

硬 X 線偏光度検出器 PHENEX によるカニ星雲の偏光観測

山形大理: 郡司修一、佐々木大悟、星野利典、藤田直樹、門叶冬樹、櫻井敬久

阪大理: 林田清、穴吹直久、常深博

ISAS/JAXA: 斎藤芳隆

理化学研究所: 三原建弘

KEK: 岸本祐二

1 はじめに

軟 X 線や硬 X 線天文学は、エネルギー、時間、イメージの 3 つ情報を精度良く測定する事で大きく発展してきた。一方偏光の観測は感度の高い検出器を製作する事が難しいため、今までほとんど行われてこなかった。しかし、近年の検出器技術の大きな進歩によってその状況が大きく変化し、高精度の偏光度検出器の開発に道が開けるようになった。2010 年には IKAROS に搭載されたガンマ線バースト偏光検出器 GAP がガンマ線バーストの偏光を検出し、そのエネルギー発生メカニズムに大きな知見を与えた。また数年後には X 線の偏光測定を行うための GEMS が SMEX によって打ち上げられる予定である。そして近年ではガンマ線バーストの偏光を精度良く測定する事で量子重力理論に実験的な制限を付けることができるという事も分かってきた。そのため偏光観測は単なる天体物理を行うための一手段としてではなく、宇宙論やひいては素粒子物理学の研究に大きく役立つことが分かってきた。我々は硬 X 線領域でこのような偏光観測に先鞭を付けるために PHENEX(Polarimetry for High ENergy Xrays) プロジェクトを 2006 年から推進してきた。2006 年には有効面積が 43.6cm^2 と小さな検出器ではあったが、カニ星雲の偏光観測を行い、 $50\text{keV}\sim 150\text{keV}$ のエネルギー領域で、偏光方向が $154\pm 43^\circ$ という結果を得た。一方 2008 年には INTEGRAL 衛星が $0.1\text{MeV}\sim 1\text{MeV}$ の領域でカニ星雲の偏光を測定し、 $123\pm 11^\circ$ という結果を発表している。しかしこれは以前の X 線領域 (5.2keV) での $152.6\pm 4.0^\circ$ という観測結果と大きく異なっていた。単に X 線とガンマ線で放射領域が異なるという事で解釈する事もできるが、まだはっきりした結論が出ていない。現時点では、X 線とガンマ線の間領域での偏光観測が非常に重要である。そこで我々は検出器の有効面積を 2 倍にして、再びカニ星雲の偏光観測を行うことを計画している。2006 年のデータと合わせて、より偏光方向の決定精度を上げ、硬 X 線領域での偏光方向を調べる事を計画している。本プロシーディングスでは、2012 年のカニ星雲の偏光観測についての準備状況を説明する。

2 PHENEX 検出器

PHENEX はコンプトン散乱の原理を利用した散乱型の偏光度検出器であり、ユニットカウンターと呼ばれる検出器を並べる事で構成されている。図 1 の左図にユニットカウンターの概略図を示す。ユニットカウンターは、36 本のプラスチックシンチレーターと、それを取り囲むような 28 本の CsI(Tl) シンチレーターで構成されており、それらが 64 チャンネルマルチアノード PMT(H8500) の上に置かれている。また CsI(Tl) の上面と側面には鉛とスズでできたシールドが置かれており、プラスチックシンチレーターの上には、モリブデンでできたコリメーターが

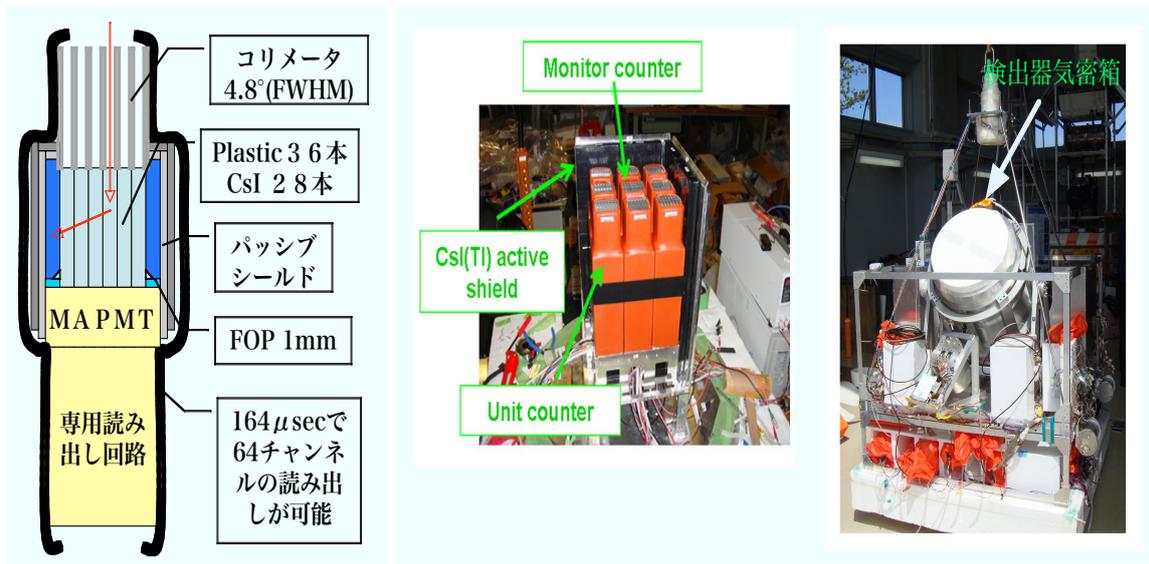


図 1: 左がユニットカウンターの概略図。真ん中が PHENEX 検出器本体の組み立て中の写真。右図が PHENEX 検出器を気密箱に入れてゴンドラに取り付けた図。

設置されており、開口角を 4.8 度 (FWHM) に制限している。硬 X 線がいずれかのプラスチックシンチレーターに入射すると、硬 X 線は散乱される。散乱された硬 X 線は、周りのいずれかの CsI(Tl) シンチレーターに吸収される。エネルギーデポジットがあったプラスチックシンチレーターと CsI(Tl) シンチレーターの位置を同定すれば、硬 X 線の散乱方向を知ることができる。硬 X 線の散乱される方向は、入射硬 X 線の偏光方向に依存しているため、この散乱方向の情報を取得することで、入射硬 X 線の偏光情報を得ることができる。検出器が偏光をどの程度精度良く測定できるかは、モジュレーションファクターと呼ばれるパラメーターで評価される。地上でのビーム実験から、80keV に対して、ユニットカウンターは 53% のモジュレーションファクターを持ち、かつ 20% の検出効率を持つということが確認できた。このモジュレーションファクターは天体観測用の偏光度検出器としては世界最高レベルの値である。

2006 年の実験では我々は 4 台のユニットカウンタを搭載して実験を行ったが、2009 年には検出器の有効面積を 2 倍に拡大するために、8 台のユニットカウンタを製作し、検出器に搭載している。これが図 1 の中央の写真に示されている。この写真にはユニットカウンター 8 台とモニターカウンターという検出器 (カニ星雲の方向を検出器が正しく向いているかを調べるためのフラックスモニター) と、CsI のアクティブシールドが写っている。右の写真は、組み上がった検出器を円筒状の気密箱に入れて、それをゴンドラに取り付けた写真である。

3 方向制御の問題点と対策

現在最も問題となっているのが、検出器のアジマス方向の制御である。我々は 2006 年に実験を行っているが、6 時間のレベルフライト中制御が行えた時間は 2 時間程度であった。後の解析から、リアクションホイールの不感帯が原因である事が分かり、それに対する対処を行い、2009 年に再度気球実験を行った。しかし、その実験でも方向制御が正しく行われなかった。その時の原因は予想したよりも吊り紐が上空で固くなり、リアクションホイールのパワーが足りなくなってしまったためである。そこで、我々はリアクションホイールの慣性モーメントを 2 倍に増やし、

さらに制御のレートを 1Hz から 16Hz に上げたシステムを開発した。そして、2011 年に神戸大学の青木先生が PI として行われた気球実験に、我々の制御システムを相乗りさせてもらい、制御の実験を行った。この実験では天体を追尾するという事は行わず、検出器を指定した方向に向け続けるという事を行った。実際のゴンドラのアジムス方向の角度が図 2 に示されている。図 2 の横軸は時間 (sec) であり、縦軸が目標方向とゴンドラの方の差である。制御が正常にかかっていたら、グラフが 0 度付近で一定になる。我々はこの図で 2000~3000sec の時間帯で方向制御の実験を行った。図から分かるとおり、多少のオフセットが覆いてはいるものの約 1 度以下の精度で制御が成功している事が分かる。この実験により、方向制御の問題がほぼクリアできたとい

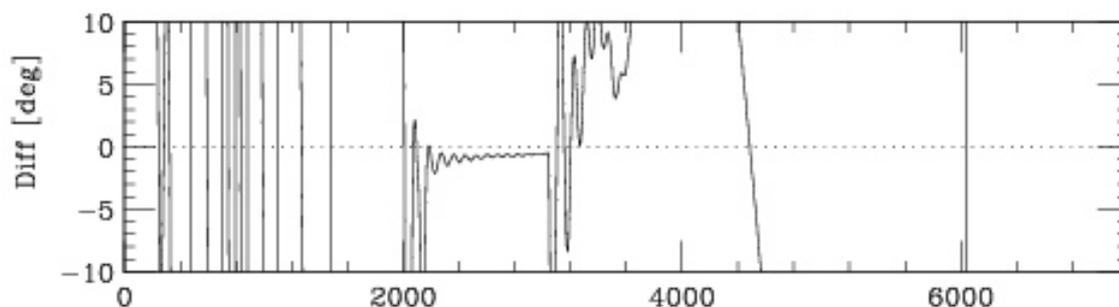


図 2: 横軸が時間、縦軸が目標方向とゴンドラの方の差を取ったグラフ。制御を行っていた 2000~ 3000sec の間で、ゴンドラが 1 度以下の精度で目標方向を向いていた事が分かる。

う事が分かったので、我々は 2012 年に再び PHENEX による観測を再開する準備が整った。

4 Feasibility

2012 年に実験を行った場合、どの程度の成果が得られるのかを見積もってみた。その見積もりには通常 MDP (Minimum Detectable Polarization) というパラメーターが使われる。MDP の定義は以下の通りである。

$$MDP = \frac{429}{A\eta SM} \sqrt{\frac{A\eta S + B}{T}} \quad (1)$$

- A : 検出器の面積 (cm^2)
- η : 検出効率
- M : モジュレーションファクター
- S : カニ星雲からの信号のレート ($counts/cm^2/sec$)
- B : バックグラウンドレート ($counts/sec$)
- T : 観測時間

ここで、 A, η, M はそれぞれ $88cm^2, 0.2, 0.53$ を代入する。また信号のレートは大気での硬 X 線の減衰、方向制御の不定性によりアクセプタンスが 80% になる事を考慮して、 $0.056counts/cm^2/sec$ という値を使用した。またバックグラウンドに関しては、今までの実験から考えて信号の 2 倍以上になる事はないと考えて、 $0.112counts/cm^2/sec$ という値を使用した。また観測時間に関しては、3 時間のレベルフライトを仮定し、さらに方向制御が安定するまでに 30 分時間がかかったと考え、さらにデータ収集系の効率が 60% である事を考慮して 5400 秒とした。これらの値を代

入して計算したところ、MDP はおよそ 20%弱であった。PHENEX の 2006 年度の結果ではカニ星雲の偏光度は 33%程度であり、INTEGRAL ではさらに高い結果が出ているので、99%のコンフィデンスレベルで偏光の検出が行えると考えられる。このデータを 2006 年のデータと合わせれば、現在 43 度程度ある誤差を 30 度程度に抑える事ができると思われる。

5 今後の予定

現在実験を行うためにユニットカウンターのチューンアップを進めている。特に時間が経つと MAPMT と結晶の間に塗っていたオプティカルグリースが乾いてしまうので、この塗り直しやゲインの微調整が主な作業となっている。またデータ収集系のデッドタイムを減らすための努力も現在行っており、現在 40%程度のデッドタイムを 20%程度まで減らせるように頑張っている。また今まで複雑だった電源系をシンプルにして集中電源装置を採用する様にしており、その製作も終わり、単体での熱真空試験も行った。年内には再び検出器を組み上げて、気密箱に入れ、来年からは総合的な試験を行えるようにする予定である。

また大樹町の場合、現時点では 3 時間以上のレベルフライトを達成する事はかなり難しいと考えられる。そのため、海外で気球実験を行える機会を、現在調査をしている。まずカニ星雲が観測しやすいアメリカでの放球を考え、偏光に興味を持っている NASA の研究者にコンタクトしてみた。しかし、残念ながらすぐにはアメリカでの放球ができる見通しは現時点では立っていない。今後も幾つかのチャンネルを当たってみる予定である。