



Radiation Detectors for Direct Dark Matter Search

Kentaro MIUCHI¹

¹*Department of Physics, Graduate School of Science, Kobe University, Rokkodai, Nada, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan*

E-mail: miuchi@phys.sci.kobe-u.ac.jp

(Received March 8, 2016)

Dark matter is believed to account for more than one fourth of the energy density of the universe. Despite many experimental efforts to investigate dark matter, no clear understanding of its nature has been achieved. Direct dark matter searches aim to detect the energy deposited by the elastic scattering between dark and ordinary matters. No "ultimate" direct dark matter detector has been developed to date, thus there is still some room for new technology in this field. In this paper, some requirements for direct dark matter detectors are reviewed.

KEYWORDS: radiation detector, dark matter...

Radiation Detectors for Direct Dark Matter Search: 直接暗黒物質探索のための放射線検出器
 Kentaro Miuchi (Kobe University): 身内賢太郎(神戸大)

Abstract: 概要

暗黒物質は宇宙のエネルギー密度の 1/4 以上を占めていると信じられている。多くの実験が暗黒物質の研究に取り組んできたにも関わらず、この自然の明確な理解が得られていない。暗黒物質の直接探索は暗黒物質と普通によく知られた物質との弾性散乱によって落とされたエネルギーを検出することが狙いだ。今日において究極の暗黒物質の検出器は開発されていない。つまりこの分野において新たな技術の余地がまだあるということだ。この論文では、いくつかの暗黒物質の直接探索のための検出器の要請を批評する。

1. Introduction: 導入

宇宙・天文学の観測は宇宙のエネルギー密度の 1/4 以上は知らない粒子（暗黒物質）の形状におけるものだと述べている。最初に暗黒物質の兆候は銀河のクラスターの中で銀河の移動の研究における 1930 年代に報告された^[1]。1970 年代、銀河スケールの暗黒物質のハローが銀河の回転曲線で説明ができると報告された^[2]。さらに最近、WMAP と PLANCK 人工衛星による宇宙背景放射の観測は宇宙における暗黒物質の量を精密に見積もった^[3]。弱いレンズ化、X 線、可視光による宇宙衝突の観測（バレット・クラスター^[4]）は銀河クラスタースケールの暗黒物質の存在を明らかにした(reveal)。

暗黒物質は重力効果のレベルでよく理解されていると同時に、この精密な本質(nature)はまだ明らかになっていない。最大の候補の一つは質量を持った弱い相互作用をする粒子(WIMP)である^[5]。多くの WIMP の実験的な調査が世界中で進行している。図 1 は典型的な 3 つのアプローチ・タイプだ。彼らは WIMP(図の DM) と普通の粒子(図の q) がどうにかして相互作用する (図の雲の形状) という仮定に基づいている。

3 つの手法の間の主な違いはこれら相互作用の方向だ。衝突(collider)実験は 2 つのよく知られた粒子を用いて高エネルギー状態を通して WIMP を生成することに挑んでいる(attempt)。LHC 実験は RUN-2 で 13 TeV において WIMP 探索をして、そして今までの所(thus far)では、明確な証拠は得られていない^[6]。間接的な探索は反物質、 γ 線、ニュートリノなどの対消滅信号を WIMP-WIMP 相互作用から探している。FERMI^[7], PAMELA^[9], AMS-02^[8] 実験は天文的なオブジェクトから反粒子と γ 線を探索している。ここで、暗黒物質は重力に関して(gravitationally)とらわれる(trap)だろう。これらの実験も明確な証拠は見えない

った。3つ目のアプローチのタイプは直接探索である。直接探索では、よく知られた粒子の検出器がしよ
うされ、WIMP-原子核の相互作用を検出する。直接検出の原理は2章で説明し、そして3章で検出器の要
請を議論する。

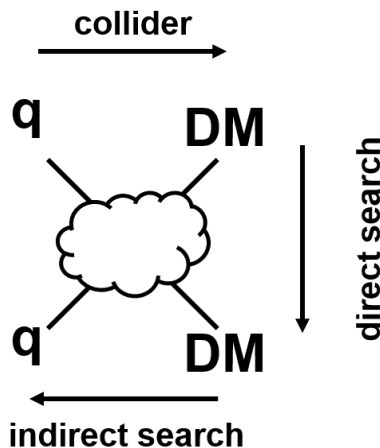


図1. 暗黒物質調査の概略図。DMとqはそれぞれ、暗黒物質とよく知られた粒子。中心の雲は相互作用を示す。矢印は相互作用の方向を示す。

2. Direct Search of Dark Matter: 暗黒物質直接探索

直接探索はWIMP-原子核弾性散乱(いくつかの非弾性散乱も)が使用される。直接探索の原理は図2に描いている。これも精密研究^[10]でよく記述されている。銀河の暗黒物質は重力に関してとらわれて、そして最も確からしいマクスウェル速度 $v_0 = 220 \text{ km s}^{-1}$ はこの速度分布と仮定した場合のほとんどにある。銀河の太陽系の速度(244 km s^{-1})を考慮すると、仮定されたWIMPと与えられた検出器の原子核の質量における地球での検出によって得られたエネルギースペクトラムを計算することができる。典型的なエネルギー分布は図3に示す。ここでは、2つのスペクトラムとこれらの世界的な流行でのみ見解の間の違いは無視する。このスペクトラムは指数関数的な特徴を持つ。これは暗黒物質検出のために2つの重要な要請が導ける。最初は低エネルギー閾値だ。閾値が低くなると、たくさんの事象が予想される。2つ目は低バックグラウンドだ。可能な背景は中性子弾性散乱と γ 線コンプトン散乱が同様な形で見えるだろう。この要請は γ 線バックグラウンド除去のために粒子識別が可能な検出器または低放射能検出器のどれかによって満たせる。他の重要な要請はプロット(図3)の鉛直領域から推論できる。鉛直軸は、しばしば counts/keV/kg/day として表される。1 pbのWIMP-陽子のスピン依存性の断面積はこのスペクトラムのために仮定された。これ(断面積)は世界制限より3乗大きい。つまり、3つ目の要請は巨大な検出器である。

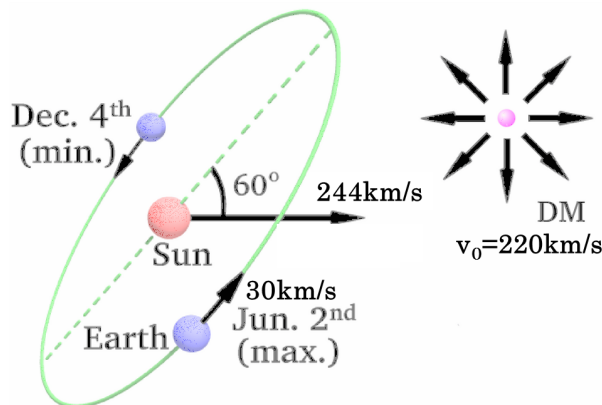


図2. 太陽系の移動と銀河の暗黒物質の概略図

次に暗黒物質の検出信号を議論する。最初の信号が検出された事象のエネルギースペクトラムになるだろう。図 3 に示したエネルギースペクトラムの形状は面白くないが、運動学依存性の特徴をまだ示す。散乱の型が非相対論的弾性散乱なので標的原子核に依存した反跳エネルギーは簡単に計算することができる。スペクトラムは軽い標的で平(flat)になり、そして重くなると険しくなる(steep)。つまり、エネルギースペクトラムに依存した標的原子核は暗黒物質検出の最初の特徴的な信号になるだろう。同じ標的質量に依存した中性子背景問題は残る。

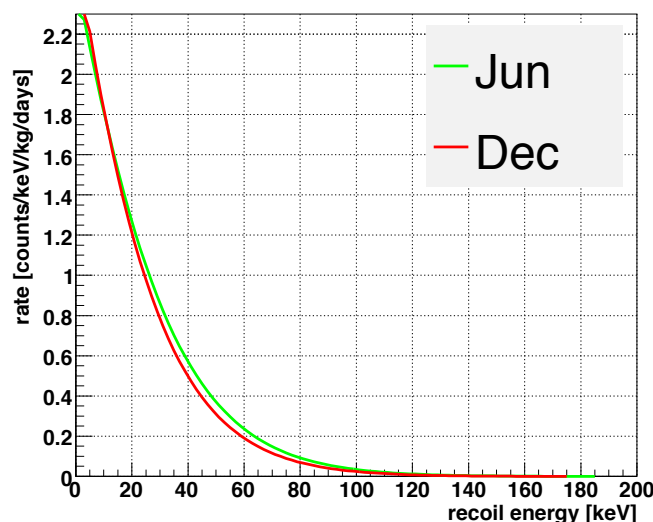


図 3. 暗黒物質の予想されるエネルギースペクトラムの例。Jun と Dec はそれぞれ 6 月と 12 月の予想されるスペクトラムを示している。標的はフッ素を仮定し、WIMP-陽子のスピンの依存した散乱断面積を 1 pb と仮定。仮定した WIMP 質量は 100 GeV だ。

二つめの信号は季節変動(annual modulation)である。ここで、図 2 に戻ってもらおう。銀河に関連して地球の速度は冬より夏の方が速い。この違いはエネルギースペクトラムにおいて小さな変化 (shift) を生成する。これは、夏には高エネルギーへ、冬には低エネルギーへ移行する。与えられたエネルギー・ビンを考慮すると、事象頻度が季節変動が予想される。この違いは典型的に数%なので、巨大な質量の検出器が季節変動観測のために使用される。この信号は暗黒物質検出のとてもクリアな証拠になると信じられているが、実際、答えは簡単なものではない。多くの包囲された(ambient)バックグラウンド源は季節変動を見ることでわかった。DAMA/LIBRA 実験は季節変動を 14 サイクル観測した、巨大な質量の(最初の半分は 100 kg の、次の半分は 250 kg の)NaI(Tl)シンチレータを用いて^[11]。巨大にしたにもかかわらず、変動信号の優位性、DAMA/LIBRA データが主張するパラメータ領域が多く他の実験によって除外された。それはつまり、この結果は決定的(conclusive)ではない^[12-20]。

3つめの信号は方向だ^[22]。図 2 は銀河内太陽系の移動により地球に逆らって(against)暗黒物質の相対移動は等方ではないことを示す。言い換えれば(in other words)、WIMP の風(WIMP-wind)は研究室に設置した検出器に届くのだ。WIMP-原子核の弾性散乱は反跳角において巨大な非対称性をあたえ、そして暗黒物質検出の強い証拠を構成する(constitute)だろう^[21]。

3. Radiation Detectors for Direct Dark Matter Search : 直接暗黒物質探索における放射線検出器

このセクションでは、直接暗黒物質探索における検出器を批評する。図 4 で、暗黒物質検出器は検出方法に基づいてカテゴリ化されている。検出器のエネルギー損失はそれぞれ光、熱、イオン、またはそれらの組み合わせとして測定できる。直接暗黒物質探索実験もこの形態で表される。

3.1 Large Mass : 巨大な質量

前セクションの議論によって、予測される暗黒物質の頻度は極めて低い。したがって、典型的に 100 kg を超える巨大な質量を使用することが重要である。シンチレータ(図 4 の"光"を示す)はスケールアップすることが容易で、そして個体 NaI(Tl)と CsI(Tl)シンチレータは直接暗黒物質探索の早い日から使用されていた。DAMA/LIBRA 実験は 250 kg の NaI(Tl)シンチレータを 7 年間地下実験で用いた^[11]。液体希ガス(液

体キセノン、アルゴンなど)検出器はスケールアップとその場で精製によって、だんだん魅力的になってきた。XMASS 実験は暗黒物質検出器として 800 kg の最大質量(液体キセノン)を使用している^[23]。これは年間季節変動の方法を使って最初と同等の被曝における DAMA を許容するパラメータ範囲を除いた。XENON と LUX 実験が液体キセノンを使用したのは上の説明の理由だけでなく、次のサブセクションで議論する γ 線の除去力のためでもある。

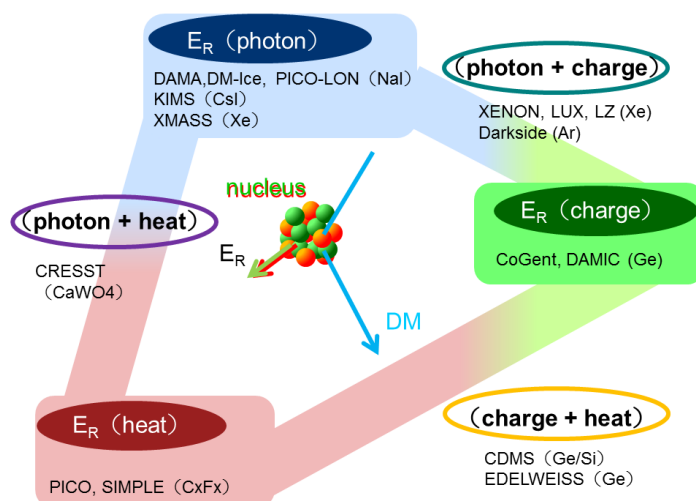


図 4. 暗黒物質直接検出によって測定された物理パラメータの概念図。3つの主要パラメータの光子、電荷、熱は三角形の頂点に示している。3つのパラメータを組み合わせて端に示す。暗黒物質直接探索実験も(同様に)示している。

3.2. Low Background: 低い背景

暗黒物質の予測される(検出)頻度は極めて低いので、背景雑音はできるだけ低くするべきである。ほとんどの暗黒物質探索実験は宇宙線を最小にするために地下の実験室で行なっている。検出器は背景雑音に対して適切に包囲の遮蔽を設置している。加えて、検出器は特別に低バックグラウンドを達成するために開発もできる。最初の重要な特徴は電子反跳の除去だ。WIMP、 γ 線、電子による原子核反跳事象は電子反跳事象を発生させる。光量とイオン収集効率は入射粒子に依存する。したがって図4に示すが、電子反跳の除去は2つ以上の運用(carry)で検出されたなら成し遂げることができる。任意の2つまたはこれら3つの運用を用いた実験があります。XENON と LUX のデバイスは光だけでなくイオン電荷を検出し、そしてつまり、電子反跳除去が可能。スケールアップと電子反跳除去の入手可能が2つの面で液体希ガス検出器を直接暗黒物質探索の感度向上を可能にする。

他に重要な因子は検出器材質の純度だ。検出器内のウラン 238, トリウム 232, カリウム 40, そして炭素 14 などの放射能汚染はしばしば(often)背景雑音を増やすだろう。DAMA 実験が使用した NaI(Tl)シンチレータは特にそれを純化して、そして検出器を最も綺麗にしている、今の所(thus far)。これは DAMA の結果の独立な確認における不足している理由から、比較できる NaI シンチレータは手に入らない。現在、DM-ICE と PICO-LON 実験は DAMA の純度に到達し、数年の放射能フリー検出器などを用いた測定が開始されている^[24, 25]。

3.3. Low Energy Threshold: 低エネルギー閾値

図3に示すように、予測される暗黒物質のエネルギースペクトラムは指数関数の様相だ。これは閾値を下げると予想される事象数が指数関数的に増加することを意味する。直接暗黒物質検出は巨大な質量と低い閾値に調整することが必要だ。主な流行は巨大な質量とそこそこの低い閾値である。DAMIC グループによって報告された面白いアプローチは 0.5 g の質量で極めて低い閾値 0.04 keV を使用している^[26]。低い閾値を使用して、彼らは他の巨大質量の検出器における報告と感度の比較を得た。

3.4. Directional Sensitivity: 方向感度

WIMP の風の検出は暗黒物質検出の信号をととても確信させる (convince) ものになるだろう。この信号は暗黒物質を検出した後で、銀河の暗黒物質の動きを調査するために使用することもできる。ガス検出器は方向を持った検出のデバイスを成し遂げることがほぼできる、なぜなら原子核反跳の典型的な軌道長は数 mm、低圧力のガスの中であっても。DRIFT グループは低バックグラウンド (Multi-wire Proportional Chamber) MWPC を開発し、他の検出器と感度比較の実証をした^[29]。しかし、方向感度は確認していない。NEWAGE 実験は開始から方向感度の追求 (pursue) の異なったアプローチを取ってきた。原子核の軌道によって書かれたスカイマップを用いて、検出器は方向感度の限界を設定される^[27, 28]。方向の情報は強くて、典型的に非等方性な検出の要求のために数十イベントのみで良い。それに対して (in contrast)、季節変動の信号はふつう数千イベント以上要求される。これらの検出器の最も重要な開発研究 (R&D) の問題の一つである低圧力ガス標的を使用することは、十分に検出器の質量を持たせてデバイスをスケールアップすることである。原子核乾板は個体検出器で簡単にスケールアップすることができる。数百 nm 未満の位置分解能を有する Fine-grain エマルジョンは方向性を持った暗黒物質の探索のために特別に開発されていて、そして彼らは研究を行っている^[30]。エマルジョンには時間分解能がなく望遠鏡と同等の操作が必要だが、方向感度の改善するための良い検出器になった。将来、時間分解能においてガス検出器、精密なスカイマップ、そしてエマルジョンの巨大な統計解析の組み合わせが WIMP 天文学において有利に (profitably) 使われるだろう。

4. Conclusion: まとめ

長年暗黒物質の直接探索は行われてきた、しかし明らかな証拠は見つかっていない。直接暗黒物質探索の放射線検出器はいくつかの仕様特徴を要求する。最も重要な要因は”巨大な質量”、”低雑音”、そして”低い閾値”である。少なくとも (at least) これらの特徴の一つは持っている新しい検出器技術は暗黒物質の直接探索の良い候補になるかもしれない。従来の検出器を用いて反跳エネルギーを捉えることに加えて反跳方向も観測することは、より重要な (significant) 検出を作る付加的な情報を与えるだろう。方向性の検出器は WIMP 天文学の時代を起す強力なツールになるだろう。

Reference

- [1] F. Zwicky et. al.: *Astrophys. J.* 86 (1937) 217.
- [2] V. C. Rubin et. al.: *Astrophys. J.* 159 (1970) 379.
- [3] P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration): *Astron. Astrophys.* 571 (2014) A16.
- [4] D. Crowe et al.: *Astrophys. J.*, 648 (2006) L109.
- [5] G. Jungman, M. Kamionkowski, and K. Griest: *Phys. Rep.* 267(1996)195.
- [6] D. Abercrombie et al.: arXiv 1507.00966.
- [7] M. Ackermann: *Phys. Rev. D* 97 (2015) 122002.
- [8] L. Accardo et al. (AMS Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 121101.
- [9] O. Adriani et al. : *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 081102.
- [10] J. D. Lewin and P. F. Smith : *Astropart. Phys.* 6 (1996)87.
- [11] R. Bernabei et al.: *Eur. Phys. J. C* 73 (2013) 2648.
- [12] E. Aprile et al. (XENON Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 181301.
- [13] D.S. Akerib et al. (LUX Collaboration): arXiv 1512.03506.
- [14] R. Agnese et al. (SuperCDMS Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 112 (2016) 241302.
- [15] R. Agnese et al. (SuperCDMS Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 071301.
- [16] P. Agnes et al. (DarkSide Collaboration): arXiv 1510.00702.
- [17] D.S. Akerib et al. (LUX Collaboration): arXiv 1602.03489.
- [18] E. Aprile et al. (XENON Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 021301.
- [19] C. Amole et al. (PICO Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* 114 (2015) 231302.
- [20] C. Amole et al. (PICO Collaboration): arXiv 1510.07754.
- [21] T. Tanimori et al.: *Phys. Lett. B* 578 (2004) 241.
- [22] D.N. Spergel et al.: *Phys. Rev. D* 37 (1988) 1353.
- [23] K. Abe et al.: *Nucl. Instrum. and Meth.* A716(2012)78.

- [24] E. Barbosa et al.(DM-Ice Collaboration): arXiv 1602.05939.
- [25] K. Fushimi: These proceedings.
- [26] J. Barreto et al.Phys. Lett. B 711 (2012) 264.
- [27] K. Nakamura et al.: PTEP (2015) 043F01.
- [28] R. Yakabe et al.: These proceedings .
- [29] J.B.R. Battat et al.: Physics of the Dark Universe 9-10(2015) 1.
- [30] T. Naka et al. Review of Scientific Instruments 86(2015)0730701.