## 科学研究費助成事業

平成 2 7 年 6 月 9 日現在
機関番号: 1 4 4 0 1
研究種目: 基盤研究(B)
研究期間: 2011 ~ 2014
課題番号: 2 3 3 4 0 0 7 1
研究課題名(和文)ワイドバンドエックス線撮像偏光検出器の開発と硬エックス線偏光観測
研究課題名(英文)Development of Wideband X-ray Imaging Polarimeters and Hard X-ray Polarimetry
研究代表者
林田 清(Hayashida, Kiyoshi)
大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 3 0 2 2 2 2 2 7

研究成果報告書

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文):X線偏光測定は、超新星残骸の磁場構造や、プラックホールまわりの降着円盤の幾何学を知 るための有効な観測手段と期待されながら、現状では未開拓の分野である。これを打破するために、X線ガンマ線偏光 観測小型衛星PolariSを計画している。このための硬X線偏光撮像計の開発を行った。コンプトン散乱を検出原理とする 偏光計をシンチレータと位置検出光電子増倍管を組み合わせて製作し、ソフトとハードの改良を行いつつ性能評価を実 施した。1.3mmFWHMという位置分解能、50-60%のM値を達成し、従来50keVだった散乱偏光計のエネルギー下限を10-20ke Vまで下げることに成功した。

研究成果の概要(英文):X-ray polarimetry is effective for measuring magnetic field in super novae remnants or geometry of a accretion disk around a black hole. Nevertheless, the field has been unexploited. We are planning a small satellite, PolariS, dedicated to X-ray and gamma-ray polarimetry. We primarily developed hard X-ray imaging polarimeters for it. The polarimeter consists of scintillators and position sensitive photo multipliers. We built a such a system and improved its performance by introducing various new features in hardware and software. We obtained high positional resolution of 1.3 mm FWHM and polarization sensitivity of M of 50-60%. We also succeeded in making the lower threshold of the polarimeter down to 20keV, much lower than 50keV for previous polarimeters of similar type. The background reduction was optimized by using simulation using GEANT4 package. Overall, the polarimeters plus hard x-ray telescopes can detect hard X-ray polarization for sources with brightness of 1/100 Crab.

研究分野:X線天文学

キーワード: X線偏光 シンチレーション検出器 宇宙磁場 降着円盤 光電子増倍管 観測衛星 PolariS



科研費

## 1. 研究開始当初の背景

X線天文学の50年を超える歴史において、 ブラックホールや銀河団中の高温ガスなど、 我々の宇宙観を変える発見がなされてきた。 この間、X線観測技術も格段の進歩をとげ、 例えば角度分解能は可視光のそれに並ぶ0.2 秒角が達成されている。観測対象も彗星から、 最果ての銀河までひろがり、多波長天文学の 一環として重要な位置をしめている。

しかし、電波から紫外線の波長では観測手 段として確立している偏光測定は、X線領域 では未開拓のままでいる。偏光観測が重要で あることは、X線天文学黎明期から指摘され ている。例えば、超新星残骸やパルサーの磁 場の構造や、ブラックホールまわりの降着円 盤の幾何学など、X線偏光観測ではじめて明 らかにできる情報として期待されていた。 1970年代にはX線偏光観測に特化した衛星 も打ち上げられ、かに星雲の偏光は検出され たものの、その後 30年以上にわたり観測的 な進展がとどこおっていた。これは、X線偏 光検出器の感度が低かったのが原因である。

ただし、2000 年以降、偏光観測をめぐる 状況が変わってきた。ひとつのきっかけが、 我々(山形大学、大阪大学、理研、宇宙研の グループ)が世界に先駆けて実施した、硬 X 線偏光観測気球実験 PHENEX (2006,2009 年)である。また、X線よりさらに波長の短 いガンマ線領域では、ヨーロッパの衛星 INTEGRAL が偏光検出に成功した(かに星 雲、2008)。さらに、2010 年打ち上げられた ソーラーセイル試験衛星 IKAROS に搭載さ れた GAP 検出器がガンマ線バーストの偏光 検出に成功した。

このような中で、X線ガンマ線偏光観測に 特化した新世代の小型衛星の計画を国内の 研究者を中心に立案したのが PolariS 衛星計 画である。

2. 研究の目的

X線ガンマ線偏光測定が特に重要なのが、 非熱的放射である。シンクロトロン放射の偏 光から磁場の構造を、コンプトン散乱成分の 偏光から散乱体(ブラックホールまわりの降 着円盤など)の幾何学を推定できる。スペク トルや時間変動の観測のみでは区別できな かった複数のモデルに対して、偏光測定で決 着がつけられる。

PolariS 衛星では、非熱的放射が卓越する 硬X線領域に焦点をしぼり、かに星雲の 1/100 以上の明るさの天体の偏光度、偏光方 向を 10-80keV の範囲で測定することを第一 の目的にしている。このために、焦点距離 6m の硬X反射望遠鏡3台とその焦点面に設置す る散乱型撮像偏光計を搭載する。PolariS 衛 星の第二の目的は、1年に10発以上のガン マ線バーストの偏光測定である。 IKAROS/GAP の発展として、多数のガンマ 線バーストの系統的偏光測定からジェット の構造を探る。



図1 PolariS 衛星全体図。JAXA 小型衛 星バスの上に、6m 伸展式光学台、3 組の 硬 X 線反射望遠鏡と偏光撮像偏光計など を搭載する。重量は約 450kg。

本研究の目的は、この PolariS 衛星計画を 具体的な目標にすえた搭載装置の基礎開発 である。

3. 研究の方法

PolariS 衛星の全体像を図1に示す。硬 X 線で撮像するための反射望遠鏡は、同心円状 に設置した多数の多層膜反射ホイルで構成 される。このホイルを斜めにかすめるように 入射した X線を結像する。このため、一般に 長い焦点距離が必要で、例えば 2015 年度打 ち上げのASTRO-H衛星の硬 X線望遠鏡の焦 点距離 12mである。PolariS では、それを各 方向におよそ 1/2 に縮小し、焦点距離 6m の 望遠鏡を目指した。本研究では、ホイルの枚 数や多層膜のデザインを検討し、十分な有効 面積が実現できるのか、シミュレーションに より検証した。



図 2 PolariS 硬 X 線撮像偏光計プロト モデルの構造。オレンジ MAPMT、緑プラ シン、水色 GSO、茶色スペーサ。赤は Be 柱。5 台のユニットで構成している。

一方、この望遠鏡の焦点面には、撮像能力 をもつX線偏光計を設置する。図2に示した のが、そのPolariS硬X線撮像偏光計のプロ トモデルの構造である。シンチレータと位置 検出型光電子増倍管(MAPMT)で構成され ている。中心のプラスチックシンチレータに 入射したX線がコンプトン散乱を起こすと、 散乱X線と反跳電子が生じる。前者が周囲の GSOで、後者がプラスチックシンチレータで 信号を生じた場合、X線入射位置と散乱方向 がわかる。コンプトン散乱では、入射 X線の 偏光(電場ベクトル)方向に垂直な方向に散 乱されやすいという性質があるので、これを 利用して偏光測定ができる。この動作原理は、 散乱偏光計と呼ばれるタイプで、硬 X線から ガンマ線でもっとも効率よく偏光測定でき る。

本研究では、この偏光計のデザインをシミ ュレーションも駆使して最適化すること、実 際に偏光撮像計プロトモデルを製作するこ と、製作した偏光撮像計の性能評価を実施す ることを行った。性能評価の指標としては、 偏光計としての性能を表す Modulation Factor (M)と検出効率(n)、さらに位置分解能 がある。Mやηのエネルギー依存性も重要で、 特に、従来 50keV 程度だったプラスチックシ ンチレータ使用の散乱偏光計のエネルギー の下限をいかに 10keV 付近まで下がられる かがポイントになる。



図3 放射光施設 KEK PF における PolariS 撮像偏光計試験。単色 X 線偏光 ビームを偏光計を回転させながら照射。

また、軌道上での運用でどの程度までバッ クグランドを下げられるかも重要である。こ の点に関しても、最適な方策(検出器のシー ルドなど)ションレーションによって探った。

さらに、PolariS 衛星の姿勢制御を含めた システムについて検討を加えるとともに、実際の観測計画を検討した。

4. 研究成果

(1)硬X線反射望遠鏡のデザイン最適化



デザイン検討の結果、3 セグメント、ホイ ル厚み0.22mm,ホイル長さ200mm,Pt/C多層 膜、内直径80mm,外直径200mmと決定した。 ホイル全重量は1台あたり6.3kg、全枚数432 枚である。有効面積の計算値は図4に示す

(2)硬X線撮像偏光計の開発

 
 ① 偏光撮像計プロトモデルの製作 図5に示すような偏光計のプロトモデル を製作した。プラスチックシンチレータのユニット1台を中心に、GS0シンチレータのユニット4台で囲まれている。最終的にはGS0 ユニットを8台にする計画である。



図5 PolariS 散乱撮像偏光計プロトモデ ル(左) とプラスチックシンチレータ (2.1mmx2.1mmx40mm) 8x8 ブロック(右)。

② 偏光撮像計の性能評価

製作した偏光撮像計の性能評価は放射光施設において 10-80keV の範囲の単色偏光 X線を照射することで行った。位置検出能力としては 1.3mmFWHM (0.6 ピクセルに相当し、散乱型の偏光計としては他に例を見ない特長になっている。



図6位置分解能測定結果。



図7 モジュレーションカーブ測定結果 の一例(40keV、中心位置入射の場合)

図7に示したのは横軸に偏光計で検出し たイベントの散乱位相角分布で、モジュレー ションカーブとよばれるものである。この山 と谷の深さから Modulation Factor (M)が決ま る。検出効率ηは検出イベントの総数を入射 X 線総数でわったものになる。

MAPMT(につないだ)多チャンネルヘッド アンプからの全出力を生データとして記録 し、これからイベント選択処理を施している。 この処理方法によって、性能が大きく異なる。 特に、反跳電子のエネルギーは 20keV の X 線 入射の場合で 1keV 程度と低いため、特別な 取り扱いが必要となる。

我々は、シンチレータ柱からの光が必ずし もMAPMTの1ピクセルに収まらないことを利 用して、MAPMTの暗電流イベントと入射 X線 イベントを区別する手法を発明した。また、 従来見過されていた、ペデスタルレベルのオ フセット、変動を補正する処理をとりいれる ことで、反跳電子に対する閾値を 1keV 付近 まで下げることに成功した。このようにして 得た結果を図8,図9にまとめる





図8に示すとおり、Mは10-80keVのほとん どのケースで50-60%という値を示している。 散乱偏光計のMとしては、例えばIKAROS/GAP のそれが43%@80keVであることとくらべても 高い。



図 9 PolariS 偏光撮像計プロトモデルの 検出効率η

検出効率に関しては、Double Hit というモ ードと、Single+Double という二つのモード で値が系統的に異なることがみてとれる。前 者は、プラスチックシンチレータの信号を参

照するモードで、この撮像偏光計の基本とな る動作モードである。一方、対象が点源であ る場合は、プラスチックの信号を参照しない でも偏光計としては利用できる。これが後者 のモードである。後者のモードを活かすため に、Be 柱をパッシブターゲットとして導入し ている(図2参照)。高エネルギー側では両 モードとも 10-20%という効率をもっている。 Single+Double Hit (点源専用) モードでは 15keV でも3%程度の効率を確保している。低 エネルギー側で低下する原因の一部は、プラ スチック中で光電吸収断面積と散乱断面積 で決まる原理的な制限である。これをさらに 向上させるためには、Be を Li に置き換える ことが有効で、本研究でも試験的にX線散乱 スペクトルの評価を行っている。

一方、Double Hit モードで系統的に Single+Double モードより効率が低いのは、 プラスチックシンチレータでの反跳電子の 信号が、シンチレータ検出器としては従来に ない低いレベル(20keVのX線入射に対して 1keV 程度) であることによっている。検出器 の組み上げ方法の工夫に加えて、先に述べた ような、データ処理の工夫をほどこすことで、 従来 50keV 程度だった (Double Hit) エネルギ ー下限を図9に示すように20keV程度まで削 減できたことは、本研究の大きな成果である。 なお、プロトモデルでは GSO シンチレータ を4ユニット使用しているが、最終的なフラ イトモデルでは、これを8ユニットに増設す る。これにより単純に効率が図9の2倍にな ることが期待される。

③ 偏光撮像計のシミュレーションソフト 図8,図9には実測出たとともに、シミュ レーションの結果を白抜き(Siml.)として 示している。シミュレーションはX線と物質 の相互作用を再現する GEANT4 パッケージを 使用するとともに、シンチレータ光の発光と その広がり、MAPMT の電荷増幅なども再現す ることを目指した。実験測定値との一致は完 全ではないが、実験データの検証だけでなく 将来の設計最適化にも利用できるソフトウ ェア資産を開発することができた。

(3) 軌道上でのバックグランド評価と削減対策

軌道上では宇宙線、X線背景放射、アルベ ドガンマ線、中性子などが検出器に対するバ ックグランド信号をつくる。この定量的な評 価にも、上で作成したシミュレーションソフ トを活用した。

まず、検出器を(入射面だけ穴をあけた) Pb+Sb のシールドでおおっただけでは、バッ クグランドが、(最も明るい X 線源である) かに星雲の強度をも卓越してしまうという こともわかった。様々な方策を検討した結果、 望遠鏡方向からの X 線のみをとりこむフード 状のシールドと、検出器の多チャンネルヘッ ドアンプの出力を活用した反同時計数処理 が有効であることがわかった。Double Hit モ ードの場合であれば、イベント入射位置で X 線源からのイベントを選択できるので、これ らとあわせることで、かに星雲のおよそ 1/100 のレベルにバックグランドを抑えられ ることを明らかにした。これにより、PolariS 衛星の目標である、かに星雲の 1/100 の明る さの X 線天体の偏光観測を実現できる根拠を 得た。





以上の研究結果をもとに期待される検出 感度を最小検出可能偏光度 MDP として図10 に示す。結論として、かに星雲の1/100の明 るさの天体に対して、1Ms の長時間観測を実 施することで、10-30keV バンドで MDP 7%、 30-80keV バンドで MDP 20%という値で偏光検 出可能という結果となる。1 年間の運用期間 でおよそ 30 個程度の天体を観測する予定で あるが、多くが、かに星雲の1/10 あるいは それ以上の明るさの天体であるので、100ks あるいはそれ以下の観測時間で低い偏光度 の場合でも検出可能となる。

観測対象の 30 天体には、系内のブラック ホール連星系、中性星連星系、パルサー、超 新星残骸、さらに、活動銀河核、ブレーザー、 銀河団を含む。例えば、シンクロトロン放射 が X 線放射メカニズムである超新星残骸、ブ レーザーでは、磁場構造が明らかにされる。 一方、ブラックホール連星系や活動銀河核で は降着円盤による反射成分に関して強い偏 光が期待されており、観測から降着円盤の傾 きなどが測定できると期待される。

現時点でプロジェクト化されたX線偏光観 測衛星はなく、PolariS衛星も検討段階にあ るが、これが実現することで硬X線偏光観測 という、高エネルギー天体物理の新たな窓が 開けると期待している。

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

- ① <u>K. Hayashida</u>, Y. Daisuke, <u>S. Gunji</u>, T. Tamagawa, <u>T. Mihara</u>, T. Mizuno, H. Takahashi, T. Dotani, H. Kubo, Y. Yatsu, F. Tokanai, T. Nakamori, S. Shibata, A. Hayato, A. Furuzawa, 他12 名, "X-ray gamma-ray polarimetry small satellite PolariS", SPIE Proc. 査読なし)、9144, 2014, 91440K, 10pp DOI: 10.1117/12.2056685
- ② K. Hayashida, 他 28 名," Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H", SPIE proc. (査読なし), 9144, 2014, 914429, 8pp.
   DOI: 10.1117/12.2054575
- ③ 林田清、定本真明、吉永圭吾、金柱鏞、 上司文善、井出舜一郎、<u>郡司修一</u>、坂野 光成、片桐惇、岸本祐二、<u>三原建弘</u>、杉 本樹梨、高木利紘、他 PolariS Working Group, "小型衛星 PolariS 搭載用 X 線撮 像偏光計の開発"、KEK Photon Factory Activity Report 2013(査読なし)、#31 B, 2014, 509 http://pfwww.kek.jp/acr2013pdf/part\_ b/pf13b0509.pdf
- ④ S. Inoue, <u>K. Hayashida</u>, H. Akamatsu, S. Ueda, R. Nagino, H. Tsunemi, N. Tawa, K. Noriaki; K. Koyama, "Discovery of an overlapping cluster in the Abell 1674 field with Suzaku", PASJ(査読あり), 66, 2014, id717 DOI: 10.1093/pasj/psu044
- ⑤ S. Ueda, <u>K. Hayashida</u>, N. Anabuki, H. Nakajima, K. Koyama, H. Tsunemi, "Suzaku observations of the type 2 QSO in the central galaxy of the Phoenix cluster", ApJ Letters(査読あり), 778, 2013, id33 DOI: 10.1088/0004-637X/778/1/33
- ⑤ S. Ueda, <u>K. Hayashida</u>, H. Nakajima, N. Anabuki, H. Tsunemi, H. Kan, T. Kohmura, S. Ikeda, K. Kaneko, 11 名 ," Measurement of the soft X-ray response of P-channel back-illuminated CCD", Nucl. Instr. & Methods A(査読あり), 704, 2013, 140-146 DOI: 10.1016/j.nima.2012.11.187
- ⑦ <u>K. Hayashida</u>, D. Yonetoku, <u>S. Gunji</u>, T. Tamagawa, <u>T. Mihara</u>, T. Mizuno, T. Dotani, H. Kubo, T. Murakami, Y. Yatsu, 他 10 名, "X-ray gamma-ray polarimetry satellite Polaris", SPIE proc. (査読なし), 8443, 2012, 84434G 9pp DOI: 10.1117/12.926002

〔雑誌論文〕(計25件)

<sup>5.</sup> 主な発表論文等

 
 林田清、定本真明、上司文善、吉永圭吾、 <u>郡司修一</u>、坂野光成、片桐惇、岸本祐二、 <u>三原建弘</u>、杉本樹梨、高木利紘、他 PolariS Working Group, "小型衛星 PolariS搭載用X線撮像偏光計の開発"、 KEK Photon Factory Activity Report 2012(査読なし)、#30 B, 2013, 379

〔学会発表〕(計29件)

- 林田清、"PolariS 搭載用硬 X 線撮像偏光 計の開発:バックグランド成分とパッシ ブターゲット",日本天文学会 2015 年 春季年会、2015 年 3 月 20 日、大阪大学
- 2 林田清、"X線ガンマ線偏光観測の展望", 高エネルギー天体物理連絡会研究会、 2015年3月9日、広島大学
- ③ K. Hayashida, "X-ray gamma-ray Polarimetry Mission PolariS", SPIE Astronomical Telescopes and Instruments, 2014年6月22日, カナダ モントリオール
- ④ 林田清、"X線ガンマ線偏光観測小型衛星 PolariS:開発の現状 2014"、日本天文学 会 2014 年秋季年会、2014 年 9 月 13 日
- ⑤ 林田清、"X線ガンマ線偏光観測小型衛星 PolariS開発の現状"、日本天文学会 2014 年春季年会、2014年3月20日、国際基 督教大学
- ⑥ 林田清、"PolariS計画の現状"、小型衛星
   会議、日本天文学会 2013 年秋季年会、
   2013 年 3 月 7 日、宇宙科学研究所
- ⑦ 林田清、"PolariS 衛星/GEMS で展開するX線ガンマ線偏光観測計画"、学術会議シンポジウム、2013年2月17日、東京大学
- ⑧ K. Hayashida, "X-ray and gamma-ray Polarimetry Small Satellite PolariS", COSPAR Symposium, 2012年7月15日、 インド マイソール
- ⑨ K. Hayashida, "X-ray and gamma-ray Polarimetry Small Satellite PolariS", SPIE Astronomical Telescopes and Instruments, 2012年7月5日、オラン ダ アムステルダム

6.研究組織
 (1)研究代表者
 林田 清 (HAYASHDIA Kiyoshi )
 大阪大学・理学研究科・准教授
 研究者番号: 30222227

(3)連携研究者
 郡司修一(GUNJI Syuichi
 山形大学・理学部・教授
 研究者番号: 70241685

三原建弘 (MIHARA Tatehiro)
 理化学研究所・宇宙観測実験連携研究グル
 ープ・専任研究員
 研究者番号: 20260200

)

齊藤芳隆(SAITO Yoshitaka)
 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
 准教授
 研究者番号: 50300702