

NEWAGE

direction-sensitive dark matter search

中村 輝石（京都大学D2）

2012/8/1-4 第42回天文天体物理若手夏の学校

概要

銀河の運動やCMB観測から存在が予言されている暗黒物質は、いまだに直接検出された例はなく、宇宙の謎の一つである。これまでに、直接探索実験として大質量検出器を用いた観測が多く行われてきたが、暗黒物質検出の根拠となる計数率の季節変化が数%と小さいため、確度の高い別手法による実験が期待されている。NEWAGE (NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment) は、本研究室が独自に開発した画像検出器 μ -PICを応用した飛跡検出器を用いた、方向に感度を持つ暗黒物質探索実験である。

NEWAGE実験では、2012年の秋に予定している次期地下実験に向けて、バックグラウンド除去、エネルギー閾値低下の研究を行ってきた。冷却活性炭を用いたガス循環をすることにより、バックグラウンドであるラドンを1/10以下に低減した。低圧ガスを用いることにより、エネルギー閾値を従来の半分の50keVまで下げることが成功した。暗黒物質に対する予想される感度は、これらの改良により2桁の向上が見込まれる。

1. 暗黒物質

発見すればノーベル賞確実と言われていながら、いまだに未発見である「暗黒物質」は、人類が解決できていない宇宙の謎の一つである。銀河の回転曲線や、重力レンズ効果、宇宙論パラメータの測定などから、宇宙にはバリオンの約5倍の質量の暗黒物質が存在すると考えられている。

暗黒物質は標準理論の枠組みで作られる「普通の」物質ではなく、それを越えた新理論の粒子であると考えられており、暗黒物質の候補として、WIMPやアクシオン、Qボール、ステラエルニュートリノなどが挙げられる。しかし、その正体はいまだ不明であり、現在世界中で暗黒物質の発見を目指した研究が進められている。

2. 暗黒物質探索実験

暗黒物質の候補であるWIMPを直接検出するためには、WIMPと原子核の弾性散乱事象を捉え、BG事象と切り分ける必要がある。そのために、暗黒物質特有の信号が必要となる。この、暗黒物質特有の信号には二種類ある。

2. 1. 従来の手法

我々が地球上で直接検出できる暗黒物質は銀河に付随している暗黒物質である。暗黒物質は銀河系内でボルツマン分布をしていると考えられており、太陽系はその中を約200km/sの速度で白鳥座方向に向かって運動している(図1)。地球は太陽の周りを公転しているため、暗黒物質に対する相対速度は一年を通して変化する。従来の手法とは、この相対速度の変化に起因するイベントレートの季節変化を検出するというものである(図2)。予想される季節変化はわずか数%程度と少なく、統計を稼ぐために固体や液体の検出器を用いる。世界中の多くの実験はこの手法を取っており、DAMA[1]は季節変動を観測したことから暗黒物質を発見したと主張しているが、他の実験はこの季節変化を棄却する結果を得ている。

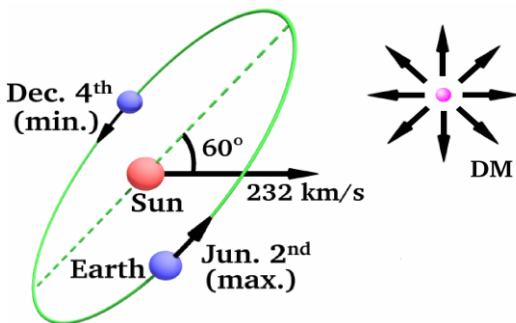


図1 暗黒物質と太陽系の運動の模式図。

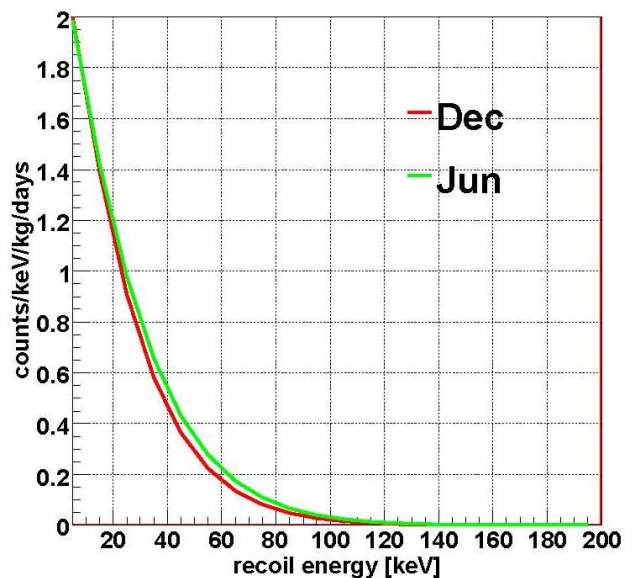


図2 暗黒物質との弾性散乱で原子核が得る予想されるエネルギースペクトル。緑は6月、赤は12月のときのものである。

2. 2. 方向に感度を持つ手法

暗黒物質の証拠として最も確度の高いものに、到来方向の異方性が挙げられる。これは、太陽系が銀河中を運動していることにより生じる「暗黒物質の風」の方向を測定することで、暗黒物質の存在を主張するものである(図3)。太陽系は白鳥座の方向に向かって運動しているため、暗黒物質は白鳥座の方向から多く飛来していると考えられる。白鳥座の方向は一日を通して変化し、また一年を通して変化するため、時刻や季節に依存した環境変化を打ち消す効果がある。シミュレーションによってWIMPに弾性散乱された原子核の散乱角の余弦分布を見ると、 $\cos\theta=1$ となる前方散乱が卓越していることが分かる(図4)。NEWAGE実験[2]ではガス検出器を用いることで原子核の飛跡を取得し、方向に感度を持つ手法で暗黒物質探索を行っている。

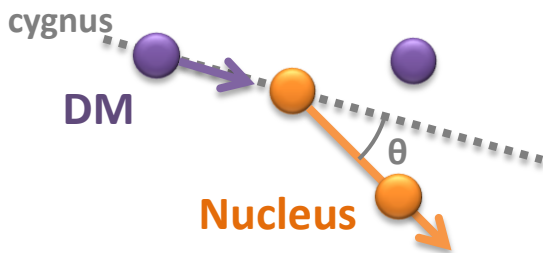


図3 暗黒物質と原子核の弾性散乱の模式図。

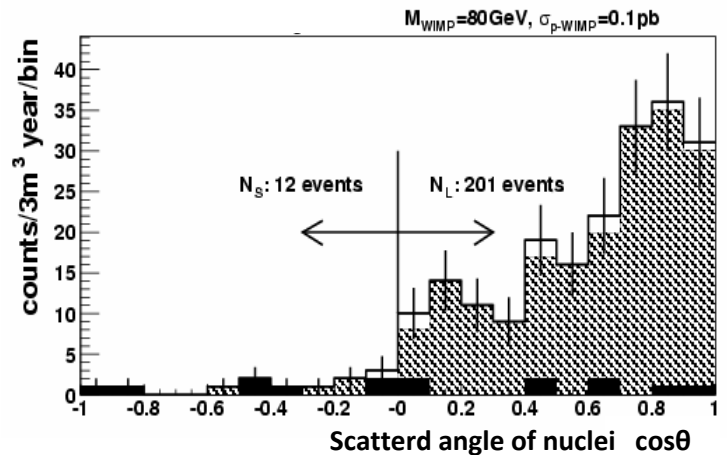


図4 暗黒物質によって弾性散乱された原子核の角度の余弦分布。

3. 検出器

NEWAGEの検出器は、二次元画像検出器「micro Pixel Chamber : μ -PIC[3]」を使った三次元飛跡検出器「micro Time Projection Chamber : μ -TPC[4]」を用いており、原子核飛跡の三次元的な情報を得ることができる(図5-7)。暗黒物質に散乱された原子核の典型的な飛跡長は1mm以下と短いですが、 μ -PICは400 μ m間隔で縦横にストリップが並んだ構造をしており、短い原子核の飛跡を捉えることができる。表1にNEWAGEの検出器の特徴をまとめる。

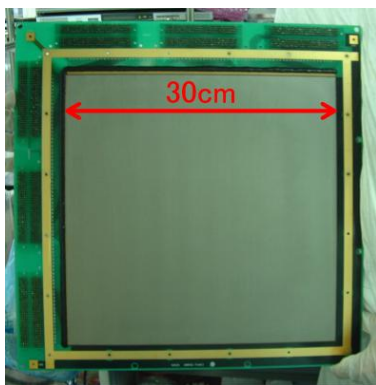


図5 μ -PICの写真。

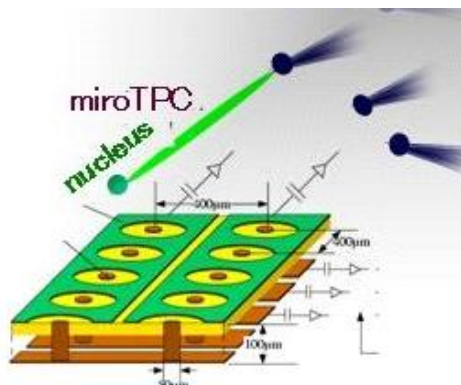


図6 μ -TPCの模式図。

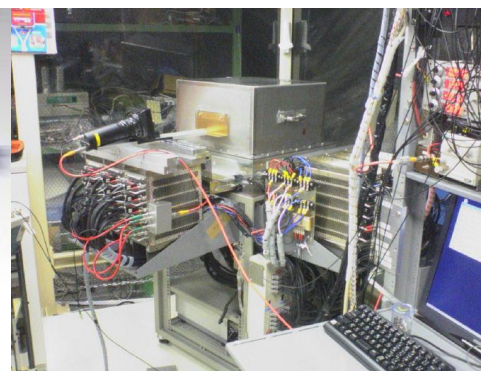


図7 μ -TPCの写真。

	Current	2012 Plan	Future Plan
Detection Volume	30 × 30 × 31 cm ³	30 × 30 × 41 cm ³	>1 m ³
Gas	CF ₄ 152 Torr	CF ₄ 76 Torr	CF ₄ 30 Torr
Energy threshold	100 keV	50 keV	35 keV
Energy resolution(@ threshold)	70%(FWHM)	70%(FWHM)	50%(FWHM)
Gamma-ray rejection(@threshold)	8 × 10 ⁻⁶	8 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁷
Angular resolution (@ threshold)	55 deg(RMS)	40 deg(RMS)	30 deg(RMS)

表1 NEWAGEの検出器の性能

4. これまでの測定結果

2010年までに行われた暗黒物質探索実験の結果、質量100GeVのWIMP、SD反応の断面積に対し、5500pbの制限を付けた(図8)[2]。このときの観測時間は0.52kg・daysであり、観測場所は地下2700m.w.e.の神岡の地下実験施設である。得られた角度分布からは暗黒物質に起因する到来方向異方性が検出されず、方向に感度を持つ手法での制限を世界で初めて付けた。

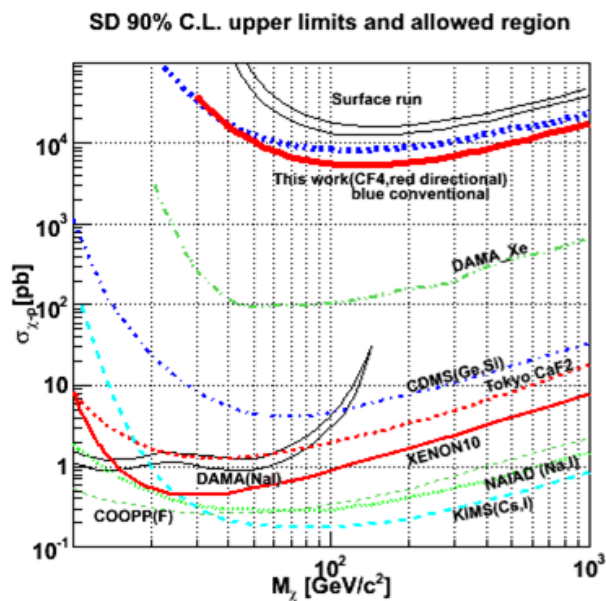


図8 SD反応の散乱断面積に対する制限曲線[2]。赤色はNEWAGEが2010年に付けた方向に感度のある手法での制限曲線である。

5. 次期地下実験のための開発

NEWAGEの次の目標はDAMAが暗黒物質の存在を主張している領域の探索である。そのためには3桁の感度向上が必要であり、我々はこれを、バックグラウンドの低減、エネルギー閾値の低下、大型化で達成する予定である。2012年の地下実験では、手始めにバックグラウンドの低減、エネルギー閾値の低下を施した測定を予定している。本章では、各開発項目と結果を報告する。

5. 1. ガス循環

壁などに用いられている金属は微量のウラン・トリウム系列の金属を含み、ラドンを発生させる。ラドンは気体であるため、検出領域に侵入してきて α 崩壊を起こし、バックグラウンドとなる。このラドンを除去するために、ガスを循環して冷却した活性炭を通過させる、ラドンを除去するシステムを作製した(図9)。このシステムを用いた結果、ラドンの量はこれまでの1/10まで低減することに成功した(図10)。

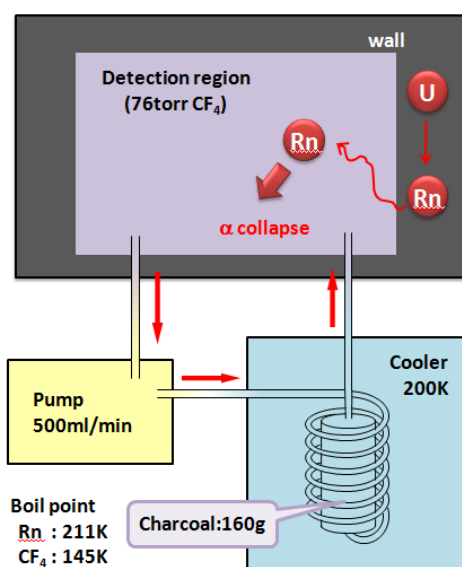


図9 ガス循環システムの模式図

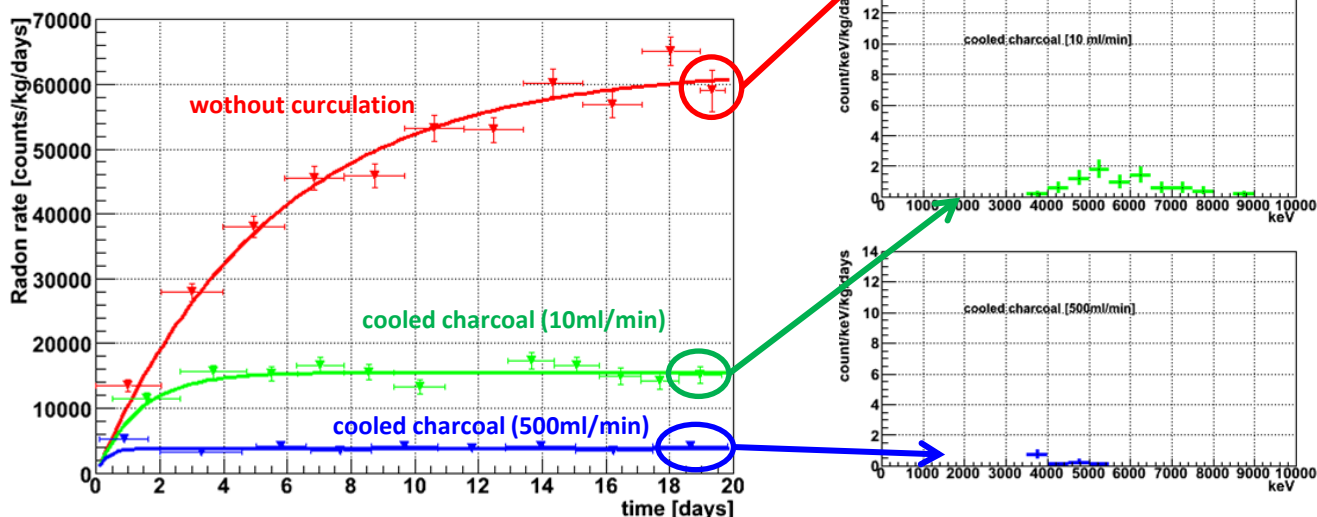


図10 左図はラドンレート(エネルギー3MeV以上、飛跡長9cm以上)の時間変化。赤線は循環なしのとき、緑線は10ml/minで循環したとき、青線は500ml/minで循環したとき。右図は20日経過したときのラドンのエネルギースペクトル。

5. 2. 低圧ガス

暗黒物質の弾性散乱による原子核の予想されるエネルギースペクトルは指数関数的に減衰する形状をしているため、エネルギー閾値を現行の100keVから50keVに下げると暗黒物質に対する感度は10倍に向上する(図11)。NEWAGEの検出器において、エネルギー閾値は飛跡長の長さによって律即されている。ガスの圧力を従来の半分にすると飛跡長が倍に伸び、エネルギー閾値を半分にすることができる。そのため、従来の0.2atmから0.1atmのガスを用いた試験を行った[5]。低圧ガスを用いることで、50-100keVのエネルギー領域においても前方散乱を確認でき、角度分解能の測定に成功した(図12)。また、原子核の検出効率は50keVで60%と、暗黒物質探索に支障のない値を得ることができた(図13)。

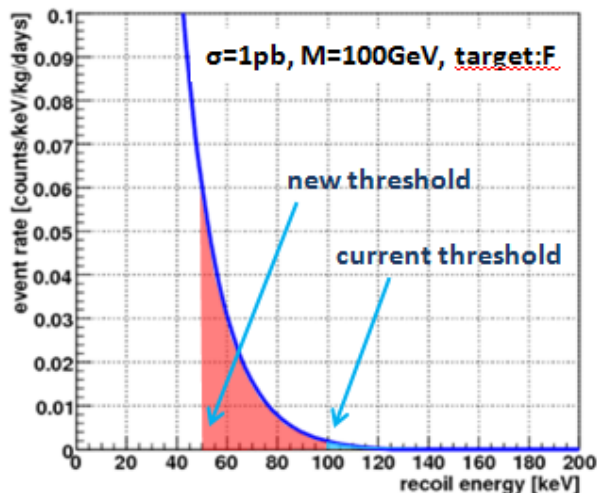


図11 暗黒物質の弾性散乱による原子核の予想されるエネルギースペクトル。エネルギー閾値を100keVから50keVに低下させると青の領域に加えて赤の領域のイベントを取得することができるため、暗黒物質の感度は約10倍に向上する。

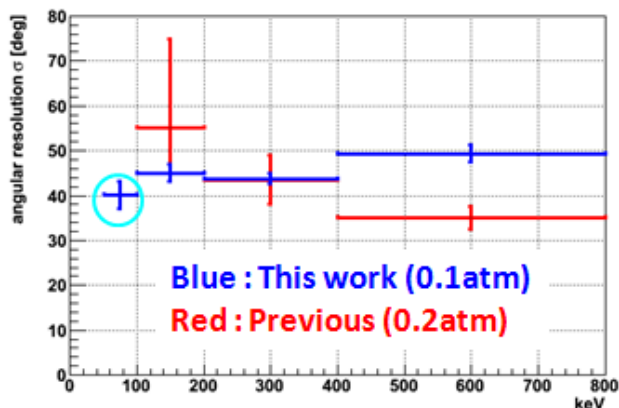


図12 エネルギーごとの角度分解能。赤点は0.2気圧のガス、青点は0.1気圧のガスを用いたときの結果である。

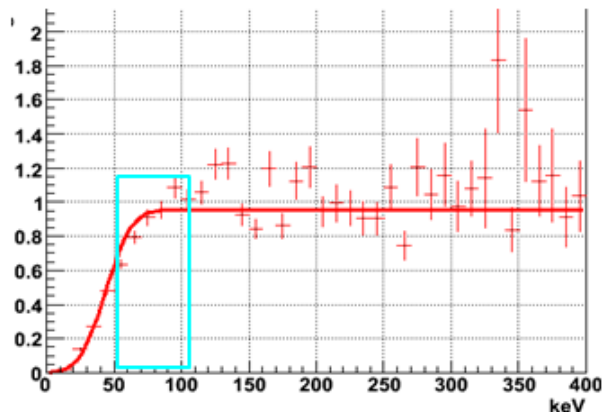


図13 エネルギーごとの検出効率。今回新しく追加する50-100keVのエネルギー領域での検出効率は60%以上である。

5. 3. 新ドリフトケージ

次期地下実験において、ドリフトケージを新たに製作予定である。これは、ドリフト長を最適化するためである。現在はドリフト長が50cmの μ -TPCを用いているが、ドリフト長が長いと統計数が稼げる反面、電子拡散によって角度分解能が悪化するという影響がある。そこで、暗黒物質検出の有意度を角度分解能ごとに計算した(図14)。また、外部トリガーで測定したデータを用いて、解析的に30cm、40cm、50cmのドリフト長のときの角度分解能を導出し、それぞれのドリフト長のときの暗黒物質の検出の有意度を求めた。データ取得プログラムの変更によって角度分解能が向上する可能性があるため、各ドリフト長に対して10度ずつ向上を見込んだ場合の計算も行った。その結果、40cmが最適と判断し、現在ドリフト長が40cmのドリフトケージを製作中である。

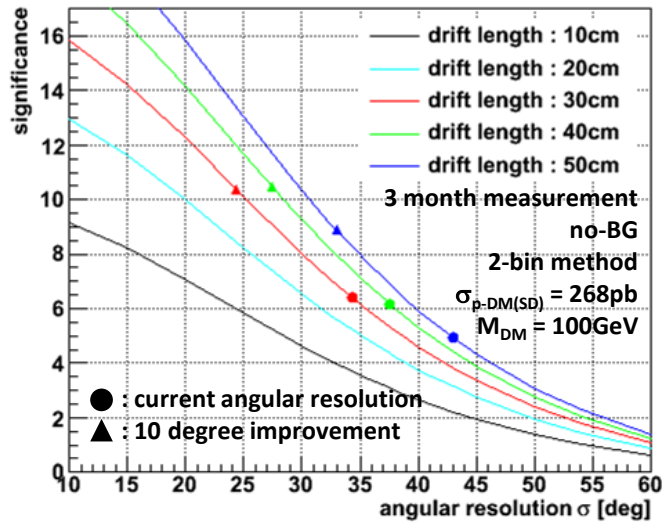


図14 ドリフト長ごとの有意度の角度分解能依存性。各色はドリフト長に対応している。図中の丸点は現在の角度分解能、三角点は10度の向上を見込んだ時の有意度である。現在の角度分解能では30cmのときに有意度が最大となるが、10度の向上を見込んだ場合、40cmのときに最大となる。

6. まとめ

次期地下実験では、従来よりも2桁よい感度で暗黒物質探索実験を行う予定である(図15)。そのため、バックグラウンドの低減、エネルギー閾値の低下という開発を行い、十分な性能を持つことを確認した。今後は、これらの改良を神岡地下に適用し、測定を行う予定である。また、さらに先の実験では検出器の大型化を行うことによってDAMAの主張する領域にせまる。

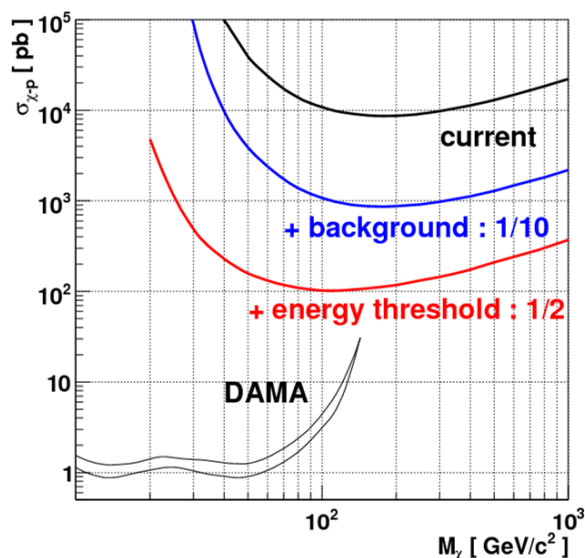


図15 予想される制限曲線。次期地下実験ではバックグラウンドの低減とエネルギー閾値の低下で2桁の感度向上を目指す。

参考文献

- [1] R. Bernabei *et al.*, Eur. Phys. J. C 56 (2008) 333
- [2] K. Miuchi *et al.*, Phys. Lett. B, 686 (2010) 11
- [3] A. Takada *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. A 573 (2007) 195
- [4] K. Miuchi *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. A 576 (2007) 43
- [5] K. Nakamura *et al.*, JINST 7 C02023 (2012)