

# ガンマ線バースト偏光検出器を用いた 太陽フレアの偏光観測の可能性

金沢大学大学院自然科学研究科数物科学専攻  
宇宙物理研究室修士1年  
高橋拓也

平成23年8月25日

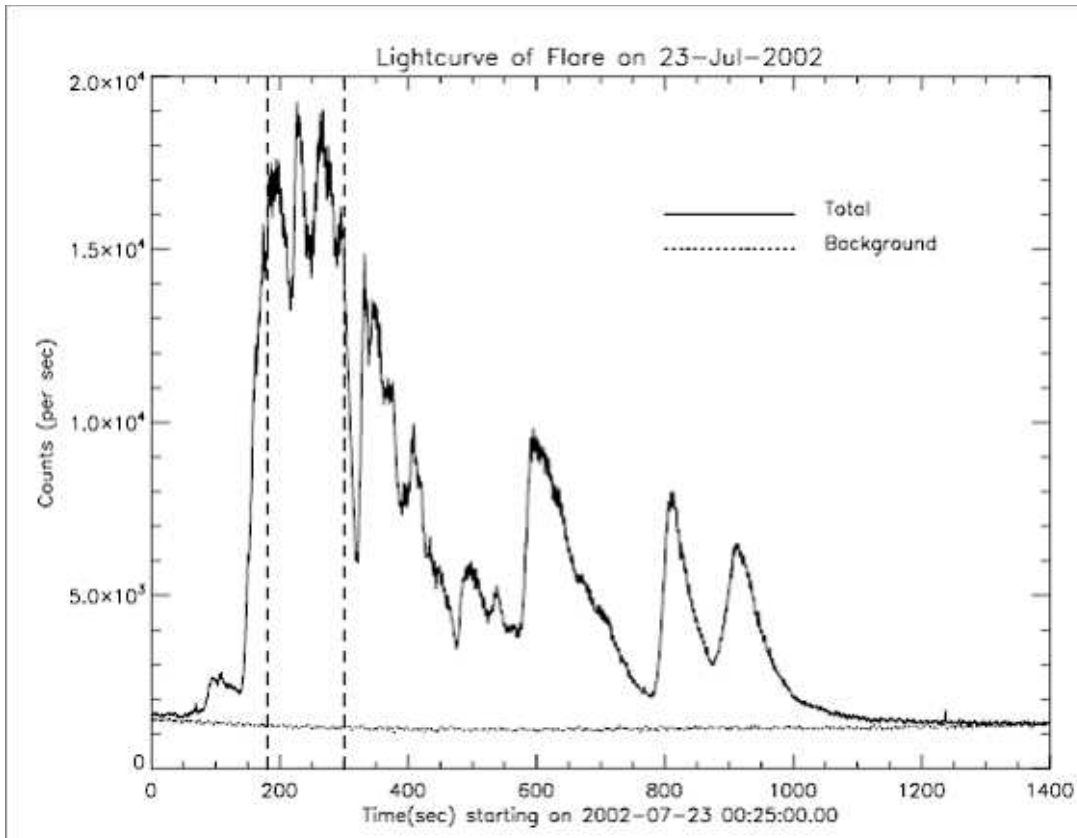


図 1: RHESSI が観測した 02/06/23 に発生した太陽フレアのライトカーブ。  
エネルギーレンジ 25~300keV。  
Suarez-Garcia et al 2006

## 1 太陽フレアの偏光について

太陽フレアが発生すると数分から数時間程度の中に、様々な波長域において増光現象が観測される。(図 1) その中で硬 X 線やガンマ線領域での増光は磁気リコネクションによって加速された粒子が非熱的制動放射によって放射するものと考えられている。太陽フレアの偏光を観測することは粒子加速や放射の過程を理解する上で重要であるが未だにその観測例は少ない。

太陽フレアの偏光はフレアの立ち上がりに存在し、以降は熱的放射の成分が混じるので偏光は存在しないか非常に小さくなると考えられる。

## 2 偏光の検出

具体的なデータについて述べる前に、RHESSI や我々の検出器がどのようにして偏光を検出しているかについて述べる。

物質に偏光した光子が入射した場合、入射する光子のエネルギーを  $E$ 、散乱光子のエネルギーを  $E'$ 、入射光子に対する光子の散乱角を  $\theta$ 、 $\phi$ 、立体角を  $d\Omega$ 、微分断面積を  $d\sigma$ 、古典電子半径

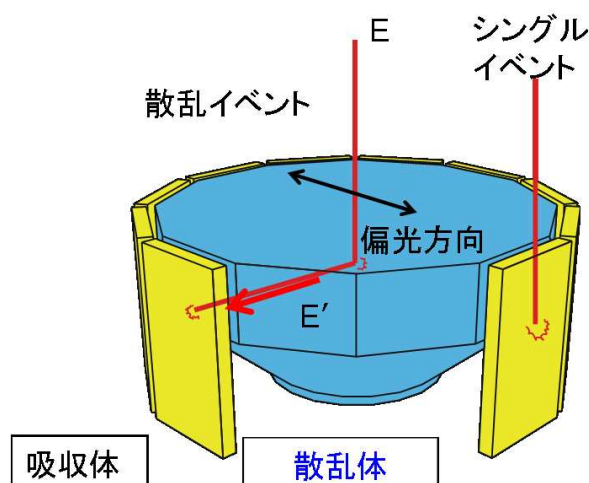


図 2: コンプトン散乱の散乱異方性を表した図。偏光方向とは垂直な向きに散乱されやすい。

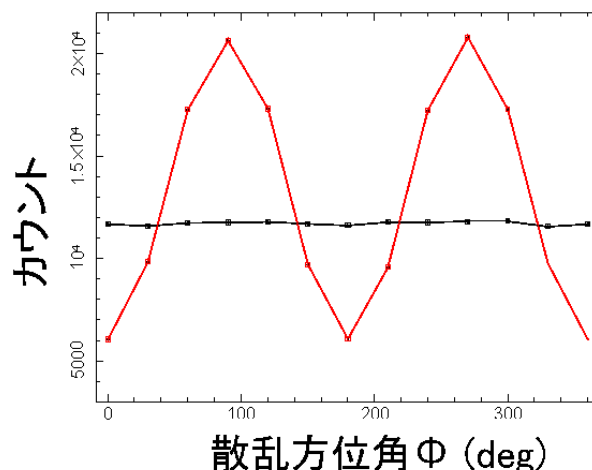


図 3: 無偏光の光子が入射した場合と 100% 偏光した光子が入射した場合それぞれの散乱強度分布を示した図。黒が無偏光光子が入射した場合で赤が 100% 偏光した光子が入射したものを示している。無偏光光子が入射した場合は各方向に均一に散乱しているが、偏光した光子が入射すると散乱方向に異方性が生じている

を  $r_0$  とすると、Klein-Nishina の式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 E'^2}{2 E^2} \left( \frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - 2\sin^2\theta\cos^2\phi \right) \propto 1 - \sin^2\theta\cos^2\phi \quad (E \ll m_e c^2) \quad (1)$$

より偏光方向と垂直に散乱されやすい異方性をもつ (図 2, 3)。

吸収体には散乱体で散乱され、吸収体に入射する散乱イベントと、直接吸収体に入射するシングルイベントが考えられるが、散乱イベントのみを取り出して計測することで偏光を測定することができる。

### 3 RHESSI による偏光観測

ここで、過去に行われた RHESSI による太陽フレアの偏光観測の例について紹介する (Suarez-Garcia et al 2006)。代表的な散乱強度分布の図を添付する (図 4~ 図 6)。式 1 より偏光が存在するなら散乱強度分布は  $\sin^2$  のカーブを描く。ここでは散乱方位角のプロット範囲が  $0 \sim 180$  (deg) の範囲なので、一山のカーブとなる。また、縦軸は各検出器でのカウント数の平均値が 0 となるように描かれている。グラフ中の実線は関数

$$A(\eta) = \mu_p \cos\left(2\left(\eta - \phi + \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (2)$$

$\mu_p$  : モジュレーションファクター

$\eta$  : 散乱方位角 (deg)

$\phi$  : 偏光角 (deg)

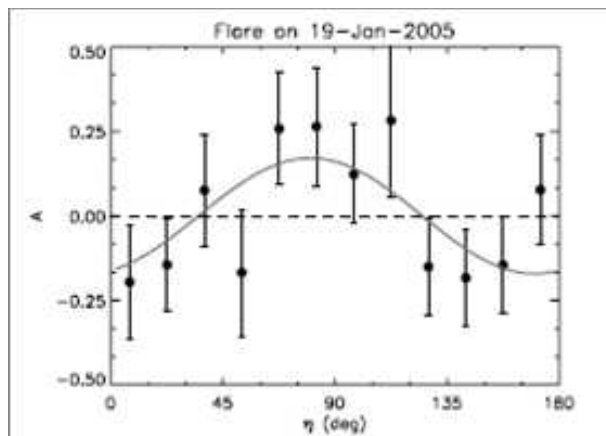


図 4: 2005/01/19 のイベント (Suarez-Garcia et al 2006)。

偏光度: $54 \pm 21\%$   
偏光角: $170 \pm 21(\text{deg})$

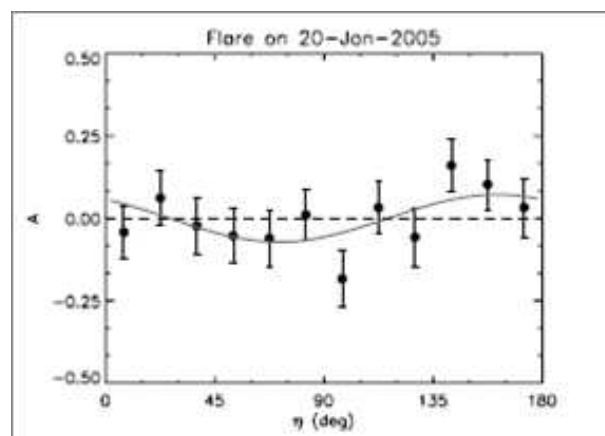


図 5: 2005/01/20 のイベント (Suarez-Garcia et al 2006)。

偏光度: $21 \pm 10\%$   
偏光角: $66 \pm 14(\text{deg})$

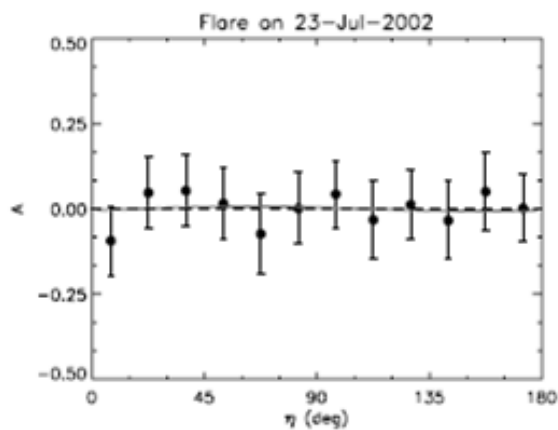


図 6: 2002/06/23 のイベント (Suarez-Garcia et al 2006)。

偏光度: $2 \pm 14\%$   
偏光角: $151 \pm 195(\text{deg})$

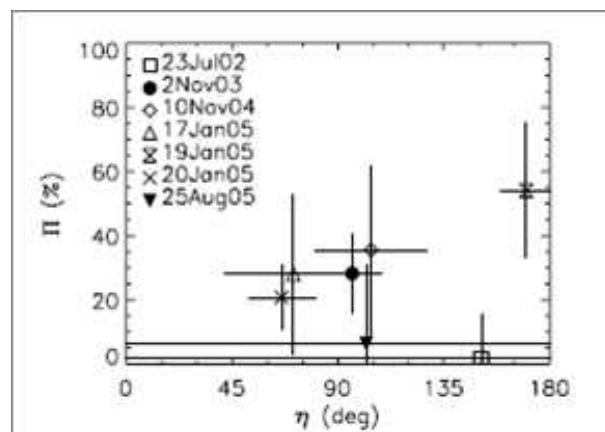


図 7: RHESSIが解析した太陽フレアの偏光度と偏光角の関係についてプロットした図 (Suarez-Garcia et al 2006)。



図 8: RHESSI に搭載されている検出器の写真

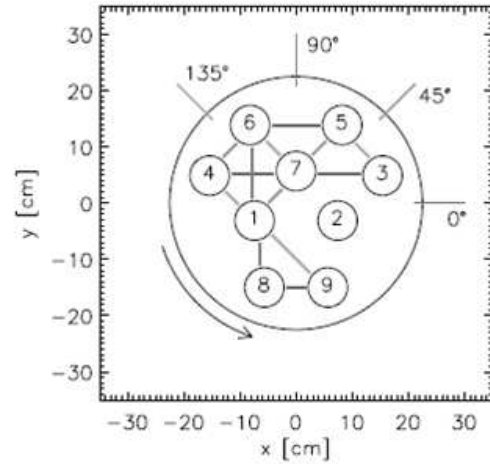


図 9: RHESSI に搭載されている検出器の配置図。実線で結ばれた検出器間でコンプトン散乱が可能となっている

でフィッティングを行った結果のベストフィットを表している。

解析の結果求めた太陽フレアの偏光度と偏光角の関係についてプロットしたのが図7である。

## 4 先行研究における課題

図 8 と図 9 は実際に RHESSI に搭載されている検出器の写真とその配置図である。一見してわかるように検出器の配置が幾何学的に非対称であり、そのためコンプトン散乱の予測が難しくなってしまう。RHESSI はこのように偏光観測に特化したデザインにはなっていない。そこで我々の研究室では、

- 幾何学的に単純
- 同時係数回路により散乱光子のみを取り出す

偏光観測に特化した検出器を開発した。次節以降では我々が開発したガンマ線バースト偏光検出器 (Gamma-ray burst Polarimeter:GAP) について述べる

## 5 ガンマ線バースト偏光検出器

図 10 と図 11 がガンマ線バースト偏光検出器 (GAP) の写真と構造図である。GAP は中央に散乱体としてのプラスチックシンチレータを配置し、そのまわりを吸収体として 12 枚の CsI(Tl) シンチレータが取り囲んだ構造になっていて、幾何学的な対称性の高い検出器である。

GAP は小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (図 12) に搭載され、2010 年 5 月 21 日に種子島から打ち上げられ、現在も観測を行っている。GAP は太陽面とは反対側に取り付けられており、太陽フレアは GAP の裏側から入射することになる。



図 10: GAP の写真

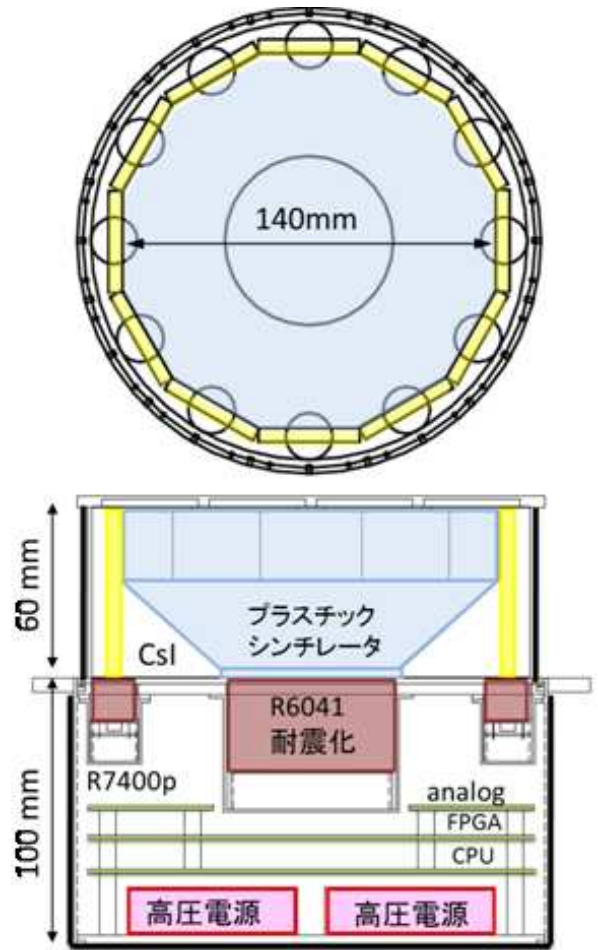


図 11: GAP の構造を表した図

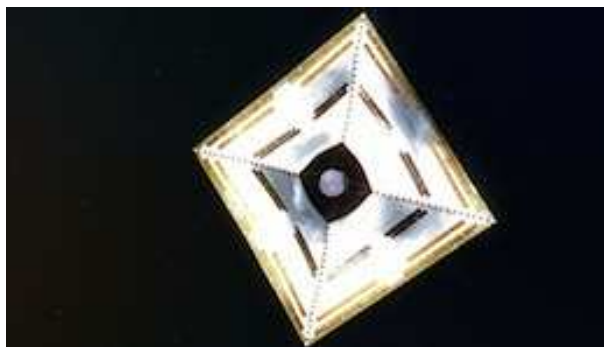


図 12: IKAROS

## 6 定常観測におけるカウントレートの変化

GAPはガンマ線バーストが発生すると専用の観測モードに移行するが、それ以外にも定常的に観測を行っておりバックグラウンドデータとして活用するなどしている。図13は定常観測における散乱光子のカウント数の変化を示した図である。いくつかの点でカウント数が急激に増大している箇所がある。我々はこのカウント数の増大を太陽フレアによるものだと考えている。

今回はこれらの中から2011/06/07に観測されたカウント数の増大について紹介する。図13から2011/06/07付近を拡大したのが図14である。

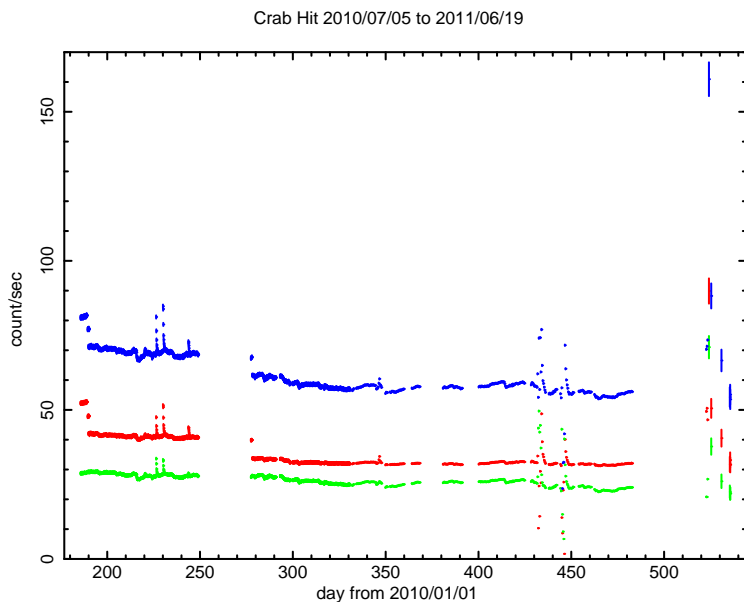


図13: 定常観測におけるカウントレートの推移.GAPは2つのエネルギーレンジで測定を行うことができ、赤がLow側(40~100keV), 緑がHigh側(100~300keV), 青は双方を足したデータ。

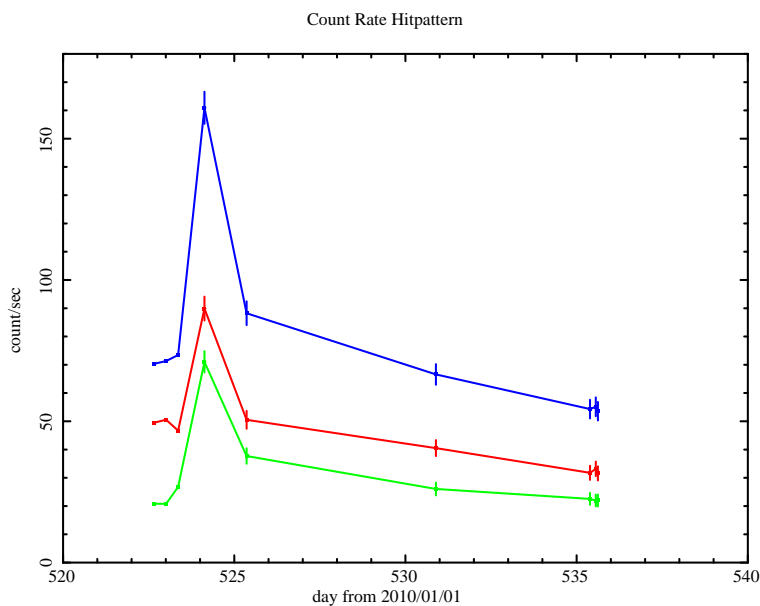


図14: 図13から2011/06/07付近を拡大した図

## 7 他衛星が観測した太陽フレア (2011/06/07)

ここで、GAP のカウント数の増大が本当に太陽フレアによるものなのかについて検証する。GOES や STEREO 衛星による観測により 2011/06/07 06:00(UT) ごろに太陽フレアが発生したことが分かっている (図 15~16)。太陽フレアが発生した時刻で RHESSI が観測したスペクトルをみると様々な波長域で増光が確認できる。

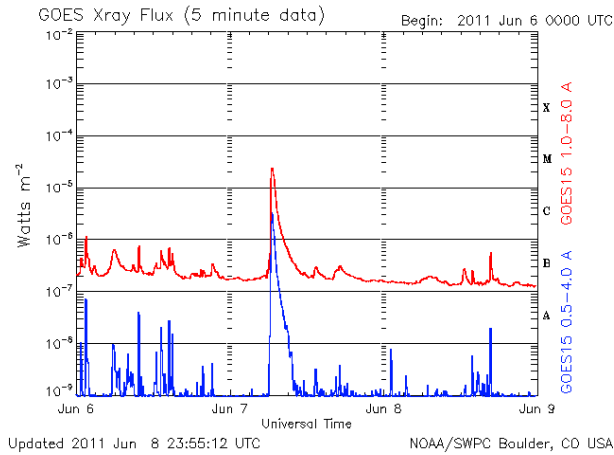


図 15: GOES Xray Flax(5minits data)

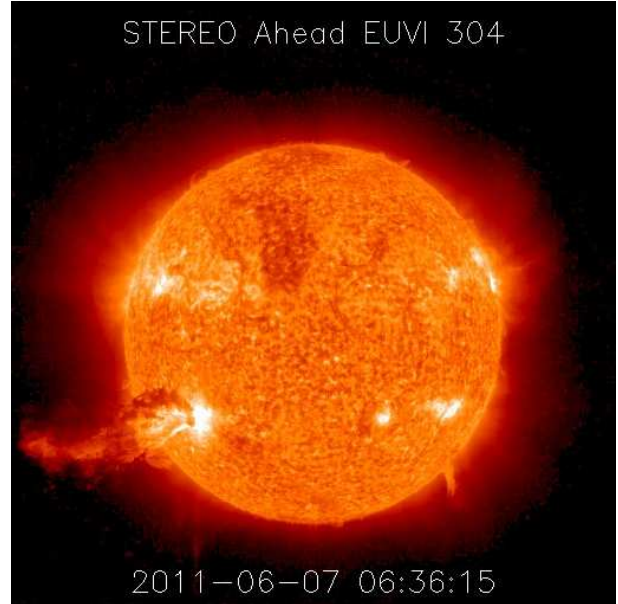


図 16: STEREO 衛星が観測した 2011/06/07 の太陽フレア

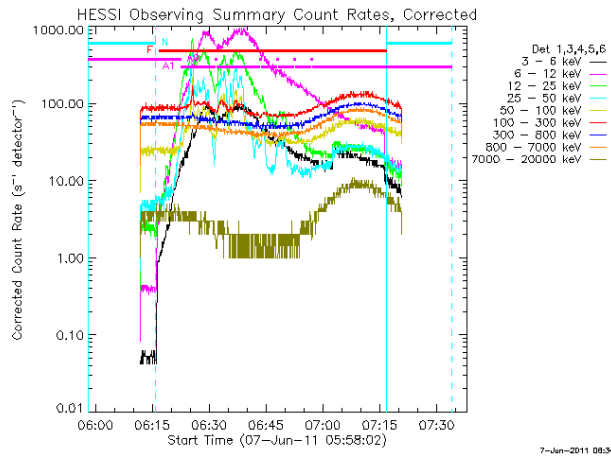


図 17: 太陽フレアが発生した時刻に RHESSI が観測した各波長域でのスペクトル。さまざまな波長域で増光現象が確認できる。



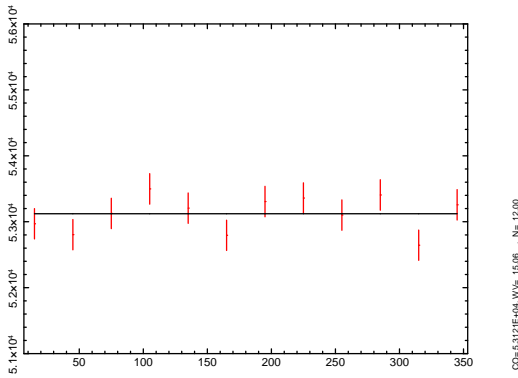


図 18: 太陽フレアが発生する前の散乱強度分布。コンスタントフィットを行い $\chi^2$ で評価を行う(自由度11)。 $\chi^2$ は15

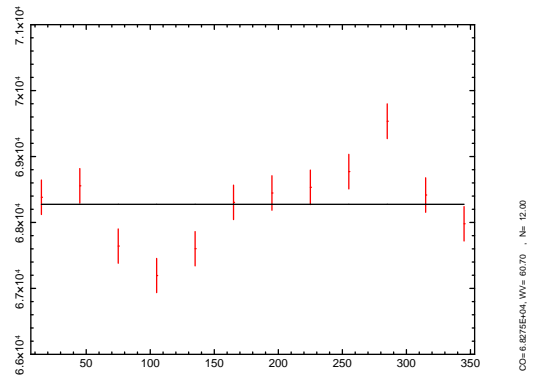


図 19: 太陽フレアの立ち上がりを捉えたときの散乱強度分布。 $\chi^2$ は61に増大している

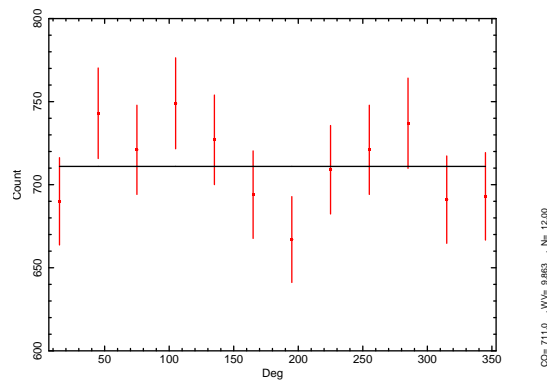


図 20: カウント数が最大になったときの散乱強度分布。 $\chi^2$ は10に再び減少している

## 8 GAP が観測した散乱強度分布データ

実際に GAP が観測した散乱強度分布のデータを紹介します(図 18~図 20)。今回は特に High 側のエネルギー帯での測定データを紹介します(図 14 の緑色でプロットされているデータ)。

1 回の計測時間は最初の 3 点では 510 分、それ以降では 1 回 2 分で計測を行った。平均カウントと残差の大きさが変化しているのはそのせいである。

High 側のエネルギーレンジは 100~300keV である。各散乱強度分布データに対してコンスタントフィットを行い、結果を $\chi^2$ 値で評価する(自由度11)。その結果、太陽フレアが発生する前のデータ(図 14 の最初のデータ)では $\chi^2$ 値は15であったのに対して、太陽フレアの立ち上がりを捉えたと思われるデータ(図 14 の 3 点目のデータ)では $\chi^2$ 値は61に増大した。しかし、カウント数が最大に達した時点のデータ(図 14 の 4 点目)では $\chi^2$ は10に再び減少した。

この傾向は GAP が観測した他の太陽フレアのデータでも同様の傾向を示す。そこで、太陽フレアの偏光は太陽フレアの立ち上がりにも存在しているのではないかと考えている。このことをより詳細に検討するには太陽フレアの立ち上がりのみを正確に捉えて観測を行う必要があるが 1 回の測定を長時間に設定していた状態では立ち上がりのみを捉えることは難しい。そこでこの太陽フレアの途中から 1 回の測定時間を 510 分から 2 分に変更して測定を行っている。

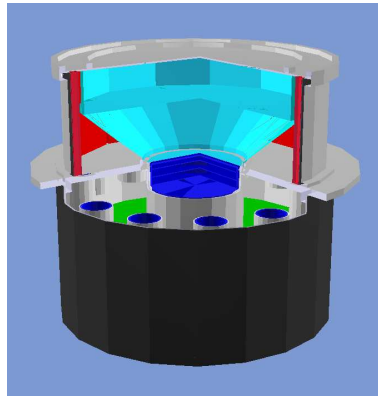


図 21: シミュレーション用に設定した GAP の構造モデル。各シンチレータや電気回路、それらを囲むアルミや鉛など GAP の構造を忠実に再現している

## 9 シミュレーションと系統誤差

データの定量的な解析にはシミュレーションによる解析が必要である。我々は GEANT4 というモンテカルロシミュレータを利用している。GAP の構造モデルを設定し (図 21) シミュレーションを行うが、構造モデルと実際の検出器間の違いを系統誤差として取り扱う。系統誤差を評価するために地上実験を行った。GAP の裏側斜め 10 度方向から放射線を降らせた。GAP は対称性の高い検出器であるが斜めから入射した場合、その対称性が崩れ、散乱強度分布はサインカーブを描く。

放射線源には  $^{57}\text{Co}$  を使用した。無偏光光源なので GAP に斜めから入射した際の効果を正確に取り扱うことができる。

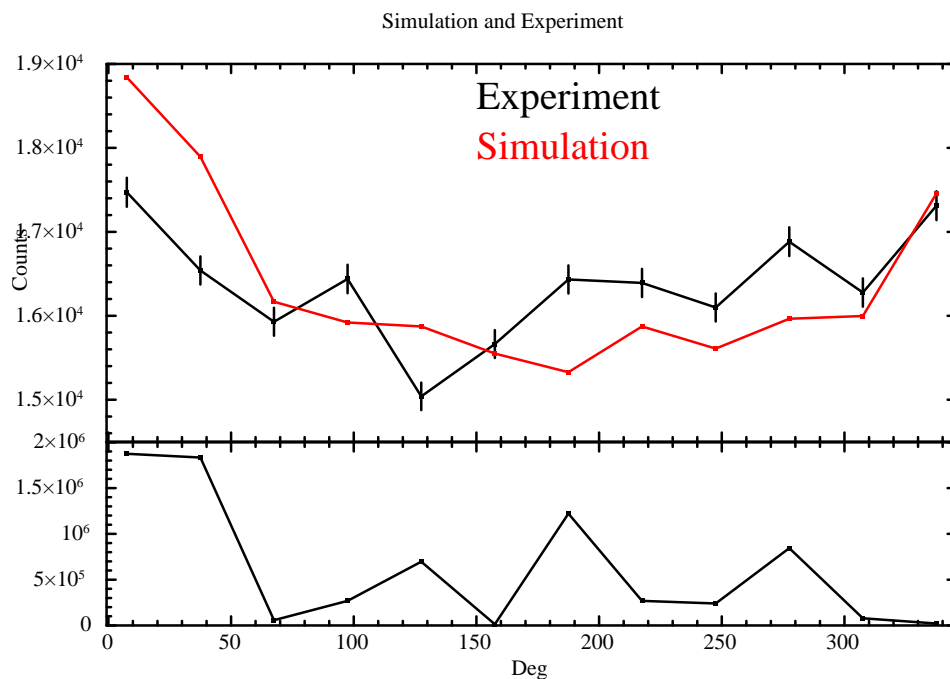


図 22: 系統誤差を評価するための地上実験の結果とシミュレーションを比較した図。残差の二乗値を一緒にプロットしている

得られた散乱強度分布とシミュレーションを比較したのが図 22 である。各点での残差の二乗値も一緒にプロットしてある。実験の結果系統誤差は 4.8% であった。

これらの結果を踏まえ、現在解析を行っている最中である。解析はまだ不十分で偏光があるかどうかなどの具体的な結果はだせていない。

## 10 まとめと今後の課題

我々の研究室ではガンマ線バースト偏光検出器 (GAP) を開発した。GAP はその名の通り、ガンマ線バーストの偏光を測定するための検出器であるが、定常観測のカウント数の変化より、太陽フレアが検出できていることが判明した。しかし、1 回の測定時間が長時間であったことなど太陽フレアの観測には適さない設定だった。そこで、今後はこれまでに検出したデータを解析するとともに 1 回の測定時間を短く設定し新たな太陽フレアの検出を目指していく。