

宇宙線反粒子測定器 GAPS に用いる粒子飛行時間カウンタの開発

清水 雄輝* 黒川 祐樹** 入江 優花*** 福家 英之**** 他 GAPS チーム

Development of the Time-of-Flight counter for the General Anti-Particle Spectrometer

Yuki Shimizu* Yuki Kurokawa** Yuka Irie*** Hideyuki Fuke**** for the GAPS collaboration

1. はじめに

近年、宇宙マイクロ波背景放射等の精密な観測により、宇宙を構成する物質・エネルギー組成が明らかとなっている[1]。宇宙を構成する成分のうち、通常の物質であるバリオン成分は約 5%に過ぎず、残りの約 27%は暗黒物質、約 68%は暗黒エネルギーと呼ばれる未知の成分であることが分かっている。このうち暗黒物質は、バリオンでないことは分かっているものの、光を散乱・放出しないため直接的な観測が困難であり、その正体は不明のままである。暗黒物質の候補として様々な理論的推測があるが、その中で有力なものとして、質量を持ちながら通常の物質とはほとんど相互作用をしない粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP)がある。

WIMP として存在する暗黒物質の探索には、大きく分けて二種類の方法がある。一つは、WIMP が極稀に通常の物質に衝突する現象を利用した直接探索である。直接探索では、地下に設置した装置に WIMP が衝突した際に生じる原子核反跳を測定することによって WIMP を検出する。もう一つの方法として、WIMP から生じる、測定が容易な別の粒子を捉える間接探索がある。WIMP は対消滅や崩壊を起こし、その際に二次的な粒子が生成されることが理論的に予測されている[2,3]。この生成粒子のうち、特に反粒子を捉えることによって WIMP の間接的な検証が可能である。

我々が進める宇宙線反粒子測定計画 GAPS (General Anti-Particle Spectrometer)は、アメリカ航空宇宙局(NASA)の南極周回気球に搭載した測定器を用いて宇宙線中の希少な反粒子を高精度で観測することを目的とした、日米伊3か国による国際共同研究である[4]。特に、これまでに観測例のない反重陽子を主要な観測対象としている。GAPS 測定器の構成を図 1 に示す。測定器は、主検出器である中央のシリコン検出器アレイ[5,6]と、その周りを囲む粒子飛行時間(Time-of-Flight, TOF)カウンタから構成される。測定器に入射した観測対象の反粒子は、まず TOF カウンタを通過した後にシリコン検出

器アレイ内で減速・捕獲されエキゾチック原子を形成する。その後、脱励起により特性 X 線を放出し、最終的に核子対消滅によってパイ粒子や陽子のハドロン粒子群を生成する。このような反粒子の反応過程を測定器全体で精密に測定することにより、高精度での反粒子同定を可能とする。TOF カウンタは内外 2 層で構成されており、飛行時間からの入射粒子の速度計測を行うとともに、入射粒子および二次粒子の損失エネルギーの測定やトリガー生成等を行う。GAPS 計画では、TOF カウンタによる飛行時間分解能 0.5 ns 以上を要求する。

これまで GAPS に用いる TOF カウンタの開発として、モンテカルロシミュレーションによるプラスチックシンチレータ内の光の伝搬の計算[7]や、カウンタの試作試験を行ってきた[8,9,10]。本研究では、これらの成果をもとに、先行研究で問題となった時間測定におけるノイズの影響を抑えるため、新規に構築した計測システムを用いて試作 TOF カウンタの時間分解能の評価を行った。

2. 試作 TOF カウンタおよび実験セットアップ

GAPS 測定器に用いる TOF カウンタには、広い面積をカバーしつつ入射粒子の通過物質量を最小限とするため、長尺かつ薄いプラスチックシンチレータを使用する。TOF カウンタの試作に用いた材料を表 1 に示す。

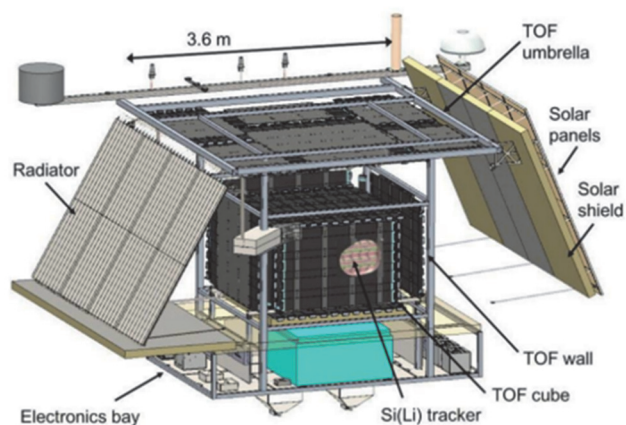


図 1 GAPS 測定器の構成

*教授 物理学教室

Professor, Institute of Physics

**学部生 機械工学科

Undergraduate student, Department of Mechanical Engineering

***大学院生 工学専攻応用物理学領域

Graduate student (M.C.), Course of Engineering

****准教授 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

Associate Professor, Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency

プラスチックシンチレータの両端には、集光用のアクリル製ライトガイドを介して光電子増倍管(Photo Multiplier Tube, PMT)を取り付けた。シンチレータとライトガイドの接着には光学セメントを用い、ライトガイドと PMT の間にはシリコンシートを挿入した。シンチレータ内で発生した光を反射させるために全体をアルミナイズドマイラーで覆い、遮光のためさらにその上から黒ビニールシートで覆った。完成した試作 TOF カウンタを図 2 に示す[10]。

表 1 試作 TOF カウンタの材料

	型式、サイズ
プラスチックシンチレータ	EJ200 (ELJEN)、150 cm × 16 cm × 0.5 cm
ライトガイド	アクリライト L001 (三菱ケミカル)
PMT	H11934-200-020 (浜松ホトニクス)、 受光面23 mm × 23 mm

時間分解能の評価には宇宙線ミュー粒子を用いた。粒子の入射時刻および入射位置の決定のため、5 cm × 5 cm × 1 cm のサイズのプラスチックシンチレータ EJ228 と PMT を組み合わせたトリガー用カウンタを 2 つ製作し、TOF カウンタを挟むように上下に配置して測定を行った。

TOF カウンタおよびトリガー用カウンタに取り付けられた PMT の出力信号を計測するため、ロジック回路に NIM モジュール、データ取得に VME モジュールを用いた。使用したモジュールのリストを表 2、モジュールの配線およびセットアップを図 3、4 に示す[10]。各 PMT の出力は signal divider で 2 つに分割し、一方を discriminator へ、他方をケーブルによってタイミングを遅らせた後に charge ADC

モジュールへ入力した。discriminator には Constant Fraction Timing (CFT)型を使用することで、PMT 信号のパルス波高の違いによる time walkを抑えた。CFT の遅延時間は TOF カウンタで 5 ns、トリガー用カウンタで 2 ns とした。各 PMT の discriminator 信号は、信号発生時刻の記録のため Time-to-Digital Converter (TDC)モジュールに入力した。また、上下 2 つのトリガー用カウンタで同時に信号が発生した場合のみトリガー信号を生成させるため、トリガー用カウンタの discriminator 信号 2 つを coincidence に入力した。図 4 のように、coincidence 信号は 2 段の gate generator に入力し、前段はラッチとして使用し、後段で時間幅 100 ns のゲート信号を生成した。このゲート信号は、charge ADC のゲート入力、TDC のトリガー入力として使用し、両モジュールのデータ取得の開始に用いた。charge ADC および TDC で 1 イベント分のデータ記録したのちに VME controller からの信号送信でラッチを解除することで、両モジュールでの取得データの同期性を確保した。

3. 実験および時間分解能の評価

前述のセットアップにより、試作 TOF カウンタおよび 2 つのトリガー用カウンタでの宇宙線ミュー粒子の同時測定を行い、各 PMT 信号の電気量および発生時刻を計測した。トリガー用カウンタの位置を 25 cm 間隔で変更し、計 5 か所のミュー粒子の入射位置で測定を

表 2 使用したモジュール

モジュール	規格	型式
Signal Divider	NIM	N-TM 227 (テクノランド)
Discriminator	NIM	715 (Philips)
Coincidence	NIM	N-TM 103 (テクノランド)
Gate and Delay Generator	NIM	N-RY 007 (テクノランド)
VME Controller	VME	V1718 (CAEN)
Charge ADC	VME	V965A (CAEN)
TDC	VME	V1290N (CAEN)



図 2 完成した試作 TOF カウンタ[10]

(上：遮光・PMT 取り付け前、下：遮光・PMT 取り付け後)

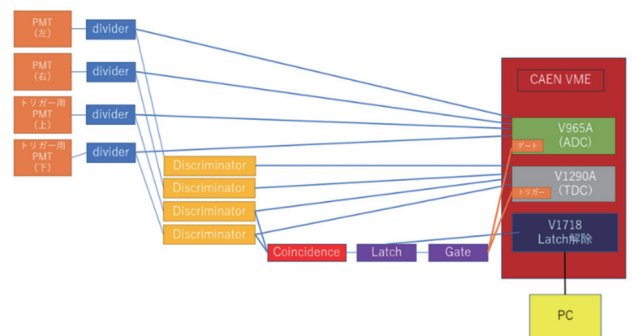


図 3 モジュールの配線図[11]

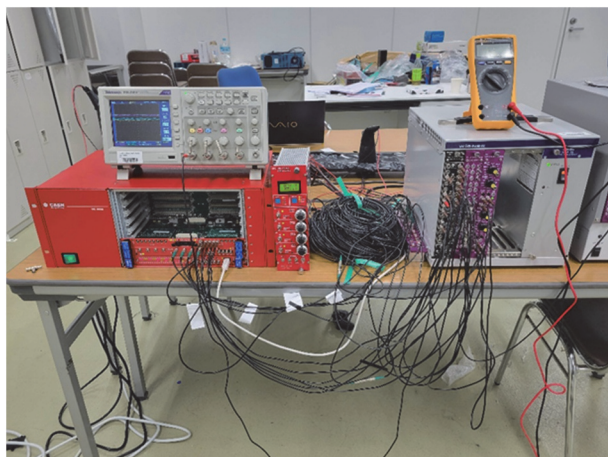


図4 モジュールのセットアップ[11]

実施した。

charge ADC で計測された電気量から、ミュオン粒子がプラスチックシンチレータを通過したときの損失エネルギーが得られる。ミュオン粒子の入射位置が TOF カウンタ中央のときの、上部トリガー用カウンタの電気量(ADC 値)の分布を図5に示す。ミュオン粒子のピークよりも低エネルギー側の分布はガンマ線などの環境放射線によるものと考えられるため、上下のトリガー用カウンタでそれぞれ ADC 値

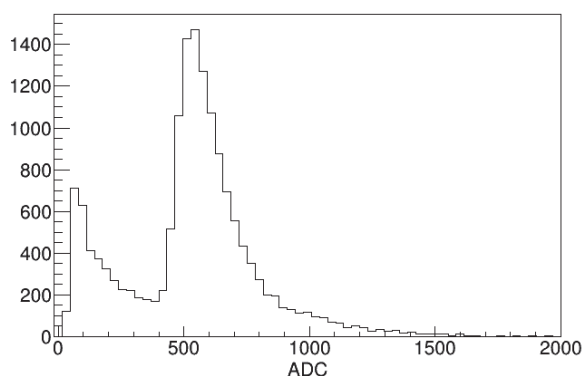


図5 上部トリガー用カウンタの電気量(ADC 値)分布

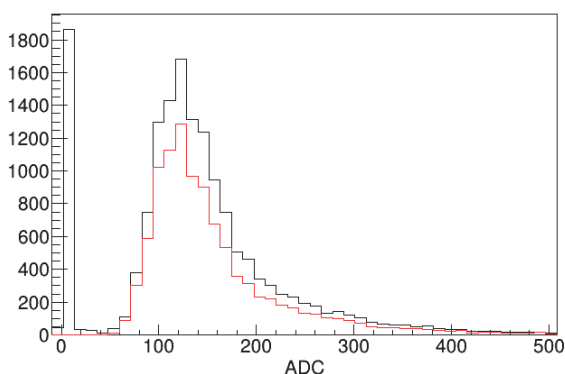


図6 TOF カウンタ左 PMT の電気量(ADC 値)分布
(黒：TOF カウンタによるイベント選別前、赤：選別後)

400、50 以上のイベントのみ解析に用いた。また、同じ入射位置における TOF カウンタの左 PMT の電気量の分布を図6に示す。前述のトリガー用カウンタによるイベント選別を行うと、ミュオン粒子のピークよりも低エネルギー側のイベントを除去することができる。

TDC で計測した各 PMT 信号の発生時刻を用いて、時間分解能の評価を行った。ミュオン粒子が TOF カウンタを通過してから、発生した光が PMT に到達するまでの時間のばらつきが時間分解能に影響を与える。ここでは、ミュオン粒子の通過時刻の代わりに上部トリガー用カウンタの信号発生時刻を時間の起点とした。ミュオン粒子の入射位置が TOF カウンタ中央のときの、TOF カウンタ左右 PMT それぞれへの光の到達時間の分布を図7に示す。それぞれの分布に、図の点線のようにガウス分布によるフィッティングをかけて、得られた標準偏差を時間分解能とした。ミュオン粒子の各入射位置における左右 PMT それぞれの時間分解能を図8に示す。入射位置が各 PMT から遠いほど時間分解能が低下する傾向が見られるが、これはプラスチックシンチレータ内での光の伝搬距離が長くなるほど光の収集効率が悪くなるためである。

GAPS 測定器では、TOF カウンタの内層と外層のシンチレータを入射粒子が通過したそれぞれの時刻の差から粒子飛行時間を求める。また各層を入射粒子が通過した時刻は、左右の PMT での信号発生

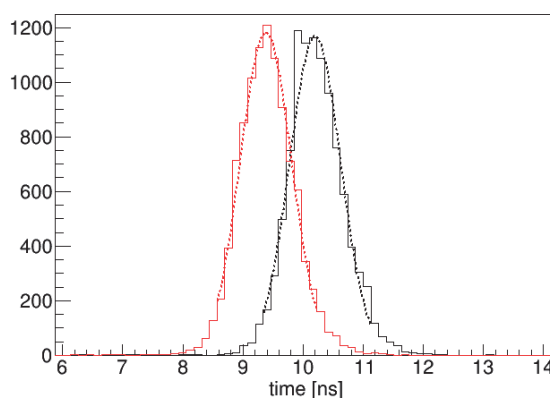


図7 TOF カウンタ左右 PMT への光の到達時間分布
(黒：左 PMT、赤：右 PMT)

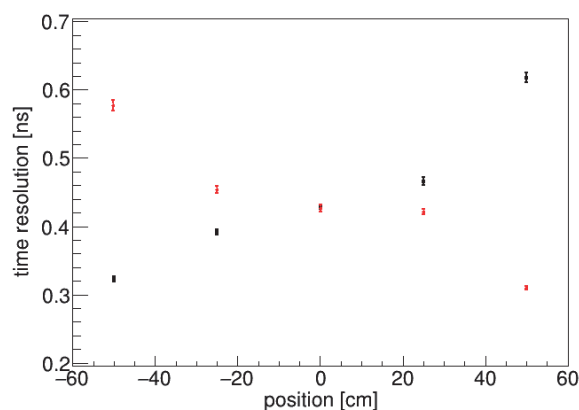


図8 入射位置ごとの各 PMT の時間分解能
(黒：左 PMT、赤：右 PMT)

時刻の平均値から算出可能である。そのため、TOF カウンタ左右 PMT の時間分解能をそれぞれ σ_L 、 σ_R とし、内層と外層で同じ性能とすると、飛行時間分解能 σ_{TOF} は次の式で表すことができる[8]。

$$\sigma_{\text{TOF}} = \sqrt{\frac{\sigma_L^2 + \sigma_R^2}{2}}$$

各入射位置における飛行時間分解能を上式から算出した結果を図9に示す。測定を行った5箇所について、要求される0.5 nsの飛行時間分解能を満たす結果が得られた。

GAPS の観測対象となる反粒子はミュオン粒子に比べて低速であるため、プラスチックシンチレータ中での損失エネルギーがより大きく、発光量も増加する。そのため、反粒子の測定時には本研究でのミュオン粒子による評価結果よりも高い時間分解能が得られることが見込まれる。

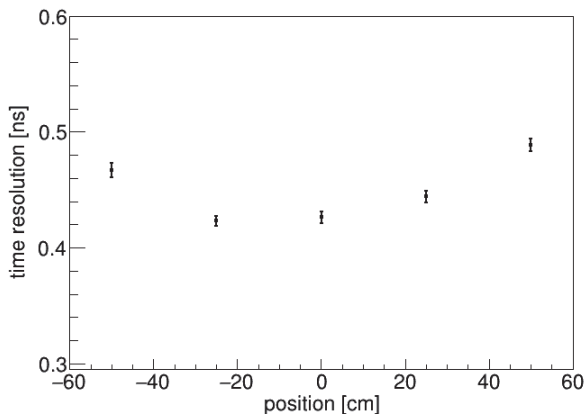


図9 入射位置ごとの粒子飛行時間分解能

4. 結論

GAPS 計画は、宇宙線反粒子の測定を通しての暗黒物質の間接探索を目的としている。本研究では、GAPS 測定器に搭載する TOF カウンタの性能実証のための試作試験を行った。長尺かつ薄いプラスチックシンチレータを用いてカウンタを試作し、時間分解能を評価した。試験には宇宙線ミュオン粒子を用い、別途用意したトリガー用カウンタにより TOF カウンタへの粒子入射位置を定めて計測を行った。ミュオン粒子の入射から TOF カウンタの両端に取り付けられた PMT へのシンチレーション光の到達までの時間差を計測し、その分布の標準偏差として時間分解能を評価した。トリガー用カウンタの位置を変更し、TOF カウンタの各入射位置について測定を行った結果、GAPS 計画で要求される粒子飛行時間分解能0.5 ns以上を満たす結果が得られた。

謝辞

本研究は、工学部特別予算重要機器整備費により購入した機器を用いて実施しました。また本研究の一部は、科研費若手研究(A) (26707015、代表者：福家英之)、基盤研究(C) (20K04002、代表者：清水雄輝)を受けて実施しました。

参考文献

- [1] N. Aghanim et al., Planck 2018 results VI. Cosmological parameters, *Astronomy and Astrophysics*, 641, A6 (2020).
- [2] T. Aramaki et al., Review of the theoretical and experimental status of dark matter identification with cosmic-ray antideuterons, *Physics Reports*, 618, 1-37 (2016).
- [3] P. De la Torre Luque, M. Winkle and T. Linden, Anti-nuclei predictions from antiproton-motivated models, *Proc. of Science, 27th European Cosmic Ray Symposium*, 423, 119 (2023).
- [4] T. Aramaki et al., Potential for precision measurement of low-energy antiprotons with GAPS for dark matter and primordial black hole physics, *Astroparticle Physics*, 59, 12-17 (2014).
- [5] K. Perez et al., Fabrication of low-cost, large-area prototype Si(Li) detectors for the GAPS experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 905, 12-21 (2018).
- [6] M. Kozai et al., Developing a mass-production model of large-area Si(Li) detectors with high operating temperatures, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 947, 162695 (2019).
- [7] 和田拓也、GAPS 気球実験に用いる TOF シンチレーションカウンタの形状の Geant4 による最適化設計、青山学院大学卒業論文 (2016)
- [8] 橋本岳、GAPS 気球実験における TOF シンチレーションカウンタの設計、青山学院大学修士業論文 (2018)
- [9] 多田瑞穂、南極周回気球搭載宇宙反粒子測定機器 GAPS に用いる粒子飛行時間計測器の研究、神奈川大学卒業論文 (2021)
- [10] 入江優花、南極周回気球による宇宙線反粒子探索実験 GAPS の粒子飛行時間カウンタの性能評価、神奈川大学卒業論文 (2022)
- [11] 黒川佑樹、南極周回気球宇宙反粒子測定計画 GAPS で用いる TOF カウンタの時間分解能の評価、神奈川大学卒業論文 (2023)