

Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b'

Kiseki Nakamura^{1,*}, Kentaro Miuchi², Toru Tanimori¹, Hidetoshi Kubo¹,
Atsushi Takada¹, Joseph D. Parker¹, Tetsuya Mizumoto¹, Yoshitaka Mizumura¹,
Hironobu Nishimura¹, Hiroyuki Sekiya³, Atsushi Takeda³, Tatsuya Sawano¹,
Yoshihiro Matsuoka¹, Shotaro Komura¹, Yushiro Yamaguchi² and Takashi Hashimoto²

¹Department of Physics, Kyoto University, Oiwakecho, Sakyo-ku Kyoto-shi, Kyoto, 606-8502, Japan

²Department of Physics, Kobe University, Rokodai, Nada-ku Kobe-shi, Hyogo, 657-8501, Japan

³Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo, Gifu, 506-1205 Japan

*E-mail: nakamura@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

Received August 21, 2014; Revised February 27, 2015; Accepted February 27, 2015; Published April 15, 2015

NEWAGE is a direction-sensitive dark matter search experiment using a micro-time-projection chamber filled with CF₄ gas. Following our first underground measurement at Kamioka in 2008, we developed a new detector with improved sensitivity, NEWAGE-0.3b'. NEWAGE-0.3b' has twice the target volume of the previous detector, a lower energy threshold, and an improved data acquisition system. In 2013, a dark matter search was undertaken by NEWAGE-0.3b' in Kamioka underground laboratory. The exposure of 0.327 kg · days achieved a new 90% confidence level direction-sensitive spin-dependent cross-section limit of 557 pb for a 200 GeV/c² weakly interacting massive particle. Relative to our first underground measurements, the new direction-sensitive limits are improved by a factor of ~10, and are the best achieved to date.

Subject Index F41

Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b'

ガスによる飛跡検出器 NEWAGE-0.3b'での方向感度暗黒物質探索

Abstract: 概要

NEWAGE は CF₄ ガスで満たされたマイクロ・タイム・プロジェクション・チェンバーを用いた方向感度を持つ暗黒物質探索実験である。2008 年神岡での我々の最初の地下測定に続いて、我々は感度改善した新しい検出器 NEWAGE-0.3b'を開発した。NEWAGE-0.3b'は前回の検出器の標的体積の 2 倍、低いエネルギー閾値、そしてデータ収集システムを改良した。2013 年、暗黒物質探索は神岡地下実験場で NEWAGE-0.3'によって着手された(undertaken)。0.327 kg · days の暴露は 90% C.L.の方向感度・スピン依存性の断面積が 200 GeV/c² の WIMP において 557 pb の限界値を達成した。最初の地下測定と比べて(relative)、新しい方向感度の限界はファクター約 10 まで改善され、そしてこの限界値は(我々の)データにとって最高のものです。

1. Introduction: 導入

多数の宇宙観測は宇宙質量の大きな揺らぎは非バリオン(non-baryonic)な暗黒物質で構成されていることを示唆している^[1]。弱く相互作用する質量を持った粒子(WIMP)は暗黒物質をリードしている(先頭に立っている)候補の一つである^[2]。我々の銀河のハローないの WIMP は地球で検出されることが予想され、特に、WIMP と原子核の弾性散乱の信号が直接探索実験で検出可能(detectable)であるべきである^[3]。WIMP 信号のエネルギー・スペクトラムは指数分布に似ていると予想され、そして妥当な(relevant)エネルギー領域は 100 keV 以下と考えられている。低く予想された事象頻度は普通の(ordinary)物質と WIMP の間の相互作用の断面積が小さいことが起因する(attributable)。従って、WIMP 検出実験は低バックグラウンド環境で実施しなければならず、そしてつまり典型的に地下施設でこれを着手される。

多くの暗黒物質の直接探索実験が今日まで行われてきている。事象頻度の年間変動(季節変動)(annual modulation)の観測が陽性の結果を出しているが、これらの結果は不変的に承諾されていない。従って、暗黒物質のより強固な(robust)根拠を得るために、方向感度法によって検出できる他の明確な(distinct)信号が探索されるべき。白鳥座(Cygnus constellation)は太陽系移動の前方方向に見えるため、暗黒物質は”WIMP の風”としての白鳥座方向から来ると思っていた。前方と後方に散乱した反跳角度(予想される風向きに関連して)は大きな非対称が示される(典型的なエネルギー領域で10倍以上)^[4]。地球に相対した白鳥座の方向をどちらも日と年どちらも変動するため、日と季節環境の変数によって導入された系統誤差は減らす予定だ。高位置分解能で低圧力のガス検出器は気圧ガスで1mmより短い軌道を検出することができる(be suitable)。NEWAGE実験は低圧力ガスの時間射影電離箱(time projection chamber: TPC)で生成される明確な暗黒物質の信号を探索する。

2. Detector: 検出器

前回の測定の感度(NEWAGE-0.3aによる実施[5])は我々の改善した直接暗黒物質検出器 NEWAGE-0.3b'によって10倍(tenfold)に高めた(enhance)。NEWAGE-0.3b'は μ -TPC、この回路システム、そして活性炭冷却がついたガス循環システムで構成される。NEWAGE-0.3b'は0.3aの2倍の体積をもちエネルギー閾値が低く、そしてデータ収集システムが改良されている。0.3b'は0.3aと操作上同様のため、ここでは本質的な性質をまとめ、そして新しい性質を詳しく述べる(detail)。

2.1. System

μ -TPCとその内部構造の模式図を図1に示す。 μ -TPCは2次元の細かいピッチの画像デバイス、これはマイクロ・ピクセルチェンバー(μ -PIC)と知られている[6]、ガス電子増幅器(GEM)[7]、そして0.1気圧のCF₄ガスで満たされた検出器体積(30×30×41 cm²)で構成されている。x,y,z軸は図1で定義されている。この論文で長さの単位はcmが採用されている、特に明記しない限り(unless otherwise stated)。検出器の画像化した時、 μ -PICは主なガス増幅として、そして読み出し電極(electrode)も動作する。 μ -PICの面積30.72×30.72 cm²、これは400ミクロンの768×768ピクセルに対応する、は768のアノードストリップと768のカソードストリップに接続された。アノード、カソードストリップは直交に(orthogonally)設計された(configure)ため、ヒットピクセルの2次元位置を得ることができる。ガス増幅率を十分確保するために、サブ増幅器として μ -PICの4mm上にGEMが置かれた。GEMの有効領域(31×32 cm²)は μ -PICの全体を覆っている。放電(discharge)のダメージ損傷を減らすために、GEMは8箇所に区画されている。GEMは100ミクロン厚の液体結晶ポリマーの上に構築され、穴のサイズとピッチはそれぞれ80ミクロンと140ミクロンである。ドリフト長、これは標的相互作用の利点と長いドリフト通過によって生じる角度分解能の悪化の間のトレードオフ(妥協点)の適正によって決定された、は41cmである。電場はドリフト領域の側面壁に1cm間隔のワイヤーとドリフト面によって形成されている。ポリエーテルエーテルケトン(Polyetheretherketon: PEEK)は0.3b'の側面における材質に新たに採用された、なぜなら0.3aの壁で使用していたガラス強化フッ素樹脂(glass-reinforced fluoroplastic)は相当量な(significant amount)ラドンを放出したからだ。 μ -PIC, GEM,そしてドリフト面に適用されている電圧は図1に明記している。これらの電圧は組み合わせたガス増幅率(μ -PIC x GEM) 2500倍での安定制御を実現した。エネルギー較正の目的のため、10Bの薄い層を表面に塗った(coat)ガラス板が(-5, -12, 0) cmに導入された。 μ -TPCは0.1気圧のCF₄ガスで満たされた厚さ2.5cmのステンレス製鉄の真空ベッセル内に設置された。CF₄ガス内では電子ドリフト拡散が小さくそしてフッ素は大きなスピン依存(SD)なWIMP-養子断面積を持つため、CF₄ガスは方向感度性SD暗黒物質探索のために適正な選択である。

0.3b'は冷却炭を使ったガス循環システムが追加された(supplement with)。このシステムは暗黒物質探索の致命的なバックグラウンドとなるラドンを削減するため、そして長期間オペレーション(1ヶ月を超える)を超えるガスの質(ガス増幅率、ドリフト速度)を維持するために開発された。ベッセル内のガスは油フリーのポンプ(XDS5 Scroll pump, EDWARDS)によって連続的に循環され、そして炭(TSURUMICOAL 2GS)の100gを押し進められた(pushes through)。これはラドンと他の不純物を吸収する。流量頻度はニードル型バルブ(needle-like valve)によって毎分500mlで制御された。230Kで安定冷却が冷却ヒーターによって実現された。この間、冷却機(CT-910 Cool Man Trap, SIBATA)はこいつの最大冷却力で常に作動していた。この循環システムでガス交換からの20日間のラドン頻度はこのシステムなしと比べて1/50に削減した。

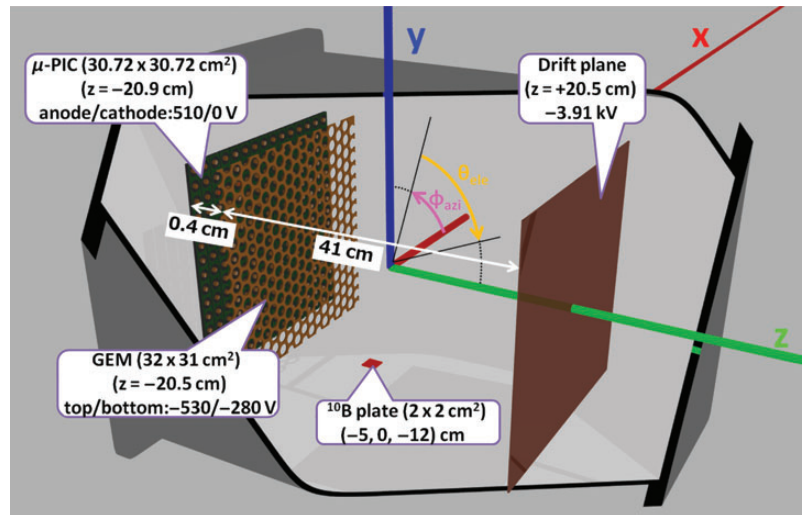


図 1. NEWAGE-0.3b'の概略図。検出器体積の中心に原点を持つ座標系も示す。赤、青、緑の線はそれぞれ x, y, z 軸である。エネルギーは(-5, 0, -12)の 10B の薄い層でコーティングしたガラス板によって較正される。

XDS Dry Pump



[XDS5 Scroll pump, EDWARDS](#)

科学機器
冷却トラップ*クールマントラップ*
Cold Trap *COOLMAN-TRAP*



この冷却トラップは各種蒸留装置や減圧濃縮装置、真空乾燥器などから排気されるペーパーや水蒸気を真空系内で効率よく捕集し、真空ポンプへの流入を最小限に抑えることができます。



[CT-910 Cool Man Trap, SIBATA](#)

- 冷却トラップの槽内温度は-50℃ (CT-510型) と-90℃ (CT-910型) の2機種。
- 減圧濃縮装置や真空乾燥器から排気する溶媒等の捕集に最適です。
- ガラストラップ (オプション) を使用すれば、強い酸なども効率よく捕集できます。
- -90℃に到達する時間は約16分と速いので、準備時間が短縮できます。
- トラップ槽に冷却コイルが無いので、槽内の清掃が簡単にできます。
- ドレインを設けていますので、捕集物の取り出しが容易です。

μ -PIC 読み出しに専念するための回路を持つデータ収集システム(DAQ)は 0.3b'のために採用された^[8]。DAQ システムは「電荷」と「軌跡」の2種類のデータを記録する。「電荷」データは 768 カソードからのアナログ信号を増幅してそして、4 チャンネルにグループ化して記録される。4 チャンネルからの波形は 100 MHz フラッシュ ADC によってその後記録される。合算された波形(FADC-sum)は荷電粒子のエネルギー・デポジット (落としたエネルギー) を計算するために使用される。「軌跡」データはある事象によって全てのストリップヒットのアドレスと time-over-threshold(TOT: 閾値を超えていた時間)を記録する。TOT は閾値を上昇して超える端と加工して超える端の間のクロック期間(duration)として測定される。ドリフト速度は 8 cm/ms なので 1 クロックは 0.8 mm に相当する。図 2 はある軌跡事例を示す。この新しく採用された DAQ モード、これをモード 5 と呼ぶが、回路ファームウェアをアップデートすることによって TOT を測定した。それぞれのストリップで落としたエネルギーの追加された情報は荷電粒子のエネルギー損失によって与えられる。前のモード「DAQ モード 1」は x-y の同時計測がなく出力アドレスの番号を制限することによって記録データのサイズを減らしている。2つの DAQ モードの差は表 1 にまとめた。

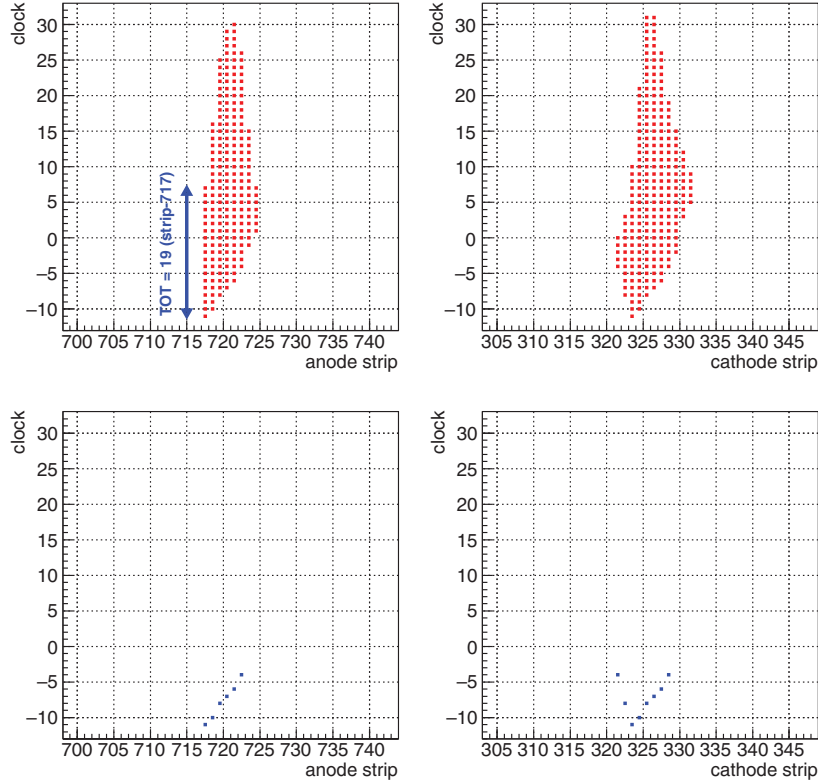


図2. α 線の生軌跡データの一例。測定されたエネルギーは 600 keV。示された点はクロック-アノード (z - x) とクロック-カソード (z - y) の記録されたデジタルヒットである。上図は DAQ モード 5 で得られた実データで、下図は DAQ モード 1 で計算した同じ事象を示す。上図で垂直の長さがそれぞれストリップの TOT を示す。

Table 1. Difference between DAQ modes 1 and 5.

DAQ mode	mode1	mode5
x - y coincidence	take	not take
strip address to record at each clock	X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max}	all
Time over threshold (TOT)	not take	take
detector	NEWAGE-0.3a	NEWAGE-0.3b'

2.2. Energy calibration

エネルギーは γ 線 β 線よりむしろ α 線を用いて較正された。なぜなら我々は原子核軌道への検出器応答に興味を持つため、これは WIMP-原子核散乱から生じることが予想される。 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応 ($Q=2.310$ または 2.792 MeV) における ^{10}B の原子核捕獲によって α 線が生成される。熱中性子を μ -TPC 内の ^{10}B に照射することによって μ -TPC 内で α 線が生成される。較正のため外から熱中性子の照射のために、我々は検出器の外のポリエチレンによって囲まれた ^{252}Cf 中性子線源を配置した。この中性子捕獲反応は普通、即発 γ 線を放射する、つまり生成された α 線の運動エネルギーは 1.5 MeV だ。TPC 応答の線型性はバックグラウンドのラドンの α 線から評価された。 ^{220}Rn と ^{222}Rn とこれらの孫核のどれも約 6 MeV でピークを作るが、約 10% の違いを持つ。

エネルギー分解能は 2 つの因子で校正される：検出応答の非一様性 (σ_{uni}) と電気雑音 (σ_{noise})。前者はガス増幅率の一依存とガス体積の電子雪崩の消滅から供給される (source)。この因子はエネルギーに依存せず、そしてラドンピークの幅から $\sigma_{\text{uni}}=20\% \pm 5\%$ と評価された。後者はフラッシュ ADC のデータから評

価された。オフタイミングの波形とオンタイミングのデータは同じ方法(manner)のプロセスで得られたとして、電気雑音は 50 keV で $\sigma_{\text{noise}}=2\text{keV}$ と評価された。

2.3. Event selection

バックグラウンドを減らすために、いくつかの事象選択が適用される。暗黒物質解析の間、 $28\times 24\times 41\text{ cm}^2$ の信用できる(fiducial)カットの体積は $30.72\times 30.72\times 41\text{ cm}^2$ の検出体積から選択される。この工程は壁と ^{10}B 板から放射される(eject)荷電粒子を除去した。

γ 線バックグラウンドと α 線バックグラウンドはその後以下の基準でカットされる。電子のエネルギー損失(dE/dx)は原子核の損失よりもすごく小さいため、電子の軌道は長く(図 4)そして不連続(図 5)、原子核軌道(図 3)と比べて。粒子種類(species)の間の軌道長とエネルギー損失密度における差は2つのパラメータで定量された:"length"と"TOT-sum"。パラメータ"length"は以下で計算された。X-z と y-z 平面で、直線によって立上り点はフィットされる。ここで、立上り点はエネルギー落とすことに対応した期間の軌道の形状に関する情報を持つ。その後(Then)、フィット線に刺って立上り点の領域はそれぞれの面で計算される。そのあと(After that)、3次元空間の"length"は計算される。他のパラメータ"TOT-sum"はすべてのストリップのTOTの合計である。得られたストリップのTOTはストリップに沿った青点(立上り時刻)から黒点(下降時刻)の間の長さである。従って、単一の事象のTOT-sumは青、赤、黒点の合計数で、ここで、赤点はこの事象のスタートとエンドポイントの間に置かれている(lie)。また(Also)、 μ -PICに混ざり込んでいる放射性不純物(impurity)からの α 線バックグラウンドのドリフト長さは短いので、ガス拡散は小さい、そして軌道形状は直線に近い(図 6)。軌道形状を使用してこの α 線バックグラウンドを区別するために、"roundness"パラメータを直線の立上り点の偏差の形状の広がりとして式(1)によって定義した。

$$\text{roundness}_x = \frac{\sum^{N_x} (z_{\text{risex}} - a_x x - b_x)^2}{N_x}, \quad \text{roundness}_y = \frac{\sum^{N_y} (z_{\text{risey}} - a_y y - b_y)^2}{N_y},$$

$$\text{roundness} = \min(\text{roundness}_x, \text{roundness}_y), \quad (1)$$

ここで、 N_x と N_y はそれぞれxとyストリップのヒット数。 z_{risex} と z_{risey} は最小のz値でこれは図3-6の青点に対応する。そして (a_x, b_x) と (a_y, b_y) は (x, z_{risex}) と (y, z_{risey}) のフィットによって得られた直線によるベストフィット。

^{252}Cf によって生成された原子核軌道と ^{137}Cs によって生成された電子軌道のlengthとTOT-sum、roundness依存性は図7-9に示す。これらの図に基づいて、原子核と電子事象を区別するために3つのカットパラメータを決定した。

○length cut: 軌道長[cm] > 0.6 + 0.004×E[keV]

このカットは過度に(excessively)長い軌道事象を除去する(図4を見よ)。

○TOT-sum cut: TOT-sum < 50

このカットは不連続軌道を除去する(図5を見よ)

○roundness cut: roundness < 0.05

このカットは図9に示すような ^{137}Cs runの残された事象を除去する(図6をみよ)。

図3に示すような原子核事象はこれらカットの3つ全てで生き残った(survive)。これらカットは原子核の検出効率*を過度に(unduly)間違えることなく(compromising)、効率的に ^{137}Cs run事象を削減する(図7-9をみよ)。

*この効率測定は次の節で記述される。

加えて、roundnessカット効率を研究するために、検出器に ^{252}Cf からの中性子を照射し、そしてドリフト長の長さの関数として原子核事象のroundnessを測定した。この測定で、 ^{252}Cf からの即発 γ 線はそれぞれの事象の絶対位置zの検出を可能にするためにトリガーとして使用された。Roundnessとドリフト長の関係は図10にプロットされている。Roundness cutはzの信頼できる空間cutのような操作として観測される。

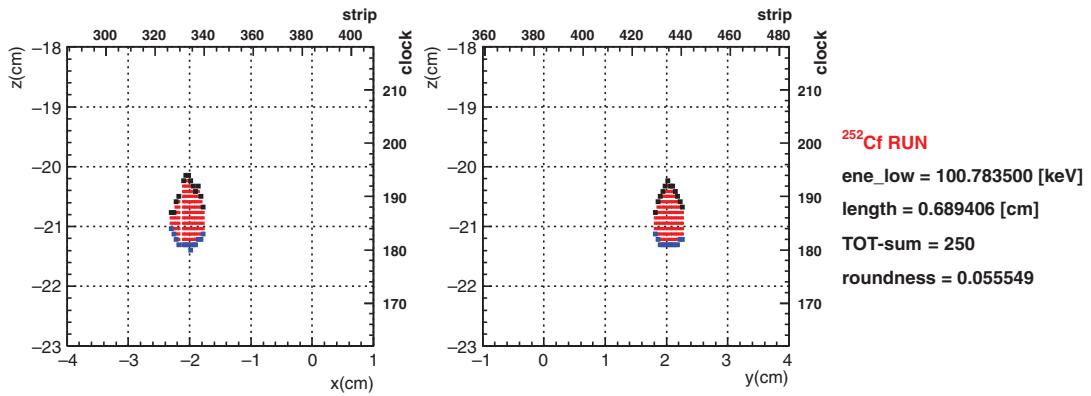


図 3. ^{252}Cf 線源での測定した軌跡例。左右のパネルは z-x と z-y のデジタル軌道の射影をそれぞれ示す。立上り点と下降点そしてその間の点を青、黒、赤でそれぞれ示す。描かれた事象は length cut, TOT-sum cut そして roundness cut で生き残った。

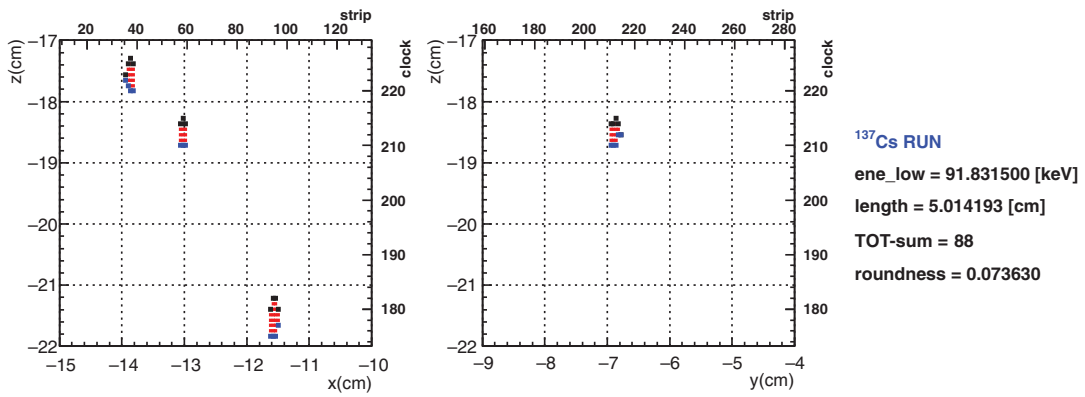


図 4. Length cut によってカットされた ^{137}Cs 線源からの軌跡例

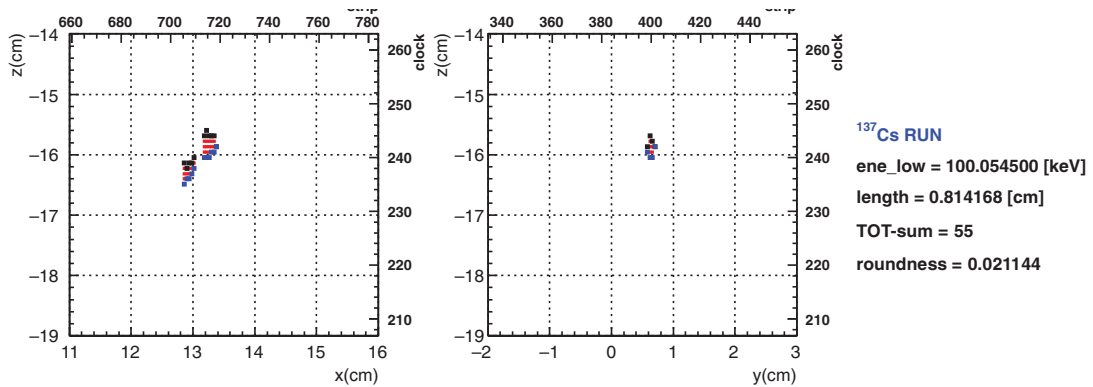


図 5. TOT-sum cut によってカットされた ^{137}Cs 線源からのサンプル例。

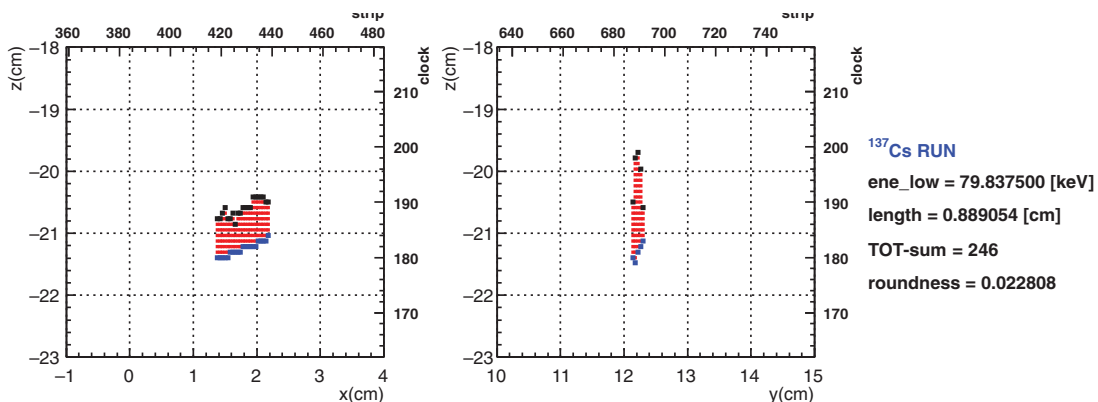


図 6. ^{137}Cs run が混入している μ -PIC からの α 線のバックグラウンドのサンプル例。この事象のタイプは roundness cut でカットされる。

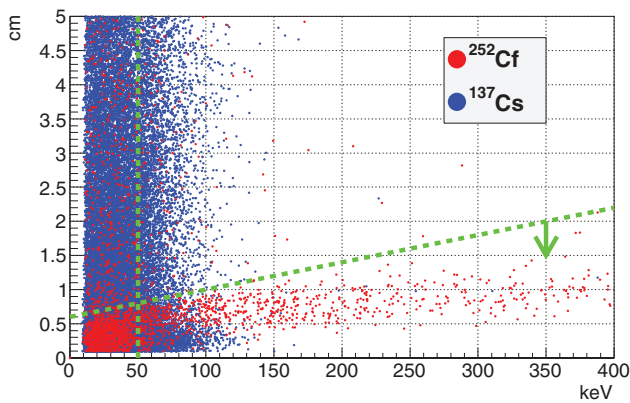


図 7. 粒子エネルギーにおける軌道長依存性。赤と青点は ^{252}Cf と ^{137}Cs によって放射された測定データをそれぞれ示す。

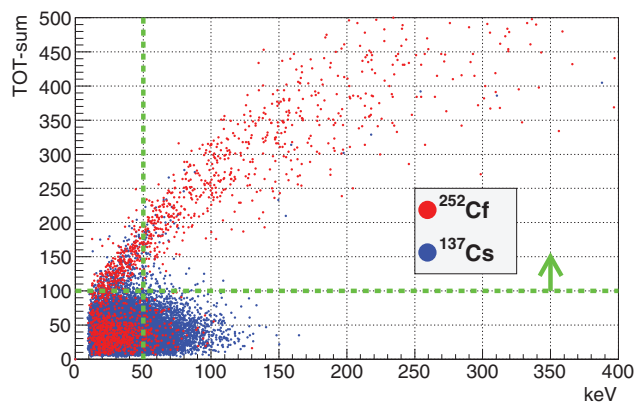


図 8. Length cut の後の粒子エネルギーにおける TOT-sum 依存性。赤と青は上記で記述されている。

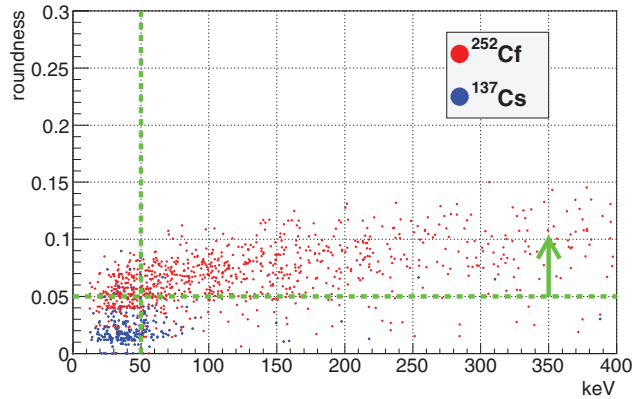


図9. Length cut と TOT-sum の後の粒子エネルギーにおける roundness 依存性。赤と青は上記で記述されている。

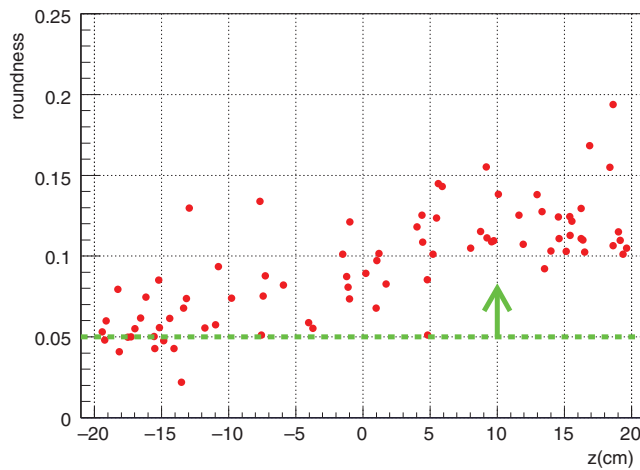


図10. ドリフト長の関数としての測定された roundness。

2.4. Performance

ここで、原子核の検出効率、電子の検出効率（または γ 線除去力）、方向依存効率、そして角度分解能について議論する。

原子核事象の検出効率と γ 線事象の除去力を測定するとき、セクション 2.3 で導入した 3 つのカットを課した(impose)。図 11 に原子核反跳事象の測定した検出効率を示す。この効率は、エネルギースペクトラムをシミュレートしたことによってセクション 2.3 で説明した 3 つのカットの後、測定したエネルギースペクトラムを分割する（用は比をとったということ: $A/B = A$ divided by B ）ことによって評価した。分母(denominator)は検出器応答のない中性子による原子核反跳のシミュレートされたエネルギースペクトラムである。つまり、評価された効率は検出とカット効率を含む。位置依存性をキャンセルするために、6 つの ^{252}Cs の位置と平均でスペクトラムは測定された。線源位置は(25.5, 0, 0), (-25.5, 0, 0), (0, 25.5, 0, 0), (0, -25.5, 0), (0, 0, 25.5), (0, 0, -25.5)だ。図 11 のいくつかのビンは 1 を超えているエラーバーを持つ。なぜなら、低い事象頻度のため高エネルギー領域において系統誤差が大きいため。図 11 の青線に示している効率曲線が物理要求を超えないため (so that) フィットパラメータに制限をした。次の解析でこの効率曲線を使用する。検出とカット効率は 50 keV 閾値で 40%だ。

デジタル信号の閾値とカット効率は低エネルギーで検出効率が下がる。

電子事象の検出効率を決定するために検出器は ^{137}Cs からの γ 線を照射された。そしてこのデータはシミュレーション結果と比較された。得られたエネルギー・ビン内で、検出効率は同じエネルギーでシミュレートされた電子の事象頻度によって割った(divide)測定された事象頻度である(用は比をとったということ: $A/B = A$ divided by B)。50-100 keV のエネルギービンにおける電子の検出効率は 2.5×10^{-5} と評価された。図 12 のエネルギーの関数として電子検出効率をプロットした。

50-100 keV 領域の方向感度の効率は様々な位置に置いた ^{252}Cf からの中性子を検出器に中性子を照射することによって測定した。場所はつまり、(25.5, 0, 0), (-25.5, 0, 0), (0, 25.5, 0), (0, -25.5, 0), (0, 0, 25.5), (0, 0, -25.5), (0, 0, 47.5), (0, 0, -47.5)。シミュレーションのために、6つの測定の荷重平均(標準偏差 23%)が正しく等方反跳を捉えているか確認した。予想された暗黒物質による散乱反跳した原子核軌跡の方向分布において、荷重因子は測定された方向依存した効率である。

角度分解能は中性子-原子核の弾性散乱から評価した。具体的に言うと(Specifically)、測定された $|\cos \theta|$ 分布はシミュレートされた分布と比較された。ここで、 θ は原子核の方向と ^{252}Cf 中性子線源の間の角度である。前の我々の検出器研究で、50 keV のエネルギー閾値で 40 deg の角度分解能を測定した。

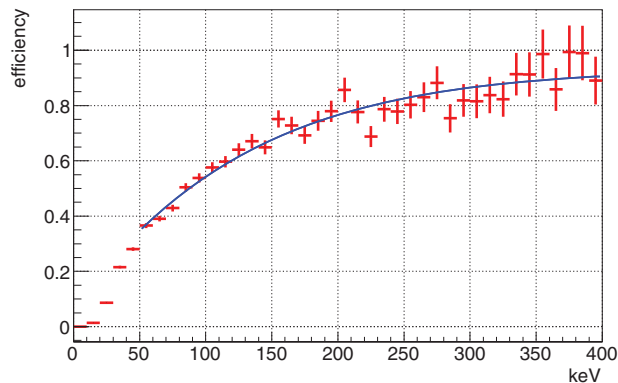


図 11. エネルギーの関数として原子核事象の検出効率。エラーバーは統計誤差

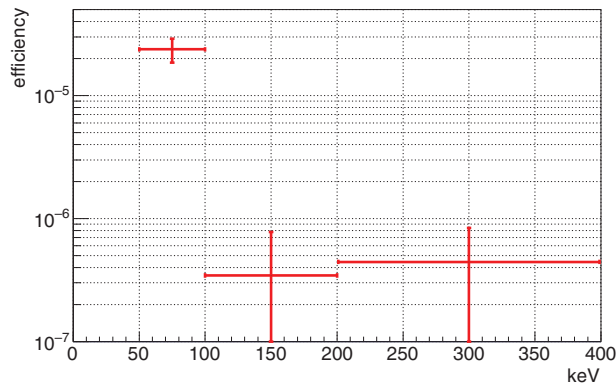


図 12. 電子事象の検出効率、または γ 線の除去能力、エネルギーの関数として。

3. Experiment

方向感度の暗黒物質探索実験(RUN14)が神岡鉱山の地下施設で実施された。NEWAGE-0.3b'は神岡観測所 実験室 B に導入された。ここは(36°25' N, 137°18' E)、深さは水換算で 2,700 m である。利用を簡単にするために、検出器は任意の放射線遮蔽によって覆われていない。 μ -TPC の μ -PIC 平面は垂直に置かれ、z 軸は S30°E の方向に整列されている。Run 情報は表 2 にまとめている。最初の sub-run が 2013 年 7 月 17 日にガスを重点して開始された、そして暗黒物質測定が 7 月 20 日から 8 月 11 日まで続いた。17.1 日の曝露を収集した。2 回目の sub-run は 10 月 17 日に開始された。そして 10/19 から 11/12 のデータを蓄積された。14.5 日間、暗黒物質に触れさせていた。標的ガスは信頼できる体積 27,552 cm^3 で 0.1 気圧の

CF4である。つまり、被曝している間、最初と2回目の sub-run はそれぞれ $0.177 \text{ kg} \cdot \text{days}$ と $0.15 \text{ kg} \cdot \text{days}$ 、合計で $0.327 \text{ kg} \cdot \text{days}$ の被曝である。

図13に測定したエネルギー分布を示す。前のRUNの結果も比較のために示す。有効なスペクトラムは検出効率において対応してプロットされている。角度分解能は 50 keV の下で測定されたので、 50 keV から RUNN14 のエネルギースペクトラムをプロットしている。RUN14 のバックグラウンド RUN は $100\text{--}400 \text{ keV}$ のエネルギー領域内で RUN5 の BG よりも $1/10$ くらい低い。 $50\text{--}400 \text{ keV}$ エネルギー領域の軌道方向のプロットとこれらに対応する $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|$ 分布を図14, 15にそれぞれ示す。ここで、 θ_{cygnus} は WIMP の風の方向と原子核反跳の測定された方向の角度である。暗黒物質の観測において、白鳥座からの強い信号を期待する。観測された方向分布は粗いが東方的で、 $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|=0$ と 1 のあたりにいくつか超過 (excess) してる。この結果は特別な分布が非対称な検出器成分によって生成されたバックグラウンドの支配のせい(attribute)かもしれない。方向情報からのバックグラウンド源の精密な識別を実施して、ほかの場所で報告する予定だ(中村がプレゼントする)。この論文では前の仕事で実施した従来の方向感度解析を採用する。

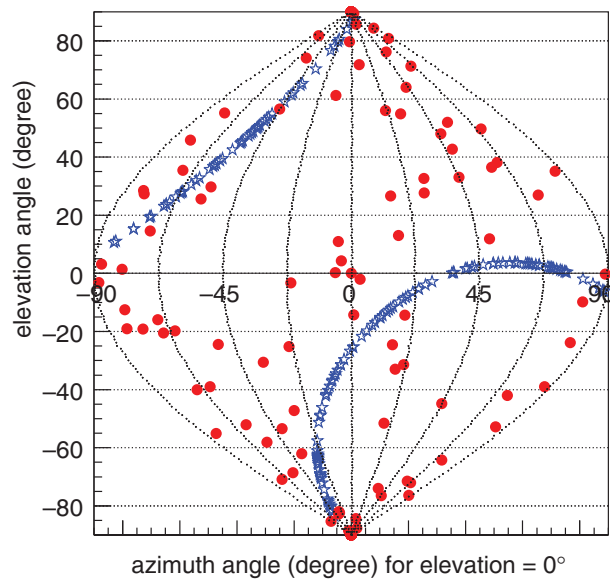


図14. 正弦射影(sinusoidal projection)によって描かれた $50\text{--}400 \text{ keV}$ エネルギー領域における RUN14 で観測された原子核軌道方向(赤)。青点はそれぞれの事象に対応する白鳥座方向。この解析は head-tail 認証を使用しないため、方位角の領域は $\pm 90^\circ$ 以上である。

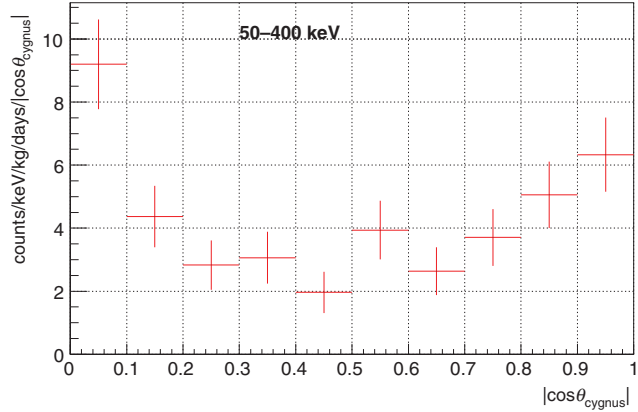


図 15. 50-400 keV エネルギー領域における RUN14 の観測された $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|$ 分布

4. Result

方向感度法によって SD 断面積 $\sigma_{\chi-p}^{SD}$ を求めた (derive)、ここで測定した $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|$ 分布は計算した期待されたスペクトラムと比較した。この計算に伴った天文学パラメータ、原子核パラメータ、検出器応答は表 3 にまとめた。解析のために使用したエネルギー領域が低い時、原子核クエンチングの効果の計算 (account) が必要だ。エネルギーは図 16 に示すように SRIM^[11] によってシミュレートした 0.1 気圧の CF4 ガスのイオンクエンチング効率を使用して補正した。イオンクエンチング係数は MIMAC グループによって測定されて、SRIM の値より大きい。この解析で控えめな (conservative) 制限を得るために SRIM の計算結果を採用した。制限を得るために、予想された $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|$ 分布と測定されたものは全ての測定した事象が暗黒物質事象と仮定して比較した。低統計のため、10 keV ビンごとの 50-400 keV 領域におけるの予想された $|\cos\theta_{\text{cygnus}}|$ 分布と測定されたものがリビンされ、それぞれ他と比較された。工程の詳細は文献^[5] に与える。

Table 3. Astrophysical parameters, nuclear parameters, and detector responses used to derive the WIMP-proton limits.

WIMP velocity distribution	Maxwellian
Maxwellian velocity dispersion	$v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$
Escape velocity	$v_{\text{esc}} = 650 \text{ km s}^{-1}$
Local halo density	$\rho_{\text{DM}} = 0.3 \text{ GeV}/c^2 \text{ cm}^{-3}$
Spin factor of ^{19}F	$\lambda^2 J(J+1) = 0.647$
Energy resolution at 50 keV	7.8 keV
Angular resolution at 50–100 keV	40°

図 17 は WIMP 質量 M_χ の関数として SD 断面積 $\sigma_{\chi-p}^{SD}$ の制限をプロットした。曲線の上の憑依きは 90% 信頼区間で除外される。赤実線はこの提供する仕事の結果をプロットしている。我々の現在の測定も文献における従来の手法によって解析された (スペクトラムも同じ)。2つの方法は同じ小さい統計での計算 (account) 結果が与えられた。大きい系統誤差はエネルギー・スペクトラムの不確かさだ。セクション 2.2 の記述として、エネルギー分解能は $\sigma_{\text{uni}}=20\% \pm 5\%$ と $\sigma_{\text{noise}}=2 \text{ keV}$ と決定されている。控えめな (conservative) 制限を確保するために解析では $\sigma_{\text{uni}}=15\%$ を仮定した (50 keV で 7.8 keV の合計エネルギー分解能を与えている)。図 18 は計算した $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 値を示す。WIMP モデル (赤)、ふらっとバックグラウンドモデル (黒)。バックグラウンド研究は $\cos\theta$ の詳細な議論が要求されるので、この論文でこのデータは等方的なバックグラウンドと比較される。70 GeV よりも小さい最小の χ^2 値を示す。質量領域 100-1000 GeV の領域のためとして、90% 信頼区間の上限を 2.7 を超える χ^2 までの断面積を増やすことによ

って推定した。200 GeV の WIMP 質量における 557 pb の上限の SD WIMP-陽子弾性散乱の 90%信頼区

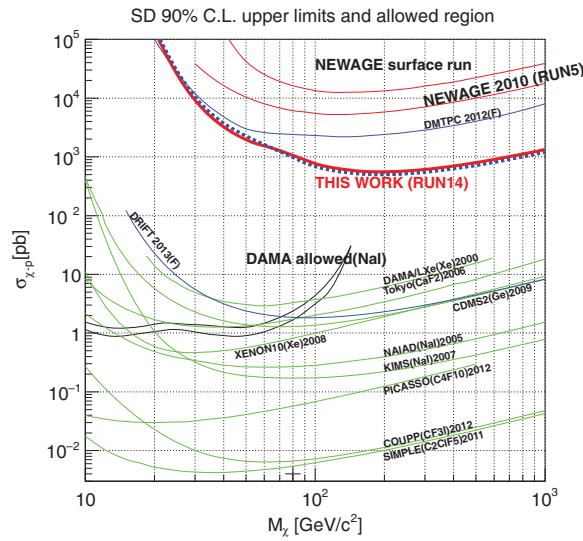


図 17. WIMP 質量 M_χ の関数としてのスピン依存断面積 $\sigma_{\chi-p}^{SD}$ の限界。この細い赤実線が提供する方向による方法の結果をプロットする。従来の方法の結果(細いドット青線)は咲こうとしてプロットされる。NEWAGE 地表 RUN と NEWAGE2010 (RUN5)と書かれたラベルされた赤の細い線はそれぞれ地表と神岡で測定した以前の結果である^[10]。許容(allow)の領域(DAMA^[13])と他の実験の上限を比較のため示す。緑実線と青線は従来解析の液体または個体によって課した方向感度のない限界である (DAMA/LXe^[14], NAIAD^[15], KIMS^[16], Tokyo(CaF2)^[17], XENON10^[18], CDMS2(Ge)^[19], PICASSO^[20], COUPP^[21], SIMPLE^[22])。そして、ガス検出器によってセットされた制限(DM-TPC^[23], DRIFT^[24])である。

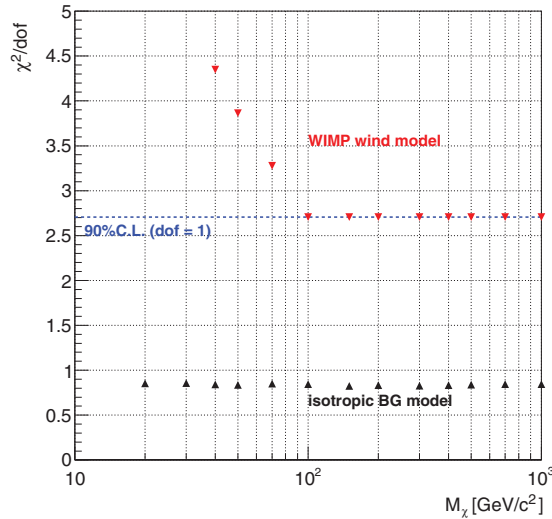


図 18. 測定した $|\cos \theta_{\text{cygnus}}|$ とモデルのこれらの比較における χ^2 値。赤点は WIMP の風モデルの χ^2 値。クロテンは等方的なバックグラウンドモデルの最小の χ^2 値である。(何を言いたいかというと、DM を仮定すると χ^2 が悪く、BG を仮定すると χ^2 がいいから今回の結果は BG がよく一致する)

間を得た。この結果は方向感度の手法での SD WIMP 探索の新しいベストな感度記録を残したが(mark)、他の手法での SD WIMP 探索の先駆者のこれよりもまだ感度は悪い。

RUN14 のバックグラウンド放射の支配は μ -PIC の U/Th 系列からの α 線として認識している。この問題は他で詳細に議論する予定だ(中村プレゼン)。低バックグラウンド放射の新しい μ -PIC の開発と次の数年以内に DAMA 領域の最初の調査の計画を始めた。

5. Conclusion

NEWAGE-0.3b'は神岡地下施設で 2013 年 7 月 17 日から 11 月 12 日まで着手されていた暗黒物質の直接探索に採用された(employ)。露出は $0.327 \text{ kg} \cdot \text{days}$ と評価され、90% C.L.の方好感度スピン依存断面積の限界は $200 \text{ GeV}/c^2$ の WIMP 質量で 557 pb が新たに得られた。前の我々の測定と比べて、SD 断面積の限界はファクター10に改善された。今日、これは我々のグループによって得られた方向感度限界のベストである。

Reference

- [1] P. A. R. Ade et al., *Astron. Astrophys.* 571, A16 (2014).
- [2] G. Jungman et al., *Pys. Rep.* 267, 195 (1996).
- [3] J. D. Lewin and P. F. Smith, *Astropart. Phys.* 6, 87 (1996).
- [4] D. N. Spergel, *Phys. Rev. D* 37, 1353 (1988).
- [5] K. Miuchi et al., *Phys. Lett. B* 686, 11 (2010).
- [6] A. Takada et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. A* 573, 195 (2007).
- [7] F. Sauli and A. Sharma, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 49, 341 (1999).
- [8] H. Kubo et al., *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* 1, 371 (2005).
- [9] K. Nakamura et al., *JINST* 7, C02023 (2011).
- [10] H. Nishimura, PhD thesis, Kyoto University (2009).
- [11] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Matter*, (Pergamon Press, Oxford, 1985).
- [12] MIMAC, EAS publication series, *Proc. CYGNUS 2011, Third Inter. Conf. on Directional Detection of Dark Matter*, 53, 25 (2012).
- [13] C. Savage et al., *Phys. Rev. D* 70, 123513 (2004).
- [14] R. Bernabei et al., *New J. Phys.* 2, 15.1 (2000).
- [15] G. J. Alner et al., *Phys. Lett. B* 616, 17 (2005).
- [16] H. S. Lee, et al. (KIMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 99, 091301 (2007).
- [17] Y. Shimizu et al., *Phys. Lett. B* 633, 195 (2006).
- [18] J. Angle, et al. (XENON Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 101, 091301 (2008).
- [19] Z. Ahmed et al. (CDMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 102, 011301 (2009).
- [20] S. Archambault et al., *Phys. Lett. B* 711, 153 (2012).
- [21] E. Behnke et al., *Phys. Rev. D* 86, 052001 (2012).
- [22] M. Felizardo et al., [arXiv:1106.3014v3].
- [23] S. Ahlen et al., *Phys. Lett. B* 695, 124 (2011).
- [24] E. Daw et al., *Astropart. Phys.* 35, 397 (2012).