

MeV・GeV 検出器の過去、現在、未来

高橋忠幸

(宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・宇宙科学研究本部 (ISAS))

1 ガンマ線による宇宙物理学

宇宙での X 線・ γ 線領域は、宇宙の高エネルギー現象を探る大切な「窓」である。X 線が、加熱された高温プラズマからの放射を主に見ていたのに対し、 γ 線は、それに加えて、原子核の崩壊のプロセス、加速され光速に近い速度をもつ荷電粒子に伴う放射が主体となる。そのため、 γ 線領域は宇宙で起きている原子核や素粒子反応と直接関係しており、その核心に迫る窓として宇宙物理学の重要な課題を豊富に含んでいる [1, 2]。21 世紀の高エネルギー天文学においては、 γ 線で高い感度を持つ検出器、特にイメージング能力を持った検出器を開発することによって、粒子の加速や、ブラックホール近傍の強い重力場からの γ 線放射、未知の素粒子や原子核の現象を探るなど、これまで観測が及んでいなかった新しい非熱的な宇宙を探ることが目標となっている。

2 感度のギャップ

CGRO (コンプトン GRO) 衛星 (1991–2000)、そして INTEGRAL 衛星 (2003–) によって、科学衛星による γ 線観測は大きく進んできたが、X 線天文衛星の感度と比較した場合、いまだに 1 桁から、場合によっては 2 桁以上もの感度の不足はいなめない。図 1 に、これまで、あるいは近未来の衛星が到達する検出感度を地上のチェレンコフ望遠鏡の感度と共に示した。図から明らかなように γ 線領域では、X 線領域で観測しているような、暗い、遠方の天体の観測に必要な感度にまだ到達していない。それは、 γ 線領域で天体からくる信号強度がそのものが圧倒的に少ないうえ、観測手段もまだ未開発だからである。感度の図において、10keV のところで不連続になるのは、従来の撮像型 X 線望遠鏡を応用できる範囲が 10keV までであったことによる。また数百 MeV 以上で、CGRO 衛星の EGRET 検出器や 2007 年打ち上げ予定の GLAST 衛星の感度が比較的高いのは、検出器の中で対生成反応によって生じた電子・陽電子対を再構成することにより、入射 γ 線の方角を知ることができるからである。こうした技術の使えないサブ MeV/MeV 領域は他の波長にくらべて、これまでに到達された感度が低い「感度のギャップ」となっている。

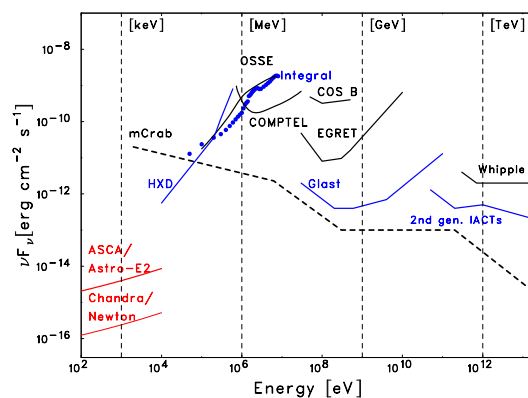


図 1: X 線からガンマ線にかけての感度の比較。Crab Nebula の 1/1000 の強度 (1 mCrab) に対応するスペクトルを重ねてある。数 10 keV から数 10 MeV の領域が感度のギャップになっている事がわかる。

X線領域では、数秒角を上回るような極めて高い角分解能を持つ画像をとることができるX線望遠鏡の技術が確立しているのに対し、 γ 線は、波長が短いため、集光鏡を応用することが極めて難しい。そのため、イメージを取得するために、コリメータを用い少しずつ観測の方向をずらしながら画像を構築する方法、符合化マスク（コーデッドマスク）と位置検出型の検出器を組み合わせる方法の他に、MeVガンマ線領域ではコンプトン散乱を、GeVガンマ線領域では対生成反応を積極的に利用したイメージング法が用いられてきた。図2に、X線からGeVガンマ線領域において到達されてきた角度分解能を示す。コーデッドマスクが有効である1 MeVまでは数10分の角度分解能が得られているが、数 MeV を超えると1度を超えるような角度分解能の観測しか行われていない。

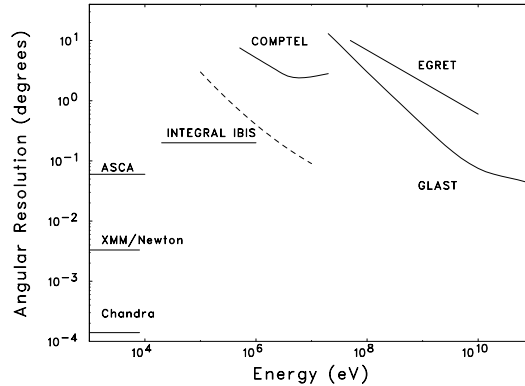


図 2: 角度分解能。点線はシリコンを散乱体として用いた場合のコンプトン望遠鏡の角度分解能の限界。

3 GeVガンマ線観測 - 対生成望遠鏡 -

ガンマ線のエネルギーが100 MeVを超えると、対生成反応を通じて入射ガンマ線を電子・陽電子対に変え、それらの飛跡とエネルギーを測定するタイプの検出を行うことができる。CGRO衛星のEGRET検出器は、総重量1830 kgという大型の検出器で、薄いタンタルのフォイルとワイヤースパークチェンバーとが交互に28層にわたって積み重ねられた飛跡検出器（トラッカー）を持ち、タンタルの薄い膜でガンマ線が対生成反応した後の電子・陽電子それぞれの飛跡を記録する[3]。飛跡検出器の下には厚いヨウ化ナトリウムシンチレータでできたカロリメータがおかれ、制動放射によって、ガンマ線を放出し、そのガンマ線がさらに対生成反応を起こし、次々とガンマ線や電子・陽電子対を作り出す電磁シャワーのエネルギーの測定を行って入射ガンマ線のエネルギーの決定を行った。反応で生成する電子と陽電子のなす角は、入射ガンマ線のエネルギーが高いほど小さく、その方向からガンマ線の到来方向を知ることができる。エネルギーが低い場合は、作られた電子や陽電子が物質中で多重散乱をおこすため、すぐに元々持っていた方向の情報を失ってしまう。

2007年に打ち上げが予定されているガンマ線衛星GLASTのLAT検出器は、加速器実験における半導体検出器技術を駆使して作られるもので総重量は3000 kgにもおよぶ[4]。同じ手法を用いながら、エネルギー範囲、視野、空間分解能の全てでCGRO衛星のEGRET検出器を大きく凌駕する。トラッカー部は18層の数100ミクロン幅の細い電極を沢山並べたシリコン検出器（シリコンストリップ検出器）と薄いタングステンのシートでできており、エネルギーを測定する電磁カロリメータはヨウ化セシウムシンチレータの細かなブロックで構成されている。トラッカー部がシリコンストリップ検出器になったため、電子や陽電子が、通過する際の位置を100ミクロンを上回る極めて高い精度で記録することができる。また、各層の間の距離を小さくとることができるようになったため、数GeVの γ 線で0.1度とい

うような EGRET に比べて格段に優れた角度分解能が得られる。LAT では、セグメント化したカロリメータでシャワーの形状を測定することで、カロリメータから抜け出るような高いエネルギーのガンマ線の測定が可能になったことに加え、大きな角度で入射してきたガンマ線からの電子・陽電子対の飛跡を再構築できるようになっている。そのために、10 GeV から 100 GeV にかけて $10,000 \text{ cm}^2$ にもおよぶ有効面積と全天の 20% を一度にカバーすることができる視野をもつ。

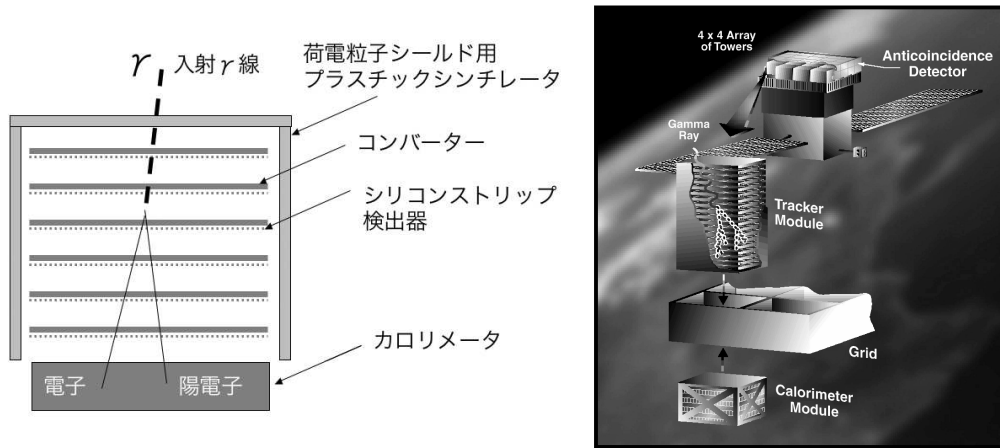


図 3: (左) 対生成検出器の原理 (右) GLAST 衛星の LAT 検出器

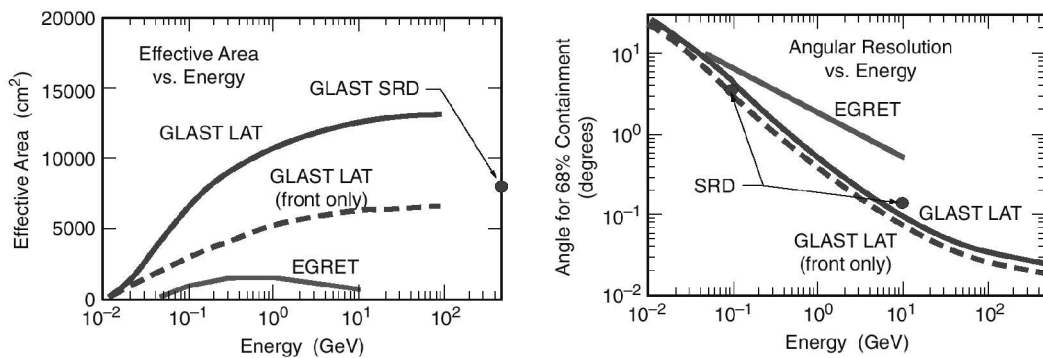


図 4: GLAST 衛星の LAT 検出器の有効面積、角度分解能の EGRET との比較

4 MeV ガンマ線観測 - コンプトン望遠鏡-

4.1 COMPTEL 検出器

MeV 領域での γ 線観測は、他の γ 線領域に比べて非常に難しい。それは、この領域では物質との相互作用の確率が小さいのに加え、コンプトン散乱が主要な反応となるため検出器中に入ってきた γ 線が、検出器中の電子にエネルギーを部分的にわたし、その後検出器から抜けてしまうことが起こるためである。そのために、コリメータやシールドなどによってバックグラウンドを効率よく除去することが難しく、また、目標とする天体からのガンマ線を選び出すのに十分な空間分解能を得ようとしても、コリメータやコーデッドマスクが入射ガンマ線に対して透明になってしまう。したがって、光電吸収に頼った検

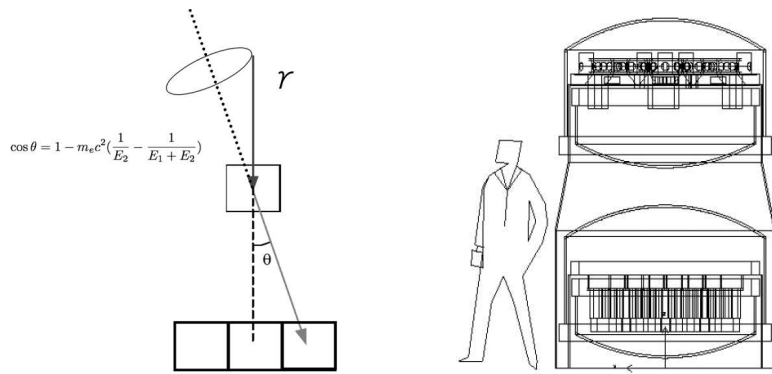


図 5: コンプトン望遠鏡の概念と COMPTEL 検出器 [5]。

出器を用いるかぎり¹、たとえ十分な有効面積を確保していても、バックグラウンドに対して高い S/N 比を得る事が難しく、図 1 に示されるように、高い感度を得る事ができない。

MeV 領域で感度の高い観測を行うために考案された検出器が、コンプトン散乱を利用したコンプトン望遠鏡である (図 5 右)。CGRO 衛星に搭載された COMPTEL (図 5 左) [5] では、2 層目の検出器を用い、1 層目 (液体シンチレータ) でコンプトン散乱を起こして散乱された電子と、2 層目の吸収体 (NaI シンチレータ) で吸収された光子の、それぞれのエネルギー、検出器上での反応位置、および反応時刻を記録する。これらの情報から、運動量保存則とエネルギー保存則を用いて入射 γ 線光子の到来方向は頂角 θ を持つ円錐面に制限され、天空上では円環として与えられる。複数のガンマ線による円環を重ねることで、 γ 線天体の位置を決めるのである (図 6 左)。COMPTEL ではバックグラウンドをできるかぎり落とすために、散乱体から吸収体までの散乱光子の飛行時間 (TOF: Time of Flight) をイベント選択の条件に入れる、あるいは中性子によるバックグラウンドを除去するために、液体シンチレータに対して波形弁別を施すなどの工夫を行っている。

COMPTEL は、観測の非常に困難な MeV γ 線の領域で、パイオニア的な成果をあげた。コンプトン望遠鏡では散乱体でコンプトン散乱を起こす確率と吸収体で光電吸収を起こす確率の積で有効面積 (実際の検出器の面積に検出効率をかけあわせた面積) が決まる。そのため、COMPTEL は 1500 kg 近い重量を持ちながら、有効面積が 20 - 50 cm² と非常に小さい。ところが、MeV 以上において CGRO 衛星の OSSE [6] や INTEGRAL SPI などの有効面積が、COMPTEL の有効面積よりも大きいものにも関わらず (2 MeV で OSSE は 300 cm² なのに対し、COMPTEL は 50 cm²)、到達感度は COMPTEL におよばない。この事からも、コンプトン運動学を応用した検出器の効果がわかる。ただし、COMPTEL は TOF を条件に課しているために視野が狭く、全天サーベイを行う際に効率が悪い。角度分解能も 1 度から数度と十分ではなく、また、エネルギー分解能も半値幅で 1.2 MeV において 8.8 % 程度とサブ MeV 領域の γ 検出器と比較して改良の余地が大きい。

4.2 次世代コンプトンガンマ線望遠鏡

数 100 keV から MeV のエネルギー領域でより感度をあげるために、次世代のコンプトン望遠鏡の開発が日本をはじめ、世界各地で精力的に進められている [9]。その例が、図 6 に示すように、半導体やガス検出器を用い、角度分解能の向上や有効面積の拡大とともに、視野角を十分に大きくとったものである。こうした検出器の実現のために、

¹数 10 MeV 以上では対生成の割合が大きくなるが、生成される電子・陽電子のエネルギーが十分な角度分解能が得られるほど高くない。

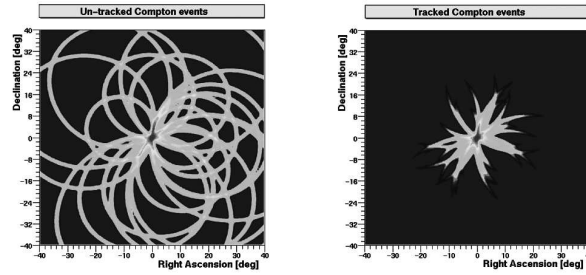


図 6: コンプトン望遠鏡による線源の検出のシミュレーション (左) コンプトンリングの重ね合わせ (右) 電子の散乱方向に制限をつけられる場合に得られるコンプトンアークの重ねあわせ [10]

- 高いエネルギー分解能の検出器を散乱体や吸収体に用いることで、角度分解能をあげる。
- 電子の散乱方向を知ることによって、ガンマ線の入射方向を円ではなく、弧あるいは点に制限する (図 7 右) ほか、電子の散乱方向を Compton の運動学の条件を加えて検出器の散乱の順番を知る (どちらが散乱で、どちらが吸収か) と共にバックグラウンドを低減する。
- 検出器中での多重コンプトン散乱を積極的に用いて検出効率の向上とバックグラウンドの低減をはかる [7][8]。特に、3 回から 4 回以上コンプトン散乱を行った事象では、散乱後検出器から抜けてしまっても、入射ガンマ線のエネルギーや到来方向を求めることができる。

といった様々な可能性が追求されている。

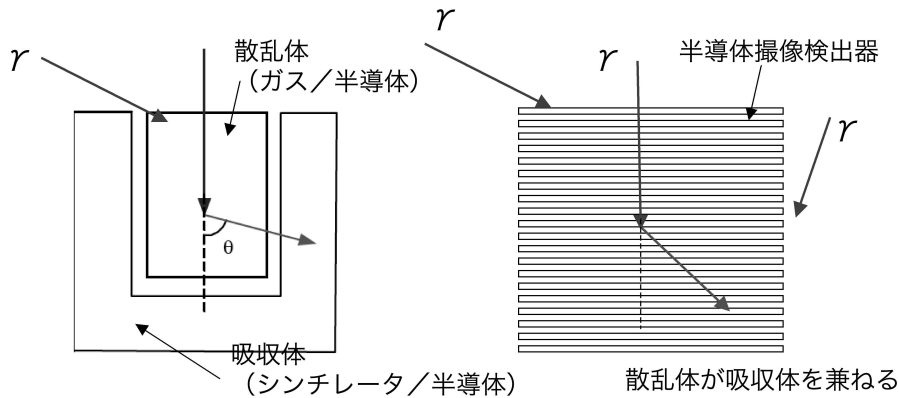


図 7: 次世代コンプトン望遠鏡の考え方。

高感度のコンプトン望遠鏡を実現するためには、エネルギー分解能、位置分解能を向上させるとともに、できるだけ有効面積の大きな検出器とする必要がある。図 9 に様々な検出器を散乱体として用いた場合のコンプトン散乱の確率を示す。半導体を用いた場合、コンパクトな検出器で十分な厚みの散乱体を実現することが可能であり、それとともなって、取り囲む吸収体の体積も比較的小さくすることが可能となる。また、半導体の種類によっては散乱体と吸収体を兼ねることも可能である [11]。ガスを散乱体に用いた場合、半導体検出器に比べて散乱電子の飛跡を検出する能力に勝るが、散乱体の体積を大きくせざるを得ずそれに伴って取り囲む吸収体の体積も大きなものとなる [13]。このように、散乱部、吸収部に用いる検出器によって、メリット・デメリットがあり、今後、数 10MeV のエネルギー領域で

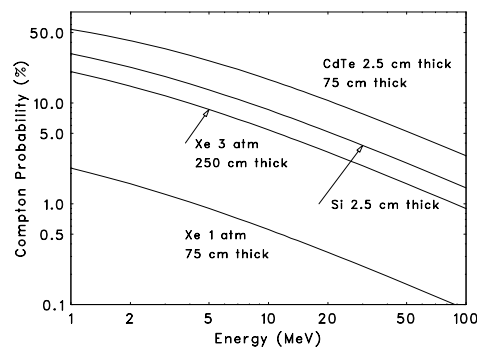
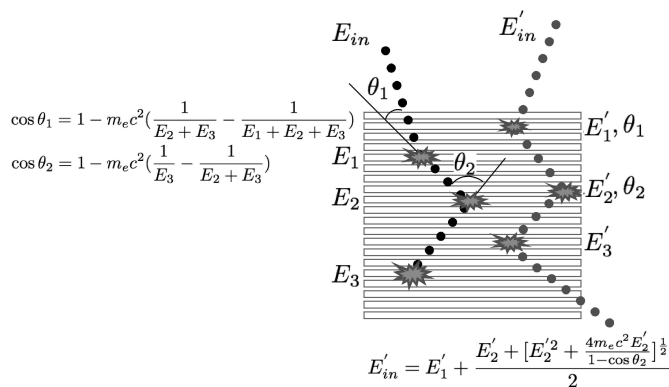


図 8: 多重コンプトン法の原理。(左) γ 線が抜け出なかった場合 (右) γ 線が抜け出した場合

COMPTEL の感度を 1 桁ないし 2 桁向上させるためには、より一層の技術開発と実証実験が不可欠である。

日本では、テルル化カドミウム半導体を主体とした半導体多層コンプトン望遠鏡 (SMCT)[11] やガスマイクロ TPC を散乱部に用いた検出器 [12] など、特徴をもった技術にもとづいた次世代コンプトンガンマ線望遠鏡開発が進められており、技術的な水準も高い。また、現在提案中の NeXT 衛星において、サブ MeV ガンマ線の領域で高感度観測をめざすために提案されているソフトガンマ線検出器 (SGD) は、高いエネルギー分解能を持つシリコンストリップ検出器とテルル化カドミウムピクセル検出器を組み合わせたコンプトンカメラを基本とした、世界でもはじめての半導体多層コンプトンカメラである [14]。SGD を構成する半導体の層の数を増やすことにより、MeV 領域のガンマ線が観測可能になるため、SGD の技術は上述した次世代コンプトン望遠鏡の第一歩であるといってもよい。

参考文献

- [1] N. Gehrels and J. Paul, *Physics Today*, **51** no 2 (1998) 26
- [2] 高橋忠幸:ガンマ線天文学、21 世紀の宇宙観測 (家 正則監修) 誠文堂新光社 (2003)
- [3] D.J. Thompson et al., "Calibration of the Energetic Gamma-ray Experiment Telescope (EGRET) for the Compton Gamma-ray Observatory", *ApJS*, 1993, 86, 629
- [4] GLAST 衛星ホームページ (<http://www-glast.stanford.edu/>)
- [5] V. Shoönfelder et al., "Instrument Description and Performance of the Imaging Gamma-ray Telescope COMPTEL aboard the Compton Gamma-ray Observatory", *ApJS*, 1993, 86, 657
- [6] W.N. Johnson et al., "The Oriented Scintillation Spectrometer Experiment Instrument Description" *ApJS*, 1993, 86, 693
- [7] T. Kamae et al., "A New Method to Measure Energy, Direction, and Polarization of Gamma rays", *Nucl. Inst. And Meth. A260* (1987) 254
- [8] J. Kurfess et al., "Considerations for the next Compton telescope mission", *AIP Conf. Proc.* 510, 789-793 (2000)
- [9] Astronomy with Radioactivities IV and Filling the Sensitivity Gap in MeV Astronomy, 2003, Seon (<http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/workshops/seen03>)
- [10] G. Kanbach et al., "The MEGA Project", *New Astronomy Reviews*, 2004, in press
- [11] T. Takahashi et al., "High resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope", *SPIE*, 2003, 4851, 1228
- [12] T. Tanimori et al., "MeV Gamma-ray Imaging Detector with micro-TPC", *New Astronomy Reviews*, 2004, in press
- [13] P. Bloser et al., "Applications of Gas Imaging Microwell Detectors to an Advanced Compton Telescope", *New Astronomy Reviews*, 2004, in press
- [14] T. Takahashi et al., "Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the NeXT mission", *New Astronomy Reviews*, 2004, in press