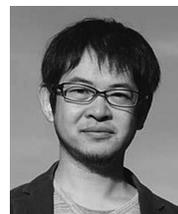


# 「かに星雲」の軟ガンマ線偏光観測

小高裕和

〈東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

e-mail: odaka@juno.phys.s.u-tokyo.ac.jp



X線より高いエネルギーの偏光観測は依然として技術的フロンティアに位置づけられている。「ひとみ」衛星が最後に見た天体である「かに星雲」は、ミッション初期における軟ガンマ線検出器(SGD)の最重要ターゲットであり、パルサー風星雲の中の高エネルギー電子がシンクロトロン放射で輝くため高い偏光度が期待できる。詳細な解析の末、かに星雲からの軟ガンマ線(60-160 keV)が約20%偏光していること、偏光角がパルサー自転軸とほぼ揃っていることがわかった。いよいよX線・ガンマ線偏光観測の幕が開けようとしている。

## 1. はじめに

光子(電磁波)の状態は伝播方向を定めるとエネルギーと偏光で完全に指定されることから、偏光の測定は分光計測とともに電磁波による観測手段として不可欠な要素であると言える。しかし、電波や可視光の偏波・偏光のデータに普段から接しておられる方々からすれば意外かもしれないが、X線よりも高いエネルギー域での偏光測定というのは一般的ではなく、それどころか依然として技術的フロンティアに位置づけられている。

偏光測定が難しい理由のひとつは、天体観測に適した実用的な偏光子が存在しないためである。偏光子というのは偏光選択能力のあるデバイスであり、偏光板はその一例である。では、軟ガンマ線(ここでは100 keVくらいと思ってよい)ではどうするのか? このエネルギー域で現実的なのはコンプトン偏光計である。これは検出器の中で起きる入射光子のコンプトン散乱を測定し、その偏光に対する依存性を利用する。「ひとみ」衛星(ASTRO-H)の軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector, SGD)もコンプトン偏光計として機能するように設計された<sup>1)</sup>。SGDの装置の詳細に

については次号の渡辺氏の記事を参照されたい。

軟ガンマ線はブラックホールジェットなどで非常に高いエネルギーまで加速された粒子からの放射を見ることができる重要な帯域である。こうした非熱的放射は連続スペクトルを持ち、ラインなどの特徴的な構造がないため、偏光という新しい測定軸を加えることが放射過程やその環境を決定する鍵になるのである。ASTRO-Hサイエンスチームで議論したのは、SGDによる偏光測定を正確に実施し、批判に耐えうる結果を世に出すには、どうしたら良いかということだった。というのも、当時、軟ガンマ線偏光の天体観測例はきわめて限られており、結果の不定性も大きく、説得力に欠ける、強い自信が持てない、という状況だったのである。筆者としても、SGDの偏光測定能力自体には自信があったものの、世界で初めての測定結果に説得力を持たせるのは簡単ではないと思わざるを得なかった。

## 2. かに星雲の観測

ひとみ衛星の観測開始のあと、SGDは搭載観測機器として最後に立ち上げを行った。真っ先に見ることにしていたのが「かに星雲」である。X

線で非常に明るいため、もともと重要な較正対象天体であったが、特にサイエンス面で期待がなかったのが偏光測定である。かに星雲はパルサー風星雲内に存在する高エネルギー電子のシンクロトロン放射で輝き、高い偏光度が期待できる。先行研究も高い偏光度を示唆していた<sup>2)-5)</sup>。

我々は偏光観測の結果に説得力を持たせるために、十分すぎるほどのデータの質を確保するという戦略をとった。このキャリブレーション観測で、SGDの偏光測定性能を検証・確立し、自信を持って他の天体でのサイエンスに繋がりたいという考えからである。そのためコラボレーション内部の観測提案書では、詳しい系統誤差の評価も行うために、複数の衛星ロール角で観測を実施することで、合計100 ksという長い観測時間を要求した。

かに星雲の1回目の観測は、2016年3月25日の21時過ぎ(JST)から開始された。そのあと、いったん別の天体の観測に移るはずであったが、翌日には衛星との通信が途絶。予定していた2回目以降の観測の機会は失われてしまった。

### 3. データ解析とその結果

遺されたデータはきわめて貴重なものだ。総露光時間はわずか5 ks。計画の100 ksに対して達成できた観測時間が短すぎることは明白だったが、SGDの能力を考えるとそれでも偏光の情報が得られるのではないかと我々は期待した。しかし予断は禁物である。

ガンマ線偏光の解析というのは、様々なデータ解析の最終段階に位置するものである。つまり、個々の検出器が正しく機能しているかのチェックや8万個に及ぶ読み出しチャンネルの評価・ゲイン調整、シミュレーションモデルのチューニングといった縁の下の力持ちと言えるような要素が確立してから、はじめて科学的な意味をもつ。

そうした解析項目の一つひとつ積み重ねた末、かに星雲の偏光度は $22 \pm 11\%$ 、偏光角は $111 \pm 13$ 度と求まった(エラーは1シグマ相当)。この解析

結果の根拠になるコンプトン散乱の水平角分布を図1に示した。理論曲線とデータ点を比べると、確かに偏光に由来するサインカーブが見えていることがわかる。同時に、誤差は大きそうだということも見てとれる。

### 4. 解釈. X・ガンマ線偏光の新時代

表1において、本研究結果<sup>6)</sup>とこれまで報告された主要な観測結果<sup>4,5,7,8)</sup>を比較する。大きな不定性のため単独の結果からは強い主張がしづらいが、偏光角は120度くらいで、よく揃っていることがわかる。実はこれが星雲の中心にあるパルサーの回転軸とよく一致している。図2に示すように、X線撮像から得られたパルサー自転軸の天球面での角度は124度である<sup>9)</sup>。これが意味することは何だろうか。X線画像に見られるトーラス構造において純粋なトロイダル磁場があれば、シンクロトロン放射はトーラス軸の向きに約50%偏光する。現実には乱流磁場<sup>10)</sup>などの様々な効果で偏光度は下がるので、約20%の偏光度という観測結果は自然だと言えそうだ。

次に何を目指すべきか。まだまだ測定の誤差が大きすぎる。もう一度、表1を見るとSGDの観測時間5 ksは他の測定に比べて圧倒的に短いことがわかる。観測時間を十分確保できれば、誤差を

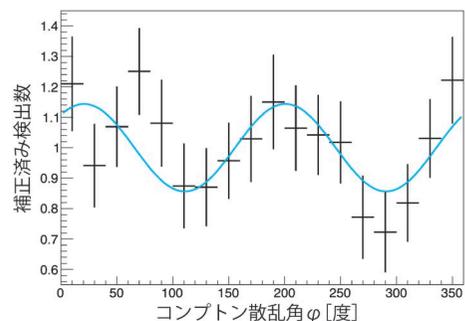


図1 SGDが捉えた検出器内のコンプトン散乱の水平角分布(検出器応答関数で補正済)。この分布から偏光のパラメータが決まる。実線はフィットされた理論曲線。

表1 かに星雲の軟ガンマ線偏光の主要な観測結果.

実験名	エネルギー (keV)	偏光角 (度)	偏光度 (%)	露光時間 (ks)	文献
Hitomi/SGD	60-160	111±13	22±11	5	本研究 (6)
PoGO+	20-160	131.3±6.8	20.9±5.0	92	Chauvin et al. 2017 (7)
AstroSAT/CZTI	100-380	143.5±2.8	32.7±5.8	800	Vadawale et al. 2018 (8)
INTEGRAL/SPI	130-440	117±9	28±6	600	Chauvin et al. 2013 (5)
INTEGRAL/IBIS	200-800	110±11	47 (+19/-13)	1200	Forot et al 2008 (4)

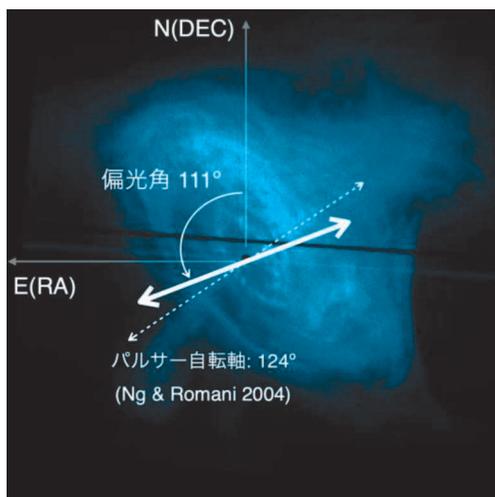


図2 かに星雲のX線イメージ (Chandra衛星) に今回得られた偏光角 (実線) の情報を重ねた. パルサーの自転軸 (破線) と偏光角がエラーの範囲で一致している.

数%まで小さくする余地がある. そうすると, 星雲の放射とパルサー本体の成分を切り分けたい, 空間分解したい, エネルギー依存性を見たいといった欲がでてくる. こうしたことも遠くない将来実現するはずだ. 2021年にはNASAのIXPEが軟X線 (2-8 keV) での撮像偏光観測を初めて実現する予定である. 高エネルギーでの偏光観測という新しい窓が開こうとしている.

謝辞

本稿の科学的内容は, 2018年に渡辺伸氏, 内田悠介氏らが中心となり, ひとみコラボレーションとしてまとめた論文にもとづいている. 詳しくはそちらをご覧ください. ASTRO-H衛星の

開発・運用, SGDの開発・運用やデータ解析に携わった全ての方に厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) Tajima, H., et al., 2018, JATIS, 4, 021411
- 2) Weisskopf, M. C., et al., 1978, ApJL, 220, L117
- 3) Dean, A. J., et al., 2008, Science, 321, 1183
- 4) Forot, M., et al., 2008, ApJ, 688, L29
- 5) Chauvin, M., et al., 2013, ApJ, 769, 137
- 6) Hitomi Collaboration, PASJ, 70, 113
- 7) Chauvin, M., et al., 2017, Sci. Rep., 7, 7816
- 8) Vadawale, S. V., et al., 2018, Nature Astron., 2, 55
- 9) Ng, C.-Y. & Romani, R. W., 2004, ApJ, 601, 479
- 10) Shibata, S., et al., 2003, MNRAS, 346, 841

Soft gamma-ray polarization of the Crab Nebula

Hirokazu ODAKA

The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Polarimetry in X-rays or higher energies has still been technically limited. The Crab Nebula, the last target of Hitomi, was the most important target of the Soft Gamma-ray Detector, and was expected to have a high degree of polarization because of synchrotron radiation by high energy electrons inside the pulsar wind nebula. Based on detailed analysis, we find that soft gamma-ray emission (60-160 keV) from the Crab Nebula is about 20% polarized with a polarization angle well aligned with the pulsar spin axis. The window of X-ray and gamma-ray polarimetry is getting opened.