

NEWAGE 実験の最新状況と今後の展望

神戸大学

池田 智法

ikedata.tomonori.2s@kyoto-u.ac.jp

神戸大学

身内 賢太郎

miuchi@phys.sci.kobe-u.ac.jp

2020 年 (令和 2 年) 5 月 6 日

1 はじめに

宇宙の全エネルギー密度の約 1/4, 通常の物質と比較すると 5 倍以上を占める未知の物質, 暗黒物質。多くの候補のなか, WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) と呼ばれる素粒子は, 宇宙初期に生成されてから対消滅による数密度減少によって現在の残存量を自然に説明できることから暗黒物質の良い候補だと考えられている。これまで暗黒物質の検出を目指して多くの実験的研究が行われてきたが, 発見には至っていない。われわれは暗黒物質直接検出の決定的証拠をつかみ, その正体を解明することを目指して, 方向に感度をもつ実験「NEWAGE」を提唱し, 探索感度を向上させてきた。2013 年には NEWAGE の歴史などを中心に高エネルギーニュースで紹介した [1]。今回は奇しくも 2013 年の記事での「NEWAGE next step」に到達したタイミングでの記事執筆のお話を頂いた。最新の地下実験の結果及び, 検出器開発の話題をお楽しみいただければと思う。

2 実験概要

暗黒物質直接探索実験ではおもに暗黒物質と弾性散乱した原子核を検出する。太陽系は天の川銀河に属しており, その銀河中心まわりの回転運動ははくちょう座に向かっている。暗黒物質も銀河ハロー中に熱平衡状態で存在していると考え, 太陽系の座標系でははくちょう座の方向から暗黒物質の風が吹き付けているように感じる。いわゆる「暗黒物質の風」である。私たちは地球にターゲットとなる原子核を含んだ検出器において暗黒物質からの信号が来るのを待つわけだ。

では, 暗黒物質由来の反跳原子核の信号とはどういったものなのだろうか。暗黒物質特有の信号は 2 種類ある。一つは観測数の「季節変動」だ。地球は太陽系を公転しているため 6 月ははくちょう座から遠ざかる方向に, 12 月ははくちょう座に向かう方向に運動している。これは

6 月は暗黒物質の風が強く吹き付けるため, 反跳原子核のスペクトルは高エネルギー側にシフト, また 12 月は低エネルギー側にシフトすることを意味する。したがって, あるエネルギー領域の観測数は季節によって変化するのだ。この時の観測数の変化を観測するのが季節変動観測実験である。その変化の大きさは太陽系の速度と公転速度の比に依存するため, 数%と予想されている [2]。

もう一つの信号が反跳原子核の「反跳角の異方性」である。暗黒物質の風ははくちょう座の方向から吹き付けてくるので原子核ははくちょう座とは逆の方向に散乱され, 前方散乱が多く, 後方散乱が少ない分布となる (図 1)。この前後非対称度を観測するには, 原子核反跳のエネルギーと時間だけでなく, 反跳方向の検出も必要とし, 「方向に感度を持った実験」と呼ばれている。反跳原子核のエネルギーは典型的には数 keV であるので, その飛跡を捉えて方向を決定することは技術的に非常に難しい。しかし, この前後非対称度 (前方散乱と後方散乱の比) は $O(10)$ であり, 季節変動と比べて非常に大きなシグナルとなるため, 暗黒物質検出の確度の高い証拠になりうる [3]。さらに, この反跳角度分布を精度よく観測することができれば, 暗黒物質の速度分布に関する情報も得ることができるため非常に興味深い [4]。

NEWAGE は 3 次元ガス飛跡検出器を用いた方向に感度を持った暗黒物質探索実験で, 2007 年より東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室で感度を向上させながら観測を行っている [1]。現在は, DAMA 領域 (イタリアの DAMA グループが季節変動観測によって暗黒物質の存在を示唆すパラメータ領域) を方向に感度を持った手法で探索することをひとつの目標としている。その特徴は低気圧ガス TPC と高解像度二次元飛跡検出器「 μ -PIC」[5] を組み合わせることで反跳原子核の 3 次元飛跡検出を可能としていることだ。低気圧にすることで原子核の飛跡距離を伸ばし, さらに高解像度な飛跡検出器を使うことで飛跡の方向を精度良く決定することができている。2007 年に 17 L の有効体積を持った検出器によって, 方向に感度を持った初の暗黒

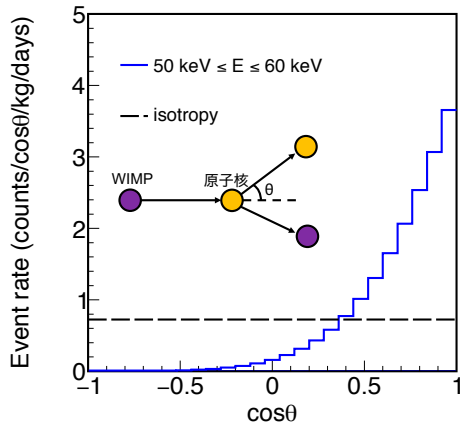


図 1: 暗黒物質と散乱した原子核の反跳角度のシミュレーション。ここでは暗黒物質の質量を 100 GeV, ターゲット原子核にフッ素, 暗黒物質と陽子のスピンの依存する散乱断面積を 1 pb と仮定している。

物質探索実験として地上実験の結果を発表し、その後神岡地下実験施設にて暗黒物質探索を開始した。さらに、2013 年に活性炭循環系の導入によってラドン背景事象（バックグラウンド）を除去し、0.1 気圧まで低圧にすることでエネルギー閾値を下げることで感度を向上させた。NEWAGE はこうした結果によって方向に感度を持った手法で世界を牽引してきた。また、2015 年の結果で観測された残存イベントは内部バックグラウンド由来であることが示唆されたため、さらなる感度向上にはこれらを削減する必要があった [6]。

3 低バックグラウンド検出器の開発

暗黒物質探索で飛跡検出器を使う利点の一つは、ガンマ線起源などの電子飛跡のイベントを強力に除去することだ。これは飛跡の長さやエネルギーの相関関係から、原子核と電子イベントを判別できることを利用している。NEWAGE 実験では外部シールド材を使わずとも 50 keV 以上の電子イベントを $O(10^{-6})$ で除去することができている。しかしながら、低エネルギーのアルファ線とターゲット原子核イベントを区別することは難しい。そのためアルファ線を放出するウラン・トリウムなどの放射性不純物が検出器内に存在することが大きな問題となる。2015 年の観測結果では、取得されたエネルギースペクトルの特徴からアルファ線バックグラウンドが μ -PIC 表面から放出されていることが示唆された。実際にゲルマニウム検出器による測定によって、 μ -PIC に大量のウラン・トリウムの不純物が含まれていることが確認された。こうした背景を踏まえて、われわれはア

ルファ線バックグラウンド量の少ない暗黒物質探索実験用の検出器の開発を行った。

3.1 $LA\mu$ -PIC

まずは μ -PIC のどの部分にバックグラウンド源が含まれていたかを議論するため、 μ -PIC の構造を述べておく。図 2 上に示すように、 μ -PIC は 250 μm の穴があいたカソードストリップ電極が 400 μm 間隔で並んでおり、穴の中央に直径 60 μm のアノード電極が位置している。つまり、小さな比例計数管が 2 次元平面状に並べられた構造である。また、アノード電極は、絶縁体の裏側でカソードと直交した方向に走るアノードストリップに接続されている。飛跡はオフライン解析にてアノードストリップとカソードストリップの時刻同時計数をとることで再構成される。さて、この μ -PIC 基板自体はポリイミド基板が 3 枚重なった構造になっており、全てのポリイミド基板に強化材としてガラスクロスが使われていた。バックグラウンド源の所在を突き止めるためにポリイミドとガラスクロスを分離し、ゲルマニウム検出器で測定した。ここで理解できたことは、このガラスクロス材に大量のウラン・トリウムの放射性不純物が含まれていたことだ。ガラスクロス材が使用されていた上層のポリイミド基板からアルファ線が放出していたのである。中間層、最下層で発生したアルファ線は透過力が小さいため検出器表面まで出てくることはない。そのため表面層と最下層を新素材に変更した（図 2 下）。新素材はガラスクロスが入っていないポリイミドにエポキシを重ねたもので、ウラン・トリウム含有量は 1/100 倍である。この表面層を新素材に変更したものを「Low-alpha μ -PIC ($LA\mu$ -PIC)」と呼んでいる。

バックグラウンド源を特定できたことから、2016 年に検出面積 10×10 cm^2 のプロトタイプの $LA\mu$ -PIC を開発し、ガスゲインなどの性能評価を行った。従来の検出器と同程度の性能が確認されたため、検出面積 31×31 cm^2 の大型検出器の開発に着手した。2017 年末までにこれの性能評価を終え、神岡地下実験施設の暗黒物質探索検出器へ設置作業を始めた。

3.2 NEWAGE-0.3b” の開発

$LA\mu$ -PIC を使った暗黒物質探索を行うため、2017 年 11 月から神岡地下実験施設の検出器の改修が行われた。データ収集システムやガス循環系は変更せずにそのまま使用することで短期間で改修作業を終えることができた。 $LA\mu$ -PIC を使うことで低バックグラウンド化されたこの検出器を「NEWAGE-0.3b”」と呼んでいる（図 3）。 $LA\mu$ -PIC の検出面は 31×31 cm^2 , TPC ケージの

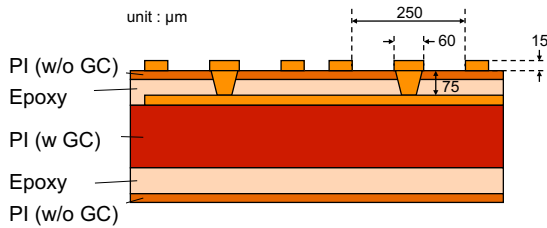
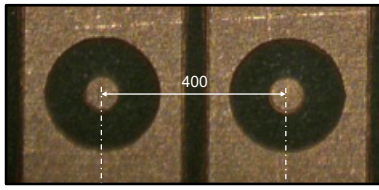
Microscope picture of LA μ -PIC

図 2: LA μ -PIC の顕微鏡写真 (上) と断面の模式図 (下)。上層と下層のポリイミド (PI) とエポキシ (Epoxy) が新しく導入された低バックグラウンド素材である。

長さは 41 cm なので検出体積は 40 L に相当する。ターゲットガスは従来通り 0.1 気圧の CF_4 ガスを使用している。

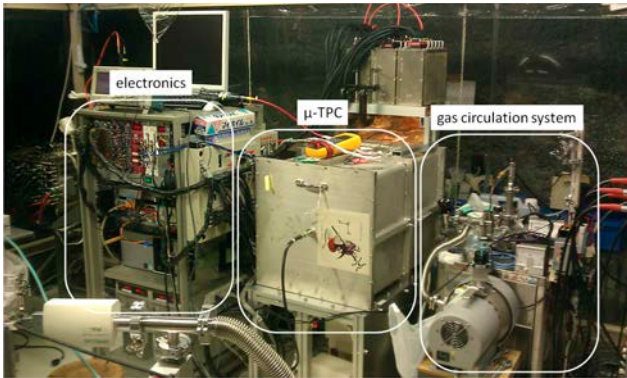


図 3: 神岡地下実験施設に設置された NEWAGE-0.3b” 検出器。左からデータ取得システム, ガス TPC, 活性炭循環システムである。

4 2018 年地下測定

NEWAGE-0.3b” の性能評価を終え、いよいよ 2018 年 6 月から暗黒物質探索が開始された。検出器は 2 週間に一度較正を行うことで安定性が保証された。有効観測時間 108 日、観測量としては $1.1 \text{ kg} \cdot \text{days}$ のデータを取得した。ここで得られたエネルギースペクトルを図 4 に示す。灰色のスペクトル (RUN14) が従来の μ -PIC を使用した際の 2015 年の結果で、黒色のスペクトル (RUN22) が LA μ -PIC を使用した結果である。RUN14 のスペクトルでは 50-100 keV のエネルギー領域の計数が多く、これは μ -PIC 表面から出てきたアルファ線バックグラウンドが起因していた。RUN22 のスペクトルではこの領

域での計数が約 $1/34$ になっており、バックグラウンドが見事に削減できていることがわかる。つまり、期待通り LA μ -PIC では表面アルファ線バックグラウンドが削減できたのである。

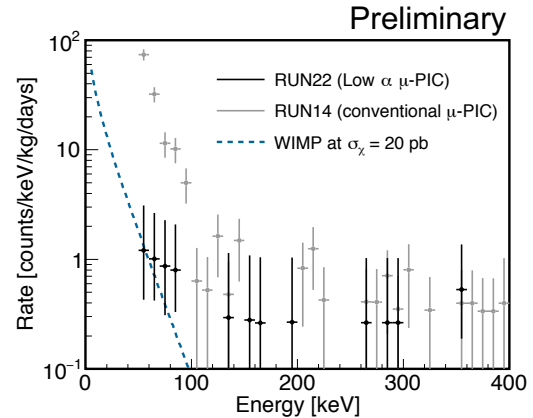


図 4: 観測されたエネルギースペクトル。黒色のスペクトル (RUN22) が LA μ -PIC を使ったデータ。灰色のスペクトル (RUN14) が従来 μ -PIC を使った 2015 年のデータ。点線は質量 100 GeV の暗黒物質から期待される信号である。

検出された原子核イベントの検出器座標系での方向分布を図 5 に示す。反跳原子核の反跳角度分布はこれを銀河座標系に座標変換し、はくちょう座の方向との角度として得られる。50-60 keV のエネルギー帯の反跳角度分布を図 6 に示す。この観測された分布 (黒点) を暗黒物質から期待される分布 (赤線) と比較することで、暗黒物質の有無を議論することができる。観測された事象数が少なく、十分な信頼度で発見を主張することができなかった。そのため、暗黒物質の散乱断面積に制限値を与えることとなった。

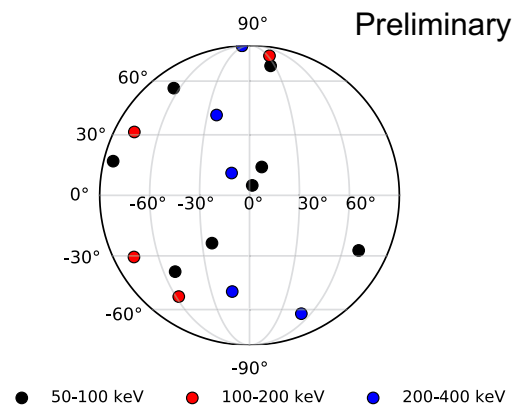


図 5: 観測された事象の検出器座標系での方向分布。

方向に感度を持った方法で得られたスピンに依存する

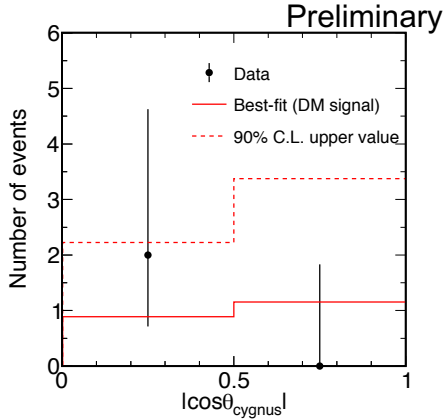


図 6: 50-60 keV のエネルギー帯の反跳角分布。黒点がデータ。赤線が暗黒物質から期待される信号。

散乱断面積の制限曲線を図 7 に示す。赤線が 2018 年の結果で灰色線が 2015 年の結果である。LA μ -PIC によってアルファ線バックグラウンドを削減できたおかげで約 15 倍の感度向上に成功した。図中には DAMA 領域も一緒に示してあるが、方向感度を持って DAMA 領域を探索するのにもあと一歩と迫っている状況だ。季節変動とは違った手法でこの領域を探索することは非常にインパクトのある結果になるに違いない。現在も統計量を増やすために観測を継続している。今後も結果を期待して頂きたい。

さて、DAMA 領域で暗黒物質の発見を有意に主張するには当然ながらバックグラウンドの削減が必須である。そのため 2018 年のデータを用いてバックグラウンド研究が行われた。考えられるバックグラウンドは大きく分けて、外部バックグラウンドと内部バックグラウンドの 2 種類がある。外部バックグラウンドは宇宙線由来ミューオン、環境ガンマ線、環境中性子などである。現在の感度領域では宇宙線ミューオンと環境中性子からの期待されるバックグラウンド事象は無視できるほど計数率が低い。環境ガンマ線は除去しきれていないものが残っており、残存事象の約 30% 占めている可能性がある。しかしながら、このバックグラウンドは遮蔽材によって比較的簡単に削減することができる。

問題となるのは内部バックグラウンドである。内部バックグラウンドはその名の通り検出器内部で発生するバックグラウンド、検出器の材料から出てくるガンマ線やラドン、アルファ線である。ラドンバックグラウンドは検出器の材料中に含まれるウラン・トリウムから崩壊して出てきた希ガスであるラドンガスが検出器中で崩壊、アルファ線を放出することでバックグラウンドとなる。ラドンのうちウランの崩壊系列である ^{222}Rn は寿命が長いのでガスを循環して活性炭などで吸着除去するのが効果的だ。しかし、トリウムの崩壊系列である ^{220}Rn

は寿命が短いのでそうした方法は使えない。もともと材料中に混入しているトリウム量を減らすしかないのである。NEWGE 実験では活性炭循環を利用して ^{222}Rn を除去しているが、 ^{220}Rn が除去できておらず残存事象の 10% を占めている可能性がある。また、2015 年の結果で示唆された μ -PIC の表面バックグラウンドも内部バックグラウンドの一つである。 μ -PIC 表面材料を低バックグラウンド素材に変更したことで大概是除去できたはずだが、その残存放射能を確認するために XMASS グループの小林氏の協力のもと低バックグラウンドアルファ線カウンター (Ultra-Lo1800, XIA LLC) を使って検査した。観測されたスペクトルが 5.3 MeV にピークを持っていたことから、検出器の極めて表面の部分に ^{210}Po が堆積していることがわかった。これは空気中のラドンが崩壊した際に検出器の表面に埋め込まれた可能性がある。また、測定された放射能からこの表面バックグラウンドが 2018 年の観測データの残存イベントの約 60% を占めると予想される。そのため、DAMA 領域探索のための NEWAGE 実験の今後の大きな課題はラドンバックグラウンドと LA μ -PIC の表面バックグラウンドの除去となっている。

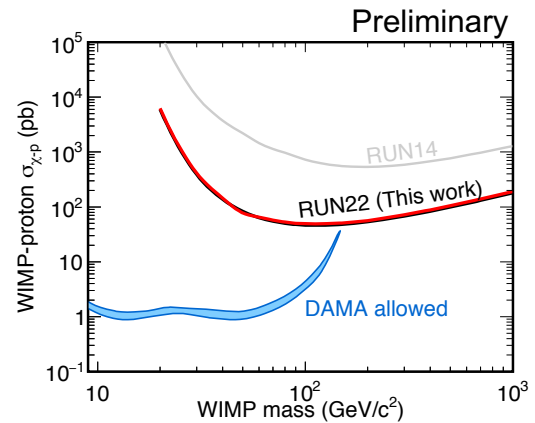


図 7: 方向に感度を持った方法で得られた暗黒物質と陽子のスピンの依存する散乱断面積の制限曲線。赤線 (RUN22) が 2018 年の LA μ -PIC を使った結果、灰色線 (RUN14) が 2015 年の結果である。青く示された領域は DAMA グループが発見を主張する領域。

5 さらに感度向上を目指して

内部バックグラウンドを有効的に除去する方法はないだろうか。2018 年の結果から予想される内部バックグラウンドの特徴的な点はどちらもドリフトプレーンと μ -PIC 検出面近傍に集中しているということだ。したがって、電子のドリフト方向 (Z 軸) に対して反応点の位

置を特定することができれば除去可能となる。残念ながら従来のガス検出器ではZ軸の位置決定は不可能であるが、近年陰イオンガス検出器であればそれが可能であるとわかってきた。現在、NEWAGE 実験では内部バックグラウンドの除去を目的として陰イオンガス μ TPC の開発に着手している。陰イオンガス検出器において、Z軸の位置決定のためのキーポイントとなるのが「マイノリティキャリア」である。

5.1 マイノリティキャリアの発見

Z 軸の位置決定、もしくはZ軸に対する有効体積カットというのは2層型液体希ガス検出器で広く使われている解析方法で非常に強力なバックグラウンド除去法である。二層型液体希ガス検出器ではターゲットとなる液相で発光したシンチレーション光 S1 と、電離電子を電場によって気層に集めた後にアバランシェ増幅によって発光する S2 がある。この S1 と S2 の発光タイミングの差 ΔT と電子のドリフト速度 v を使えば、次式で Z を決定することが可能である。

$$Z = v \times \Delta T. \quad (1)$$

ガス TPC 検出器でも電離電子を検出面まで電場で収集する方法は同じであるが、S1 のように反応時間に発光する信号がないため、従来のセルフトリガーのガス TPC では反応点の Z の特定は不可能に思われてきた。しかし 2015 年に DRIFT グループがガス検出器でも Z の位置決定を成し遂げた。まずはその方法を話す前に DRIFT グループのガス TPC 検出器の説明から入るとしよう。

通常ガス検出器ではおもに希ガスがよく使われており、電離電子が電荷を検出面に運んでくる役割を担う。しかし、DRIFT グループの検出器では陰イオンガスを用いている。電気陰性度の大きいガスを使用することで電離電子がすぐさまガス分子に捕獲されて陰イオンとなり、陰イオンが検出面まで電荷を運んでくる。利点としては、ガス分子は重たいためにドリフト中も熱的な拡散が小さいことだ。そのため長い距離をドリフトしてきたとしても拡散が小さく飛跡の情報を保持しやすい。暗黒物質探索実験のようにターゲット量を確保するためにドリフト距離を長くしたい応用にとっては非常に適したガスなのである。これが陰イオンガスの最大の特徴だった。

しかし、2015 年に DRIFT グループは彼らが使っている陰イオンガス CS_2 に O_2 を混ぜると複数の種類の陰イオンが形成されることを発見した [7]。彼らが観測した波形を図 8 に示す。ここで最も大きなピーク (I) より先行した 3 つのピーク (S, P, D) がまさしく CS_2^- とは違う別種の陰イオンである。ここでは最も大きなピー

クをメインキャリア、それより早い電荷をマイノリティキャリアと呼ぶ。これらの陰イオンが反応点で同時に生成されることから、電荷の到達時間の差とドリフト速度を用いて Z の位置を次式で特定することができる。

$$z = (t_a - t_b) \frac{v_a v_b}{(v_b - v_a)}. \quad (2)$$

DRIFT グループは実際に暗黒物質探索実験にこの技術を適用し、ドリフトプレーン近くのラドンバックグラウンドを特定、ガス検出器で初めて 3 次元の有効体積カットの解析を行って感度向上に成功した [9]。

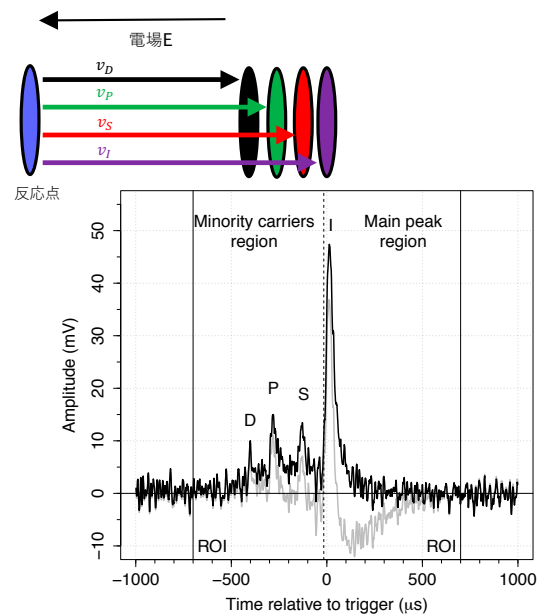


図 8: DRIFT グループが観測した陰イオンガスの波形。I がメインキャリア。S, P, D がマイノリティキャリアである。図は参考文献 [9] から引用。

これに加え、ニューメキシコ大学では陰イオンガス SF_6 でもマイノリティキャリアの観測を報告した [8]。 SF_6 の場合はメインキャリアは SF_6^- 、マイノリティキャリアは SF_5^- である。 SF_6 ガスの利点は CS_2 ガスと比べて無毒であるためハンドリングがよいところだ。また、フッ素を含んでいるため暗黒物質のスピン依存に対しての散乱断面積が大きくターゲットとしても優秀である。陰イオンガスのドリフト速度は非常に遅いので高レート実験には適さないだろう。しかし、拡散が小さいことから検出器の巨大化にも対応でき、有効体積も確保できるため、暗黒物質探索に最適化された検出器となる。これらの報告を受け、世界中のガス検出器を使った暗黒物質探索実験では陰イオンガス TPC 開発の大きなムーブメントが巻き起こった。

5.2 陰イオンガス μ TPC の開発

NEWAGE グループでも 2015 年から陰イオンガス TPC の開発を開始した。DRIFT グループではガス増幅デバイスとして多線式比例計数管 (MWPC) を、ニューメキシコ大学では ThickGEM を使用していたが、われわれは独自に低バックグラウンド化に成功した μ -PIC 検出器を用いた「陰イオンガス μ TPC」を開発することにした。陰イオンガスにはハンドリングが良い点から SF_6 ガスを選択した。その結果、 μ -PIC+GEM のシステムでも十分なガスゲインが確認された [10]。しかしながら、陰イオンガスの増幅プロセスは未だよく理解されていない。高電場中で陰イオンから電子を引き剥がしたあと、電子が雪崩増幅するのが有力なモデルであるが、 SF_6 の電気陰性度は非常に高く、つまり電子の引き剥がしが非常に難しい (SF_6 ガスは工業的に絶縁ガスとしてもちいられるほどだ)。 SF_6 から電子を引き剥がすほどの高電場が μ -PIC の電極で形成されているのかどうかを現在シミュレーションで検証中である。陰イオンガス中での電子増幅プロセスが解明できれば陰イオンガス検出器に適した電極構造などの設計も効率的に行うことができるので、シミュレーションでのガスゲインの再現は陰イオンガス μ TPC 開発の重要な研究課題の一つとなっている。

さて、陰イオンガスのドリフト速度は電子のドリフト速度より 100 倍も遅く、従来の読み出し回路では十分な電荷の積分時間が確保できない。しかし、このドリフト速度は液体中の電子のドリフト速度と同程度であるので、液体アルゴン検出器のために開発された読み出し回路を転用することができた。KEK の測定器開発グループによって製作された「LTARS チップ」を搭載したアナログボードと、波形情報をデジタル化してデータ転送するためのデジタルボードを使用して、陰イオンガス μ TPC の試作機の製作を行なった。図 9 に陰イオンガス μ TPC の試作機の写真を示す。この検出器は $12.8 \times 25.6 \times 144 \text{ mm}^3$ の有効体積を持つ。 μ -PIC の検出面積は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ だが、読み出し回路のチャンネル数が検出面積を制限している。ベッセルには 20 Torr の SF_6 が充填されている。また、 SF_6 ガスのマイノリティキャリアの生成量はガスに混入する水分量に大きく影響を受けるので、アウトガスの水分除去目的に合成ゼオライト (ゼオラム®) をガス循環系に導入している。

この検出器で得られた陰イオンガス特有の信号を示しておこう。ドリフト距離 89 mm に α 線源として ^{241}Am を置いた際の μ -PIC アノードの 32 チャンネルの信号波形を図 10(a) に、平均波形を図 10(b) に示す。検出面に対しアルファ線を平行に入射しているため、メインピークの時間が揃っており、ほぼ全てのストリップでマイノリティピークが観測されている。平均波形を取ること

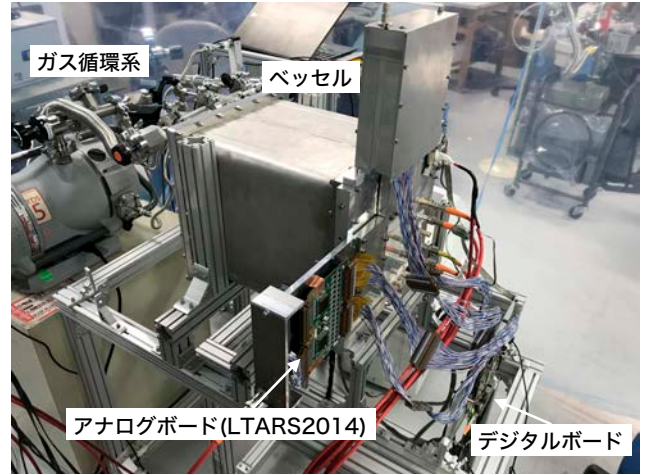


図 9: NEWAGE 実験で開発された陰イオンガス μ TPC の試作機。ベッセル中に TPC ケージと μ -PIC+GEM システムが設置され、 SF_6 ガスが封入されている。

その存在は一目瞭然だ。このマイノリティピークは陰イオン SF_5^- によって作られたもので、メインピークに比べてドリフト速度は 9% 速く、その電荷量は 3% 程度である。先に議論した通り、Z の絶対位置はこの二つのピークの到達時間差から式 (2) より決定することができる。

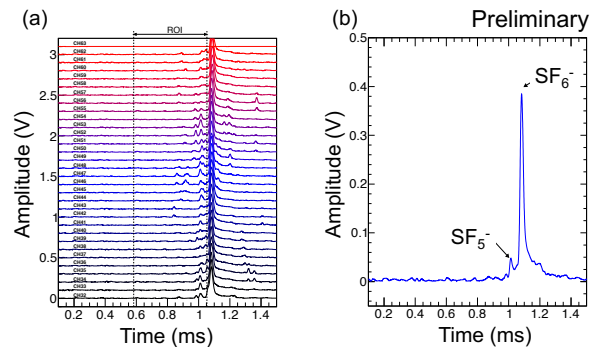


図 10: 陰イオンガス μ TPC で検出されたアルファ線の波形信号。(a) は μ -PIC アノード 32 チャンネルの信号、(b) はその平均波形を表す。

実際に数千イベントについて Z を再構成した分布が図 11(a) である。その中央値はアルファ線源を置いた Z の位置である 89 mm を再現していることがわかる。この時の Z の位置決定の分解能 (σ) は 16 mm であった。またアルファ線源の位置を変えることで線形性も確認された (図 11(b))。これらの結果からマイノリティキャリアを利用すれば Z の位置を決定できるということがお分かりいただけただろう。

われわれの開発した陰イオンガス μ TPC は、読み出しに μ -PIC を用いているために、従来の μ TPC と同じく飛跡の再構成が可能である。再構成されたアルファ線の飛跡のサンプルを図 12 に示した。ここで着目していただきたいのが Z 軸である。繰り返しにはなるが、従来

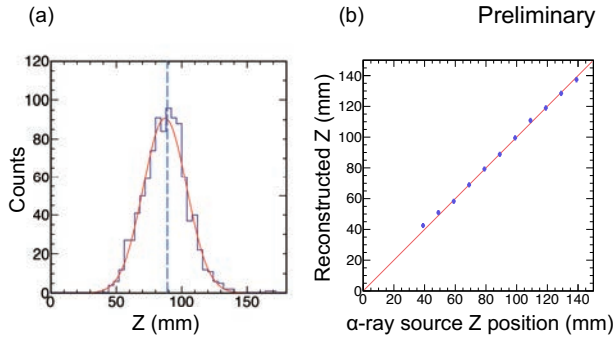


図 11: (a) マイノリティキャリアを使って再構成した Z の分布。点線は ^{241}Am 線源の位置を示す。(b) 各線源位置に対する再構成された Z の分布の平均値のプロット。

のガス TPC ではこの Z の値は絶対位置ではなかった。しかし、マイノリティキャリアを利用することで Z を絶対位置に再構成することができたのだ。こういった方法で現在のバックグラウンドであるラドン・ $\text{LA}\mu\text{-PIC}$ 表面からのアルファ線バックグラウンドを除去し、感度に向上つなげていく予定である。また、これまでに報告されてきた SF_6 を用いた陰イオンガス TPC の開発では、 Z 方向の位置決定が示されたのみであったが、本実験が SF_6 陰イオンガス μTPC の Z 位置決定と 3 次元飛跡の検出を同時に実現した初の結果であることも強調しておきたい。

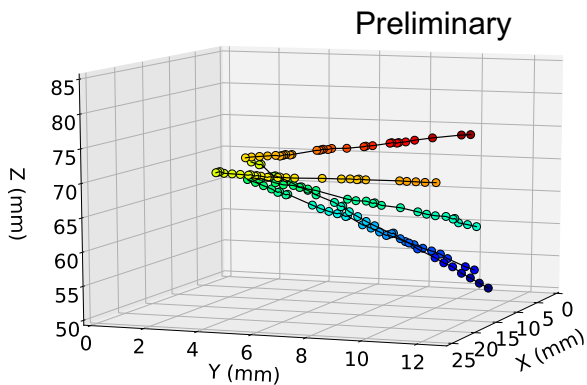


図 12: 再構成されたアルファ線の飛跡。 Z はマイノリティキャリアによって決定された絶対位置を示す。

5.3 CYGNUS/NEWAGE-TPC

これまで方向に感度のある暗黒物質探索及びその開発に焦点を当てて説明してきたが、暗黒物質の直接探索という観点からは、液体キセノン検出器などの大質量検出器による探索がすすめられており、われわれの目指す「決定的証拠」や「性質解明」のためにも数 100 kg

以上の検出器が必要となる。このためには、国際協力が必要であると考え、積極的にその準備をすすめている。特に、英国の DRIFT グループらとともに準備を進めている「CYGNUS」を有力な国際ネットワークとして近い将来機能させてゆきたいと考えている。これまでに、CYGNUS メンバーの検出器を搭載することも可能な CYGNUS-KM/NEWAGE-1.0 (C/N-1.0, 図 13) チェンバーを製作、現在神戸大学で調整を行っている。将来的にはこうした 1 m クラスのチェンバーをユニットとして、多くの検出器を世界中の地下実験施設に置き、暗黒物質の正体解明に挑みたいと考えている。

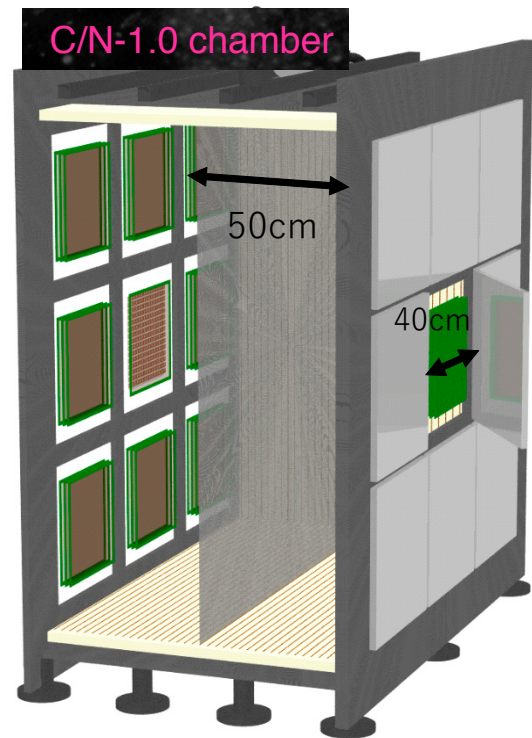


図 13: C/N-1.0 チェンバーの模式図。最大 $40 \times 40 \text{ cm}^2$ の大きさの検出器を 18 ケ搭載可能なチェンバーとなっている。

6 最後に

本稿では、方向に感度をもつ暗黒物質探索実験で世界をリードする NEWAGE の最新結果、感度向上のキーテクノロジーとなるであろう陰イオンガス μTPC 、さらに将来的な国際協力体制の「CYGNUS」について述べた。暗黒物質の直接検出に決定的な証拠を与え、その性質解明に重要な役割を果たすであろう方向に感度を持つ手法のこれからの発展にぜひご注目頂きたい。

7 謝辞

NEWAGE 実験は、科学研究費補助金 (16H02189, 19684005, 23684014, 26104005, 19H05806), 学術振興会二国間事業, 東京大学宇宙線研究所共同利用からの助成を受けている。また, 神岡地下実験施設の検出器の管理や検出器の開発には神岡スタッフのみなさまの多大なる協力をいただいている。読み出し装置は KEK RD プロジェクトプラットフォームの協力のもと開発を進めてきた。ご支援いただいた皆様にこの場をお借りして感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] 中村輝石, 身内賢太朗, 高エネルギーニュース **31-4**, 287 (2013). “方向に感度を持つ暗黒物質探索実験 NEWAGE”
- [2] J. Lewin and P. Smith, *Astroparticle Physics* **6**, 87 (1996).
- [3] D. N. Spergel, *Phys. Rev. D* **37**, 1353 (1988).
- [4] S. K Lee, A.H.G Peter, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **04**, 029 (2012)
- [5] A. Takada *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **573**, 195 (2007)
- [6] K. Nakamura *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2015**, 043F01 (2015)
- [7] D. P. Snowden-Ifft, *Review of Scientific Instruments* **85**, 013303 (2014)
- [8] N. Phan *et al.*, *Journal of Instrumentation* **12**, P02012 (2017)
- [9] J.B.R. Battat *et al.*, *Physics of the Dark Universe* **9-10**, 1-7 (2015)
- [10] T. Ikeda *et al.*, *EPJ Web Conf.* **174**, 02006 (2018)