

気液2相型アルゴン光 TPC 検出器による暗黒物質探索実験 (ANKOK)

早稲田大学 理工学術院

寄田 浩平

田中 雅士

kohei.yorita@waseda.jp

masashi.tanaka@aoni.waseda.jp

鷲見 貴生

木村 真人

矢口 徹磨

washimi@kylab.sci.waseda.ac.jp

masato@kylab.sci.waseda.ac.jp

tetsuma-yaguchi@kylab.sci.waseda.ac.jp

2018 年 (平成 30 年) 2 月 17 日

1 はじめに

ANKOK 実験は、早稲田大学が推進している「気液 2 相型アルゴン光 TPC 検出器による暗黒物質探索実験」である。ただ、“実験”とは言っても、現在はまだ地上での試験運用を繰り返し、地下実験に向けた感度評価を行っている段階である。また、早大の 1 研究室の所属学生が主体となって推進する小さな実験でもある (図 1)。したがって本稿では、まだ発展途上ではあるが、種々の困難を乗り越え、世界と戦える検出器を開発構築しよう！という学生達の気概や開発の生々しさ (初々しさ?) も含めた研究紹介ができればと思う。

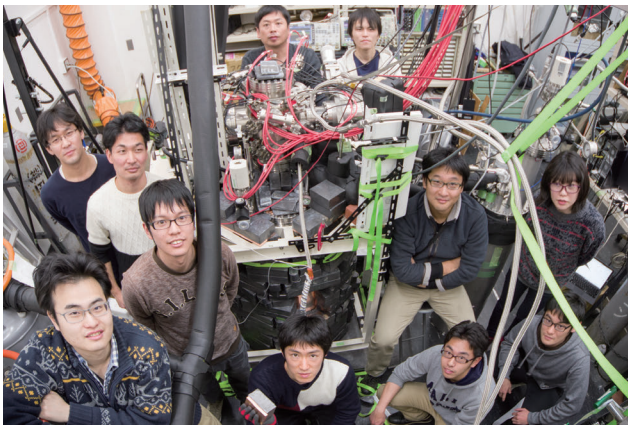


図 1: 2017 年度 ANKOK 実験メンバー。前列左より、鷲見 (D3), 竹村 (M2), 青山 (B4), 武田 (B4)。中列左より、菊地 (M2), 飯島 (M1), 矢口 (M2), 田中, 平良 (B4)。後列左より、寄田, 木村 (D1)。

1.1 物理目標と意義

ANKOK は、低質量領域の暗黒物質、とくに DAMA 領域 (図 2) の検証を第一物理目標としている。14 年にも及ぶ 9σ 以上の季節変動現象 (6 月 ↑ 12 月 ↓) [1] から示唆

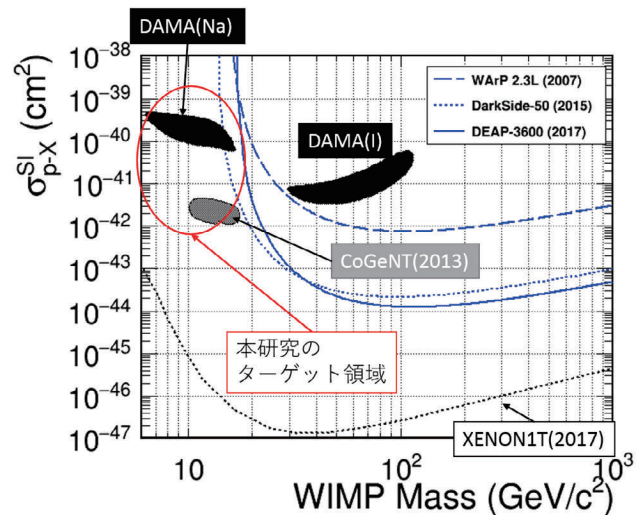


図 2: これまでの Ar を用いた WIMP 探索結果と ANKOK の目標探索領域 (“DAMA 領域”)

される質量 $10 \text{ GeV}/c^2$, 断面積 10^{-40} cm^2 付近の領域における存在検証と変動現象の原因究明である。なぜ (いまさら) DAMA 領域? という疑問もあるかとは思いますが、ここで“我々が思う Ar で挑戦する意義”を今一度、列挙してみる。

1. DAMA の結果を説明できる明確な原因は示されておらず、問題の解決には至っていない¹。また、新物理発見への道筋・指導原理を失いつつある昨今、いまいちど観測結果をヒントに研究展開することも一つのやり方と考える。
2. Xe 媒質 ($Z=54$) では棄却されているものの、DAMA の NaI 結晶 ($\text{Na}(Z=11)$) に近い比較的軽い原子

¹ANKOK 実験が始動した 2012 年頃は、DAMA 領域周辺に CDMS, CoGeNT, CRESST 等、一時期最大で 4 つの実験が存在を主張していた。その後、いくつかの実験が (自身で) 存在を棄却し、2018 年現在は DAMA と CoGeNT 実験の結果が残っている。

核 (=大きな反跳) かつ異なる実験手法での相互検証が望まれる。一方で, Ar($Z=18$) を用いた実験 (DarkSide[2], WArP[3], DEAP[4]) ではどれも DAMA 領域に探索感度が届いていない (図 2)。すなわち Ar 媒質では未検証なのである²。くわえて, DAMA 領域に関わらず, 媒質依存性の検証は常に重要なこと, また, 世界的には Ar 媒質実験 (DUNE 等) の発展が目覚ましいことなどから, 日本における Ar-TPC 技術の開発・蓄積そのものも重要な意義をもつ。

3. 液体 Ar の沸点は $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$, 蛍光波長は真空紫外光の 128 nm と厳しい特性はあるものの, 発光量や粒子識別能力 (後述) は特段に高いため, 開発努力次第でその潜在能力を最大化できる可能性の高い, 極めて魅力的かつ有望な媒質である。

4. 実用的な側面として, Ar は安価 (安いコンビニイン程度) なため, 圧倒的に開発・実験コストを抑えられる。また, この領域の探索には, 大型化一辺倒ではなく, 小型で“高感度”な検出器開発で勝負できる点が大きな魅力である。学生達が真の意味で主体性をもち, 限られた予算の中で世界と戦える検出器を構築する経験を積むことは想像以上に得難いことである。

これらを総合すると, 新たな知見の創出, 教育的効果, 実験・予算規模の観点から, 費用対効果が極めて高い実験といえる。

1.2 検出原理と開発の鍵

図 3 のような検出器内の液体 Ar 原子核が WIMP によって反跳をうけると“1次蛍光 (S1)”と“電離電子”が同時に生成される。次に検出器内に形成した電場で, この電離電子を鉛直方向にドリフトさせ気相に取り出すと, 電子数に比例した“2次蛍光 (S2)”が生成される。Ar の S1 波形弁別 (PSD) や S2/S1 比は, WIMP 起因の原子核反跳事象と主な背景事象となる γ 線に起因する電子反跳事象で大きく異なるため, 高い背景事象除去力を確保することが可能となる。DAMA 領域の探索には, エネルギー閾値を下げたうえで低エネルギー領域での背景事象除去を実現する必要がある。現行他実験のエネルギー閾値である 40 keV を 20 keV 以下まで下げることができれば, $100\text{ kg}\times\text{days}$ のデータ量でも DAMA 領域が検証可能となる。したがってこの開発は, 大型化の R&D とはまったく異なる側面をもっている。以下に我々が行ってきた開発の鍵を簡単にリストする。

- 極低温環境下 ($-186\text{ }^{\circ}\text{C}$) での実装・安定運用

²本稿校了後の 2 月 21 日に DarkSide が従来とは異なる解析手法を用いて DAMA 領域をカバーする探索結果を報告しており (arXiv:1802.06994), 現在 ANKOK 実験でも内容を精査中である。

- Ar の高純度化と長期的維持 (酸素, 水, 窒素の除去)
- Ar 蛍光 ($VUV=128\text{ nm}$) の検出と検出光量の最大化
- VUV に直接感度をもつ MPPC の開発と評価
- 高電圧印加 (放電対策や CW 回路の実装)
- ^{39}Ar 起因背景事象の粒子識別による除去
- 内部放射線背景事象の除去
- 独自発光モデル・シミュレーションの構築
- 低エネルギー閾値化, 中性子遮蔽, 探索感度評価
- 地下実験の実現に向けた議論 等々。

上記の個別詳細は 2 章以降を参照して頂きたい。

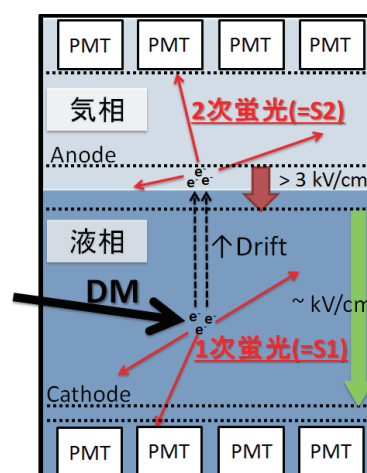


図 3: 気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器の概念図

1.3 歴史的経緯をすこしだけ

1 章の最後に, せっかくの機会なので早稲田大学における「気液 2 相型検出器開発」の経緯を少しだけ紹介させて頂く。時系列で以下の 2 段階に分かれる。

2009 年 ~ 2012 年 (ANKOK 前史) :

2009 年, 早大で高エネルギー素粒子実験研究室 (LHC/Tevatron) を立ち上げると同時に, KEK 測定器開発室に加わり, “Argon-TPC” の基礎開発研究を開始した。もともと暗黒物質探索への適用に興味があった早大が, 次世代大型ニュートリノ実験への発展を目標に開発を始めていた KEK/ETHZ のグループに加わったのが事の始まりである。最終目的は異なるが, 多くの基礎開発課題は共通であるため, これらを共有することで互いの研究を効率的に促進させた。J-PARC でのビームテスト実験等, 当時の詳細に関しては [5] を参照されたい。

2012 年 ~ 現在 (ANKOK) :

2012 年からは早大グループとして独自路線で, 暗黒物質探索に特化した開発に本格的にシフトした。

これまでの大型化や電荷読出し（飛跡検出）等の方針ではなく、小中型だが高感度の光検出に特化した気液 2 相型 Ar 検出器の開発構築を推進してきた。それが本稿の内容である。2013 年、この「気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器による暗黒物質探索実験」を「ANKOK 実験」と名付けた。ネーミングセンスに関してはご容赦頂きたい（“ベタ”なのである）。

2 ANKOK 検出器

2.1 早稲田大学テストスタンド

現在 ANKOK は地下実験の準備段階として早稲田大学西早稲田キャンパス構内にテストスタンドを構築して開発を進めている。都心のキャンパスであるため実験場所の確保、特に遮蔽シールド構築に十分な床耐荷重を持つ実験室の確保には苦心したが、2016 年の秋より現在の半地下実験室に全実験設備を移設し、さらに研究を促進させることができた。戦略としては、地上ですべての開発構築を完遂し、そのまま検出器システム一式を地下施設に移設すれば即座に探索が可能となる算段で進めている。

図 4 にあるように、テストスタンドは液体 Ar および検出器が収容される容積 200 L の真空断熱容器（以下 200 L 容器）、遮蔽シールド、充填ライン、循環ラインパネル、液化器、エレキラック、モニター用デスクから構成されている。今後の地下実験環境への移設に向けて、4 m × 4 m × 3 m ほどの比較的コンパクトな実験スペースで展開している。

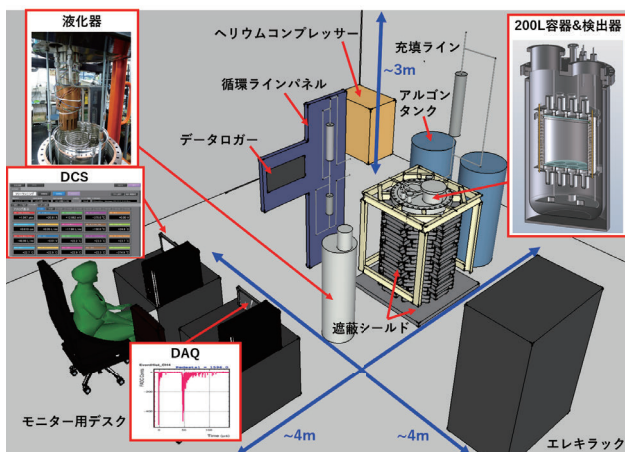


図 4: 早稲田大学テストスタンド概要

2.2 液体 Ar 純化・保持システム

Ar 原子は不活性であるため、電離電子は液体中でも長距離ドリフトをすることが可能だが、電気陰性度が高い不純物（酸素、水など）があると吸収され、S2 光量が減る。そのため、これら不純物を $\mathcal{O}(1 \text{ ppb})$ 以下に抑え

なくてはならない。また、128 nm の Ar 蛍光の発光・伝搬過程を阻害する窒素不純物も $\mathcal{O}(100 \text{ ppb})$ 以下にする必要がある。ANKOK の液体 Ar 純化・保持システムは、この高純度の達成と長期的維持に代わり、安定性と安全性も担保するようデザインされている（図 5）。Ar の純化は、まず実験開始時に商用の液体 Ar タンク（酸素不純物 1 ppm）から 200 L 容器に充填する際にモレキュラーシーブと還元銅が詰められた自作フィルターを通すことにより、初期純度を 0.1 ppb 程度にする。しかし、容器内部材からのアウトガスなどによって純度は徐々に悪化するため、実験中も常にガス相から Ar を取り出し、商用のフィルター（SAES 社 Microtorr, Pureron 社 GP-5）で純化した後に液化器により再液化して容器に戻す循環システムにより、純度を長期間保持している。系の熱流入は液化機に取り付けられた GM 冷凍機（住友重機 CH110, 200 W@87 K）で補償される。また、初期純度向上および純度悪化抑制のために、アウトガスの少ない検出器部材を選定し、配管系のリークチェック ($<10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$) も入念に行うことが重要である。また、実験開始前に約 2 週間の真空引きを行いアウトガスレートを 10 Pa/h 以下に抑える等、様々な工夫をこらしている。

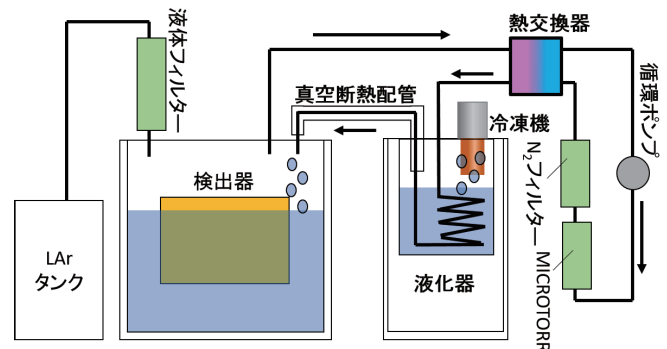


図 5: 液体 Ar 純化および保持システム

図 6 に早稲田大学テストスタンドで得られた電子のドリフト時間と S2 光量（電子数に比例）の相関を示す。電離電子寿命換算で $\tau_e \approx 1.7 \text{ ms}$ （酸素・水換算で $\sim 0.2 \text{ ppb}$ ）という世界最高レベルの高純度を達成している。ANKOK 実験の検出器サイズでは、電子減衰をほぼ無視できるレベルである。

2.3 気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器

ANKOK 実験で光読み出しに使用している 3 インチ光電子増倍管（PMT: Hamamatsu R11065）は、液体 Ar 用に特化して開発され、液体 Ar 温度で動作可能、波長変換後の Ar 蛍光（128 nm → 420 nm）に対して高い量子効率（約 30%）、低放射性バックグラウンド等、暗黒物質探索に最適な特徴を有する。過去 5 年間にわたり、この高

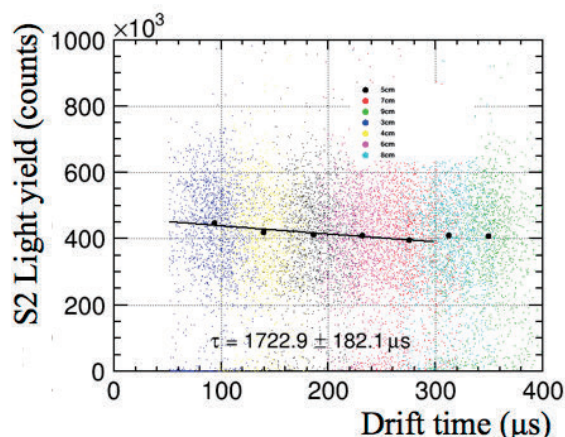


図 6: S2 光量とドリフト時間の関係から算出したドリフト電子寿命測定の結果

価な PMT を (予算の関係で) 年に数本ずつ買い揃えながらプロトタイプ検出器を徐々にアップグレードし、2 相型検出器の基礎特性の理解と物理感度評価を進めてきた。2018 年現在、PMT は 14 本となり図 7 に示すような有感領域約 5 kg の検出器を用いて研究を行っている。

検出器本体には低温下での強度や絶縁性に優れ、アウトガスや放射性物質も少ない PTFE を使用している。検出器上下面に 7 本ずつ PMT を配置し、PMT の前には両面に ITO (Indium Tin Oxide) 透明電極が成膜された厚さ 1 cm の石英板を設置している。この ITO 電極は 98% の可視光透過率があり、金属製グリッドを用いる場合より検出光量の増加が期待できる。また検出器下部のカソード-PMT 間で反跳が起こると電離電子が気相に到達できないため S2 不感領域となるという問題があるが、ここを石英で埋めることにより回避できる。液面下 5 mm の位置には、4 mm 間隔で格子状に径 100 μm のステンレスワイヤー (以下グリッド) が張られている。また、検出器内部の電場を一樣に保つため、無酸素銅リング (以下シェーパー) を鉛直方向 1 cm おきに配置している。検出器側面は反射材 (3M 社製 ESR) で覆われており、検出器内壁に露呈する石英および ESR の全表面には、128 nm の Ar 蛍光を 420 nm に波長変換する TPB (1,1,4,4-Tetraphenyl-1,3-butadiene) が蒸着されている。

2.4 純 Ar 中での高電圧印加

TPC を設計する際、純度の高い気体 Ar 中では、特に放電が起こりやすいという難題がある。一般にガス検出器では、メタン等を添加することにより放電抑制が可能だが、2 相型 TPC 検出器では不純物は電離電子損失の原因となり、有効ではない。また、液体 Ar は比較的耐電圧性に優れているが、内部に気泡があるとそれを通じて放電を起こす可能性もある。ドリフト長 30 cm の 2 相型検出器で、取り出し部分に 4 kV/cm、ドリフト部分に

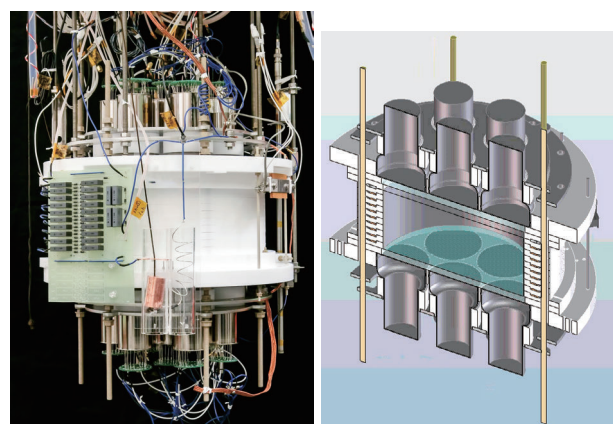


図 7: 有効質量約 5 kg のプロトタイプ検出器

1 kV/cm 程度の電場を付加する場合、カソード電圧は 30 kV 以上となる。この電圧を外側からフィードスルーを通じて印加すると、ガス部分での放電を抑えることが極めて難しくなる。実際、WArP や DarkSide といった過去の液体 Ar 実験は、この放電に苦しめられてきた。一方、我々はコッククロフト・ウォルトン回路 (CW 回路) を液体 Ar 内に導入し、内部で高電圧を生成している。CW 回路はコンデンサーとダイオードを梯子状に組み合わせ、交流電圧を印加することにより多段増幅し、高電圧を得られる装置である。直接フィードスルーから印加する交流電圧を数 100 V としながらも、内部液体中で高電圧を得られるという自明な利点以外にも、各段からの出力をそのまま検出器のフィールドシェーパーと接続することで、一樣な電場形成が可能になるという特典付きである。くわえて、低温ではダイオードの特性が向上し逆方向電流がほとんどゼロになるため、一度充電すると丸 1 日程度は電圧を保持することができる。これにより、実験中の AC 電源起因のノイズが一切ないという利点もある。図 8 は各電場で我々が測定したドリフト速度の結果と ICARUS 実験モデルとの比較である ([6])。これにより、CW 回路による増幅は正しく機能しており、TPC 内に設計通りの電場がかかっていることが確認できる。

2.5 遮蔽シールド

最終的な暗黒物質探索は、環境中性子の少ない大深度地下実験室で行う必要があるが、環境 γ 線背景事象は地上と地下で大きく変わらないことが知られている。そのため、地上テストスタンドにて、厚さ 10 cm の鉛および 1 cm の無酸素銅を用いて総重量約 4 トンの γ 線シールドを検出器外周に構築し性能検証を行っている。図 9 にシールドの設計、および実装の様子を示す。

2.6 DAQ

データ取得は、SIS 社製の 16 Ch, 14 bit, 250 MS/s の FlashADC (SIS3316) を用いて行っている。FlashADC

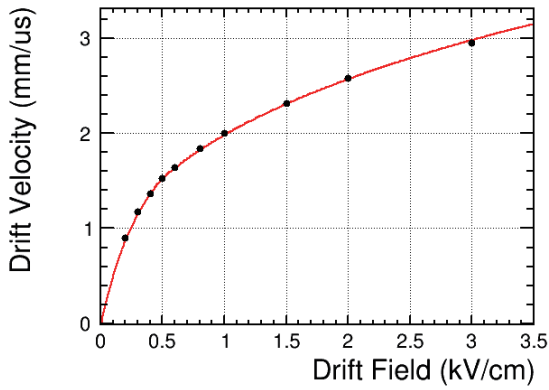


図 8: ドリフト速度の測定結果 (実線は ICARUS 実験によるモデル)

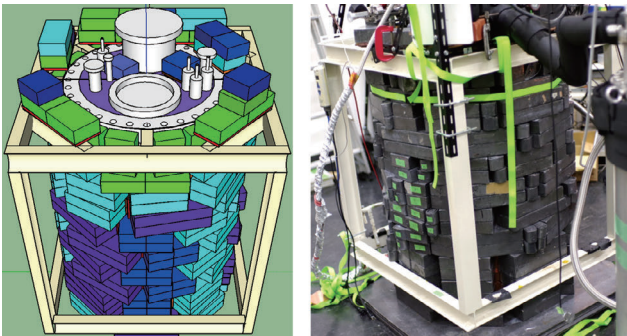


図 9: γ 線遮蔽シールド

で取得されたバイナリデータは、逐次 ROOT ファイルへ変換し保管している。データ取得と平行して ROOT ファイルへ変換することで、オンラインレベルでの応答波形の確認や NTuple を用いた簡易的な統計解析を行い、実験中の素早いフィードバックを行っている。オフラインでは ROOT ファイルに変換した生波形に対して光子計数法を適用し、得られた結果を NTuple 化することで、より汎用的 (ユーザーフレンドリー) なデータフォーマットでの解析が可能になっている。現在の ANKOK の DAQ システムの概要を図 10 に示す。

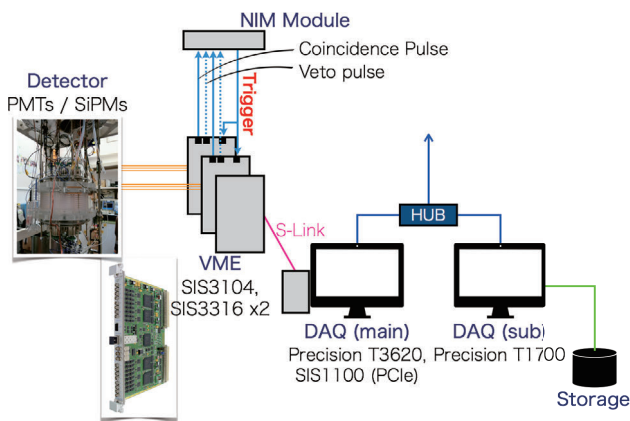


図 10: ANKOK DAQ システム概要。2 台の PC でデータ取得と演算、データ書き出しを分担する。

様々な電場で得られた典型的な電子反跳 (ER) 事象の波形を図 11 に示す。 $t \approx 0$ のピークが 1 次シンチレーション光 (S1), $t \geq 20 \mu\text{s}$ のピークが 2 次シンチレーション光 (S2) である。波高は S1 のピーク値で規格化しており、S1 と S2 の時間差は電離電子のドリフト時間に対応している。印加電場 E_d が強くなるにしたがってドリフト速度が速くなるため、この時間差が短くなる。2 相型 TPC 検出器では、この時間差とドリフト速度を用いて鉛直方向の事象発生位置を 1 mm 以下の精度で再構成することができる。また、印加電場が強くなるにつれてイオン対の再結合率が減少するため、S1 光量に対して相対的に S2 光量が増加している様子がわかる。

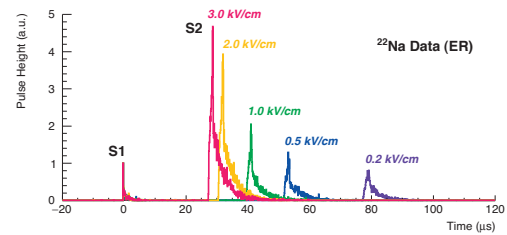


図 11: 2 相型 Ar 光 TPC 検出器で取得される典型的な波形 (^{22}Na 線源による ER 事象)

3 開発成果

本章では、過去 5 年間に渡る開発成果の中から主要なものをいくつか取り上げ紹介する。

3.1 検出光量の最大化

10 GeV/ c^2 付近の低質量 WIMP による原子核反跳エネルギーは 20 keV 以下と小さいため、検出光量を十分に確保することが探索の鍵となる。たとえば、20 keV の原子核反跳によって“発生”する Ar 蛍光量は約 200 光子程度、PMT の QE を考慮すると期待できる検出光量は最大でも 60 光子程度となる。したがって、これをいかに効率よく読み出すかが最初の関門となる。Ar 蛍光の検出効率は、一般に γ 線などの電子反跳事象を用いて測定し、単位エネルギー損失あたりの光量 (pes/keV $_{ee}$: ee = electron equivalent) で表される。なお、中性子や WIMP 起因の原子核反跳事象に対しては、これに消光因子 (keV $_{ee}$ /keV $_{nr}$) がかり (pes/keV $_{nr}$) で表される。

ANKOK 実験の開発初年度は、2 相型の原理検証に重点を置いたため、検出光量は 1 pes/keV $_{ee}$ 以下であった。その後、TPC 構造の改良、Ar の純化装置の増強、反射材の選定、TPB 波長変換剤の蒸着方法の最適化など、血の滲むような努力で検出光量増加の開発を進めてきた。検出光量は、各種 γ 線源を 200 L 容器の外から照射し、得られる全吸収ピークから算出している。図 12 に ^{57}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs の各線源で取得したスペクトラム

を重ね書いたものを示す。4つの全吸収ピークそれぞれから算出した結果は一律に ≈ 10 p.e./keV_{ee} であった。これは Ar 検出器として世界最高の検出光量である。

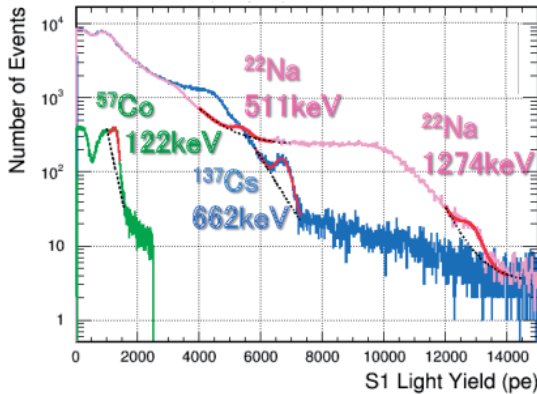


図 12: 各種 γ 線源で取得した光量分布と全吸収ピーク

3.2 電場・エネルギー依存性の測定

液体 Ar の発光特性は、電場の大きさや作用するエネルギーによって大きく変化するため、これらの依存性を理解することは非常に重要な課題である。そこで線源を用いて様々な条件で発光量を測定した。背景事象となる ER 事象の抽出には、おもに ^{22}Na を利用した Back to Back 法を用い、信号モデルとなる原子核反跳事象 (NR 事象) の抽出は、 ^{252}Cf を用いた Time of Flight (ToF) 法で行う。いずれの場合にも、線源近くに置かれた NaI (TI) シンチレータと Ar 検出器のコインシデンスを要求することで背景事象を抑制している。例として、ToF による粒子識別結果を図 13 に示す。このデータは、 ^{252}Cf を有感領域から 1 m 離れた位置に設置している。横軸は 2つの検出器の検出時刻差、縦軸は Ar 検出器での波形弁別変数 (S1 の Slow 成分と Total 光量の比) である。

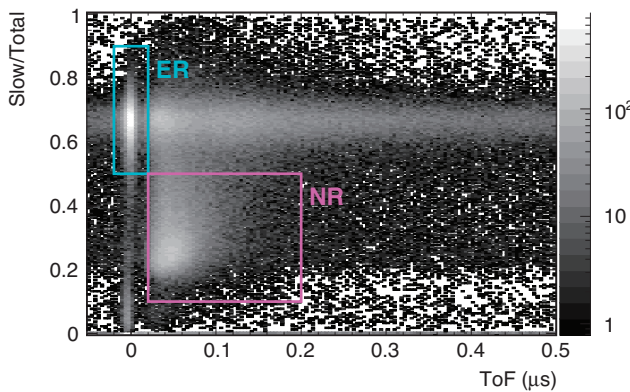


図 13: ^{252}Cf 線源より得られた ToF と PSD(Slow/Total) の 2次元分布

このようなデータを各電場で取得し、ER 事象の S1・S2 の電場依存性を示したのが図 14 である。電氣的消光

により、電場の増加に伴って S1 は減少し、再結合から逃れた電離電子の増加により S2 光量も増加する。これらの結果を Birks' Law から類推される次式の経験則でフィットすることで、それぞれの電場依存性を定量的に説明することができる。

$$S1 = C_1 \times \left(1 - \frac{A}{1 + \frac{1}{\rho} \frac{k_B}{E_d} \frac{dE}{dx}}\right) \quad (1)$$

$$S2 = C_2 \times \frac{A}{1 + \frac{1}{\rho} \frac{k_B}{E_d} \frac{dE}{dx}} \quad (2)$$

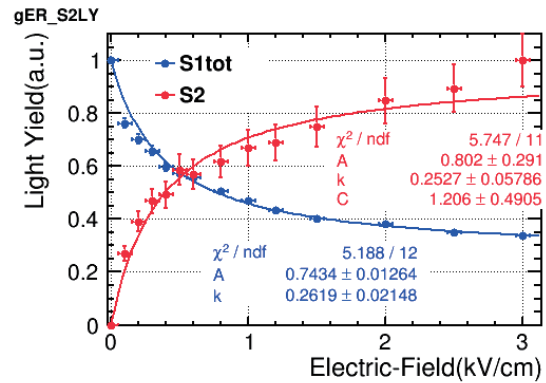


図 14: ER 事象における S1, S2 光量の電場依存性

図 15 は NR 事象における消光因子の測定結果である。この消光因子には、電氣的消光のほかに核的消光の効果も含まれている。これらは ToF により決定される入射中性子のエネルギーとその後方散乱ピークを用いることで算出している。誤差は大きいものの、 $E_d \geq 1$ kV/cm での測定は先行他実験 [7] でもなされていないため、世界初の結果である。

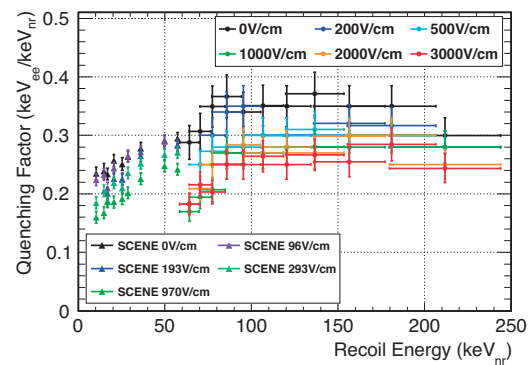


図 15: NR 事象の消光因子測定結果

3.3 粒子識別

前述したとおり、気液 2 相型 Ar 光 TPC 検出器では (1) S1 波形と (2) S2/S1 光量比を用いた粒子識別 (総称して PID と呼ぶ) を行い、ER 事象と NR 事象を分離する。(1) S1 の波形弁別 (PSD) は、NR 事象

と ER 事象で Ar 蛍光の早い成分と遅い成分の比が異なることを利用する。ANKOK では、発光の立ち上がりを $t = 0$ として、 $[-0.02, 0.12] \mu\text{s}$ の積分光量を “Fast”, $[0.12, 5.0] \mu\text{s}$ の積分光量を “Slow” と定義し、 $\text{Slow/Total} \equiv \text{Slow}/(\text{Fast} + \text{Slow})$ を PSD パラメータとして用いている。(2) S2/S1 光量比は電離蛍光比のパラメータであり、光量比の \log_{10} を取った値をパラメータとして用いている。図 16 は、S1 光量が等しい領域 ($10 \text{ keV}_{\text{ee}} @ 0 \text{ kV/cm}$) における PID 分布である。横軸を Slow/Total, 縦軸を $\log_{10}(\text{S2/S1})$ とした 2 次元分布であり、両変数が大きい方が ER 事象, 小さい方が NR 事象である。消光因子の電場依存性も考慮する必要があるが、電場印加にしたがって S2/S1 による分離が有効になることがわかる。

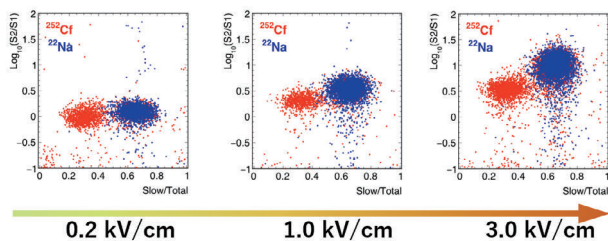


図 16: 同光量での ER/NR 分離能力の変化。一番左の低電場 ($E_d = 0.2 \text{ kV/cm}$) から、右 (最大 $E_d = 3.0 \text{ kV/cm}$) の高電場に行くにつれて分離能力が向上する様子が見てとれる。

3.4 検出器シミュレーションの構築

データの理解を深め、シールド量の算出や物理感度を定量的に評価するため、ANKOK 実験では Geant4 を用いた独自の検出器シミュレーションを構築している。すでに検出器ジオメトリから Ar 応答, (光学過程), 光検出器応答, デジタル化までの一連の過程を実装しており、シミュレーション結果をデータとまったく同様のフレームワークで取り扱うことが可能となっている (詳しくは [8] を参照)。特に Ar 中でのエネルギー損失に対しては、Xe 実験で広く用いられている NEST[9] を参考に、 E_d や dE/dx に依存する Ar 応答モデルを独自に構築し、データの理解に取り組んでいる。荷電粒子のエネルギーによって異なる再結合関数 (Birks' Law or TIB Model) を用いることや、エネルギー損失から直接励起されるものと再結合により励起されるものを区別することで、PID パラメータのエネルギー依存性や広がり再現を試みている。

3.5 ^{39}Ar の観測

ANKOK 実験の最大の背景事象は、Ar の放射性同位体 ^{39}Ar に起因する ER 事象である。 ^{39}Ar は通常の液体

Ar 中に 1 Bq/kg で存在することが知られている。高い費用を払って地下で Ar を精製しない限り減らすことができない内在的背景事象である。逆にいえば、この ^{39}Ar のレート以下に他の ER 事象を減らす必要がない、ともいえる。しかし、そもそもシールドを設置しない状態では地上/地下環境を問わず存在する環境 γ 線起因の ER 事象が支配的となり、これを抑制しない限り真の背景事象である ^{39}Ar の観測にすら至らない。そこで、まず検出器シミュレーションを用いて環境 γ 線の成分の理解とシールド量の算出を行った。図 17 は、シールドを設置せずに取得したエネルギースペクトルと、シミュレーションで予測される各 γ 線束成分の寄与である。環境 γ 線束量は NaI(Tl) シンチレータを用いて別途測定した結果をインプットとして利用している。シミュレーションとデータは概ね一致しており、構築した ANKOK シミュレーションの妥当性および環境 γ 線フラックスの理解は十分であるといえる。

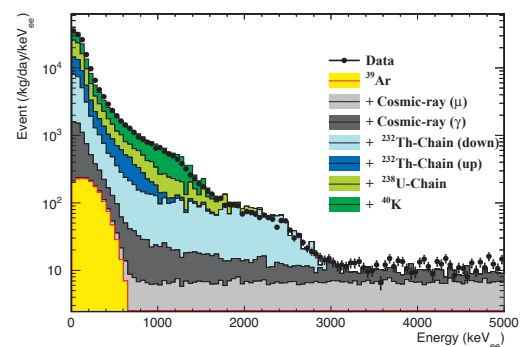


図 17: シールドなしで取得したエネルギースペクトル

次にこの結果をもとに、環境 γ 線を ^{39}Ar 成分程度まで抑えるシールドをデザインした。計算した結果、 ^{39}Ar を観測するには真空容器の側面および下面に 10 cm 厚の鉛を設置すれば十分であることが示された。実際にこのシールドを実装し取得したデータを図 18 に示す。この測定から ^{39}Ar が $\approx 1 \text{ Bq/kg}$ で存在することを確認することができた。ANKOK としては初めて真の (最後の) 敵の姿を見ることに成功したのである。繰り返しのなるが、より多くのシールドを積むことで環境由来の ER 事象はより低減できるが、この ^{39}Ar はこれ以上減らすことはできない。したがって、信号効率を維持しながらこの ^{39}Ar を PID でどこまで棄却できるか、という探索感度に直結する本質的 (最終的) な課題に我々は取り組んでいることになる。

4 VUV-MPPC の開発

ANKOK は PMT の利用をベースラインにしているが、MPPC の利用についても 2 通りの方法を検討・開発

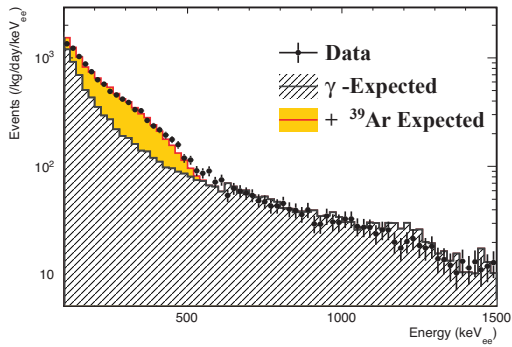


図 18: 10 cm 厚の鉛シールドを設置して取得したスペクトラム (^{39}Ar の観測)

している。1つ目はPMTを可視光MPPC(420 nmに対して高PDE)に入れ替えることで、波長変換後のAr蛍光の検出効率を改善すること。2つ目は、浜松ホトニクスと共同開発(我々はAr蛍光のPDE測定等の基礎特性担当)しているVUV-MPPCの利用である。VUV-MPPCはAr蛍光128 nmに直接感度のある素子であり、過去3年間にわたり、浜松ホトニクスとともに、その試作サンプルの低温基礎特性試験や液体Ar試験を行い、Ar蛍光に対するPDEを測定してきた。PMTと比べ、低電圧(放電の心配がない)で、ゲインの分散が小さい優れた光検出素子であり、小型であるため、これを用いることで検出器の位置分解能や光子計数精度の向上が見込める。これまでの成果の詳細は[10]を参照されたい。なお、MPPCによるAr蛍光直接検出と低温環境下での液体Ar蛍光直接検出は、ともに世界初の結果である。

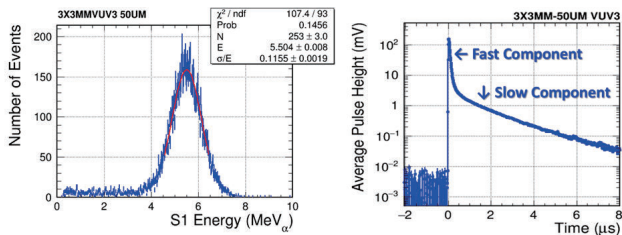


図 19: VUV MPPC で直接した液体 Ar 蛍光のスペクトル (左) と平均波形 (右)。 ^{241}Am からの α 線信号。

また、このVUV-MPPC4個を小型プロトタイプTPCの気相側面に配置し、 γ 線源データを取得し(図20)、詳細は省くが壁際で強い位置分解能があることも確認できた。

5 探索感度評価と現状の課題

現在、これまでに得られた基礎特性や各種依存性の評価結果を総集し、暗黒物質探索感度を定量的に評価している。これらの結果は近々論文に投稿する予定のため詳細は省かせていただくが、低エネルギー閾値化

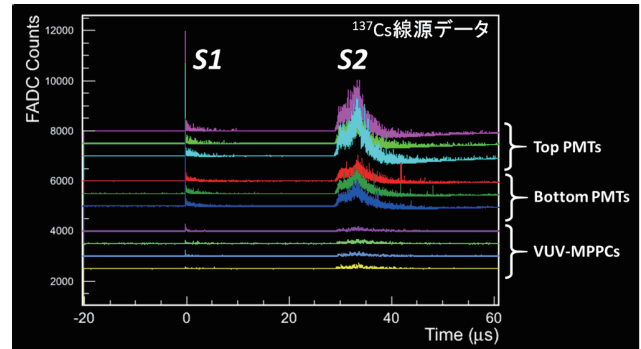


図 20: PMT 6 本 + VUV MPPC 4 個で構成された 2 相型検出器の信号波形

と DAMA 領域探索感度の関連について簡単に議論しておく。

Ar 原子核を標的とし、核子-WIMP 断面積 10^{-40} cm^2 で質量 10, 15, 20 及び 50 GeV/c^2 の WIMP が 100 $\text{kg}\times\text{days}$ 相当 (例えば 10 kg の検出器で 10 日) のデータ中に期待される信号の反跳エネルギー分布を図 21 左図に示す。このプロットからは、反跳エネルギーには WIMP 質量に依存するカットオフがあり、例えば 10(15) GeV/c^2 に感度を持つには 20(40) keV_{nr} 以下のエネルギー閾値を達成する必要がある事がわかる。逆に、低閾値さえ実現すれば急激に信号数が増加するため、100 $\text{kg}\times\text{days}$ でも十分な信号数が期待できることも分かる。一方、図 21 左図中には 100 $\text{kg}\times\text{days}$ あたりの ^{39}Ar 背景事象の分布も示してある。 ^{39}Ar は低エネルギー領域でおおよそ 4000 $\text{events}/\text{keV}_{nr}$ のレートでほぼフラットな分布をしている。たとえば、40 keV_{nr} の反跳エネルギーにおいて背景事象を、粒子識別等によって 4000 分の 1、すなわち 1 $\text{event}/\text{keV}_{nr}$ 以下まで削減できれば、20 GeV/c^2 の WIMP に感度を持つ実験が行えることになる。これをまとめたものが図 21 右図である。横軸に達成できるエネルギー閾値にとり、背景事象が 1 または 0.01 $\text{event}/\text{keV}_{nr}$ まで削減できることを想定した場合、どこまで低質量 WIMP を探索できるかの関係性を端的に示している。これにより探索に必要な ^{39}Ar に対する識別・棄却力が定量化できる。現在、これまでの ANKOK の成果を踏まえて、検出光量やドリフト電場依存性も考慮しながら、 $\text{PSD}\otimes\text{S2}/\text{S1}$ 比による識別能力の最終評価・最適化を行っている。

具体的な低エネルギー閾値化には MPPC を使った大光量化と S2 の有効利用の 2 つの方針があり、これが Ar 媒質の先端研究課題となっている。MPPC に関しては 420 nm の可視光に対する感度は PMT より優れており (PMT:約 30% MPPC:約 50%)、既存の検出器を置き換えただけで大きな検出光量の増加が期待できる。また、放射性背景事象も少なくできるという利点もあることから、DarkSide 等の競争実験も開発を行っている。ただし、ひとつひとつが小さな MPPC を多数隙間なく並べ

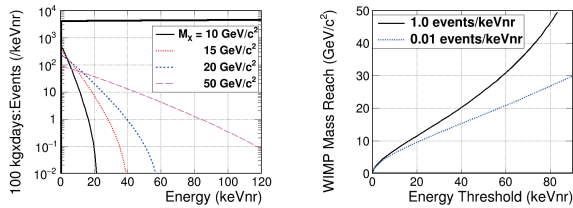


図 21: 左図: 100 kg×days のデータに期待される WIMP 信号数および ^{39}Ar 背景事象。右図: エネルギー閾値と探索可能な WIMP 質量の関係。

て十分な Photo-coverage を確保できるか、波形弁別可能な多チャンネル読出しシステム、液体 Ar 温度で駆動可能なアレイの開発等の課題がある。一方、S2 に関しては、DarkSide 等他実験が粒子識別に有効活用できていない状況において、ANKOK は CW 回路による高電場印可を活かして前章で述べたような基礎測定を通じて理解を深めてきた。現在この測定をもとに、検出器性能向上のための最適化を進めている。ANKOK は現在、この 2 つの最終的な技術的・物理的課題を並行して解決すべく、日々活発に活動している。

6 まとめと今後の展望

ANKOK 実験は 2017 年度現在、早稲田大学構内に可動性の高いテストスタンドを構築し、3 インチ PMT14 本使用した有効質量 5 kg の検出器を用いて基礎特性および物理感度評価を行っている。ただし、地上では特に環境中性子起因の背景事象が多く、その影響を抑えきることができない。したがって、地上での物理感度評価には限界があるため、今後数年で宇宙線起因の背景事象が少ない地下実験室に移転し、DAMA 領域探索を行うことを目標としている。地下実験の実現に向けて、ANKOK 実験は 2014 年度より東大宇宙線研神岡地下実験施設の共同利用実験として採択されており、施設側との議論を継続的に進めている。また、背景事象の理解には実験場所における環境中性子フラックスの理解が重要であるため、2015 年より新学術領域「地下素核」に参加する複数の実験間で中性子測定コンソーシアムを組織し、液体シンチレータや ^3He 比例計数管を用いて神岡地下での測定を行っている（詳しくは [11]）。

世界各国の多くの実験が様々な標的原子核を用いて暗黒物質直接探索に挑んでおり、いつどこで発見されてもおかしくはない状況といえる。ひとたびその兆候 (DAMA 領域もその一つであるが) がみつければ、本質的な暗黒物質の発見には、エネルギースペクトル、媒質依存、季節変動、方向依存、加速器生成や対消滅過程との相互検証等すべての要素の検証が必要不可欠となる。そういう (明るい) 将来を見据えて、安価で高感度の検出器を構築し、多地点設置や同時観測も可能にできるような開発・準備をしておくことが極めて重要な時期だと

考えている。

ここまで述べてきたように ANKOK 実験は、早稲田大学の 1 研究室が学生主導で暗黒物質探索の最前線に立とうという気概に支えられたプロジェクトである、過去 5 年間にわたり、気液 2 相型 Ar 光 TPC という極めて難しい検出器開発における数々の難題を自分達の手で解決し、基礎技術を地道に積み上げてきた。2018 年度には ANKOK 初の「博士」も誕生する予定である (筆者の一人)。なにかと大きな予算・大きな実験提案しか“通らない・意味がない”と思われがちな昨今、このように小さくも新しい実験で奮闘する若いチームを応援して頂ければ幸いである。一緒にやってくれる方、もちろん大歓迎である!

7 謝辞

本研究は新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核実験」の公募研究や挑戦的萌芽研究、早大特定課題研究助成費などによって支えられている。なお、ここに示した一連の成果は、今回の著者 5 名だけでなく、歴代の研究室所属学生 (総勢 22 名) が主体的に懸命に取り組んだ賜物であることを最後に添えて締めくくりたい。

参考文献

- [1] R. Bernabei *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **73**, 2648 (2013)
- [2] P. Agnes *et al.* [DarkSide Collaboration], *Phys. Rev. D* **93**, no. 8, 081101 (2016)
- [3] P. Benetti *et al.*, *Astropart. Phys.* **28**, 495 (2008)
- [4] P.-A. Amaudruz *et al.* [DEAP-3600 Collaboration], arXiv:1707.08042 [astro-ph.CO].
- [5] 丸山和純, 田中雅士, *高エネルギーニューズ* **30-2**, 73 (2011).
- [6] S. Amoroso *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **516**, 68 (2004).
- [7] H. Cao *et al.* [SCENE Collaboration], *Phys. Rev. D* **91**, 092007 (2015)
- [8] M. Kimura, M. Tanaka and K. Yorita, *JPS Conf. Proc.* **11**, 040003 (2016).
- [9] M. Szydagis *et al.*, *JINST* **6**, P10002 (2011)
- [10] T. Igarashi, M. Tanaka, T. Washimi and K. Yorita, *Nucl. Instrum. Meth. A* **833**, 239 (2016)
- [11] 田中雅士, 帝釋稜介, 鈴木優飛, 吉本雅浩, *高エネルギーニューズ* **35-4**, 229 (2017).