

電子飛跡検出型コンプトンカメラによる偏光観測

吉川 慶 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

高エネルギー天体では偏光を生成するプロセスが多数存在する。数百 keV から数十 MeV のガンマ線では、超新星残骸の磁場構造、ガンマ線バーストの放射機構、降着円盤や分子雲トーラスの幾何構造といった情報が偏光を検出することで分かる。しかし、MeV ガンマ線では宇宙線との相互作用により多量のガンマ線・中性子・荷電粒子を生じ、高雑音環境になってしまうため検出が難しい。また、MeV ガンマ線ではコンプトン散乱が優位に起こるのだが、従来の撮像技術では散乱ガンマ線の方向、エネルギー、反跳電子のエネルギーを測定し、反跳電子の方向が測定できていない。そのため入射ガンマ線を再構成することができず、撮像精度が悪い。現在、強力な雑音除去能力および高精度な撮像能力を持つ偏光検出器が必要とされている。そこで、次世代の MeV ガンマ線偏光検出器として電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を行っている。シンチレーション検出器により散乱ガンマ線のエネルギーと吸収位置を検出し、ガス飛跡検出器により反跳電子のエネルギーと三次元飛跡を検出する。電子飛跡を見ることで、入射ガンマ線の再構成ことができ、偏光と撮像を同時に行える世界初の検出器となる。偏光観測の性能評価をするために SPring-8 BL08W で偏光観測能力実証実験を行った。182keV 直線偏光ビームを 10 mm 厚のアルミ板に照射し、その 90° 散乱光を測定した。検出器全体を方位角方向に回転させることで、入射ガンマ線の偏光方向を変えて、方位角依存性を見た。この実験より性能指標であるモジュレーションファクターが $\sim 0.6@130\text{keV}$ という高い値を得られた。偏向角の検出も誤差の範囲内で、設定した方位角と一致した。今後は、撮像を活かした偏光測定実験、より偏光検出に適したジオメトリの考案をして電子飛跡検出型コンプトンカメラを改良していく。そして、気球や衛星に搭載し、未知の高エネルギー現象の解明を目指す。

1 はじめに

光子から情報を得る手段は 4 つある。角度分布を得るための撮像、スペクトルを得るための分光、強度の時間変動を得るための測光、そして、磁場構造と幾何構造を得るための偏光検出である。磁場中を電子が運動していると、ローレンツ力によって加速度を受けて、磁力線に巻き付いた形で螺旋運動をすることになる。このときにシンクロトロン放射が起こる。偏光度 Π は一般に式 (1) のように書くことができ、シンクロトロン放射での偏光度は式 (2) のようになる。

$$\Pi = \frac{P_{\perp} - P_{\parallel}}{P_{\perp} + P_{\parallel}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_x^{\infty} K_{\frac{5}{3}}(\xi) d\xi}{K_{\frac{2}{3}}(x)} \quad (2)$$

ここで、単位立体角あたり単位周波数あたりの放射パワーの、磁場に垂直な成分を P_{\perp} 、平行な成分を P_{\parallel} とし、 $K_{\frac{5}{3}}$ 、 $K_{\frac{2}{3}}$ は修正ベッセル関数、 x は周波数は無次元した量である。電子のエネルギー分布が冪関数として仮定すると、指数が 2 のとき 69%、3 のとき 75% と高い偏光度を示す。[1] 超新星残骸からの非熱的放射はシンクロトロン放射と考えられているが、実際に電子がどのように加速されているのかは、はっきり分かっていない。偏光を検出した場合、磁場の向きを知ることができ、加速過程の解明のための重要な手がかりとなる。またガンマ線バーストの放射機構には確立したモデルはないが、偏光を検出することでシンクロトロン衝撃波モデルが正しいかどうか検証できる。

ブラックホールや中性子星、白色矮星といった高密度天体は、降着円盤や分子雲トーラスを形成する。図 1(b) のように中心天体からの光が降着円盤や分子

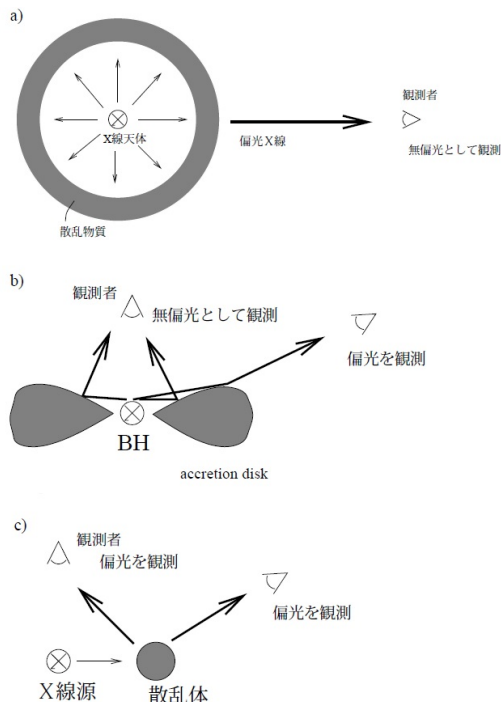


図 1: 天体からの散乱による偏光 [2]

雲トラスで散乱すると偏光が起こる。撮像では角度分解できないような微小な幾何構造も、偏光を検出することで理解することができる。

現在、電波、赤外、可視光では一般的に偏光検出が行われている。しかし、X線、ガンマ線では、技術的に偏光検出が難しく、定常天体で4例 [3][4][5][6]、ガンマ線バーストでは3例 [7][8] と観測結果が少ない。それには偏光検出が難しいだけでなく、X線、ガンマ線は検出そのものが難しいという理由がある。中でも数百 keV から上の MeV ガンマ線では、銀河面全体に広がったガンマ線放射や宇宙線と衛星筐体との相互作用により多量のガンマ線・中性子・荷電粒子を生じ、高雑音環境になってしまうため検出が難しいのである。また、MeV ガンマ線ではコンプトン散乱が優位に起こるのだが、従来の撮像技術では散乱ガンマ線の方向、エネルギー、反跳電子のエネルギーを測定し、反跳電子の方向が測定できていない。そのため入射ガンマ線を再構成することができず、撮像精度が悪い。今、強力な雑音除去能力およ

び高精度な撮像能力を持つ偏光検出器が必要とされている。

2 ETCC の観測原理

次世代の MeV ガンマ線偏光検出器として電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-tracking Compton camera, ETCC) の開発を行っている。MeV ガンマ線領域ではコンプトン散乱が優位に起こるので、それを再構成することで撮像が行える。散乱ガンマ線のエネルギーと方向ベクトルを E_γ 、 \vec{g} 、反跳電子のエネルギーと方向ベクトルを K_e 、 \vec{e} とする (図 2)。このとき入射ガンマ線のエネルギー E_0 と、到来方向 \vec{s} は式 (3)~(5) のように一意に表すことができる。

$$E_0 = E_\gamma + K_e \quad (3)$$

$$\vec{s} = (\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\tan\alpha})\vec{g} + \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}\vec{e} \quad (4)$$

$$= \frac{E_\gamma}{E_\gamma + K_e}\vec{g} + \frac{\sqrt{K_e(K_e + 2m_e c^2)}}{E_\gamma + K_e}\vec{e} \quad (5)$$

シンチレーション検出器で散乱ガンマ線のエネルギーと吸収位置を検出し、ガス飛跡検出器により反跳電子のエネルギーと三次元飛跡を検出する。従来と異なり、電子の反跳方向が分かるため、入射ガンマ線の再構成することができ、鮮明な画像が得られる。

偏光したガンマ線に対するコンプトン散乱の散乱断面積は式 (6) のようになる。方位角 ϕ がこの式に含まれているため、偏向情報を方位角分布から得られる。それが図 3 のモデレーションカーブである。偏光度 100% のガンマ線が入射してきた時のモデレーションカーブに対して式 (7) のように定義するモデレーションファクター M が偏光検出器の性能指標となる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2\sin^2\theta\cos^2\phi \right) \quad (6)$$

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (7)$$

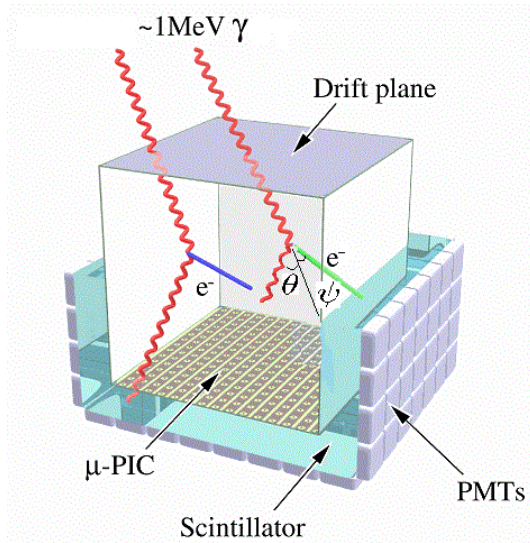


図 2: コンプトン散乱前後の変数の定義図 1

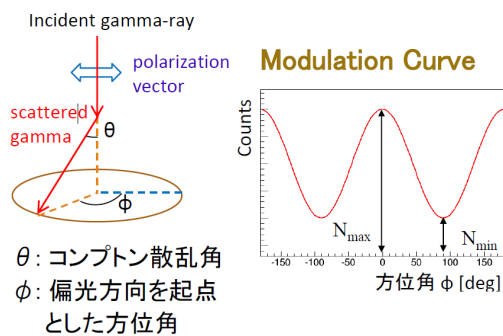


図 3: コンプトン散乱前後の変数の定義図 2

式 (8) のように ϵ を定義すると、式 (1)(6) より式 (7) と書くことができる。 $\phi = 90^\circ$ としたときの θ に対するモジュレーションファクター M の最大値をグラフにしたものが図 4 である。エネルギーが大きくなるにつれて M が下がっていているのが分かる。

3 偏光検出の性能評価のためのビーム実験

偏光検出の性能を評価するには、ETCC の観測エネルギー帯域 (百 keV ~ 1MeV) で直線偏光した X 線やガンマ線で、高い統計数が必要となる。そこでそれを満たすビームライン SPring-8 BL08W にて実験

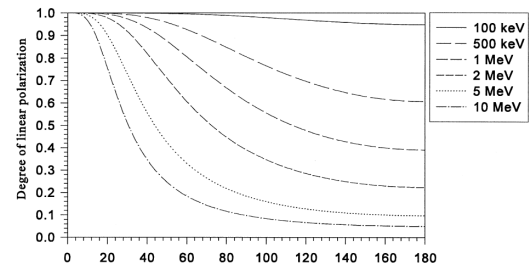


図 4: θ に対するモジュレーションファクター M [10]

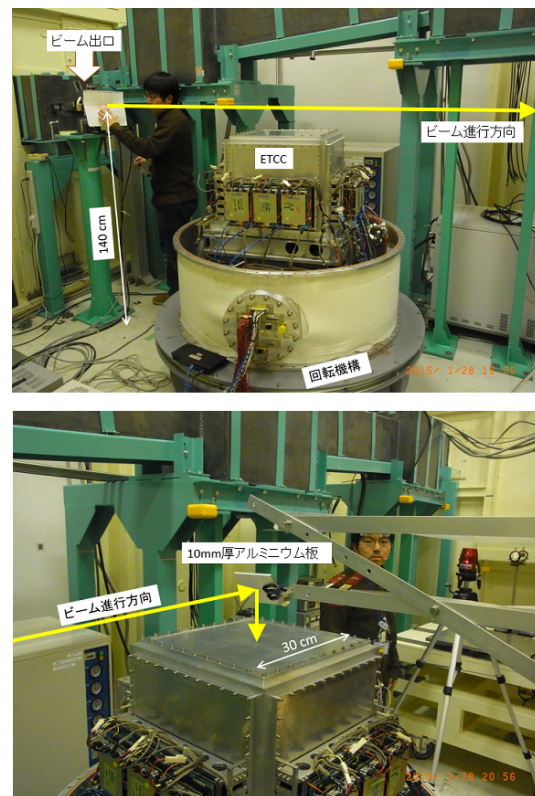


図 5: ビーム実験の様子

を行った。図 4 のように 182keV 直線偏光ビームを 10 mm 厚のアルミ板に照射し、その 90° 散乱光を測定をした。検出器全体を方位角方向に回転させることで、入射ガンマ線の偏光方向を変えて、方位角依存性を見た。結果は、図 6、7、表 1 のようなものとなった。モジュレーションファクターが $\sim 0.6@130\text{keV}$ という高い値を示した。偏向角の検出も誤差の範囲内で、シミュレーションによって得られた値と一致した。

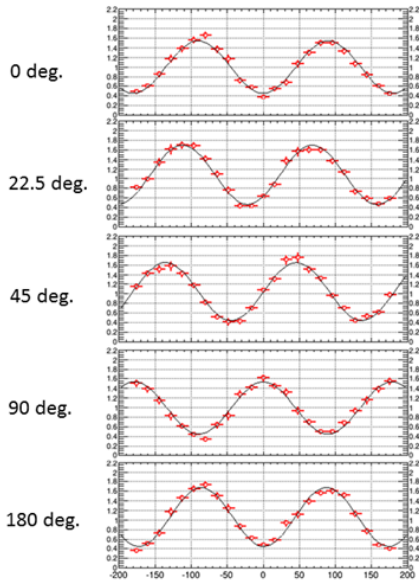


図 6: ビーム実験時のモデュレーションカーブ

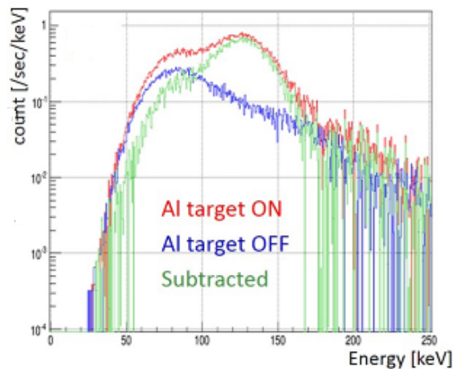


図 7: ビーム実験時のスペクトル

表 1: ビーム実験における方位角と偏光角

ETCC の方位角 ϕ	偏光角	$\frac{\chi^2}{ndf}$
0 度	0.3	$\frac{19.2}{19}$
22.5 度	-21.8	$\frac{24.0}{19}$
45 度	-44.0	$\frac{16.1}{19}$
90 度	-89.7	$\frac{17.4}{19}$
180 度	-2.3	$\frac{25.4}{19}$

4 結論と今後に向けて

ETCC が偏光検出器として高い性能を持つことが実証できた。現在の ETCC では有効面積が 1cm^2 で、

100keV の天体を 10 時間観測すると、偏光度 50% までの天体の偏光を検出できる。今後、ETCC を改良し、まず有効面積 10cm^2 で偏光度 15% の天体の偏光を検出できるところまで性能を上げる。将来的には衛星として打ち上げ、COMPTEL の 100 倍の検出感度にし、MeV ガンマ線天文学を開拓する。そして未知の高エネルギー現象の解明を目指す。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。SPring-8 BL08W(Proposal No.2014B1088) のご協力に感謝いたします。

Reference

- [1] George B. Rybicki et al. 2004, *Radiative Processes in Astrophysics*, Physics textbook
- [2] 堀川貴子 修士論文 2001 「偏光 X 線ビームラインの較正とガス比例計数管偏光計の開発」
- [3] Weisskopf et al. 1976, *Measurement of the X-ray polarization of the Crab Nebula*
- [4] A.J.Dean et al. 2008, *Polarized Gamma-Ray Emission from the Crab*, Science 321
- [5] M.Forot et al. 2008, *Polarization of the Crab Pulsar and Nebula as Observed by the INTEGRAL/IBIS Telescope*, ApJ 688
- [6] P.Laurent et al. 2011, *Polarized Gamma-Ray Emission from the Galactic Black Hole Cygnus X-1*, Science 332
- [7] D. Yonetoku et al. 2011, *Detection of Gamma-Ray Polarization in Prompt Emission of GRB 100826A*, ApJ 743
- [8] D. Yonetoku et al. 2012, *Magnetic Structures in Gamma-Ray Burst Jets Probed by Gamma-Ray Polarization*, ApJ 758
- [9] F. Lei et al. 1997, *COMPTON POLARIMETRY IN GAMMA-RAY ASTRONOMY*