

MPPCを用いたコンプトン散乱型ガンマ線バースト コンプトン望遠鏡の可能性

S. Gunji, Y. Saito, T. Nakamori, (Yamagata Univ.), M. McConnell (UNH), J. Gaskin, B.D. Ramsey (NASA/MSFC), T. Mihara (RIKEN), K. Hayashida (Osaka Univ.), S. Kishimoto, Y. Kishimoto(KEK), D. Yonetoku (Kanazawa Univ.), K. Toma (Tohoku Univ.), T. Sakamoto(Aoyama Gakuin), Y. Saito (JAXA), H. Takahashi (Hiroshima Univ.), and Y. Yatsu (Tokyo Tech.)

Abstract:我々はガンマ線バーストのガンマ線放射メカニズムを明らかにするために散乱型ガンマ線バースト偏光度検出器の開発をニューハンプシャー大学やNASA/MSFCと共同で推進してきた。今年度はシンチレータとMPPCという光検出器を使ってコンプトン望遠鏡を開発できるかどうか基礎実験を通して確認した。その結果原理的にコンプトン望遠鏡を構築する事は可能だということが分かったが、数年間MPPCを宇宙で使用すると、ダークカレントが数千倍に増加するという事が分かった。その結果観測期間が数年間にも及び衛星実験ではまだ実用化が難しいということが分かった。

Motivation

ガンマ線バースト(GRB)の発見からおよそ50年が経ち、今まで様々な観測がなされてきたが、GRBには未だ未解明の問題が多く残されている。特にガンマ線バーストの放射メカニズムは未解明の問題の最たるものである。標準的なファイアーボールモデルでは、火の玉が光速の99.999%でジェット状に吹き出し、そこからガンマ線も放射されていると考えられているが、詳細は明らかで無い。しかしガンマ線放射には2つのメジャーなモデルがある。一つはシンクロトロンモデルと呼ばれるもので、もう一つがフォトスフィアモデルと呼ばれるモデルである。シンクロトロンモデルは内部衝撃波によって熱化された電子が磁場に絡みつき、シンクロトロン放射を起こすというモデルであり、フォトスフィアモデルは光学的に薄くなってきた火の玉から、ガンマ線が散乱されながら漏れ出すというモデルである。両者の違いを見分けるには、ガンマ線の偏光観測が非常に有効だと予想されており、シンクロトロンモデルの場合、磁場が揃っている場合には高い偏光度(40%程度)を持ったガンマ線が放射される可能性があり、フォトスフィアモデルでは偏光度が低い(~10%未満)と考えられる。実際に2010年にIKAROSに搭載されたGAPという小型のガンマ線バースト偏光度検出器は1.5年の間に30例程度のガンマ線バーストを捕らえ、

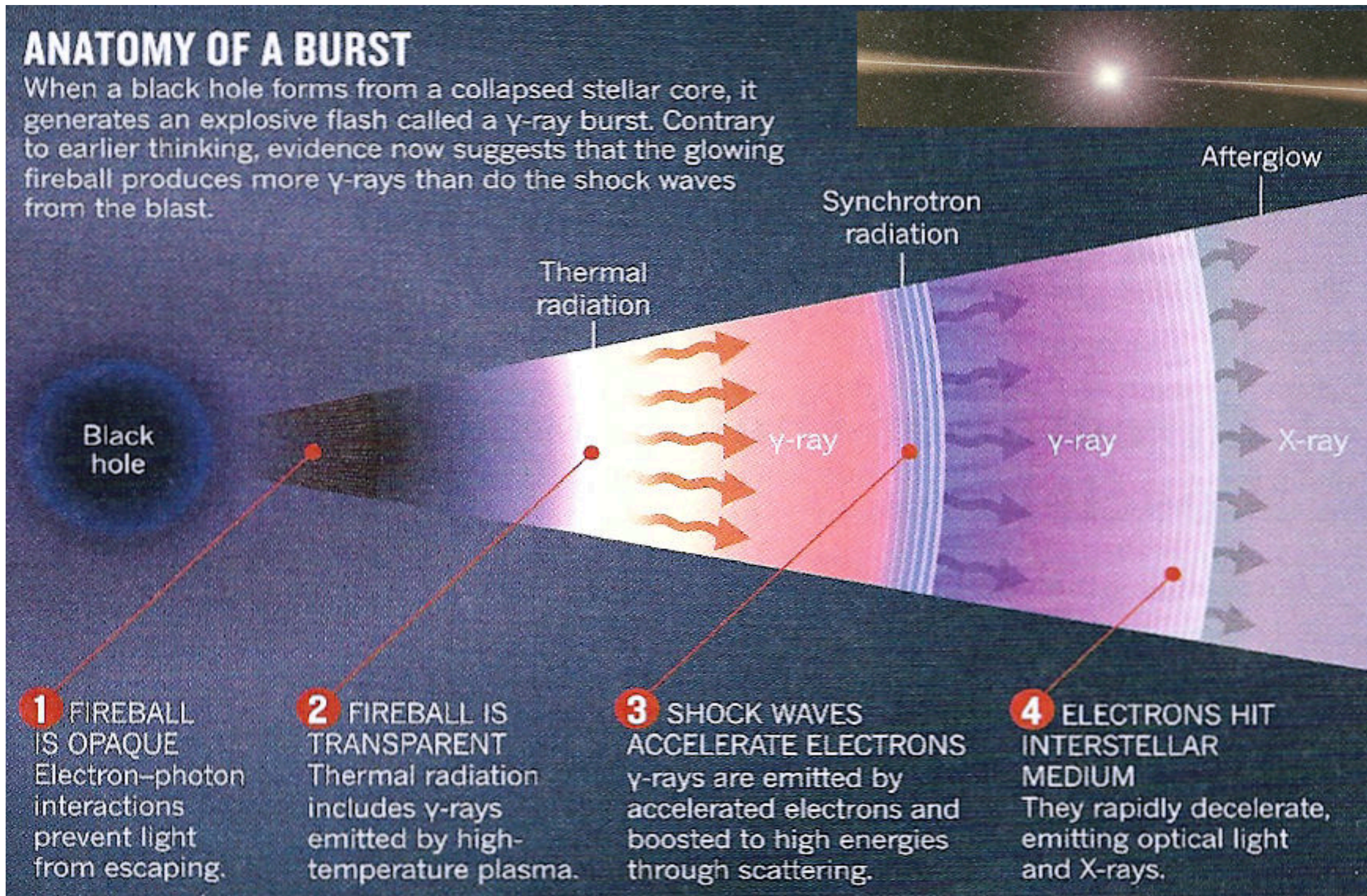
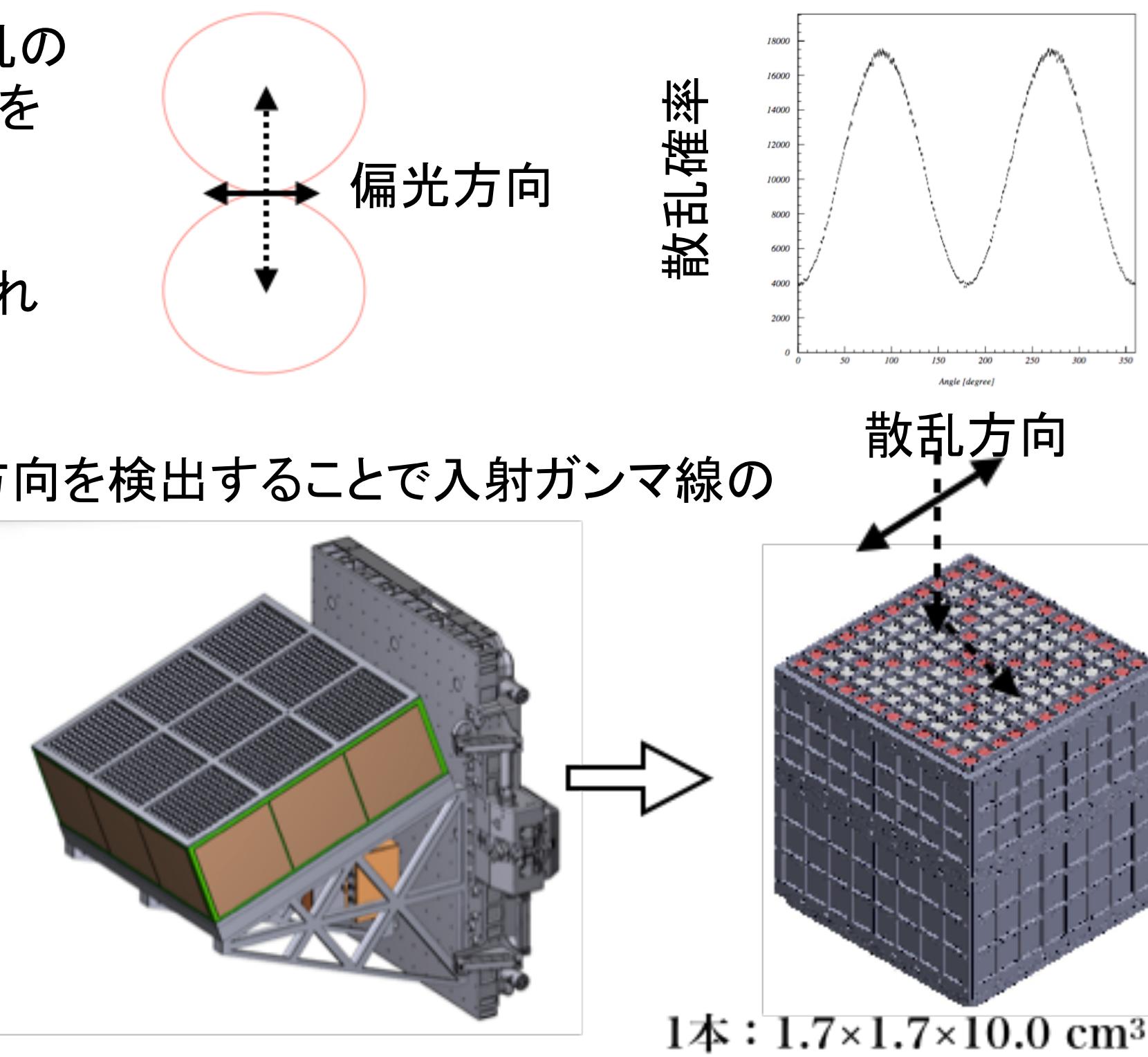


Figure.1 (<http://universe-review.ca/I08-08-GRB.jpg>)

その中の3例に対しては偏光測定を行う事ができた。特にその中の2例に関しては、非常に高い偏光度が観測された事から、整列した磁場によるシンクロトロン放射が有力だと考えられるが、例が少なく偏光度の誤差も大きいことから確実な事がまだ分かっていない。そこで、我々はより高性能のGRB偏光度検出器を開発し、それを飛行体に搭載する計画を立案した。これがLEAP計画である。

LEAP Project

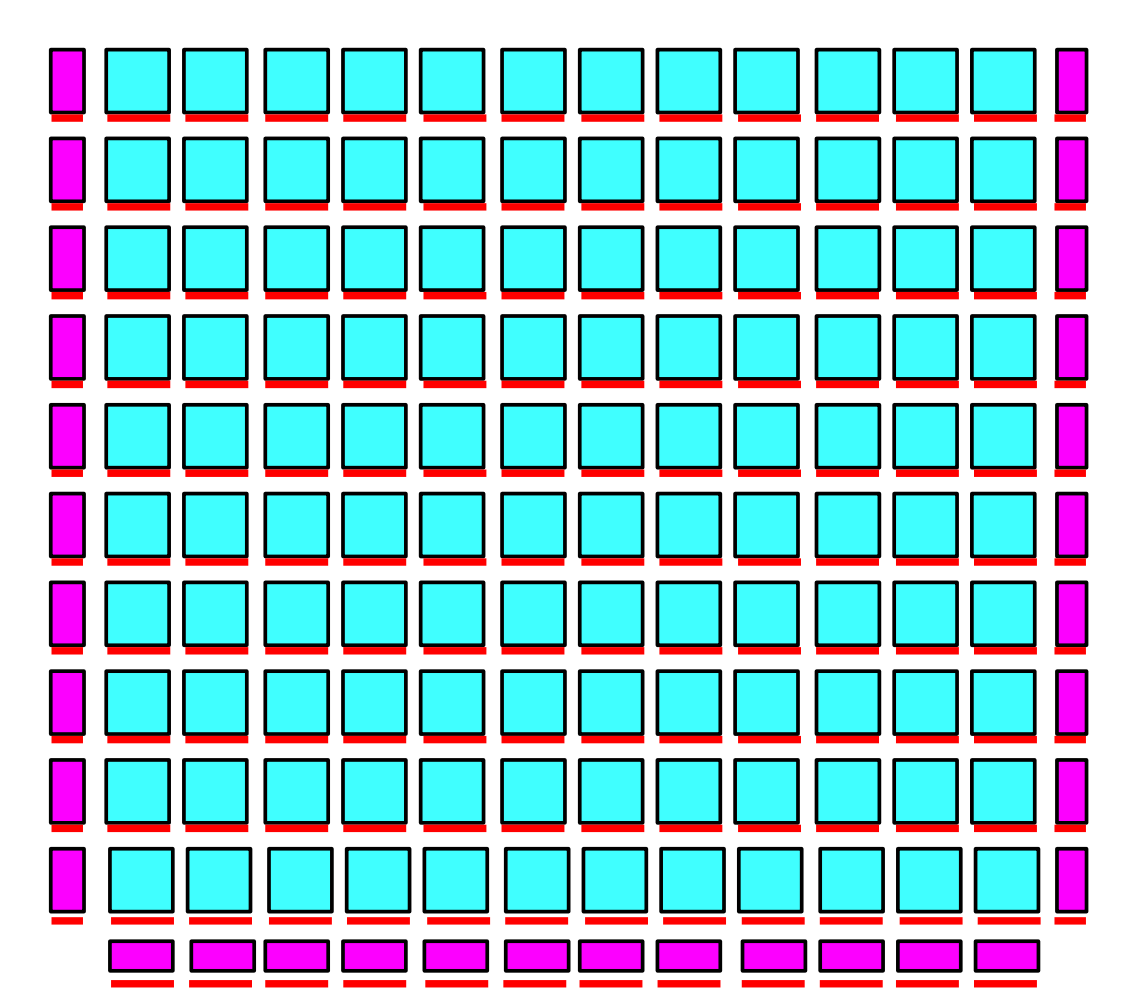
LEAP計画で開発している検出器は、コンプトン散乱の異方性を利用している。本検出器は入射ガンマ線を散乱させるためのプラスチックシンチレータと散乱したガンマ線を吸収するためのCsI(Tl)で構成されている。検出器のどこで散乱し、どこで吸収されたかが分かれば、ガンマ線の散乱方向が分かる。コンプトン散乱では、ガンマ線の散乱方向は入射ガンマ線の偏光方向に依存するため、その散乱方向を検出することで入射ガンマ線の偏光情報を取得できる。当初は右図のようなモジュール検出器を9台国際宇宙ステーションに搭載し、2年間で100個近いGRBの偏光観測を目指しており、2016年12月にプロポーザルをMission of Opportunity(MoO)に提出した。しかし、このプロポーザルが通らなかった事と国際宇宙ステーションの正式運用が2024年までである事から、SMEXのような小型のプラットフォームでも十分に性能を発揮する検出器の基礎デザインを始めた。その検出器が



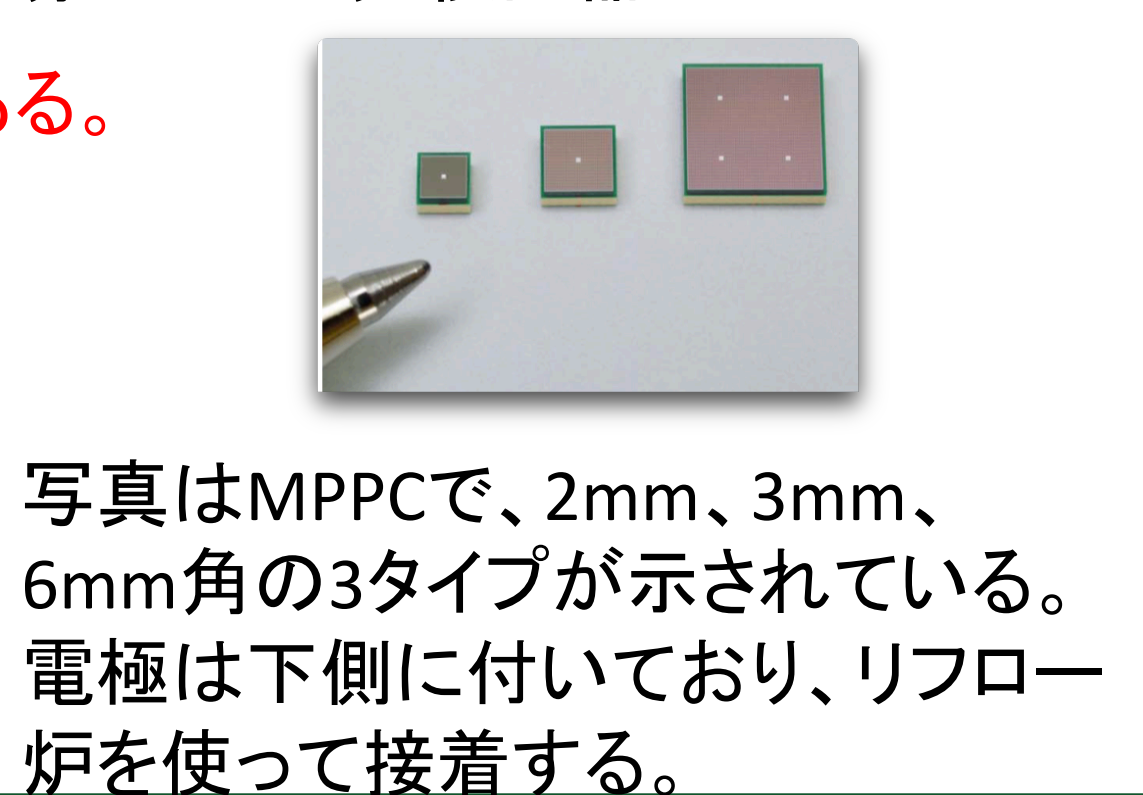
右図に示されたコンプトン望遠鏡である。今までの検出器はプラスチックシンチレータとCsI(Tl)の棒状の検出器がマトリクス状に並んでおり、下部にそれぞれ光電子増倍管が取り付けられていた。それに対して、新しいデザインの検出器では1cm立方のプラスチックシンチレータにMPPCという新しい光デバイスが取り付けられている。そしてそれを囲むようにMPPCが取り付けられた1cm立方のCsI(Tl)シンチレータが取り付けられている。今までの検出器では2次元の散乱方向しか分からなかったが、新しい検出器の場合3次元の散乱情報が取得できる。またコンプトン散乱の運動学から、散乱体及び吸収体の位置、そして散乱体と吸収体でのエネルギーデポジットを読み出せば、どちらの方向からガンマ線が飛来したのかコーン上に同定できる。そして何発もイベントため、コーンを交点を求めることでガンマ線バーストがどの方向で生じたかを決定する事ができる。しかしこの検出器を実現するには3つの事問題をクリアしなくては

いけない。

- 1) PMTIに比べMPPCはノイズのレートが非常に高い。特にプラスチックシンチレータでのエネルギーデポジットは数keVである。ノイズに埋もれず信号を読み出せるのか確認する必要がある。
- 2) MPPCが多数取り付けられた回路基板を何層にも積み重ねる。回路基板で入射ガンマ線を散乱させないようにするには、非常に薄い回路基板にMPPCをバンボンディングする必要がある。そのような事は可能かを調べる。
- 3) そもそもMPPCはまだ宇宙で使用された実績が非常に乏しい。MPPCが長時間宇宙放射線にさらされた後でも十分な性能を発揮できるのか調べる必要がある。



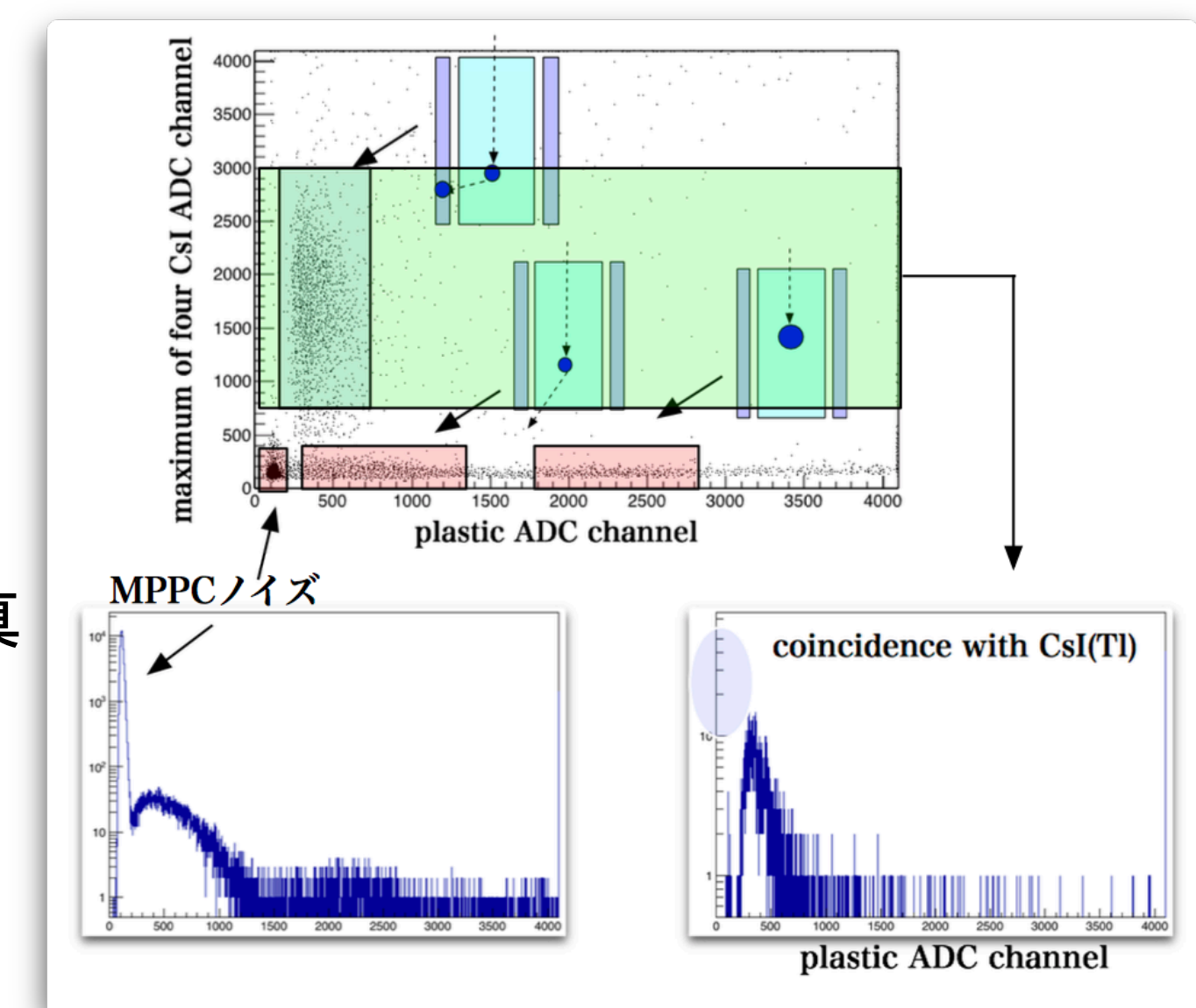
水色がプラスチックシンチレータ
ピンクがCsI(Tl) or GAGG(Ce)
赤がMPPC光検出器



写真はMPPCで、2mm、3mm、6mm角の3タイプが示されている。電極は下側に付いており、リフロー炉を使って接着する。

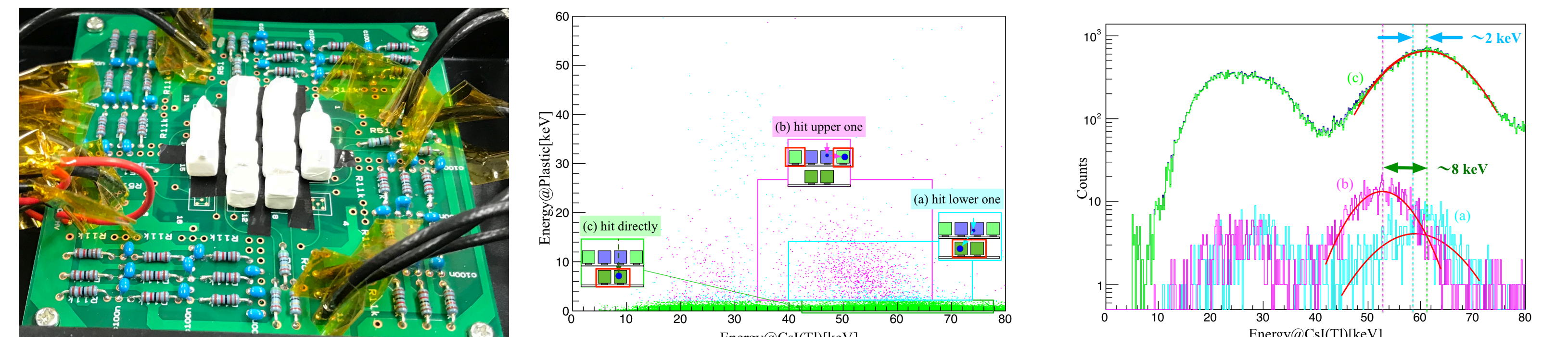
ミニコンプトンカメラの試作

1) まず右の写真の様なミニ偏光計を製作した。この偏光計は中心に14.5 x 14.5 x 30mm³のプラスチックシンチレータ(EJ-208)を取り付け、その4方に3 x 14.5 x 30mm³のCsI(Tl)を4枚取り付けられたものである。中央のプラスチックシンチレータは6mm角のMPPCを4つ、各々のCsI(Tl)は2mm角のMPPCがそれぞれ1つ取り付けられている。全体を-20度にし、中央のプラスチックシンチレータに60keVを照射して、プラスチックシンチレータによる信号でトリガーをかけた。その結果が右下の図である。2次元プロットの横軸はプラスチックシンチレータでのエネルギーデポジットであり、縦軸はCsI(Tl)でのエネルギーデポジットである。図には実際に起こったパターンによって3つのクラスターが形成されている。この図で重要な事は、CsI(Tl)にある程度のエネルギーデポジットがあった場合、プラスチックシンチレータにはアクシデンタルなヒットが無いという事である。つまり**コインシデンスを取ることでMPPCのノイズは大幅に低減できる事が分かった。**



2) 次に0.2mm厚のFR-4製の回路基板を製作し、その上にMPPCをバンボンディングしてみた。その様子が、下の写真に示されている。写真ではさらにMPPCの上にシンチレータが12個置かれているが、中心の4つが1cm角のプラスチックシンチレータであり、周りの8つが1cm角のCsI(Tl)シンチレータである。またこの基板の下に、2層目の基板が置かれている。2層目にも同様に4つのMPPCがバンボンディングされており、それぞれにはCsI(Tl)が置かれている。

2層でできたミニコンプトンカメラの上から241Amの線源を照射し、エネルギーデポジットが最大のプラスチックシンチレータとCsI(Tl)をそれぞれ選び出して、2次元プロットを作った。これもイベント毎に3つのパターンに分かれており、この2次元プロットをCsI(Tl)のエネルギー方向に射影すると、そのピーク位置が微妙にずれているのが分かる。それはコンプトン散乱によってプラスチックシンチレータでのエネルギーデポジットを反映している。このようにコンプトン散乱の角度による違いが見えているという事は、逆に考えれば**エネルギーデポジットによって散乱角の情報が得られ、引いては入射ガンマ線の方向に対する情報も得られるという事である。まだ詳しいスタディーはできていないが、この検出器はコンプトン望遠鏡として原理的に動作するという事が分かった。**



MPPCのテスト実験

3) MPPCに衛星環境で数年分に相当するプロトン照射し、そのラディエーションダメージを調べた。以下の図は横軸にプロトンの照射量を取り、縦軸にダークカレントを取ってある。照射前は~30nAであったため、およそ1kradでダークカレントが1000倍に増えてしまった。そこで照射条件によって、その増加が抑えられるのかを調べるため、以下の実験を行った。

1) 電源ONと電源OFF

MPPCの電源を入れた状態と入れない状態で、同様の照射を行った。もし違いがあればSAAで電源をOFFすることでダークカレントの増加量を下げられる。しかしながら、**ONでもOFFでもdoseが同じならおなじだけダークカレントが増えた。**

2) 高フラックスと低フラックス

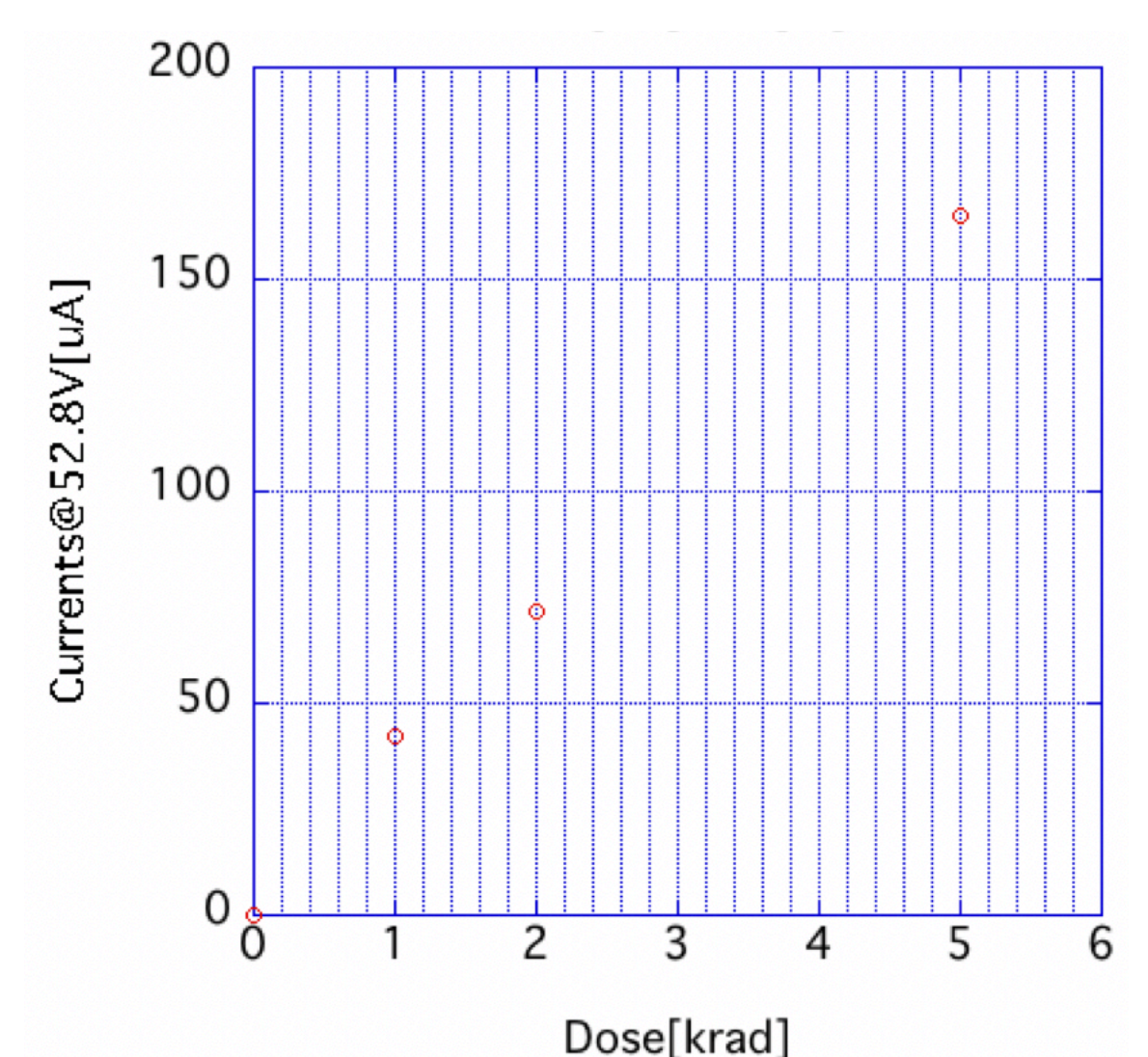
宇宙空間で数年分の照射を実験施設ではわずかに数分で行うため、実際よりもかなり高フラックスで照射が行われる。もし低フラックスの方がダークカレントの増加が少なければ、地上実験よりも宇宙空間の方がよりダークカレントの増加は緩やかになるはずである。そこでフラックスを30倍程度低くして、同じdose量の照射を行った。しかしながら、**ダークカレントはフラックスの低い高いに関係なく同じだけ増加した。**

3) 違うメーカーの製品

MPPCは浜松ホトニクス製の製品だが、SiPMは他のメーカーでも製作されている。そこでSensLというメーカーの製品でも同様の実験を試みた。しかし、**メーカーが違ってもdose量が同じであれば、同じだけダークカレントが増加した。**

4) アンニーリングの効果

5krad照射したMPPCを恒温槽に入れて、1時間アンニーリングを行った。しかし60度で行っても**ダークカレントは10%程度しか減らなかった。また120度で行っても精度30%程度しか減少しなかった。**



おわりに

ガンマ線バーストの放射メカニズムを同定するため、ガンマ線偏光度検出器を開発している。当初は大型の検出器の開発を目指していたが、今年度は質量は数分の1だが同程度の性能を獲得できるコンプトン望遠鏡が実現できるかを基礎実験により調べた。その結果、MPPCの放射線による劣化が無ければ、原理的に実現可能であると分かったが、残念ながら1kradでダークカレントが1000倍になってしまう事が分かった。本研究はLEAPワーキンググループの戦略的基礎開発と科究費基盤AIによって行われた。