

SMILE: 広視野 MeV ガンマ線偏光撮像の検証

古村翔太郎, 高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴¹, 岸本哲朗,
竹村泰斗, 中増勇真, 吉川慶, 中村優太, 谷口幹幸, 黒澤俊介², 澤野達哉³
(京大理, 1:京大宇宙ユニット, 2:東北大 NICHe, 3:金沢大数物)

1 X線・ガンマ線天体の偏光観測と電子飛跡検出型コンプトンカメラ

X線・ガンマ線領域における偏光観測は、ガンマ線バースト（GRB）初期放射モデルの制限、パルサーや活動銀河核（AGN）ジェット内部の磁場構造の調査、ブラックホール連星系における降着円盤の幾何構造の調査や一般相対論的效果の検証など、現在の測光・撮像・分光観測のみでは解決困難な課題に対して決定的な情報をもたらすと期待されている。一方でX線・ガンマ線偏光観測は、同帯域で最も明るい2つの定常天体（かに星雲 [1,2,3]・はくちょう座 X-1[4]）および、記録的に明るい GRB[5, 6] について、 5σ 以下の有意度での観測が数例行われたのみである。

近年開発が進められている偏光検出器は、おもに2種類に大別される。ひとつは、10–100 mCrab 程度の既知の定常天体を主な対象とした、X線集光ミラーやコリメータを利用したポインティング型の偏光望遠鏡である。もうひとつは、明るい突発天体である GRB 観測に特化した、広視野・大面積の偏光計である。GRB 偏光計はその広い視野から大量の雑音が入り、定常天体の観測はほぼ不可能である。このように、既知の定常天体や GRB については観測計画が存在する一方、実験的知見を増やすことを目的とした、未知の偏光天体の広域探索の実現の目処は立っていない。

京大宇宙線ガンマ線グループは、MeV ガンマ線全天探索を目指し、広視野 MeV ガンマ線望遠鏡：電子飛跡検出型コンプトンカメラ（ETCC）の開発を進めてきた。従来のコンプトンカメラでは取得できなかった反跳電子の方向をガス検出器で測定することで、優れたガンマ線撮像性能（point spread function, PSF $\sim 15^\circ$ @662 keV 実証済み、目標 $2-3^\circ$ ）と、それに基づく2–3桁の雑音低減の実現への道筋を示した [7]。現行の ETCC は、200 keV のガンマ線に対して $\sim 1 \text{ cm}^2$ の有効面積と $2\pi \text{ sr}$ の広視野を実証しており、ガス種・ガス圧や散乱ガンマ線の吸収体であるシンチレータの変更により、 30 cm^2 の有効面積が実現できる見込みである [8]。この改良型 ETCC を用いた気球実験では、2週間で 50 mCrab の flux を有意に観測可能であることが予想される。

仮に ETCC が優れた偏光検出能力をもつ場合、広視野・撮像・偏光観測という全く新しい手法でガンマ線偏光観測を行なうことができる。すなわち、(1) 広い視野で突発天体を含めた多数の天体を同時に観測し (2) 撮像により視野内の天体を分離することで強力な雑音低減を実現し (3) 1天体毎に高感度の偏光測定が可能となる、まさに広域探索に最適な偏光検出器となる。

2 シミュレーションを用いた偏光検出能力の見積もり

偏光したガンマ線は偏光方向と垂直な方向に散乱されやすいという性質を持ち、散乱方向の異方性分布を測定することで偏光度及び偏光方向を決定できる。現行の ETCC は図 1 左に示すように、 30 cm 角のガス検出器とそれを取り囲むピクセルシンチレータアレイ（ピクセルサイズ: $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^2$ ）の2つの検出器で、3次元的な散乱方向を測定できる。また、ETCC は光子の到来方向を1イベントごとに決定できるため、入射ガンマ線の進行方向を Z 軸とした座標系（光子座標系）における散乱角度分布 $D(\cos \theta, \phi)$ を求めることができる。Geant4 シミュレーションで

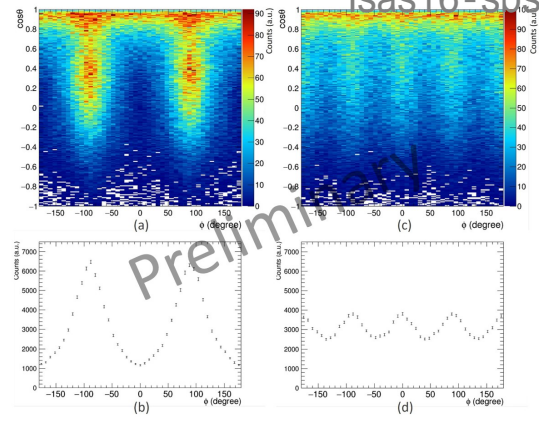
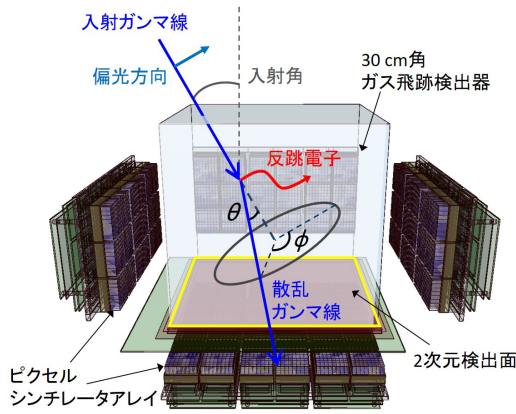


図 1: 左: 現行 ETCC の模式図、右: (a)(c)200 keV, on-axis 入射の 100%偏光と無偏光に対する散乱角度分布 $D(\cos \theta, \phi)$ 、(b)(d)100%偏光と無偏光に対する方位角分布 $N(\phi)$

計算した、入射エネルギー 200 keV, 100%偏光の平行光が ETCC に垂直に入射 (on-axis) した場合の $D_{pol}(\cos \theta, \phi)$ と、それを $\cos \theta$ 方向に積分して求めた方位角分布 $N_{pol}(\phi)$ を図 1 (a), (b) に示す。得られた $N_{pol}(\phi)$ には、ETCC のシンチレータの配置に応じた幾何効果による異方性が含まれる。幾何効果は、シミュレーションから同様に計算できる無偏光光に対する $N_{unpol}(\phi)$ (図 1 (d)) で割ることで補正され、図 2 に示すような偏光由来の異方性のみを含む $N_{cor}(\phi)$ を得ることができる。 $N_{cor}(\phi)$ は理論的には $\cos 2\phi$ に従う。フィッティングの結果から偏光検出能力を示すモジュレーションファクター μ は 0.7 と大きな値が得られた。

実際にはガンマ線はある入射角度をもって到来する (off-axis) 場合が殆どであり、検出器の立場からみると、光子の進行方向に散乱が集中するような偽の異方性が生じる。一般的なコンプトン散乱型偏光計では検出器の複雑化を避けるため、2次元検出面に射影した方位角分布のみを取得している。この場合、off-axis 入射効果による偽の異方性を除去することができないため、方位角分布は $\cos 2\phi$ に従わず、 μ は入射角に従って減少することが報告されている [9, 10]。ETCC は解析的にこの効果の補正を行うことができるため、広い視野内で大きな値の μ を維持することができる。

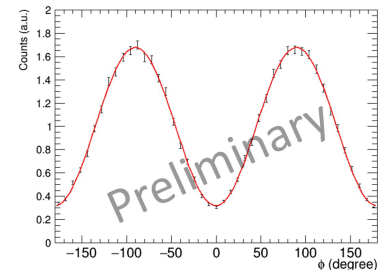


図 2: $N_{cor}(\phi) = N_{pol}(\phi)/N_{unpol}(\phi)$

3 偏光 X 線ビームを用いた実証実験

2015 年 1 月に SPring-8 の偏光 X 線ビームライン BL08W を用いて実証実験を行った (Proposal No. 2014B1088)。図 3 左に示すように、ビームラインからの 182 keV の X 線を Al 板で散乱させ、ETCC の入射窓に設置した鉛ブロックを用いてゆるくコリメートしたのち、ETCC に入射させた (擬似的な on-axis 入射)。Al 板で 90° の散乱をうけた場合、偏光度はおおよそ 96% で入射エネルギー 134 keV 程度と計算される。この時得られた エネルギースペクトルが図 3 右であり、Al 板からの成分が 134 keV 付近にピークを持つことが分かる。この状態で ETCC を回転させることで入射 X 線の偏光方向を変えて、 $N_{pol}(\phi)$ の測定を行った。前節と同様にシミュレーションを用いて幾何効果の補正を行い、得られた $N_{cor}(\phi)$ を図 4 に示す。それぞれの偏光方向における $N_{cor}(\phi)$ を $\cos 2\phi$ でフィッティングすることで得られた偏光角 (位相) は、設定した偏光方向と誤差の範囲で一致する。また、 μ は $0.57\text{--}0.60 \pm 0.02$ が得られた。これは実験環境をシミュレートすることで得られた理想的

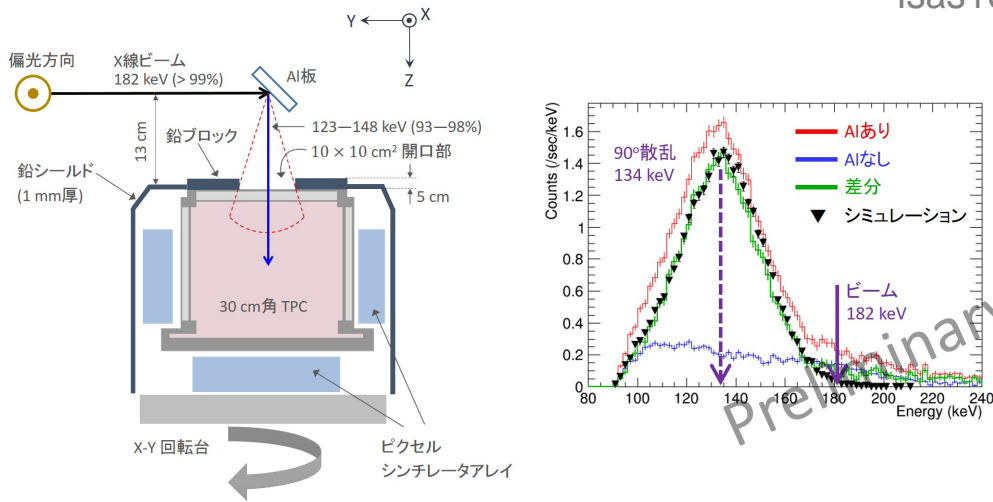


図 3: 偏光 X 線ビーム実験のセットアップと ETCC で得られたエネルギースペクトル

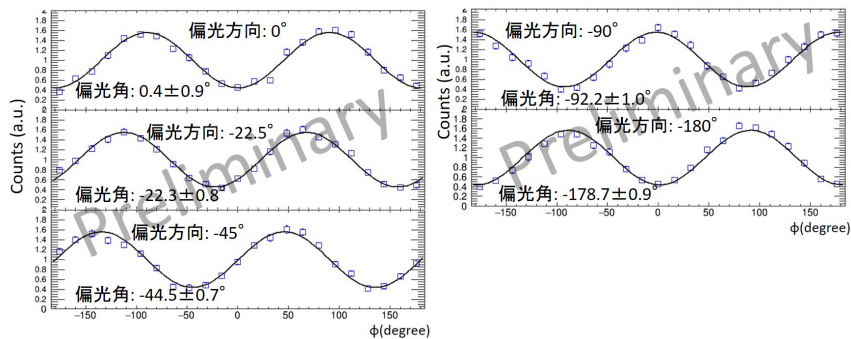


図 4: 測定された $N_{cor}(\phi)$ 。入射 X 線の偏光方向と、フィッティングにより得られた偏光角。

な μ の値、 $0.61\text{--}0.63 \pm 0.01$ と誤差の範囲内で一致する。

次に off-axis 入射効果の補正を実証するため、ETCC の入射窓に設置した鉛ブロックを取り除いた上で、Al 板を図 3 の位置からビーム上流側に 20 cm 移動させた。Al 板で散乱し ETCC に入射する X 線は、 $20\text{--}80^\circ$ の広い範囲の入射角を伴い、入射エネルギーは $147\text{--}179$ keV、偏光度は $98\text{--}99\%$ と計算される。この時得られたエネルギースペクトルが図 5 (a) である。およそ 154 keV にピークが見えるが、これは入射角 30° の X 線のエネルギーに相当する。実際、ETCC により得られた X 線の到来方向イメージ (図 5 (b)) では、入射角 $20\text{--}40^\circ$ 付近にイベントが集中しており、エネルギー分布と対応が取れていることがわかる。このように入射光子の到来方向を知ること、光子座標系を定義し off-axis 効果を補正することが可能になる。X 線の到来方向を 30° と仮定して off-axis 効果と幾何効果を補正した、 $N_{cor}(\phi)$ を図 5 (c) に示す。 $N_{cor}(\phi)$ は $\cos 2\phi$ でフィットする事ができ、 μ は 0.54 ± 0.02 と得られ、on-axis 入射の場合から大きな劣化は見られない。

4 最小偏光検出感度の見積もり

3σ の最小偏光検出感度 (minimum detectable polarization, MDP) を見積もるため、現行の ETCC における μ のエネルギー依存性と 154 keV のガンマ線に対する入射角度依存性をシミュ

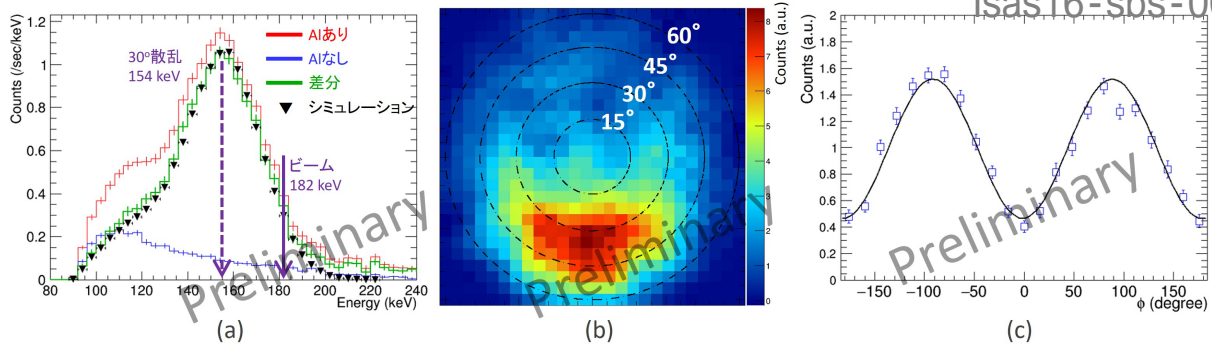


図 5: ETCC で得られた (a) エネルギースペクトル (b) 到来方向イメージ (c) $N_{cor}(\phi)$

レーションで計算した (図 6)。入射角度依存性から、大きな入射角に対しても μ の値は劣化が小さく抑えられており、視野 2π sr の大部分を偏光検出に利用することができることがわかる。

1 節で述べた様に、将来的には 200 keV のガンマ線に対して ETCC1 台あたり有効面積 30 cm^2 が期待できる。また気球高度における雑音レートは、過去の気球実験結果 [11] から $0.1 \text{ ph/cm}^2/\text{sec}$ と見積もることができる。これらの値から 10 時間の気球観測を行なった場合には、かに星雲とはくちょう座 X-1 の MDP はそれぞれ、12%, 16% と求められ、INTEGRAL 衛星による報告 [2,3,4] の追観測が期待できる。また、極域周回気球で 1 ヶ月程度の長期間観測を行なうことができれば、広視野を活かした GRB の偏光検出も期待できる。同型の ETCC2 台を用いると、 10^{-5} erg/cm^2 程度の明るさを持つ典型的な GRB の場合、MDP は 21% と計算できる。ETCC は分光・撮像・偏光検出を単独で行なうことができ、他の GRB 検出器 (Fermi/GBM, Swift/BAT など) との同時観測を必ずしも必要としないため、視野内で発生したほぼ全ての GRB に対して偏光測定を行なうことができ、1 ヶ月の飛行中に 2-3 個の偏光検出が期待できる。これらの気球実験で広視野・撮像・偏光天体の観測手法が確立できれば、衛星により、全天の数 10 mCrab の天体を一度に約 10% の精度で偏光測定を行なう広域探査が可能となる。

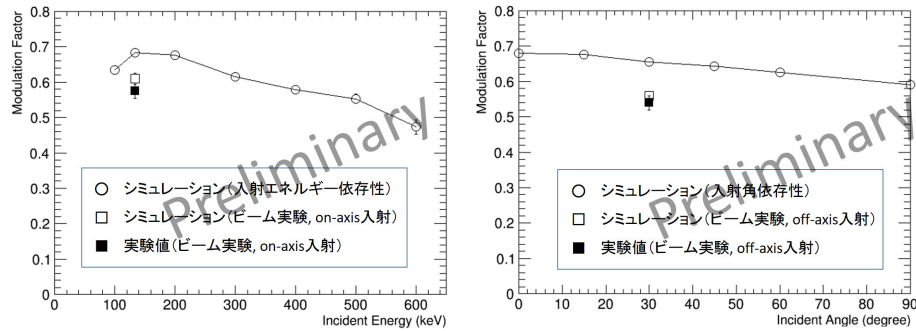


図 6: 現行 ETCC における μ の入射エネルギー依存性と入射角依存性

参考文献

- [1] M. C. Weisskopf, et al., ApJ, 220 (1978), L117.
- [2] A. J. Dean, et al., Science, 321 (2008), 1183.
- [3] M. Forot, et al., ApJ, 688 (2008), L29.
- [4] P. Laurent, et al., Science, 332 (2011), 438.
- [5] D. Yonetoku, et al., ApJ, 743 (2011), L30.
- [6] D. Yonetoku, et al., ApJ, 758 (2012), L1.
- [7] T. Tanimori, et al., ApJ, 810 (2015), 28.
- [8] 高田淳史, 他, 平成 28 年度大気球シンポジウム, isas16-sbs-025.
- [9] S. Xiong, et al., NIMA, 606 (2009), 552559.
- [10] F. Muleri, ApJ, 782 (2014), 28.
- [11] A. Takada, et al., ApJ, 733 (2011), 13.