

電子飛跡検出型広視野コンプトンカメラによる sub-MeV および MeV ガンマ線観測気球実験の結果と展望 (SMILE 実験)

谷森 達*, 服部 香里*, 株木 重人*, 窪 秀利*,
黒澤 俊介*, 井田 知宏*, 岩城 智*, 身内 賢太郎*,
水田 栄一**, 永吉 勉*, 西村 広展*, 野中 直樹**,
岡田 葉子*, 折戸 玲子*, 高田 淳史**, 高橋 慶在*, 上野 一樹*

Result and Prospect for Balloon-Borne Experiments of Sub-MeV and MeV Gamma-ray Astronomy using an Electron-Tracking Compton Camera

By

T.Tanimori*, K.Hattori*, S.Kabuki*, H.Kubo*, S.Kurosawa*, C.Ida*, S.Iwaki*,
K.Miuchi*, E.Mizuta**, T.Nagayoshi*, H.Nishimura*, N.Nonaka**, Y.Okada*,
R.Orito*, A.Takada**, M.Takahashi* and K.Ueno*

Abstract

We developed the Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) with reconstructing the track of a recoil electron in Compton process for both sub-MeV and MeV gamma rays to explore MeV gamma-ray astronomy in space. By adding the direction of a recoil electron to Compton reconstruction method, the direction of the incident gamma ray is determined for each individual photon. Also, an angle between the recoil electron and scattered gamma ray is powerful for the kinematical background-rejection. Since MeV gamma-ray astronomy has suffered from huge background so far, this new method is expected to increase the sensitivity. In the simulation, a 50 cm cubic ETCC would provide about 10 times better sensitivity than that of COMPTEL for one year observation in space.

As a first step, we observed diffuse cosmic and atmospheric gamma rays at balloon altitudes with an ETCC consisting of the 10 cm cubic Time Projection Chamber (μ -TPC) and the GSO crystal pixel arrays surrounding the μ -TPC (SMILE-I). This instrument was launched on 1st September, 2006 from the Sanriku Balloon Center, and we successfully carried out about 3-hour observation time at an altitude of 32-35 km, and consequently obtained the both gamma-ray spectra between 0.1 and 1 MeV. In addition, this result indicates that the expected detection sensitivity of a future SMILE experiment between 150 keV and 20 MeV would provide a ten times better sensitivity than those of other missions at around 1 MeV.

For the next balloon-borne experiment, we are developing a larger ETCC for detecting sub-MeV gamma rays from celestial point sources such as Crab and Cygnus X-1 during a few hours observation.

Key words : MeV Gamma-ray Astronomy, Compton Gamma-ray Camera, Micro-Pixel Gas Chamber

* Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University

** Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

概 要

我々は天文学の中で最も未開拓な Sub-MeV・MeV ガンマ線の全天探査を行うために、電子飛跡検出型コンプトンガンマ線カメラ (ETCC) を開発した。この装置は、従来のコンプトンカメラでは測定困難であった、反跳電子の方向を測定し、入射ガンマ線の方向を決定できるばかりでなく、反跳電子と散乱ガンマ線の角度を用いた運動学的検証により、高い雑音除去能力を持ち、高感度が期待できる。宇宙環境下での動作試験、および宇宙拡散ガンマ線、大気 2 次ガンマ線の検出を目的として、10cm 角 ETCC を気球に搭載し、2006 年 9 月 1 日、三陸大気球観測所より放球し、観測高度 32～35km で約 3 時間の観測に成功し、解析の結果 0.1-1MeV 領域で 420 ガンマ線事象を観測、宇宙拡散ガンマ線および大気ガンマ線エネルギースペクトルを得た。この結果から、将来 50cm 角 ETCC 程度の装置の場合、従来の 10 倍程度の感度が達成できる可能性を得た。

現在、次期気球実験によるガンマ線天体の観測に向け、中型 ETCC の製作を進めている。その現状も報告する。

1. Introduction

近年、GeV および TeV ガンマ線天文学は飛躍的な進歩を遂げた。大型チェレンコフ光 TeV ガンマ線望遠鏡や 2008 年に打ち上がった Fermi 衛星の観測によって、これらのエネルギー領域は 10mCrab 以下または同等の感度が達成されつつある。しかし、図 1 に示すように 1～30MeV の領域は、COMPTEL による観測のみで [1]、他のエネルギー領域より 1 桁以上感度が悪い。さらにサブ MeV 領域 (0.1～1MeV) では、現在 INTEGRAL 衛星による観測が行われているが、全天探査には至っていない [2]。この領域は、多くの天体からの放射が期待されながら、図 2 のように定常放射天体は未だ 30 個程度しか発見されていない。これは、この領域に有効な測定手段が開発されていないためであり、宇宙物理では数少ない未開拓領域である。当然、GeV 領域で検出されている天体以上の多くの天体からの放射が期待される。さらに 511keV 電子陽電子消滅ガンマ線、 ^{56}Co 、 ^{26}Al などの核ガンマ線などラインガンマ線が存在し、非熱的エネルギー領域でスペクトロスコピーが可能な唯一の領域である。この領域で高感度全天観測を実現するには、広視野で且つガンマ線の方向が数度以下の精度で測定可能なイメージング装置による観測が不可欠である。

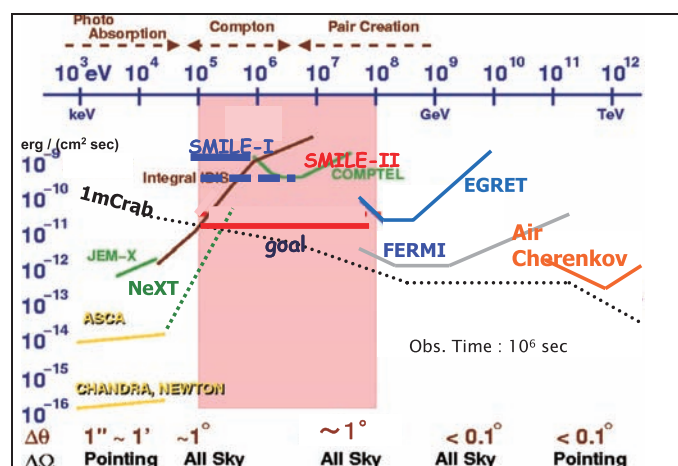


図 1 高エネルギー領域での宇宙観測の感度

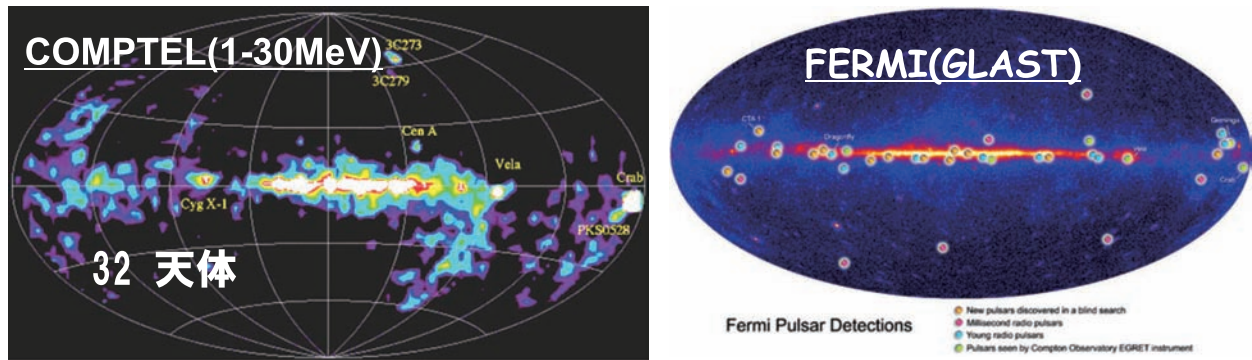


図2 COMPTEL による MeV ガンマ線全天分布 [1] (左) と Fermi による GeV ガンマ線全天分布 [3] (右)

我々は、以下に述べるような 0.1～数 10MeV のエネルギー領域で、ガンマ線のコンプトン散乱による反跳電子の飛跡をサブミリの精度で 3 次元サンプリングし、微小な電子飛跡を高精度で測定できる新しい技術を開発、その技術を発展させ広視野（人間の視野と同程度の 2～3str 程度）が可能な電子飛跡検出型コンプトン型ガンマ線カメラ（Electron-Tracking Compton Camera: ETCC）を実現した [4]。将来的には、このような ETCC を人工衛星に搭載し、0.1～数 10MeV 領域で、数年の観測を行い COMPTEL の 10 分の 1（10mCrab）の感度および COMPTEL の倍以上の角度分解能（半値幅 2 度@ 1GeV）で全天探査を実現したい。この観測が実現出来れば GeV 領域の EGRET 同等の数百個の天体が検出できると考えている。図 3 に衛星観測に向けての気球実験による ETCC ガンマ線観測プロジェクト、SMILE（Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment）のロードマップを示す。すでに 10cm 角小型 ETCC を用いた気球実験（SMILE-I）を行い、宇宙拡散ガンマ線観測に成功し [5]、現在、衛星搭載予定装置のプロトタイプ（40×40×40cm³）ETCC を用いた気球観測（SMILE-II）を予定し、かに星雲、Cygnus X-1 などの強いガンマ線天体の観測を目指している。

2. MeV ガンマ線天文学の意義

サブ MeV・MeV 領域の天文学は、非熱的宇宙現象に大きく関係している。特に核ガンマ線により唯一非熱的領域で元素識別が可能である。（1）巨星及び超新星爆発での元素合成、（2）強い重力場、ブラックホール（BH）天体、（3）宇宙・銀河の進化、（4）粒子加速、宇宙線伝播などが期待できる。特に（1）（2）（3）は、この領域の特徴を生かした興味深い対象である。

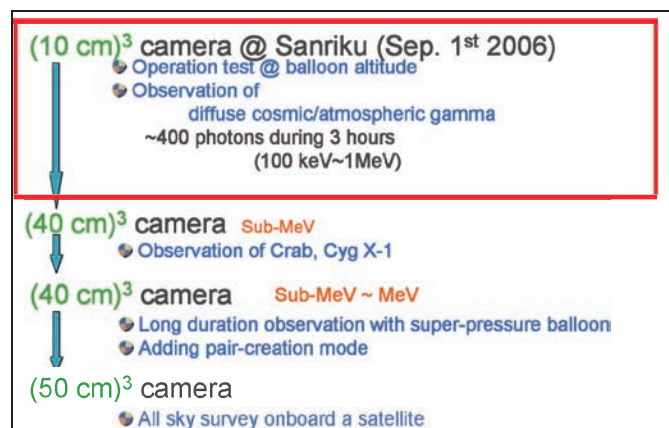


図3 SMILE 実験（Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment）ロードマップ

- (1) 元素合成は、鉄より軽い元素に関しては星での核融合、重元素は超新星爆発で合成されていると考えられているが、その観測的証拠はまだ少ない。光や X 線で元素識別は可能であるが、その元素がいつできたかはわからない。短寿命同位体からのガンマ線を検出することで初めて元素合成の“その場”観測が実現できる。COMPTEL、INTEGRAL による ^{26}Al の銀河分布測定 [6, 7]、SN1987A からの ^{56}Co ガンマ線測定 [8] とまだ僅かな観測しか存在しない。また陽電子・電子対消滅からの 511keV ガンマ線も OSSE[9] や INTEGRAL[10] による銀河中心近傍からの放射が観測された。陽電子放出核の生成ばかりでなく、銀河中心 BH 近傍にあると考えられる超高温プラズマ、さらには銀河中心に集積しているであろう WINP の対消滅など多様な発生源が予想され、さらなる高精度なイメージング観測が求められている。
- (2) BH 近傍では強重力場により降着円盤は高温となり、放射はガンマ線領域となり、イオンの重力場での加速から π^0 の生成も期待できる。熱的ガンマ線放射という特異なスペクトル観測が期待される。また P-N 結合から放射される 2.1MeV ガンマ線の重力場による偏移を観測できれば BH 近傍の相対論的重力場の直接観測が実現できる。銀河内には、Cygnus X-1 や銀河中心など、この観測に適した天体があり、今後の観測が期待できる。
- (3) 銀河の進化段階で星生成時期には超新星爆発が多数起こり、大量に放出された ^{56}Co や ^{56}Ni から多量の核ガンマ線が放出され、現在は赤方偏移によりサブ MeV 領域に銀河系外背景ガンマ線となって観測されることが考えられている。このようにサブ MeV 領域背景ガンマ線分布と銀河団分布との相関から銀河進化の様子を捉えることができる [11]。これは拡散ガンマ線分布を精度良く測定する必要があるが、後述のように我々が開発した ETCC のような到来ガンマ線方向をそれぞれのガンマ線毎に決定することが必要である。
- (4) 宇宙非熱的現象の中心をなす粒子加速や宇宙線起源問題では、このエネルギー領域は、最低エネルギー領域になる。非熱成分のスペクトルは、サブ MeV から 100TeV にいたる広いエネルギー領域にまたがるが、加速機構で最重要課題である加速粒子が電子であるか陽子かの識別に決定的な役割を MeV 領域が果たしていることがわかる。

3. MeV ガンマ線天文学の困難と ETCC

このように MeV ガンマ線天文学は元素合成など大変興味深いのが、今まで COMPTEL によって 1MeV 以上の全天探査、また最近では INTEGRAL によりサブ MeV 領域の銀河面探査が行われた程度である。さらに COMPTEL が行った探査では全天で定常放射天体が約 30 天体、INTEGRAL では 600keV 以上ではまだ 4 天体が観測された程度であり、GeV 領域の最近の Fermi の観測 [3] とは大きな隔たりがある。MeV ガンマ線天文学の発展を阻害しているのは、次に述べるようにイメージング観測の技術的困難によるところが大きい。この領域では、ガンマ線と物質の相互作用はコンプトン散乱が主であり、一意的にガンマ線の到来方向測定が困難となる。そのため、この領域では視野を制限するコリメータを用いた観測が中心であった。本来、この領域のガンマ線画像を得るにはコンプトン散乱過程の反跳電子および散乱ガンマ線の方向およびエネルギーを測定し、運動学的に再構成を行うことが必要となる。コンプトンカメラの基本原理は図 4 に示すように、前置検出器中でガンマ線が物質中とコンプトン散乱し、反跳電子が前置検出器で捕らえる。しかし反跳電子のエネルギーは低く、散乱点とそのエネルギーのみ測定される。一方、散乱ガンマ線は、後段のガンマ線検出器でエネルギーと位置を測定する。このように前段および後段検出器の情報から反跳電子のエネルギー、散乱ガンマ線のエネルギーと方向が得られ、図 4 の式にあるように、散乱ガンマ線方向に対して入射ガンマ線の仰角 (ϕ) が得られる (この手法をコンプトン法という)。入射ガンマ線の方向を決めるには、散乱ガンマ線方向に対する方位角も決定する必要があるが、これは反跳電子の方向のみで測定可能な物理量であり、コンプトン法を用いたコンプトンカメラでは、図 4 のように円錐の範囲でしか入射方向を決定出来ない。しかし、コンプトン法はガンマ線の方向を仰角のみであるがガンマ線毎に決定できる唯一の手法であり、1991 年、宇宙ガンマ線観測衛星 Compton Gamma-Ray Observatory に搭載された COMPTEL 検出器として実現した。図 5 に示すように、上段の液体シンチレータで入射ガンマ線をコンプトン散乱させ、後段の NaI(Tl) シンチレータで散乱ガンマ線を測定し、コンプトン法により入射ガンマ線の仰角を求める。しかしガンマ線再構成が不完全なため、宇宙線による雑音ガンマ線の除去が困難であり、上下の検出器のヒットした時間差からガンマ線到来の上下方向を判断し、下方からの雑音ガンマ線を除去したが、それでも図 5 にあるように 10 倍以上の雑音ガンマ線の上に僅かな宇宙ガンマ線があり、予定より、かなり感度が悪くなった [13]。

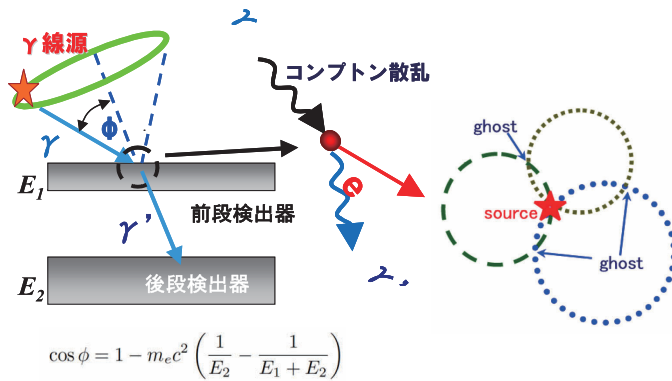


図4 コンプトン法およびコンプトン検出器の概念図.

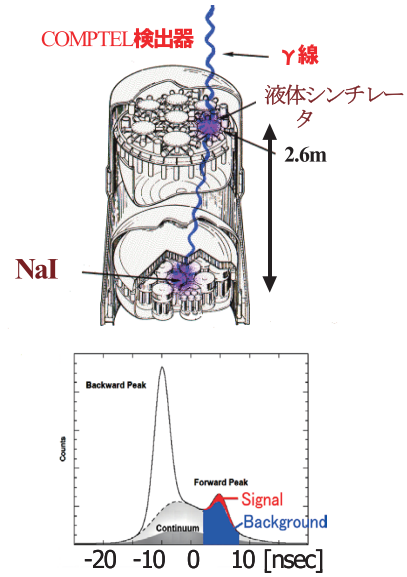


図5 COMPTEL 検出器 (上) および上下の検出器の時間差分布 (下) [12].

しかし、全天の核ガンマ線源探査を初めて行い、突発天体も含め約 60 天体の観測に成功、MeV ガンマ線天文学を大きく進歩させた。さらに近年打ち上げられ、現在も観測を継続している INTEGRAL では、Ge 検出器によるコードドマスク法による観測が行われている [14]。Ge を用いることでエネルギー分解能や位置分解能は大変優れているが、この手法では、雑音ガンマ線除去が困難であり（外部に Active-Veto のためのカウンターを持っているが）、600keV 以上では、4 天体の検出にとどまっている。

現在、コンプトン法を発展させた手法が世界で開発されている。ひとつの方向はエネルギー分解能を向上させ、仰角の分解能の改善である。反跳電子の位置およびエネルギー分解能を向上させるため、Si、CdTe や Ge など半導体ストリップ検出器 (SSD) をガンマ線散乱体に用いた装置が研究されている。一枚の SSD は薄いため、数枚の SSD を重ねる (多重コンプトン法) [15-21]。装置の中で 3 回以上コンプトン散乱を行った場合、最終的に散乱ガンマ線が装置から逃げ出した場合でも、入射ガンマ線の仰角およびエネルギーを求められる利点がある。現在、JAXA を中心に次期 X 線観測衛星 ASTRO-H に Active-Veto 方式を採用し、視野を約 5 度に制限し、雑音除去能力を高めた半導体コンプトンカメラが搭載される予定である [22]。

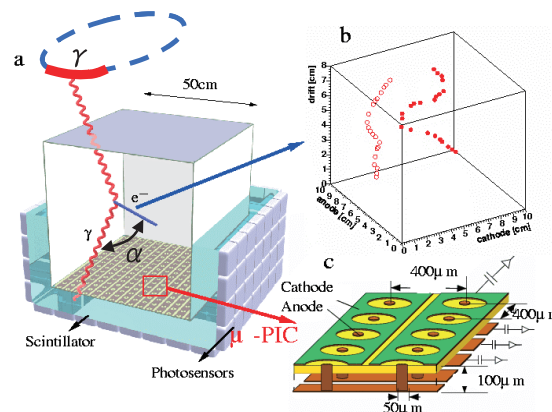


図6 電子飛跡検出型コンプトンカメラ概念図 (左)、実際に測定された電子飛跡 (右上) と μPIC 検出器の概念図 (右下)。

一方、我々は、図6に示すような、反跳電子の方向を決定し、到来ガンマ線の方位角も決定することでイメージング能力の向上を目指した電子飛跡検出型コンプトンカメラ（Electron-Tracking Compton Camera: ETCC）を開発している。この手法を方位角決定コンプトン法としよう。コンプトン反跳電子は、ガス中でも数 cm 程度しか飛ばない。そのため、角度情報を得るためには、サブミリ間隔で電子飛跡を測定する必要がある。我々は微細加工技術を用いて、基板上に微細な比例計数管を形成する技術を独自に開発、サブミリ間隔で荷電粒子の飛跡測定が可能になった。図6右下のような $400\mu\text{m}$ 間隔で基板上に微小ピクセル型ガス増幅器を形成する Micro Pixel Gas Chamber (μPIC) を開発 [23]、これを基に3次元位置情報が測定できる Micro Time Projection Chamber (μTPC) を実現した [24]。図6右上にあるようにガス中で多重散乱するコンプトン散乱電子の3次元飛跡を捕えられる。さらに μTPC の周囲を散乱ガンマ線測定用シンチレータで囲むことで、ガスを用いた ETCC を開発した。ETCC は、反跳電子と散乱ガンマ線のなす角 α も求まる。 α は入射ガンマ線再構成には不必要であるが、 α の実測値と予想値との比較から再構成の信頼度を評価でき、雑音事象の削減に有効である。このように大幅な雑音ガンマ線の低減が期待される。図7に示すように、TPC 内の電子飛跡および散乱角 α に予想される物理的条件を要求することで1桁以上雑音ガンマ線を減少させることが出来た (^{137}Cs , 662keV ガンマ線点源を使用)。さらに2個のガンマ線点源 (^{137}Cs , 662keV) を用いて、同じエネルギーのガンマ線源の画像を従来のコンプトン法および方位角決定コンプトン法を用いた場合での再構成図を図8に示す。方位角情報により従来のコンプトン法の10分の1のガンマ線で、より鮮明な画像が得られる。このように方位角決定コンプトン法は、従来のコンプトン法に比べ、大幅な低雑音、高画像分解能が可能である。MeV ガンマ線領域では、装置の有効面積に比べ雑音除去能力が重要である。特に連続エネルギー成分に対して ETCC では、 α 角を用いた運動学的雑音除去法によって大きな感度改善が期待できる。

このように、我々は ETCC が MeV 領域ガンマ線全天観測に有効であると考え、図3に示したように開発・観測を行いながら、全天探査を行う計画を進めている。2005年には10cm角 Time Projection Chamber (TPC) および散乱ガンマ線の位置とエネルギーを測定する GSO(Ce) シンチレータ・ピクセルアレイ (1ピクセルは $6\times 6\times 13\text{mm}^3$) [25] を組み合わせた ETCC を開発、地上実験で基本性能を調べ、図9のようなイメージング能力を得た。

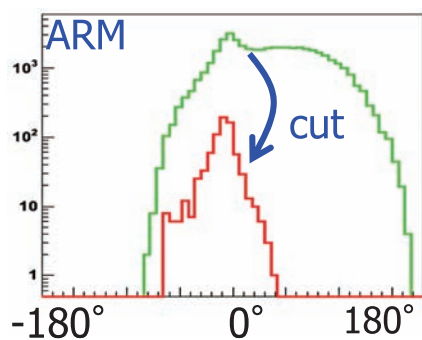


図7 662keV ガンマ線の測定された仰角 (ARM) 分布、TPC 内の飛跡および α 角による雑音除去前の分布 (緑線) と除去後の分布 (赤線) 示す。線源 (0度) 付近で1桁以上雑音が減っている。

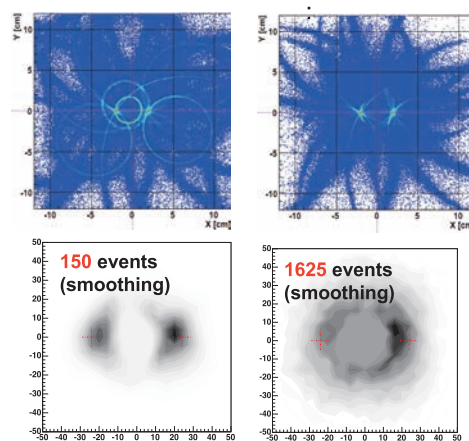


図8 ETCC (左) および、反跳電子の方向を測定しない従来のコンプトン法 (右) による2つの点源の再構成図。(上) シミュレーション (下) 測定結果。

4. SMILE-I 気球実験

2006年には、第1段階実験として、 $10\times 10\times 14\text{cm}^3$ の ETCC を用いて、宇宙線や装置の放射化などの環境雑音の測定、さらに物理対象として大気および宇宙拡散ガンマ線の測定を目的とした気球観測実験 SMILE-I を行った (図10)。この実験は主に特定領域研究「ブラックホール天文学の新展開」(代表：牧島一夫東大教授) の計画研究で行った。こ

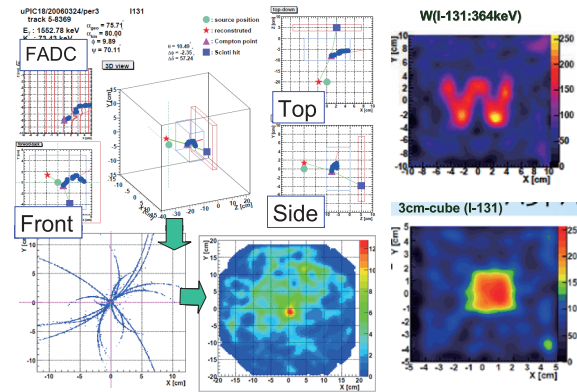


図9 ガンマ線イベントの3次元表示(左上), 得られたガンマ線到来方向を数イベント重ねると方向がわかる, 装置前20cmにNa-22点源の画像(左下). 医療用ETCCで測定したW形状(右上)および直方体のファントム線源(364keV)のガンマ線画像(右下). どちらのファントムも装置前10cmにある.

の実験では, 拡散ガンマ線観測を目的としたため, 角度分解能より検出効率を重視してXe 80%, Ar 18%, C₂H₆ 2%の混合ガスを使用し, 検出効率は約 10^{-4} , 視野は3strを得た. シミュレーションでは, 宇宙拡散・大気ガンマ線は, 0.1~1.0MeVにおいて約400光子の検出が予想された. 装置の詳細は, 文献[5, 26, 27]を参照していただきたい.

2006年9月1日に, SMILE-I観測装置を搭載した気球を三陸大気球観測所から放球した. 7時間の飛行中, 高度32~35kmで3時間半の観測を順調に行い, 約20万事象を測定・記録し無事回収した. 解析の詳細は省くが, コンプトン反跳電子の飛跡を用いた幾何学的・運動学的解析によって, 雑音が大きく減少できた. 最終的に残った881事象のエネルギースペクトルを図11に示す. 連続スペクトル・ガンマ線検出において従来のコンプトン法では困難だった雑音除去が効率良く行えた. 天頂角 60° 以内の420事象を用い, 宇宙および大気拡散ガンマ線強度を算出した. この強度算出には宇宙線による装置自身の放射化による雑音ガンマ線や大気ガンマ線をシミュレーションにより見積もることが不可欠となる. 観測されたデータとシミュレーションを比較しながら改良することで信頼性のあるシミュレーションを開発することができた(図12左). 特に, ETCCは宇宙線など荷電粒子飛跡を直接検出できるので, 中性子(反跳陽子を捉えられる)も含めガンマ線以外の雑音をほぼ除去出来ることがわかった. このシミュレーションから求めた宇宙および大気拡散ガンマ線, 雑音ガンマ線などの高度依存性を求め, それらを最終的に測定された420事象のガンマ線の大気深さのフラックス変化に対して図12右に示すようにフィットした. 大気ガンマ線成分は大気厚減少に比

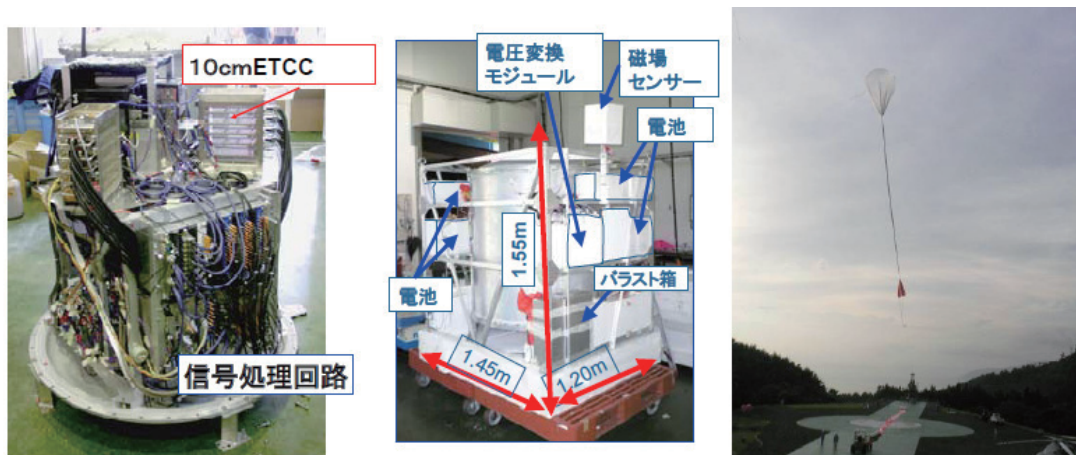


図10 SMILE-I気球搭載ETCC装置(左)を格納した圧力容器を気球ゴンドラに搭載し(中), 2006年9月1日に, 三陸大気球観測所から放球した(右).

例し減少するが、途中から宇宙拡散ガンマ線フラックスが大気ガンマ線フラックスを上回るため、フラックスが一定になるのが観測されている。このフィットの結果から、0.1～1MeVの大気ガンマ線および宇宙拡散ガンマ線スペクトルを求めたのが図13である。この領域は、過去の観測例が少ないが以前の観測結果と矛盾のない結果となった。

今後の気球実験では、このシミュレーションにより、高精度な雑音予想が可能となり、装置設計の信頼度向上に繋がる。さらに観測されたガンマ線フラックスおよび装置の大きさ（有効面積）を考えると、このETCCは、COMPTELの約10倍のS/Nで観測を実現できたことがわかる。

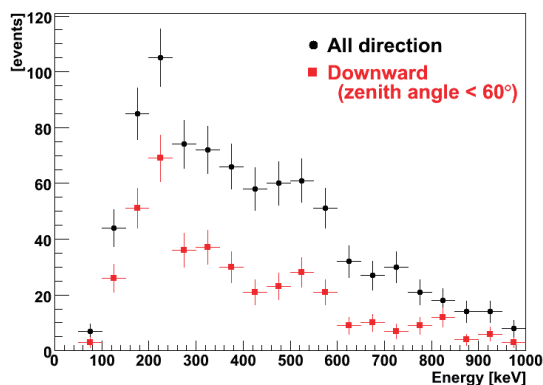


図11 最終的に得られたエネルギースペクトル

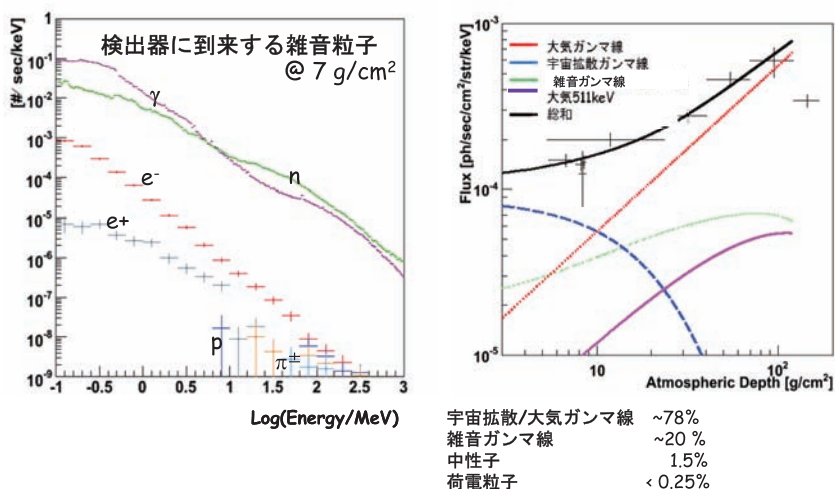


図12 (左) シミュレーションによる装置にはいる雑音粒子の内訳。(右) 観測されたガンマ線フラックスと大気厚の相関図。雑音ガンマ線とは気球装置で宇宙線照射により発生したガンマ線であり、この図の総和を求めるフィットから下にある検出された420事象の成分を求めた。

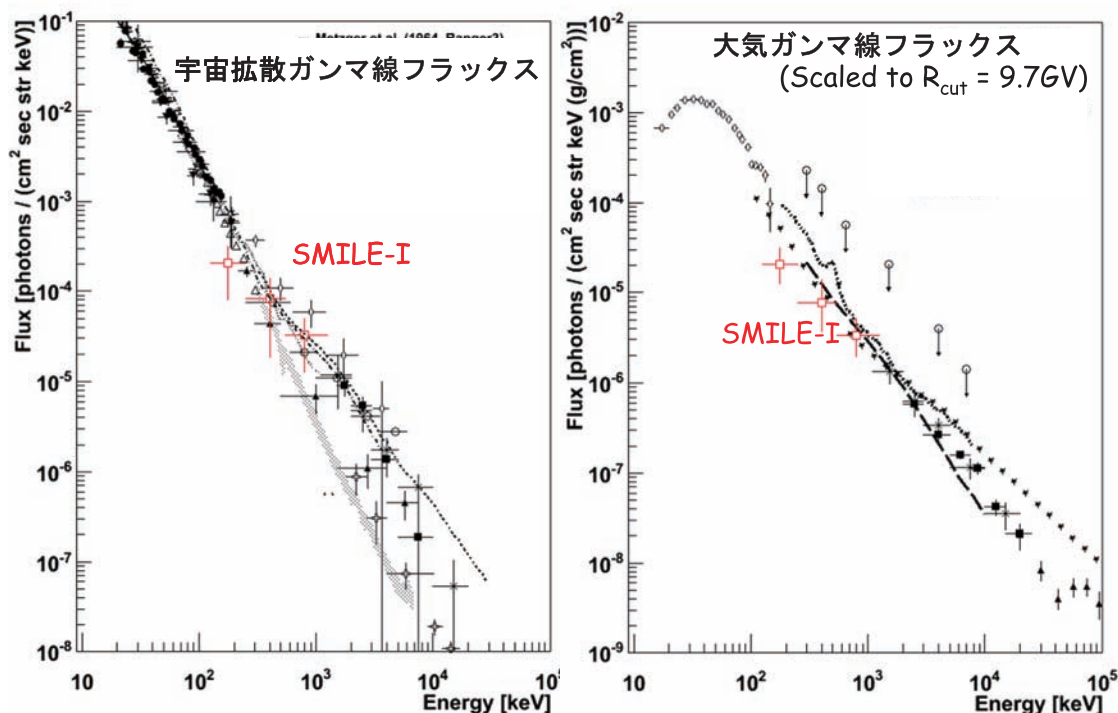


図13 SMILE-I 実験で観測された 0.1 ～ 1 MeV の宇宙拡散ガンマ線（左）および大気ガンマ線（右）のエネルギースペクトル。赤点が今回のデータ点。他のデータ点は過去の他のグループの観測データを示す、詳しくは文献 [5, 27] にある。

5. 銀河内ガンマ線天体観測用気球実験 (SMILE-II)

我々は、ETCC を用いた宇宙 MeV ガンマ線観測をさらに推進するため、10cm 角 ETCC による気球実験と並行して、かに星雲、Cyg X-1 などの軟ガンマ線放射天体を約 5 時間で 5σ 以上の精度で観測するための大型装置のプロトタイプとして、30cm 角 ETCC を開発してきた。現在、図 14 のような 30cm 角 ETCC を完成させ、性能改善を続けている。また 30cm 角以上の大型 ETCC 気球実験では省電力が不可欠であり、 μ PIC 用アンプの CMOS 化による高密度・省電力化を KEK と共同で進めている。2008 年には前段階として、この LSI をベースに製作された中性子検出器用 LSI の実用化を行い（図 15 左）、さらに宇宙 MeV ガンマ線観測用に雑音低減と高密度化を行った LSI を 2010 年に完成させ、ETCC への搭載を予定している。同時に角度分解能および効率改善のため、シンチレータ部もピクセル数が 5 倍以上に増加するため、PMT に直接接続し、64ch 信号の信号処理を独立に行うヘッドアンプを 2009 年に開発した（図 15 右）。さらに一つのヘッドアンプでさらに複数の PMT 信号を処理する工夫を行い、さらなる消費電力の削減に努力している。

我々はこのように中型 ETCC による気球観測を行うため、まず装置改良および調査のため、平成 20 年度に基盤研究 A（代表者：窪秀利）、さらに国内での気球実験を実現するため、平成 21 年度に基盤研究 S（代表者：谷森達）による支援を得て、実際の気球用中型 ETCC 製作に取りかかった。2011 年に中型 ETCC による 6 時間程度の飛行（観測約 3 時間）の気球観測実験を行うことを提案している（SMILE-II）。

現在、大樹町で予想されるレベルフライト時間が 3 時間程度であることを考慮すると、かに星雲に対して 3 時間の観測で 5σ 以上のガンマ線検出が可能であることが必要であると判断し、前回の 10cm 角 ETCC 気球実験の結果をシミュレーションに反映させた結果から 30cm 角 ETCC より大きい 40cm 角 ETCC（但し $40 \times 40 \times 30 \text{ cm}^3$ の容積）による観測が必要であると判断した。これに基づき基盤研究 S では、40cm 角 ETCC による気球実験を提案しており、20cm 角 μ PIC を 4 枚組み合わせた 40cm 角 TPC を実現する。2009 年に、まず 20cm 角 μ PIC を 2 枚組み合わせた μ TPC を製作し、試験を行っている。また検出効率を改善するため、ガス気圧を 2 気圧（以前は 1 気圧）への高圧化、角度分解能を改善できる CF_4 ガスの使用などを検討している。また TPC 内の電子飛跡の再構成法の改善により 2～3 倍程度の効率化が期待できる。ガス圧・種類の改善と合わせて 3 倍以上の効率化を目指している。

このように、10cm 角 ETCC から 40cm 角 ETCC と装置は大型するが、気球実験で使用できる電力は SMILE-I の 205W を大きく超えることが出来ない。SMILE-II では約 290W の電力に制限する必要がある。そのため μ PIC およびシンチレータ回路の LSI 化を進め、大幅な省電力を行う。また 20cm 角 μ PIC を 4 枚独立に動作させるなど装置の一部が故障しても大半が動作するような設計を行い、確実なデータ取得を目指す。ETCC の視野は 2–3str と広いため、気球の姿勢制御は必要なく、装置も SMILE-I 同様、与圧容器に格納させる。

この計画で予定通り天体からのガンマ線検出が出来た場合、次は同じ 40cm 角 ETCC を用い、一日程度の気球観測による銀河中心の観測、さらには 1 週間以上の長時間気球観測による銀河面観測へ、計画を進めていきたい。現時点では費用の面から GSO 結晶を使用しているが、図 16 に示すように、エネルギー分解能が GSO の倍以上優れている (662 keV で 3%) LaBr₃(Ce) を用いた場合、地上実験では、角度分解能が GSO 使用時の約半分から 2/3 に改善できた [28]。将来搭載することで、1MeV 付近で半値 2 度以下の角度分解能による観測を考えたい。

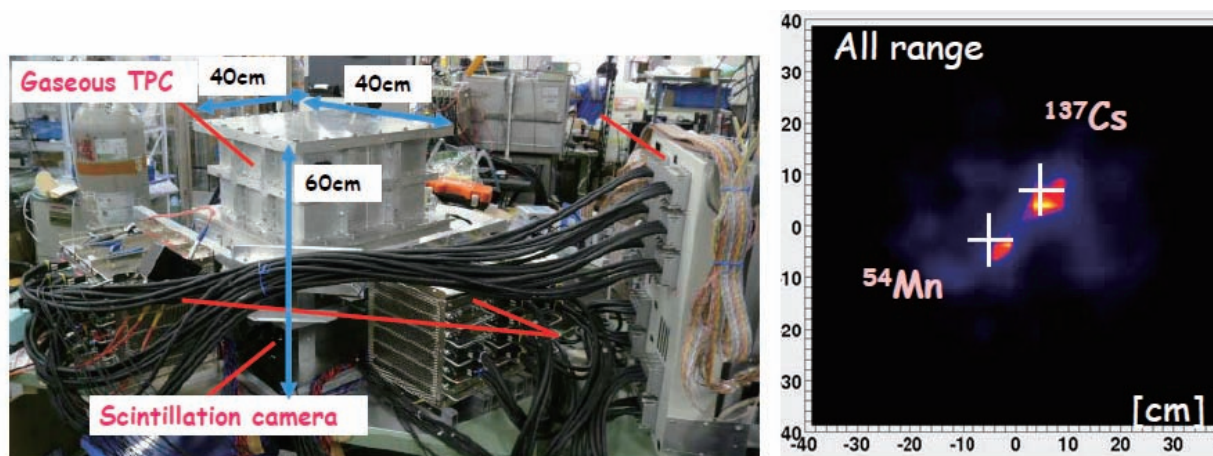


図 14 地上試験用 30cm 角 ETCC (左) および、この装置で測定した 662keV および 835keV の 2 つの RI 点源の同時撮像 (右)。2 つの線源は装置前面 20cm にあり、線源のある面上への射影図である。

また、散乱体としてガスを用いる利点として数 MeV 以上の高エネルギー領域で起こる電子対生成反応による電子・陽電子の飛跡を高精度で捉えられる。まだ粗い計算しか行っていないが、ガス散乱体では 30MeV 程度のガンマ線で約 0.5 度 (半値)、10MeV でも 5 度程度と高角度分解能が期待できる。また散乱断面積も 1MeV でのコンプトン散乱よりは 5 倍程度大きい。現在 Fermi 衛星でも角度分解能は 1GeV で 1 度を少し切る程度であることを考えれば、ガンマ線でも高位置分解能イメージングが可能となる。また有効面積を考えると Fermi でも 100MeV 以下は数百 cm² 程度であり角度分解能は 5–10 度と大変低い。1×1m² 程度のガス検出器があれば、100cm² の有効面積で 0.5 度以下の角度分解能が 5–100MeV で可能となり、Fermi でも不可能な SNR 内部のガンマ線分布を描くことが出来る。TeV ガンマ線望遠鏡は、ステレオ観測により 0.1 度という高分解能イメージングが実現しているが、Fermi では不可能であり、この ETCC に用いたような TPC による対生成領域ガンマ線検出が最有力候補である。我々は、今年度、10cm 角 ETCC を用いて電子シンクロトロン加速器とレーザー光による逆コンプトン散乱で発生させた 1–30MeV ガンマ線による電子対検出試験を行う。かに星雲を対象とした次期気球実験では、僅かではあるが、観測が期待でき、長期気球観測では確実に検出できる。5–100MeV 領域は、非熱的宇宙現象の理解に大変重要である。特に、50MeV 以下では、電子からのガンマ線のみが寄与するが、50MeV 以上では、急激に宇宙線陽子が生成する π^0 によるガンマ線の寄与が大きくなっていく。このように 10–100MeV ガンマ線の分布は宇宙線加速起源問題に決定的な情報を含んでいる。このような対生成領域ガンマ線検出も長時間気球実験で可能に成ってくると考えている。

このように、ETCC はコンプトン領域から電子対生成領域にわたる 0.1–100MeV という 3 桁にわたる天文学の最後の未開拓領域を一機に観測可能にし、元素合成、ブラックホールから宇宙線加速にいたるまで、多様な宇宙物理に大きな寄与が期待できる。

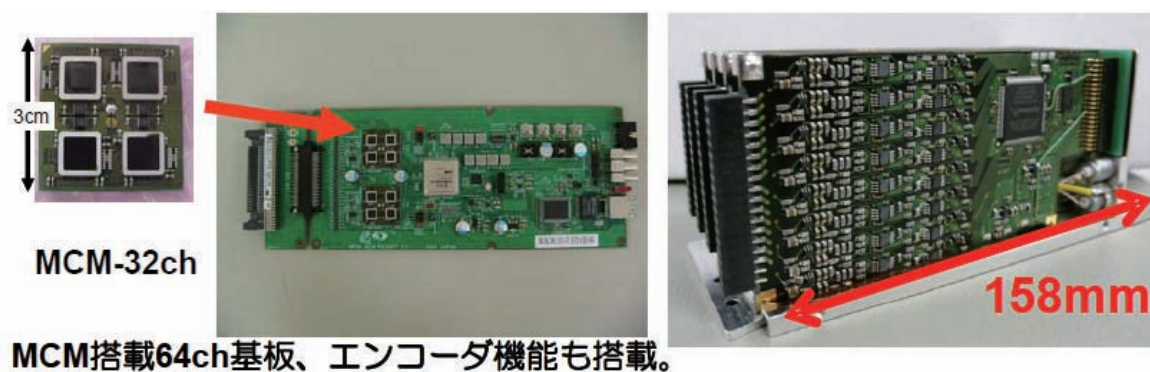


図 15 開発中の μ PIC 用 LSI および搭載回路基板（左）と、シンチレータ用 PMT 処理回路（右）。

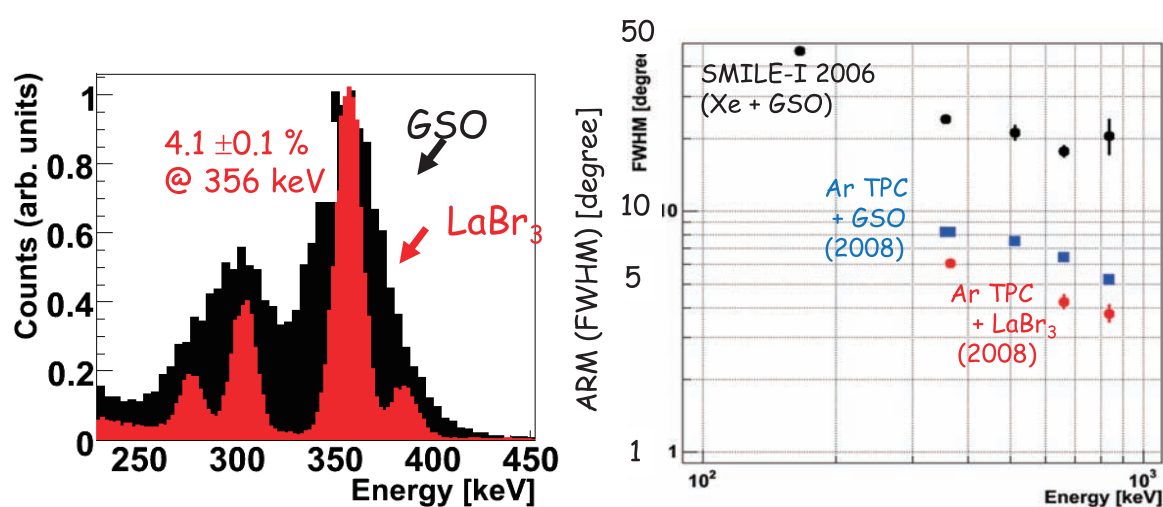


図 16 (左) LaBr₃(Ce) と GSO(Ce) の ^{133}Ba ガンマ線スペクトル. (右) 10cm 角 ETCC の各種ガスおよびシンチレータ結晶の違いによる角度分解能.

謝辞

まず気球実験に関しては、JAXA 気球グループの多大な尽力によって、この実験は初めて可能になった。またこの場を借りて感謝を述べたい。この研究は、文部科学省科学研究費補助金、特定領域研究「ブラックホール天文学の新展開」(代表、牧島一夫東大教授、平成 14-18 年度)の計画研究「広視野ガンマ線カメラによるブラックホールからの熱的ガンマ線放射の探索」、基盤研究 A「広視野ガンマ線カメラを用いた気球実験による MeV 領域ガンマ線天体観測の開拓」(代表、窪秀利、平成 20-23 年度)および基盤研究 S「広視野ガンマ線カメラによる MeV ガンマ線銀河内天体気球観測」(代表、谷森達、平成 21-25 年度)の援助を受けている。

References

- [1] V. Schönfelder et al., “The first COMPTEL source catalogue”, A&AS, 143 (2000) 145
- [2] L. Bouchet et al., “INTEGRAL SPI All-Sky View in Soft Gamma Rays: A Study of Point-Source and Galactic Diffuse Emission”, ApJ, 679 (2008) 1315
- [3] A. A. Abdo et al., “Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-Ray Source List”, ApJS, 183 (2009) 46

- [4] T. Tanimori et al., “MeV γ -ray imaging detector with micro-TPC “, *New Astron. Rev.*, 48 (2004) 263; R. Orito, et al., “Compton gamma-ray imaging detector with electron tracking “, *Nucl. Instr. Meth. A*, 525 (2004) 107; A. Takada et al., “Development of an advanced Compton camera with gaseous TPC and scintillator “, *Nucl. Instr. Meth. A*, 546 (2005) 258; H. Kubo et al., “High-speed Position Encoding System for the TPC with Micro Pixel Chamber Readout “, 2005 IEEE NSS Conf. Rec., 371
- [5] A. Takada et al., “The Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays with an Electron-Tracking Compton Camera Loaded on a Balloon “, *J. of the Phys. Soc. of Japan, Suppl. A*, 78 (2009) 161
- [6] J. Knödlseider et al., “Image reconstruction of COMPTEL 1.8MeV ^{26}Al line data “, *A&A*, 345 (1999) 813
- [7] R. Diehl et al., “SPI measurements of Galactic ^{26}Al “, *A&A*, 411 (2003) L451
- [8] S. M. Matz et al., “Gamma-ray line emission from SN1987A “, *Nature*, 331 (1988) 416
- [9] W. R. Purcell et al., “OSSE Mapping of Galactic 511 keV Positron Annihilation Line Emission “, *ApJS*, 491 (1997) 725
- [10] J. Knödlseider et al., “Early SPI/INTEGRAL constraints on the morphology of the 511 keV line emission in the 4th galactic quadrant “, *A&A*, 411 (2003) L457
- [11] P. Zhang and J. F. Beacom, “Angular Correlations of the MeV Cosmic Gamma-Ray Background“, *ApJ*, 614 (2004) 37
- [12] V. Schönfelder et al., “Instrument description and performance of the Imaging Gamma-Ray Telescope COMPTEL aboard the Compton Gamma-Ray Observatory“, *ApJS*, 86 (1993) 657
- [13] G. Weidenspointner et al., “The COMPTEL instrumental line background“, *A&A*, 368 (2001) 347
- [14] G. Vedrenne et al., “SPI: The spectrometer aboard INTEGRAL“, *A&A*, 411 (2003) L63
- [15] T. Kamae, R. Enomoto, R. Hanada, “A new method to measure energy, direction, and polarization of gamma rays“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 260 (1987) 254
- [16] J. D. Kurfess., W.N. Johnson, R.A. Kroeger, B.F. Philips, “Consideration for the next Compton telescope mission“. THE FIFTH COMPTON SYMPOSIUM. AIP Conference Proceedings, 510 (2000) 789
- [17] H. Tajima, et al., “Gamma-ray polarimetry“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 511 (2003) 287
- [18] G. Kanbach et al., “The MEGA project“, *New Astron. Rev.*, 48 (2004) 275
- [19] D. Bhattacharya et al., “Prototype TIGRE Compton γ -ray balloon-borne telescope“, *New Astron. Rev.*, 48 (2004) 287
- [20] S. E. Boggs et al., “Overview of the nuclear Compton telescope“, *New Astron. Rev.*, 48 (2004) 251
- [21] T. Tanaka et al., “Recent results from a Si/CdTe semiconductor Compton telescope“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 568 (2006) 375
- [22] T. Takahashi, “Next Generation Hard X-ray and Gamma-ray Mission in Japan“, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 134 (2004) 191
- [23] A. Ochi e al., “A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 471 (2001) 264
- [24] R. Orito et al., “A novel design of the MeV gamma-ray imaging detector with Micro-TPC“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 513 (2003) 408
- [25] H. Nishimura et al., “Development of large area gamma-ray camera with GSO(Ce) scintillator arrays and PSPMTs“, *Nucl. Instr. Meth. A*, 573 (2007) 115
- [26] 谷森達 et al., 「電子飛跡測定型広視野コンプトンカメラによる sub-MeV および MeV ガンマ線観測計画 (SMILE 実験)」 大気球研究報告 20080229 (2008) 97
- [27] A. Takada et al., “Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera“, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A*, 78 (2009) 161
- [28] S. Kurosawa, et al., “Development of an 8×8 array of LaBr_3 (Ce) scintillator pixels for a gaseous Compton gamma-ray camera“, *Nucl. Instr. Meth. A*, in press