



Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



First underground results with NEWAGE-0.3a direction-sensitive dark matter detector

Kentaro Miuchi^{a,*}, Hironobu Nishimura^a, Kaori Hattori^a, Naoki Higashi^a, Chihiro Ida^a, Satoshi Iwaki^a, Shigeto Kabuki^a, Hidetoshi Kubo^a, Shunsuke Kurosawa^a, Kiseki Nakamura^a, Joseph Parker^a, Tatsuya Sawano^a, Michiaki Takahashi^a, Toru Tanimori^a, Kojiro Taniue^a, Kazuki Ueno^a, Hiroyuki Sekiya^b, Atsushi Takeda^b, Ken'ichi Tsuchiya^c, Atsushi Takada^d

^a Cosmic-Ray Group, Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

^b Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo Higashi-Mozumi, Kamioka cho, Hida 506-1205, Japan

^c National Research Institute of Police Science 6-3-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-0882, Japan

^d Scientific Balloon Laboratory, ISAS, JAXA Yoshinodai 3-1-1, Sagamihara, Kanagawa, 229-8510, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2009

Received in revised form 8 February 2010

Accepted 8 February 2010

Available online 12 February 2010

Editor: H. Weerts

Keywords:

Time projection chamber

Micro pattern detector

Dark matter

WIMP

Direction-sensitive

ABSTRACT

A direction-sensitive dark matter search experiment at Kamioka underground laboratory with the NEWAGE-0.3a detector was performed. The NEWAGE-0.3a detector is a gaseous micro-time-projection chamber filled with CF₄ gas at 152 Torr. The fiducial volume and target mass are $20 \times 25 \times 31 \text{ cm}^3$ and 0.0115 kg, respectively. With an exposure of 0.524 kg days, improved spin-dependent weakly interacting massive particle (WIMP)-proton cross section limits by a direction-sensitive method were achieved including a new record of 5400 pb for 150 GeV/c² WIMPs. We studied the remaining background and found that ambient γ -rays contributed about one-fifth of the remaining background and radioactive contaminants inside the gas chamber contributed the rest.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

First underground results with NEWAGE-0.3a direction-sensitive dark matter detector

暗黒物質直接探索検出器 NEWAGE-0.3a での地下の最初の結果

Abstract: 概要

神岡地下実験室で NEWAGE-0.3a 検出器を用いた暗黒物質直接探索実験が行われた。NEWAGE-0.3a は 152 Torr^{*)} の CF₄ ガスのマイクロ時間プロジェクション・チェンバーである。基準となる体積と標的の質量はそれぞれ $20 \times 25 \times 31 \text{ cm}^3$ と 0.0115 kg である。0.524 kg days の露出で、方向に感度をもつ方法によって改善されたスピンの依存している弱い相互作用する質量をもつ粒子(WIMP)と陽子の断面積の限界は 150 GeV/c² の WIMP において 5400 pb の新しい記録を達成した。我々は残された背景雑音を研究し、そして取り巻く γ 線が残された背景雑音の 1/5 を分布していることとガスチェンバーの中の放射能汚染が分布していたことがわかった。

^{*)} 1 Torr = 133 Pa = 1/760 気圧

1. Introduction: 導入

1980 年代から継続して暗黒物質の探索への興味は増大している。ウィルキンソンによるマイクロ波の非等方性探索の全天観測(Wilkinson Anisotropy Probe All-sky)^[1]、スローンによるデジタル・スカイ・サーベイの巨大なスケール測定^[2,3]、そして2つの他の実験(Supernova Cosmology Project^[4]と High-Z Supernova Search^[5])からの超新星データがより精密な天文学的パラメータ決定と一緒に生成した後で、この問題の注目は最近増大している。弱い相互作用している質量を持つ粒子(WIMP)は暗黒物質の強い候補の一つである。WIMP は3つの方法で主に探索されている：加速器での衝突実験^[6]、間接的な(indirect) (宇宙物理)実験^[7,8]、そして実験室での直接探索。LHC 実験は超対称性(SUSY)粒子の性質の厳重な(stringent)限界の設定と発見のために期待されている。この粒子は WIMP の良い候補である。間接実験は WIMP の本質(nature)へのいくつかの手がかりを検出できるかもしれない。これらの実験が質量と断面積についての情

報を与えてくれる間、我々はさらに(still)これらの粒子が宇宙での暗黒物質であることを証明するために直接探索する必要がある。

WIMP 直接実験の多くは締めくくって^[9-12]、現在稼働して^[13-16]、または計画中である。液体希ガス検出器^[10]と低温検出器^[13]での実験は次の十年(decade)で標準模型の最小の超対称的な拡張(Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model: MSSM)理論による予言領域を調査するために(explore)1 kg 以上のスケールアップを予定している。これらの巨大な検出器は WIMP-原子核の散乱を通して原子核の変換されたエネルギーのみを測定する。つまり WIMP のほとんどははっきりとした(distinct)信号はエネルギー・スペクトラムの季節変動(annual modulation)。季節変動の信号の振幅はとても小さいので (WIMP と原子核の散乱の全事象の数%)、DAMA/LIBRA グループによって報告された 11 周期の季節変動の観測結果^[9, 14]は今までここだけが陽性(possible signature)を報告した。他のグループが DAMA/LIBRE の結果を確認するために様々な検出器のタイプで挑戦したが、季節変動の信号を観測したグループはまだない。多くのグループが原子核模型に依存しない暗黒物質の研究のための巨大な検出器を準備した。さらに、季節変動よりも他の検出方法も天文学模型に依存しない研究が必要だ。

他の WIMP のはっきりとした痕跡(signature)は銀河ハローに関して(with respect to)太陽系の相対移動からの結果を通してである。WIMP が等方的に移動すると仮定したら、太陽系移動の方向からピーク WIMP 流量が来るはず。白鳥座(constellation Cygnus)の方へ向かって起こる。反跳頻度は逆サイド方向でピークとなるだろうし、この分布は明確な信号になるだろう。いくつかの実験と理論はこの非等方性(または WIMP の風)の検出可能性の上で稼働して、今のところ実施されている^[18-25]。これらの提案された方法の中で、ガス検出器は WIMP の風を検出するのに最もふさわしいものの一つだ。なぜなら、原子核反跳の軌跡が他の検出器による角度分解能よりも原理的によく検出できるため^[26-28]。DRIFT グループは MWPC(Multi-wire proportional Chamber)で 10 年以上 WIMP の風を検出するためのガス検出器研究を開拓してきた^[29, 30]。我々は新しいプロジェクトを提案した。New generation WIMP-search with Advanced Gaseous tracking device Experiment (NEWAGE)^[23]。これは検出器のセンサーピッチと 3 次元軌道構造において DRIFT 検出器よりも有利である (advantage をもつ)。試作機の構造と最初の表面?実験室での暗黒物質探索実験の後、試作機を地下実験室に投入し、そして精密なこの性能について研究した^[31, 32]。この論文では方向に感度を持った暗黒物質探索研究の最初の地下での結果を報告する。

2. Detector

この実験のために我々は NEWAGE-0.3a 検出器を使用した、最初の試作機で、(0.3 m)³ クラスのガス型 TPC (time projection chamber)。検出器システムと性能研究を前の仕事で記述した^[32]。そう、この章では暗黒物質探索研究にぴったり(closely)関連した本質的な性質を簡単に(briefly)まとめる。

2.1. System

図 1 に NEWAGE-0.3a 検出器の概略図を示す。NEWAGE-0.3a 検出器は TOSHIBA/DNP SN060222-3 の 30.7 cm x 30.7 cm μ -PIC によって読み出される 3 次元軌跡ガス検出器である。 μ -PIC は 2 次元の画像デバイスであり、それは直行に形成された(orthogonally-formed)400 ミクロン・ピッチの読み出しストリップを持つ^[33]。フッ素樹脂プラスチック(fluoroplastic)の回路ボード上の電場形状パターンがガス電気増幅(GEM)上の検出体積を形成する^[34]。増幅面積 23 cm x 28 cm の GEM を中間増幅(intermediate amplifier)として使用した。20 x 28 x 31 cm³の基準体積(fiducial volume)は検出体積 20 x 28 x 31 cm³で定義された。チェンバー・ガスの多くの潜在的な候補の中で、スピン依存した WIMP の検出器に有利な CF₄ を使用した。CF₄ は拡散(diffusion)係数が小さいので良い TPC ガスとしても知られている。これは角度分解能の良い検出器のために絶対必要な(indispensable)性質である。ステンレスのベッセル^{**}に CF₄ ガスを 152 Torr で封入した。有効体積の標的質量は 0.0115 kg。SORB-AC カートリッジポンプ(cartridge pump)(SAEG Getter MK5)は検出器構造からガスが出て行くの吸着のためベッセルに取り付けた。典型的な操作パラメータ: 結合された 2400 (μ -PIC x GEMr = 300 x 8)のガス増幅で安定した操作を実行のために活用、は図 1 に示す。

** ベッセルとは、高圧で液体を貯蔵できる耐圧容器のこと。

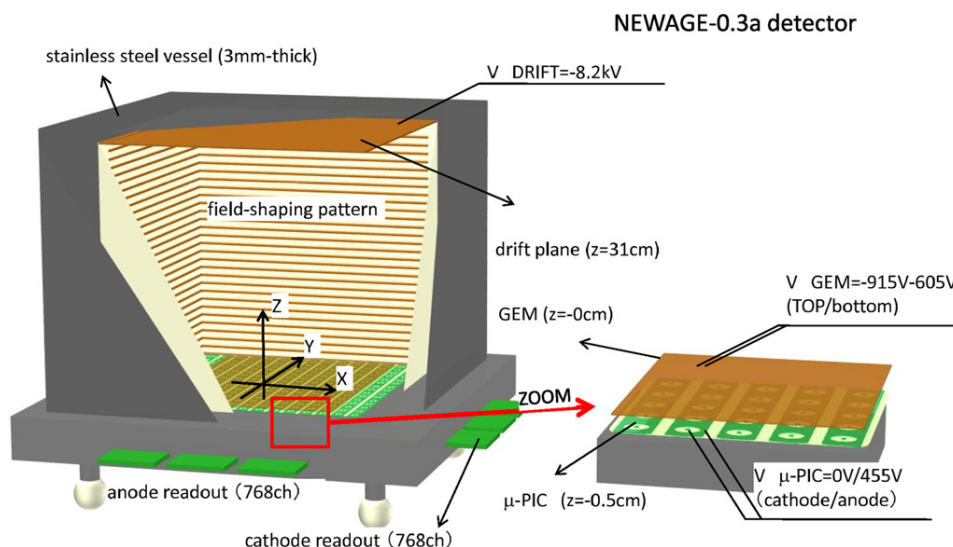


図 1. NEWAGE-0.3a の概略図。ドリフト面と GEM の間の体積が検出体積で、これは 152 Torr の CF₄ ガスが充填されている。

2.2. Performance

地下実験室で検出器の性能を研究した。測定はトリガーとデータ収集システムに関して(in term to)暗黒物質と同じ方法(manner)で実行した。事象データの一つの設定は軌道の形情報(デジタルヒット点)とエネルギー情報(アナログ波形の合計)で構成されている。¹⁰B(n, α)⁷Li 反応(Q=2.310 or 2.792 MeV)で生成される α 線を用いてエネルギーを較正した。薄さ 0.6 ミクロンの 10B 層でコーティングされたガラス板をガス中に設置して、熱中性子を検出器に照射した。ラドン孫核の崩壊からの α 線(5.6, 6.1, 7.2 MeV)も使用した。つまり、この実験では、 α 線と同等のエネルギー単位(keV α .e.)を使用した。(イオン化効率、フッ素とヘリウム原子核のクエンチング係数を WIMP の予想されるスペクトラムを計算するための解析において勘定した。) α 線の軌跡長とエネルギーの相関関係(correlation)によって暗黒物質のエネルギー領域における線形元帥を確認した。

我々はデータへの次に示す 4 つのイベント選択の基準(criteria)を用いた。これらの基準は暗黒物質 RUN からのデータと同様に適用される。

- N_{hit} 選択: 最低でも 3 点ある事象を選択した、この基準は確かな(cirtain)角度分解能を持つ軌道方向を決定するために必要である。
- 基準体積(Fiducial-volume)の選択: ヒット点が全て基準体積の中にある事象を選択した。これは検出器のフッ素化プラスチック壁からの原子核軌道の背景雑音事象を除去した。
- エネルギー選択: 100-400 keV α .e.^{†)} のエネルギーを持つ事象を選択した。確実な角度分解能を担保するために(maintain)低いエネルギー閾値が選択され、これは原子核反跳の長さによって限定される(restrict)。高い方は予想される逃す速度で WIMP の最高の反跳エネルギーで設定される。次の議論で DM のエネルギーとしてのこれに(逃す速度)について触れる(refer)。
- 原子核反跳の選択: 軌道長が 1 cm よりも短い事象を選択した。この長さの制限は背景雑音の γ 線事象を除去する。

^{†)}100 keV α .e. は 149 keV のフッ素原子核反跳に相当する。

次のパラグラフに検出器性能測定の方法と結果を批評する。詳細はこの文献^[32]で見ることができる。

- エネルギー分解能: エネルギー分解能は 3 つの成分で決定された: 電子雑音の項(σ_{noise})、増幅率の非一様性($\sigma_{\text{non-uni}}$)、そして最初の電子-イオン対の項の統計(誤差) (σ_{sta})。 σ_{noise} は 55%と測定された。 $\sigma_{\text{non-uni}}$ は 6 MeV α .e. ピークの高エネルギーから 45%とよく知られている。 σ_{sta} は 6%と計算された。つまり、3 つの項の 2 乗和の平方根がエネルギー分解能で、100 keV α .e. で 70%(FWHM)を与える。
- γ 線検出効率: ¹³⁷Cs 線源から γ 線を NEWAGE-0.3a に照射した。シミュレートされた頻度の事象

選択を通過した電子軌道の検出頻度を比較した。そして、その結果、検出効率は $100 \text{ keV } \alpha .e.$ で 8.1×10^{-6} であるとわかった。つまり、 γ 線除去力は $100 \text{ keV } \alpha .e.$ で 99.9992% である。エネルギー依存性は前の仕事^[32]に示す。

- 原子核軌道の絶対かんど： ^{252}Cf 線源からの中性子を NEWAGE-0.3a に照射した。通過した事象選択の原子核軌道の検出頻度をシミュレーションの頻度と比較した。原子核軌道の検出効率は $100 \text{ keV } \alpha .e.$ において 80% であるとわかった。エネルギー依存性は前の仕事^[32]に示す。エネルギー依存性の測定は暗黒物質 RUN データの解析での勘定(account)をとる。
- 方向依存した原子核軌道の検出効率： ^{252}Cf 線源からの中性子を NEWAGE-0.3a に照射した。6つの位置に線源おくことによって等方散乱を作り、方向依存した原子核軌道の検出効率を測定した。
- 原子核軌道の角度分解能： ^{252}Cf 線源からの中性子を NEWAGE-0.3a に照射した。原反跳した子核軌道の $\cos \theta$ 分布を様々な角度分解能によって不明瞭にした(smear)シミュレーションでフィットした。 θ は入射中性子の方向と検出した原子核軌道の方向の角度である。 $100 \text{ keV } \alpha .e.$ の原子核軌道において 55° (RMS)の角度分解能を得た。

性能測定した典型的な結果は表 1 にリストした。

Table 1
Performance of NEWAGE-0.3a detector at energy threshold ($100 \text{ keV } \alpha .e.$)
[32].

Parameter	Value
Energy resolution	70% (FWHM)
γ -ray detection efficiency	8.1×10^{-6}
Nuclear track detection efficiency	80%
Nuclear track angular resolution	55° (RMS)

3. Measurement

2008 年 9 月 11 日から 2008 年 12 月 4 日まで水換算で 2700m 地下に位置する神岡観測所(北緯 36.25, 東経 137.18) の実験室 B で NEWAGE-0.3a を置いて最初の地下暗黒物質 run をとった。検出器は μ -PIC 面は水平に、X 軸は $S87^\circ E$ の方向に整列された(aligned)。地下実験場の高速中性子流量は表面実験場(地上)よりも 3 桁以上まで小さいので、この最初の地下 RUN の背景雑音は内部背景雑音が支配的になる。したがっていくつかの遮蔽材を設置しなかった。暗黒物質 RUN(N03aKa-Run5)は 3つの sub-run を持つ。これを表 2 にリストした。それぞれの sub-run の最初にはベッセル内の CF_4 ガスを排泄と再封入をした。

Table 2
Summary of NEWAGE-0.3a first underground dark matter run (N03aKa-Run5).

Sub-runs	Date	Live time [days]	Exposure [kg days]
Run5-1	Sep. 11th – Oct. 1st, 2008	17.81	0.204
Run5-2	Oct. 2nd – Nov. 11th, 2008	10.01	0.115
Run5-3	Nov. 13th – Dec. 4th, 2008	17.90	0.205
Total exposure			0.524

高エネルギー($\sim 6 \text{ MeV } \alpha .e.$)事象を使ってガスの放射性ラドン(^{220}Rn , ^{222}Rn)汚染とガス増幅率を監視した。高エネルギーのラドンピークの位置でガス増幅率は監視された。監視されたガス増幅率はエネルギー較正するために使用された。放射性ラドンの頻度は内部放射能の監視パートとして高エネルギーピークのカウント頻度によって監視された。ガス増幅率と放射性ラドン頻度は図 2, 3 にそれぞれ示される。Run5-2 のはじめてガス再配置の手順(procedure)の間に鉱山(mine)の空気に晒された真空管とターボ分子ポンプを使うことによって、意図せずに(unintentionally)放射性ラドンガスで標的ガスを汚染してたことがわかった。したがってこの期間はさらなる解析に使用しなかった(図 2 と 3 に示す)。このラドン汚染の期間を含むライブ時間と被曝は run summary(表 2)に示す。0.524 kg days の全被曝は約 3 ヶ月の測定で蓄積された。

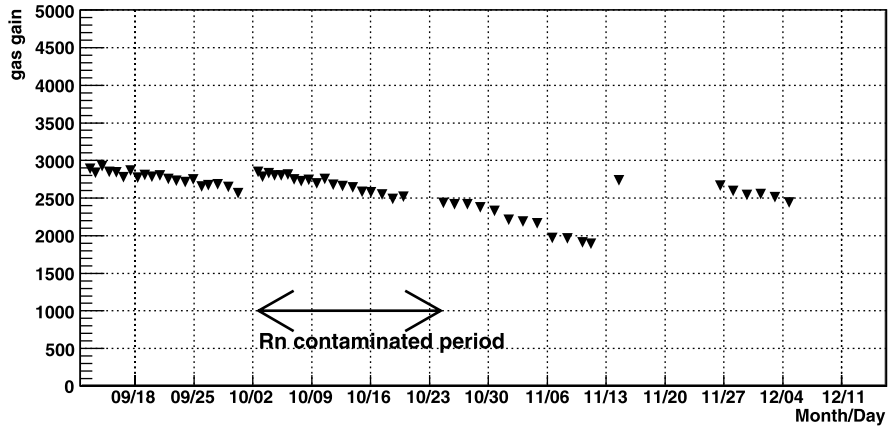


Fig. 2. Monitored gas gain during Run5.

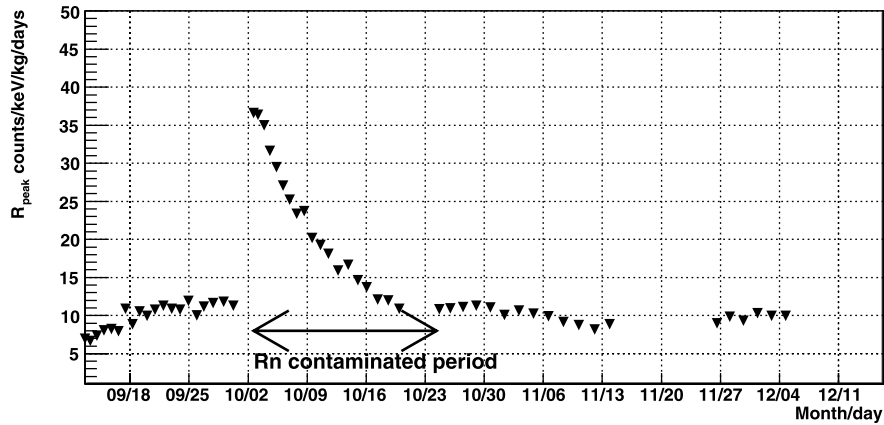


Fig. 3. Monitored radon progeny count rate during Run5.

4. Results

4.1. Measured data

セクション 2.2 で記述したデータ選択基準を暗黒物質 Run-5 の 0.524 kg days 全体に適用した。1244 の原子核軌道 (の事象) がこの選択を通過した。検出効率を用いてカウント頻度を補正した。そして図 4 に示すエネルギー・スペクトラムを取得した。エネルギー閾値 100 keV α .e.でのカウント頻度は約 50 counts/keV/kg/days である。

1244 の反跳した原子核軌道の全ての方向もプロットした (図 5A に黒いマーカーで示す)。原子核軌道の感じ (sense) は検出されなかった (軌道検出は軸よりとベクターよりではないことである) ので、スカイマップは半分の天に制限された。天の南部は北部半分に含まれた。そして WIMP 移動 (つまり、白鳥座方向からの WIMP の風) が等方であると仮定して方向に感度をもつ解析を実施した。それぞれの事象時刻で白鳥座に沿った方向も紫色のマーカーで示している。それぞれのにおける反跳方向 (黒マーカー) と対応する WIMP の風の方向 (紫マーカー) の間の角度 θ を計算し、そして図 5B に $|\cos \theta|$ 分布を示す。 $|\cos \theta|$ 分布はエネルギー領域、標的質量、ライブ時間 (計測時間) で規格化されている。これはエネルギー分解能、角度分解能、検出効率などの応答がまだ含まれている。

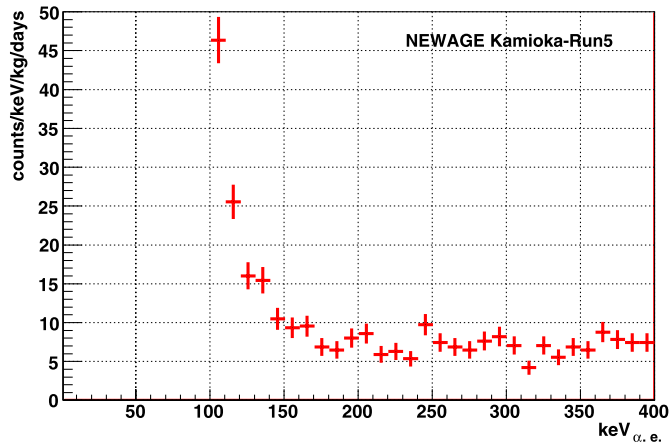


図4. 測定されたエネルギー・スペクトラム。全被曝は 0.524kg days.

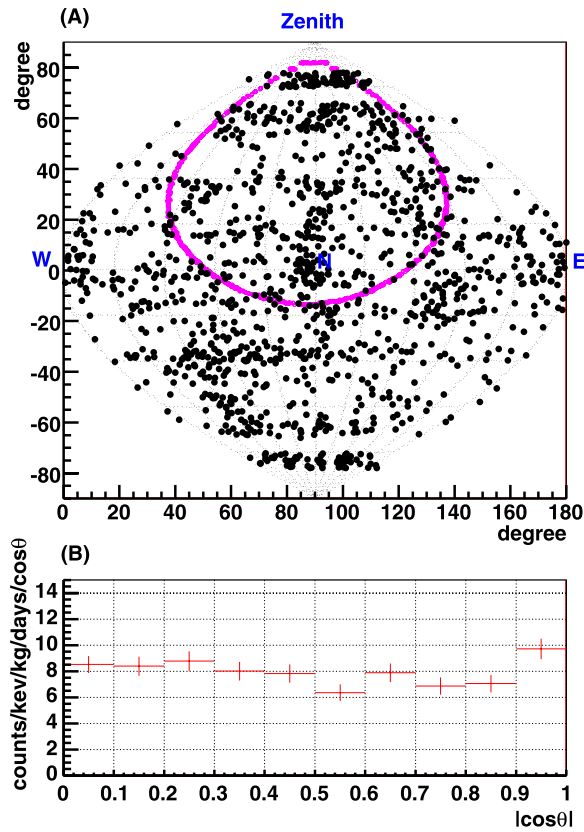


図5. 得られた原子核軌道方向(A)と $|\cos \theta|$ 分布(B)。Aの黒いマーカーは1244の原子核軌道の自称方向を示す。WIMPの風がそれぞれ時間での予想からの白鳥座に沿った方向はAの紫色のマーカーで示されている。(この図の説明文における色の参照の解釈のために、この論文のweb版へ読者は言及される。)

4.2. Direction-sensitive analysis

測定した $|\cos \theta|$ 分布を WIMP-原子核の弾性散乱から予想されるそれと比較することによって方向感度を持つ暗黒物質の制限を導いた(derive)。表3に我々が使用した宇宙物理と原子核のパラメータを与える。他の状態を除いて前の仕事で記述した同じ解析手順^[31]を使用した。与えられた WIMP 質量とエネルギー

領域で予想された $|\cos \theta|$ 分布を準備した。エネルギー分解能、角度分解能、検出効率などの検出器の応答が予想された $|\cos \theta|$ を作ると考えられる。次はこの予想された $|\cos \theta|$ 分布の準備のための手順である。

エネルギー・スペクトラム計算のために文献^[35]に従った。検出器の応答がない理想的(ideal)な $|\cos \theta|$ 分布は式(1)によって計算することができる。ここで R はカウント頻度、 θ は反跳角、 v_s は銀河に関する太陽系の速度、 v_{\min} は反跳エネルギー E_R で与えることができる WIMP の最小速度、そして v_0 はマクスウェリアン WIMP 速度分散^[36, 22]。

$$\frac{d^2R}{dE_R d\cos\theta} \propto \exp\left[-\frac{(v_s \cos\theta - v_{\min})^2}{v_0^2}\right] \quad (1)$$

Table 3
Astrophysical and nuclear parameters used to calculate the WIMP-proton cross section limits.

WIMP velocity distribution	Maxwellian
Solar velocity	$v_s = 244 \text{ km s}^{-1}$
Maxwellian velocity dispersion	$v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$
Escape velocity	$v_{\text{esc}} = 650 \text{ km s}^{-1}$
Local halo density	0.3 GeV cm^{-3}
Spin factor of ^{19}F	$\lambda^2 J(J+1) = 0.647$

予想されたエネルギー・スペクトラムと式(1)から知られた $|\cos \theta|$ 分布で、2次元の事象頻度”スペクトラム”をつくった。これは反跳角度と反跳エネルギーの関数である(図6を参照)。

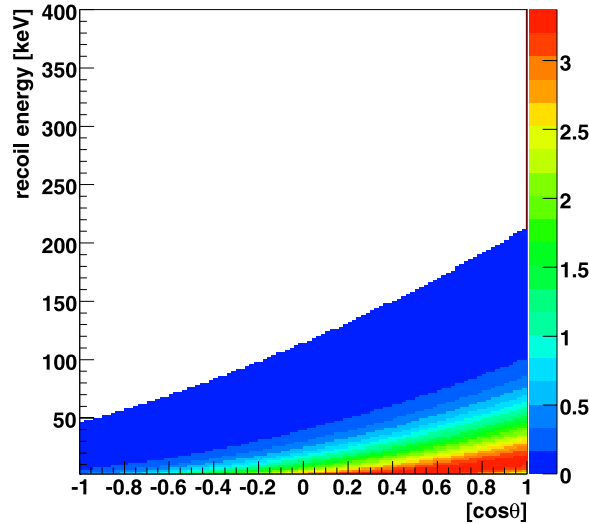


図6. 反跳角と反跳エネルギーの関数としての予想された2次元の事象頻度”スペクトラム”。標的はフッ素原子核。WIMP 質量は $100 \text{ GeV}/c^2$ と断面積 1 pb が仮定されている。 θ は WIMP の風に関する原子核反跳の反跳角。カラーは事象頻度を示し、 $[\text{counts}/\text{keV}/\text{kg}/\text{days}/\cos\theta]$ 。白のエリアは事象がゼロと予想されたパラメータ領域。(色彩は web 版でみてね)

2次元スペクトラムの水平スライスに興味のあるエネルギー領域に相当する理想的な $|\cos \theta|$ 分布である。次の順序によって検出器の応答の勘定をとった。

- ステップ1：(与えられた WIMP 質量において) 図6に示すような理想的な2次元事象頻度”スペクトラム”を作った。入力パラメータは WIMP 質量。出力は2次元事象頻度”スペクトラム”。
- ステップ2：(与えられた WIMP の風の方向において) 実際の検出器座標で WIMP と原子核の散乱をシミュレートした。ステップ1で計算した分布に従って反跳エネルギーと角度 θ_R を生成した。ここで、 α 等価エネルギーでの反跳エネルギー、考慮しているイオン化効率またはフッ素とヘリウムのクエンチング係数を SRIM コード^[37]を使用して転換した。反跳の方位角 ϕ_R はランダムに決定した。入力パラメータは WIMP 風の方向。出力パラメータは検出器での原子核軌道の方向とエネルギー。
- ステップ3：絶対検出効率と相対的な効率として検出効率を計算した。前者はエネルギーの関数、後者

は軌道方向の関数。入力パラメータは原子核軌道のエネルギーと方向（ステップ2の結果）。出力パラメータは検出効率。

- ステップ4：分解能に従って実際のエネルギーと方向で不明瞭にすることによって観測できるエネルギーと方向を計算した。入力パラメータは実際のエネルギーと原子核軌道の方向エネルギー（ステップ2の結果）。出力パラメータは観測できるエネルギーと方向。
- ステップ5：観測できる軌道方向（ステップ4の結果）と WIMP 風の方角（ステップ2の入力パラメータ）を使って $|\cos\theta|$ を計算した。計算した $|\cos\theta|$ で興味のエネルギー・ビンの $|\cos\theta|$ ヒストグラムを詰めていった。詰めるための重みとしてステップ3で計算した検出効率を使用した。
- ステップ6：観測時間の間 WIMP 風の実際の方角分布を再生成するため多くの WIMP 風方角においてステップ2-5を繰り返した。
- ステップ7：興味の WIMP 質量において1-6を繰り返した。

この方法で、WIMP-原子核弾性散乱から予想される $|\cos\theta|$ 分布を作った。

4.3. Dark matter limits

最後に方向に感度のある暗黒物質の制限をセットした。ここで、任意の背景雑音の引き算なしの暗黒物質事象としての 1244 原子核反跳事象の全てを控えめに (conservatively) 取り扱った (treat)。 $|\cos\theta|$ 分布はエネルギー依存性を持ち統計はあまり大きくないので、15 のエネルギー領域における 2 ビンの $|\cos\theta|$ 分布を作った。図7に予想された WIMP 信号のベストフィットを持つ $|\cos\theta|$ ヒストグラムの一つを示す。エネルギー領域と WIMP 質量はそれぞれ 100-120 keV α .e. と 100 eV/c²。5500 pb の断面積のベストフィットは $\chi^2/\text{dof}=3.71/1$ とこの予想された WIMP 信号を生産した、我々はこの場合 90%信頼レベル (confidence level: C.L.) で χ^2 検定によって除去した。そして $|\cos\theta|$ 分布は他の 14 エネルギー領域において予想された WIMP 信号でフィットされた。WIMP 質量 (この場合 100 GeV/c²) における制限として最小の断面積をとった。同じ方法 (manner) で 30-1000 GeV/c² の質量の WIMP の制限を計算した。WIMP 質量の全てで予想された WIMP 信号の $|\cos\theta|$ 分布は χ^2 検定で除去された

スピン依存性を持つ WIMP と陽子の断面積の得られた上限値は図8に示す。ベストの限界は 150 GeV/c² の質量を持つ WIMP において 5400 pb であった。この結果は方向感度の手法でのスピン依存性 WIMP 探索における新たな感度記録を示した。

等方的な背景雑音モデルで測定された $|\cos\theta|$ 分布をフィットもした。フィット結果は WIMP 質量依存で $\chi^2/\text{dof}=0.110/1$ を与えて、そして等方的な背景雑音モデルは 90% C.L. で除去された。

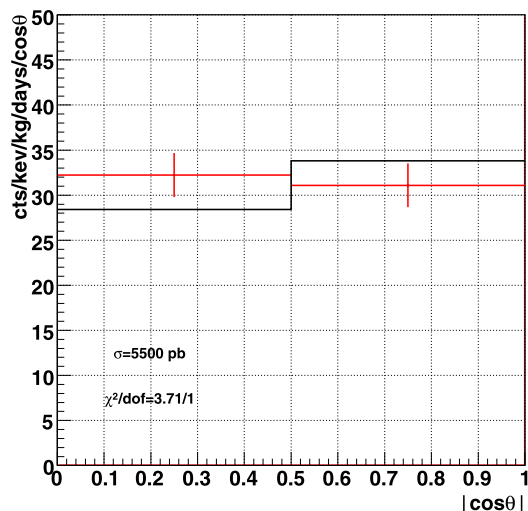


図7. 神岡 RUN-5 の測定された $|\cos\theta|$ 分布 (オンライン赤い、エラーバーを持つヒストグラム) とベストフィットで予想された $|\cos\theta|$ 分布 (オンライン黒い、エラーバーがないヒストグラム)。エネルギー領域と WIMP 質量はそれぞれ 120 keV α .e. と 100 GeV/c²。ベストフィットの 5500 pb の断面積は $\chi^2/\text{dof}=3.71/1$ を生産し、そしてこの予想された WIMP 信号は χ^2 検定によって 90%信頼区間で除去された。(図の色彩の解釈はこの論文の web 版を参考してください。)

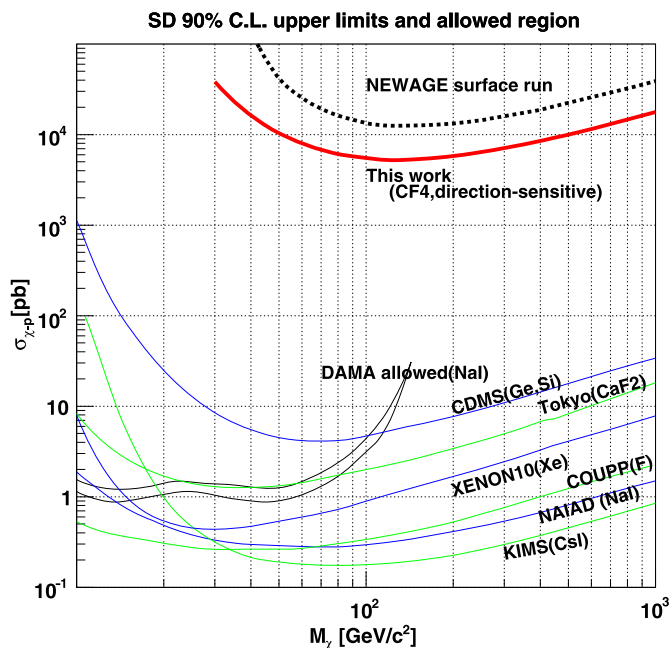


図 8. 様々な WIMP 質量パラメータスペースの WIMP-陽子のスピんに依存した断面積における上限と許された領域。厚みのある(thick)実線はこの仕事で観測した制限を示す。我々の表面 run(地上)からの制限[31]は厚みのある破線によって比較のため示す。他の方向に依存した WIMP 探索実験(DAMA(NaI)^[9], CDMS^[38], Tokyo CaF2^[12], XENON10^[39], COUPP^[16], NAIAD^[11], KIMS^[15])からの制限と許された領域を参考に示す。

5. Discussions

5.1. Background

将来の感度改善のための背景雑音の起源を研究した。100 keV α .e.のエネルギー閾値で様々な背景雑音のカウント頻度への寄与の評価を議論する。詳細は他の論文で報告する予定だ。

ベッセル外からの背景雑音の研究を開始した。高速中性子の測定された流量は $1.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[40], 100 keV α .e.での寄与は 0.2 counts/keV/kg/days 未満とシミュレートされた。 γ 線の検出効率を考慮して、我々の研究室での γ 線流量 wp 測定し、そして γ 線の寄与をシミュレートした。 γ 線の寄与は 7 ± 7 counts/keV/kg/days 未満であるとシミュレートされた。神岡観測所での宇宙線ミューオンの流量は $6 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ である^[41]。 μ -PICの検出体積を通過するミューオンの頻度は 2×10^{-4} counts/s 未満とシミュレートされた。ミューオンの除去能力の上限として電子の除去能力(8×10^{-6})を仮定した。そしてミューオン軌道の原子核軌道としての誤認識は 100 keV α .e.いじよで 0.2 counts/kg/days 未満にするべきである。宇宙線ミューオンによって生成された2次粒子は前の議論で包囲された γ 線と中性子として研究された。

次に、ベッセルに含まれる背景雑音の源を研究した。 ^{238}U と ^{232}Th 連鎖における放射性同位体は多くの希事象測定における主な背景雑音である。最初に豊富な(rich)ラドンのRUNによってラドン気体(^{222}Rn と ^{226}Rn ,とそれら孫)の寄与を研究した。(run5-2のはじめで意図せずしたものと同一方法で、ラドン気体で意図的に検出器を汚染させた。)ラドン気体は100 keV α .e.で約5 counts/keV/kg/daysを勘定したことがわかった。そして、検出体積に被爆した材質から放射された α 線の寄与を調べた。材質表面からの α 線は検出体積で全エネルギーの一部を落とし、そしてDMエネルギー領域に背景雑音事象を作る。表面 α 事象のエネルギー損失をシミュレートして、そして測定された1 MeV α .e.周りのカウント頻度によってこれらの寄与の上限を知ることができるとわかった。つまり、これらの表面 α 事象(μ -PICとGEMの間の薄い体積(5 mm)の粒子のエネルギー損失の他:gap事象、図1をみよ)は無視できる寄与になる。gap事象は潜在的に残っている背景雑音を説明できることがわかった。GEMと μ -PICの相対的なガス増幅は100 keV, α .e.周りのカウント頻度へのgap事象の寄与を与える:言い換えると、つまり、(namely)高いGEM

増幅率は低いカウント頻度を生成し、(反対に)低い GEM 増幅率は高いカウント頻度を生成する (and vice versa: 反対のことを後で言う略)。高い GEM 増幅率の操作は GEM への致命的なダメージを与えるリスクが高いので、この可能性の試験に低い GEM 増幅率 RUN を実施した。実際にカウント頻度は低い GEM 増幅率 RUN で増加した。

表 4 に背景雑音研究の結果をまとめる。この結果は gap 事象と包囲された γ 線事象を持つ背景雑音を潜在的に説明することができることを示す。感度向上のために背景雑音の 2 つの主な源を抑制するために努める (make effort)。

Table 4
Results of background studies. The rates at the energy threshold are shown in the unit of [counts/kg/days/keV].

Source	Rate
Ambient gammas	~ 10
Ambient fast neutrons	$\sim 10^{-1}$
Cosmic muons	$< 2 \times 10^{-1}$
Internal α (fiducial volume)	$< 10^{-1}$
Internal α (gap volume)	< 40
Internal β	< 5
Measured (Run5)	50

表 4
背景雑音研究の結果。エネルギー閾値でのカウント頻度は counts/kg/days/keV の単位で示される

源	頻度
包囲されたガンマ線	~ 10
包囲された高速中性子	$\sim 10^{-1}$
宇宙線 ミューオン	$< 2 \times 10^{-1}$
内部 α 線 (基準体積)	$< 10^{-1}$
内部 α 線 (ガス体積)	< 40
内部 β 線	< 5
測定(run5)	50

6. Conclusions

神岡地下実験室で NEWAGE-0.3a 検出器を用いて方向に感度を持つ暗黒物質探索実験が実施された。測定は 0.524 kg days の全被曝を生成して 2008 年 9 月 11 日から 12 月 4 日まで行った。この実験結果として、直接探索法によって制限された改善されたスピン依存した WIMP-陽子断面積は、150 GeV/c² の WIMP の 5400 pb の新記録を含めて得られた。

Reference

- [1] J. Dunkley, et al., SDSS, *Astrophys. J.* 701 (2009) 1804.
- [2] M. Tegmark, et al., SDSS, *Astrophys. J.* 606 (2004) 702.
- [3] M. Tegmark, et al., SDSS, *Phys. Rev. D* 69 (2004) 103501.
- [4] A.G. Riess, et al., *Astron. J.* 116 (1998) 1009.
- [5] S. Perlmutter, et al., *Astrophys. J.* 517 (1999) 565.
- [6] J. Ellis, et al., *Phys. Lett. B* 603 (2004) 51.
- [7] A.A. Abdo, et al., *Phys Rev. Lett.* 102 (2009) 181101.
- [8] F. Aharonian, et al., HESS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 221102.
- [9] R. Bernabei, et al., *Phys. Lett. B* 480 (2000) 23.
- [10] J. Angle, et al., XENON Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 021303.
- [11] B. Ahmed, et al., *Astropart. Phys.* 19 (2003) 691.
- [12] Y. Shimizu, et al., *Phys. Lett. B* 633 (2006) 195.
- [13] D.S. Akerib, et al., CDMS Collaboration, *Phys. Rev. D* 72 (2005) 052009.
- [14] R. Bernabei, et al., *Eur. Phys. J. C* 56 (2008) 333.
- [15] H.S. Lee, et al., KIMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 091301.
- [16] E. Behnke, et al., *Science* 319 (2008) 933.
- [17] H.P. Nilles, *Phys. Rep.* 110 (1984) 1.
- [18] A.M. Green, B. Morgan, *Astropart. Phys.* 27 (2007) 142.
- [19] P. Belli, et al., *Nuovo Cimento C* 15 (1992) 473.
- [20] R. Bernabei, et al., *Eur. Phys. C* 28 (2003) 203.
- [21] H. Sekiya, et al., *Proceedings of Fifth International Workshop on the Identification of Dark Matter, 2004*, p. 378.
- [22] K.N. Buckland, et al., *Phys. Rev. Lett.* 73 (1994) 1067.
- [23] T. Tanimori, et al., *Phys. Lett. B* 578 (2004) 241.
- [24] D. Dujmic, et al., *Astropart. Phys.* 30 (2008) 58.

- [25] T. Naka, et al., Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A 581 (2007) 761.
- [26] J. Rich, M. Spiro, Saclay preprint DPhPE 88-04.
- [27] G. Masek, et al., Proceedings of the Workshop on Particle Astrophysics, 1989, p. 43.
- [28] G. Gerbier, et al., Proceedings of the Workshop on Particle Astrophysics, 1989, p. 43.
- [29] H. Burgos, et al., Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A 600 (2009) 417.
- [30] H. Burgos, et al., Astropart. Phys. 28 (2007) 409.
- [31] K. Miuchi, et al., Phys. Lett. B 654 (2007) 58.
- [32] H. Nishimura, et al., Astropart. Phys. 31 (2009) 185.
- [33] A. Takada, et al., Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A 573 (2007) 195.
- [34] F. Sauli, A. Sharma, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci 49 (1999) 341.
- [35] J.D. Lewin, P.F. Smith, Astropart. Phys. 6 (1996) 87.
- [36] D. Spergel, Phys. Rev. D 37 (1988) 1353.
- [37] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM The stopping and range of ions in matter, Code.
- [38] D.S. Akerib, et al., CDMS Collaboration, Phys. Rev. D 73 (2006) 011102(R).
- [39] J. Angle, et al., XENON Collaboration, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 091301.
- [40] Private communication with A. Minamino, University of Tokyo.
- [41] SK Collaboration, Nucl. Instrm. Methods Phys. Res. Sect. A 501 (2003) 418.