

核ガンマ線イメージング分光法の確立と今後の MeV ガンマ線宇宙観測

谷森達, 高田淳史, 水村好貴^A, 水本哲也, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 吉川慶, 中増勇真, 中村優太, 谷口幹幸, 窪秀利, 黒澤俊介^B, 澤野達哉^C

京大理, ^A:京大宇ユニット, ^B:東北大 NICHe, ^C:金沢大数物

1. 今までの硬X線、MeVガンマ線天体観測

10keV以上の硬X線から数10MeVまでのMeVガンマ線領域に至る3桁の広いエネルギー領域の光子(以後、核ガンマ線とする)はコンプトン散乱が主な反応プロセスとなるため軟X線領域のような反射鏡(近年100keV近くまで多層膜ミラーの集光が可能になっていたが)の利用は不可能であり、幾何光学原理に沿った明確なイメージング手法は存在しなかった。一方数十MeV以上の高エネルギーガンマ線は対消滅により生成された電子・陽電子を測定し、ガンマ線の到来方向を計算することでガンマ線を電子的(計算機上)に集光させ、Fermi衛星のような繊細で高感度な観測が実現されている。一方コンプトン散乱は反跳電子および散乱ガンマ線共にその物理量測定は容易でなく、高エネルギーガンマ線のような到来方向の電子的な再構成を困難にした。しかしこのような状況でもコリメータとアンタイ検出器を組み合わせ、視野を制限し核ガンマ線分光観測が行われた。またピンホールカメラの原理を拡張したCoded mask法を用いて強度の強い天体、突発天体のイメージング検出が行われている。しかしCoded Mask法では個々のガンマ線の到来方向が得られず、雑音と信号ガンマ線の分離が出来ないため高感度観測は困難である。これらを改善する方法としてコンプトン散乱の物理量の一部、反跳電子のエネルギーと散乱点、散乱ガンマ線の方向とエネルギーを測定することでガン

マ線到来方向を決める2つの方向角(図2の θ と ϕ 、図1, 3のARM角、SPD角は θ と ϕ の角度分解能に対応)のうち仰角 θ を求めることで到来方向を円環に絞ることを可能にし、他波長のような集光によるイメージングを実現しようというCompton Camera(CC)の開発が1970年代から続き、1990年代にはCOMPTELがCGRO衛星に搭載され実際に全天観測が実施された。[1] 2000年代には改良された複数のCCが提案、気球実験が行われてきた[2,3]。しかし方位角 ϕ が測定できない影響が不明であり、衛星観測に不可欠な定量的に感度予想が実現できる装置は、今だ実現されていない。

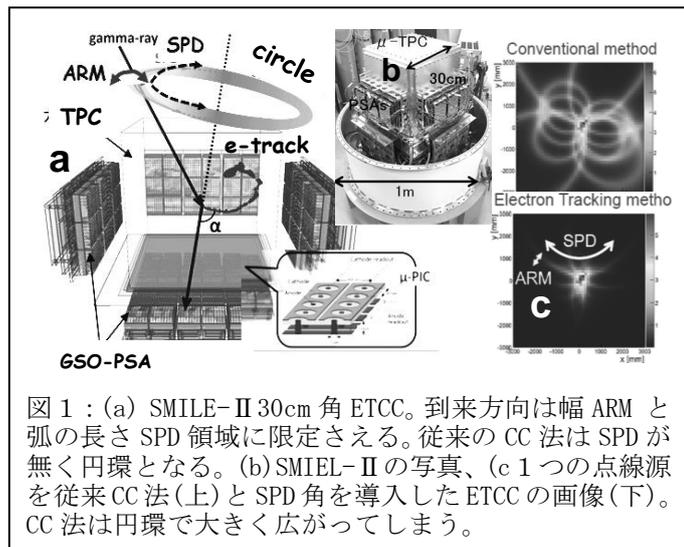


図1 : (a) SMILE-II 30cm角 ETCC。到来方向は幅 ARM と弧の長さ SPD 領域に限定さえる。従来の CC 法は SPD が無く円環となる。(b) SMILE-II の写真、(c) 1つの点線源を従来 CC 法(上)と SPD 角を導入した ETCC の画像(下)。CC 法は円環で大きく広がってしまう。

マ線到来方向を決める2つの方向角(図2の θ と ϕ 、図1, 3のARM角、SPD角は θ と ϕ の角度分解能に対応)のうち仰角 θ を求めることで到来方向を円環に絞ることを可能にし、他波長のような集光によるイメージングを実現しようというCompton Camera(CC)の開発が1970年代から続き、1990年代にはCOMPTELがCGRO衛星に搭載され実際に全天観測が実施された。[1] 2000年代には改良された複数のCCが提案、気球実験が行われてきた[2,3]。しかし方位角 ϕ が測定できない影響が不明であり、衛星観測に不可欠な定量的に感度予想が実現できる装置は、今だ実現されていない。

2. ETCCによる幾何光学に基づくイメージングスペクトロスコピーの実現

我々はこの問題を抜本的に解決するため反跳電子の方向が測定出来る電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron Tracking Compton Camera: ETCC ; 図1)を2000年から開発してきた。すでに小型ETCCを用いて06年に気球実験を行い (SMILE-I:S-I) [5]、さらに広視野(4sr)30cm角 ETCC を搭載した MeV ガンマ線気球観測装(SMILE-II:S-II) [6]を開発。この電子飛跡の3次元測定からCCでは測定不可能な方位角 ϕ を測定、それにより対生成ガンマ線同様、図2に示すような電子的に到来ガンマ線の集光が実現できる。このため光学やX線望遠鏡と同様に Point Spread Function (PSF)が厳密に定義できる (図2)。従来、幾何光学原理に基づく集光型簿望遠鏡では感度は、望遠鏡の口径にあたる有効面積と集光度を表すPSFで厳密に決定され、雑音もPSF内の雑音のみ考慮すればよい[6]。そのためX線観測などでは全視野から雑音が入る多重ピンホールカメラ、コリメータカメラから集光型望遠鏡に移ることで雑音が数百分の1に激減し2桁以上の感度向上が実現し、天文学として確立することができた。それでは核ガンマ線領域ではこのような幾何光学によるPSFが定義されてきたのであろうか。このPSFの観点から見ると従来の観測の現状がよく理解できる。カメラの有効面積 A_{eff} 、PSFを Θ 、信号量 F_g 、雑音量 B_g とすると単位時間当たりの感度は $F_g \cdot \sqrt{A_{eff}} / \sqrt{(F_g + B_g \cdot \Theta^2)}$ 、で決まり、雑音が少ないときは $\sqrt{A_{eff} \cdot F_g}$ 、雑音量が多いときは $F_g \cdot \sqrt{A_{eff}} / (\Theta \cdot \sqrt{B_g})$ 、と近似できる。CCでは図の様に方位角 ϕ が測定されず到来方向がコンプトン散乱角を半径とした円環になり事象の確率分布が数十度に広がる。単純に平均すればPSFの Θ は30-70度ぐらいと大きくなる。しかし雑音が少ないとき上の式のように感度にPSFは入らず、画像処理用最適化法(例えばMLEM法)を用いると、十分な統計がある場合CCの広がったPSFからデータで最も精度が高い仰角成分のみを強調、その分解能であるARM角に近い精度で集光した画像に変換できる。ただし定量性に問題が残る。一方雑音が多い状況では感度はPSF(Θ)内の雑音量で決まる統計揺らぎで決定される。このように統計原理で感度が決定されるので最適化法は意味が無い。最適化法は十分な信号があるとき信号に含まれる画像を劣化させる成分を仮定し取り除く手法であ

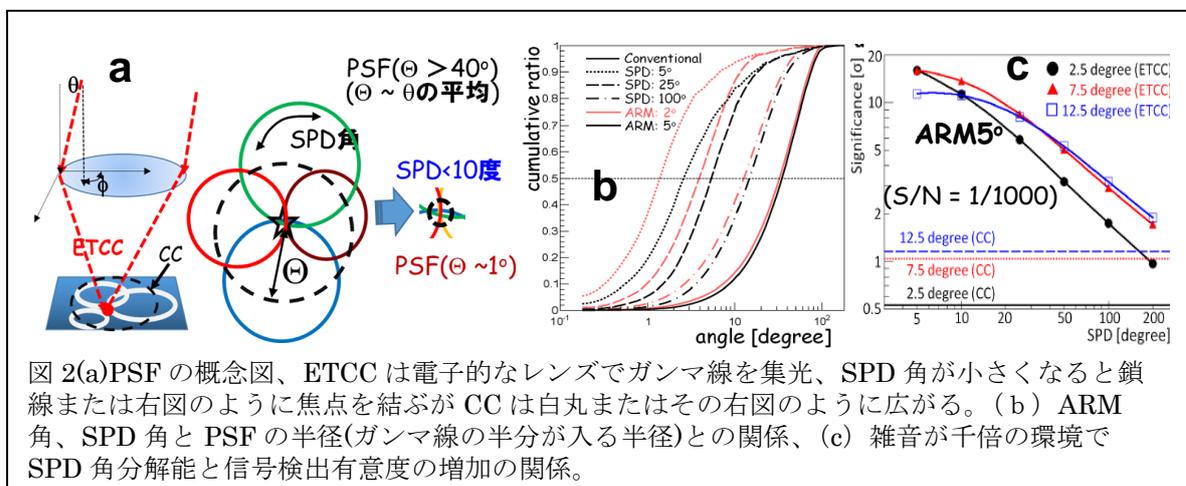


図2(a)PSFの概念図、ETCCは電子的なレンズでガンマ線を集光、SPD角が小さくなると鎖線または右図のように焦点を結ぶがCCは白丸またはその右図のように広がる。(b)ARM角、SPD角とPSFの半径(ガンマ線の半分が入る半径)との関係、(c)雑音が千倍の環境でSPD角分解能と信号検出有意度の増加の関係。

り、予測不能な雑音の揺らぎを原理的にのぞくことはできない[6]。

しかし、核ガンマ線観測ではこの議論があまり理解されていないと思わざるを得ない。COMPTEL では当初の論文では画像処理の有効性を強調していたが、実際の観測では統計的に確かな Maximum likelihood method を用いているが、この最初の論文が影響し、長らく最適化法の有効性が信じられ ARM 角を PSF として感度が計算された気配がある。多くの研究者はやはりこの点に不安があるのが論文には Angular resolution として ARM を用いるが PSF と定義されたものは見られない、しかし感度は明らかに ARM を PSF のように定義して計算されたと考えると辻褃

があう論文が多い。確かに CC では線源から出たガンマ線の円環は線源を ARM の分解能で通過するが、円環の広がり程度の領域の雑音も線源の上を通過してしまい、上で述べた Θ 程度の大きな PSF からの雑音を考慮する必要がある。図 2 に宇宙のような高雑音下での ETCC と CC の感度の違いを同じ ARM 角で SPD 角の精度の関数としてプロットしてあるが Θ が 2 度に対応する SPD 角 5 度以下では感度の 10 倍と大きな差が出る。図 3 には CC と ETCC で線源領域への他の領域からの染み込みの差でスペクトルの分解能が大きく変わることを実測したデータを示す。これらの観点から見ると、CC の気球実験でカニ星雲を観測したとき予定より数倍以上感度が予想より下がることが報告されているが、その理由が明らかになる。CC の予想感度は有効面積と ARM 角から計算されたものだとすると実際の PSF が 10 倍近く大きいとするとこのような予想と実測値の差は理解される。

一方 ETCC は厳密な PSF が SPD 角、ARM 角の精度で図 2 にあるように厳密に決定でき、装置の有効面積から光学原理に基づいた望遠鏡と同様信頼性の高い感度が導出できるこの厳密な PSF の設定は核ガンマ線領域でも完全なイメージング分光が可能となる[6,7]。X 線望遠鏡同様、PSF 内の雑音のみ考慮すればよく CC や Corded mask など視野全体から雑音が入る手法に比べ 2-3 桁雑音が下がる。当然アンタイカウンターも不要となる。これによりガンマ線分光は飛躍的な感度改善が期待できる[6]。例えば $1 \times 1 \times 0.5 \text{m}$ 程度のサイズの ETCC ならば 50Mpc を超える超新星爆発のガンマ線分光が実現でき、また月、火星などの資源探査も数 km の精度の従来の 3 桁近い高精度観測が実現できる。地上での多くのガンマ線分光でも大きな遮蔽室の中や地下でのみ実現できた環境放射能の 3 桁程度小さい放射線量も遮

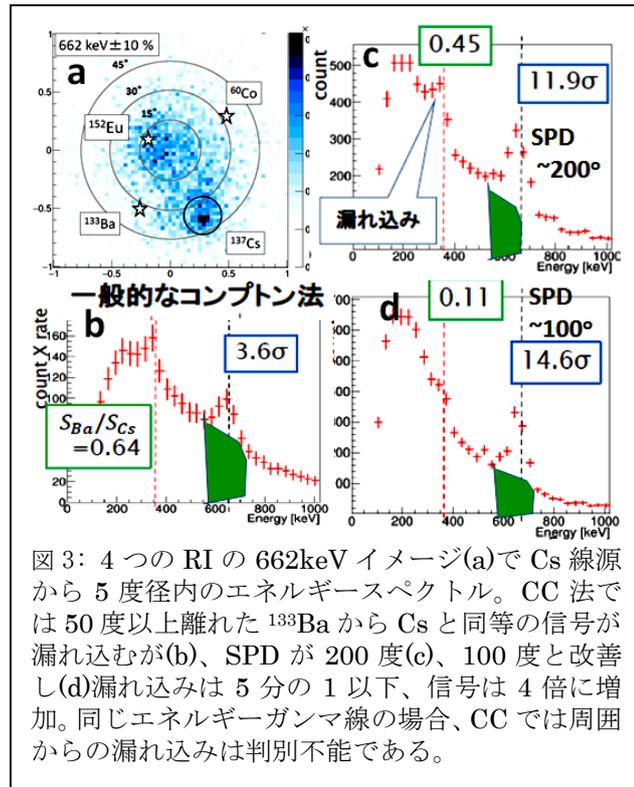


図 3: 4 つの RI の 662keV イメージ(a)で Cs 線源から 5 度径内のエネルギースペクトル。CC 法では 50 度以上離れた ^{133}Ba から Cs と同等の信号が漏れ込むが(b)、SPD が 200 度(c)、100 度と改善し(d)漏れ込みは 5 分の 1 以下、信号は 4 倍に増加。同じエネルギーガンマ線の場合、CC では周囲からの漏れ込みは判別不能である。

蔽なしでも画像付きで測定が可能となる。実際に SMLE-II で環境放射能の千分の 1 以下の放射線源の画像化、スペクトル観測に性能している (図 4)。

3. 今後の核ガンマ線天体観測の可能性。

上に述べたように幾何光学原理に基づく厳密な PSF を核ガンマ線イメージングに導入することで CC や Coded mask など従来の観測手法で謎であった感度の劣化原因が明確になり電子飛跡検出によりこの問題を完全に克服できることが明確になった。ガス検出器では Tanimori et al.2015 で述べたように構造が単純であり実質半導体検出器と同様の有効面積を近い体積で得られる。また天文学に必要な数度以下の PSF を得るには SDP 角 5

度以下が必要となる。現在のガス検出器では現在の技術でも十分実現できる範囲である。電子飛跡は dE/dx 検出や反跳電子と散乱ガンマ線の間角度を利用した運動学的検証からガンマ線以外の雑音 (荷電粒子、中性子散乱、偶発事象) をもほぼ取り除くことができる。このように ETCC は地上において図に示すように原理的に除去不可能な PSF 内の環境拡散ガンマ線レベルまで雑音低下に成功している。今回我々はこの能力を宇宙観測でも実証するべくイメージング分光能力の検証としてオーストラリアでの銀河中心からの超滅ガンマ線検出、イメージング能力と PSF による連続ガンマ線天体の高感度観測として米国でのかに星雲の気球観測を提案している。これらが予定通りの感度で観測が実現すれば上に述べた ETCC の観測能力は宇宙環境においても実証される。

これにより他波長での宇宙観測同様、今後は装置の PSF と有効面積から高精度な宇宙観測予想が保証され、提案から直接、衛星による宇宙空間での観測へ迅速な展開が可能となる。核ガンマ線は天体観測以外にも惑星探査、太陽観測、地球極域や高層大気のガンマ線観測など、基礎科学から環境、気象など社会実用に至る多くの宇宙を利用した観測の必要性が考えられる。このようにこの成果から今後の宇宙を利用したガンマ線イメージング観測の大きな発展が期待される。

References [1]Schönfelder, V. + .A&ASS Vol. 143, 145(2000), [2]Aprile, E.+New Astron. Rev., 48, 257 (2004), [4]Bandstra, M.S.+ ApJ 738 8(2011), [5] Takada, A., ApJ. 733 (2011), 13. [6]Tanimori,T., ApJ 810 (2015), 28., [7] Tanimori, T.+ submitted

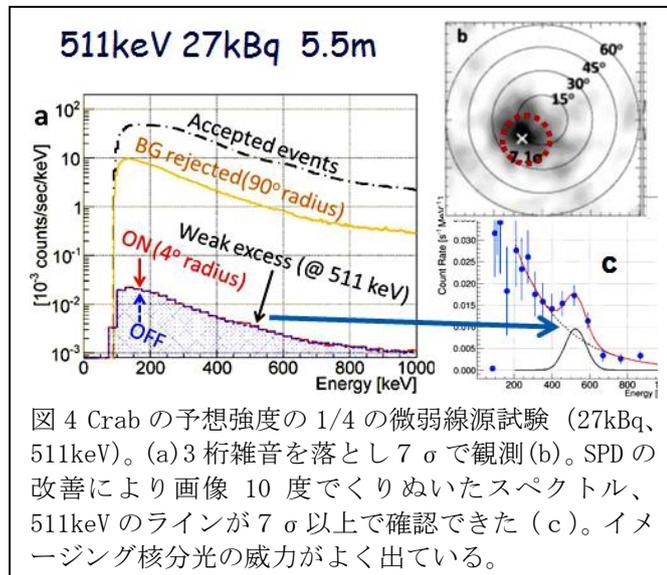


図 4 Crab の予想強度の 1/4 の微弱線源試験 (27kBq、511keV)。(a)3 桁雑音を落とし 7σ で観測 (b)。SPD の改善により画像 10 度でくりぬいたスペクトル、511keV のラインが 7σ 以上で確認できた (c)。イメージング核分光の威力がよく出ている。