

# ガンマ線バーストからのガンマ線 偏光観測の現状と将来計画

ガンマ線バースト研究の新機軸@ICRR

2017年11月 22日

山形大学・理学部 郡司修一

# 1. はじめに

## 1.1 GRBの偏光観測すると何が楽しいか？

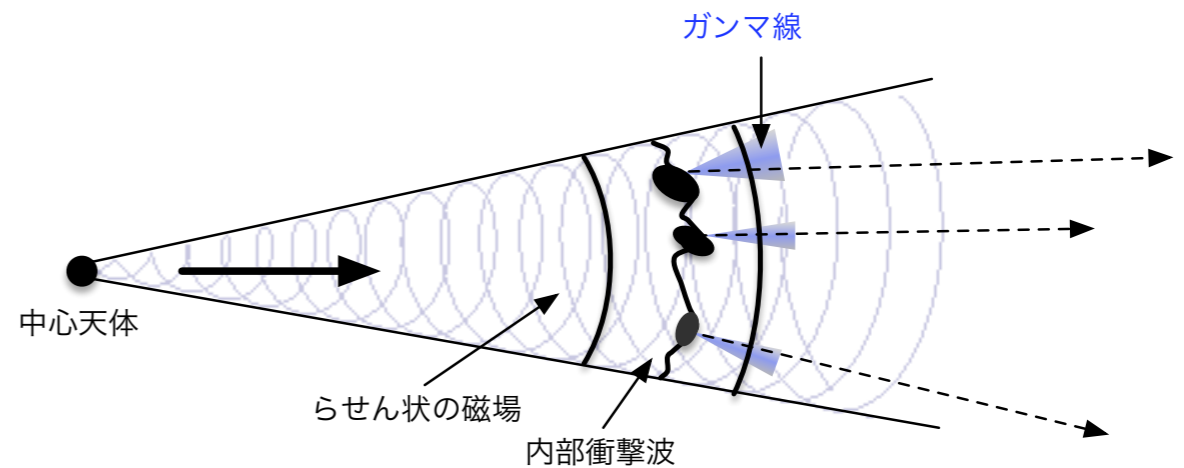
ちゃんとした話は次の當真さんが紹介してくれるはずです。

### 1) GRB自体の物理の解明

プロンプト放射がどのようなエネルギー輻射メカニズムで生じるのか？



整列磁場シンクロトロンモデル？  
ランダム磁場シンクロトロンモデル？  
コンプトンドラッグモデル？

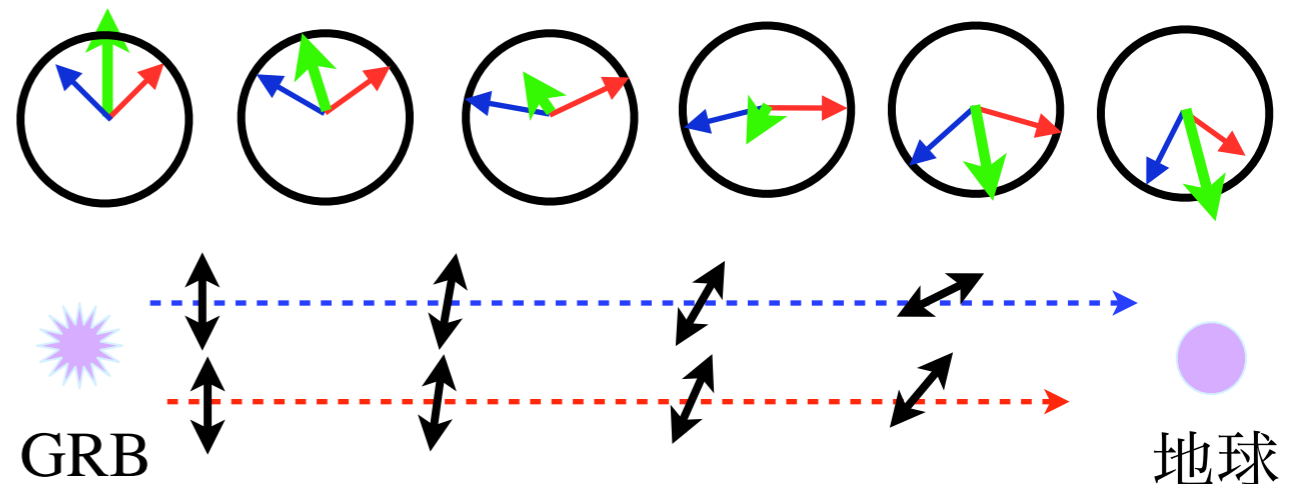


### 2) GRBを使って物理を探る

Lorentz Invarianceは厳密に成り立つか？



CPT対称性が破れ、右円偏光と左円偏光のスピードが変わり、直線偏光の向きが伝搬中に変わる。



# 1.2 偏光検出の原理

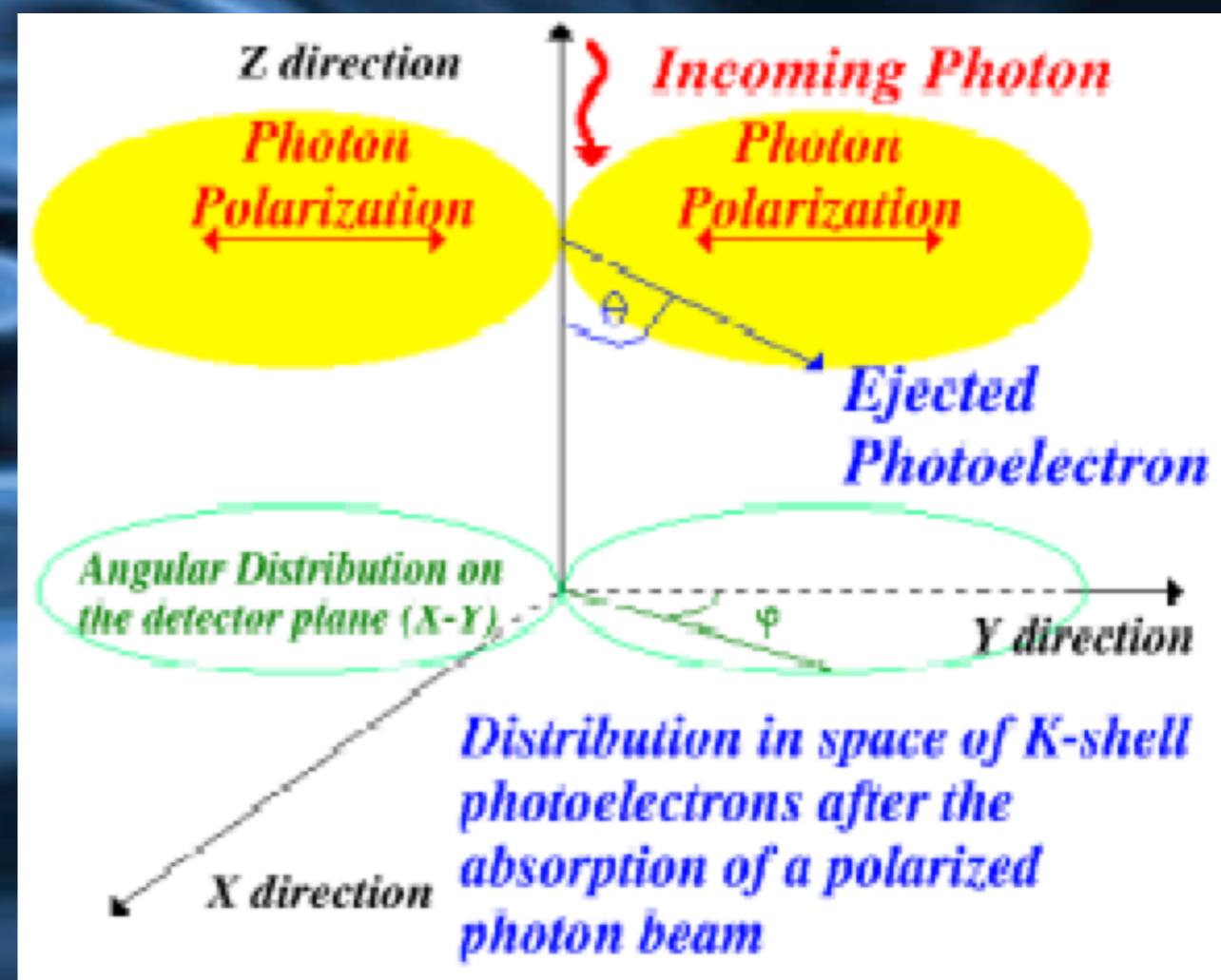
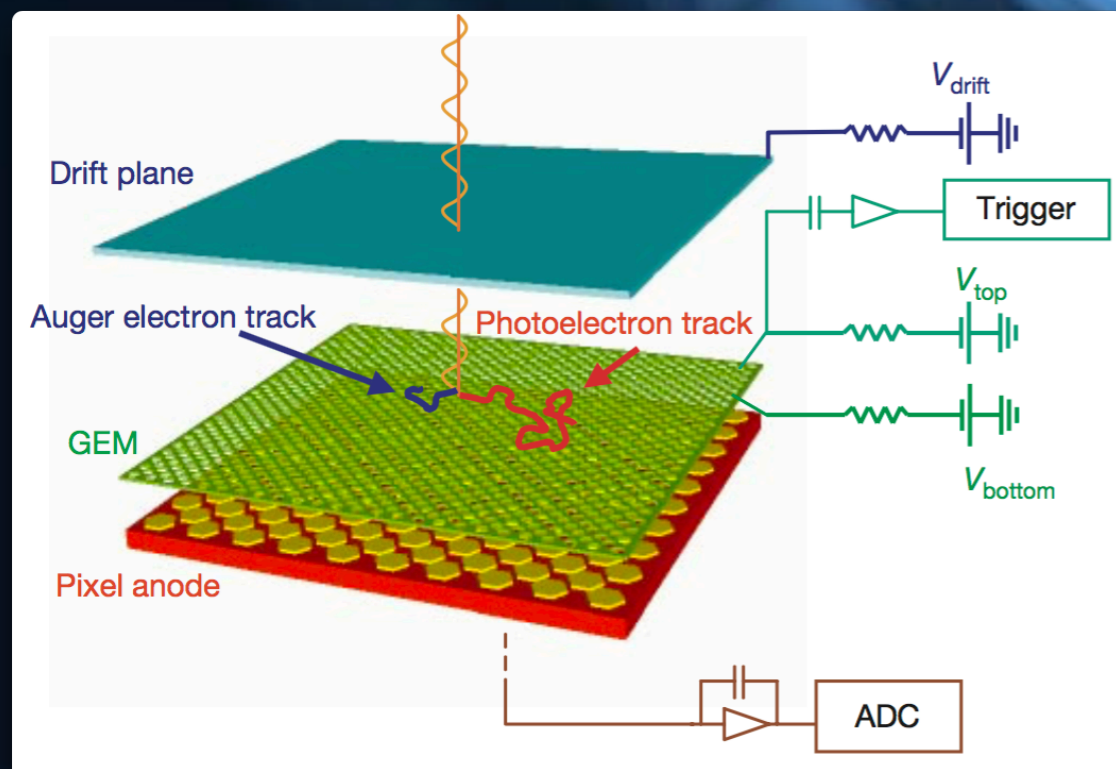
## 1) 光電吸収型

光電吸収によって放出される光電子は、X線の偏光ベクトルと同方向に出やすい。



ガス検出器中のガス原子とX線が光電吸収を起こす。一次電子のトラックに沿って2次電子ができる。その電子雲を撮像すれば、X線の偏光方向が分かる。

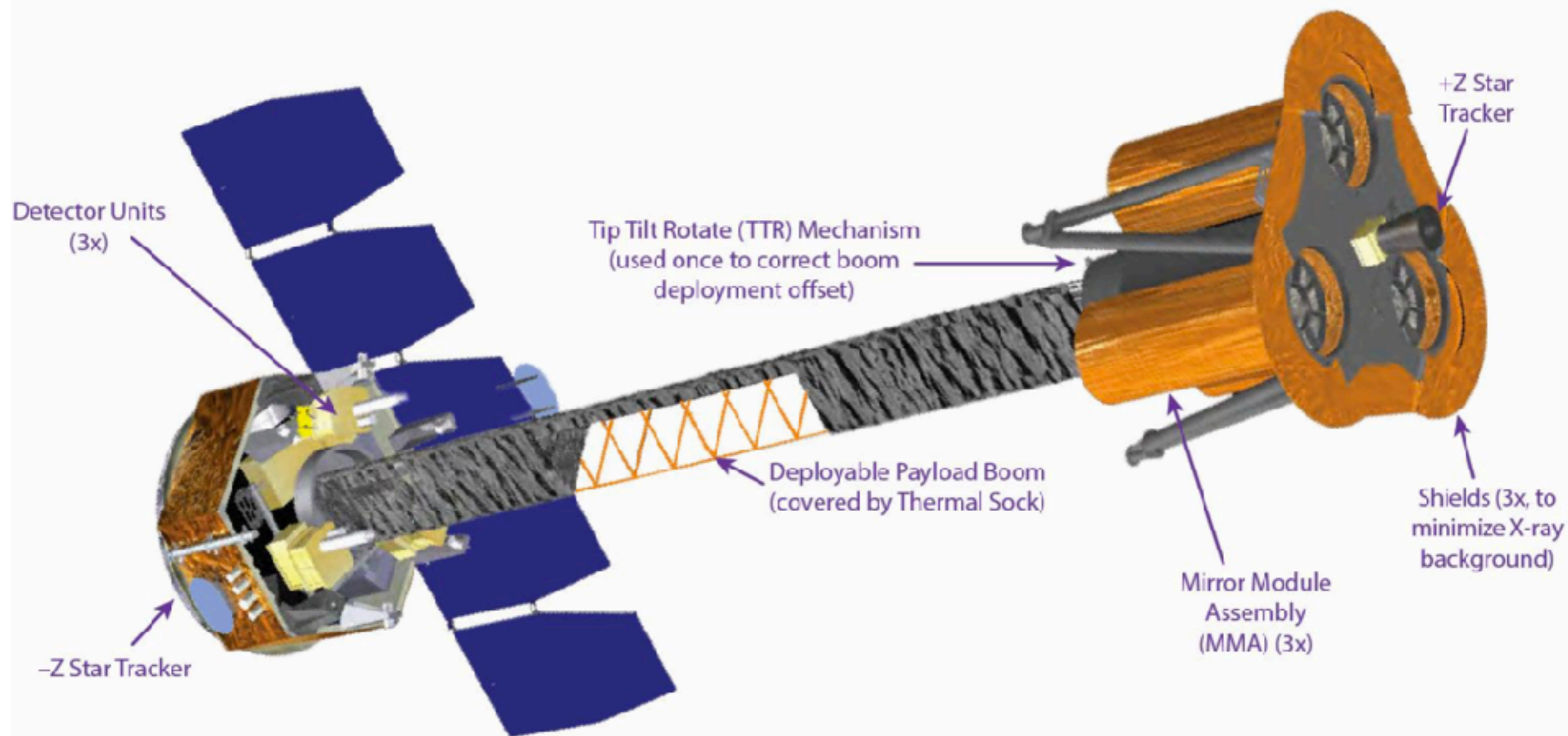
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{\mu}{k}\right)^{7/2} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^4}$$



E. Costa Nature, 2001

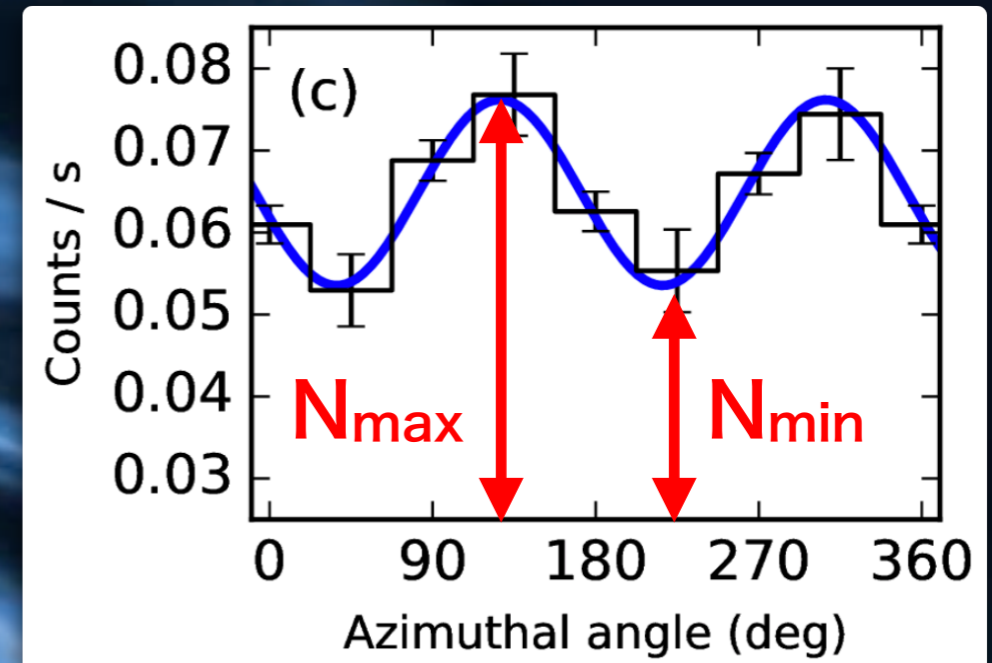
X線領域で使われる手法

2021年に上がるIXPE(Imaging X-ray Polarimetry Explorer)はこのタイプの偏光計を焦点面に搭載しており、2keV~6keV程度での観測を行う。IXPEはポインティングタイプなので、プロンプトのガンマ線は観測できないが、afterglowの偏光を狙うことは原理的に可能。



100%偏光したX線が何発も入射した時に電子の射出方向の $\phi$ 方向をプロットすると以下の様なカーブを描く。モジュレーションカーブという。ここで以下の式はモジュレーションファクターという。この値が大きければ、偏光を捕らえる能力が高い。

$$M = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}}$$



天体からのX線やガンマ線がどの程度偏光していれば、偏光検出が可能かという指標はMDP(Minimum Detectable Polarization)で表す。

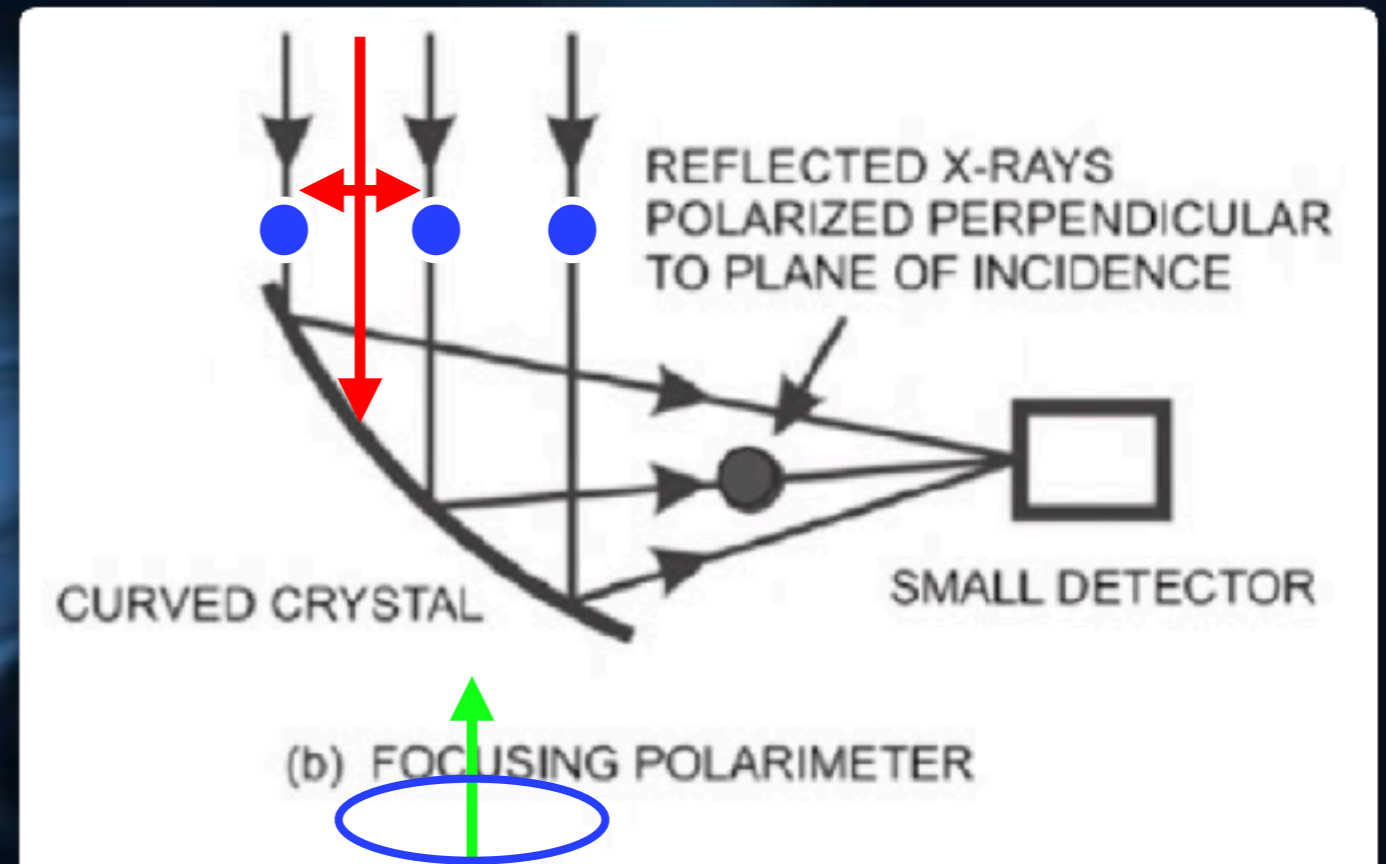
$$MDP = \frac{429}{SM\eta A} \sqrt{\frac{S\eta A + B}{T}}$$

- S 天体からのフラックス [counts/sec/cm<sup>2</sup>]
- M モジュレーションファクター
- $\eta$  検出効率
- A 検出面積 [cm<sup>2</sup>]
- B バックグラウンドレート [counts/sec]
- T 観測時間 [sec]

## 2)ブラッグ反射型

ブラッグ結晶と入射X線の偏光方向が同じ方向だとX線は反射されるが、垂直方向だと反射されない。

ブラッグ結晶とX線検出器をペアにして設置する。天体に対してシステムを回転する。結晶とX線の偏光方向が平行になった時に強い反射が起こり、検出器にX線が沢山集光される。



X-ray Polarimetry 4章 2010

90%以上のモジュレーションファクターが得られる反面、ブラッグ条件に合致しないと反射しない。従ってエネルギーバンドが狭く、多くのX線を取得できない。

10keV以下のエネルギーレンジで使用される事が多い。

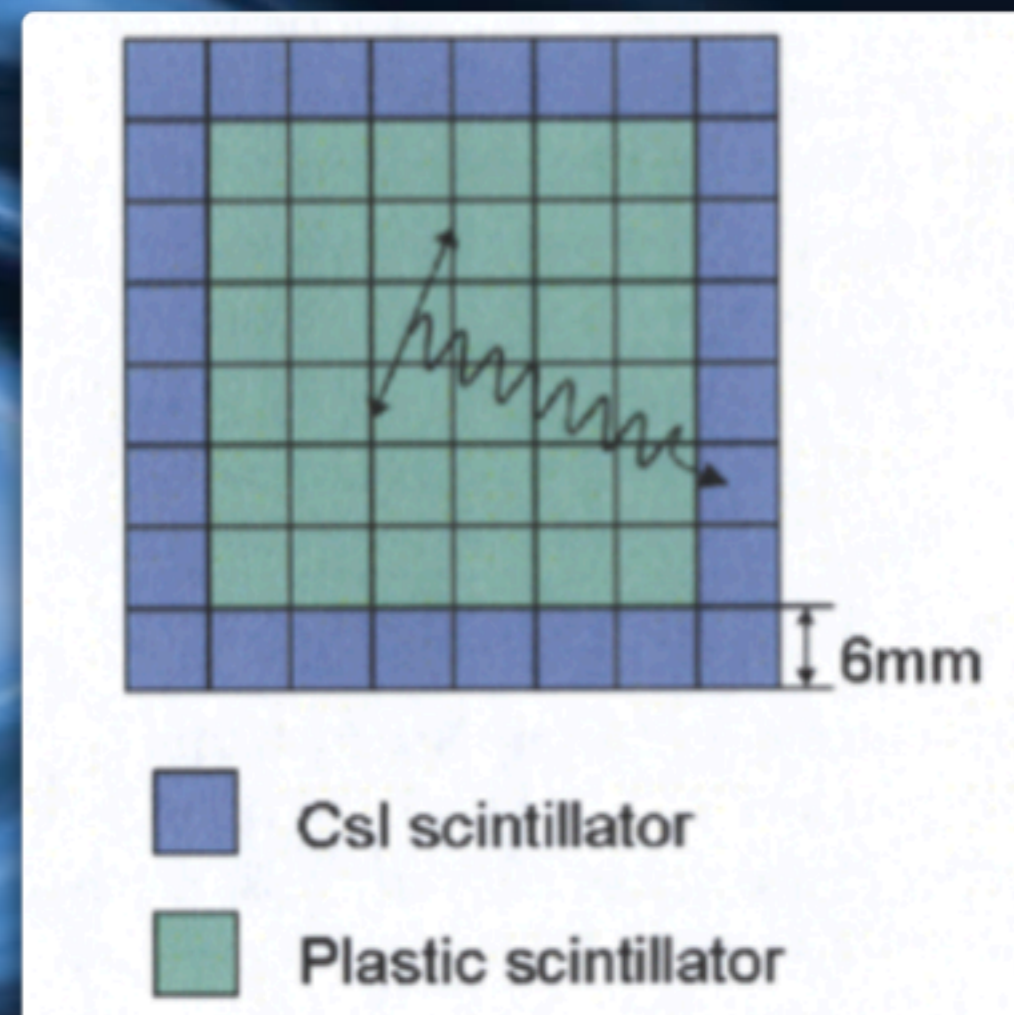
### 3) 散乱型

コンプトン散乱やトムソン散乱によって散乱される硬X線は入射硬X線の偏光方向に対して垂直に散乱されやすい。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{k^2}{k_0^2} \left( \frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)$$

散乱位置と吸収位置を検出し散乱方向を同定すれば、偏光情報を取得できる。

最適化によって40～50%程度のモジュレーションファクターが達成でき、20～30%程度の検出効率も同時に達成可能。



Kishimoto et al. IEEE NSS 2007

コンプトン散乱は数10keV～数MeVで主な相互作用となるため、ガンマ線バースト偏光度検出器としてはコンプトン散乱型が多い。

## 4) ペアークリエーションタイプ

1.02MeV以上のガンマ線は、ペアークリエーションが起こりえる。

電子陽電子の放出方向は、入射ガンマ線の偏光方向と同じ方向になりやすい。

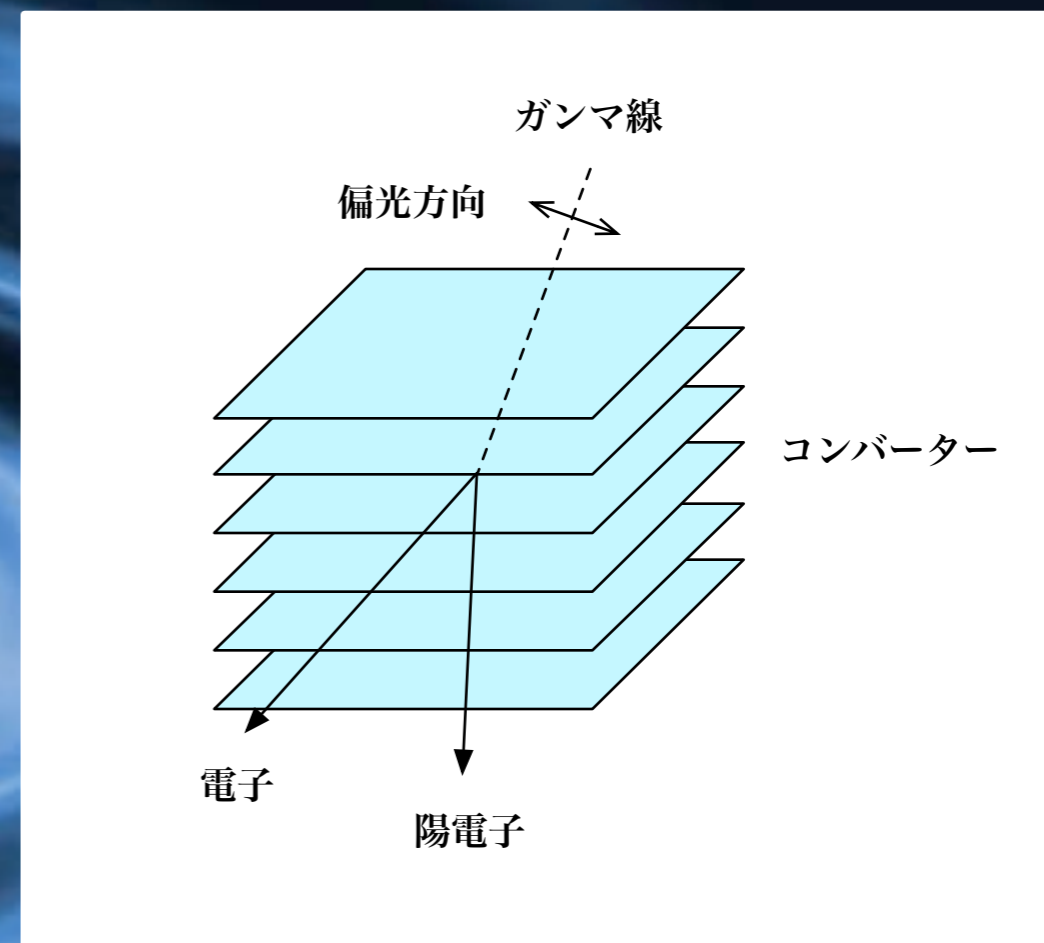
$$\sigma(\phi) = \frac{\sigma_0}{2\pi} [1 + R \cos(2(\phi - \phi_0))]$$

Ap.J. Vol.363 pp270-273 (1990)

上の式でRの値は、コンバーターによって大きく変化する。多重散乱しやすいものを使えば、0.1程度。理想的な場合でも0.4程度が限界。

そのために今まではあまり

積極的に偏光検出の原理としては利用されていないが、最近積極的に利用するグループも現れた(GRAINE、e-ASTROGAM)。





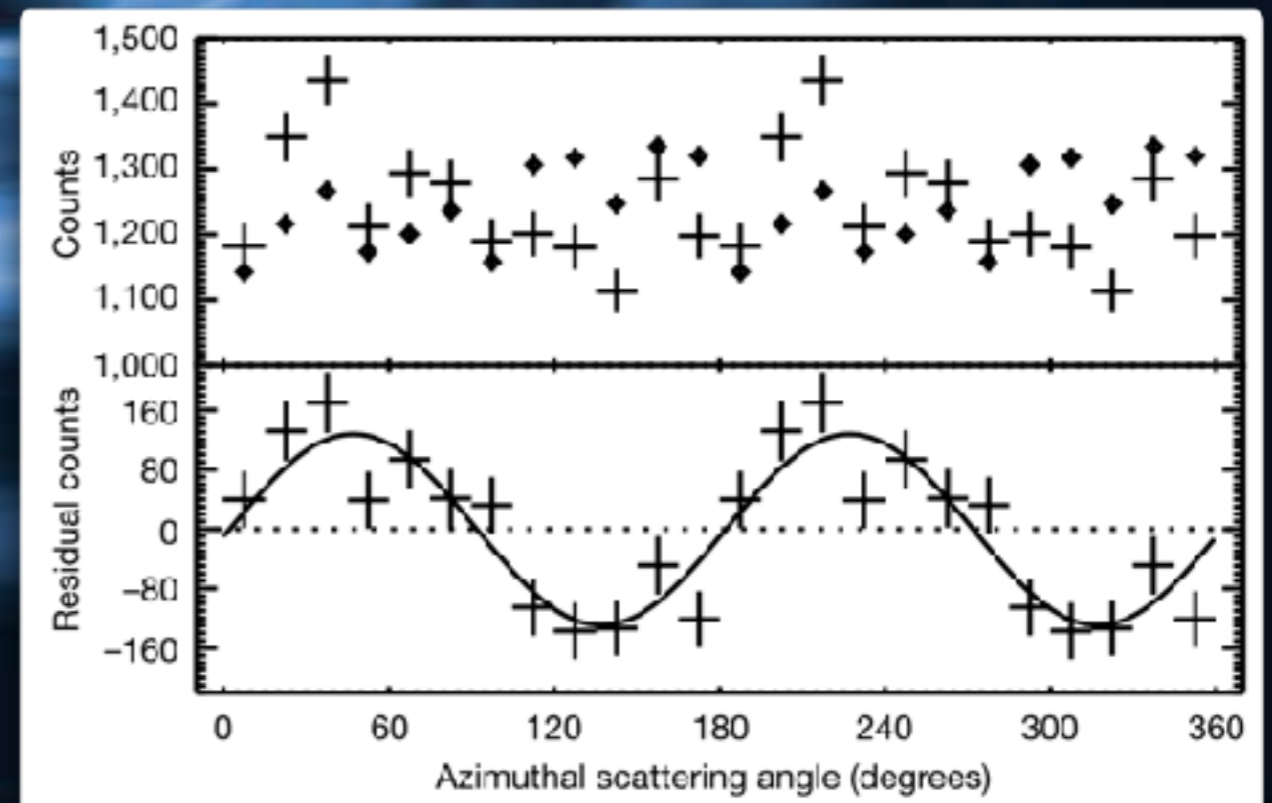
## 2. これまでの観測

### 2.1 RHESSIとINTEGRAL

ガンマ線バーストの偏光観測の最初の報告はRHESSIによるGRB 021206である。

RHESSIは太陽観測を主目的とした検出器であるため、偏光観測に特化されておらず、偏光観測のための地上キヤルも行っていない。

偏光度が $80 \pm 20\%$ と報告された。しかし、再解析の結果、 $41^{+57}_{-44}\%$ であった (Wigger et al. Ap.J. 2004)。



INTEGRALはSPI(Ge検出器の阵列)とIBIS(CdZTeとCsI(Tl)のピクセルが2層構造になった検出器)の2つを積んでいる。両方とも数m先にcodedマスクが設置されている。

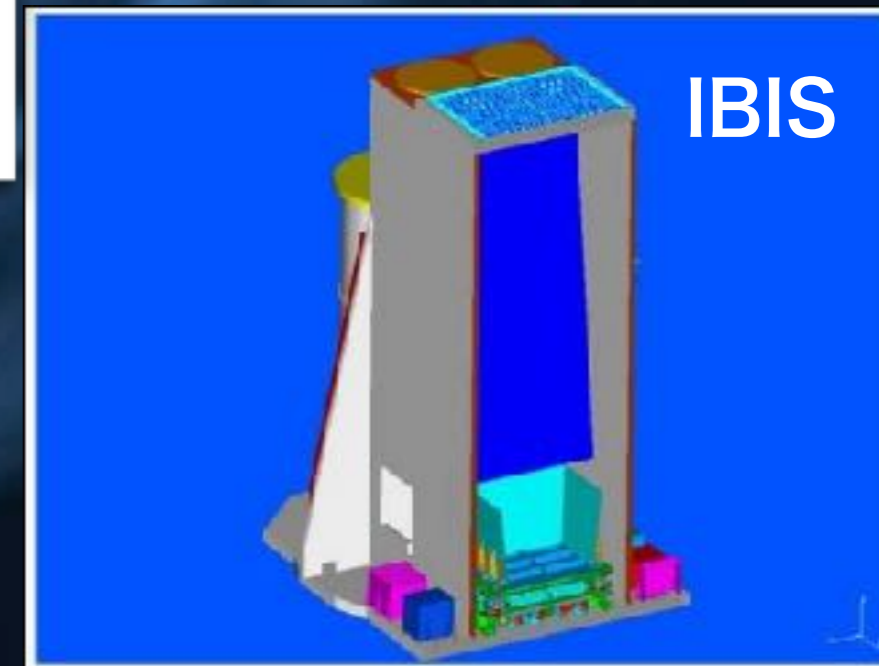
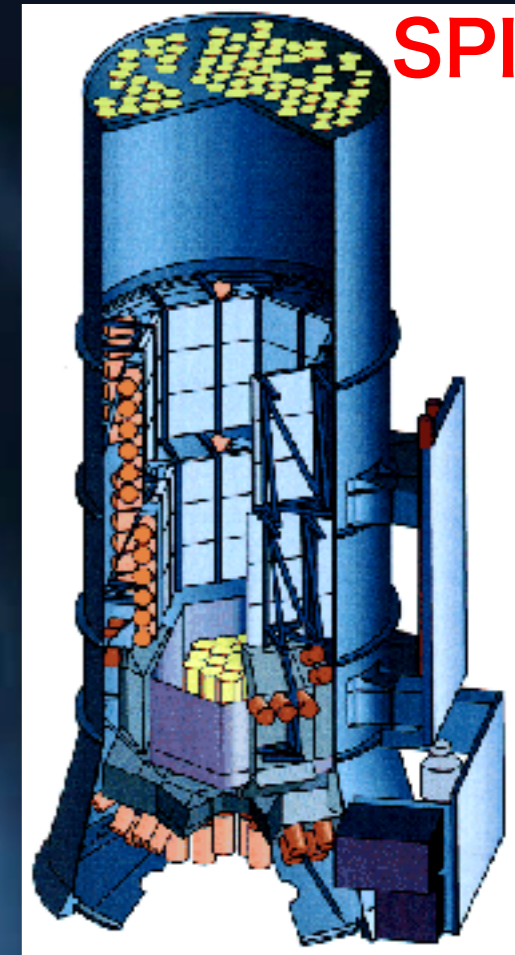
ガンマ線バーストの偏光観測の結果は以下の通り。IBISとSPIで結果が違っている事もある。

表 1: INTEGRALでのGRB偏光の測定。IBISによればGRB041219は偏光度が激しく変化している。

GRB	Instrument	エネルギーレンジ	偏光度
GRB 041219	SPI	100~350keV	98%±33%、96%±40%
GRB 041219	IBIS	200~800keV	22%±13% ~ 90%±36%
GRB 061122	SPI	100~1000keV	<60%
GRB 061122	IBIS	250~800keV	60% >
GRB 120711A	IBIS	20keV~10MeV	54±27%
GRB 140206A	IBIS	200~800keV	48%>

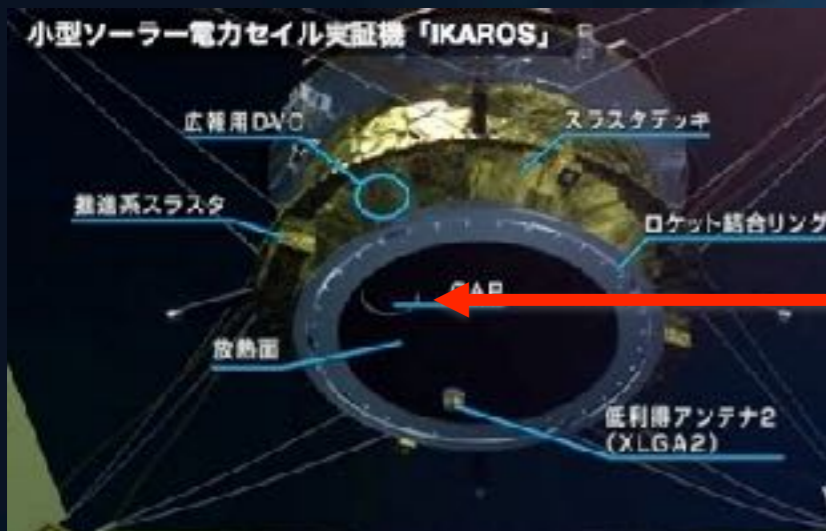
GRB 041219: S. McGlynn et al. A&A 2007, Gotz et al. Ap.J. 2009  
 GRB 061122: S. McGlynn et al. A&A 2009, Gotz et al. MNRAS 2013  
 GRB 120711A: ??  
 GRB 140206A: Gotz et al. MNRAS 2014

打ち上げ前に偏光に対しての詳細なキャリブレーションは残念ながら行われていない。

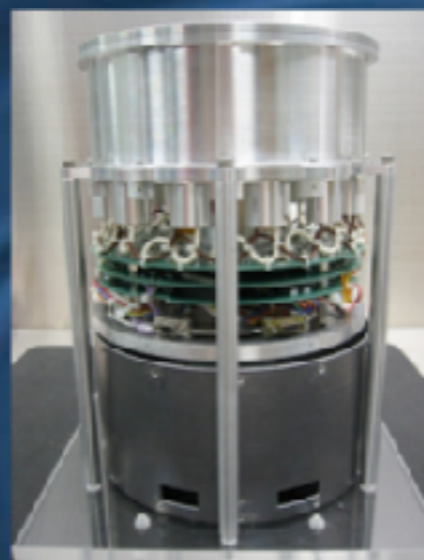


## 2.2 GAP

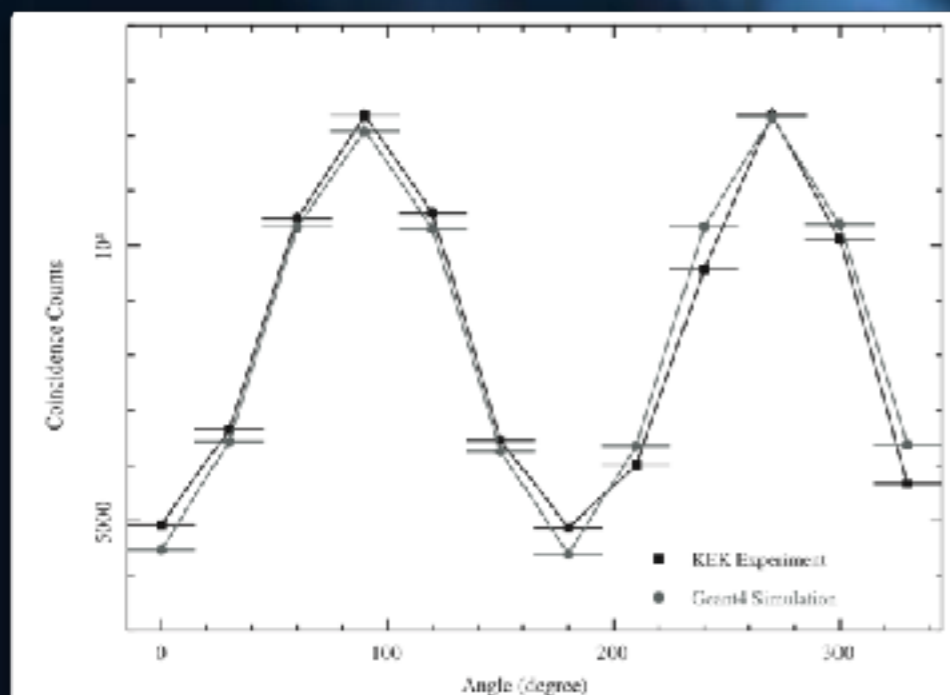
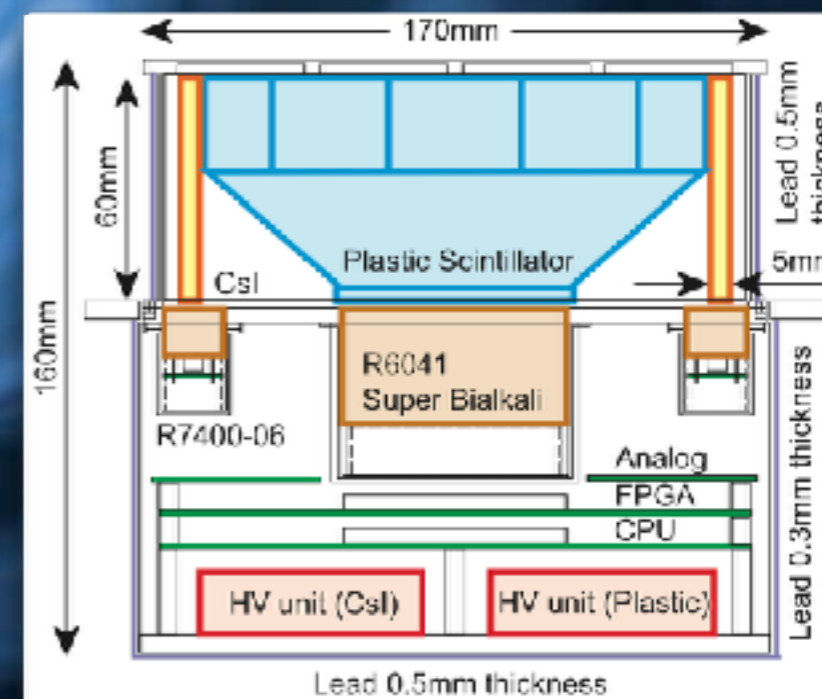
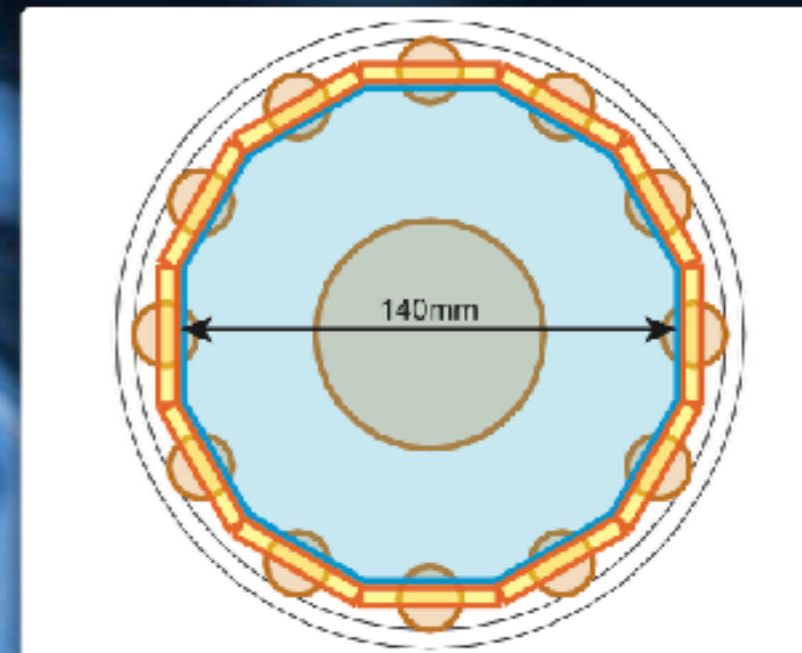
2010年5月にIKAROSソーラーセイルに取り付けて打ち上げられた。重量は3.8kgと超小型。ただし偏光観測に特化し、地上でのキャルも行われていた。



IKAROS実証機



GAP検出器



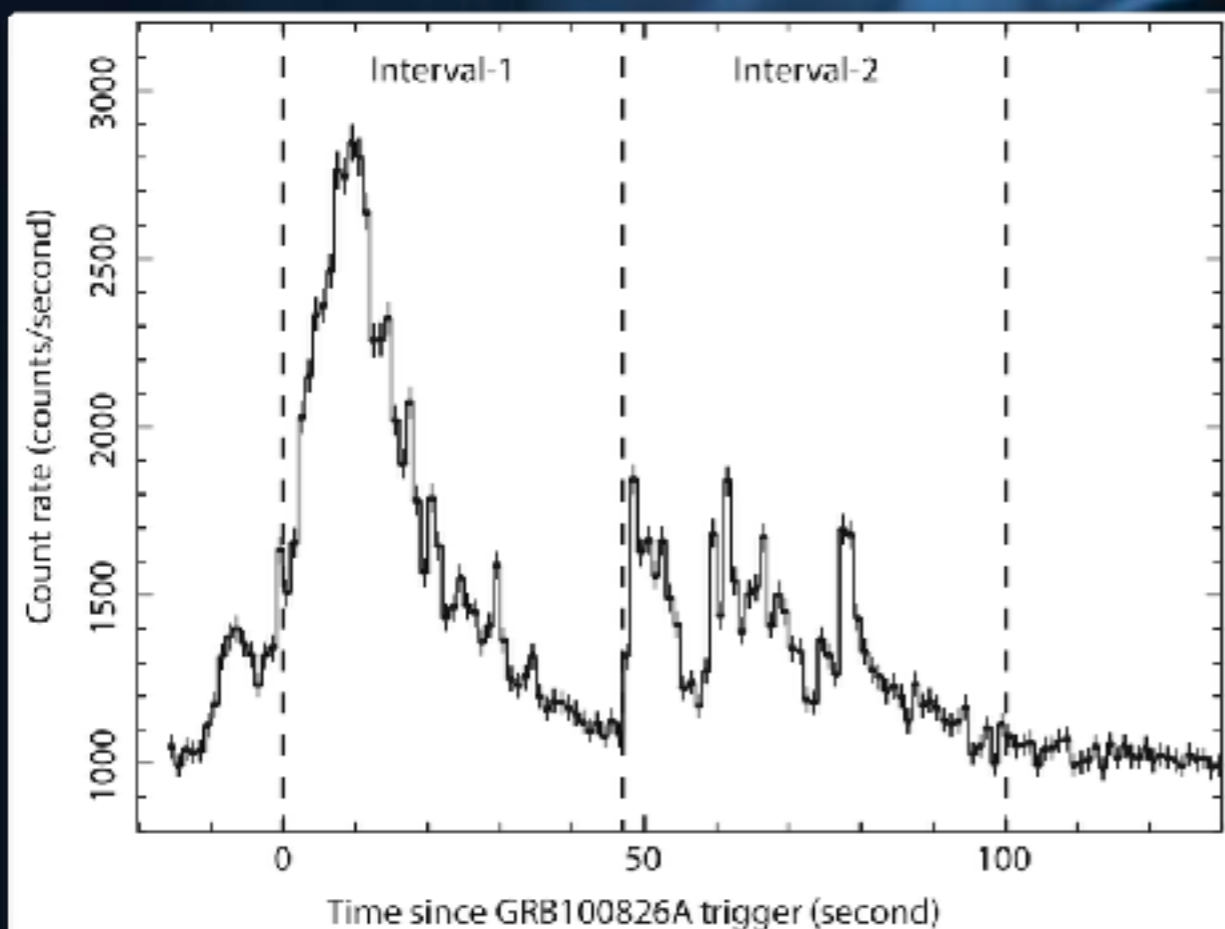
1.5年間で30例のGRBを検出。

その中で7例に関しては、偏光解析が行え、その中で3例に関しては偏光が検出された。

## 1) GRB 100826A

継続時間も長く、エネルギーも大きかった。

2つの時間帯で偏光解析が行えた。



Yonetoku et al. Ap.J. 2011

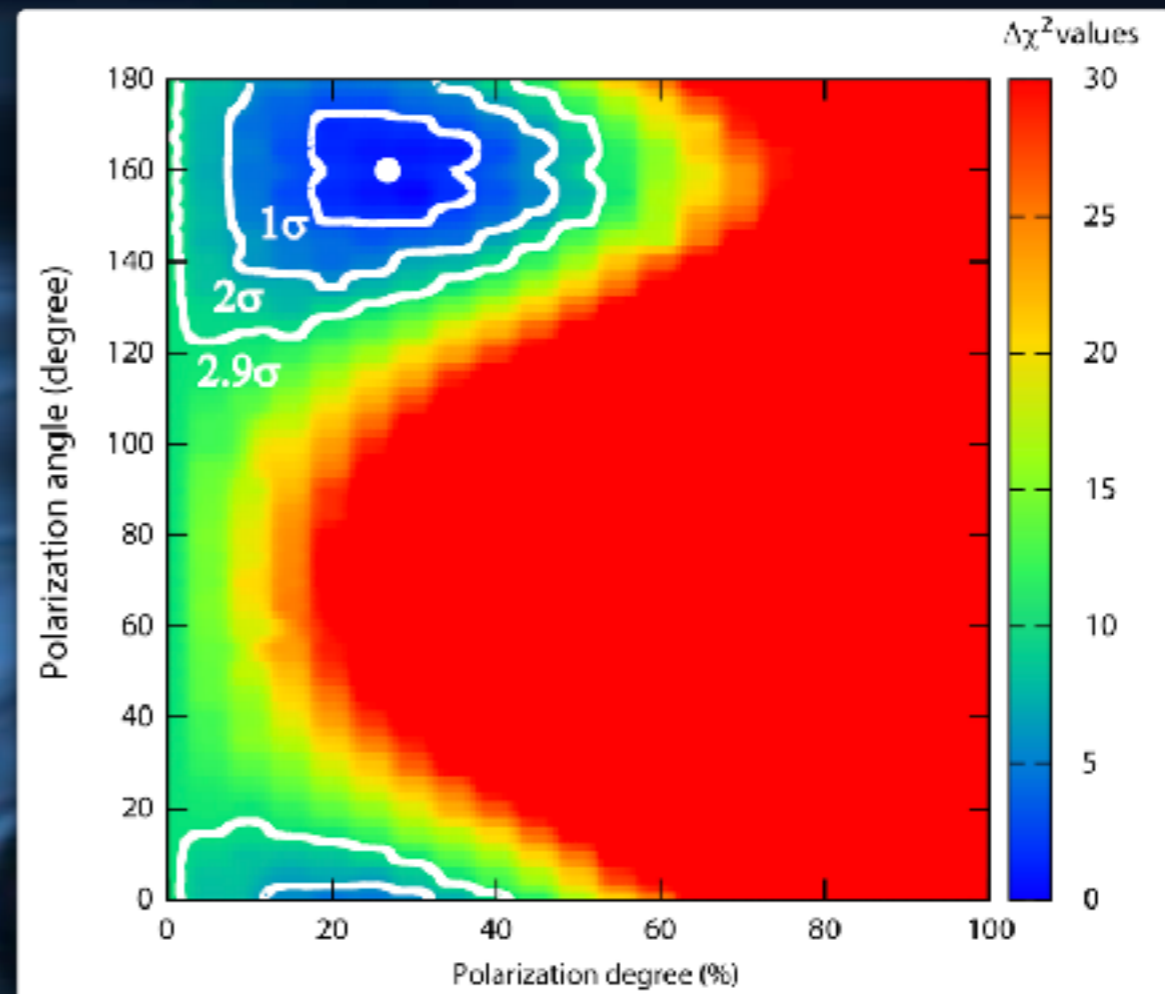
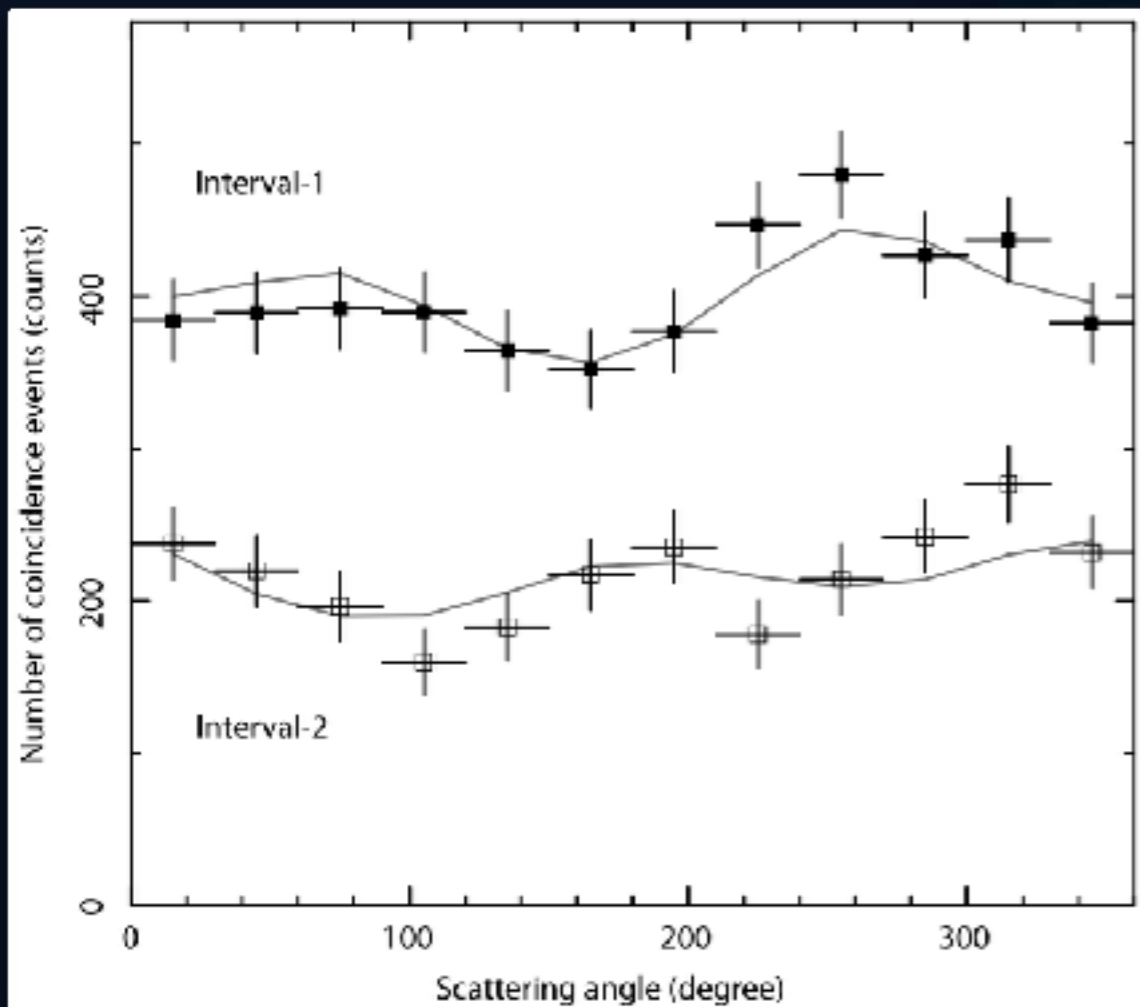
第1表 GAPが検出したガンマ線バースト  
 ほぼ10日に1個程度の割合でGRBが検出されている。太字は偏光が測られた3個と上限値が得られた4個。

No	GRB	エネルギー erg cm <sup>-2</sup>	入射角
1	100707A	<sup>a</sup> 8.8 × 10 <sup>-5</sup>	93
2	100715A		19
3	100719B		145
4	100722A		34
5	100804A		63
6	100809A		—
7	100820A		34
8	<b>100826A</b>	<sup>b</sup> 3.0 × 10 <sup>-4</sup>	20
9	101014A		54
10	101021A		41
11	101113A		26
12	101123A	<sup>a</sup> 1.3 × 10 <sup>-4</sup>	74
13	101126A		62
14	101219A	<sup>b</sup> 3.0 × 10 <sup>-6</sup>	52
15	101231A		63
16	110124A		—
17	<b>110301A</b>	<sup>a</sup> 3.7 × 10 <sup>-5</sup>	48
18	110406A	<sup>b</sup> 4.8 × 10 <sup>-5</sup>	133
19	110423A		—
20	110428A	<sup>a</sup> 2.3 × 10 <sup>-5</sup>	109
21	110505 ?		—
22	110510 ?		—
23	110514		—
24	110604A	<sup>c</sup> 3.1 × 10 <sup>-5</sup>	43
25	110625A	<sup>b</sup> 6.1 × 10 <sup>-5</sup>	41
26	110708A	<sup>d</sup> 2 × 10 <sup>-6</sup>	67
27	110715A	<sup>b</sup> 2.3 × 10 <sup>-5</sup>	88
28	110717B		25
29	<b>110721A</b>	<sup>a</sup> 3.5 × 10 <sup>-5</sup>	30
30	110825A	<sup>a</sup> 5.4 × 10 <sup>-5</sup>	29

<sup>a</sup> 10~1000 keV, <sup>b</sup> 20~10000 keV, <sup>c</sup> 20~5000 keV,

<sup>d</sup> 20~200 keV の各エネルギー範囲。

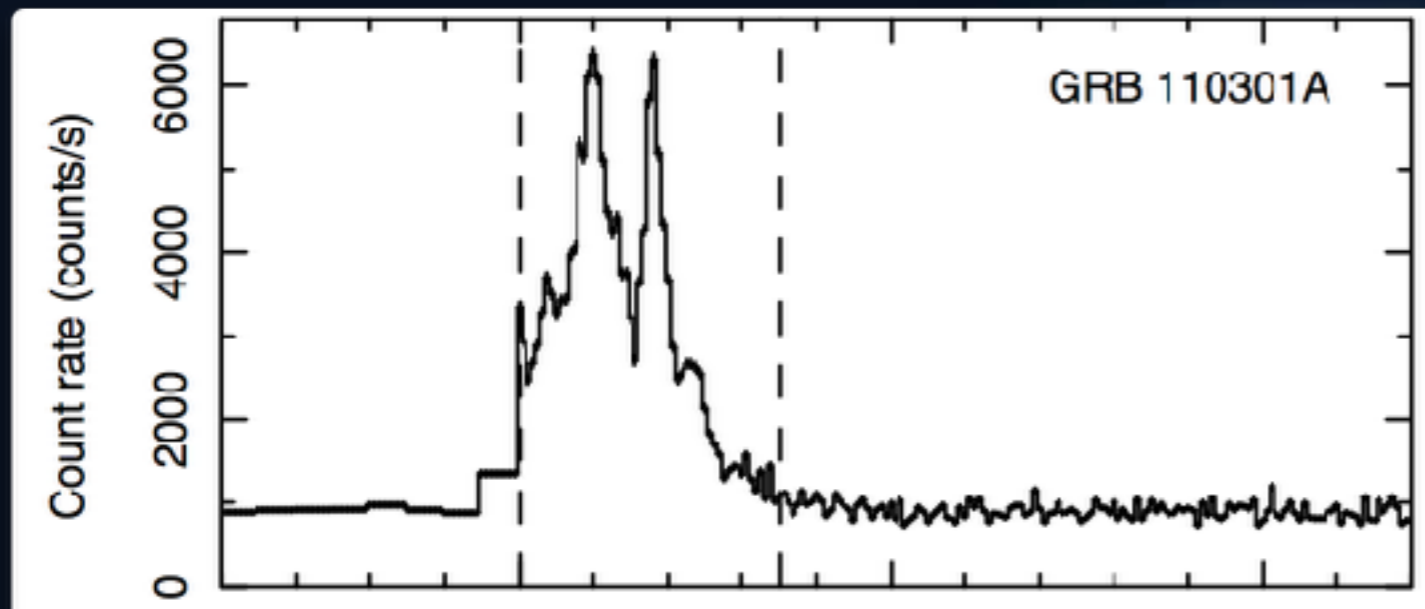
時間に対して偏光方向が90度近く変化するという現象を捉える。



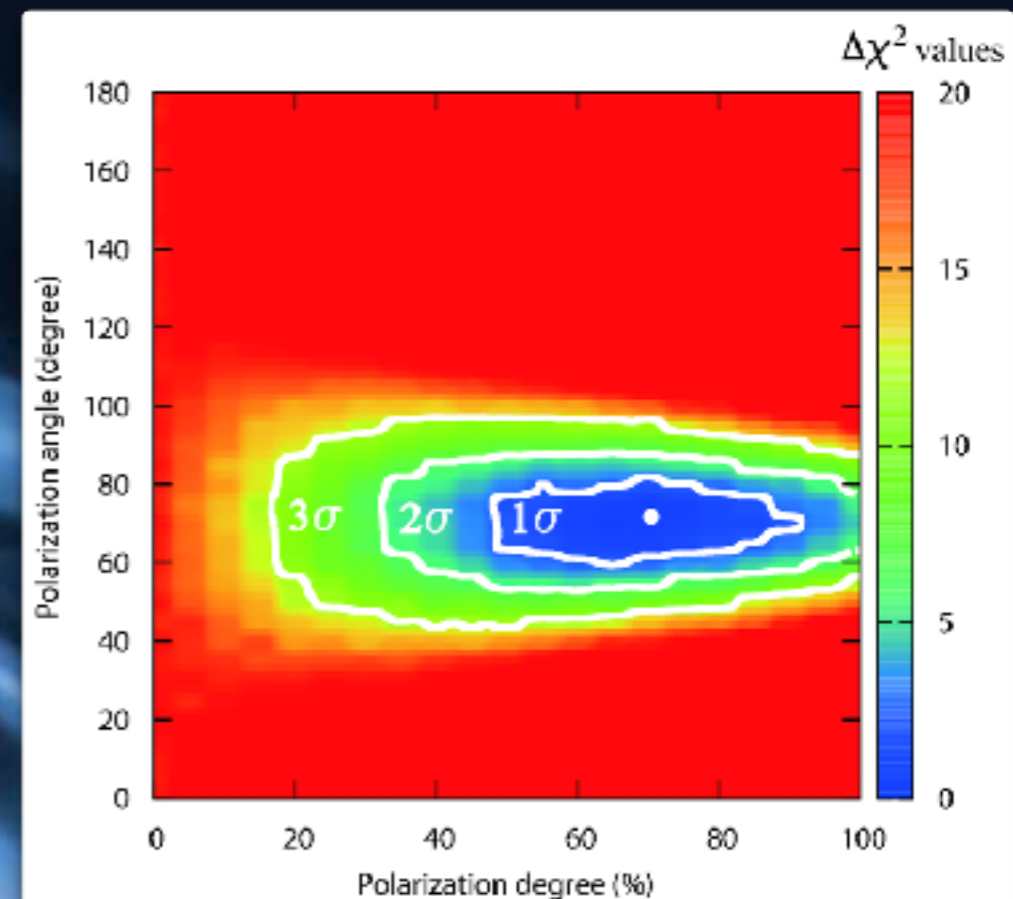
Yonetoku et al. Ap.J. 2011

時間帯	偏光度	偏光方向
Interval1	$25 \pm 15\%$	$159 \pm 18^\circ$
Interval2	$31 \pm 21\%$	$75 \pm 20^\circ$
全時間	$27 \pm 11\%$	

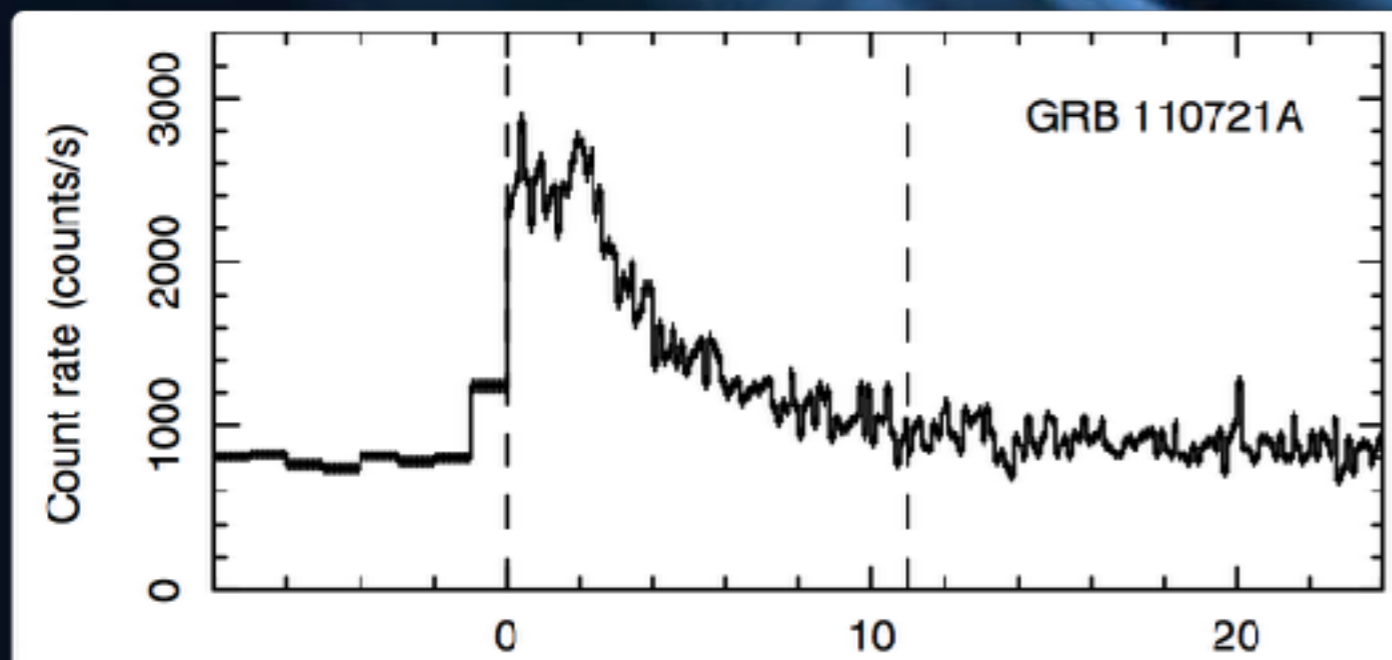
## 2) GRB 110301A



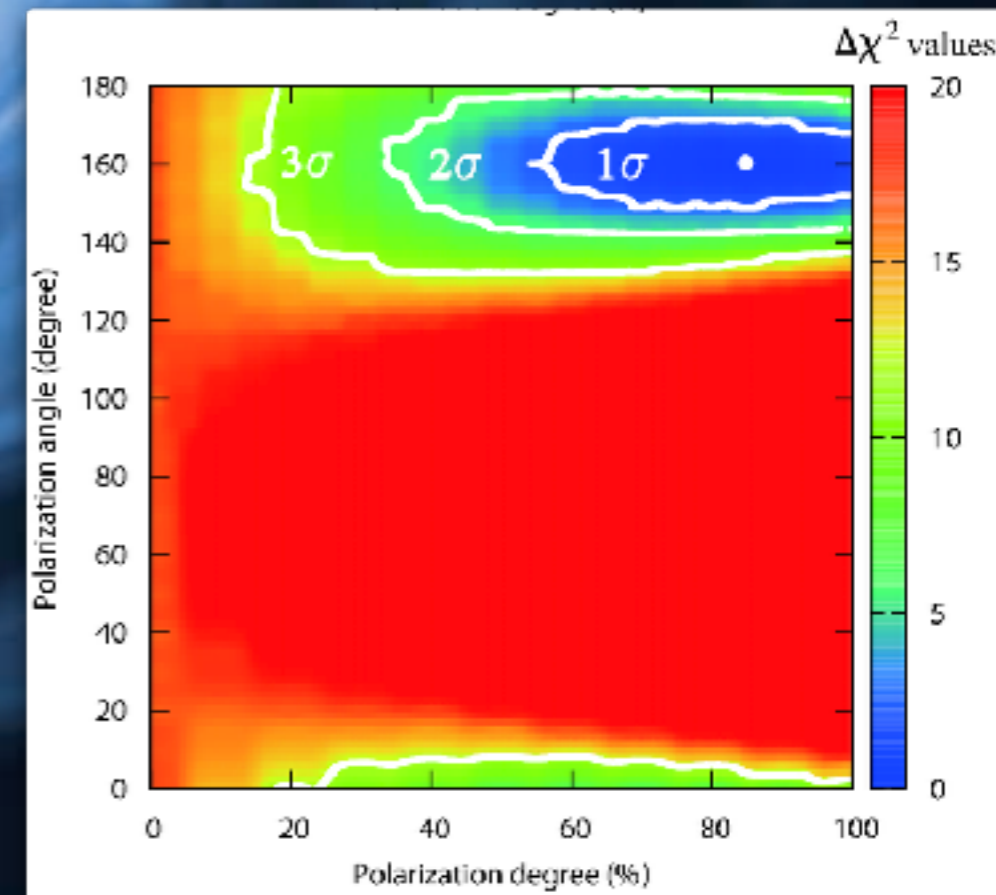
偏光度と偏光方向が $70 \pm 22\%$ 、 $73 \pm 11^\circ$



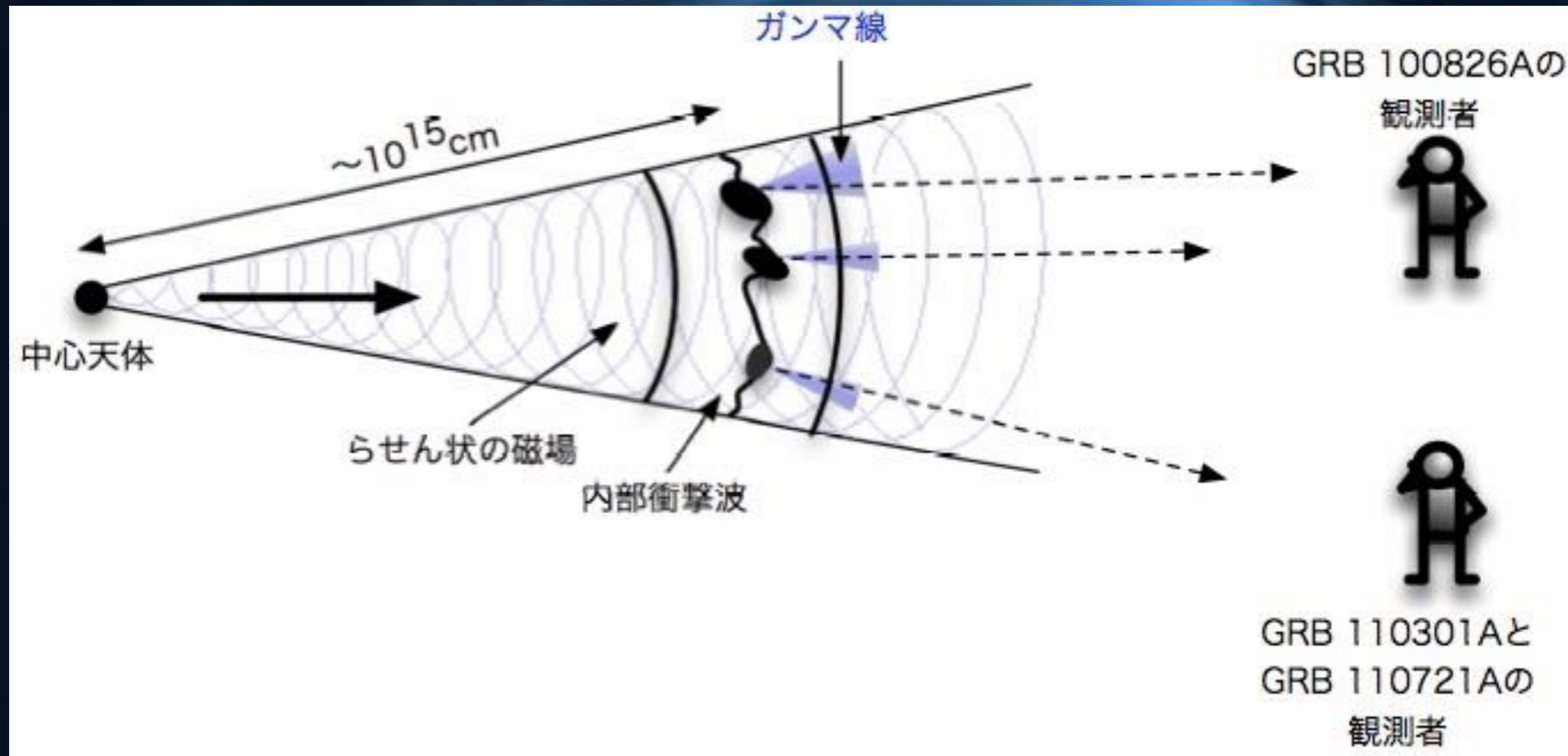
## 3) GRB 110721A



偏光度と偏光方向が $84^{+16}_{-28}\%$ 、 $160 \pm 11^\circ$



GRB 100826Aはエネルギーが大きく、偏光度は小さい。そして偏光方向が途中で変わる。GRB 110301Aと110721Aは偏光度が高い。70%程度の偏光度は、熱的なフォトンの散乱によっては作りにくい。シンクロトロン放射であれば可能(しかし特殊な場合が想定されるが)。



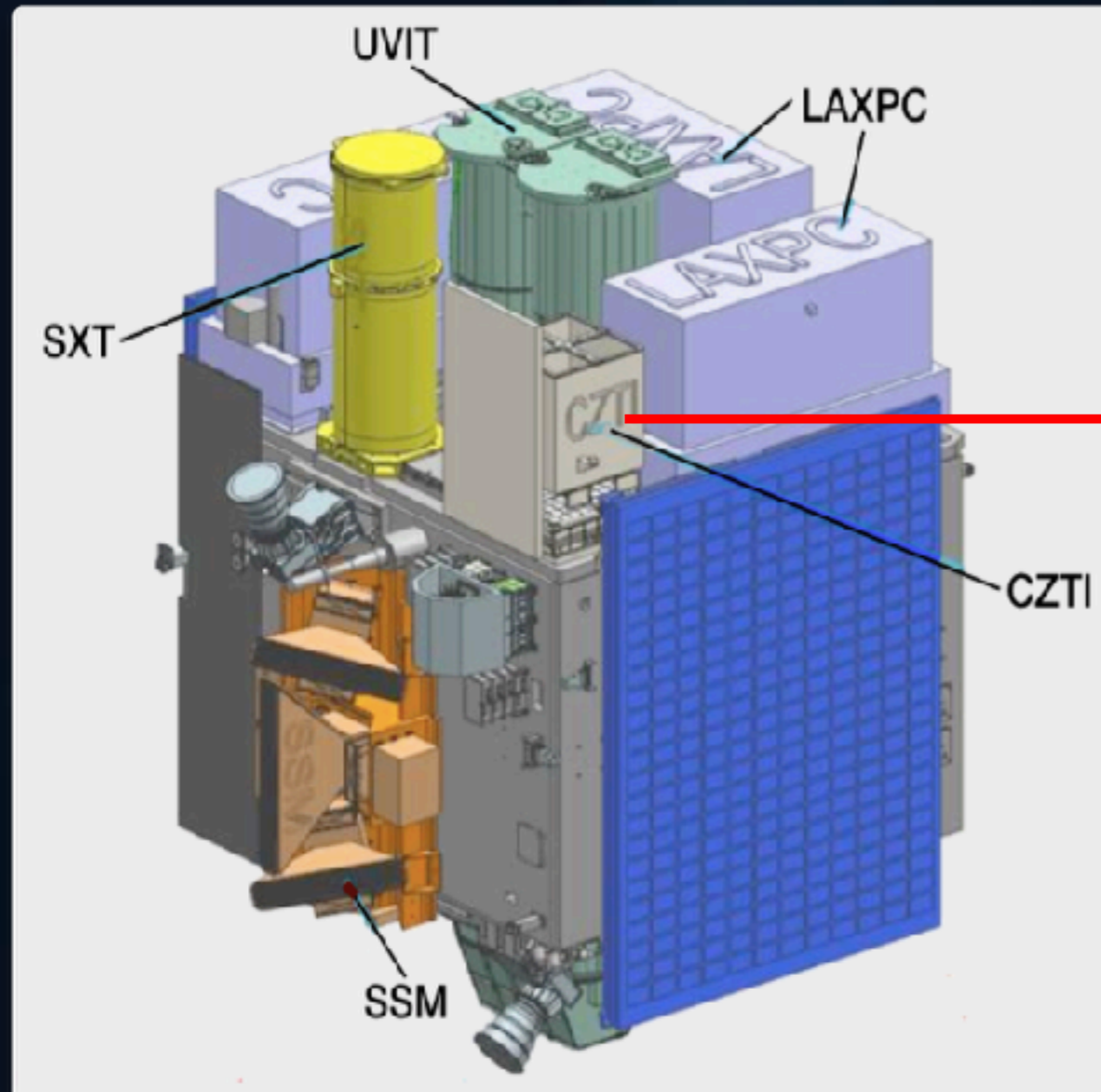
Gunji et al. 天文月報 2013年

シンクロトロン放射が有力だが、決定的な事は言えなかった。

GAPのGRB 110721Aのデータを使って、CPT Violationに対する厳しい制限を付けるなど、少額で行った割には良い実験だった。

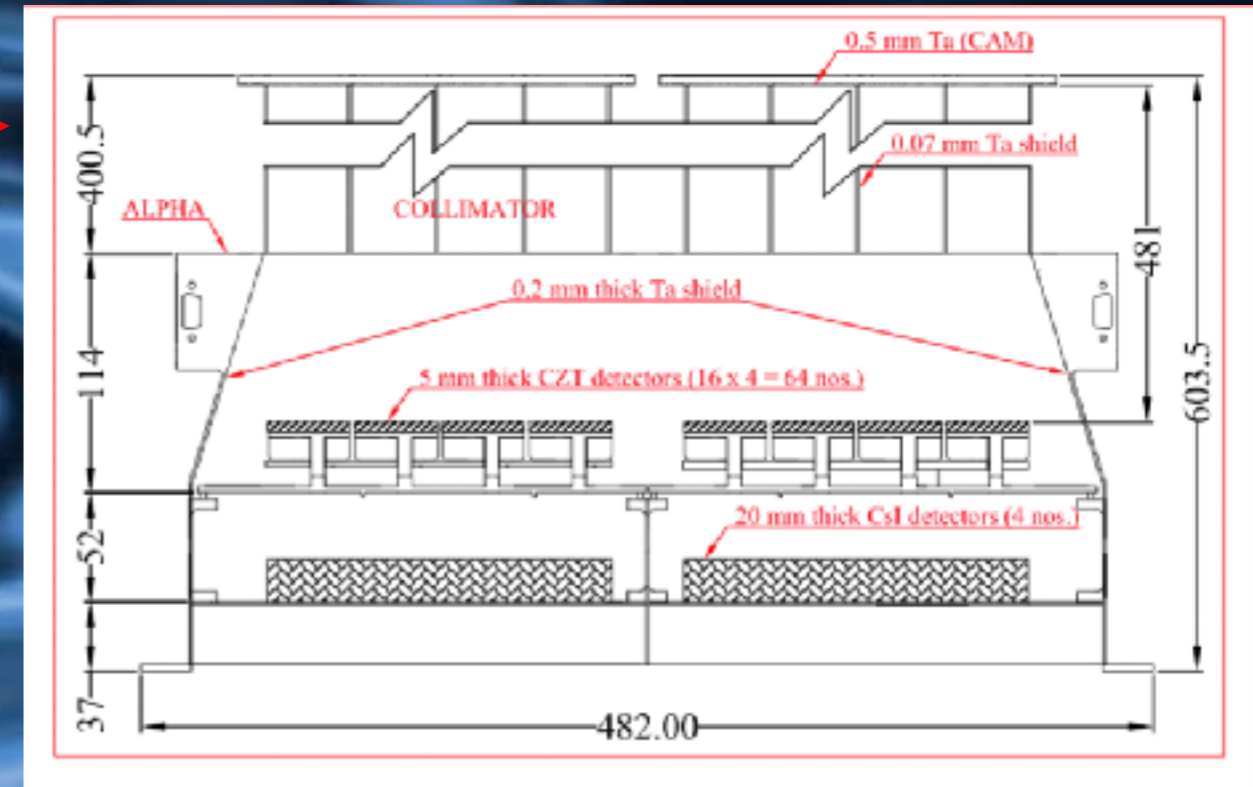
## 2.3 AstrosatとPOLAR

1) Astrosatは2015年9月にインドによって打ち上げられた衛星



<http://astrosat.iucaa.in>

コーディッドマスクの下にCdZTeのピクセル検出器が搭載されている。検出面積は1000cm<sup>2</sup>程度。



Rao et al. arXiv:1608.07388v1

本来は点源観測用の検出器だが、100keV以上ではシールドがすかすかになり、CdZTe検出器でコンプトン散乱が起こる確率が上がるため、ガンマ線バースト偏光度検出器となる。



1年間で47個のGRBを検出。その中の11個はそこそこ明るく、FermiやSwiftによって方向決定ができたので、偏光の解析が行えた。

Table 1. The sample of GRBs selected for polarization study with CZTI

GRB (Detectors)	Localization <sup>a</sup>	T <sub>90</sub> (s)	(t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> ) <sup>b</sup> (s)	α/−p	Spectral Parameters		Afterglows <sup>c</sup>	θ & φ (°)	Fluence <sup>d</sup>
					β	E <sub>p</sub> / E <sub>c</sub> (keV)			
151005A (GBM)	2'' .3	84.0	(−5.5, 85.2)	−1.30 <sup>+0.07</sup> <sub>−0.06</sub>	−2.20 <sup>+0.05</sup> <sub>−0.12</sub>	483 <sup>+286</sup> <sub>−150</sub>	X	60.82, 67.57	0.7(2.5)
160106A (GBM)	1'' .1	39.4	(−1.5, 14.7)	−0.53 <sup>+0.07</sup> <sub>−0.06</sub>	−2.31 <sup>+0.14</sup> <sub>−0.21</sub>	400 <sup>+45</sup> <sub>−40</sub>		106.12, 255.69	3.5(5.6)
160325A (GBM, BAT)	1'' .7	43.0	(−0.8, 15.2) (39.2, 27.2)	−0.71 <sup>+0.07</sup> <sub>−0.06</sub>	−2.26 <sup>+0.20</sup> <sub>−0.30</sub>	238 <sup>+25</sup> <sub>−22</sub>	X, U, O, NIR	0.66, 159.44	0.75(4.78)
160509A (GBM)	2'' .3	371.0	(3.7, 20.6)	−0.75 <sup>+0.02</sup> <sub>−0.02</sub>	−2.13 <sup>+0.03</sup> <sub>−0.03</sub>	334 <sup>+12</sup> <sub>−10</sub>	X, O, R	105.74, 55.45	4.5(48.7)
160502A (GBM)	1'' .0	16.4	(−1.0, 4.0) (12.0, 19.0)	−0.61 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	−2.40 <sup>+0.10</sup> <sub>−0.13</sub>	280 <sup>+17</sup> <sub>−14</sub>		62.96, 273.12	2.2(8.8)
160521A (GBM, BAT)	1'' .0	43.0	(130, 158)	−0.97 <sup>+0.01</sup> <sub>−0.01</sub>	−2.25 <sup>+0.03</sup> <sub>−0.03</sub>	860 <sup>+25</sup> <sub>−24</sub>	O	156.18, 59.31	20.9(47.0)
160610A (GBM)	4'' .3	24.3	(5.9, 10.4)	−0.36 <sup>+0.03</sup> <sub>−0.03</sub>	−2.38 <sup>+0.05</sup> <sub>−0.06</sub>	330 <sup>+15</sup> <sub>−13</sub>	X, O, R	65.54, 333.45	0.42(12.3)
160131A (BAT)	2'' .2	325.0	(26.2, 22.4)	−1.00 <sup>+0.14</sup> <sub>−0.14</sub>	—	388 <sup>+2730</sup> <sub>−185</sub>	X, U, O, R	116.86, 184.64	0.9(6.8)
				−1.16 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	−1.56 <sup>+0.07</sup> <sub>−0.10</sub>	586 <sup>+518</sup> <sub>−259</sub>			
160607A (BAT)	1'' .5	33.4	(3.3, 16)	−0.9 <sup>+0.1</sup> <sub>−0.1</sub>	—	131 <sup>+35</sup> <sub>−24</sub>	X, O	138.86, 315.78	0.5(3.9)
				−1.11 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	−2.50 <sup>+0.26</sup> <sub>−0.36</sub>	176 <sup>+25</sup> <sub>−42</sub>			
160703A (BAT)	3'' .9	46.4	(−4.2, 2.6) (3.8, 24.2)	−0.97 <sup>+0.14</sup> <sub>−0.14</sub>	—	277 <sup>+430</sup> <sub>−197</sub>	X, U, O, R	10.14, 95.95	0.5(1.5)
				−1.23 <sup>+0.04</sup> <sub>−0.04</sub>	—	327 <sup>+16</sup> <sub>−36</sub>			
160623A (CZTI)	3'' .5	90.4	(0, 7)	−0.88 <sup>+0.05</sup> <sub>−0.05</sub>	−2.95 <sup>+0.11</sup> <sub>−0.14</sub>	648 <sup>+33</sup> <sub>−32</sub>	X, O, NIR, R	140.46, 118.06	5.3(18.0)

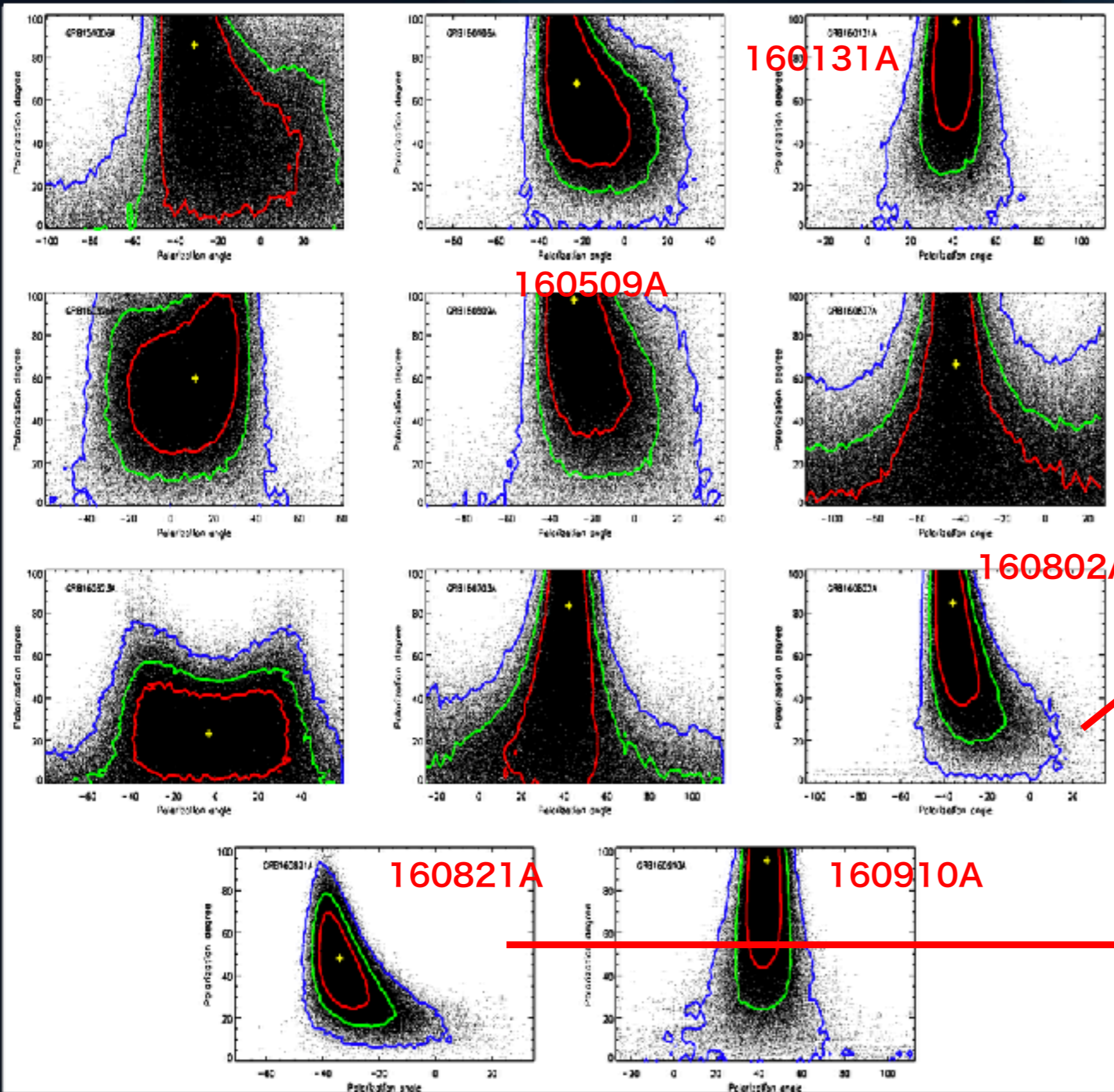
偏光度はのきなみ高い値になっており、数個のバーストに対しては値が明らかに有為である。

**Table 2.** Measured polarization fractions and angles for the GRBs

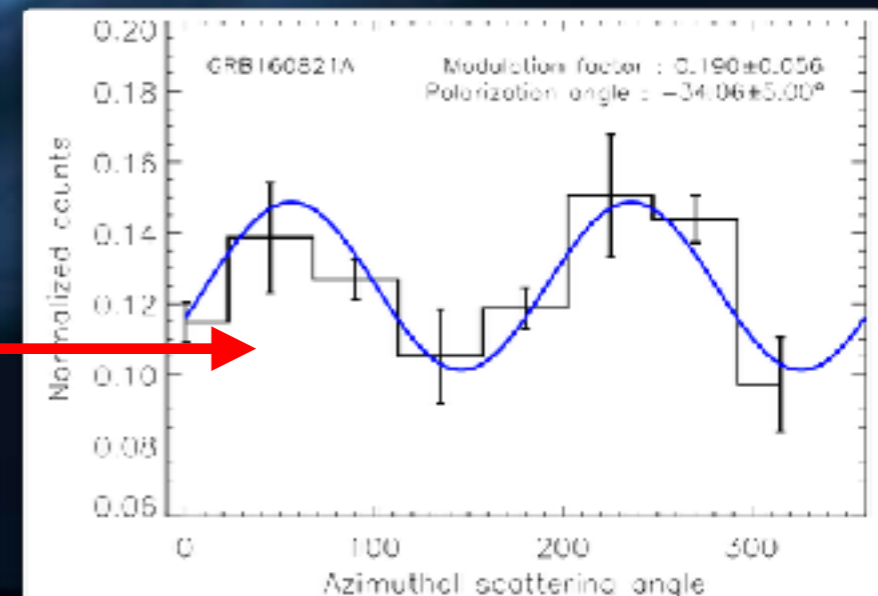
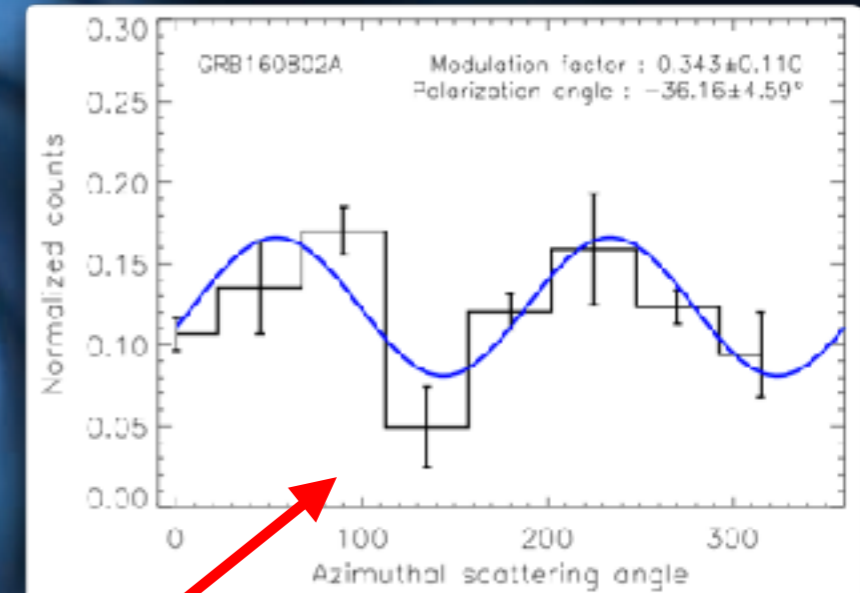
GRB Name	Compton events	PF (%)	PA (°)	Chance Probability (%)
GRB 151006A	459	$<79.2$ ( $\alpha = 0.05, \beta = 0.5$ )	-	4.17
GRB 160106A	950	$68.5 \pm 24$	$-22.5 \pm 12.0^\circ$	3.60
GRB 160131A	724	<u><math>94 \pm 31</math></u>	$41.2 \pm 5.0^\circ$	$<0.1$
GRB 160325A	835	$58.75 \pm 23.5$	$10.9 \pm 17.0^\circ$	5.00
GRB 160509A	460	<u><math>96 \pm 40</math></u>	$-28.6 \pm 11.0^\circ$	$<0.1$
GRB 160607A	447	$<75$ ( $\alpha = 0.05, \beta = 0.5$ )	-	11.15
GRB 160623A	1400	$<46.4$ ( $\alpha = 0.05, \beta = 0.5$ )	-	49.05
		$<57.1$ ( $\alpha = 0.01, \beta = 0.5$ )		
GRB 160703A	448	$<54.5$ ( $\alpha = 0.05, \beta = 0.5$ )	-	0.68
		$<68.1$ ( $\alpha = 0.01, \beta = 0.5$ )	-	
GRB 160802A	901	<u><math>85 \pm 29</math></u>	$-36.1 \pm 4.6^\circ$	$<0.1$
GRB 160821A	2549	<u><math>48.7 \pm 14.6</math></u>	$-34.0 \pm 5.0^\circ$	$<0.1$
GRB 160910A	832	<u><math>93.7 \pm 30.92</math></u>	$43.5 \pm 4.0^\circ$	$<0.1$

赤が68%、緑が95%、青が99%を意味している。

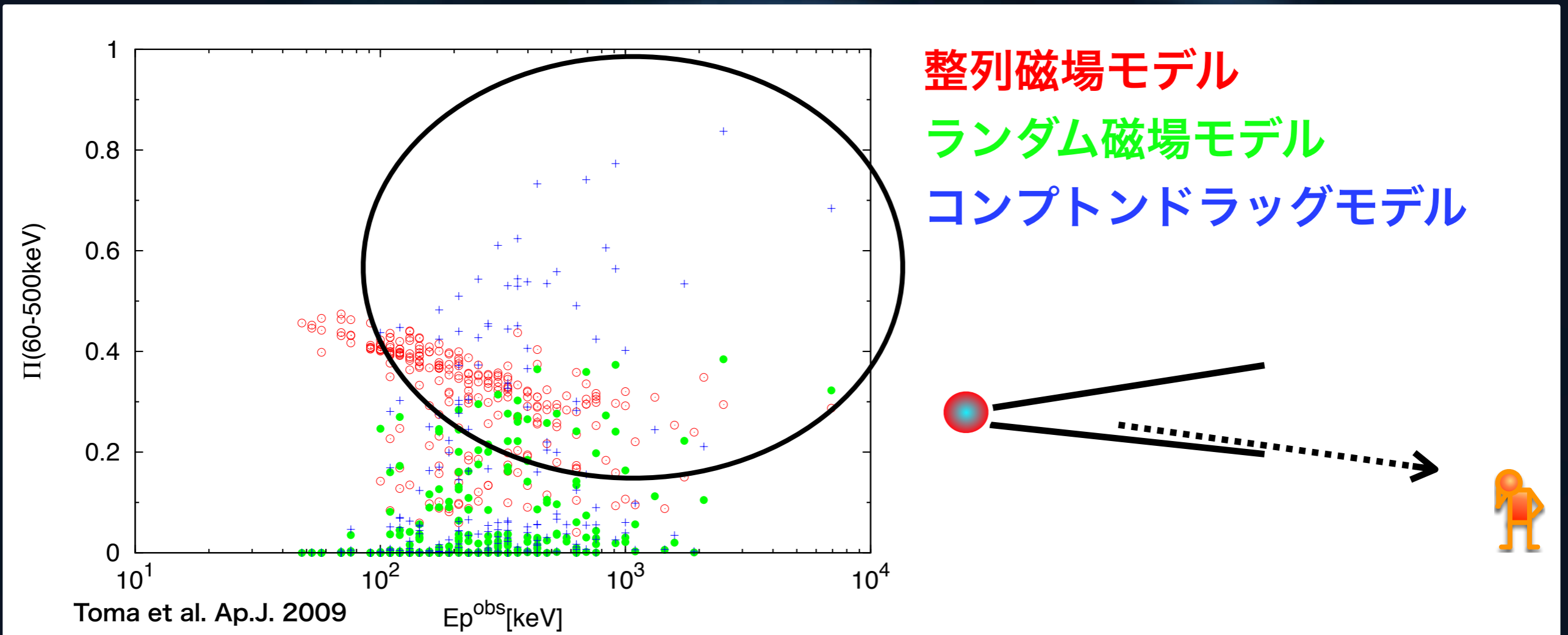
GRB 160821Aに関しては、非常に綺麗なデータになっている。



5つのGRBに関しては信頼できると思われる



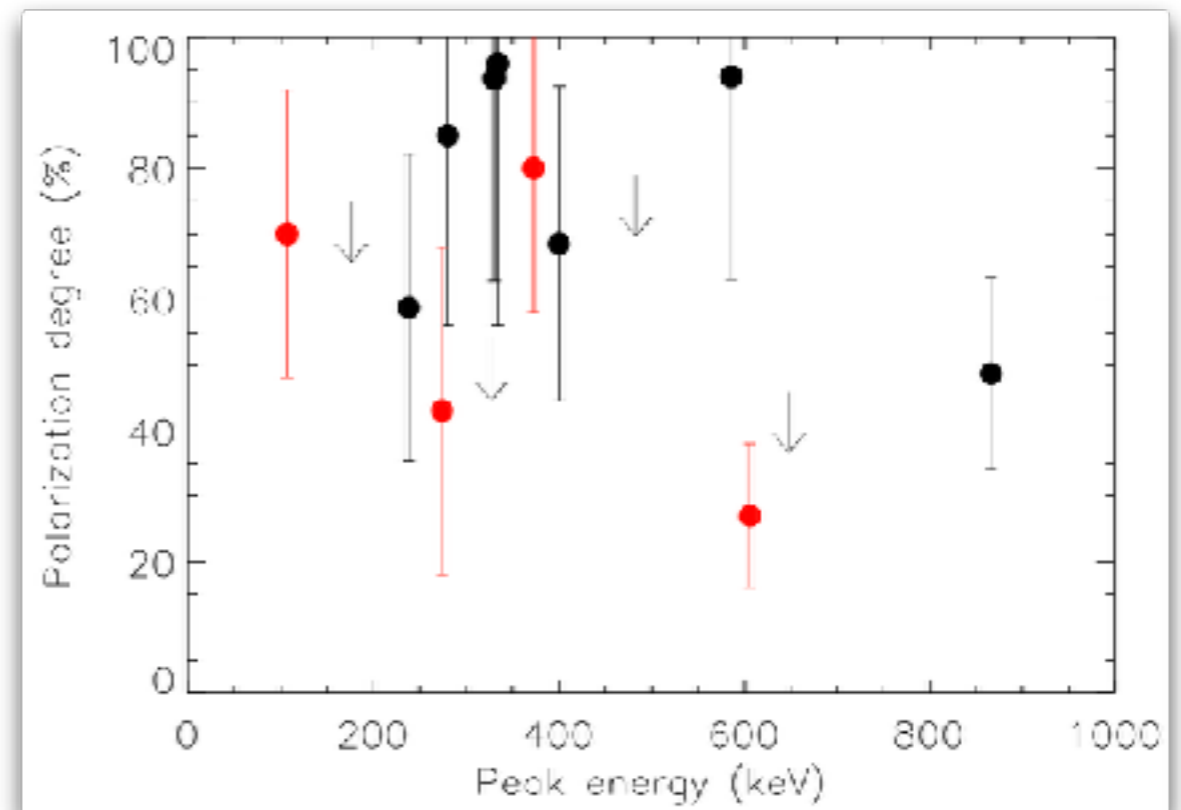
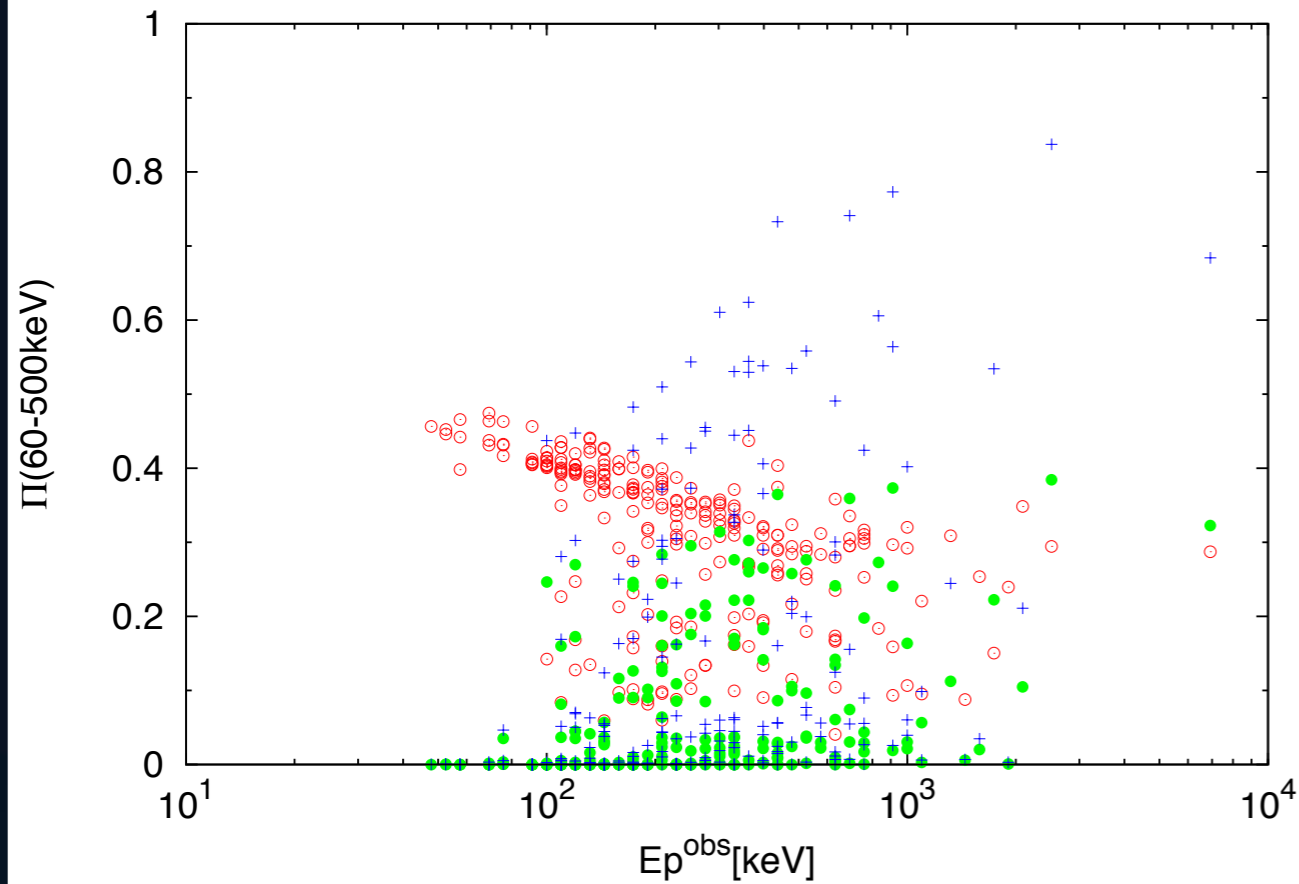
5つのGRBに対して高い偏光度が得られている。確かにランダム磁場モデルやコンプトンドラッグモデルの場合でも、高い偏光度が観測される事はあるが、ジェットすれすれの方角から見たという特別な場合である。



しかしGRB 160623Aは偏光度が低いと考えて良く、コンプトンドラッグモデルが当てはまる可能性もある。

↓  
偏光度が高かった160131Aや160509Aはすれすれから、160623Aは正面から見ていたという解釈は成り立つか？

當真さんのプロットと今までのデータを見比べてみる。

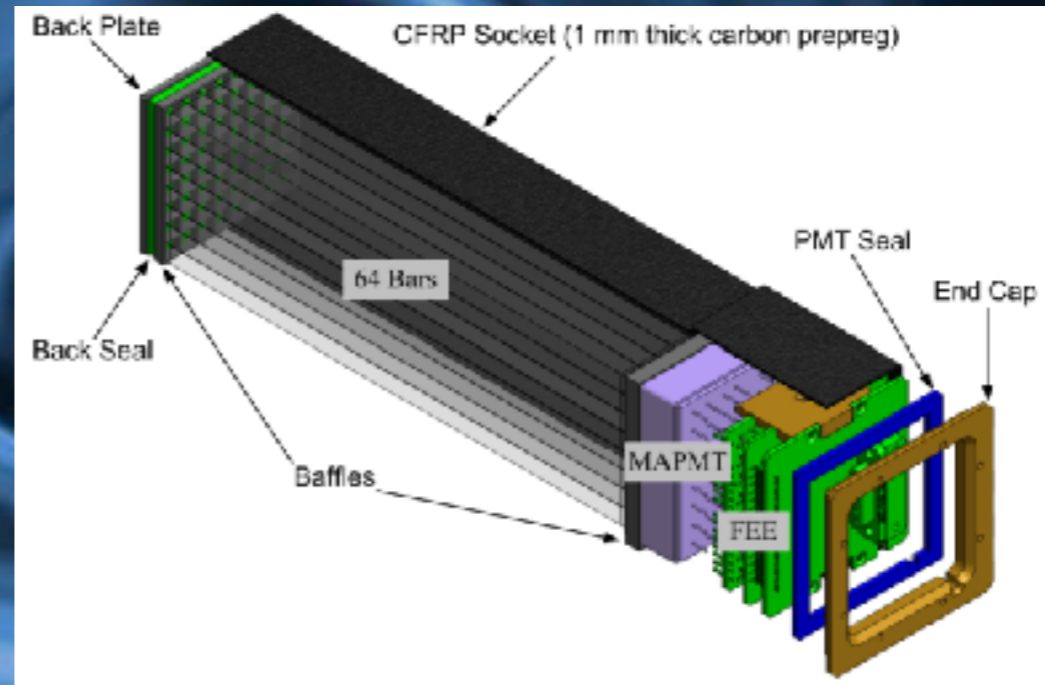
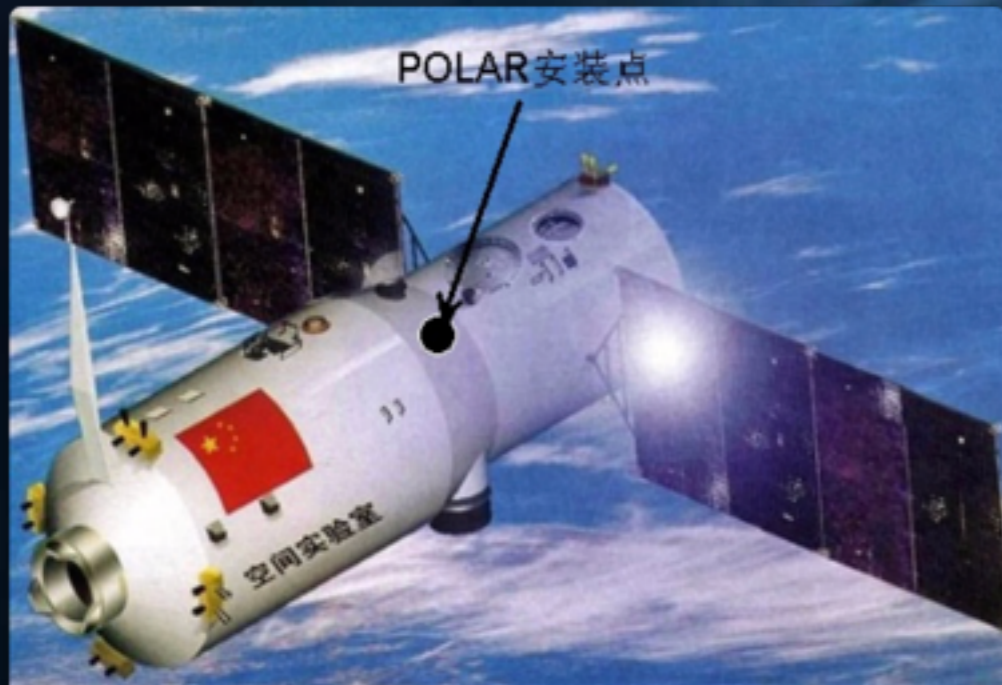


赤がGAPとINTEGRAL

残念ながら、どのモデルが正しいのかはこれだけのデータでは分からない。しかしAstrosatは5年の寿命があるため、今後統計が増える。

## 2)POLAR

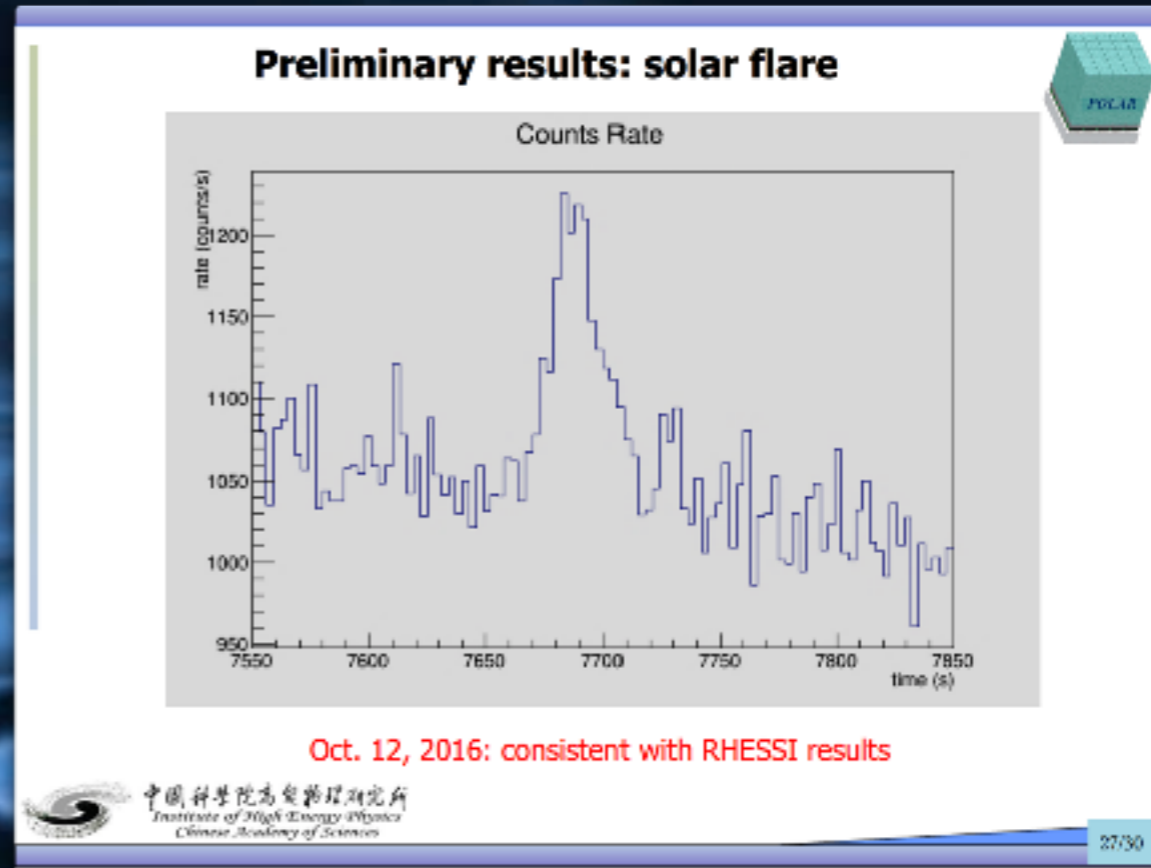
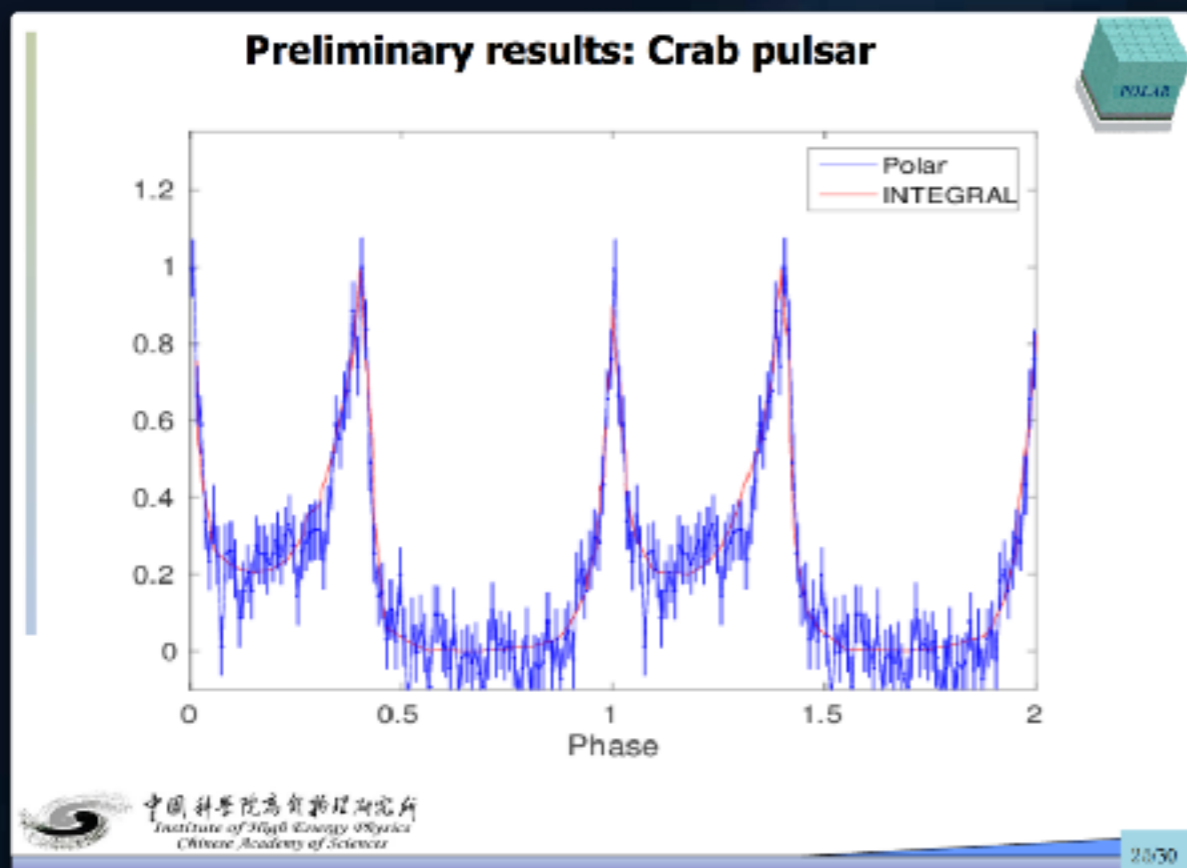
POLARはスイス、ポーランド、中国のコラボレーションによって、2016年9月に打ち上げられたガンマ線バースト偏光度検出器。中国の宇宙ステーション天宮2号に取り付けられている。検出器はプラスチックシンチレーターとMAPMTで構成されたコンプトン散乱型の偏光度検出器



Zhang@2016 理研の研究会

安価なプラスチックシンチレーターのみで作られているため、検出面積は700cm<sup>2</sup>程度あり比較的大きい。

- かにパルサーのタイムプロファイルと太陽フレアの検出
- GCNへのGRBの報告(50イベント程度)



- [20941](#) GRB 170325B: POLAR Observation
- [20940](#) GRB 170325A: Fermi GBM observation
- [20938](#) GRB 170325A: Swift-BAT detection of a short GRB
- [20937](#) INTEGRAL pointed follow-up of IceCube-170321A
- [20935](#) Konus-Wind observation of GRB 170320A
- [20934](#) GRB 170320A: POLAR Observation
- [20932](#) Fermi GBM Observation of IceCube-170321A
- [20930](#) Fermi GBM trigger 511851891/170322212 is not a GRB
- [20929](#) IceCube-170321A - IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event
- [20928](#) INTEGRAL SPI-ACS observation of AMON IceCube EHE 80305071 129307
- [20927](#) IPN Triangulation of GRB 170320A (long/intense)
- [20926](#) Search for counterpart to IceCube-170321A with ANTARES
- [20925](#) GRB 170318A: KAIT Optical Upper Limit
- [20924](#) GRB 170317A: Mondy optical observations
- [20923](#) GRB 170318B: Swift-BAT refined analysis
- [20922](#) GRB 170317A: POLAR observation

Zhang@2016 理研の研究会

[https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3\\_arch\\_old138.html](https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_arch_old138.html)

現在は高圧のトラブルで運用が停止されているが、10発程度のGRBに対してはMDP30%以下で偏光検出が可能なので、来年をめどに結果を公表する予定。(Alsatian Nov.13th,2017でのコメント)

# 3. 将来計画

今後偏光観測をする場合、何を行う必要があるのか

- ・ロングバーストの偏光観測

ガンマ線バーストのエネルギー輻射メカニズムの同定を行いたい。



- ・低い偏光度でも小さな誤差で偏光度を決定できる偏光計が必要。

- ・ショートバーストの偏光観測

ジェット軸に対しての角度と偏光度の相関を見たい。



- ・重力波望遠鏡とのコラボレーションが必要不可欠。
- ・フラックスが小さいGRBに対しても偏光度が決定できる偏光計が必要。

偏光観測に特化し、地上で十分キャリブレーションするべき。

大面積で広いエネルギーレンジに感度を持ち、優れたフォトン統計を獲得すべき。

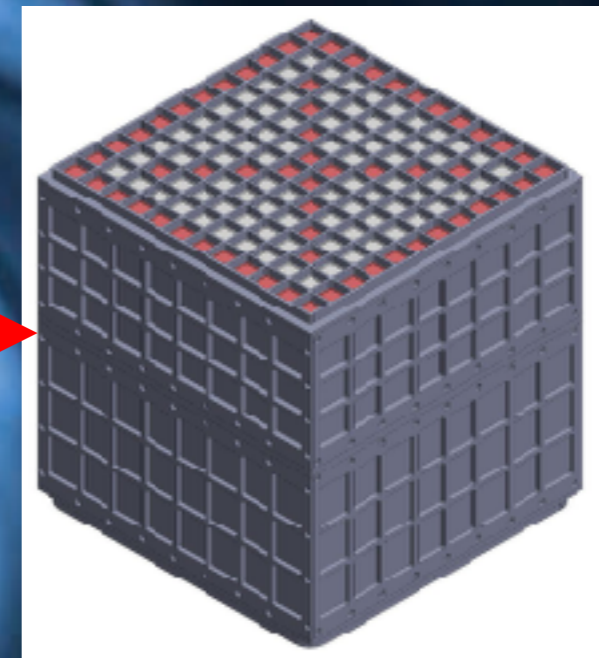
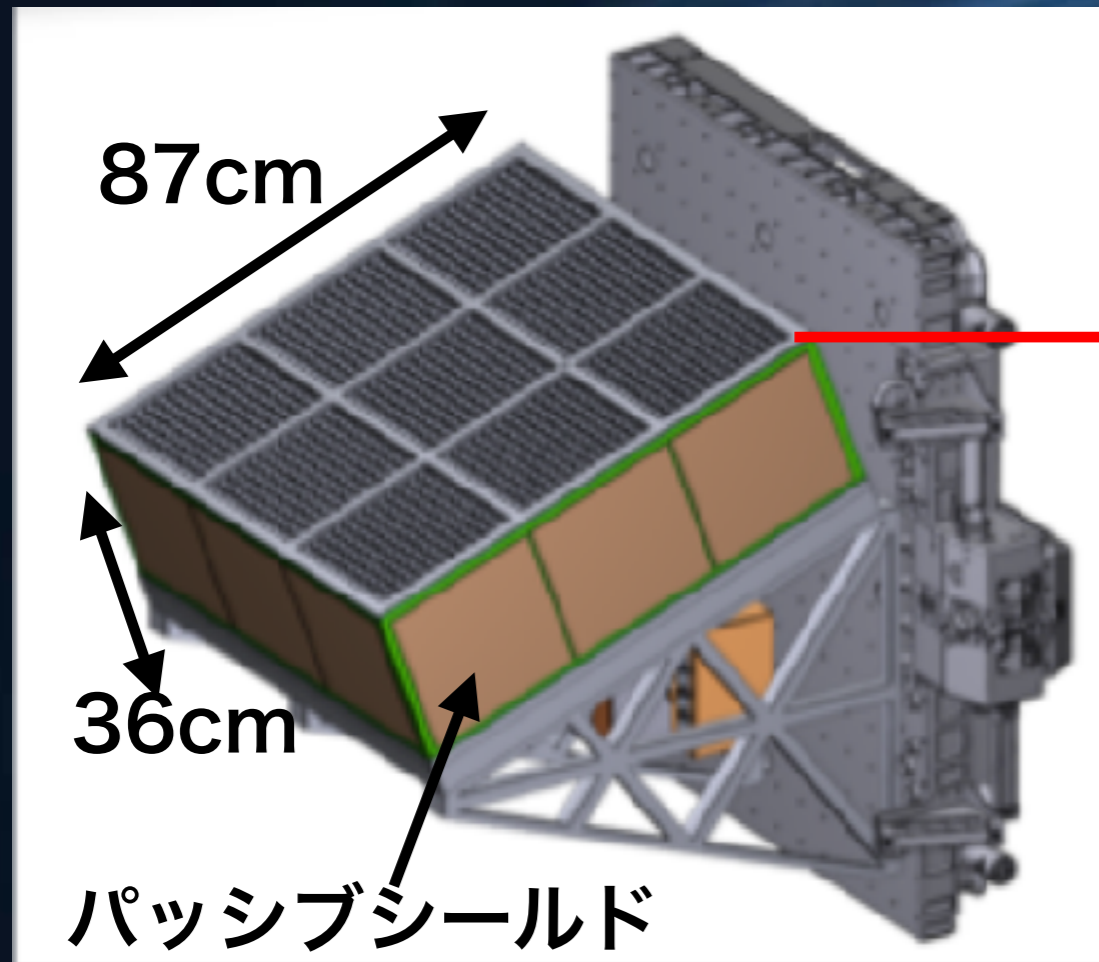
それにより時間による偏光度の変動、エネルギーに対する偏光度の測定も可能となる。



## 3.1 LEAP

UNH、NASA/MSFC、UAH、山形大、大阪大、理研、KEK、JAXA、金沢大、広島大、東工大、東北大、青山学院大等による国際協力。

宇宙ステーションに大型のガンマ線バースト偏光度検出器を載せる計画。



27×27×27cm<sup>3</sup>

コンプトン散乱型の偏光度検出器で、散乱体がプラスチックシンチレーター、吸収体がCsI(Tl)シンチレーター。検出面積は3700cm<sup>2</sup>、視野は±60°。

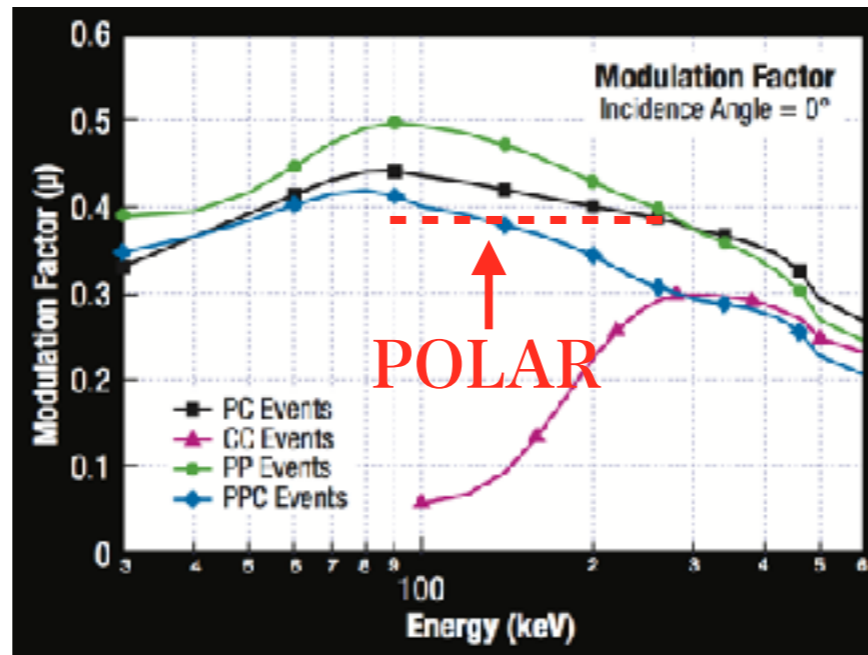
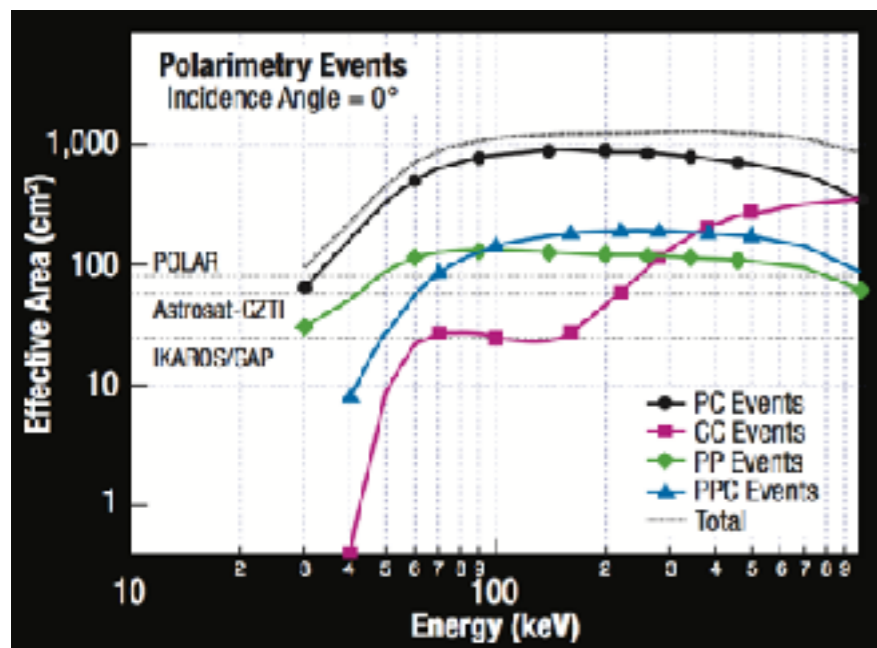
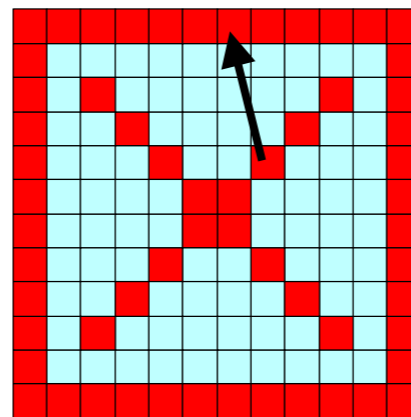
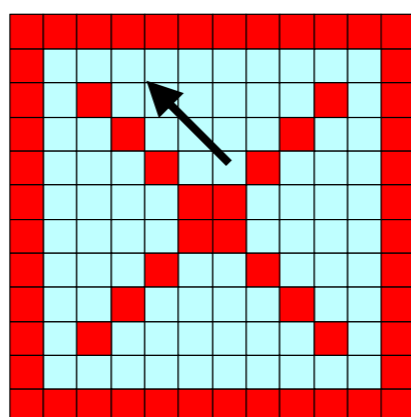
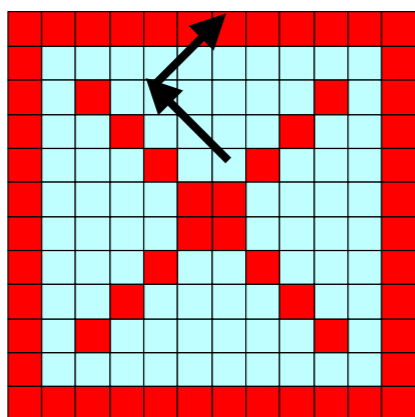
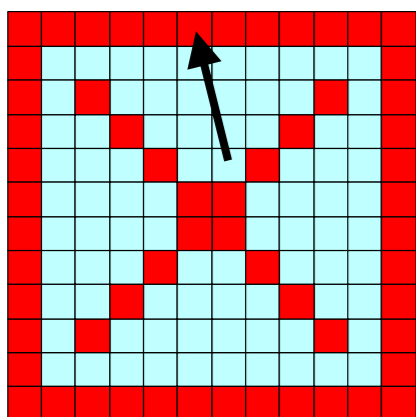
4つのトリガーモードを持っていて、低エネルギーから高エネルギーまでそこそこの検出効率を持っている。

PC mode

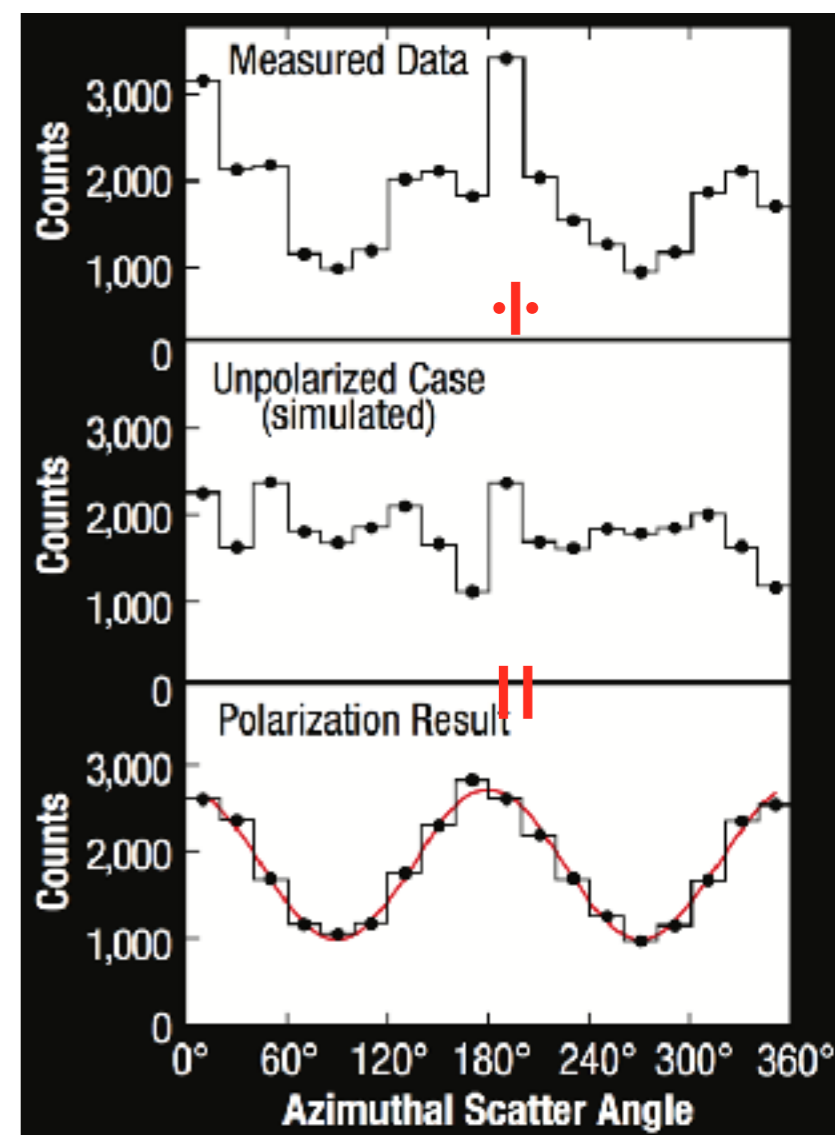
PPC mode

PP mode

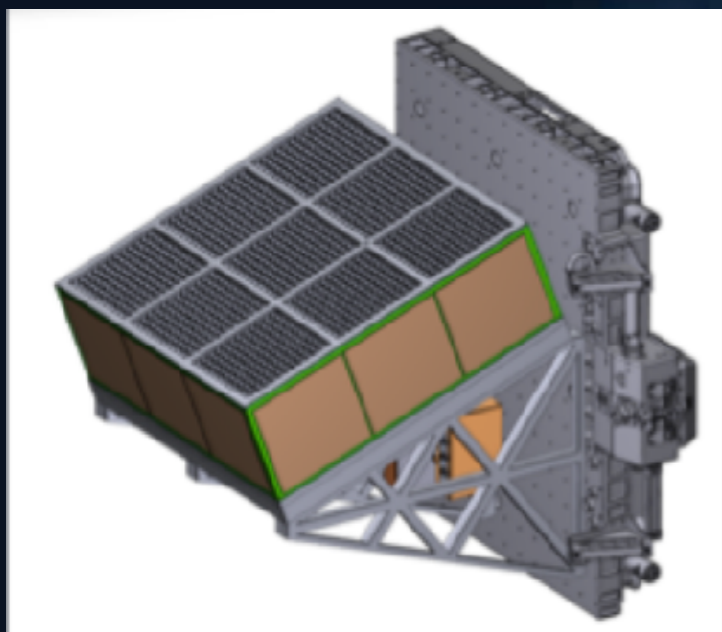
CC mode



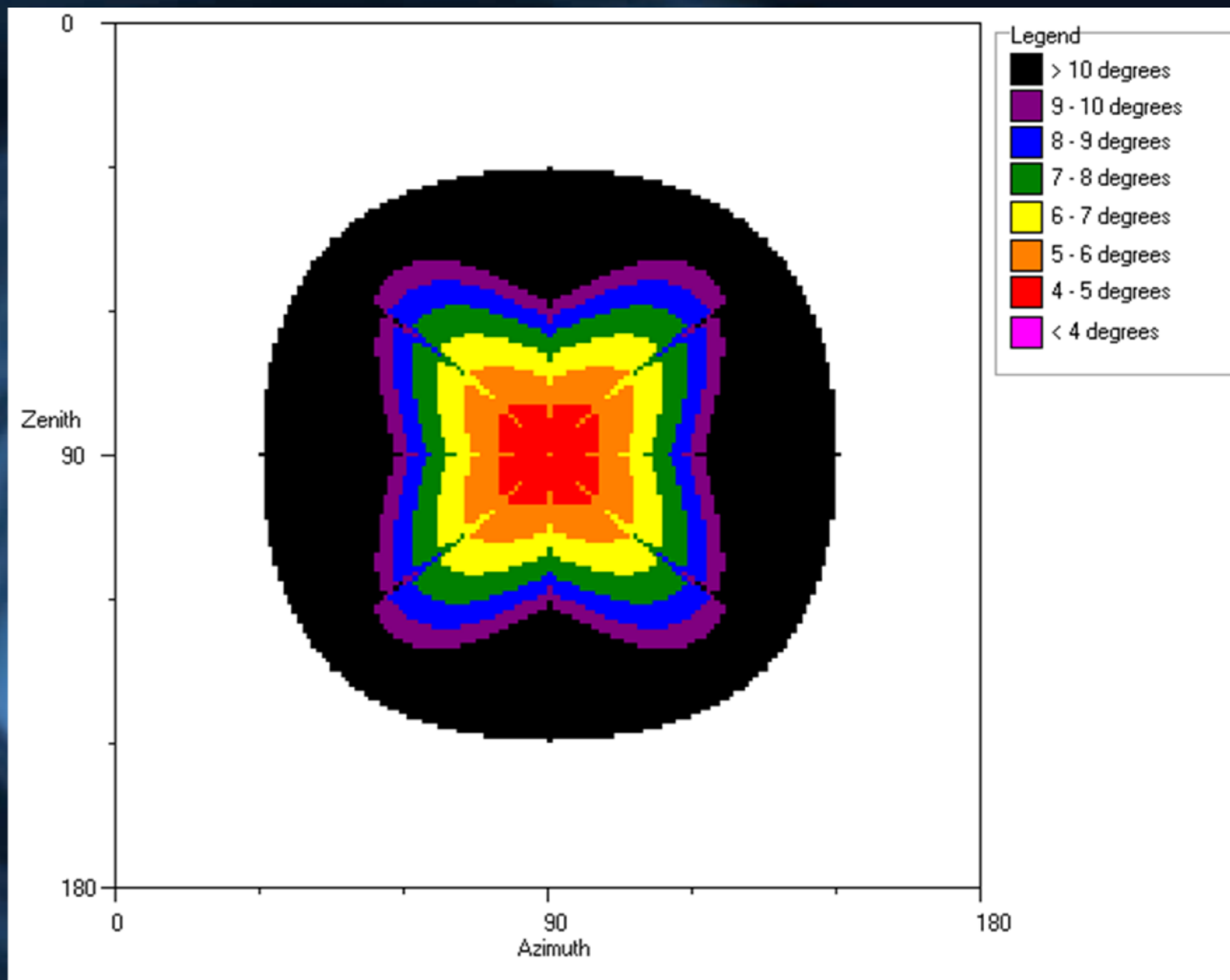
以下の方法でモジュレーションカーブが得られる。



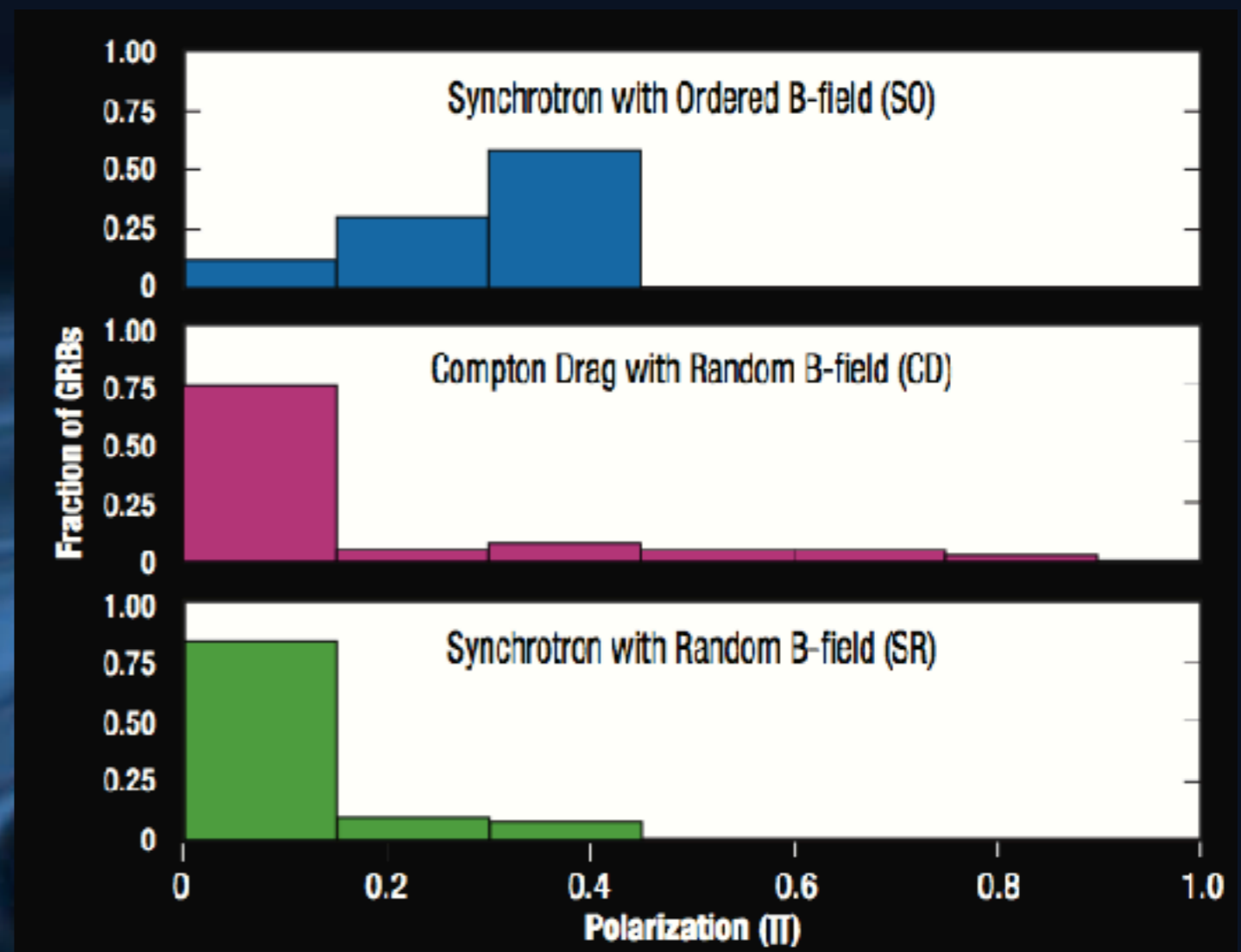
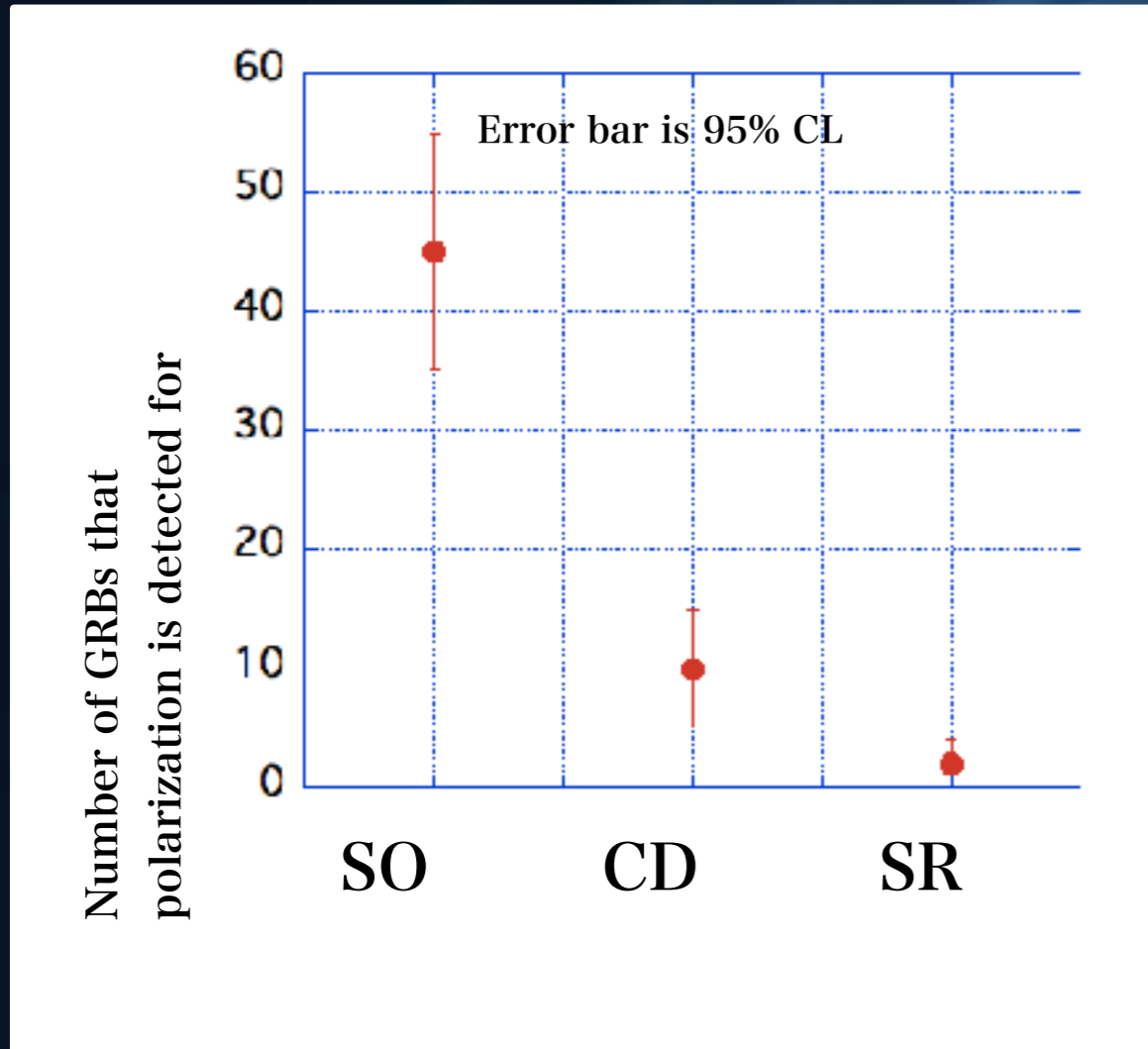
側面に付いているシールドが一部外されて、CsI(Tl)が露出している事でガンマ線を直に検出できる。それにより、粗い方向決定が可能となる。



45°程度ずれた方向からやってきた場合で、角度決定精度はおよそ10°程度。



2年間のオペレーションで  
各々のモデルでどの程度の  
数のGRBに対して偏光検出が  
行えるか調べてみる。



偏光検出が行えたGRBの数により、  
どのモデルがもっともらしいかを判断できる。

2016年の12月にNASAのMission of Opportunityに応募したが  
2017年8月に不採択の通知が来た。ただし、評価として「採択に準ずる」  
(Criteria2)であったため、もう一度戦略を練り直して、現在再挑戦の  
準備を進めている。

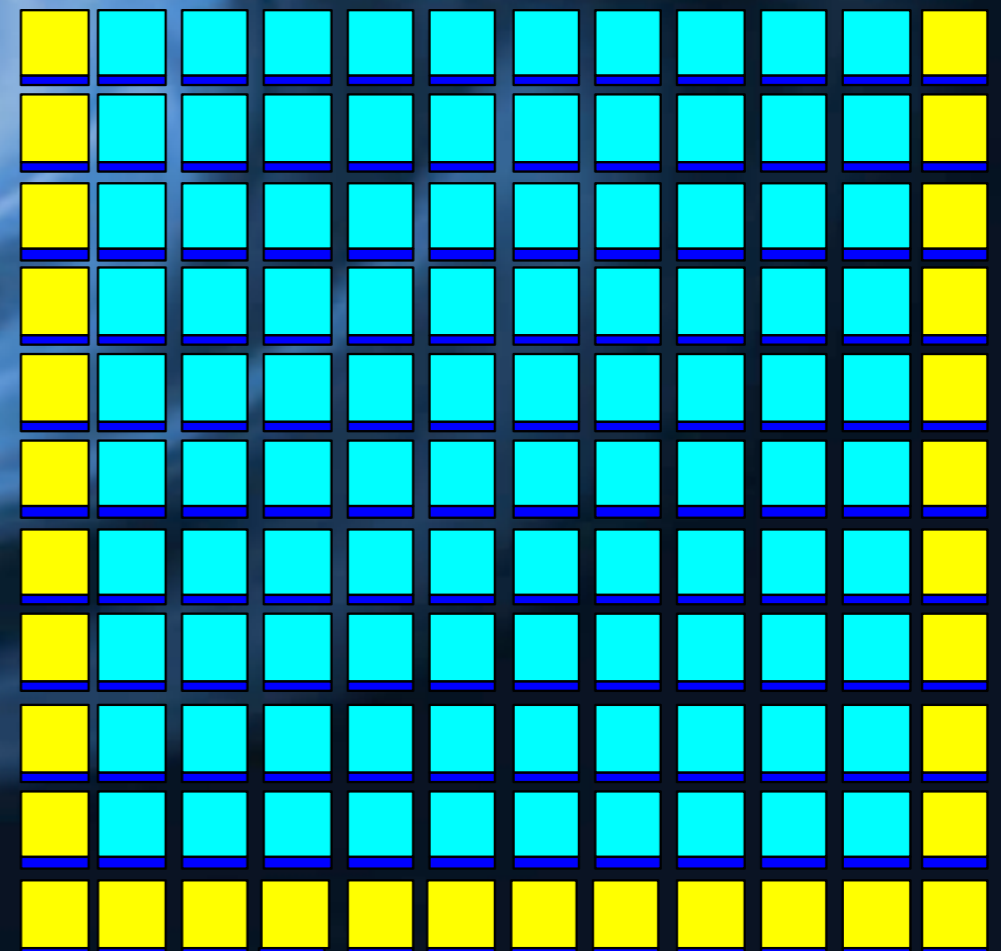


宇宙ステーションは2024年までしか運用が確約されていないので、  
小型衛星若しくは中型衛星への搭載を検討する予定である。



少し時間的余裕があるため、検出器の  
デザインをもう少しエスタブリッシュする  
事も検討中。

例えばプラスチックシンチ+MPPCを  
散乱体としたコンプトンテレスコープを  
現在検討中。



## 3.2 SPHiNX(広島大：高橋さん提供)

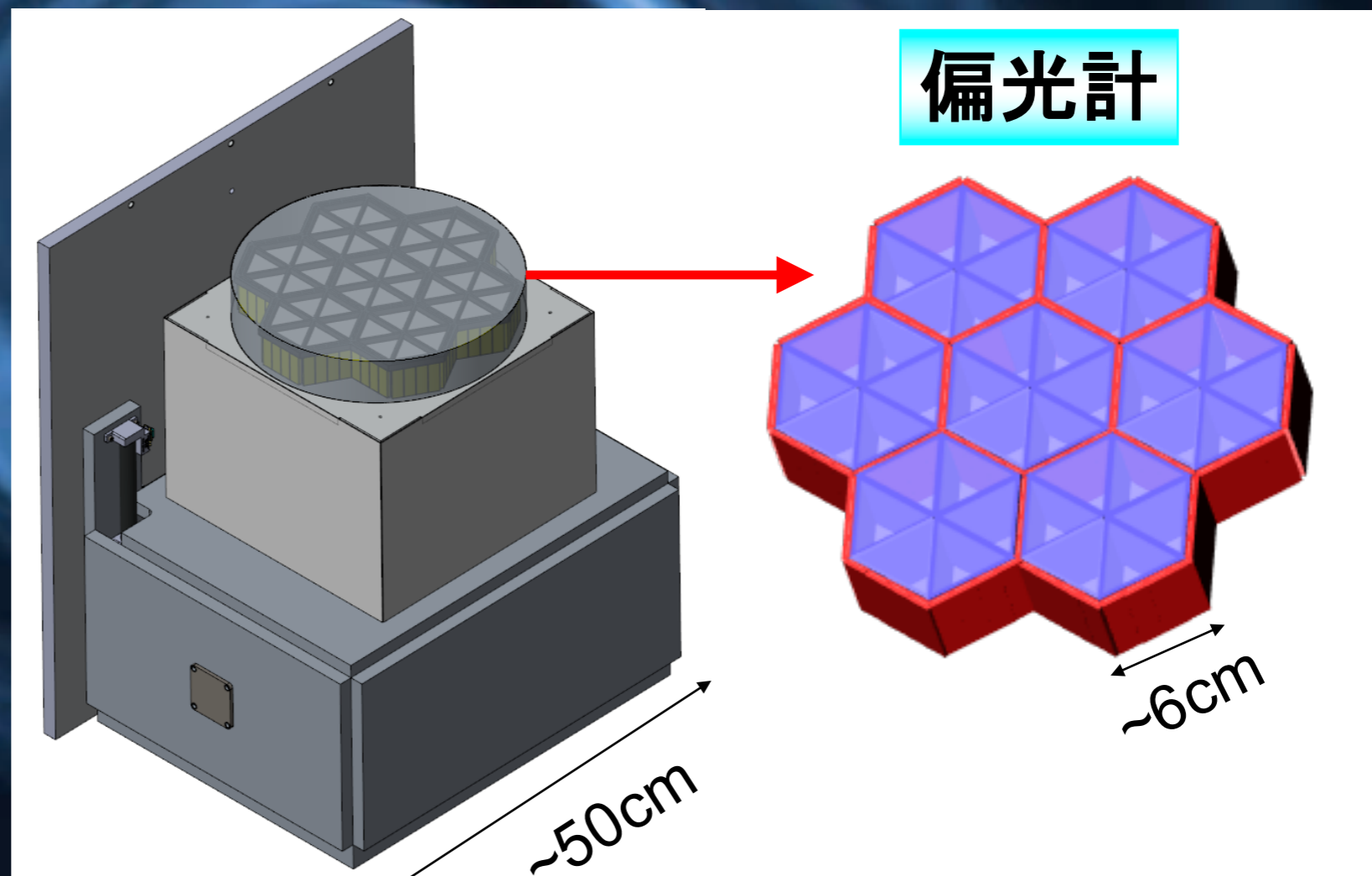
スウェーデンと広島大学が主導する小型衛星であり、すでにPhase-Aに採択され、2017年12月にPhase-Bに進むか決まる。

コンプトン散乱型の偏光度検出器でプラスチックシンチレーターとGAGGシンチレーターを使用する予定。

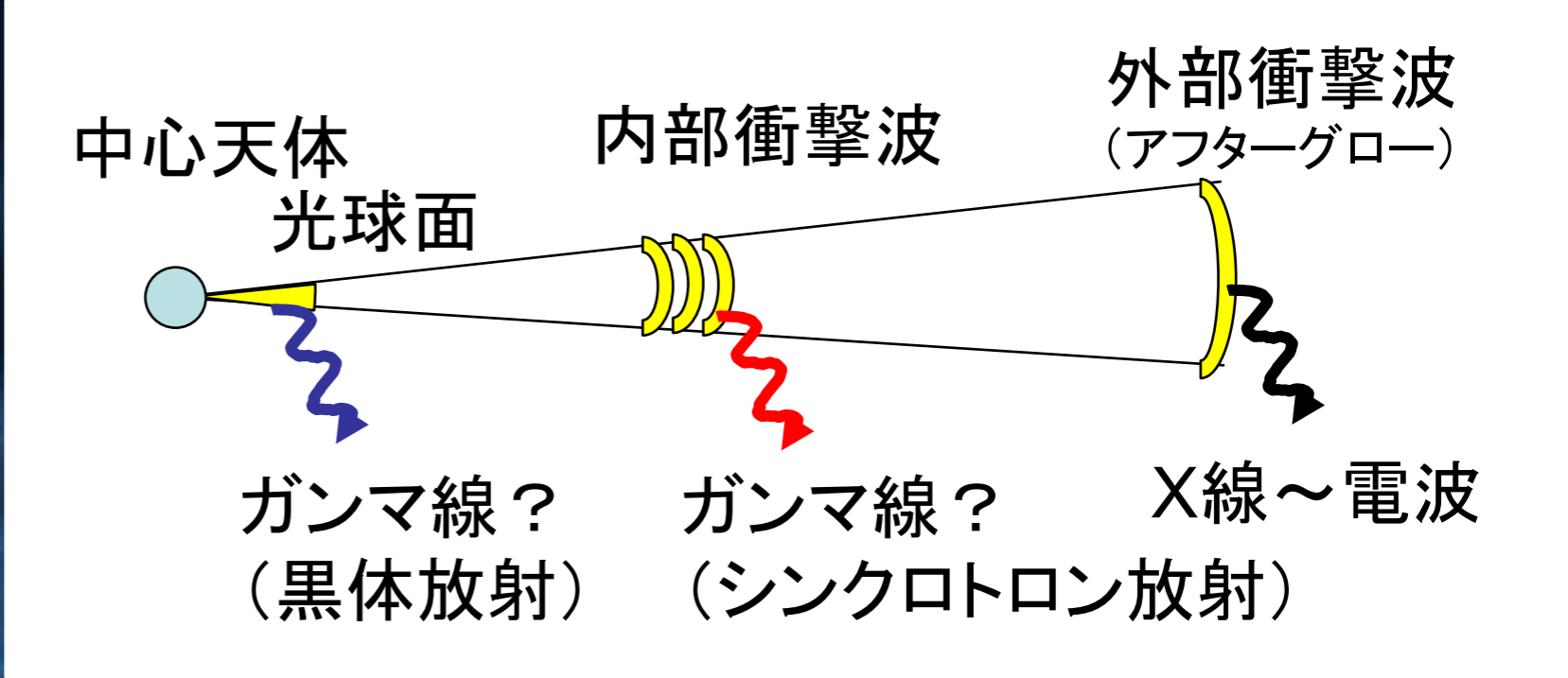
PoGO Liteという  
気球実験でのヘリ  
テージがある。



### 衛星(50kg)

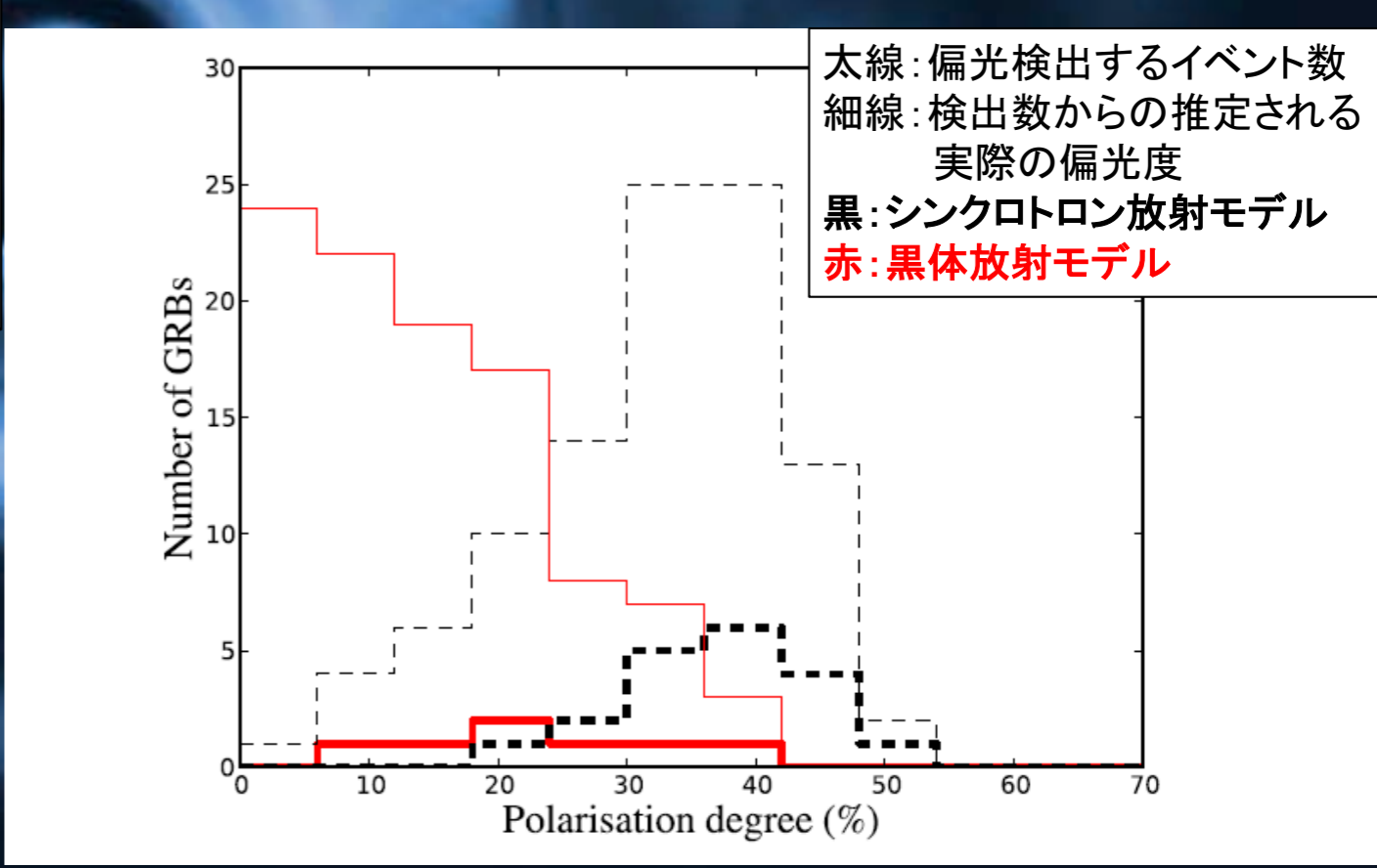
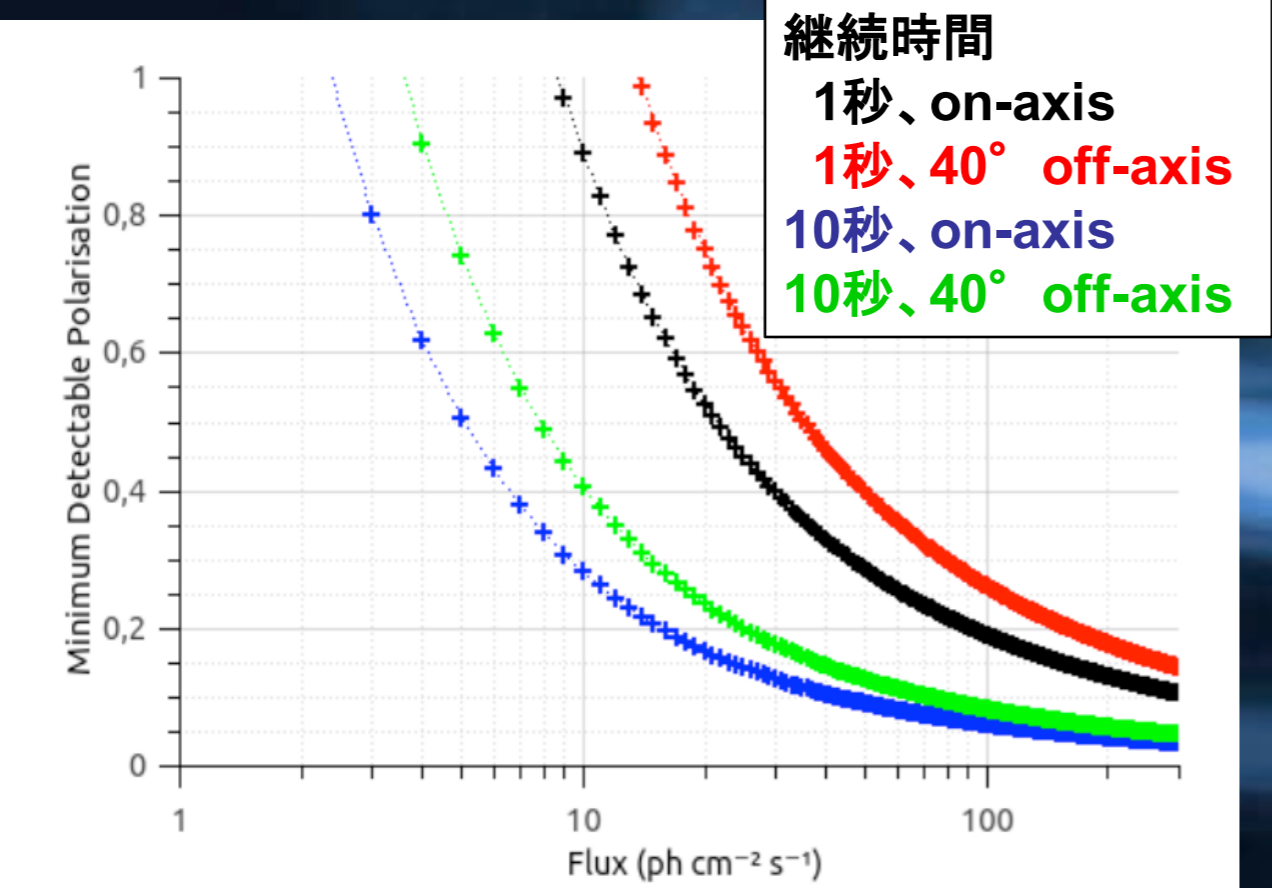


黒体放射かシンクロトロンか  
どちらが起こっているのか  
調べたい。



### 最低検出可能偏光度 (MDP) 予想

### 偏光度の頻度分布 (1年間) 予想



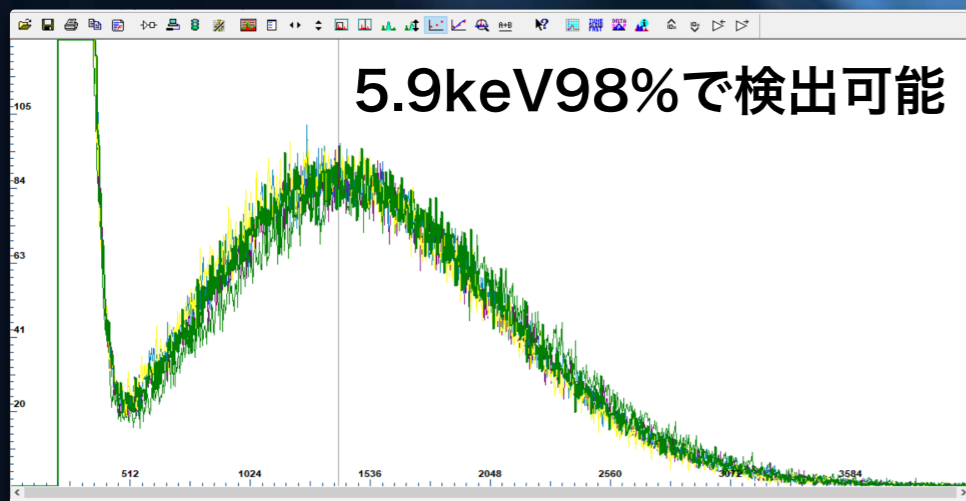
SPHiNXで検出する～10イベントのみでモデル判定が可能

## 3.3 GAP2

理研、金沢大、山形大によって開発されている小型のガンマ線バースト偏光度検出器であり、木星ソーラーセイルに搭載される事が決まっている。木星ソーラーセイルは現在Phase-A1に進んでおり、うまくいけば2025年に打ち上げ。検出器が壊れなければ30年間連続運用が可能。重量制限が5kg程度になる可能性大なので、物質量がそれほど必要ない30keV~100keV程度のガンマ線にターゲットを絞って開発。

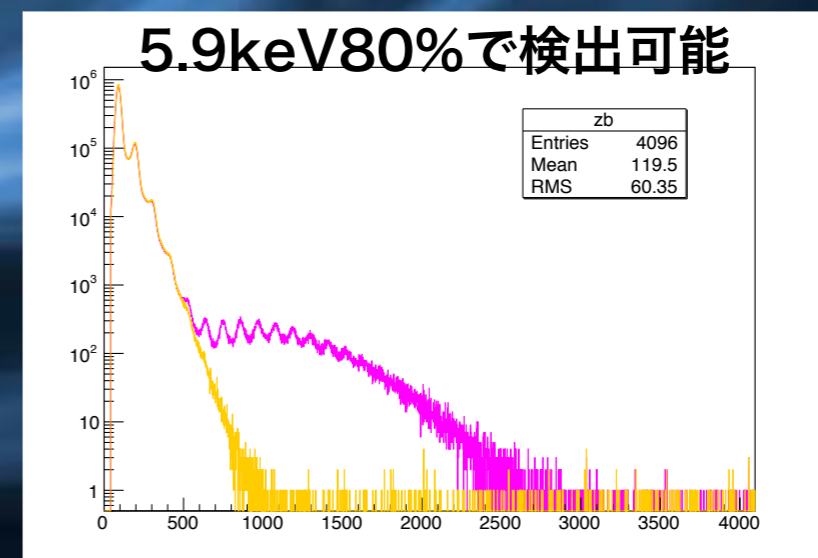
散乱体はピクセル化されたプラスチックシンチレーターで吸収体はCsI(Tl)。基礎実験により読み出しデバイス(MAPMT or MPPC)を現在選定中。

MAPMT使用



30keVのガンマ線も20~30%程度で検出可能。

MPPC使用(-20°)

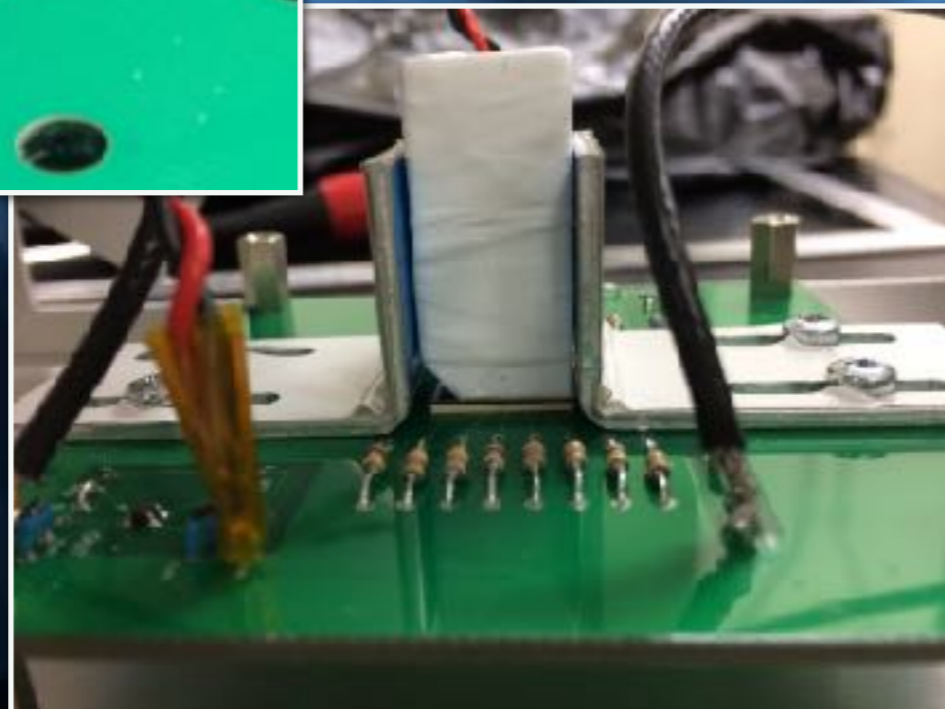
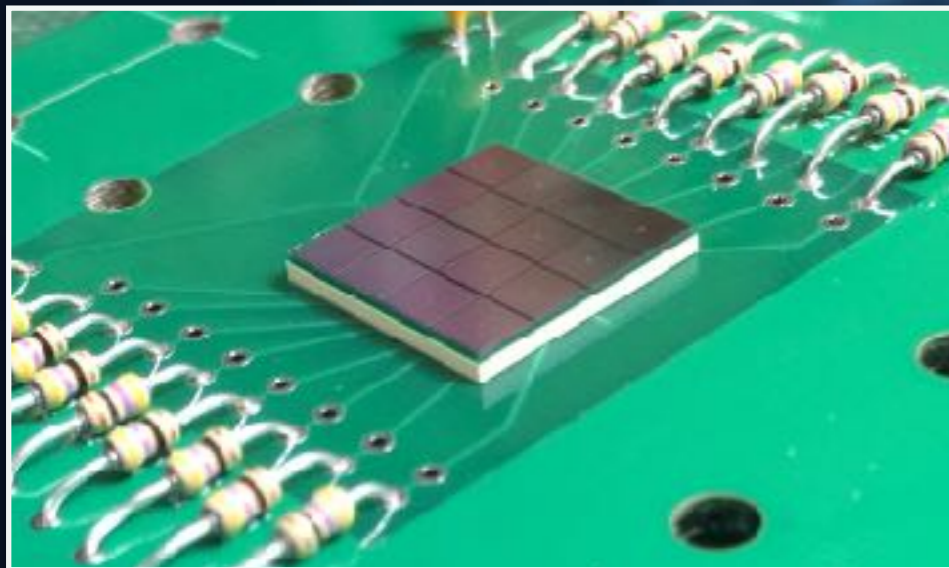


30keVのガンマ線は辛いかな？



余談：  
第三世代のMPPCには表面実装タイプのもものが存在し、リフロー炉という特殊な装置が無いと半田付けできなくなってきました。  
一方でリフロー炉はちょっとしたものでも100万円を軽く超えてしまいます。  
そこで最近研究室に導入したのが、  
タイガーのオーブントースター(1万円)。  
パンを焼く代わりに、基板にMPPCをハンダ付けしています。

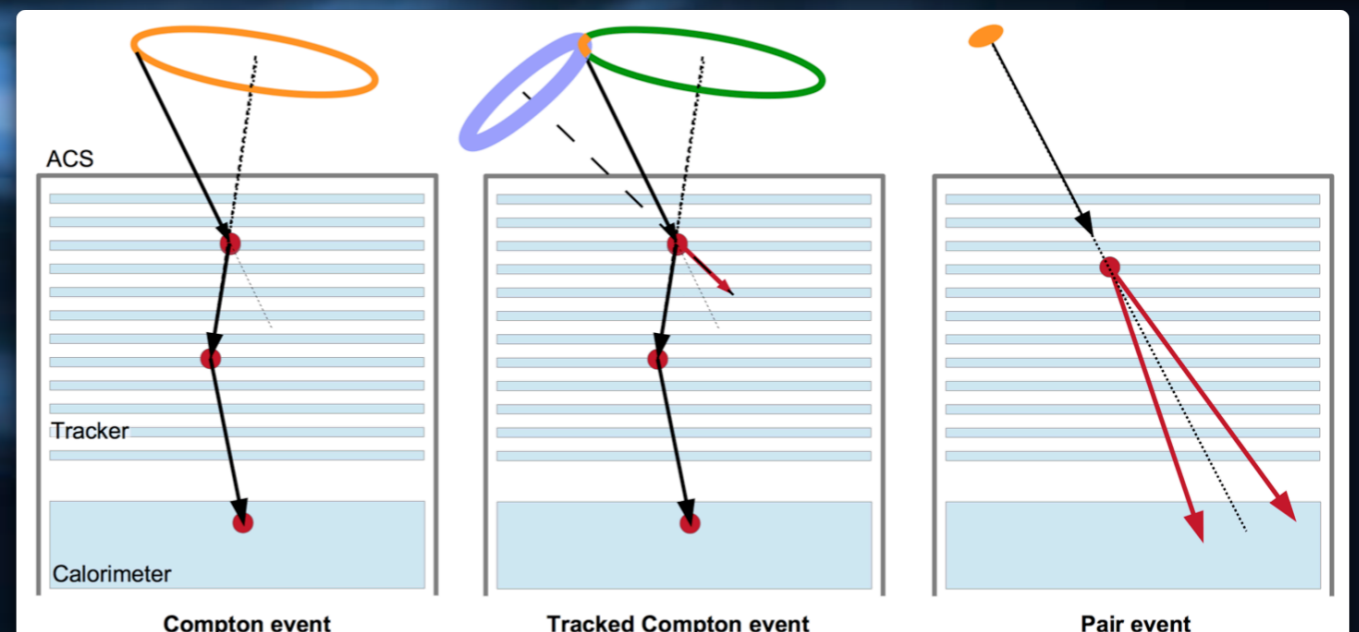
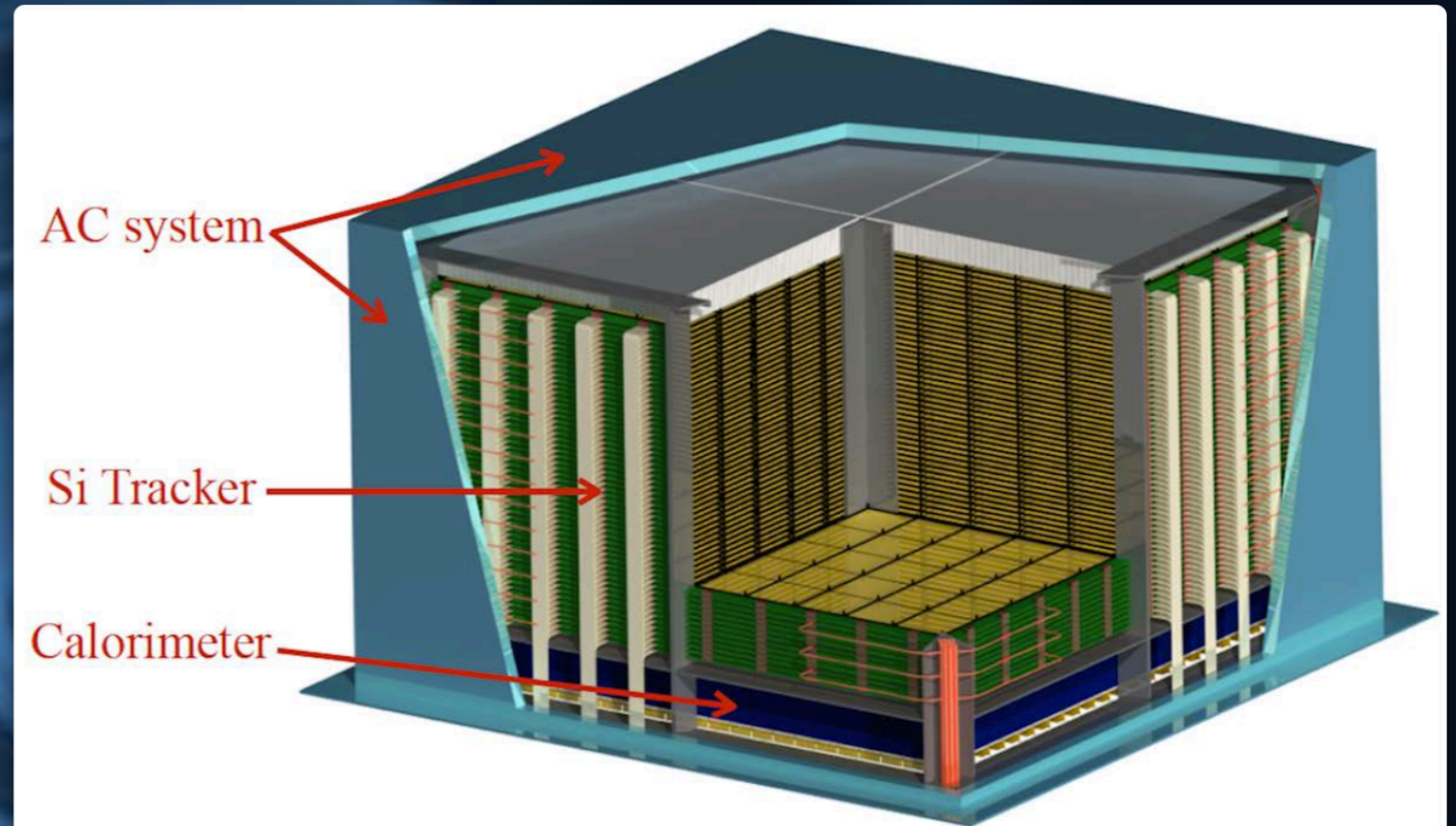
大学の会計係の人に  
随分怪しまれました。



## 3.4 e-ASTROGAM

イタリア主体のプロジェクトであり、日本人(中澤さん、林田さん)も参加している。2029年の打ち上げを目指している。コンプトン散乱とペアークリエーションの両方の相互作用を使う。検出器はシリコントラッカーとCsI(Tl)のカロリメーター。広い視野と角度分解能を併せ持った検出器。

COS B、EGRET、Fermi LATの様にタングステンコンバーターが無いので、電子や陽電子の多重散乱が起こりにくく、電子対生成でも偏光の測定が可能となる。



# 偏光に対する感度

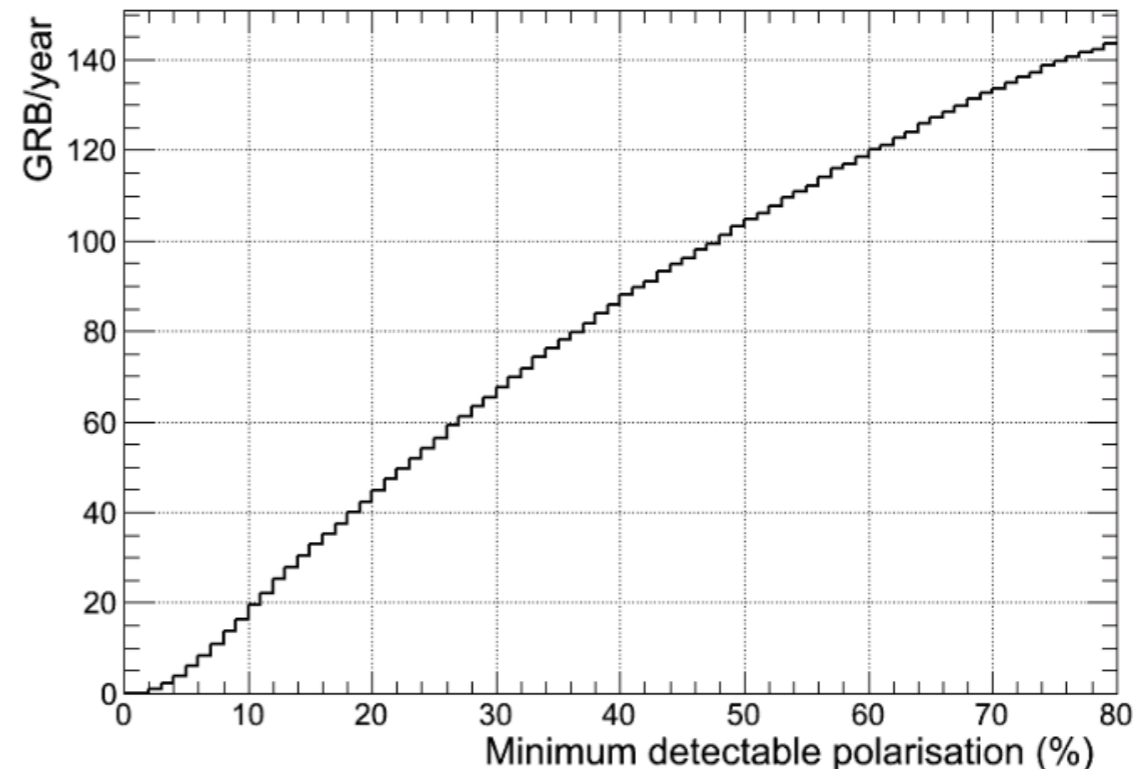
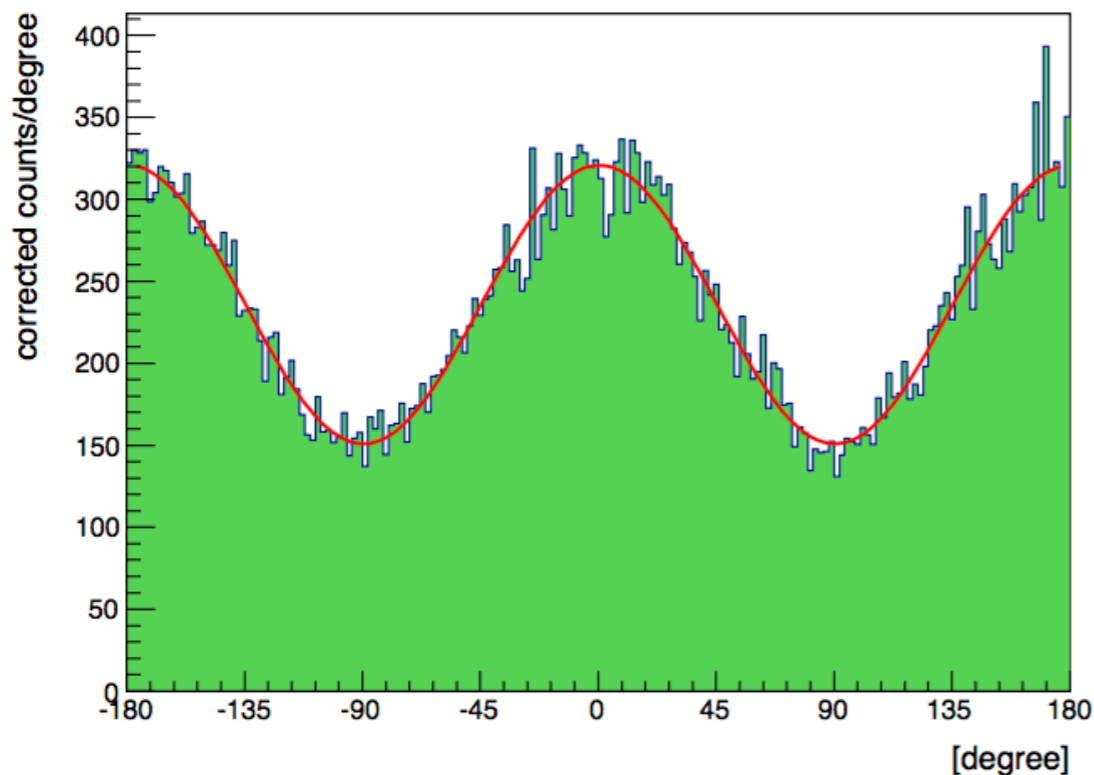


Fig. 18: *Left panel* – e-ASTROGAM polarization response (polarigramme) in the 0.2 – 2 MeV range for a 100% polarized, 10 mCrab-like source observed on axis for  $10^6$  s. The corresponding modulation is  $\mu_{100} = 0.36$ . *Right panel* – Cumulative number of GRBs to be detected by e-ASTROGAM as a function of the minimum detectable polarization at the 99% confidence level.

A.D. Angelis et al. arXiv:1611.02232v1

10%程度しか偏光していないGRBを年間20個測定できるなら、かなりの事ができると思われる。

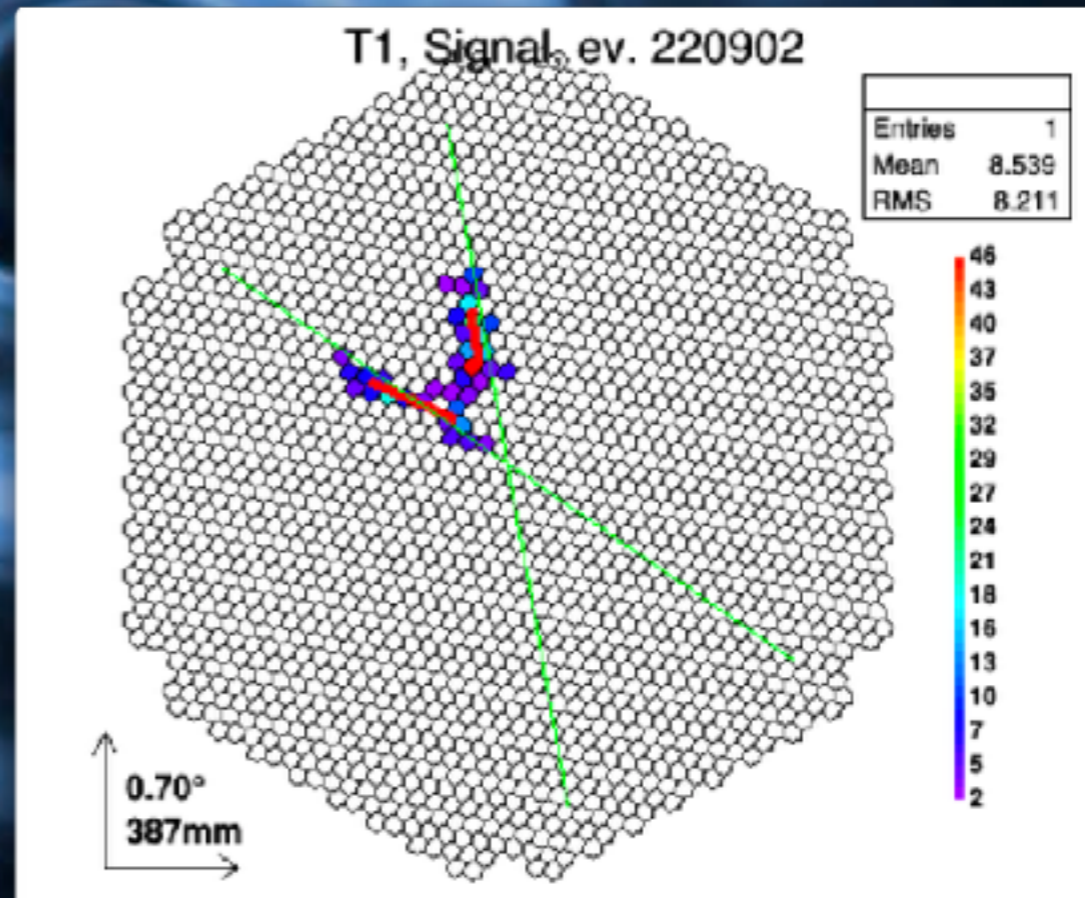
### 3.5 高エネルギーガンマ線での偏光観測可能性(おまけ)

e-ASTROGAMでは数GeVまでの偏光観測が可能となるが、それ以上のエネルギーレンジでは偏光観測の計画はない。

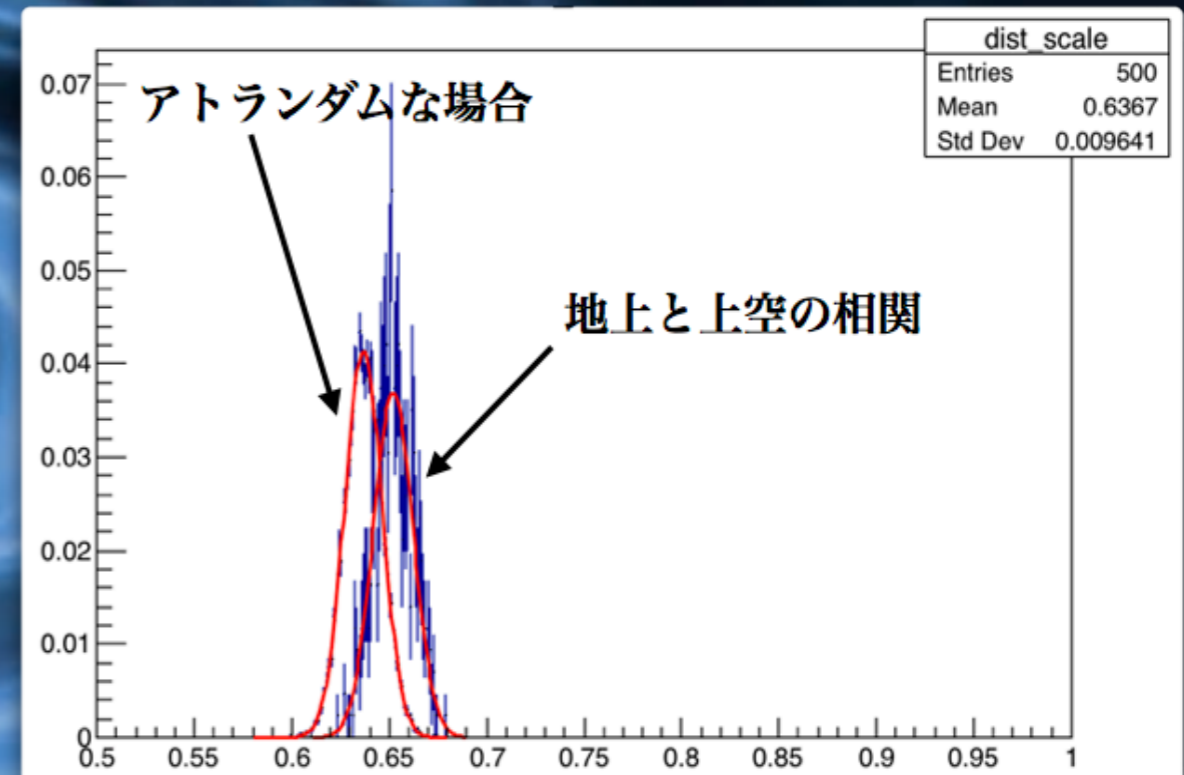
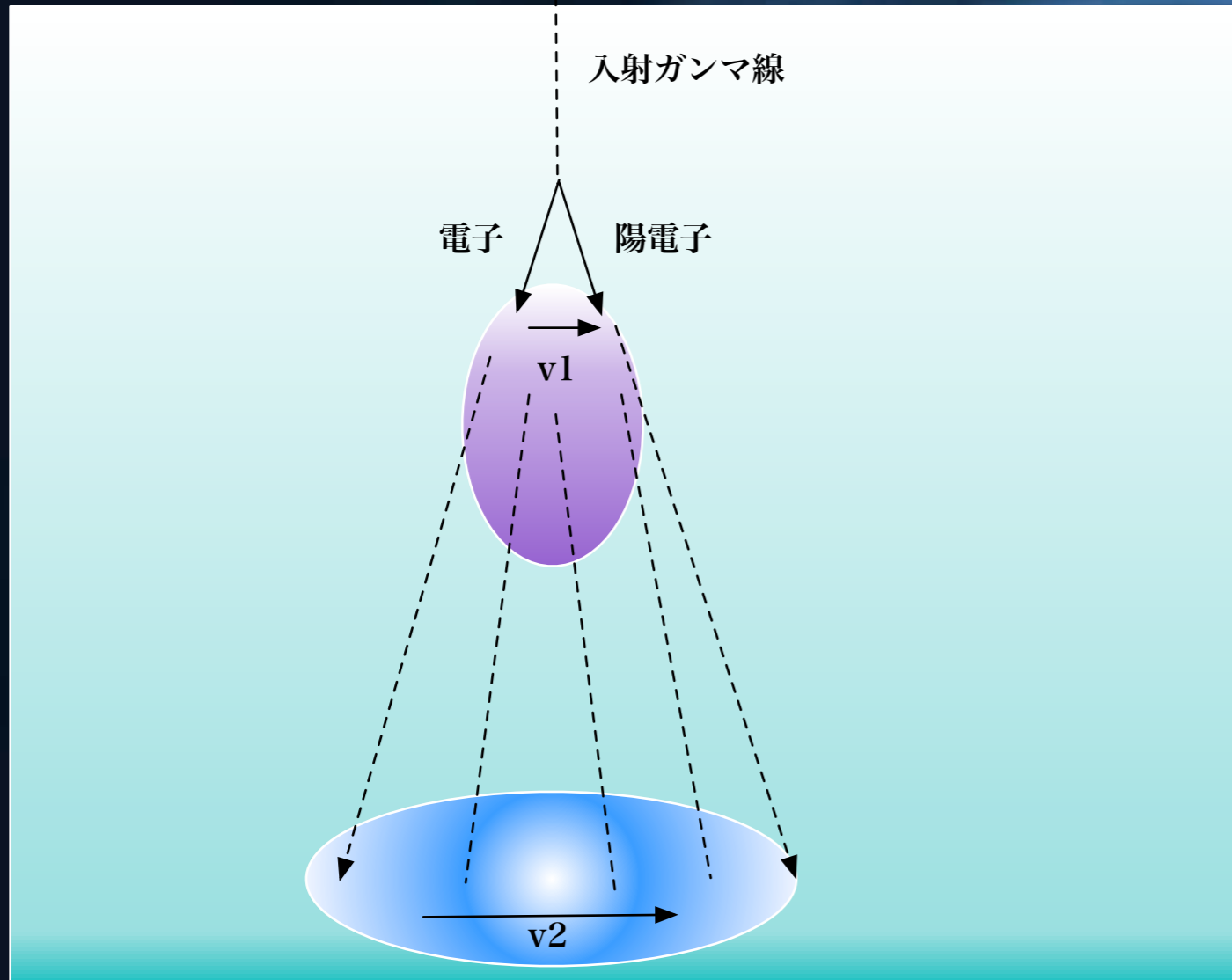
CTAはまさに20GeVから非常に高い感度を持った望遠鏡であり、これで偏光観測ができないだろうか？



上空で最初にできる電子陽電子ペアの射出方向に関する情報がチェレンコフ光として取得できればそれが可能。そして現実的にそれはある程度できる。



上空でできた電子陽電子ペアの射出方向をあるベクトル $v_1$ で表現し、地上に降ってきたチェレンコフ光のイメージ(到来時間、到来方向、到達位置によりフィルターをかける)を同様にベクトル $v_2$ で表現する。 $v_1$ と $v_2$ というベクトルに相関があるか調べてみた。



まだ始めたばかりでどうなるか分からないが、高エネルギーガンマ線の偏光をチェレンコフ光を使って測定できればそれ自体凄いいし、LIVの検証やパルサー観測などにもも使えるかもしれない。

# 4.まとめ

- 1) GRBのプロンプトガンマ線の偏光観測は、エネルギー輻射メカニズムの同定に大きな威力を発揮する。またLIVの研究にも役立つ。
- 2) プロンプトガンマ線の偏光観測は2000年代に入ってようやく行われた。まだ歴史が浅く、決定的な観測結果は出ていないが、INTEGRAL、GAP、Astrosatの現在の活躍もあり、少しずつデータが集まってきている。来年にはPOLARのデータも加わるはず。
- 3) 偏光観測の将来計画
  - ・ X線領域：IXPEによるafterglowの偏光観測
  - ・ 硬X線領域：実現可能な小型衛星。大型のものが採択されれば非常によい
  - ・ ガンマ線領域：e-ASTROGAMを始め、気球などでも新しい試みがなされるだろう。
- 4) マルチメッセンジャー  
重力波とのコラボレーションは大切。ビーム軸からの角度と偏光度の関係が分かれば、輻射メカニズムに対する大きな情報が得られる。

# 三原さんからの要請

- GAP2は数十keVに感度がある偏光度検出器です。
- 検出面積は2~300cm<sup>2</sup>、モジュレーションファクターが40%程度。
- うまくいけば30年間稼働します。
- 木星を經由してトロヤ群まで行くために、IPNに貢献できるはずです。

何か面白いサイエンスはありますか？