

大気球に搭載した 硬X線偏光計PoGO+による かに星雲，はくちょう座X-1の観測結果



高橋 弘 充

〈広島大学大学院理学研究科物理科学専攻 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉
e-mail: hirotaka@astro.hiroshima-u.ac.jp

偏光観測は、撮像、測光、分光観測とは独立な物理量が得られる重要な観測手段です。日本とスウェーデンの国際共同で開発した硬X線偏光計PoGO+（ポゴプラス）気球実験では、2016年に上空40 kmからパルサー風星雲「かに星雲」とブラックホール連星系「はくちょう座X-1」の観測に成功しました。本稿では、世界初の高感度な観測結果から分かったこと、利用した気球実験について述べます。これまでにX線やガンマ線の偏光データがほとんどなかったことから、現時点では高エネルギー偏光研究はまだ手つかずの状況です。今後より高感度な観測が予定されており、この分野の研究が急速に発展すると期待されます。

1. はじめに

偏光（偏波）観測は、天体の磁場情報や、画像では空間分解できないようなマイクロな幾何構造・物理を調べることができる強力な手段であり（図1）、イメージ（撮像）、時間変動（測光）、エネルギー（分光）測定とは相補的な観測手法です。電波や可視光などエネルギーの低い波長帯では広く利用されていますが、X線やガンマ線などの高エネルギー帯域でも、高エネルギー粒子ほど粒子加速の現場を捉えやすい、ブラックホールに吸い込まれる直前の降着円盤を観測しやすい、など特徴的な観測結果が得られると期待されています。しかし、高エネルギー帯域の偏光観測では検出器の技術的な困難などから、精度の良い観測が行われたのは1970年代のOSO-8衛星のみでした¹⁾。OSO-8衛星では、グラファイト結晶で天体からのX線をブラッグ反射させ、反射の強弱により偏光しているのか無偏光なのかを観測しました。ただし、ブ

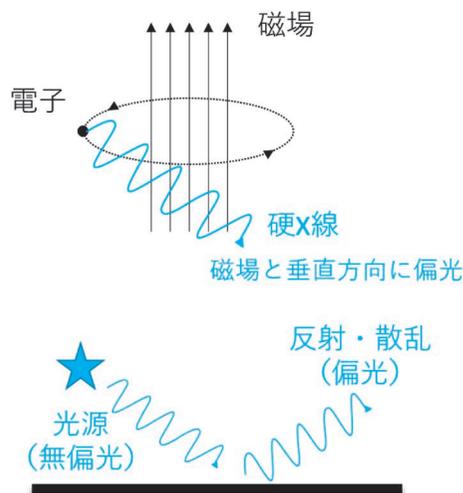


図1 偏光観測によって観測可能な磁場情報や幾何構造. (上) 高エネルギー電子・陽電子が磁場に巻き付いて放射するシンクロトロン光は、磁場の向きと垂直方向に偏光します。(下) 光源からの直接光が無偏光でも、周囲の物質で反射・散乱された光は偏光します。

ラック反射は特定のエネルギーしか反射の条件を満たさないため、OSO-8では2.6, 5.2 keV (キロ電子ボルト) のみにしか感度がありませんでした。

そのため、より広いエネルギー帯域での偏光観測を目指し現在も世界中で精力的に検出器開発が進められ、広視野を確保してガンマ線バーストなどの突発天体のための偏光計 (日本のイカロス衛星に搭載されたGAP検出器²⁾ など) や、視野を狭めて既知の天体を詳細に観測するための偏光計 (本稿で紹介するPoGO+ (ポゴプラス) 気球など) での観測成果が得られるようになってきました。本稿では、我々が携わっている硬X線偏光計PoGO+気球実験の最新成果と、気球実験について紹介します。PoGO+によって詳細な硬X線の偏光観測の結果が得られ、その有用性が実証できたことで、高エネルギー偏光について観測も理論も今後の発展が大いに期待されます。

2. 偏光 (偏波) 観測

電波や可視光の偏光は、日常生活でも身近なところで利用されています。例えば、テレビなどの信号を受信する電波アンテナは、偏波の方向を考慮して備え付けられます。また可視光では、カメラやゴーグルで反射光を軽減するために偏光フィルタを利用するなどの工夫がされています。X線やガンマ線は物質を透過してしまうためフィルタのような物が存在せず (偏光観測に限らず測光観測などにおいても)、偏光観測は検出器に追加の機能が必要となります。

X線帯域では、光電吸収した際に光電子が偏光方向に飛ばされます。そのためミクロスケールで、光電子の軌跡を測定することで偏光観測を実現できます。

硬X線やガンマ線では、コンプトン散乱の際に散乱光は偏光方向と垂直に飛ばされやすい (クライン-仁科の関係) ため、光子が入射した場所と次に散乱光が反応した場所の2か所を計測し、散乱方向から偏光を測定します。本研究のPoGO+

では、この原理を利用しています。

このように入射した場所だけでなく、追加で光電子の軌跡イメージや散乱光が反応した場所を計測しないとイケないため、高エネルギー偏光計はどうしても複雑な構造となってしまいます。

このため、ガンマ線衛星INTEGRALなどにより2000年以降にも数例の観測結果の報告があります^{3,4)}、偏光観測に特化した検出器ではないこともあり、その精度には疑問が持たれていました。

3. 硬X線偏光計PoGO+ (ポゴプラス)

今回の研究で我々は、全天で最も硬X線で明るい2天体であるパルサー風星雲「かに星雲」とブラックホール連星系「はくちょう座X-1」を、日本とスウェーデンで共同開発した硬X線偏光計PoGO+ (Polarized Gamma-ray Observer) で観測しました (研究代表者: Mark Pearce, スウェーデン王立工科大学)^{5,6)}。

日本からPoGO+への参加機関は、広島大学、東京大学、名古屋大学、早稲田大学、東京工業大学、宇宙科学研究所です (図2)。広島大学と東京大学は検出器の組み上げと大気球の運用を、名古屋大学は読み出し回路、早稲田大学と東京工業大学は光センサーの光電子増倍管の開発を中心となって行いました。高エネルギー加速器研究機構のフォトンファクトリー (シンクロトロン放射光) でも、これらの機関が主体となって地上較正実験



図2 2016年に放球した硬X線偏光計PoGO+気球の全体像とチームメンバー。

を実施しました。また偏光計内のデータ通信には、宇宙科学研究所が中心となって構築した衛星搭載機器の統一通信規格SpaceWireを利用しています⁷⁾⁹⁾。

PoGO+では、2011年～2016年にかけて3回の気球フライトを行い、この中で最も高感度な観測は3回目の2016年7月に行ったものです。上述のようにX線やガンマ線の偏光観測は技術的に困難なため、偏光観測に特化した検出器により詳細な偏光情報を取得することに成功できたのは、硬X線帯域では世界で初めての成果となりました。観測帯域は20–180 keVです。

ここでは、観測した2天体の科学的な成果を本章で、PoGO+では直径100 mにも膨らむ気球に搭載して観測を実施したことについて第4章で述べます。

3.1 パルサー風星雲「かに星雲」

地球上には宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子（多くは陽子、一部が電子）が宇宙から降り注いでいます。この宇宙線の生成（高エネルギーまで加速する）現場は、銀河系内の超新星残骸やパルサー風星雲、銀河系外の活動銀河核などと考えられていますが、加速するメカニズムには未解明な点があり、その1つが生成現場における磁場の強度と方向です。そこで本研究では、偏光観測によりパルサー風星雲「かに星雲」における磁場情報を調べました。

「かに星雲」は藤原定家が『明月記』の中で、西暦1054年に急に明るく輝く天体が出現した、と紹介している超新星爆発がもとになって形成されました。超新星爆発の際に、中心にパルサー（中性子星とも呼ばれ、高速に回転する半径10 kmほどの高密度星）が形成され、このパルサーが現在も1秒間に約30回転もの高速で自転して周囲に莫大な運動エネルギーを撒き散らしています。このエネルギーで加速された高エネルギー粒子によって、パルサー周辺に数光年スケールの星雲を形成しているため、パルサー風星雲と呼ばれてい

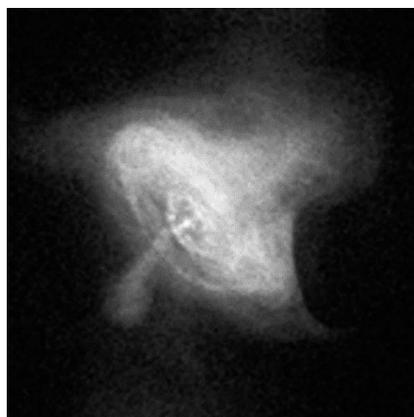


図3 パルサー風星雲「かに星雲」のX線画像。中心のパルサー（中性子星）が高速回転しており、周囲に高エネルギー粒子を撒き散らしています。また右上と左下に、細く絞られたジェット構造を持っています。

ます（図3）。

「かに星雲」から放射されているX線や硬X線は、どちらも高エネルギー粒子（電子、陽電子）が磁場に巻き付いて放射している（シンクロトロン放射）と考えられています。この際に、天体の中で磁場の向きが揃って整列していれば偏光度は高い値となり、逆に磁場の向きが色々な方向に乱れているとお互いの偏光をキャンセルし合い低い偏光度となります。こうして、偏光度の高低から天体における磁場の整列具合が観測できます。

観測結果

PoGO+で得られた観測結果は、硬X線の偏光度が約20%とある程度の高い値でした（図4）^{10),11)}。きれいに整列した磁場からは70%もの高い偏光度が予想されることから、このPoGO+の結果は、「かに星雲」の磁場の方向がある程度は揃っているが乱れていることを示します。この「程度」がどれくらいであるかは、数値計算など他の研究との定量的な比較が必要で、今後の研究対象です。

続いて我々は、この硬X線の偏光情報を1桁エネルギーの低いX線帯域で得られたもの（40年前にOSO-8衛星により一度だけ観測¹⁾）と比較しま

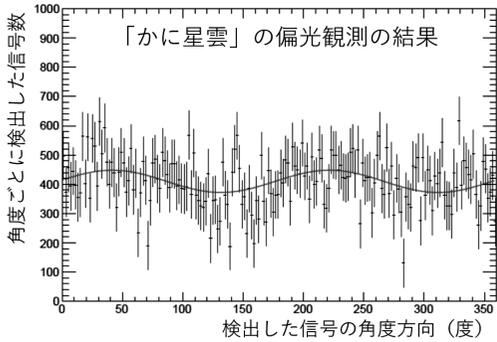


図4 PoGO+によって検出された「かに星雲」の硬X線偏光の情報。偏光計内でコンプトン散乱した際の角度をヒストグラムに詰めています。平坦ではないことから、「かに星雲」が約20%偏光しており、偏光角はジェットとほぼ平行であることが分かりました¹⁰⁾。

した。この結果は、両者の偏光度と偏光方位角はほぼ一致していることを示していました。これは、X線と硬X線が放射されたそれぞれの場所で、磁場の整列具合は同程度であることを示しています。

X線と硬X線は、どちらも高エネルギー電子と陽電子によるシンクロトロン放射に起因します。ただし、放射する高エネルギー粒子のエネルギーは硬X線の方が4倍高く50兆電子ボルト、逆に、寿命（粒子がシンクロトロン放射を出し続け、エネルギーを失うまでの時間）は1/4短く3年弱と見積もられています。この寿命ではパルサー近傍で加速された高エネルギー粒子は、光速の0.5倍の速度で移動してもパルサー風星雲の端まで到達することができず、硬X線はパルサー風星雲のより中心に近い場所だけから放射されています。一方でX線を放射する高エネルギー粒子の方は寿命が長いので、パルサー風星雲に広く行き渡ることになり、天体全体から放射されています（これはX線の観測イメージから明らかになっていました¹²⁾）。このため今回の偏光観測の結果により、パルサーから遠ざかっても磁場の向きの乱れ具合は変化しない（さらに乱れる訳ではない）ことが分かりました。

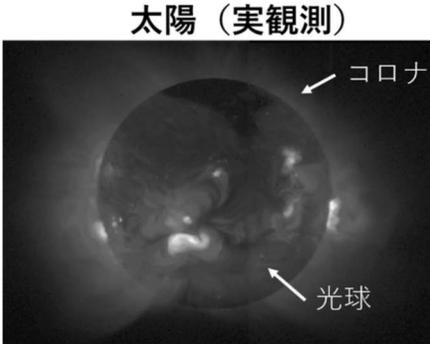
今回のPoGO+と同等の「かに星雲」の偏光観測の結果はAstroSat衛星でもPoGO+と同時期に報告され¹³⁾、また「ひとみ」衛星の軟ガンマ線検出器でも最近に報告が出ています¹⁴⁾。AstroSat衛星では天体信号がノイズの5%レベルと低いものの計9日以上長時間観測を実施し、約33%の偏光度を報告しています。AstroSatの観測帯域は100-380 keVとPoGO+よりも高く、またPoGO+の観測値よりも高い偏光度となっていることから、高エネルギーになると偏光度（磁場の整列具合）が高い可能性が示唆されます。「ひとみ」衛星では「かに星雲」を2.4時間しか観測していませんが、優れたバックグラウンド除去と偏光検出の能力により、PoGO+と同程度の約22%の偏光度を60-160 keV観測帯域で報告しています。

これまではX線やガンマ線の偏光データがほとんどなかったことから、偏光研究は手つかずの状況です。今後は、2021年打ち上げ予定のX線偏光観測衛星IXPE¹⁵⁾の観測結果や理論研究から、磁場構造などのパルサー風星雲の描像が明らかになり、どのように高エネルギー宇宙線が加速されているのかについて理解が進むと期待されます。

3.2 ブラックホール連星「はくちょう座X-1」

PoGO+では、「かに星雲」に加えブラックホール連星系「はくちょう座X-1」の観測を実施しています¹⁶⁾。この天体は、太陽の15倍の質量のブラックホールに伴星である恒星から物質が降着して（降り積もって）います。ブラックホールに吸い込まれる直前の物質は、強い重力と物質間の摩擦によって非常に高温に熱せられ（約1,000万度）、X線や硬X線で明るく輝いています。そのため、X線観測によってブラックホール近傍での降着物質（降着円盤とコロナ、図5）の物理状態を明らかにすることができれば、中心に存在するブラックホール自身の物理量や、強い重力場における一般・特殊相対論的な効果も観測することができるかと期待されています。

しかし、これまでの時間変動（測光）やエネル



(宇宙科学研究所より)

ブラックホール連星系 (想像図)



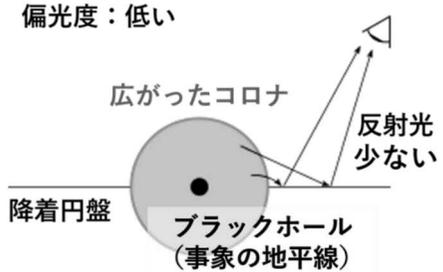
(ESAより)

図5 ブラックホール連星系の降着物質（降着円盤とコロナ）の想像図。太陽と同様に高温なコロナが存在すると考えられていますが、ブラックホール近傍でどのような幾何構造になっているのか長年議論が続いています。

ギー（分光）の観測だけでは、降着物質がどのような状態にあるのか2つのモデルが30年以上にわたって議論が平行線をたどっていました（天体が遠方にあるため撮像では「点」にしか見えず、撮像観測からは構造は調べることができません）。これは観測される硬X線放射のうち、コロナから放射されて直接に観測される成分（直接光）と降着円盤で反射・散乱されてから観測される成分（反射光）の割合が、情報量が足りずに分離できなかったためです。

ブラックホールの降着物質の2モデル（図6）では、物質がブラックホールのどこまでの近傍まで安定にとどまっているのかが異なります。1つ目

「広がったコロナ」モデル



「コンパクトなコロナ」モデル



図6 ブラックホール近傍のコロナの幾何構造についての2モデル。相対論的な効果の影響が異なるため、異なる偏光度が予想されます。

のモデルは、コロナはブラックホール近傍だけでなく広がって存在している「広がったコロナ」モデルで^{17),18)}、もう一方のモデルは、物質はブラックホールのごく近傍にだけコンパクトな構造で存在している「コンパクトなコロナ」モデルです^{19),20)}。後者の「コンパクトなコロナ」モデルではブラックホール近傍で強い重力の影響を受け、コロナからの光が曲げられてより多く降着円盤へ向かうため、反射光の割合が非常に高いと予想しています。

そのため偏光観測から、反射光が少なく直接光の割合が多い（偏光度が低い）のか、直接光が少なく反射光の割合が多い（偏光度が高い）のかという独立な情報が得られれば、2モデルのどちらが物理的に正しいのかを決着できると期待されていました。

観測結果の解釈

今回 PoGO+ で偏光観測を実施した際に、「は

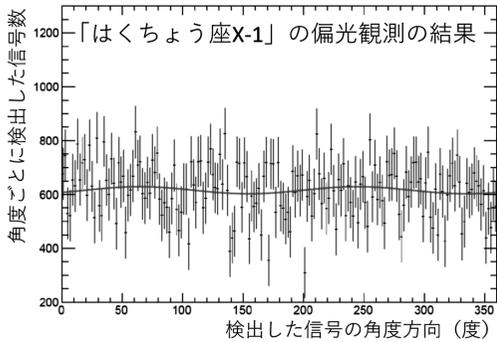


図7 PoGO+によって検出された「はくちょう座X-1」の硬X線偏光の情報。図4の「かに星雲」の結果に比べ、ほぼ平坦なため、偏光度は8.6%以下であることが分かりました¹⁶⁾。

くちょう座X-1」はlow/hard状態と呼ばれる、質量降着率が低く硬X線で明るい状態でした。硬X線は、X線ほど吸収されませんが、ガンマ線ほどは透過力が強くないため、反射や散乱の影響を調べるのに最適なエネルギー帯域です。PoGO+の観測結果から、「はくちょう座X-1」の硬X線偏光は微弱（8.6%以下）であることが分かりました（図7）。

偏光度は、数値計算により「広がったコロナ」モデルでは数%²¹⁾、「コンパクトなコロナ」モデルでは15%²²⁾にも達すると予想されていました。そのため今回のPoGO+の測定によって、ブラックホールからの相対論的な効果を強く受ける「コンパクトなコロナ」モデルは棄却され、偏光度が低い「広がったコロナ」モデルが支持されることが明らかになりました。この結果は、従来の時間変動やエネルギーの測定では得られなかった偏光という独立な観測量が高エネルギー帯域で得られたことによる世界初の成果です。

今後は、様々な質量のブラックホール（今回のような太陽質量の数倍から、銀河の中心に存在する100億倍もの超巨大サイズ）も高エネルギー偏光観測することで、独立な物理量から、ブラックホールに吸い込まれつつある物質が重力の影響をどのように受けているかが明らかにされ、中心に

存在するブラックホールの特性（自転速度）やブラックホールが及ぼす相対論的な効果（時空のゆがみ）などの理解が進むと期待されます。

4. 大気球を利用した実験

本研究では、直径100 mにも膨らむ大気球にPoGO+偏光計を搭載し、2011-2016年の3回にわたってスウェーデンから放球しました。人工衛星に比べ気球実験は、開発の時間スケールが短いため新規探索のサイエンスに向いている、最先端の技術を利用できる、回収後に改良を加えられるという利点があります。PoGO+実験ではまさにこれらのメリットを活かし、2016年の3回目のフライトで、硬X線の帯域において世界で初めて信頼性の高い偏光情報を得ることに成功しました。

4.1 大気球による成層圏からの観測

天体からのX線やガンマ線は地球の大気で吸収されてしまうため、本研究では直径100 mにも膨らむヘリウム気球で上空40 kmの成層圏まで大型検出器を持ち上げ、観測を実施しています。この高度であれば、20 keV以上の硬X線は大気に吸収されずに観測可能です。PoGO+の気球ゴンドラは総重量2トン、横幅は約10 mあり、これはX線衛星「ひとみ」とほぼ同じスケールです。今回の科学的な成果が得られたPoGO+の3回目のフライトは、2016年7月12日から18日までの1週間に行われました（図8）。打ち上げ場のスウェーデン・キルナ市にあるEsrange気球実験場からカナダのビクトリア島までフライトし、研究対象である「かに星雲」と「はくちょう座X-1」を毎日それぞれ4時間、6時間ずつ観測しました。この結果、総観測時間は「かに星雲」が25時間、「はくちょう座X-1」が34時間も取得することができました。この1週間で北極圏を約1/3周しており、気球の速度は約30 km/hでした。打ち上げからパラシュートで着陸するまでの動画を公開しているので、是非ご覧ください²³⁾。

人工衛星として打ち上げることができれば、よ

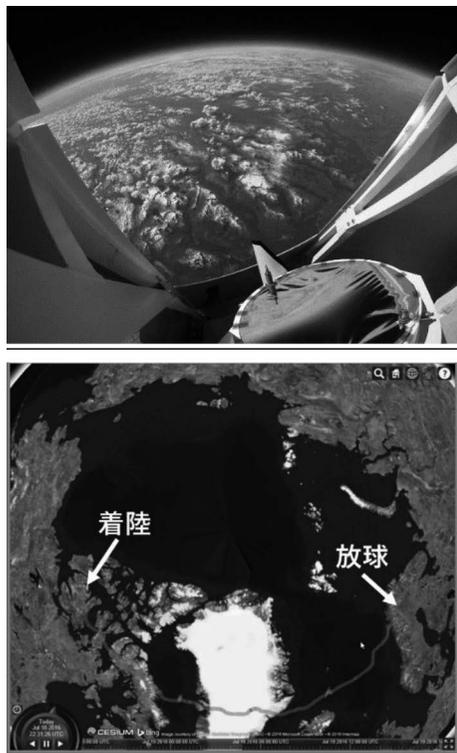


図8 (上) PoGO+気球に搭載したカメラで、上空40 kmの成層圏から見た地球。スウェーデン宇宙公社より。(下) 2016年7月12日~18日のPoGO+フライトの軌跡。スウェーデンのキルナ市から放球し、カナダのビクトリア島に着陸しました。

り長い観測時間を得ることができますが、各コンポーネントにより高い信頼性・確実性が求められるため、世界初を目指す偏光観測のような野心的な検出器を載せるのは難しく、また開発期間も長くなってしまいます。PoGO+は偏光観測に特化した気球実験として開発したことで、複数回のフライトを重ねることで検出器の性能を向上させ、最先端技術を利用しつつ、総重量2トンもの大型の検出器で観測することができました。この結果が、低コストでありながら、他の人工衛星のミッションに先駆けて信頼性の高い硬X線の偏光観測へと実を結びました。

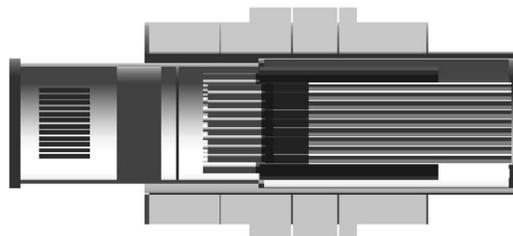


図9 PoGO+偏光計の全体図。全幅で約1 m。右から硬X線が入射し、中央部の主検出部でコンプトン散乱と光電吸収を起こします。周囲の大きな構造は、大量に降り注ぐバックグラウンドを除去するためのコリメータやシールドです。系統誤差を低減するために、この偏光計全体が回転しながら観測を行っています。

4.2 PoGO+偏光計の特徴

PoGO+気球実験では上述のような科学的な成果を得ることができました。この実現には、偏光計の2つの機能が大きな役割を果たしています。1つがバックグラウンドの低減、もう1つが系統誤差の低減です。

そもそも天体からの硬X線は微弱(数イベント/秒)で、宇宙線バックグラウンドが約1,000倍も大量に降り注ぐ中で検出しなければなりません。そのため、PoGO+では天体方向の約2°を除いて、他の方向はすべてシールドで覆っています(図9)。これはX線衛星「すざく」で培われ「ひとみ」でも利用された日本の知見です。中心部に61本に分割された30 cmサイズの偏光計の検出部があり、ここでコンプトン散乱と光電吸収が同時に起こった偏光イベントを検出します。その周りには、宇宙線に含まれる荷電粒子やガンマ線バックグラウンドと反応してノイズを除去するシールド、視野を狭めるコリメータ、さらには宇宙線の中性子バックグラウンドを減衰させるシールドも配置しています。こうして天体信号とバックグラウンドの比を最終的に1:7まで向上させることができました^{10),16)}。

硬X線の偏光観測では、コンプトン散乱した光子がどちらの方向に飛びやすい(飛びにくい)か

を計測しています。しかし、完全に理想的な検出器を作ることは不可能なため、どうしても測定結果には異方性が生じてしまいます。PoGO+では、この疑似的な偏光をキャンセルするために、偏光計全体を6分間で1回転（毎秒1°）の速度で回転させました。これにより、無偏光の入射光について測定した疑似的な偏光度を0.1%以下に抑えることに成功しました⁵⁾。

こうしてバックグラウンドと系統誤差が低減できたことで、最終的に信頼性の高い観測結果をやって得ることができた訳です。

PoGO+チームでは、北天での明るい天体の観測が完了したため、次はアメリカとの国際共同研究により、南極からX-Calibur（エクスカリバー）気球実験を実施する計画です（研究代表者：Henric Krawczynski, アメリカ・ワシントン大学）。X-Caliburでは、天体からの信号を硬X線望遠鏡で集光することにより、小型の偏光計で低バックグラウンド環境を実現し、質量降着型X線パルサーの偏光観測を目指しています²⁴⁾。最初のフライトを2018年12月に計画しており、この記事もフライト間近の南極から送っています。将来は日本の大型の硬X線望遠鏡を搭載することなどで、さらに高感度な偏光観測により活動銀河核など新しい種族の物理を探っていくことを目指していきます。

参考文献

- 1) Long, K. S., et al., 1980, ApJ, 238, 710
- 2) Yonetoku, D., et al., 2011, PASJ, 63, 625
- 3) Laurent, P., et al., 2011, Science, 332, 438
- 4) Jourdain, E., et al., 2012, ApJ, 761, 27
- 5) Chauvin, M., et al., 2017, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 859, 125
- 6) Friis, M., et al., 2018, Galaxies, 6, 30
- 7) Kamae, T., et al., 2008, Astroparticle Physics, 30, 72
- 8) Mizuno, T., et al., 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 600, 609
- 9) Takahashi, H., et al., 2010, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 8, Pm1
- 10) Chauvin, M., et al., 2017, Scientific reports, 7, 7816
- 11) Chauvin, M., et al., 2018, MNRAS, 477, L45

- 12) Weisskopf, M. C., et al., 2000, ApJ, 536, L81
- 13) Vadawale, S. V., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 50
- 14) Hitomi collaboration, 2018, PASJ, 70, 113
- 15) O'Dell, S. L., et al., 2018, Proc SPIE, 106991X
- 16) Chauvin, M., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 652
- 17) Frontera, F., et al., 2003, ApJ, 592, 1110
- 18) Makishima, K., et al., 2008, PASJ, 60, 585
- 19) Miniutti, G., & Fabian, A. C., 2004, MNRAS, 349, 1435
- 20) Fabian, A. C., et al., 2012, MNRAS, 424, 217
- 21) Schnittman, J. D., & Krolik, J. H., 2010, ApJ, 712, 908
- 22) Dovciak, M., et al., 2011, ApJ, 731, 75
- 23) <https://www.youtube.com/watch?v=0oxd9-Wl-Qg> (2019/04/25)
- 24) Kislak, F., et al. 2018, JATIS, 4, 011004

Hard X-ray polarimetric observations of Crab Nebula and Cygnus X-1 with PoGO+ balloon-borne experiment

Hiromitsu TAKAHASHI

Department of Physical Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan

Abstract: Polarimetry is complementary with imaging, photometry and spectroscopy, and can measure independent physical parameters. PoGO+ is the balloon-borne hard X-ray polarimeter developed by the international collaboration between Japan and Sweden. In 2016, it observed the pulsar-wind nebula, Crab Nebula, and the black-hole binary, Cygnus X-1, from the altitude of 40 km. In this article, we report PoGO+ observational results and the balloon experiment. There have been a few polarimetric observations in X-ray and gamma-ray, and the high-energy polarimetric research is a new field. In the near future, more sensitive observations are scheduled and the researches in this area are expected to proceed dramatically.