

連載講座

放射線イメージング技術の最前線(第5回)

# X線・ $\gamma$ 線による 宇宙放射線イメージング

高橋忠幸

Reprinted from  
RADIOISOTOPES, Vol.53, No.2  
February 2004



Japan Radioisotope Association

<http://www.jrias.or.jp/>

## 連載講座



## 放射線イメージング技術の最前線 (第5回)

X線・ $\gamma$ 線による宇宙放射線イメージング<sup>†</sup>

高橋忠幸

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部  
229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1

Key Words : X ray astronomy, gamma ray astronomy, cosmic ray, science mission

## 1. はじめに

光による天文学が、人類の歴史ほど古くから始まったのに対して、X線による天文学の歴史は極めて短い。それは、X線がほとんど大気に吸収されてしまい、地上で観測することができないからである。そのため、宇宙にX線で輝いている天体が数多く存在するということを、人類が知ったのはロケットという大気圏外に出る手段を持ってからである (図1 参照)。

太陽系外の天体がX線で輝いている事が初めてわかったのは、1962年のジャコーニ (2002年、X線天文学の創設によりノーベル賞受賞) らのグループによるロケット実験である。その後の研究により、思いもかけないほどの明るさで輝いていたX線天体の正体が、中性子星と呼ばれ星の一生の最期に到達する天体からのものであること、更に理論上の産物とされていたブラックホールという天体からもX線が放射されていることなどがわかり、X線天文学は劇的な進歩をとげた。日本は、X線天文学の黎明期から参画し、1993年に打ち上げられた「あ

すか」衛星にいたるまで、すでに4機のX線天文衛星を打ち上げて、これまでに大きな貢献をしてきた<sup>1)</sup>。

6000度の太陽の表面が可視光で明るく輝いているのに対し、X線を放射するのは、数千万度、あるいは1億度といったような超高温のガスである。銀河系内のブラックホールの場合では、連星系の相手の星から流入してきたガスがブラックホールに落ち込む過程で摩擦により熱せられ、落ち込む直前で超高温の状態になってX線が放射されるとして多くの現象が説明できる。このようにX線や $\gamma$ 線を用いることで、光や電波では観測できないような、巨大な重力

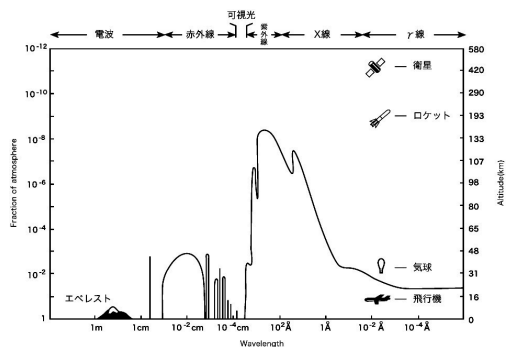


図1 電磁波の大気による吸収。大気外からくる種々の波長の電磁波が到達できる高度を波長の関数として示したもの。紫外線よりも波長の短い光は大気に吸収されて地上には届かない

<sup>†</sup>The Front of Radiation Imaging Technique(5). X-ray・ $\gamma$ -ray Imaging Observations in Space. Tadayuki TAKAHASHI: Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), JAXA, 3-1-1, Yoshinodai, Sagami-hara-shi, Kanagawa Pref. 229-8510, Japan.

や宇宙の加速器が関わる宇宙の極限環境を調べることが可能になるのである。

実験室でおなじみの放射性同位体は、宇宙においても、重要な役割を果たす。酸素、シリコン、鉄、あるいはその他の重い元素は宇宙の創世時からあったのではなく、星の中で作られ、超新星爆発によって宇宙空間にまき散らされた。X線や $\gamma$ 線の観測を行い、元素に特有な蛍光X線や、核 $\gamma$ 線を観測することによって、こうした元素が、どこでどの位作られたか、更に、銀河がどのようにして誕生し、物質が生まれ、循環して、生命につながっているかを調べることができる。

X線や $\gamma$ 線は電荷を持った粒子と異なり、磁場によって方向は変わらない。そのため、発生源を直接研究することができる。図2に示すように、X線領域ではイメージング技術の進歩にともない、ほとんど全ての種族の天体からX線が放射されていることが明らかになっている。一方、 $\gamma$ 線領域では数十keVから数十GeVの観測を行ったコンプトン衛星(1991~2000年)によって理解が進んだ<sup>2)</sup>ものの、感度の高い検出器を作るのが難しく、X線のような高い空間分解能のイメージが得られていない。本稿では、X線によるイメージング技術について簡単に触れたあと、宇宙 $\gamma$ 線のイメージング技術の現状と将来、及び、 $\gamma$ 線天文学について述べる。

## 2. 宇宙X線によるイメージング

X線領域でイメージングを行うためには、到来するX線の方向を知ることが必要である。X線で輝く天体が発見されたとき、その正確な位置を求めるために、X線天文学の創設者の一人である小田 稔氏が考案したすだれコリメータが大活躍したが、現在ではX線望遠鏡が広く用いられている<sup>3)</sup>。

X線が真空中から金属面すれすれに入射すると、全反射が起こる。これを利用してX線画像を得ることができる。図3に示すように斜入射X線反射望遠鏡は、こうした反射鏡を同心

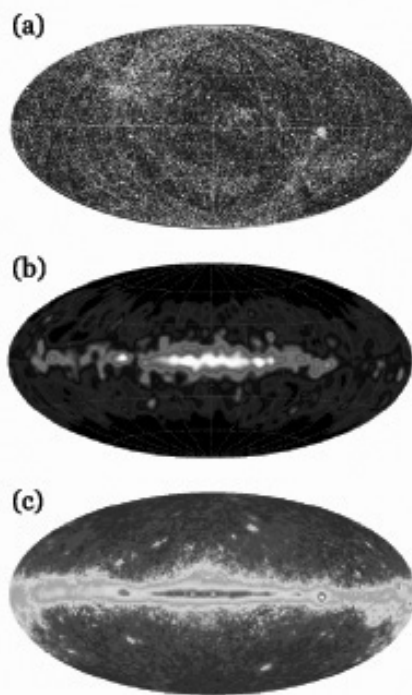


図2 X線、 $\gamma$ 線による全天のイメージング  
(a) ROSAT 衛星による 0.1~3 keV の X 線 (マックスプランク研究所(独)提供) (b) コンプトン衛星の COMPTEL 検出器による 1~30 MeV の  $\gamma$  線 (マックスプランク研究所(独)提供) (c) コンプトン衛星の EGRET 検出器による 100 MeV~10 GeV の  $\gamma$  線 (NASA/GSFC 提供)

円状に並べることにより反射面積を大きくしたものである。2005年に打ち上げが予定されている日本の Astro-E2 衛星に搭載される X線望遠鏡(図4)では、厚さ 0.16 mm のアルミフォイルを反射鏡の形に整形し、その上に金をコーティングしたものを、170 層も同心円状に並べたものである。直径 40 cm の鏡によって得られる集光面積は、6.7 keV 付近で約 250 cm<sup>2</sup>、4 台合計で 1 000 cm<sup>2</sup> にもおよぶ。Astro-E2 の X線望遠鏡の空間分解能は 1 分程度である。これに対してチャンドラ衛星(米)では、反射鏡 1 枚あたりの厚さを確保し、その表面精度を極限近くにまで改善することによって、

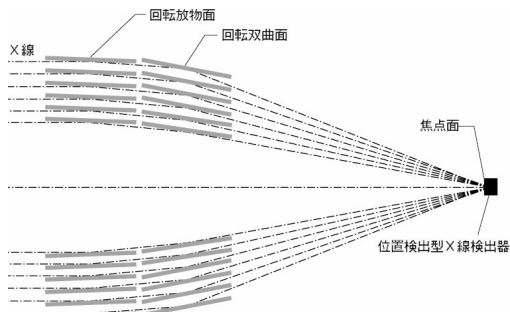


図3 X線の全反射を利用した斜入射X線反射望遠鏡の原理。回転放物面と回転双曲面で2回反射させることにより光軸から離れた方向での収差を小さくしている

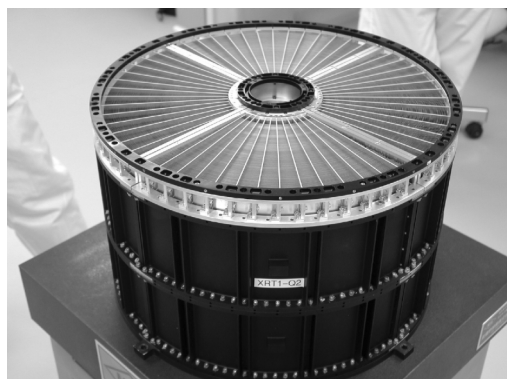


図4 Astro-E2衛星に搭載されるX線反射鏡。約170層の斜入射X線反射望遠鏡が同心円状に配置されている(JAXA/ISAS提供)

0.5秒角の空間分解能を実現している(図5)。ただし、1.2mの直径の望遠鏡に4枚しか鏡を同心円に並べることができず、有効面積は200 cm<sup>2</sup>と小さい。

宇宙X線の観測においては、イメージングを行うのと同時に、スペクトルを取得することが重要である。それは、高温ガスからのX線放射は、温度、含まれる元素の種類や密度によって多様なスペクトルを示すからである。

「あすか」衛星は、位置比例蛍光X線検出器とともに、世界で初めてX線CCDを焦点面検出器として搭載しX線光子一つひとつのエネ

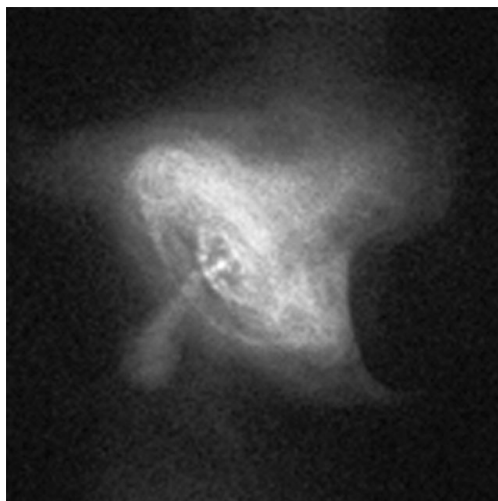


図5 チャンドラ衛星によるかに星雲のX線画像。中心にあるパルサーの周りの構造が0.5秒角の空間分解能でとらえられている。画像の一边は2.24分角(NASA/CXC/ASU提供)

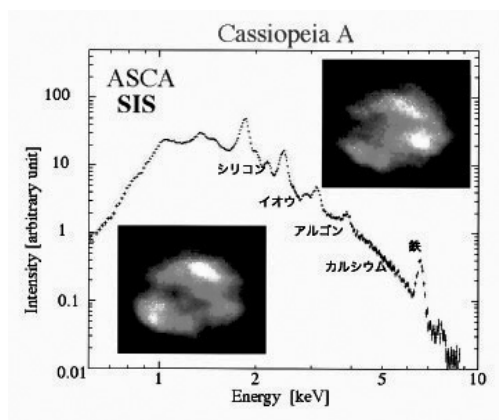


図6 超新星残骸カシオペア座-AのX線像とX線スペクトル。リング状に見える超新星残骸の直径は約2.5分角。X線スペクトルには、マグネシウムから鉄までのイオンからの輝線放射がみられる(JAXA/ISAS提供)

ルギーを測ると同時にイメージを撮像することで超新星残骸における元素の分布を詳細に調べる事に成功した(図6)。

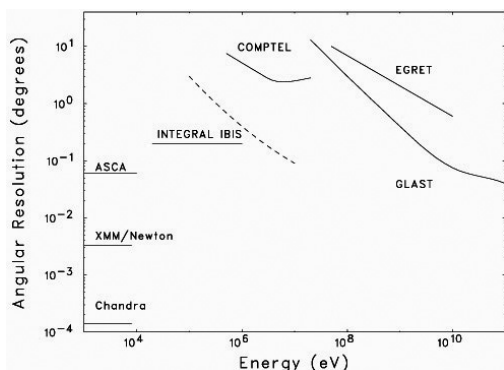


図7 角度分解能。点線はシリコンを散乱体として用いた場合のコンプトン望遠鏡の角度分解能の限界。GLASTは2007年に打ち上げが予定されている

### 3. 宇宙 $\gamma$ 線によるイメージング

$\gamma$  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ほか、MeV  $\gamma$  線領域ではコンプトン散乱を、GeV  $\gamma$  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<sup>4)</sup>。図7に、X線からGeV  $\gamma$  線領域において到達されてきた角度分解能を示す。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、 $\gamma$  線、特にMeV領域の $\gamma$  線では数度程度であることがわかる。

#### 3.1 コーデッドマスク

コーデッドマスクを用いたイメージングでは、検出器の上部に $\gamma$  線を通す開口部分と遮る部分とが、半々の割合で配置されたマスクが置かれている。この場合、一つひとつの開口部が、ピンホールカメラの穴に対応していると考えればよく（図8）、検出器に観測される画像は、複数のピンホールカメラの画像の重ね合わせに

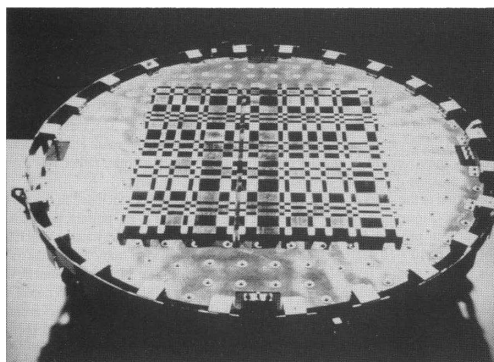


図8 グラナット衛星に搭載されたSIGMA検出器に用いられたコーデッドマスク

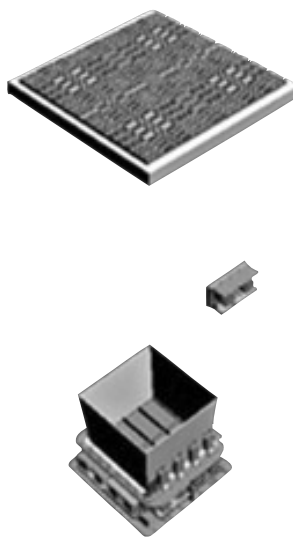


図9 インテグラル衛星に搭載されたIBIS検出器の概念図(ESA提供)

なる。したがって、取得した画像からフーリエ変換などの、数学的な手法を用いて光源の像を再構成することになる。インテグラル衛星のSPIと呼ばれる検出器では、ゲルマニウム素子を19個並べることで、優れたエネルギー分解能に若干のイメージング能力を加えたものであるが、IBIS検出器では、4 mm角で2 mm厚のCdTe素子を16384個しきつめた撮像検出器がマスクの下に置かれている（図9）。画像の

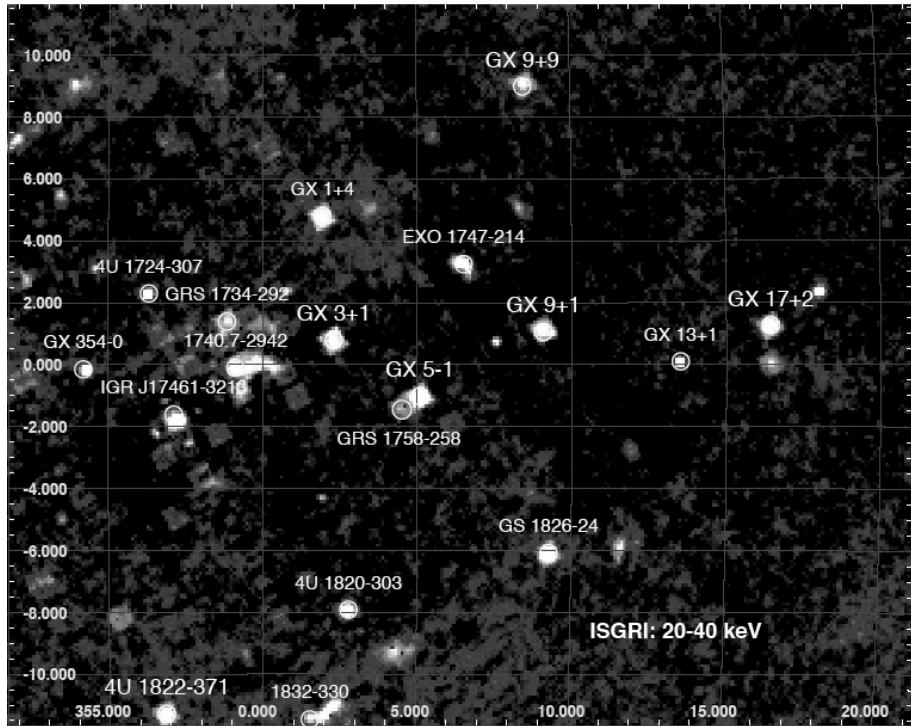


図10 IBISによって観測された20～40 keVの領域での $\gamma$ 線イメージ。銀河中心方向の明るい中性子星と低質量星との連星系からの $\gamma$ 線が観測されている(A. Paizis 他, Astronomy & Astrophysics 誌, 2003)

分解能は、マスクに空いている穴の大きさとマスクの検出器までの距離、及び検出器の位置分解能によって決まり、SPIは2度角、またIBISは12分角である。図10にIBISによって観測された銀河面のイメージを示した。

### 3・2 コンプトン望遠鏡

コンプトン散乱が主な反応となるMeV領域での $\gamma$ 線観測は、他のエネルギー領域に比べてもっとも困難である。それは、コンプトン散乱では $\gamma$ 線と物質との相互作用の確率が光電効果に比べて小さいのに加え、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渡し、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。

コンプトン散乱をうまく利用した $\gamma$ 線検出器がコンプトン望遠鏡である。コンプトン衛星に搭載されたCOMPTEL(図11)では2層の

検出器を用い、1層目を散乱体として用いて、この層でコンプトン散乱を起こして散乱された電子と、散乱後、2層目の吸収体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、及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 $\gamma$ 線光子の到来方向が頂角 $\theta$ を持つ円錐面に制限され、天空上でこの方向は円環として与えられる。複数の $\gamma$ 線による円環を重ねることで $\gamma$ 線の天体の位置を決めるのである。電子のエネルギーばかりではなく、散乱した方向をも検出することができるような検出器を散乱体として用いている場合は、 $\gamma$ 線の到来方向は、円環上で、一点あるいは弧として求まる。

COMPTELは、観測の非常に困難なMeV $\gamma$ 線の領域で、パイオニア的な観測を行い大きな成果をあげた。コンプトン望遠鏡は散乱体でコ

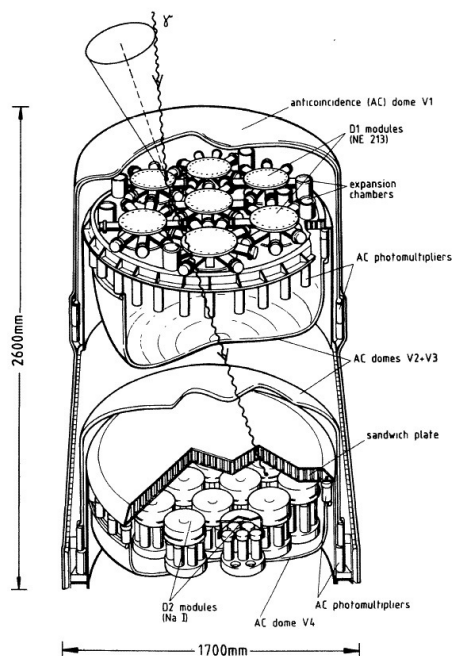


図11 コンプトン衛星のCOMPTEL検出器。散乱体にはコンプトン散乱の確率が光電吸収の確率に比べて大きくなるように液体シンチレータを用い、吸収体にはヨウ化ナトリウム結晶で作られたシンチレータを用いている (マックスプランク研究所(独)提供)

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。COMPTELは1500 kg近い重量を持ちながら、有効面積が20~50 cm<sup>2</sup>と非常に小さかったために、明るい天体しか観測できなかったのが現状である。角度分解能が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%程度であった (図12)。

数百 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。筆者らが開発しているのは、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化カドミウム撮像素子<sup>5)</sup>

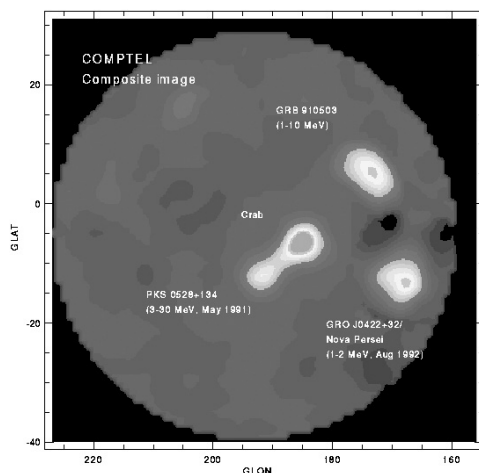


図12 COMPTELによって得られた銀河中心の反対方向の MeV $\gamma$  線画像。異なる時期に取得した画像を重ねている。明るい天体でも1度程度の位置分解能力である(マックスプランク研究所(独)提供)

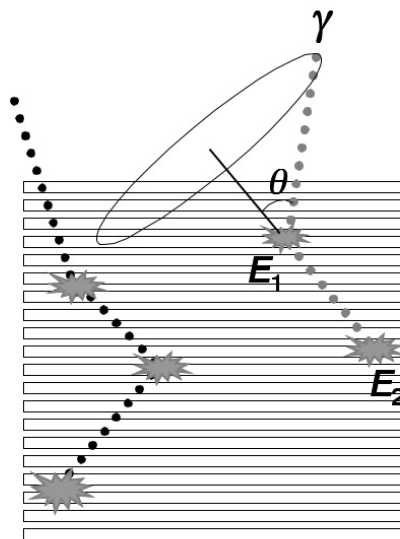


図13 半導体多層コンプトン望遠鏡の概念図。右のように1回コンプトン散乱して吸収された事象ばかりではなく、左のように複数回コンプトン散乱した事象も、入射 $\gamma$ 線のエネルギーと到来方向とを求めることができる

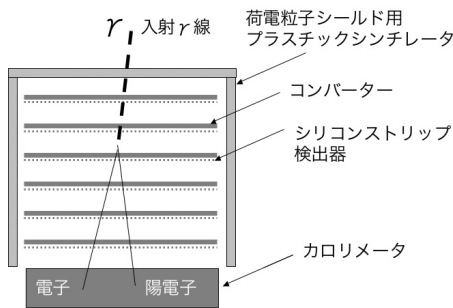


図14 対生成検出器の原理

とを数十層にわたって積層した新しいコンプトン望遠鏡である。シリコンやテルル化カドミウムを組み合わせることで、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。この検出器は、高いコンプトン散乱の反応断面積を持ち、小型の検出器でも大きな有効面積を持つとともに、広い視野を得ることができる。

コンプトン散乱の散乱角 ( $\cos\theta$ ) は、散乱体で吸収されたエネルギーを  $E_1$ 、吸収体でのエネルギーを  $E_2$  とすると

$$\cos\theta = 1 - mc^2[1/E_2 - 1/(E_1 + E_2)]$$

で与えられる。そのため、散乱体や吸収体として高いエネルギー分解能を持つ検出器を用いることで角度分解能が改善される。一方、散乱の相手となる物質中の電子が有限の運動量を持つため、実際に得られる角度分解能には限界がある（ドップラー限界）。

### 3.3 対生成望遠鏡

ターゲットとする $\gamma$ 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 $\gamma$ 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ことができる。コンプトン衛星の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 $\gamma$ 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。飛跡検出器の下には数GeVの高いエネルギーの電子や陽電子を吸収できるような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置かれて、対生成した電子や陽電子のエネルギーが測定された。

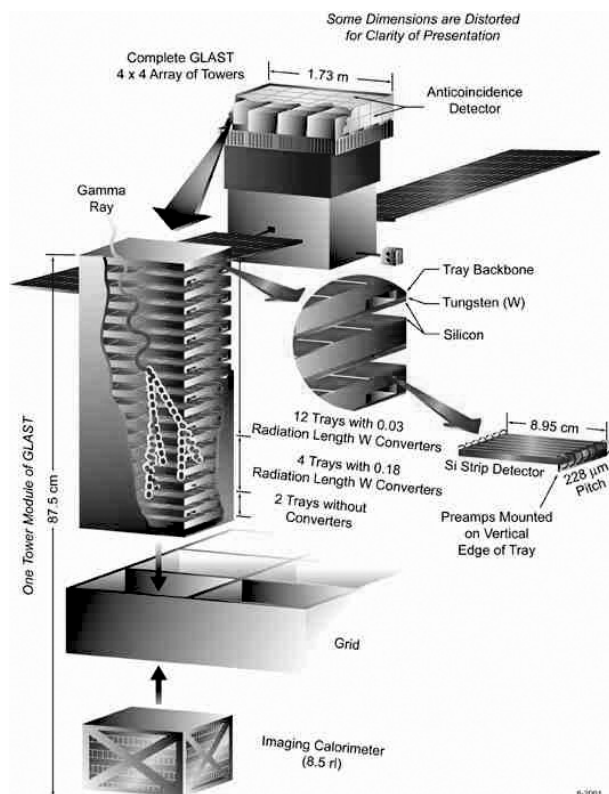
反応で生成する電子と陽電子のなす角は、入射 $\gamma$ 線のエネルギーが高いほど小さく、その方向から $\gamma$ 線の到来方向を知ることができる。エネルギーが低いと、作られた電子や陽電子が物質中で多重散乱を起こすため、すぐに持っていた方向の情報を失ってしまう。

2007年に打ち上げが予定されている $\gamma$ 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、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コンプトン衛星のEGRET検出器を大きく凌駕する。トラッカー部は228  $\mu\text{m}$  ピッチの細い電極を多数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を18層重ねてできている。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  $\mu\text{m}$ を上回る高い精度で記録することができる。そのため、数GeVの $\gamma$ 線で0.1度という角度分解能が得られる。

## 4. $\gamma$ 線天文学

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、 $\gamma$ 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スピードを持つ荷電粒子にともなう放射が主体となる。そのため、 $\gamma$ 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、



図15 GLAST 衛星の概念図<sup>6)</sup>

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。

$\gamma$ 線による観測の一例として、核 $\gamma$ 線による宇宙の放射性同位体の測定があげられる。超新星は星の進化の最後の段階でみられる爆発的な現象である。その爆発の瞬間に起こる激しい核反応によって、鉄よりも重い元素が合成され、同時に $\gamma$ 線を放出する放射性同位体がつくられる(表1)。この放射性同位元素が爆発で膨張するガスを輝かせるのである。もし、放射性同位体が崩壊する時に放出するエネルギーの決まった核 $\gamma$ 線を測ることができれば、生成された放射線同位体の量を直接調べることができる。

また、寿命の異なる放射性同位体からの核 $\gamma$ 線が銀河系の中にどのように分布しているかを測定することで、銀河系における超新星爆発の

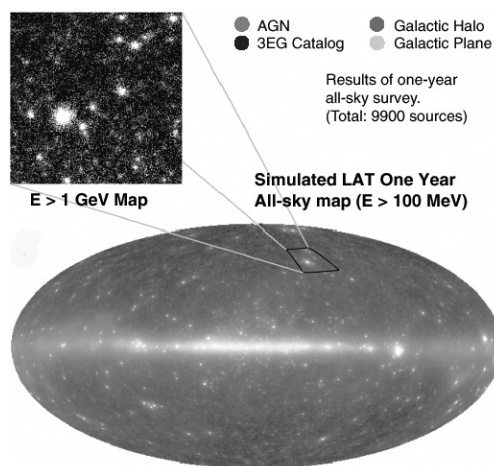
図16 GLAST 衛星によって期待される GeV $\gamma$ 線全天マップ。図2の EGRET によるものと比べて圧倒的に解像度が向上する<sup>6)</sup>

表1 超新星爆発から予想される主な核 $\gamma$ 線

放射性 同位元素	平均寿命	$\gamma$ 線エネルギー (keV)
$^7\text{Be}$	77 日	478
$^{56}\text{Co}$	111 日	847, 1238
$^{57}\text{Co}$	390 日	122
$^{22}\text{Na}$	3.8 年	1275
$^{44}\text{Ti}$	89 年	78, 68, 1157
$^{26}\text{Al}$	$1.04 \times 10^6$ 年	1809
$^{60}\text{Fe}$	$2.0 \times 10^6$ 年	59, 1173, 1332

歴史を知り、ひいてはその生い立ちを知ることができる。COMPTELは、我々の銀河系において、平均寿命が $10^6$ 年の $^{26}\text{Al}$ からの1.8 MeVの $\gamma$ 線の強度分布を測定し、強度の高いいくつかの場所を発見した。これらのうちのあるものは銀河の腕に位置し、大量に星が生まれ、その結果、多くの超新星爆発を起こしていると考えられている場所に一致している。

電子は安定な素粒子で、真空中では他の粒子に崩壊しないが、その反物質の陽電子も安定である。ただし電子と陽電子とが出会うと2個あるいは3個の光子を出して消滅する。前者の場合は、電子（陽電子）の質量と同じ511 keVの $\gamma$ 線が、それぞれ反対の方向に2個の光子として放出される。この $\gamma$ 線を電子・陽電子消滅線と呼ぶ。

電子・陽電子の消滅 $\gamma$ 線が銀河中心付近に存在することが1970年に大気球を用いた観測で発見されて以来、その起源が $\gamma$ 線天文学の大きな話題となってきた。1997年に、コンプトン衛星のOSSE検出器はこの電子陽電子消滅 $\gamma$ 線が銀河面に沿って広がっていることを示す一方で、更に銀河中心に強く集中していること、そして中心から銀河の北極に向かう方向に広がっている成分もあることを発見し（図17）、議論的となった。OSSEは数度の角度分解能しかなく、またエネルギー分解能も不十分である。INTEGRAL衛星をはじめとした、新しい $\gamma$ 線検出器の登場が望まれる。

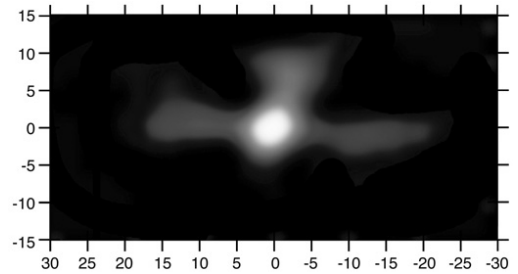


図17 コンプトン衛星のOSSE検出器が観測した電子陽電子消滅 $\gamma$ 線（511 keV）の分布。コリメータを用い、我々の銀河の中心付近を銀経 $\pm 30$ 度、銀緯 $\pm 15$ 度にわたってスキャンして作った画像。銀河面に沿った分布のほかに、銀河中心上方部に明るい分布がみられる（NASA提供）

コンプトン衛星のEGRET検出器は、GeV $\gamma$ 線の領域でイメージング観測を行い、数多くの正体不明の天体を発見した。その分布などから、これらの多くは、我々の銀河系の中に位置すると考えられているが、検出器の角度分解能が低いこともあり、他の波長で候補天体を同定できていない。こうした「 $\gamma$ 線未同定天体」の正体は、21世紀の $\gamma$ 線衛星が解くべき大きな課題の一つである。特に、2007年に打ち上げられるGLAST衛星のもたらす高い角度分解能での $\gamma$ 線観測は、こうした状況を一変させると期待されている。

## 5. おわりに

宇宙でのX線・ $\gamma$ 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。2005年に打ち上げが予定されている日本のAstro-E2衛星には、衛星として史上初めてX線マイクロカロリメータが搭載される。この検出器はX線光子により検出器中に生じた温度上昇を100万分の1度ケルビンの精度で測定するもので、6.7 keVのX線に対して6 eV（FWHM）というエネルギー分解能を得ている<sup>3)</sup>。同時に搭載される高感度の $\gamma$ 線検出器（HXD）は、数百 keV までの領域で従来の $\gamma$ 線検出器と比



図 18 2002 年に打ち上げられたインテグラル衛星の外観 (ESA 提供)

較して 1 桁低いバックグラウンドを達成しようとするものである。更に、将来の衛星のために、ブラッグ反射を応用し、80 keV 程度までイメージングが可能な硬 X 線望遠鏡<sup>6)</sup>や、次世代のコンプトン  $\gamma$  線望遠鏡などの技術開発も進められている<sup>4)</sup>。21 世紀の高エネルギー天文学においては、これまで観測が進んできた X 線や GeV 領域の  $\gamma$  線に加えて、サブ MeV/MeV 領域の  $\gamma$  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、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、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。

## 文 献

- 1) 井上 一, X 線天文衛星「あすか」, 物理学会誌, **56**(12), 903(2003)
- 2) Gehrels, N. and Paul, J., *Physics Today*, **51**, No.2, 26 (1998); 釜江常好訳, 新しい  $\gamma$  線天文の展開, パリティ 11 月号(1998)
- 3) 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)
- 4) 高橋忠幸,  $\gamma$  線天文学, 21 世紀の宇宙観測(家正則監修), 誠文堂新光社(2003)
- 5) 高橋忠幸, 中澤和洋, CdTe/CdZnTe を用いた  $\gamma$  線検出器と宇宙観測への応用, 物理学会誌, **59**(1), 26-34(2004)
- 6) 山下広順, 国枝秀世, X 線スーパーミラー, 応用物理学会誌, **66**(12), 1359-1360(1997)