

100 kg 衛星と次世代検出器を用いた新しいガンマ線天文学

高橋忠幸、中澤和洋、尾崎正伸（宇宙科学研究所）

田島宏康、釜江常好（スタンフォード大学線形加速器センター） 能町正治（大阪大学）

深沢泰司（広島大学） 国分紀秀（東京大学）

1 はじめに

数 100 keV から数 10MeV にいたる、sub-MeV/MeV 領域のガンマ線を用いた観測は、これまで実現されてきた検出器の感度が低いため、「ギャップ」として、取り残されていた（図 1）。このエネルギー帯こそ、ブラックホールの最深部の情報を引き出し、また、銀河の非熱的なエネルギーの鍵をにぎる陽子加速を研究する上で、重要である。

X線からガンマ線へ-- 感度のギャップ--

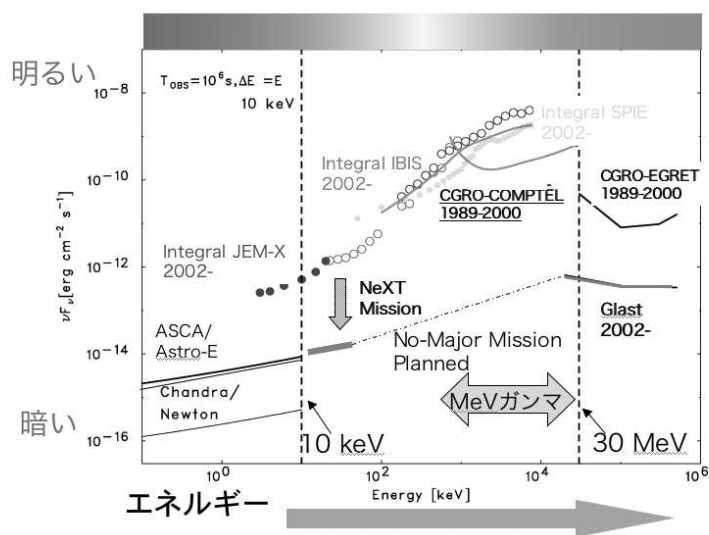


図 1: X線衛星、ガンマ衛星による連続スペクトルに対する感度。10keV のところで不連続になるのは、従来の撮像型 X 線望遠鏡が応用できる範囲が 10keV までであったことによる。また百 MeV 以上で、コンプトン衛星の EGRET 検出器や GLAST 衛星の感度が高いのは、このエネルギー領域でのバックグラウンドが小さい上、対生成反応によって生じた電子・陽電子対を再構成することにより、入射ガンマ線の方角を知ることができるからである。こうした技術の使えない 10keV から数 10MeV という範囲は他の波長にくらべて、到達された感度が低い「ギャップ」となっている。

ガンマ線を観測するための検出器は、従来より、大型な検出器でなければ実現不可能と考えられてきた。われわれは、AstroE2 衛星の硬 X 線検出器によって、また、現在立案中の NeXT 衛星によって、新しい概念に基づいた検出器の提案を行い、軽量であるけれども、非常に高感度なガンマ線検出器の開発を行っている。

本論文では、テルル化カドミウム半導体という、新しい半導体を用い、半導体多重コンプトンカメラ (SMCP)、アクティブ対生成望遠鏡 (APT) といった、われわれが、新しく提案している考えを用いたガンマ線望遠鏡について述べる。この検出器は、極めて多量の信号処理回路が前提となるが、実現すれば、100 kg から 200 kg というような小型衛星を用いて、トンを超える巨大衛星に匹敵するようなサイエンスを行うことが可能である。

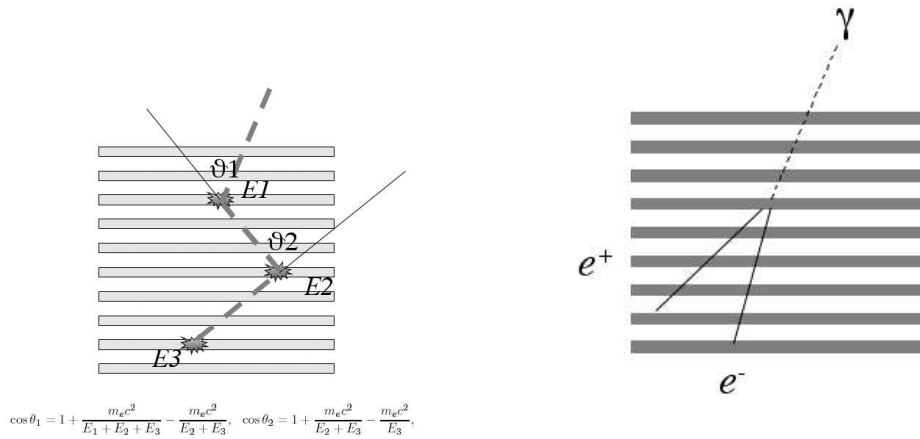


図 2: (左) 多重コンプトンカメラ (SMCP) の原理、(右) アクティブ対生成望遠鏡 (APT) の原理。

2 新しい半導体多重コンプトンカメラ (SMCT) とアクティブ対生成望遠鏡 (APT)

われわれは、検出器の中で起こるコンプトン散乱を効率よく利用し、バックグラウンドとなる雑音ガンマ線を識別する次世代技術として、半導体多重コンプトン望遠鏡 (Semiconductor Multi Compton Telescope : SMCT) の考え (Kamae et al. 1987, Takahashi et al. 2001, 2003, Tajima et al. 2003) に基づいた検出器を開発している。この検出器では、ストリップ検出器やピクセル検出器のような、半導体撮像素子を、数十層にわたって積層し、その中で起こるコンプトン散乱を、各層で、検出された位置とエネルギーとから、コンプトン散乱の運動学 (運動量保存則とエネルギー保存則) に従って再構成するものである (図 2 左)。こうした「コンプトン運動学」を利用する検出器は、従来のガンマ線検出器に比べて、バックグラウンドを劇的に減らすことができるため、高い感度を得ることができる。SMCT で、複数回散乱してから吸収されるような事象では、コンプトン運動学とジオメトリの両方の条件を課すことでバックグラウンドを低減することができる。

数 MeV のガンマ線をコンプトン望遠鏡で検出する場合、テルル化カドミウム半導体は、コンプトン散乱と光電吸収の反応断面積が、シリコンに比べて高いため、従来のように、散乱体と吸収体にわけて考えられていたコンプトン望遠鏡ではなく、それらが一体となったものを作ることが可能である (Takahashi et al. 2003)。また、入射ガンマ線のエネルギーが、数 10MeV の領域では、対生成反応が主要となる。0.5 mm 厚の CdTe は、0.03 r.l (radiation length) に相当し、これは、GLAST 衛星などのコンバーターと同じ厚みとなる。したがって、薄い CdTe を多層に用いることで、対生成を起こすのに十分な厚みを、アクティブな半導体素子で作ることができる。そのため、従来、エネルギーが測定できないために、感度を失っていた 100MeV 以下のガンマ線で、生成された電子と陽電子のエネルギーロスを測ることで、入射ガンマ線のエネルギーを測定し、対生成事象を再構成することができる (図 2 右) (Active Pair Telescope : APT の考え)。

3 小型衛星でのガンマ線観測

数 MeV から数 10MeV のエネルギーでのパイオニア的な観測は、コンプトン GRO 衛星に搭載されたコンプテル検出器によってなされた。コンプテルは液体シンチレータと NaI シンチレータとからなり、全体の重量は 1 トンにもおよぶ巨大なものであったが、その有効面積は、10cm² から 30cm² にしかすぎない。

図 3 に示すように、2cm 角、0.5mm 厚のテルル化カドミウム半導体の撮像素子を 80 段にわたって

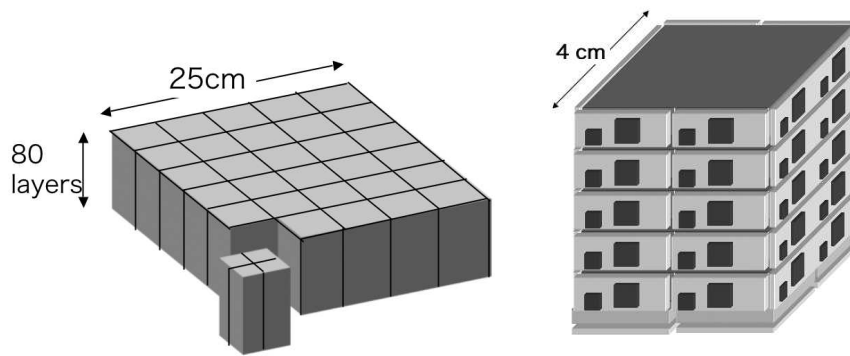


図 3: (左) SMCP/APT の概念図 (右) 80 層の両面ストリップ検出器の 1 ユニットの概念図。

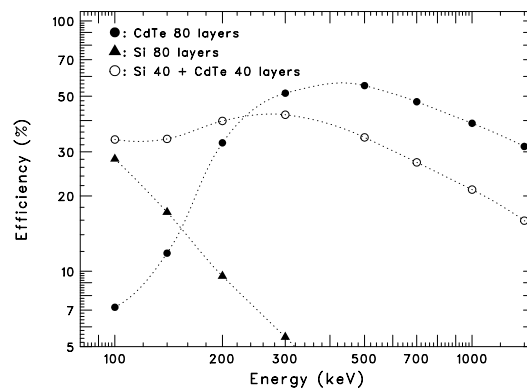


図 4: 図 3 の検出器の効率。80 層の SMCP を、CdTe のみ、あるいは Si と組み合わせた場合とで比較している。

重ねたユニットを、さらに組み合わせた SMCT/APT を作った場合、10 kg の半導体素子で、1MeV での検出効率は、40%と、COMPTEL の有効面積の 10 倍を得ることができる (図 4) (Takahashi et al. 2003)。

このような、超コンパクトな SMCT/APT では、撮像素子の各チャンネルからの信号を読み出し、さらにアナログ値をデジタルに変換していくための回路が大規模になり、100 万チャンネルにもおよぶと考えられる。これを解決するためには、アナログ処理回路を VLSI 化し、超小型化すると同時に低消費電力化する技術が不可欠である。われわれは、すでにこのような試みに着手しており、今までにない低雑音の放射線計測回路を LSI の中に作り込むことに成功している (Tajima et al. 2003)。最終的には、1 チャンネルあたりの消費電力が 20 マイクロ W にまで、おさえる事ができると、考えられているため、100 万チャンネルであったとしても、消費電力は 20W にとどめることができる。今後は、こうした LSI を、どのようにして、検出器に実装していくかという、ハイテク実装技術の開発が鍵となる。

近年の携帯電話や IT 技術の急速な進歩に見られるような小型化技術によって、これまで考えられなかったようなアプローチでサイエンスを行うことが可能となってきた。MeV ガンマ線天文においても、巨大な検出器ばかりではなく新しい概念と高度な次世代技術によって、小型で、かつ、巨大な検出器をはるかにしのぐ高感度検出器が実現できる。SMCT/APT は、従来のガンマ線観測に加えて、広がったガンマ線エミッション、偏光観測、突発現象の探査、高感度ラインガンマ線探査など、さまざまな新しい領域で、その能力を発揮する。こうした検出器を、小型衛星に搭載し (図 5)、粒子バックグラウンドの低い赤道周回の軌道に展開することによって、100 kg 衛星でも 1 トン衛星を上回るサイエンスが可能となるのである。

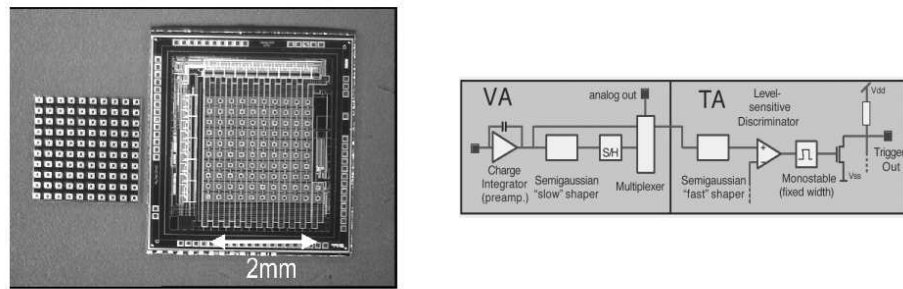


図 5: 本グループが、IDEAS 社とともに開発した、放射線計測用のアナログ LSI。200 ミクロン角のピクセルの中に右のような回路が作り込まれている。

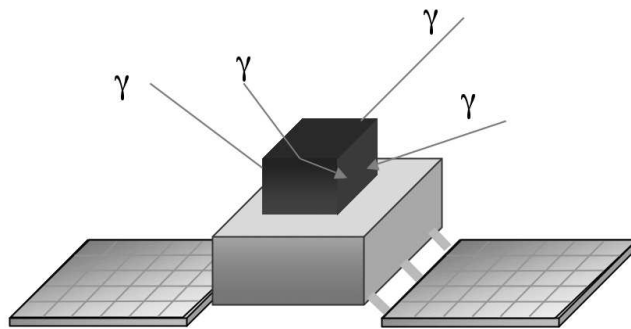


図 6: SMCT/APT を小型衛星に搭載した場合の概念図。非常に広い視野をいかして、全天の MeV ガンマ線源の探査が可能である

参考文献

- [1] T. Kamae, R. Enomoto and N. Hanada, “A New Method to Measure Energy, Direction, and Polarization of Gamma rays”, Nucl. Inst. And Meth. A260 (1987) 254
- [2] H. Tajima, S. Uno, T. Nakamoto, T. Mitani, T. Takahashi, T. Kamae, K. Nakazawa, Y. Fukazawa, Y. Okada, and M. Nomachi, “Low Noise Double-Sided Silicon Strip Detector for Multiple-Compton Gamma-ray Telescope”, to appear in SPIE, 2003.
- [3] T. Takahashi, T. Kamae, K. Makishima, “Future Hard X-ray and Gamma-ray Observations” (Astronomical Society of the Pacific Conference Series), vol 251, pp. 210-213, 2001.
- [4] T. Takahashi, K. Nakazawa, T. Kamae, H. Tajima, Y. Fukazawa, M. Nomachi, and M. Kokubun, “High resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope”, to appear in SPIE, 2003.