

小型衛星 PolariS 搭載用 X 線撮像偏光計の開発 II

Development of the X-ray Imaging Polarimeter for the Small Satellite PolariS II

林田 清^{1,*}, 金柱鏞¹, 吉永圭吾¹, 定本真明¹, 上司文善¹, 井出舜一郎¹,
郡司修一², 坂野光成², 片桐惇²
岸本祐二³, 三原建弘⁴, 杉本樹梨⁴, 高木利紘⁴

¹大阪大学理学研究科, 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-1

²山形大学理学部, 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

³高エネルギー加速器研究機構, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

⁴理化学研究所, 〒351-0198 和光市広沢 2-1

Kiyoshi Hayashida^{1,*}, Masaaki Sadamoto¹, Fumiyoshi Kamitsukasa¹, Keigo Yoshinaga¹,
Shuichi Gunji², Mitsunari Sakano², Jun Katagiri²,

Yuji Kishimoto³, Tatehiro Mihara⁴, Juri Sugimoto⁴, Toshihiro Takagi⁴

¹Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560-0043, Japan

²Yamagata University, 1-4-12 Koshirakawa-cho, Yamagata, 990-8560, Japan

³KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

⁴RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, 351-0198, Japan

1 はじめに

X 線天体の偏光観測は、宇宙空間の磁場や高密度星まわりの降着円盤の構造など、直接撮像不可能な対象を探る手段として、X 線天文学の創生期から重要視されてきた。1970 年代には、超新星残骸かに星雲からの軟 X 線放射の偏光が検出され[1]、人工衛星による系統的な X 線偏光探査も実施された[2]。しかし、1980 年代以降の汎用 X 線天文衛星では、撮像、スペクトル観測に重点がおかれ、偏光観測に進展はなかった。

2000 年代に入りこの状況が大きく変化している。新しいタイプの X 線天文用偏光計が開発され、硬 X 線偏光計を搭載した気球実験 PHENEX[3]をはじめとした観測が実施されるようになった。100keV-1MeV の軟ガンマ線領域では、ヨーロッパの INTEGRAL 衛星が、かに星雲[4]、白鳥座 X-1[5]の偏光検出に成功している。日本のグループが開発した、偏光検出器 GAP[6]はソーラーセイルミッション IKAROS に搭載され、ガンマ線バーストの偏光検出に成功している[7]。このような状況の中、我々は、2010 年代後半の打ち上げを目標に、X 線ガンマ線偏光観測に特化した小型衛星 PolariS[8],[13]の実現を目指して開発をすすめている。

2 PolariS 衛星と硬 X 線撮像偏光計

PolariS は、JAXA 小型衛星として計画されている X 線ガンマ線偏光観測小型衛星である。国内を中心に海外からの参加者を含めて約 30 名のワーキンググループで、デザインを検討してきた。2013 年に打ち上げられた JAXA 小型衛星初号機（惑星観測が目

的)「ひさき」衛星と同様に小型衛星標準のバスシステムを使用し、PolariS 独自のミッション部を搭載する形となる。PolariS の第一の目標は、かに星雲の 1/100 以上の数 10 個の天体から硬 X 線領域(10-80keV)での偏光をはじめ検出することである。このために、焦点距離 6m の硬 X 線反射望遠鏡を 3 台、伸展式光学台とともに搭載する。それぞれの焦点面には、シンチレータと位置検出型光電子増倍管(MAPMT)で構成され、コンプトン/トムソン散乱の異方性を利用する、散乱撮像偏光計を設置する。PolariS 衛星は、偏光測定 of the system error を最小限におさえるために、衛星全体を 0.1RPM の速度で回転する。X 線天体の直線偏光度、偏光方向をエネルギーの関数として測定するのが目的である。

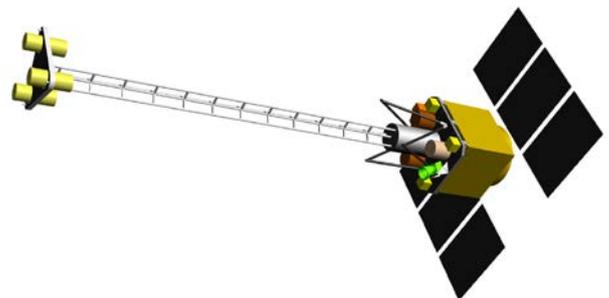


図1: PolariS 衛星全体図 6m 伸展式光学台を伸展した状態。

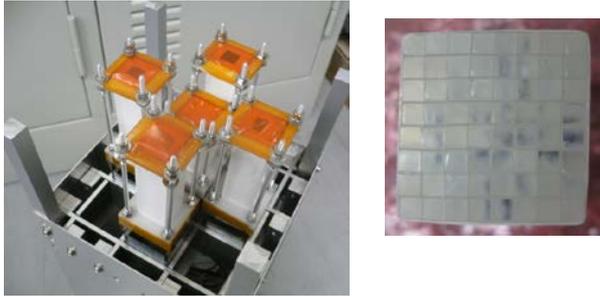


図2 : PolariS 散乱撮像偏光計プロトモデルシンチレータブロックと MAPMT のユニット 5 台で構成している(最終的に 9 台に拡張する)。

PolariS 散乱撮像偏光計の中心の 1 台にはプラスチックシンチレータ柱を 8x8 個組み合わせたブロック(右図が MAPMT への接地面)が使われており、周辺の 4 台は GSO シンチレータ柱とプラスチックスペーサを 4x4 個組み合わせたブロックが使用されている。MAPMT 1 個の断面サイズは 30mmx30mm。X 線は中心ユニットのプラスチックシンチレータに入射し、ある確率で散乱、反跳電子の信号を発生するとともに、散乱 X 線が GSO シンチレータで吸収される。これによって X 線入射位置と散乱方向がわかるというのが、この撮像偏光計の原理である。

この散乱撮像偏光計のプロトモデルの性能評価を主な目的にしたのが BL14A を利用した実験課題 2012G733 である。2012 年 12 月、2013 年 6 月、12 月、それぞれ 4-5 日の期間、BL14A の 10-80keV の範囲の単色偏光 X 線を使用した実験を実施した。ビーム偏光度の較正から、偏光測定能力、検出効率、位置検出性能といった結果は既に報告している ([9][10],[11],[12],[13])。

まとめると、

- 1) 偏光測定能力を示す M 値は 50-60%と(例えば IKAROS/GAP の散乱偏光計と比べても)高い。
- 2) 従来 50keV 程度以上に限定されていた入射 X 線のエネルギー下限を 20-30keV まで下げることが成功した。(ただし 20keV での検出効率は反跳電子検出モードで 2%程度、非検出モードで 8%程度)
- 3) 散乱型偏光計に撮像能力を兼ね備えることに成功し、位置分解能として 1.3mmFWHM という値を得た。

本実験課題 2014G697 では、2012G733 の成果をさらに発展させるべく、特に低エネルギー側の感度向上をめざした実験と、構造含めてデザインを見なおした改良型撮像偏光計に関する性能評価を目的としている。これまでに実施したのは 2014 年 12 月の 3 日間のビーム実験である。この結果を中心に報告する。

2 BeあるいはLi 散乱体の評価

上で示したように PolariS 撮像偏光計は、プラスチックシンチレータに入射した硬 X 線が Compton 散乱した場合に、その反跳電子の信号と散乱 X 線を検出することで撮像と偏光測定を実現する。この(本来の)検出モードを反跳電子検出モードと呼んでいる。

入射した X 線が Coherent な散乱を起こした場合、光電吸収された場合には、このモードでは検出できない。そもそも、Compton 散乱の反跳電子のエネルギーは 50keV 入射に対して 5keV 程度、20keV 入射に対して 1keV 程度と小さい。特に入射 X 線エネルギーが低い場合に、これをシンチレータと光電子増倍管で検出するのは、技術的なチャレンジである。実際、我々は、コンポーネントの選択、構造、データ処理に様々な工夫を施すことで、従来 50keV 入射が下限であったプラスチックシンチレータ使用の偏光計の下限エネルギーを 20keV まで下げることに成功した ([9],[10],[11],[12],[13])。この点の改良は今後も継続する。

しかしながら、プラスチック内における光電吸収が、散乱に対して支配的になる 20keV より低いエネルギーでは、原理的に効率を高めることが難しい。

そこで、より軽い元素の"passive"な散乱体を導入して、10-20keV の X 線の偏光測定も可能にするオプションを考えた。この偏光計は X 線望遠鏡と組み合わせて使用することが前提で、対象天体が点源である場合には、この散乱体に入射させることができる。つまり、点源限定で偏光計として(のみ)動作させるモードである。

当初、この散乱体の材質としては Be を考えた。実際に、直径 5mm、長さ 20mm の Be 円柱を用意し、BL14A の X 線ビームを入射させ散乱スペクトルを取得したところ Fe をはじめとする不純物の蛍光 X 線が強く観測された。使用した Be の不純物濃度は 0.1 重量%程度であるが無視できない影響があることがわかった。同じサイズの Li 散乱体入手し、散乱体としての性能を比較する実験を実施した。

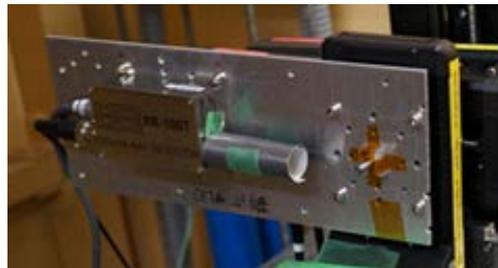


図3 散乱体(このケースでは Be 柱)に偏光 X 線を照射し、散乱 X 線を CdTe 検出器で測定する。ビーム偏光度の較正時と同様に回転ステージで回転しながら測定をした。

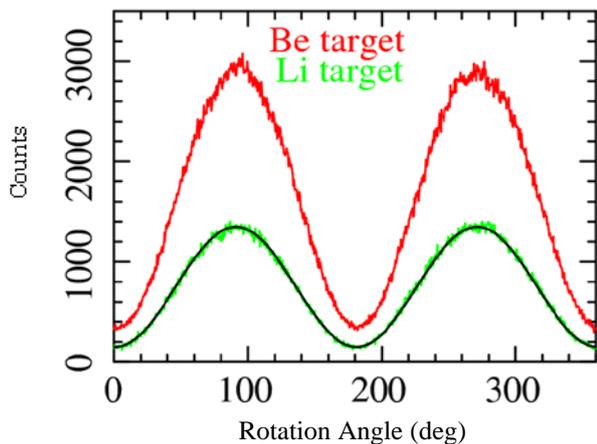


図4 18.5keVの単色偏光X線をBe散乱体、Li散乱体に照射した場合のモジュレーションカーブ。同じサイズの散乱体であるにもかかわらず、Be散乱体の場合にカウント数が大きいのは、BeとLiの密度の違い(3.5倍)を反映している。より低いエネルギーでは、散乱体での吸収が効き、差が小さくなる。

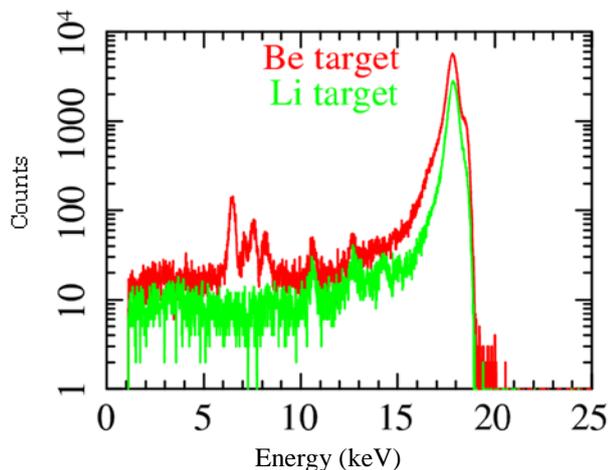


図5 18.5keVのX線を散乱体(このケースではBe柱)に照射した場合の、散乱X線のCdTe検出器によるスペクトル。回転角度は90度、もっとも散乱X線が強い方向で取得したスペクトル。Be散乱体を使用した場合に不純物のFe, Ni, Cuの特性X線が観測されている。コリメータに使用したPbの特性X線はどちらの散乱体を使用した場合にも観測されている。

図3のような装置でBeあるいはLiの散乱体に偏光単色X線を照射し、散乱X線強度の回転角依存性(図4)と散乱スペクトル(図5)を測定した。Be散乱体の場合に、Fe, Ni, Cuの特性X線が生じているのがわかる。観測されたFe強度は、材料に含まれる不純物濃度から期待される値とおおよそ矛盾はない。

3 BeあるいはLi散乱体を組み込んだPolariS撮像偏光計の評価

同じ散乱体をPolariS撮像偏光計の入射面、プラスチックシンチレータブロックの中央に設置し、性能評価を実施した。

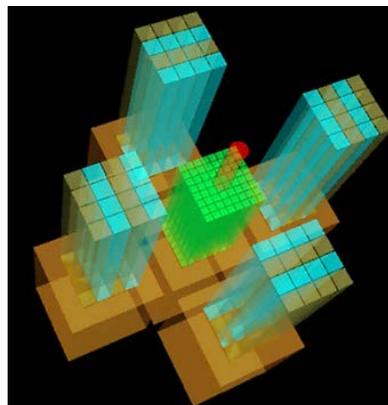


図6 PolariS撮像偏光計の構造。図の赤の円柱の位置に散乱体を設置した。

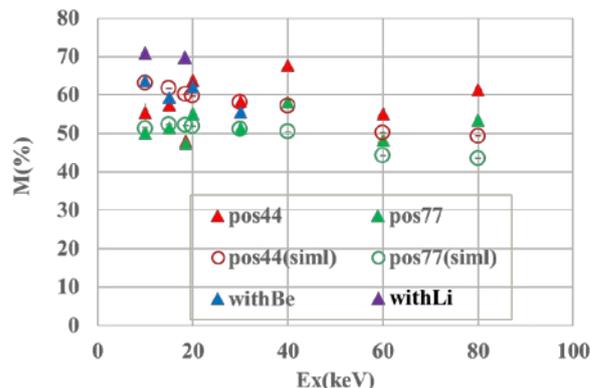


図7 PolariS撮像偏光計プロトモデルのModulation Factor, M。反跳電子非検出モードの結果を示している。塗つぶしマークは実験で得られた値、白抜きマークは、シミュレーションによる値。withBeがBe散乱体を設置した場合、withLiはLi散乱体を設置した場合。

図7に示したのがModulation Factor Mで、この分野での通例に従い100%偏光度のビームが入射した場合のmodulationに換算している。Be散乱体やLi散乱体を使用した場合、60-70%と高い値を示している。Li散乱体の場合がより高い原因としては、高次散乱の影響がより小さいことや、散乱深さがより一様に分布することが効いているなどの可能性がある。シミュレーションとも比較して検討中である。

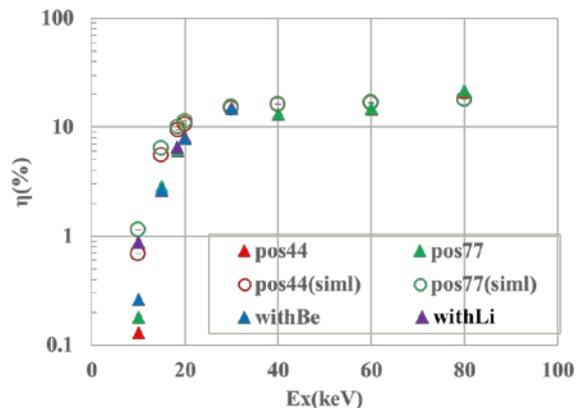


図8 PolariS 撮像偏光計プロトモデルの検出効率、 η 。反跳電子非検出モードの結果を示している。塗つぶしマークは実験で得られた値、白抜きマークは、シミュレーションによる値。withBe が Be 散乱体を設置した場合、withLi は Li 散乱体を設置した場合。

続いて図8に示したのが検出効率である。15keV以上では、Be, Li の散乱体の有無で検出効率に違いはない。10keV 入射に対して、散乱体の導入によって検出効率の向上がみられている。特に、Li 散乱体を導入した場合に効率は最大になり 1%程度である。

以上の実験結果のみから判断すると、点源天体用の反跳電子非検出モードにおいて、散乱体、特に Li 散乱体を導入することが望ましいことになる。

ただし、検討項目も残っている。今回の実験では、Li 散乱体は窒素封入のポリエチレン袋に封入したまま装着した。最終的には、コーティングや専用容器への封入などの方策が必要である。また、Li 散乱体の長さに関しても、最適化が必要である。点源目的にはより長くすべきであるが、一方で、反跳電子検出モードに対しては、検出器応答をより複雑にしてしまう。このあたりの、トレードオフの検討も必要である。

3 その他の開発状況と今後の予定

PolariS 撮像偏光計の開発は、図1に示したプロトモデル使用の性能評価を中心に行ってきたが、現在、新モデルの製作を行っている。これには宇宙で使用実績のある位置検出型光電子増倍管（と同じ外形サイズ、仕様の）モデルを使用するとともに、宇宙環境耐性などを考慮したデザインをしている。2015年度後期のビームタイムでは、この性能評価を実施したいと希望している。

これと平行して、宇宙環境でのバックグラウンドの評価を実施した。GEANT4 ライブラリを使用して各種放射線の反応を模擬し、それにモデル化した光電子増倍管+読み出し回路の応答を畳み込むことで、実験データをシミュレーションした[14]。単に鉛とスズのシールドで検出器を囲んだ状態では、（もっとも強い X 線源である）かに星雲からの信号を上回

るバックグラウンド(BGD)が発生する。1)入射方向、ただし望遠鏡以外から入ってくる宇宙背景 X 線を除外するための筒状シールドを設ける。2)検出器がもっている反同時計数機能を利用する、ということで反跳電子非検出モードでもかに星雲の 1/10 程度まで BGD をおさえられる。反跳電子検出モードで、かつ、望遠鏡の撮像能力を活用すると、BGD レベルはかに星雲の 1/100 程度になり、観測目標を達成できる見込みとなっている。

謝辞

この実験に関して林田は科研費 23340071、230000040 のサポートを受けています。PolariS 衛星の計画や撮像偏光計のデザイン開発は、PolariS ワーキンググループ（2014年12月まで；現在、偏光リサーチグループとして再編成中）の共同によるものです。ビームライン BL14A の実験においては担当の岸本俊二先生はじめ PF 関係者の皆様にお世話になりました。

参考文献

- [1] R. Novick et al., *Astrophys. J.* **174**, L1 (1972)
- [2] M.C. Weisskopf et al., *Astrophys. J.* **208**, L125 (1978)
- [3] S. Gunji et al., *Proc. of SPIE* **6686**, 18.1 (2007)
- [4] A.J. Dean et al., *Science* **321**, 1183 (2008)
- [5] P. Laurent, *Science* **332**, 1126 (2011)
- [6] D. Yonetoku et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 625 (2011)
- [7] D. Yonetoku et al., *Astrophys. J.* **743**, L30 (2012)
- [8] K. Hayashida et al., *Proc. of SPIE* **8443**, 84434G (2012)
- [9] 林田 清 他, KEKPF Report 2012, 379 (2013)
- [10] 林田 清 他, KEKPF Report 2013, 379 (2014)
- [11] 定本真明、平成 25 年度大阪大学理学研究科修士論文 (2014)
- [12] K. Hayashida et al., *Suzaku and Maxi Conference 2014 Proc.*, 150 (2014)
- [13] K. Hayashida et al., *Proc. of SPIE* **9144**, id. 91440K (2014)
- [14] 吉永圭吾、平成 26 年度大阪大学理学研究科修士論文 (2015)

* hayasida@ess.sci.osaka-u.ac.jp