

宇宙線反粒子探索 GAPS 実験用 TOF シンチレーションカウンタの開発

橋本 岳^A, 大塚 壮平^A, 小財 正義^B, 清水 雄輝^C, 竹内 崇人^A, 福家 英之^B,
 蓑島 温志^A, 吉田 篤正^A, 吉田 哲也^B, 渡邊 翼^A, 和田 拓也^A,

青学大^A, ISAS/JAXA^B, 神奈川大^C

1. 概要

General Anti-particle Spectrometer (GAPS)は南極周回気球フライトによる宇宙線反粒子(反重陽子・反陽子)の高感度探索を通じたダークマター探査を主目的とする日米欧の国際共同実験計画である。GAPSは2020年度の第1回フライト実施を目指している。我々は測定器の一つであるTime of flight(TOF)シンチレーションカウンタの開発を行っており、その現状を報告する。

2. 研究背景

超対称性粒子ニュートラリーノなどのダークマター候補が対消滅や崩壊をすることで生成され得る粒子の一つとして反重陽子が考えられており、宇宙線中のそのフラックスは0.1 GeV/n付近の低エネルギー領域に極大を持ち得ると予想されている[1]。一方、宇宙線と星間物質との衝突で生成され得る二次起源の反重陽子は、その生成の運動学から低エネルギー領域でのフラックスが抑制されると考えられている。従って、低エネルギー領域では、二次起源の反重陽子の影響を殆ど受けずにダークマター起源の反重陽子を探査できる(図1)[2]。

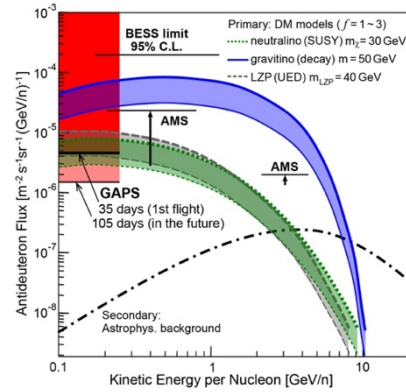


図1 ダークマター候補起源や宇宙線二次起源の反重陽子の予測エネルギースペクトルとGAPSの探索感度[2]

3. 観測手段

GAPSは南極周回気球による長時間観測を行う。GAPSが検出したい反重陽子は低エネルギーであることから、地磁気によるカットオフが十分に小さい高緯度帯の高空で観測を実施したい。夏季の南極上空の成層圏には周回する偏東風が吹いており、NASAが南極マクマード基地を拠点に運用する気球実験では一度のフライトで1ヶ月間程度飛翔することができる。以上の理由から、GAPSは南極周回気球フライトによって、宇宙線反粒子、とりわけ反重陽子の高感度探査を通じたダークマター探査を行う予定である。

4. GAPS 測定器と検出原理

GAPS 測定器は主にリチウムドリフト型シリコン(Si(Li))半導体検出器群とTime of flight(TOF)シンチレーションカウンタ群で構成されている(図2)[3]。Si(Li)半導体検出器は測定器の中心部の1.6 m×1.6 m×2.0 mの空間内にアレイ状に配置される。そのSi(Li)半導体検出器群を囲うようにしてパドル状のTOFシンチレーションカウンタが内外2層に配置されている。

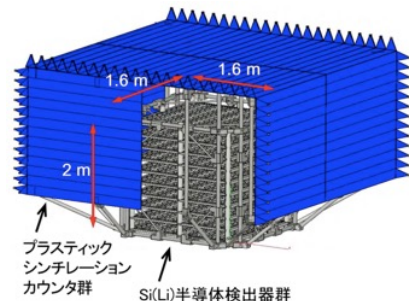


図2 GAPS 検出器概念図[3]

GAPS では、励起エキゾチック原子を用いた手法で反粒子の同定を行う[4]。飛来してきた宇宙線反粒子は測定器内でエネルギー損失によって減速し、Si(Li)検出器内に捕捉されて励起エキゾチック原子を生成する。捕捉された反粒子はカスケード的に準位を落とし、反粒子種に対応した特性X線を放出する。さらに反粒子が核子まで到達すると核子対消滅を起こして π/p 群を生成する。反粒子種に固有な特性X線を1~2本以上、 π/p 群を5~6個以上検出することで反粒子の同定を行う(図3)[5][6]。TOFシンチレーションカウンタは、入射宇宙線に対するトリガー生成、入射宇宙線の速度(β)の測定、エネルギーデポジット(dE/dx)の測定や二次的に発生する π/p 群検知等の役割を担う。

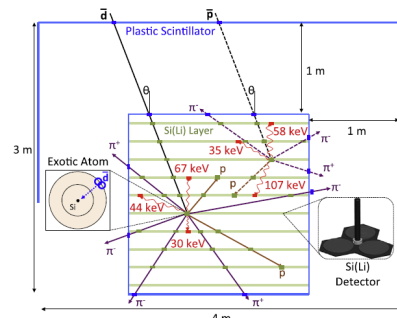


図3 励起エキゾチック原子の崩壊過程を用いたGAPS検出原理[5][6]

5. TOFカウンタへの要求仕様と開発状況

TOFカウンタに対する要求仕様として、稀少な反重陽子を探索するために大きな面積立体角が求められる。また、内外2層のTOF間の距離を1mとした場合、2層間の飛行時間で反重陽子と反陽子を弁別するには、0.5 ns程度以上の時間分解能が求められる[7]。さらに、気球実験であるため、消費電力や読み出しチャンネル数にも制限がつく。低エネルギー宇宙線への透過性も必要である[8]。以上を満たすTOFカウンタの基本設計として、これまでの検討により、各TOFカウンタのシンチレータの寸法は長さ1.8 m、幅16 cm、薄さ5 mmのパドル状とし、両端にはライトガイドを介して光電子増倍管(PMT)を取り付ける構造を考えている。隣接するTOFカウンタホドスコープ間をできるだけ密着させ面積立体角内の不感領域を最小化するため、シンチレータ両端のライトガイドを曲げるような検討も求められる。

以上を満たすべく、TOFカウンタの設計の最適化検討を行っている。検討は、TOFカウンタの試作モデルによる性能評価とシミュレーションツールキット Geant4 を用いたカウンタ内の光伝搬シミュレーションによる性能予測の双方からアプローチしている。本稿では、ライトガイドの形状、光電子増倍管(PMT)、そしてシンチレータ長の3種類のパラメータを変化させた性能比較を報告する。

試作モデルに使用したシンチレータはEljen EJ-200であり、長さは500 mm または1500 mm、幅と厚さは固定でそれぞれ160 mmと5 mmとした。ライトガイドには三菱ケミカルアクリライト#000を使用した。PMTは浜松ホトニクスH6410またはR7600-200を使用した。信号には宇宙線 μ 粒子を用い、TOFシンチレータを挟む2個のトリガー用シンチレーションカウンタでトリガーした。トリガー用カウンタのシンチレータは長さ10 mm、幅160 mm、厚さ10 mmで、シンチレータの片側から浜松ホトニクスのPMT R9880-210で信号を読み出した。以下で述べる結果は、いずれも、シンチレータの長さ方向の中央部でトリガーをかけて測定した結果である。

結果の一例として、図5に示す試作モデルの結果を述べる[8][9]。シンチレータの長さは500 mmであり、片方の端にはシンチレータの中心軸上を延伸したライトガイド(ストレート型)を、もう片方には湾曲しシンチレータと直交するライトガイド(カーブ型)を取り付けた。カーブ型はTOFカウンタ間の密着性を向上させる一案である(図4)。PMTには、受光面積は広い(ライトガイド端面900 mm²)が走行時間広がり(TTS)は小さくない(1.1 ns)H6410を用いた。その結果、カーブ側(表1のPMT2)の検出光量や時間分解能は、ストレート側(表1のPMT1)よりも1割程度劣っていた。とは言え、カーブ型にも不感領域抑制の効果はあることから、さらなる詳細検討が必要であると考えている。

次に、長さ500 mmのシンチレータの両端に端面を絞ったライトガイドを取り付け、PMT R7600-200で計測した。R7600-200は、受光面積は広くない(324 mm²)が、TTSには優れている(0.35 ns)。ライトガイド端面が受光面積に等しい場合を表1のPMT4に、受光面積をさらに小さい144 mm²に絞った場合を表1のPMT3に示す。表に示されたとおり、時間分解能ではR7600-200はH6410よりも1割程度劣り、光電子数ではR7600-200はH6410よりも2割程度劣る結果となった。ただし、R7600-200はH6410よりも印加高電圧が低くて済み、小型なために重量や不感領域の抑制に寄与するという利点もある。このようなことから、GAPSではR7600-200を基本設計のPMTとして位置づけている。

表1のPMT5とPMT6は、シンチレータを1500 mmにし、H6410で受光した場合の実験結果である。シンチレータ長を500 mmから1500 mmに伸ばしたことで、時間分解能が2割程度悪化する結果となった。時間分解能確保のためにはシンチレータが短いほど良いが、GAPS測定器全体の読み出しチャンネル数の抑制のためには1枚あたりのシンチレータ寸法がある程度は大きい必要がある。

表1にまとめた各PMTでの時間分解能を見ると、全て0.5 nsを満たす結果となっている。ただし、これらの値にはトリガー用カウンタ自身の時間分解能が包含されている。そこで、より高精度な評価を行うため、トリガー用カウンタも両側からPMTで信号を読み出すよう改変する

作業を進めている。これによりトリガー用カウンタ内の宇宙線通過位置を割り出すことができ、トリガー用カウンタの位置依存性に伴う TOF カウンタの時間分解能悪化を低減できると見込んでいる。なお、トリガー用カウンタの時間分解能の影響を除去した TOF カウンタの真の時間分解能を簡便に推測するため、次のような考察も行った。表 1 に用いた実験データにおいて各 TOF カウンタの両端の PMT 信号を同等かつ独立だと仮定すると、両端の PMT 信号の時間情報の差分はトリガー用カウンタ信号の位置依存性を相殺すると見なされる。この方法で算出した各 TOF カウンタの時間分解能を表 2 に示す。いずれも要求仕様の 0.5 ns を有意に上回っている。なお、PMT としては、以上で述べた 2 製品以外に、浜松ホトニクス H11934-200 の使用も検討している。H11934-200 は、中規模の受光面積(529mm²)、優れた TTS(0.27 ns)、比較的軽量、比較的低い印加高電圧、の特色を兼ね備えている点が魅力である。シンチレータに関しては、EJ-200 が同等と謳っている Bicorn BC-408 との性能比較も検討している。

一方、Geant4 を用いたシミュレーションでは、試作モデルと同一形状の TOF カウンタにおける光伝搬シミュレーションをはじめ、TOF カウンタの設計パラメータを様々に変化させてのパラメータスタディも行っている[10]。シミュレーションには EJ-200 のシンチレーション光スペクトル等の基本情報を設定した。PMT が検出する光電子数は、PMT の量子効率値を透過率とする入射窓と反射率が 0 の光電陰極面を設定することで模擬した。そのうえで、光電陰極面に早く到達した光電子の到達時間の分布の標準偏差をシミュレーションにおける時間分解能と見なした。試作モデルと同一形状の TOF カウンタに関して、光電陰極面に 7 番目に到達した光電子を用いてシミュレーションした時間分解能を表 2 に示す。PMT の TTS の効果や宇宙線がシンチレータ内を斜めに通過することに伴う光量増加の効果等はシミュレーションにまだ組み込んでいないものの、シミュレーション結果は試作モデルと概ね同様の傾向を示し整合している。これを踏まえ、例えばシンチレータ長を 1800 mm に伸ばしても時間分解能に対する要求仕様 0.5 ns を満たす見込みを得ている。今後は、試作モデルとの相互フィードバックにより、Geant4 シミュレーションにおける TOF カウンタの応答を高精度化し、後述する測定器全体のシミュレーションに加味することで、TOF カウンタの設計最適化を図る予定である。

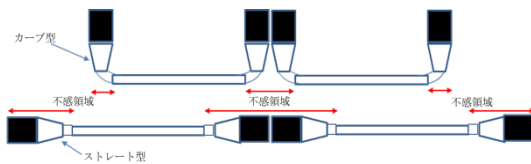


図 4 ライトガイドがストレート型とカーブ型の TOF カウンタにおける不感領域の差異の概念図



図 5 ストレート型(左端)とカーブ型(右端)のライトガイドを取り付けた試作 TOF カウンタ [8][9]

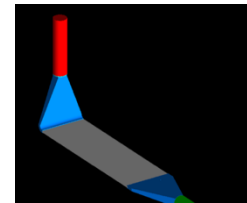


図 6 ストレート型(左端)とカーブ型(右端)のライトガイドを取り付けた TOF カウンタの Geant4 モデル [10]

表 1 試作 TOF モデルのシンチレータの中心でトリガーをかけたときの各 PMT の時間分解能と光電子数。光電子数の比較には PMT の増幅ゲインの見積誤差(±10%程度)の考慮が必要である

	時間分解能	光電子数
PMT1 シンチレータ500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410	0.39±0.01(1σ) ns	97.2±3.9(1σ) 個
PMT2 シンチレータ500 mm ライトガイド30 mm角のカーブ型 PMT H6410	0.43±0.01(1σ) ns	92.7±4.9(1σ) 個
PMT3 シンチレータ500 mm ライトガイド12 mm角のストレート型 PMT R7600-200	0.49±0.01(1σ) ns	63.6±5.7(1σ) 個
PMT4 シンチレータ500 mm ライトガイド18 mm角のストレート型 PMT R7600-200	0.44±0.01(1σ) ns	82.1±9.8(1σ) 個
PMT5 シンチレータ1500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410	0.49±0.01(1σ) ns	102.5±7.5(1σ) 個
PMT6 シンチレータ1500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410	0.48±0.01(1σ) ns	105.7±9.2(1σ) 個

※シグマの値はフィッティング誤差

表 2 トリガーカウンタの位置依存性を概算で相殺した試作モデルとシミュレーションの時間分解能

	時間分解能	
	実験($\sigma_{ex} = \sqrt{2}\sigma_{el}$)	シミュレーション
PMT1 シンチレータ500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410	0.22±0.01(1σ)ns	0.14±0.01(1σ)ns
PMT2 シンチレータ500 mm ライトガイド30 mm角のカーブ型 PMT H6410		0.15±0.01(1σ)ns
PMT3 シンチレータ500 mm ライトガイド12 mm角のストレート型 PMT R7600-200	0.29±0.01(1σ)ns	0.36±0.01(1σ)ns
PMT4 シンチレータ500 mm ライトガイド18 mm角のストレート型 PMT R7600-200		0.28±0.01(1σ)ns
PMT5 シンチレータ1500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410	0.29±0.01(1σ)ns	0.21±0.01(1σ)ns
PMT6 シンチレータ1500 mm ライトガイド30 mm角のストレート型 PMT H6410		0.20±0.01(1σ)ns

※シグマの値はフィッティング誤差

6. トリガースキームの検討

飛行時間の測定と並んで TOF カウンタが担う重要な役割はトリガー信号の生成である。稀少な反重陽子を高効率でトリガーする必要がある一方で、反重陽子よりもフラックスが 10 桁程度も高い宇宙線陽子などのバックグラウンドのトリガーレートは抑制する必要がある。GAPS のデータ収集系の処理能力を勘案すると、データ収集に伴う不感時間(デットタイム)を十分に抑制

するにはトリガーレートをおよそ 1 kHz 程度以下に抑えたい。一方、20 m²sr を超える大面積立体角を想定すると、内外 TOF カウンタを通過した荷電宇宙線イベントを無条件にトリガーすると、トリガーレートは陽子だけでもおよそ 100 kHz 程度になってしまう。そのため、反重陽子や反陽子に対する高いトリガー効率を確保しつつ、デッドタイムを減らすことができるトリガー条件の検討が必要となる。

Si(Li)半導体検出器からの信号は応答が遅いため、トリガースキームには TOF カウンタの信号のみを活用する。Geant4 を用いたシミュレーションにて陽子、反陽子、反重陽子等の宇宙線イベントを模擬し、比較的シンプルなトリガースキームによってバックグラウンド陽子に対する高い除去能と反粒子に対する高いトリガー効率を実現することを目指している。これまでの検討の結果、高エネルギーバックグラウンド(運動エネルギーが 1 GeV 以上の陽子)に関しては、外層 TOF カウンタのエネルギー損失を 1.0 MeV 以上に制約することで、82%を排除できる見込みを得た。また、低エネルギーバックグラウンド(1 GeV 以下の陽子)はエネルギーデポジットのある TOF カウンタの枚数を 6 枚以上とする条件をかけることで多く除去でき、低エネルギー陽子のトリガーレートを約 2%に抑制できる見込みである。ただし、この条件では反陽子のトリガー効率が 90%を下回ってしまうため、改善が必要である。具体的には、エネルギーデポジットのある TOF カウンタの分布(ヒットパターン)等の情報も活用することで、複合的なトリガースキームの最適化を行っていく予定である。

7. PMT 較正装置の開発

GAPS は気球がフライトする低温低圧下で観測を行う。TOF カウンタは曝露環境で使用するため、PMT は南極上空と同様な低温低圧下で動作するようポッティングしたうえで予め環境試験を行う必要がある。GAPS で使用予定の PMT の本数は 400~500 本であり、1 年余の期間内に全数を低温低圧下で較正・動作試験する必要がある。そこで、パルスレーザーによる人工光源を用いて一度に多数の PMT を低温低圧下で試験できる較正システムを開発中である。

8. GAPS 測定器全体の詳細設計

前述の TOF カウンタ単体の性能評価結果を踏まえて、GAPS 測定器全体の詳細設計も進めている。Geant4 を用いて測定器全体を模擬し、TOF カウンタだけでなく Si(Li)検出器も含めた、各構成要素の配置や形状等の設計パラメータの最適化検討を行っている。

9. まとめ

GAPS は宇宙線反粒子の高感度探索を通じたダークマター探査を主目的とする南極気球実験計画である。その実現に向け、測定器の一つである Time of flight(TOF)シンチレーションカウンタの開発を行っている。これまでに試作した TOF カウンタの評価結果により、時間分解能に対する要求仕様の 0.5 ns を満たす見込みを得ている。ただし、これまでの評価試験ではトリガー用シンチレーションカウンタ自身の時間分解能などの誤差も含めてしまっているため、今後はトリガー用カウンタの改良などを行って評価試験の精度を向上し TOF カウンタの各設計パラメータの詳細な最適化を図る予定である。トリガースキームの最適化や PMT 較正装置の開発等も進めていき、GAPS 実施に備える予定である。

謝辞

PMT 較正装置の開発に際して甲南大・山本常夏研究室にご協力を頂いております。本研究の一部は科研費(JP22340073, JP26707015, JP17H01136)、JAXA 小規模計画経費を受けて実施しました。

参考文献

1. F. Donato et al., Phys. Rev. D 62(2000) 043003.
2. 福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム(H28 年度)S5-024(SA6000060039)
3. H. Fuke et al., Adv. Space Res. 41(2008) 2056.
4. K. Mori et al., Astrophys. J. 566(2002)604.
5. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 49(2013)52-62
6. 小財正義 他, 大気球シンポジウム(H28 年度)isas-16-sbs-007
7. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 74(2016)6-13.
8. 和田拓也 他, 宇宙科学シンポジウム(H28 年度)P-031(SA6000060073)
9. 橋本岳, 2015 年度 青山学院大学卒業論文
10. 和田拓也, 2015 年度 青山学院大学卒業論文