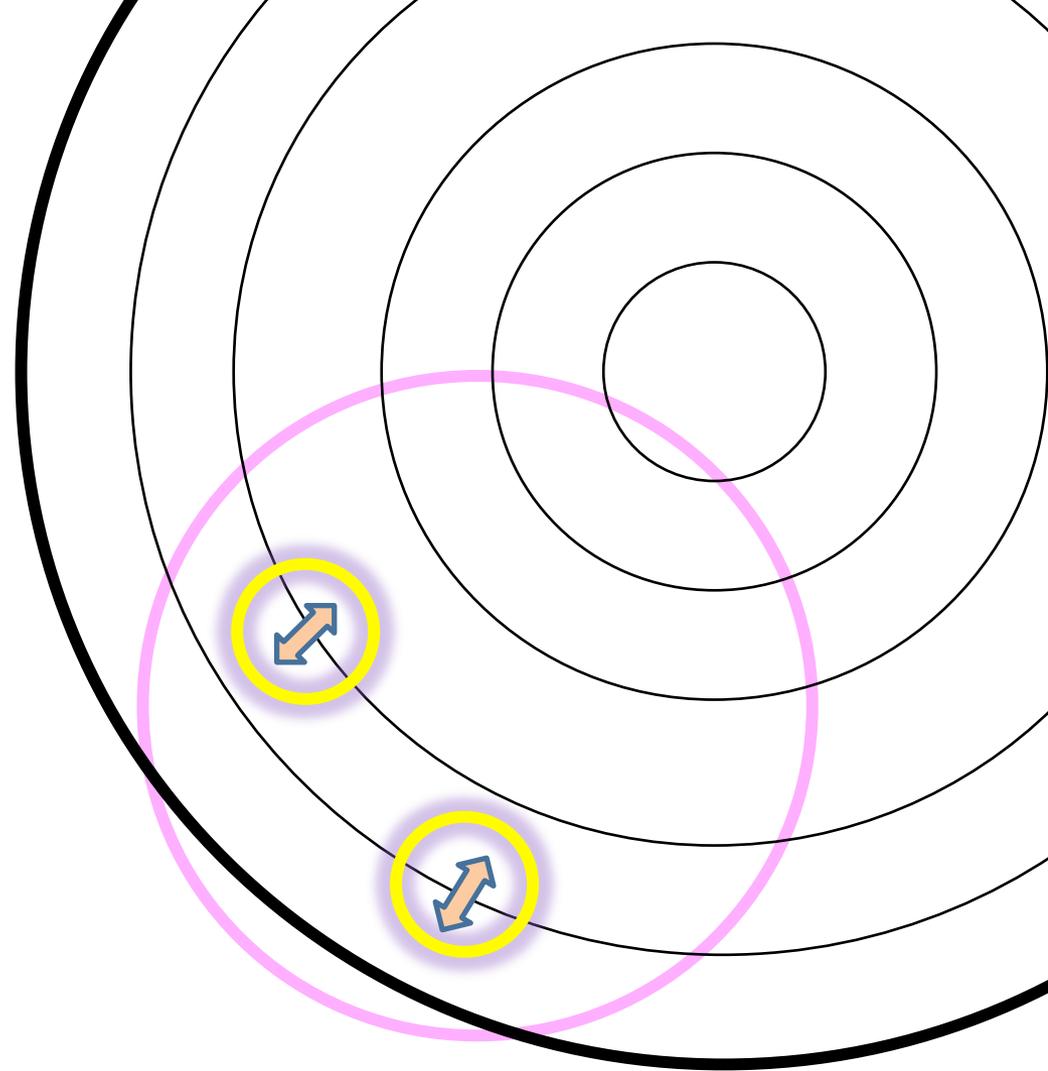
ジェットには内部構造があるだろう

ジェットの開き角と偏光角の変化



$$\theta_j < 1/\Gamma \sim 0.01 \text{ rad}$$

ジェット全体が見えるので
偏光角の変化が作れる



$$\theta_j > 1/\Gamma \sim 0.01 \text{ rad}$$

ジェットの一部だけを見ているので
偏光角は大きくは変化しない

ガンマ線バーストの想像図

- (1) 重い星が爆発してブラックホールが誕生すると、中心からほぼ光速のジェットが飛び出す。
- (2) 「ガンマ線の偏光が検出された」ことから、放射領域には数万ガウス程度によく揃った強磁場が存在していると考えられます。背景の図において、ジェット内部の赤線は強磁場を表現したものです。

- (3) 「偏光方向が短時間で変化した」ことは、ジェット内部にはガンマ線を作り出す領域がいくつか点在していて、それぞれの磁場の向きは異なっていると考えられます。
- (4) 電子・陽電子が強磁場に絡みつくことでガンマ線を作り出していると考えるのが自然です。

まとめ

- IKAROS 探査機に GRB 偏光検出器GAPを搭載した
- 3例のプロンプト放射からガンマ線偏光を検出した
 - そのうち1例では偏光角が大きく変化、
 - 残りの2例では有意な変化は確認できていない。
- Prompt GRB の放射メカニズムは
シンクロトロン放射である可能性が高い
(ただし、その他の理論モデルを棄却できたわけではない)
- 偏光角の変化から
ガンマ線の放射領域は $1/\Gamma$ よりも小さいスケールの
内部構造(パッチ構造)があると考えられる。

謝辞

- GAP プロジェクトの共同研究者
村上敏夫先生、郡司修一先生、三原建弘先生、歴代の学生さん
- IKAROS プロジェクトに関与した全てのみなさま
- 若狭湾エネルギー研究センター(プロトン照射試験)
放射線医学総合研究所(プロトン照射試験)
東京都立産業技術研究センター(ガンマ線照射試験)
石川県工業試験場(振動試験)
高エネルギー加速器研究機構(高偏光X線照射実験)
宇宙科学研究所 スタッフのみなさま
- 小さな GAP プロジェクトに注目していただき、
本賞に推薦してくださった堂谷忠靖先生
- 生活を支えてくれた母
- 心を支えてくれた7匹の猫
- 結婚前から現在まで優しい気持ちで包んでくれている最愛の妻