

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20244031

研究課題名（和文） エマルションハイブリッド望遠鏡による宇宙ガンマ線の観測

研究課題名（英文） Emulsion Hybrid Telescope for Cosmic Gamma-ray Observation

研究代表者

青木 茂樹 (AOKI SHIGEKI)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・教授

研究者番号：80211689

研究成果の概要（和文）：

宇宙ガンマ線観測に用いることのできるエマルション（原子核乾板）望遠鏡システムの開発を行った。その性能を確認するため地上での実証テストを重ね、気球に搭載するフライトモデルを設計・製作した。そのフライトモデル1号機を使用した気球実験を JAXA に提案し、2011年6月に打上げ予定の実験として採択された。

研究成果の概要（英文）：

The research and development have been done to realize emulsion gamma-ray telescope system for cosmic gamma-ray observation. After various tests to confirm its performance, the flight models are designed and constructed. We proposed a balloon-borne experiment using 1st flight model to JAXA. It has been approved by JAXA and the launching is scheduled in June 2011.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2009年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	29,100,000	8,730,000	37,830,000

研究代表者の専門分野：素粒子および宇宙線（実験）

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線天文学、ガンマ線、宇宙線、エマルション、原子核乾板

1. 研究開始当初の背景

宇宙からの電磁波の観測において、電波～赤外線～可視光～紫外線～X線の波長域の観測に較べて、ガンマ線の観測は未開拓の部分が多く、角度分解能の乏しい観測しかなされていなかった。そのような状況において、TeV領域のガンマ線の観測に関しては、地上における大気チェレンコフ望遠鏡が mrad の角度分解能を実現し、広がりをもった天体の観測において、他波長域の観測との比較が可能となっていた。

これに対して、GeV領域のガンマ線観測は1990年代前半に行われた EGRET 検出器に

よる 20～100mrad の角度分解能の観測以降新たな観測がなされない状況が続いていたが、半導体技術に基づく新しい検出器が開発され、それを人工衛星に搭載したフェルミガンマ線宇宙望遠鏡による観測開始が待たれる状況であった。（フェルミ衛星は2008年6月に打ち上げられた。）

可視光線やX線のように光学的な結像ができないガンマ線の観測では、その到来方向の測定はガンマ線から生成される電子と陽電子の方向から測定する方法に限られる。エマルション（原子核乾板）フィルムは荷電粒子に対する最も細密な飛跡検出器ではあ

るが、これをガンマ線望遠鏡として使用するには、蓄積型の検出器であるエマルジョンを使用しながら、ガンマ線の到来時刻を秒単位の精度で特定するという背反する課題を解決する必要があった。

さらに、宇宙からの電磁波の観測において、偏光観測は発生域の磁場などに関する貴重な情報源となる。GeV領域のガンマ線観測において偏光に関する情報を得るには対生成される電子と陽電子のなすアジマス角を測定する方法がある。フェルミ望遠鏡の場合は、対生成してから電子と陽電子が分離して観測ができるようになるまでに通過する物質量が大きく、その間の電磁散乱によって対生成時の角度が損なわれてしまう。これに対して、エマルジョンフィルムを用いたガンマ線望遠鏡が実現できれば、散乱量が少ない間に電子と陽電子を分離して観測することが可能であるため、偏光に関する情報が得られることが期待される。

2. 研究の目的

大規模ニュートリノ実験を実現するために開発されてきた最新のエマルジョン解析技術を宇宙ガンマ線観測の分野に応用し、さらにガンマ線の到来時刻を秒単位の精度で特定するという課題を解決することを通じて、フェルミ望遠鏡よりもさらに角度分解能に優れたガンマ線望遠鏡を開発し、より詳細な宇宙ガンマ線観測を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

エマルジョン望遠鏡の概念図を図1に示す。

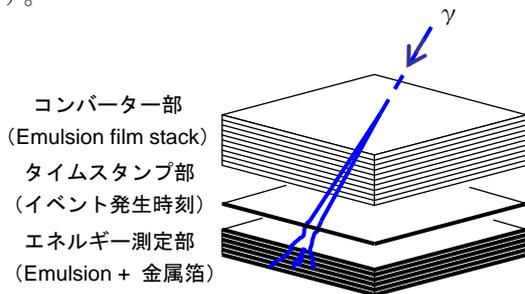


図1：エマルジョン望遠鏡の概念図

エマルジョンフィルムと金属箔との繰り返し構造のコンバーター部、エマルジョンフィルムと金属箔や薄い金属シートとの繰り返し構造のエネルギー測定部、これらにはさむタイムスタンプ部の三つの部分からなる。

タイムスタンプ部には、新しい試みとしてエマルジョンフィルム多段シフターという

手法を開発し使用する。観測時間中にフィルムをわずかずつずらし続け、飛跡の解析の際に再構成したズレの量からその飛跡の通過時刻を再現する。1枚だけのフィルムを動かし続けるだけでは長時間にわたって十分な時間分解能を確保することは困難であるが、複数のフィルムをアナログ時計の針のように独立した周期で動かし続けることで、それぞれのズレ量の組み合わせから長時間にわたる観測でも十分な時間分解能でタイムスタンプを与えることが可能となる。

このようなタイムスタンプ部を実現できれば、コンバーター部やカロリメータ部と同じエマルジョンフィルムを使用していることから親和性も良く、低消費電力でデッドタイムのないタイムスタンプ手法となる。加えて、気球高度でトラブルの原因となり得る高圧電源や電力消費量の大きい高速多チャンネル読み出し系を使用せずに済むという大きなメリットも持つ。

このようなガンマ線望遠鏡を検出器の地球に対する方向をモニターするためのスターカメラと組み合わせて気球に搭載し、大気のトップまで打ち上げてガンマ線観測を行い、高い角度分解能を活かした観測ができることを示す。

あわせて対生成される電子・陽電子のアジマス角を測定することで偏光に関する情報が得られることの実証試験も行う。

4. 研究成果

(1) 角度分解能

ガンマ線の電子陽電子対生成に関して、エマルジョンフィルム1枚の測定から期待される親のガンマ線の到来方向に対する角度分解能を、親ガンマ線のエネルギーを変化させてシミュレーションを行った。その結果を図2に示す。

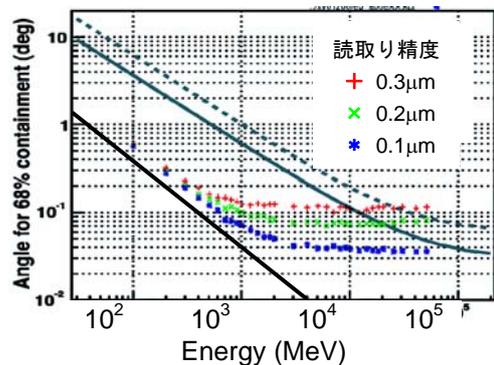


図2：角度分解能のエネルギー依存性 (灰色の曲線はフェルミ望遠鏡 黒色の直線は対生成時の横運動量から来る不定性に起因する測定限界)

灰色の曲線はフェルミ望遠鏡の角度分解能を示し、エマルジョン望遠鏡の角度分解能を色のついた記号で示す。フィルムを読み取る際の測定精度を0.3 μm とした場合を赤の+、0.2 μm とした場合を緑の×、0.1 μm とした場合を青の*でそれぞれ示している。

10³MeV以下の領域で傾きを持っている部分は、対生成時の横運動量による不定性と、角度が測定できるまでに電子や陽電子が通過する物質から受ける散乱によって角度分解能が決まる部分である。

対生成時の横運動量による不定性は原理的に避けられない部分であり、それを黒い直線で示している。シミュレーション結果がその直線よりも上に上がっている分が物質による散乱による寄与である。

エマルジョンフィルムによる測定が、フェルミ望遠鏡による測定に較べて、原理的境界に肉薄していることがわかる。

(2) デイタイムスターカメラの設計・製作

エマルジョン望遠鏡を気球に搭載して観測する場合、観測器を搭載したゴンドラは気球の回転に引きずられて、同じように回転してしまう。

ガンマ線イベントが検出された時刻における、天球に対するゴンドラの姿勢をモニターするためのスターカメラの設計が必要となる。将来の長時間フライトにおいては、昼夜を問わず観測が続くため、日中でも夜間でも同じ原理で測定が可能なデイタイムスターカメラを採用することとし、その設計を行った。

気球高度(約35km)では地表に較べれば少なくともはなるが、それでも残留大気(5g程度)による太陽光の散乱光が空の背景光として存在する。そのような光は青色側にピークがあるのに対して、星からの光は黒体放射のスペクトルを持つ。シミュレーションなどによる最適化の結果、撮像素子としては1100nm程度の近赤外まで感度を持つCCDカメラを使用し、630nm以下の波長の光をカットし、赤色および近赤外光のみ透過する光学フィルターと組み合わせて使用することにした。

上空での背景光の強度は、観測時の太陽に対する方位角に大きく依存する。実際には気球実験において確認する必要があるが、昼間の観測における限界等級は、太陽に対する方位角が140°の場合に対して6.5等級程度が期待される。

(3) 時間情報を付与する方法：多段シフター

エマルジョン望遠鏡で捉えたガンマ線の到来方向を、スターカメラからの情報に基づいて天球にマッピングするためには、各ガンマ線イベントの発生時刻を知る必要がある。

気球およびゴンドラの回転角速度は水平浮遊飛行に入った平穩時では約1mrad/secとされている。したがって、角度分解能として1mradを目指すためには、ガンマ線イベントの発生時刻を秒単位の精度で知る必要がある。

従来の加速器実験では、シリコンストライプ検出器やシンチレーティングファイバー飛跡検出器などの外部検出器と組み合わせることで、エマルジョンフィルムで捉えた飛跡に時間情報を付与するハイブリッド検出器法を使用してきた。本研究でも、研究開始当初はハイブリッド法を使用する予定であったが、電気的な外部検出器を使用して高い位置分解能を要求すると、電源や高速多チャンネル読み出し系が大掛かりになってしまい、気球実験には不向きなものになってしまうという難点があった。

研究代表者が2004年に行った気球実験では、一部のフィルムを他の部分に対して連続的に動かし、解析時にその位置ズレ量を再構成することで時間情報を得るシフターという手法を行った。そこでは、14時間の水平フライト中にフィルムを10mm程度動かし、通過飛跡のそれぞれに対して、約15分の時間分解能を付与することに成功していた。

この手法を拡張し、複数のフィルムをアナログ時計の時針・分針・秒針のように独立した周期で動かし続けることで、長時間にわたる観測でも十分な時間分解能を得る多段シフターと呼ぶ法を確立した。

多段シフターの能力を実証するために、地上での宇宙線を多段シフターとシンチレーティングファイバー飛跡検出器を外部検出器として用いて同時測定を行うテスト実験を行った。その結果を図3に示す。外部飛跡検出器との良い時刻の一致が確認できる。

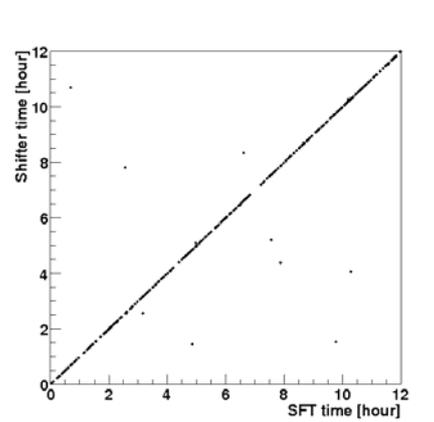


図3：多段シフター実証テストの結果
横軸：外部飛跡検出器が得た時刻
縦軸：多段シフターからの時刻

この結果に基づいて、気球に搭載するフラ

イトモデルの設計・製作を三鷹光器社と共同で行った。このフライトモデルを用いて気球実験と環境と同じ低温低压の環境を実現する装置を製作し、性能試験を行った。実際に製作したフライトモデル1号機とそのフライト用制御部の写真を図4に示す。試験の結果、低温低压環境においても常温常圧での測定と同程度の時間分解能が得られる事を確認した。

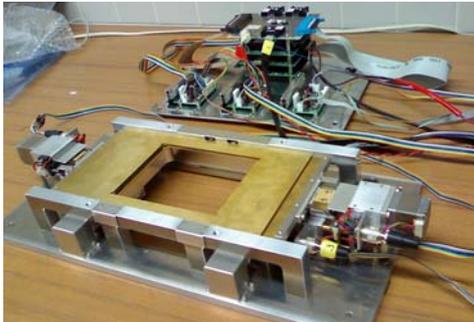


図4：シフターフライトモデル1号機とその制御部（エマルジョンフィルムをマウントする部分の大きさは12.5cm×10.0cm）

1号機を製作し試験した結果に基づいて、2号機的设计・製作を三鷹光器社と共同で行った。実際に製作した2号機の写真を図5に示す。



図5：シフターフライトモデル2号機（大きさの比較のため1号機と並べている）

(4) ビームテスト

エマルジョン望遠鏡の性能を実証するために、SPring-8にあるレーザーコンプトンビームラインにおいて逆コンプトン散乱によるMax. 2.4GeVのガンマ線ビームを照射したエマルジョンフィルムを解析した。

このビームラインは直径数mmのレーザー光の照射に対する散乱を70m離れた場所で観測するため、ビーム自身の広がり 10^{-4} 程度である。

分担者が名古屋大学に保有する全自動高速飛跡読み取り装置を使用して飛跡データを収集し、そのデータを解析してガンマ線の電子陽電子対生成と期待される約3000イベントの飛跡を選別した。

その各イベントを神戸大に設置している半自動解析装置を使用して人間が確認し、本当に対生成と確認できるものと、そうではないもの（その大半は全自動読取装置の検出効率から来る偽のイベント）を選別した。約3000イベントのうち、2577イベントの確認が終了し、その中から1425イベントの電子陽電子対生成反応を選別した。

選別されたイベントについて、親ガンマ線の到来方向の分布の測定から、角度分解能の評価を行った。その結果を図6に示す。角度分解能として1.7mradという値が得られ、シミュレーションが実験結果を再現していることも検証できた。

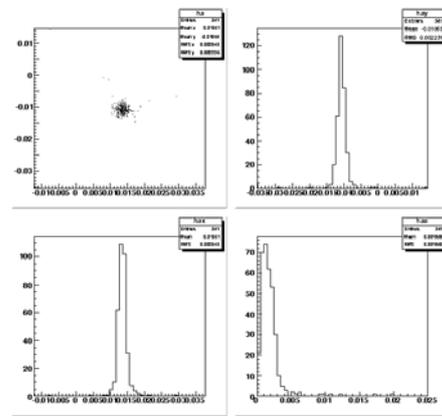


図6：親ガンマ線の到来方向分布

このビームラインで照射しているレーザー光は線偏光となっているため、散乱されたガンマ線も偏光している。電子陽電子対生成であることを確認した1425イベントのうち、電子と陽電子がなすアジマス角を測定するのに適した開き角を持つ787イベントに対して、アジマス角を測定を行い、親ガンマ線の偏光に関する情報が得られるかを解析した。その結果を図7に示す。

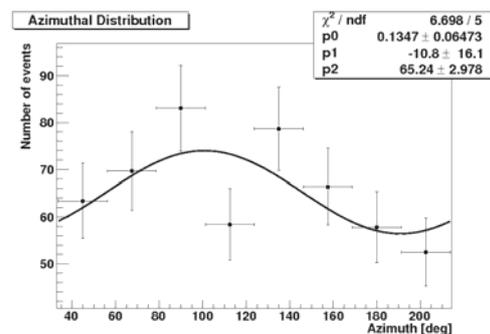


図7：電子陽電子のなすアジマス角の分布

統計精度の範囲内でビームの持っている偏光度とコンシステントな測定結果が得られていることが確認できた。

(5) 気球実験

多段シフターフライトモデル1号機およびデイトイムスターカメラを組み合わせた気球実験をJAXAに提案した。

気球実験の採択の競争が厳しく、正規の研究期間中には採用されなかったが、2011年6月に打ち上げを行う実験としてJAXAに採択された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 青木茂樹、高橋覚他
宇宙ガンマ線観測のためのエマルジョンハイブリッド望遠鏡の開発
日本写真学会誌、査読無、71(4), 2008, pp.256-258
- ② S.Takahashi, S.Aoki et al.
Time stamp technique using a nuclear emulsion multi-stage shifter for gamma-ray telescope.
Nuclear Inst. And Methods in Phys. Research A, 査読有, A620, 2010, pp.192-195

[学会発表] (計6件)

- ① 尾崎圭太、高橋覚、青木茂樹他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：逆コンプトンビーム照射実験
日本物理学会 (2011/3/28) 新潟大学
- ② 六條宏紀、高橋覚、青木茂樹他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：開発現状
日本物理学会 (2010/9/12) 九州工業大学
- ③ 六條宏紀、高橋覚、青木茂樹他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：多段シフタープロトタイプテスト
日本物理学会 (2010/3/20) 岡山大学

- ④ 高橋覚、六條宏紀、青木茂樹他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：現状報告
日本物理学会 (2010/3/20) 岡山大学
- ⑤ 六條宏紀、高橋覚、青木茂樹他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：開発状況
日本物理学会 (2009/9/10) 甲南大学
- ⑥ 高橋覚、青木茂樹、中村光廣他
エマルジョン望遠鏡によるガンマ線観測
計画：準備状況報告
日本物理学会 (2009/3/28) 立教大学

[その他]

ホームページ等

<http://newweb.h.kobe-u.ac.jp/lab/aoki/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
青木茂樹 (AOKI SHIGEKI)
神戸大学・人間発達環境学研究科・教授
研究者番号：80211689
- (2) 研究分担者
中村光廣 (NAKAMURA MITSUHIRO)
名古屋大学・理学研究科・准教授
研究者番号：90183889
- (3) 連携研究者
原俊雄 (HARA TOSHIO)
神戸大学・理学研究科・准教授
研究者番号：50156486

鈴木州 (SUZUKI ATSUMU)
神戸大学・理学研究科・助教
研究者番号：20243298
- (4) 研究協力者
高橋覚 (TAKAHASHI SATORU)
名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

六條宏紀 (ROKUJO HIROKI)
神戸大学・人間発達環境学研究科・大学院生

尾崎圭太 (OZAKI KEITA)
神戸大学・人間発達環境学研究科・大学院生