



暗黒物質探索のための宇宙線反粒子検出器の開発

清水 雄輝*

Development of Cosmic Ray Antimatter Detector for Dark Matter Search

Yuki Shimizu*

1. 緒言

最近の宇宙マイクロ波背景放射非等方性の高精度観測により、宇宙の組成は正体不明の暗黒物質および暗黒エネルギーが主成分であることが明らかとなってきた。宇宙組成のうち、通常物質を構成するバリオン（陽子や中性子）はわずか5%程度であり、残りの成分は暗黒物質が約27%、暗黒エネルギーが約68%を占める⁽¹⁾。そのうちの暗黒物質については、宇宙論および素粒子論的な研究から、通常物質とほとんど相互作用をしないが質量を持つ粒子（Weakly Interacting Massive Particle, WIMP）として存在する可能性が示唆されている⁽²⁾。WIMP は定義上、光を放射せず、物質を何の痕跡も残さずに通過してしまうため、その検出は困難である。一方、宇宙空間を飛び交う WIMP の存在を何らかの方法で確認することは、宇宙物理学のみに止まらず、素粒子物理学の領域においても大きなインパクトがあることから、世界中で様々な観測の試みが行われている。これまで、WIMP を直接的に検出する試みとして、地下の低バックグラウンド環境を利用した実験が世界各地で行われてきた。これは、WIMP が物質中の原子核に衝突する極めて稀な現象を捉える手法を用いており、宇宙線由来の放射線を防ぐため地下で実験を行うのが通例である。1998年、イタリアのグランサッソ研究所にて実験を行った DAMA グループが、WIMP の存在の証拠となる、地球の公転運動から期待される WIMP 散乱スペクトルの季節変化(～数%)を捉えたと報告した⁽³⁾。しかし、後続の実験によりそのパラメータ領域は棄却されている⁽⁴⁾。著者自身もシンチレーション検出器等を利用した地下での WIMP 探索実験を行ってきたが^(5,6)、この手法は最も直接的な探索手段

ではあるものの、WIMP 由来の信号と環境放射線によるバックグラウンドを根本的に区別する方法がないという難しさがあり、未だ検出には至っていないというのが現状である。

WIMP は前述のように正体は不明であるが、素粒子標準理論を超える複数の理論モデルにおいて、WIMP として存在し得る未発見の粒子が予言されている。そのうちの有力候補である、超対称性理論から予言されるニュートラリーノなど、各種理論モデルにて WIMP はマヨラナ粒子である可能性が指摘されている。マヨラナ粒子とは、自身が自身の反粒子を兼ねる性質を持つ粒子であり、同種粒子同士が衝突すると対消滅を引き起こす。また、WIMP は宇宙初期から存在できる程度に安定であるが、有限の寿命を持つとする理論モデルもある。前者では WIMP 同士の対消滅、後者では単一の WIMP の崩壊によって、観測可能な別の種類の粒子が発生する可能性があり、それらの二次的な粒子を捉える方法が近年注目されている。これまでに、Fermi や AMS-02 等の宇宙実験による電子・陽電子の観測⁽⁷⁾、スーパーカミオカンデや IceCube 等の地下からのニュートリノの観測⁽⁸⁾がある。また、著者が開発に参加した、現在国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームで運用が行われる CALET では、未開拓であった 10TeV 領域までの電子・陽電子観測が現在進められている⁽⁹⁾。しかし、これまでのところ WIMP に由来する事象の有意な兆候は見られていない。これらの実験では、観測対象の粒子が宇宙空間にありふれた粒子であり、バックグラウンド事象が元々多いことが観測を困難とする一因となっている。ところで、WIMP の対消滅や崩壊事象で生成される可能性のある粒子のうちで、同種粒子のバックグラウンドが十分少ないものとして、反重陽子がある。反重陽子は、陽子と中性子が結合した重陽子と対になる反粒子で

*准教授 物理学教室
Associate professor, Dept. of Physics

ある。図1に、複数の理論モデルから予想される WIMP に由来する反重陽子のスペクトルおよび、宇宙空間に存在する高エネルギー宇宙線から生じる重陽子バックグラウンドの推定量を示す。100~300MeV のエネルギー領域では、WIMP 由来の重陽子がバックグラウンドよりも2桁以上多く存在すると考えられ、WIMP 由来事象の有意な検出が可能と言える⁽¹⁰⁾。

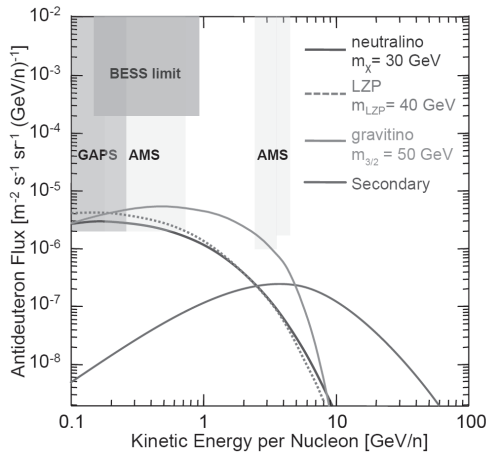


図1 予想される反重陽子フラックスとGAPSの感度⁽¹⁰⁾

反重陽子を含む反粒子の観測では、AMS-02 に代表される強磁場磁石 (~1T) を利用した粒子飛跡測定が一般的である。これは、粒子・反粒子が逆の極性の電荷を持つことを利用し、観測装置中で磁場によって飛跡が曲がる方向を測定することによって識別を行う手法である。宇宙から飛来する反粒子の測定には、大気の影響避けられる環境での実施が必要である。そのため、人工衛星や高高度気球といった飛翔体を利用した実験を行う必要がある。飛翔体実験において大質量の磁石を用いることは、搭載重量の制約に加え、検出器の有効面積・視野角が限られることもあり、予想される存在量の少ない反重陽子の検出に必ずしも最適とは言えない。

著者らが現在開発を進める GAPS (General Antiparticle Spectrometer) は、数百 MeV 領域の宇宙線反粒子検出を目的とする、長期間気球の利用を想定した実験計画である。これまでに例のない、反粒子が形成するエキゾチック原子の崩壊過程を利用した検出原理を用いることにより、大面積・広視野角での反重陽子測定が可能である⁽¹²⁾。GAPS 計画では、太陽風の影響の少ない太陽活動極小期となる、2020 年の観測実施を目指している。地磁気によるカットオフエネルギーが低い高緯度地域で観測を行うため、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の南極周回気球へ

の搭載を想定している。2012 年、観測装置の要素試作モデルで構成されたプロトタイプ(pGAPS)を宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)の大気球に搭載した実験が実施され、実際の成層圏環境下での技術実証を成功させている⁽¹³⁾。現在は、本実験の実現に向け、観測装置のさらなる研究開発が進められている段階である。

本稿では、この GAPS 計画の概要に加え、開発を進めている主要検出器の一つ、粒子飛行時間 (Time of Flight, TOF) 計測カウンタに関する研究の現状について紹介する。

2. エキゾチック原子崩壊を利用した反粒子検出

GAPS での反粒子検出の原理を図2に示す。反粒子は通常の荷電粒子と同様、真空中から観測装置を構成する物質に入射すると、電離損失過程によって運動エネルギーを失う。反粒子は運動エネルギーの減少に伴って徐々に速度を落とし、最終的に物質中の原子の周りの電子軌道に補足されて、エキゾチック原子を形成する。このエキゾチック原子は、形成された瞬間は励起状態にあり、時間が経過するとより低いエネルギー準位の状態に段階的に落ち込む。この状態遷移に伴い、複数の特性 X 線が放出される。そして、最終的には原子核に落ち込み、核子対消滅を起こして π 粒子や陽子等のハドロン粒子を放射状に発生させる。この特性 X 線およびハドロン粒子の測定によって、高精度の反粒子同定を行うことが GAPS の特徴である。

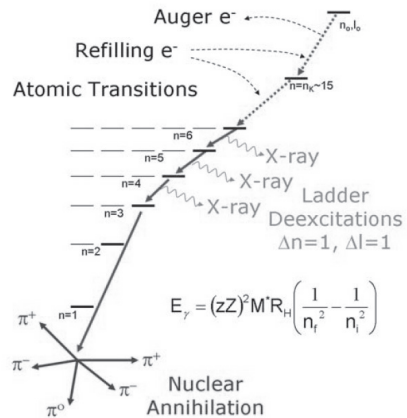


図2 GAPS による反重陽子測定原理⁽¹²⁾

GAPS の観測装置概要を図3に示す。観測装置を構成する主要要素は、中央に配置されたリチウムドリフト型シリコン半導体検出器 (Si (Li)) および、それらを取り

囲むように配置されたプラスチックシンチレーション TOF 計測カウンタ (TOF カウンタ) の 2 種類の放射線検出器である。どちらも複数の特性 X 線ならびにハドロン粒子を識別するため、細分化されたアレイ構造となっている。観測装置内での反重陽子の反応とその検出の仕組みを図 4 に示す。Si (Li) は、エキゾチック原子から生じる特性 X 線の検出を行うと同時に、入射反粒子の減速・吸収材としての機能を持つ。また、TOF カウンタで

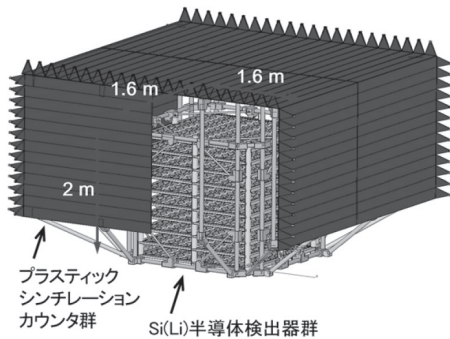


図3 GAPSの観測装置概略図

は、入射反粒子の飛行時間測定に加えて、核子対消滅で生じるハドロン粒子の検出を行う。

前述のように、GAPS による暗黒物質の探索では、反重陽子が直接の測定対象となる。反重陽子の検出においては、反陽子が主要なバックグラウンドとなる。反陽子は、陽子と対になる反粒子であり、宇宙空間におけるフラックスが反重陽子に比べて 1000 倍以上である。反陽子と反重陽子はともに GAPS の観測装置内でエキゾチック原子を生成するが、脱励起過程で放出される特性 X 線のエネルギー、核子対消滅によって発生するハドロンの粒子数、質量の違いに由来する飛行速度などの違いが生じ

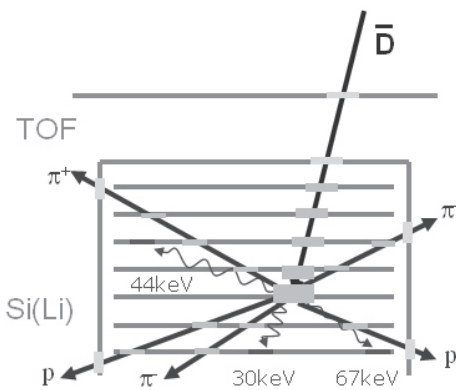


図4 反重陽子の観測装置内での反応⁰⁰

る。GAPS では、これらのパラメータについての詳細な事象解析によって、反重陽子と反陽子の識別を行う。十分な識別性能を得るには、エネルギー分解能、飛行時間分解能等の検出器性能に加え、生成粒子のマルチヒット抑制のための検出器細分化を必要とする。同時に、フラックスの極めて少ない反重陽子を捉えるため、検出器の大容積化が求められる。

3. 飛行時間 (TOF) 計測カウンタの開発

現在著者は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、青山学院大学、東海大学等と共同で、GAPS の観測装置を構成する TOF カウンタの開発を進めている。TOF カウンタは、観測装置の中心部を構成する Si (Li) 検出器全体を取り囲むように配置され、内層・外層の 2 層構造となる。この TOF カウンタは、反粒子の観測において主に以下の役割を担う。

- ・入射する反粒子の TOF 測定による速度決定
- ・核子対消滅で生じる π 粒子・陽子等ハドロンの検出
- ・反粒子の通過位置の測定による到来方向の決定

比較的安価に大面積の検出器製作が可能であり、光速に近い入射粒子の飛行時間を測定可能な速い時間応答特性を持つ検出器として、プラスチックシンチレータを用いる。プラスチックシンチレータは、荷電粒子が通過するときに損失するエネルギーを受け取り、シンチレーション光を放出する。シンチレーション光の検出には光電子増倍管 (Photomultiplier tube, PMT) を用いる。GAPS で用いるプラスチックシンチレータ、EJ200 (ELJEN 社) の基本特性を表 1 に示す。

表 1 EJ200の基本特性

光量	64% (アントラセン比)
立ち上がり時間	0.9 ns
減衰時間	2.1 ns
ピーク波長	425 nm
屈折率	1.58

反重陽子と反陽子を飛行時間から識別するためには、0.5ns 以下の時間分解能が要求される。TOF カウンタの最適な設計およびその性能を見積もるため、計算機による粒子相互作用シミュレーションおよび装置試作による評価実験を並行して行った。本章ではその研究の概要を報告する。

3.1 計算機シミュレーションによる光伝播の評価

プラスチックシンチレータでは、内部を通過する粒子が電離損失により物質中で失ったエネルギーの一部が光子となり、減衰時間に従って放出される。その光パルスを PMT で検出することによって、粒子が通過したときに失ったエネルギーおよび通過時刻を測定する。GAPS では、同一の入射粒子が外層および内層に位置する TOF カウンタを通過した時刻をそれぞれ計測し、その差から飛行時間を決定する。粒子の通過時刻は、シンチレータ内で発生した光が PMT で検出されたタイミングから求められる。シンチレータでの光の発生や伝播は確率過程であるため、入射粒子の通過から PMT での光検出までの時間にはばらつきが生じる。このばらつきが飛行時間測定に誤差を生む。そこで計算機を用い、放射線の物質中での相互作用および、発生した光子が PMT まで伝播する過程をシミュレーションによって評価した。

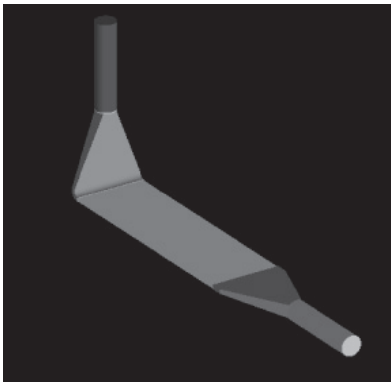


図5 GEANT4 でモデリングした TOF カウンタ⁽¹⁸⁾

シミュレーションには、放射線相互作用の計算に広く使われる、ヨーロッパ原子核研究機構の提供するモンテカルロシミュレーションコード GEANT4⁽¹⁴⁾を用いた。GEANT4 でモデリングした TOF カウンタを図5に示す。板状のプラスチックシンチレータ (500mm×5mm×16mm) の両端に、それぞれアクリルライトガイドを介して PMT を取り付ける設計となっている。2本の PMT への光の到達時間の差を用いて、シンチレータ内の入射位置の測定が可能である。GAPS では気球搭載時のサイズの制約のため、検出器は可能な限りコンパクトな形状にすることが望ましい。後述の試作検出器の設計と条件を合わせるため、プラスチックシンチレータの片側端にはストレート型ライトガイド、反対側の端にはカーブ

型ライトガイドを接続している。また、光の収集効率を上げるため、プラスチックシンチレータとライトガイドの周囲にアルミナイズドマイラーを模擬した薄いアルミ板を設置した。

シミュレーションでは、プラスチックシンチレータの各位置に、1GeV のミュー粒子を 5000 回ずつ入射させた。ミュー粒子の選択は、後述の宇宙線測定を模擬するためである。ミュー粒子をプラスチックシンチレータ中央部に入射させたときの、各 PMT へ最初の光子が到達した時刻の分布を図5に示す。ミュー粒子を発生させた時刻を時間の基準としている。図の分布幅が検出時刻のばらつきを示しており、各 PMT における時刻決定精度に相当する。ストレート型、カーブ型ライトガイドの両者で、時間分解能は約 0.15ns(1 σ)という結果が得られた。装置サイズ制約を考慮したカーブ型ライトガイドを用いた場合でも、ストレート型と比べてそんな色のない性能が得られることが分かった。入射粒子の通過時刻は両 PMT の計測時刻の平均値により決定するため、その分解能は約 0.11 ns となり、要求性能を十分満たしている。

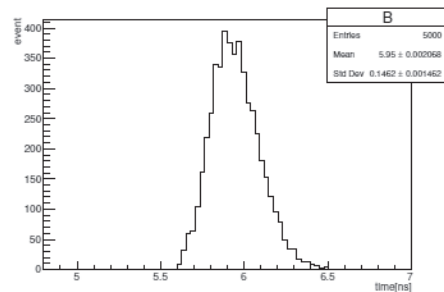
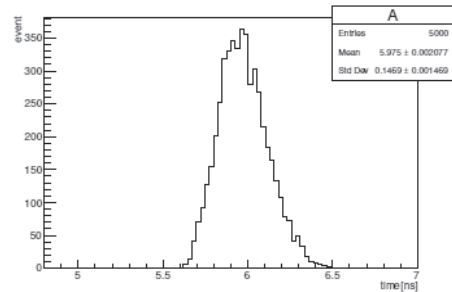


図6 シンチレーション光の PMT への到達時間分布⁽¹⁸⁾
(上がストレート型、下がカーブ型)

4.2 TOF カウンタの試作および性能評価

シミュレーションによる評価は一般的に、実機では避けられない製品のばらつきや物質の不均一さ等を取り入れることが困難なため、性能を過大評価することが多い。

シミュレーションによる評価と実機の比較のため、TOFカウンタを試作し、時間分解能の評価を行った。試作に用いた主要な材料を表2に示す。

表2 TOFカウンタの主要材料

	型番	サイズ
プラスチックシンチレータ	EJ200	500mm×5mm×160mm
ライトガイド	アクリライト	160mm (長さ)
オプティカルセメント	EJ500	-
PMT	H6410	-

製作中のTOFカウンタの写真を図6に示す。シンチレーション光の収集効率を上げるため、シンチレータおよびライトガイドには反射材としてアルミナイズドマイラーを巻いた。その後、環境からの光を遮るため、ブラックシートで全体を覆っている(図7)。

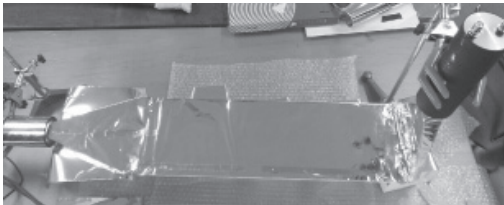


図7 製作中のTOFカウンタ⁽⁶⁾

プラスチックシンチレータの時間分解能の評価試験は、宇宙線ミュオン粒子を利用して行った。ミュオン粒子は、地球の外から到来する高エネルギー宇宙線が大気と衝突して生じた二次粒子であるが、大気や物質中で電離損失以外の反応を起こしにくいいため、十分高いエネルギーを持ったまま地表まで到来すると同時に、プラスチックシンチレータを貫通できる。試作したTOFカウンタの宇宙線測定時セットアップを図8に示す。TOFカウンタの上側・下側にそれぞれ、1cm角立方体のプラスチックシンチレータを重ねて配置してある。上空から到来したミュオン粒子がこの2本のシンチレータを通過したときにトリガ信号を発生することで、物質を貫通して直進するミュオン粒子とガンマ線等の環境放射線を識別すると同時に、プラスチックシンチレータ中のミュオン粒子が通過した位置を特定する。時間測定には、40psの時間分解能を持つ、Time-to-Digital Converter (TDC) のRPC-170 (林業精器)を使用した。

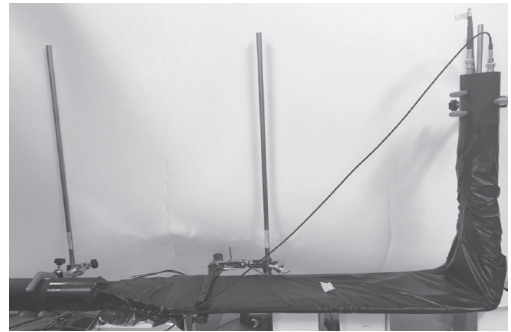


図8 TOFカウンタの宇宙線ミュオン粒子測定セットアップ⁽⁶⁾
(写真右がカーブ型、左がストレート型ライトガイド)

上下のトリガ用シンチレータの同時計測タイミング信号をTDCのスタートとし、ストレート型およびカーブ型ライトガイド接続のPMT出力パルスをそれぞれストップ信号として、シンチレーション光が各PMTに到達したタイミングを測定した。両PMT出力のTDCによる測定結果を図8に示す。GEANT4によるシミュレーションの結果(図5)同様、分布の幅が時刻決定精度に相当する。TDC出力は約0.026ns/countに相当するので、時間分解能はストレート型とカーブ型それぞれで0.52nsと0.57ns(1 σ)となる。TOFカウンタを粒子が通過した時刻は、両PMTの測定時刻の平均から求める。よって、その時間分解能は約0.39nsとなり、装置要求性能を満たしている。また、2種類のライトガイド形状による顕著な時間分解能の差は見られなかった。シミュレーションの結果と比べて有意な差異が見られるが、今回スタート信号の生成に利用した、トリガ用シンチレータに用いたPMTの応答速度が要因の一つと考えられる。トリガ用シンチレータの影響を取り除き、より正確な時間分解能の評価を行うことが今後の課題である。また、長期間気球による観測の実現に向けて、検出器の大型化およびアレイ化が必須であり、そのための研究開発を今後速やかに進めていく必要がある。

7. 結言

著者らは、高精度の宇宙線反粒子測定を行うため、GAPS計画を進めている。GAPSでは、これまでに例のないエキゾチック原子崩壊過程の測定により、反陽子や反重陽子の高感度検出を可能とする。これらの反粒子は、宇宙に存在する物質の大半を占める暗黒物質の対消滅や崩壊過程で生じることが予想される。特に反重陽子については、高エネルギー宇宙線に由来するバックグラウンド事

象が十分少なく、反重陽子 1 事象の検出であっても十分インパクトがある。未だ例のない反重陽子の観測によって、現代の物理学における重要課題の一つである、暗黒物質の正体解明につながる成果が期待できる。

本稿では、観測装置を構成する主要な検出器のうち、入射粒子の飛行時間測定を行う TOF カウンタの研究開発について紹介した。GEANT4 を用いたシミュレーションおよび試作検出器による性能評価を行い、長さ 500mm のプラスチックシンチレータを用いた場合、要求される時間分解能 0.5ns 以下を満たすことが確認された。一方、試作検出器の宇宙線測定による性能評価結果は、シミュレーションから予想された時間分解能には及ばなかった。測定時に併用したトリガ用シンチレータの影響が疑われるが、試験方法の改善が求められる。また、観測装置の実機製造に向けて、より長いサイズの TOF カウンタの開発が必要であり、シミュレーションによる性能見積もりおよび再現性の向上と合わせて、今後の課題である。

GAPS による反粒子観測は、太陽活動の影響を考慮し、活動極小期にあたる 2020 年の実験実施が望ましい。長期間気球による反粒子観測の実現に向け、搭載装置の開発が急務な状況である。

参考文献

- (1) P.A.R. Ade et al., *Astronomy and Astrophysics*, 594 (2016) A13
- (2) J.D. Lewin and P.F. Smith, *Astropart. Phys.*, 6 (1996) 87
- (3) R. Bemabei et al., *Phys. Lett. B*, 424 (1998) 195
- (4) A. Abusaidi et al., *Phys. Rev. Lett.*, 84 (2000) 5699
- (5) Y. Shimizu et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 496 (2003) 347
- (6) Y. Shimizu et al., *Phys. Let. B*, 633 (2006) 195
- (7) L. Accardo et al., *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 121101
- (8) T. Tanaka et al., *Astrophys. J.*, 742 (2011) 78
- (9) Y. Asaoka et al., to be submitted to *Astropart. Phys.*
- (10) H. Fuke et al., *Advances in Space Research*, 53 (2014) 1432
- (11) T. Aramaki et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 682 (2012) 90
- (12) C.J. Hailey et al., *New J. Phys.* 11 (2009) 105022
- (13) S.A.I. Mognet et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 735 (2014) 24
- (14) <https://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- (15) 和田拓也, 青山学院大学卒業論文, 2016
- (16) 蓑島温志, 青山学院大学卒業論文, 2016
- (17) 橋本岳, 青山学院大学卒業論文, 2016

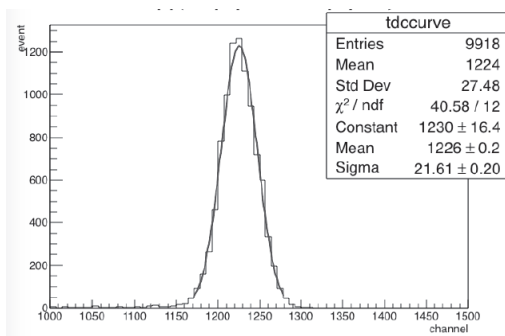
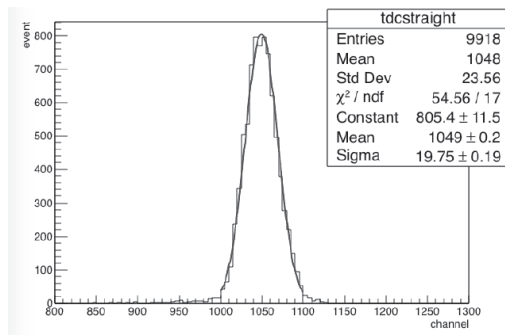


図9 宇宙線ミュオン測定における TDC 出力分布⁽¹⁷⁾

(ストレート型：上、カーブ型：下)