

# X線・ガンマ線観測による宇宙と素粒子

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 宇宙の加速器と X 線・ガンマ線観測

近年、ほとんど光の速さにまで加速された荷電粒子が超新星残骸から、銀河団、そしてブラックホールから吹き出すジェットにいたるまでさまざまな環境で見られる、宇宙の普遍的な存在であると考えられるようになってきた。これは、宇宙線として非熱的な形態をとるエネルギーが宇宙全体の中で大きな役割を果たしていることを示唆する。

宇宙での X 線・ $\gamma$  線領域は、こうした宇宙の非熱的な現象を探る大切な「窓」である。特に、加速され光速に近いスピードをもつ荷電粒子に伴う「非熱的放射」を探ることによって粒子の加速現場や、粒子の最高エネルギーやエネルギー収支などの理解を進めることができる。また、 $\gamma$  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。これまでに X 線天文学は ASCA、Chandra、XMM/Newton など X 線反射鏡を用いた X 線衛星により格段の進歩をとげてきた [1, 2]。21 世紀の高エネルギー天文学においては、X 線領域 ( $<10$  keV) を超え、硬 X 線や  $\gamma$  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、これまで十分に観測が及ばなかった粒子の加速や、ブラックホール近傍の強い重力場からの  $\gamma$  線放射、未知の素粒子や原子核の現象を探るなど、新しい非熱的な宇宙を探ることが目標となっている [3]。

超新星爆発などによって形成される強い衝撃波は、宇宙線加速の有力な現場と考えられている。こうした「宇宙の加速器」で加速された電子の場合、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などを通じて広い波長域で非熱的な放射を示す。放射の機構の違いにより、高いエネルギーにまで加速された粒子がどのような波長域で典型的な放射を行うかが異なる。SN1006 や RXJ1713.7-3946 などの超新星残骸から観測された非熱的な分布を持つ X 線 [4, 5] が、磁場中のシンクロトロン放射によるものだとするとその電子の典型的なエネルギーは、

$$E = 115 \left( \frac{h\nu}{2\text{keV}} \right)^{1/2} \left( \frac{B}{10\mu\text{G}} \right)^{-1/2} (\text{TeV}) \quad (1)$$

のようにあらわされ、X 線強度は 100 TeV を超えたエネルギーにまで加速された電子の分布を反映する。電子のシンクロトロン放射による冷却のタイムスケールは

$$\tau = 1250 \left( \frac{E_e}{100\text{TeV}} \right)^{-1} \left( \frac{B}{10\mu\text{G}} \right)^{-2} (\text{年}) \quad (2)$$

とあらわされるため、 $10\mu\text{G}$  の磁場では 160 TeV の電子は 1000 年ほどの寿命でしかない。したがって、たとえば  $1000\text{km/s}$  というような衝撃波の速度を考えた場合、こうした電子は約 1 パーセク (pc) の距離しか進まないことになる。これは、 $10^8$  年というような長い寿命を持つ GeV 領域の電子が関わる電波領域での観測と大きく状況を異にし、X 線観測では、加速器によって入射されたばかりの高いエネルギーの粒子の分布を探ることができることを示す。近い将来、硬 X 線領域での撮像観測が可能になると超新星残骸での加速限界といわれる PeV ( $10^{15}$  eV) 領域の粒子加速器の詳細に迫ることができるようになると期待される [6]。一方、TeV $\gamma$  線は、加速された電子が逆コンプトン散乱により宇宙背景放射の光子などソフトな光子を叩き上げることによって説明できるため [7]、X 線と同様に数 100TeV というようなエネルギー領域の電子に対するプローブということになる。また、電子と同等に陽子が加速されている場合には、分子雲などのターゲットとの反応でパイ中間子からの崩壊による  $\gamma$  線が期待されるが、これは数 100MeV から GeV 領域に感度の高い検出器によって詳細に探ることが可能である。

X 線天文学は、銀河団という宇宙の大規模構造が、銀河の単なる集まりではなく、10 倍もの質量をになうガスが数千万度の超高温のプラズマ球を形成していることを発見した。X 線で詳細な観測を行うことに

より、この超高温プラズマ球が  $10^{64}$ erg もの巨大エネルギーで衝突、合体を繰り返し、より巨大な銀河団に進化する姿が明らかにされつつある。最近の電波と X 線観測から、銀河団において、ほぼ光速に加速された電子からの電磁放射の存在が示唆されている [8, 9]。こうした電子による非熱的放射のルミノシティは、高温プラズマによる熱的なルミノシティの 1%程度であるが、陽子が電子の 100 倍というような宇宙線の組成を持つ場合、陽子が担うエネルギーを考慮すると、非熱的エネルギーの総量が熱的エネルギーと同程度あることになり、非常に重要な問題を提起することになる。こうした銀河団の「隠された非熱的エネルギー」は、今後の高エネルギー宇宙物理学の重要な課題である。また、宇宙線の観測から、 $10^{20}$ eV というような最高エネルギーの加速が宇宙のどこかで行われている事が知られているが、その加速器の正体は明らかになっていない。衝撃波加速の理論からは、より大きな空間的スケールをもった環境ほど高いエネルギーの粒子加速が行われると考えられている。Mpc にもおよぶスケールを持つ銀河団こそ、こうした「超巨大加速器」なのかもしれない。

## 2 NeXT 衛星

Astro-E2 衛星の後継機として、2010 年頃の打ち上げをめざして提案されている NeXT 衛星は、加速された粒子からの非熱的電磁放射を広い波長域で観測することで、非熱的エネルギーを担う粒子の加速現場の環境、ひいては「宇宙の加速器」の構造を知り、非熱的エネルギーの源を探ることを目的としている [10]。とくに、80keV まで集光可能なスーパーミラーと、その焦点面におかれ硬 X 線領域で高い感度を持つ広帯域撮像検出器は、世界にさきかぎって超新星残骸や銀河団などの硬 X 線撮像観測を行うものである。スーパーミラーがカバーするエネルギー領域は 0.3 keV から 80 keV という広いエネルギー範囲におよぶ。一方で、10 keV を超えるエネルギー領域では、従来、X 線検出のために用いられてきたシリコンは透明になってしまう。そのため、背面照射型 X 線 CCD にテルル化カドミウムピクセル検出器 [11] を組み合わせた、超広帯域のハイブリッド型撮像検出器が提案されている。NeXT 衛星では、この硬 X 線撮像システムに加え、加速された粒子の最大エネルギーを知り、非熱的粒子の総エネルギーを求めるための高感度  $\gamma$  線観測装置 (Soft Gamma ray Detector : SGD)、またプラズマ温度のみならずその速度場の詳細構造までも決定できる高いエネルギー分解能の軟 X 線分光撮像観測装置を搭載する計画である。

## 3 GeV ガンマ線観測 - 対生成望遠鏡 -

2007 年に打ち上げが予定されている  $\gamma$  線衛星 GLAST の LAT 検出器は、対生成反応を通じて入射  $\gamma$  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。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 にもおよび、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 検出器が到達した能力を大きく凌駕する [12]。LAT 検出器は、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) と薄いタンゲ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  $\gamma$  線で 0.1 度という角度分解能が得られる。また、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  $\gamma$  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  $\gamma$  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。

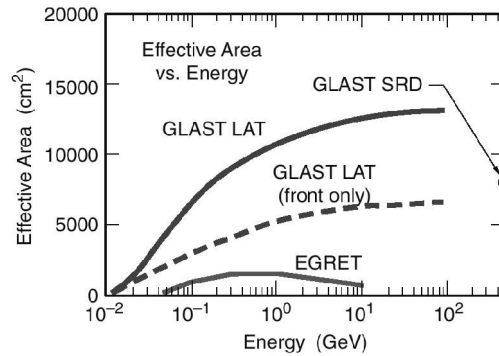
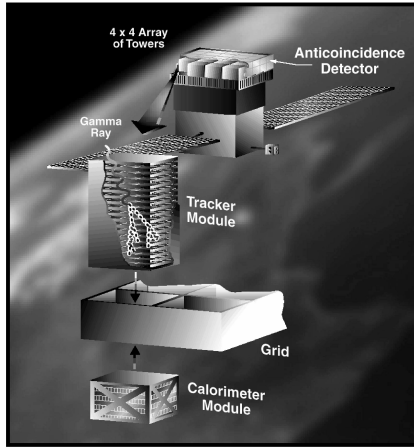


図 1: (左) GLAST 衛星 (右) LAT 検出器の有効面積の EGRET 検出器 (CGRO 衛星) との比較

#### 4 非熱的宇宙を探るために - 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  $\gamma$  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。図から明らかのように  $\gamma$  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、 $\gamma$  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。この領域を改善する試み  $\gamma$  の一つが前述の NeXT 衛星のスーパーミラーと広帯域撮像検出器である。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  $\gamma$  線の方向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。

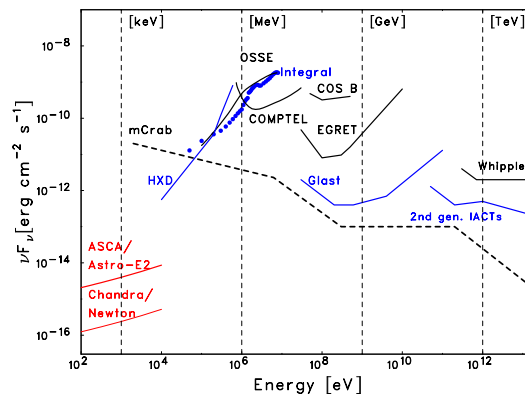


図 2: X 線から  $\gamma$  線にかけての感度の比較。Crab Nebula の 1/1000 の強度 (1 mCrab) に対応するスペクトルを重ねてある。数 10 keV から数 10 MeV の領域が感度のギャップになっている事がわかる。

MeV 領域での  $\gamma$  線観測は、他の  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  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出器を用いるかぎり<sup>1</sup>、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。CGRO 衛星に搭載された COMPTEL は、観測の非常に困難な MeV $\gamma$  線の領域で、パイオニア的な成果をあげた [13]。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 - 50cm<sup>2</sup> と非常に小さい。

数 100keV 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 [14]。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)[15] やガスマイクロ TPC を散乱部に用いた検出器 [16] など、特徴をもった技術にもとづいた次世代コンプトン  $\gamma$  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 $\gamma$  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  $\gamma$  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 [17]。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  $\gamma$  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] 井上一他：小特集：X 線天文衛星「あすか」、物理学会誌第 56 巻第 12 号、903、2003
- [2] 満田和久：X 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] 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）
- [4] K. Koyama et al., ‘Evidence for shock acceleration of high-energy electrons in the supernova remnant SN 1006’, Nature, 378, 255?258, 1995.
- [5] Y. Uchiyama, F. Aharonian, T. Takahashi, “Fine-structure in the nonthermal X-ray emission of SNR RX H1713.7-3946 revealed by Chandra”, *A&A*, **400** (2003) 574.
- [6] 内山泰伸 “Study of Non-thermal X-ray Emission Produced by Sub-relativistic and Ultra-relativistic Particles in Supernova Remnants”, 東京大学、博士論文、2004
- [7] T. Tanimori et al., “Discovery of TeV gamma rays from SN 1006: further evidence for the supernova remnant origin of cosmic rays”, *Astrophys. J.*, 497, L25?L28, 1998.
- [8] R. Fusco-Femiano et al., “Beppo-SAX OBSERVATION OF THE COMA CLUSTER”, *Astrophys. J.*, 513, L21?L23, 1998.
- [9] R. Fusco-Femiano et al., “Hard X-Ray Emission from the Galaxy Cluster A3667”, *Astrophys. J.*, 552, L97-L100, 2001.
- [10] NeXT 衛星計画提案書, NeXT 衛星ワーキンググループ, 2003.
- [11] 高橋忠幸、中澤和洋: CdTe/CdZnTe を用いたガンマ線検出器と宇宙観測への応用、物理学会誌、1, pp.26-34, 2004.
- [12] GLAST 衛星ホームページ (<http://www-glast.stanford.edu/>)
- [13] V. Schönfelder et al., “Instrument Description and Performance of the Imaging Gamma-ray Telescope COMPTEL aboard the Compton Gamma-ray Observatory”, *ApJS*, 86, 657. 1993.
- [14] Astronomy with Radioactivities IV and Filling the Sensitivity Gap in MeV Astronomy, 2003, Seeon (<http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/workshops/seeon03>)
- [15] T. Takahashi et al., “High resolution CdTe detectors for the next generation multi-Compton gamma-ray telescope”, *SPIE*, 4851, 1228, 2003.
- [16] T. Tanimori et al., “MeV Gamma-ray Imaging Detector with micro-TPC ”, *New Astronomy Reviews*, 48, 263, 2004.
- [17] T. Takahashi et al., “Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the NeXT mission”, *New Astronomy Reviews*, 48, 269, 2004.

<sup>1</sup>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。