暗黒物質直接探索実験XENON1Tによる 電子反跳事象の超過の観測とその展望

名古屋大学 高等研究院/素粒子宇宙起源研究所

風間 慎吾

kazama@isee.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学 宇宙地球環境研究所

山下雅樹

yamashita@isee.nagoya-u.ac.jp

2020年(令和2年)11月7日

1 はじめに

2020 年 6 月に国際共同実験グループ XENON コラボ レーションは,解析を行った 2017 年から 2018 年までの データに, 1-7 keV のエネルギー領域で 3σ以上の有意 さでバックグラウンドの予想を超える電子反跳事象が観 測されたことを発表した (図 1)[1]。



図 1: XENON1T 実験にて観測された低エネルギー電子 反跳の超過事象。 B_0 はバックグランド (BG) モデルを 表し, 黒点 (SR1 data) が実験データを表す。下図のバ ンドで示した領域は実験を繰り返した時に上下に動く範 囲 (1 σ , 2 σ)を表す。(カラーはオンライン, 以下同様)

XENON グループは, Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) に代表される暗黒物質の直接検出を 主目的とし, イタリアのグランサッソ国立研究所 (INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso) の地下研究所に おいて,液体キセノン Time Projection Chamber(TPC) 検出器を用いた実験を進めている。XENON1T はこの 分野において,最もバックグラウンド (BG) が低く,標 的質量が最も大きく(約1トン),また低エネルギー閾 値(1 keV)を実現している検出器であり,WIMP 探索 だけでなく,標準理論を超えた様々な物理探索を同時に 行っている。

暗黒物質と液体キセノンの衝突頻度は存在するとして も非常に稀であり, 観測される殆どの事象は検出器中に 含まれている放射性物質に由来するため, 解析において は, BG の数を精密に評価し, 得られた観測データと既 知の BG との比較を行う必要がある。しかし, そのよう な BG の考慮をいれてもなお, 予想されていた 232 個の BG を 53 個上回る有意な超過事象が観測された。

これは WIMP による原子核反跳の信号ではなく,電 子反跳による信号であり,この超過事象が未知の粒子に 起因していればその相互作用はキセノン原子が持つ電子 を寄与と考えられる。この過剰な事象についてはまだ完 全には解明されてないが,いくつかの可能性が考えられ ており,太陽中で生成されたアクシオン,太陽ニュートリ ノの異常磁気能率,暗黒物質の候補でもある Axion Like Particles (ALPs) などがその候補である。一方で,検出 器中に極微量に存在するトリチウムの可能性もある。

本稿では XENON1T 検出器やその解析の詳細につい てお伝えする。

2 気体-液体2相型キセノン検出器

液体キセノン検出器は大型化し易いこと(密度 $3g/cm^3$,約-100 °C),質量数 ($A \sim 131$)の大きい物 質は WIMP 検出感度が高いこと,シンチレーション発

■ 研究紹介



図 2:2相型キセノン TPC の検出原理。検出器は液相と 気相の2相からなる。S1とS2の蛍光は上下に並べられ た PMT によって信号が読み出される。原子核反跳と電 子反跳では dE/dx の違いにより S1とS2 の信号の比が 異なり,粒子弁別が可能となる。また,WIMP や Axion による信号は断面積が小さいため,検出器内での反応は 一度と考えられるが (右上,右中),γ線のコンプトン散 乱や中性子の多重散乱では複数回反応するためそれに伴 い,複数の S2 信号が観測される (右下)。

光量が多いこと等の理由から暗黒物質の直接探索を目的 とした検出媒体として優れており、この分野において10 年以上にわたり最も良い感度で探索を生み出している。 希ガス液体検出器はシンチレーターとしてだけでなく、 電離箱としても利用できる。

入射電子が液体キセノン中でシンチレーション光また は電離電子1個を作り出すのに必要な平均のエネルギー は、それぞれ21.6 eVと15.6 eVである[2]。液体キセ ノン検出器は、神岡におけるXMASS[3]のようにシンチ レーションだけで使われることもあるが、2 相型検出器 はこの直接蛍光と電離電子の両方の信号を用いるので TPCとしての動作が可能となる。その際、液体中で発生 した電離電子を気体相で比例蛍光に変えて読み出すとこ ろに特徴がある。電離電子が気体相で多数の比例蛍光を 発生させるため、信号の閾値を数電離電子相当まで下げ ることが可能になり、低エネルギー領域の感度が飛躍的 に向上する。さらに、電離電子信号の読み出し用の前置 増幅器が不要になり、光電子増倍管 PMT のみで容易に 信号の読み出しができる。

図2に検出器の動作原理を示す。まず入射粒子が検出 器内で相互作用し,約30nsecで減衰する直接蛍光(S1) がPMTで捉えられる。続いて再結合を免れた電離電子 は液中の電場によって上方向(Zとする)に移動する。 液体と気体の2相間には約0.7 eVのポテンシャルが存 在するため,約10 kV/cmの高電場を用いて,電離電子 を液体層から気体層へ引っ張りだす。気体相では、ドリ フトされた電離電子数に比例した蛍光(S2)が発生し、こ の信号をさらにPMTで読み出す。比例蛍光の増幅率は 1 個の電離電子に対し約 200 光子である。よって, 検出 器がトンスケールの大型検出器であるが, 1 電離電子信 号まで見てとることができる。

電離電子の移動速度は電場によるが 1-2mm/μsec であ る。S1 と S2 の時間差は電離電子の移動時間に相当し, S2 は,ほぼ気体-液体の境界面で発生するため,この時間 差が S1 発生位置の Z 方向情報に相当する。また, S2 信 号の上部 PMT アレイのヒットパターンから機械学習を 用いて X-Y 平面の位置情報を得ることができる。この 方法による位置の決定精度は数 mm 程度である。

また, 反跳核の事象は反跳電子に比べ電離密度が高い ので, 媒質中で再結合する割合が多く, S2 信号は反跳電 子より小さくなる。よって図 2 のように, S1 と S2 の比 を見ることによって, 反跳粒子を弁別することができる (識別能力 >99.8%)。また, WIMP や Axion による信号 は断面積が小さいため, 検出器内での反応は一度と考え られるが, γ線のコンプトン散乱や中性子の多重散乱で は複数回反応するため, それに伴い複数の S2 信号が観 測される。

今回の報告のポイントは, WIMP 探索ではこの粒子弁 別を行い原子核反跳を Region-Of-Interest(ROI) とする が, 電子反跳の信号を見ることによって, また違った物 理探索が可能であるところである。

3 XENON1T 検出器

本稿で XENON 実験を初めて紹介させて頂いたのは XENON10の時代でもう10年以上前になるが[4],その 後も最も良い感度で WIMP 探索を続けている。ここで、 XENON1T 検出器を紹介させて頂く [5]。XENON1T は XENON10 (2005-2007年), XENON100(2008-2016年) に続く後継機で、液体キセノン2トンの有効質量を持ち、 この分野で最も大きい検出器となる。2016年にグラン サッソ研究所にて運転を開始し, 2018年に終了してい る。現在は更に大型化された XENONnT 検出器が試運 転を行っている。図3に XENON 実験の設備を示す。目 的とする事象が非常に稀であるため, 如何に放射性 BG を減らすかが実験の肝となる。環境中性子,γ線を遮蔽 するために検出器は直径約 10m× 高さ 10 m の水シール ドタンク内に備え付けられている。また,水タンク内に は80個の8インチPMT(R5912)が反射材と共に壁に設 置され,宇宙線を伴った事象は,中性子を生成する可能 性があるため排除している。観測時には常に検出器内の 液体キセノンを蒸発させゲッターを用いた純化装置を循 環している。ガス循環速度は運転期間中に改良を行った ため、時期によって異なるが、最終的には磁気ポンプを 使用して約 70 SLPM のスピードで循環することができ る。購入したキセノンガスには通常 Kr が ppb-ppm 程



図 3: イタリア・グランサッソ地下実験施設 Hall B に 設置された XENON 実験の現場。左側が直径 10m × 高 さ 10m の水シールドタンク。水タンクには XENON1T 検出器の様子が分かるように検出器が描かれた垂れ幕が ぶら下がっている。右側はキセノン純化システム, デー タ取得装置, シフト部屋がある 3 階建てのビルディング。 Kr 除去する蒸留塔は高さ 5.5m あり, 1 階から 3 階まで 突き抜けている。

度不純物として存在し, その同位体 85 Kr の β 崩壊が, 主 な BG となるが, これは蒸留を行うことで Kr は ppt 程 度まで除去される。

図 4 の写真のように TPC 内には浜松ホトニクス社 製の極低 BG PMT(R14110-21) が上面 (127 本) と下面 (121 本) に並べられており,入射粒子がエネルギーを落 とした際に発光したシンチレーション光を捉える。TPC のサイズは直径 96cm × 高さ 97cm, 側面は VUV 光に対 して反射率の高い (反射率 = 99%)PTFE で囲んでいる。

電極は図 2 のように配置されており, TPC のドリフ ト電場はカソード電極に -8 kV, 液面近くのゲートに 0V を与えることにより 80 V/cm となる。ガス相のア ノードには+4.0 kV の電圧がかけられ, 電子を引っ張り 出す電場は 8.1 kV/cm となる。 液面はゲートから 2.5 mm に位置する。外部から電場の影響を防ぐためのスク リーン (Top/Bottom screen) が上下 PMT 前にあり, -1.55 kV の電位が与えられている。

S2 信号は上面 PMT 直下のガス層で発光するため光 量も多く,局所的な分布をしており,この情報を用いて, X-Y 平面の位置構成を行う。

液体キセノンを維持する冷却には,液体キセノン用に KEK-Iwatani で開発されたパルス管冷凍機 (PC150, 冷 凍能力 250W) が用いられ [6],液体キセノンを約 –96°C に維持した。この時のキセノン蒸気圧はおよそ絶対圧 1.9 bar であり,長期安定運転を行うことができた。



図 4: 上下に設置された PMT アレイ。上面には 127本, 下面には 121 本の 3 インチ R11410-21(Hamamatsu) が 並ぶ。

4 解析

この章では,超過が見つかった低エネルギー電子反跳 事象探索の解析の詳細について述べる。

4.1 イベントセレクション,検出効率

まずは用いたデータやイベントセレクション, 検出効 率について述べる。用いたデータは, 2017 年 2 月から 2018 年 2 月までの約 1 年間 (SR1 と呼ぶ) に取得された もので, キャリブレーションの期間を除くと約 227 日分 に相当する。有効体積は図 5 で示されるように, 検出器 壁からのガンマ線 BG の寄与を減らすため, 検出器の内 側のみ (1042 kg) が用いられており, total exposure は 0.65 ton-year に相当する。

イベントセレクションは,基本的には1 ton-year の WIMP 探索結果 [7] で用いられたものと同じセレクショ ンが用いられており,検出器中で複数回散乱した事象を 除いたり,ノイズが大きい事象を除くなど非常にシンプ ルなものになっている。図6が検出効率を表している。 セレクション効率は約91%程度と非常に高く,turn-on 構造は,S1信号を形成するための3-fold PMT コインシ デンス要求に起因している。超過が見られた2.3 keV 付 近での検出効率は80%程度である。この検出効率自体 の validation は5.1 節で述べる。低エネルギー領域での エネルギー分解能は以下の式で表され,2 keV 付近での 分解能は約20%程度である。

$$\sigma(E) \; [\text{keV}] = 0.31 \times \sqrt{E} + 0.0037 \times E \tag{1}$$



図 5: 低エネルギー電子反跳事象の反応点分布。検出器 内側を選択することで,検出器部材のガンマ線 BG を効 率的に排除できていることが分かる。

4.2 信号模型

次に本解析でターゲットとした信号模型について述べ る。本解析では、主に太陽中で生成されたアクシオン、 ニュートリノの異常磁気能率、そして ALPs の仮説検定 を行っており、これらの信号は WIMP の原子核反跳と は異なり電子反跳事象を形成する。

太陽アクシオンは 3 つの異なるカップリング (g_{ae} , g_{an} , $g_{a\gamma}$) に対応して異なる生成メカニズムがあり,本 解析でも (1) Atomic recombination and de-excitation, Bremsstrahlung, and Compton(ABC), (2) ⁵⁷Fe の M1 核遷移 (14.4 keV の単色エネルギーを持つ), (3) プリマ コフ効果, の 3 つの効果を全て取り入れた解析を行なっ た。液体キセノン検出器でこれら信号を検出するには, axioelectric 効果と呼ばれる光電効果に似た現象を利用 しており, これは g_{ae} にのみ依存している。期待される 信号の分布を図 7 に示す。今回行った解析では,アクシ オンの代表的な模型である DFSZ 模型, KSVZ 模型など の特定の模型に依存した解析ではなく, これら 3 つのパ ラメーターが完全に独立と考えた解析を行なった。

ニュートリノは,素粒子標準理論の枠組みでは磁気能 率を持たないが,標準理論を超えた物理のいくつかの模 型では 10⁻¹⁵µ_B (µ_B はボーア磁子)を超えた値が予言 されており,低エネルギー領域での生成断面積が増加す ることが期待されている。XENON1T 実験では,陽子-陽子 (pp) 連鎖反応起源の太陽ニュートリノの観測を通 じてその探索が可能となり,図 7 に示される信号分布が 期待される。



図 6:本解析の検出効率。2keV 付近の turn-on 構造は S1 信号を形成するための 3-fold PMT コインシデンス 要求に起因している。

ALPs は, axion と同様に擬スカラー粒子であるが, そ の質量と崩壊定数は axion とは異なり独立なパラメター である。ALPs は WIMP と同様に暗黒物質の候補であり, axioelectric 効果を通じて検出器中に信号を残す。ALPs は非相対論的な運動をしていると考えられており, 図 7 に示されるように, その質量に対応した単色ピークを形 成する。



図 7: 太陽アクシオン (左図), ニュートリノ異常磁気能率 (右図の左線), ALPs(右図の右線) 信号の期待されるエネ ルギー分布。塗りつぶされた分布は検出器の効果 (検出 効率, 分解能) を考慮したものである。

4.3 バックグラウンドモデル

この章では, BG モデルの詳細 (主要な BG である ²¹⁴Pb, ⁸⁵Kr) について解説を行う。

興味のある低エネルギー領域での主要な BG は ²²²Rn の娘核 ²¹⁴Pb の β 崩壊事象であり,検出器部材からの ラドンの湧き出しにより検出器中に一様に存在するた め主要な BG となる。²¹⁴Pb の放射能は,²¹⁴BiPo の 遅延同時計測により 5.1 ± 0.5 μ Bq/kg, ²¹⁸Po の α 崩 壊により 12.6 ± 0.8 μ Bq/kg 以上であると予測され ている。本解析では,最終的なフィットを行う際には この制限を仮定せず,上記予測値との比較を行った。 BG-only フィットの結果 (図 8) では,²¹⁴Pb の放射能は (11.1±0.2_{stats}±1.1_{sys}) µBq/kg と評価され、これは上
 述した予測の範囲と一致している。

第2の主要な BG は, Kr の放射性同位体 ⁸⁵Kr の β 崩 壊事象である。この Kr BG は, 前述した蒸留塔により 除去でき, rare gas mass spectrometry (RGMS) により 1 ppt 以下まで削減できていることが確認されている。



図 8: 実験データ (SR1 data) に対する BG-only フィッ ト結果 (B₀)。²¹⁴Pb 起源の BG は, 低エネルギー領域 (< 25 keV) で一番寄与が大きく, ⁸⁵Kr 起源の BG はその次 に寄与が大きい。

本解析で特に注意した点は、これら β 崩壊事象の低エネ ルギーでの振る舞いである。²¹⁴Pb, ⁸⁵Kr の崩壊は、それ ぞれ first forbidden non-unique, first forbidden unique transition であるが、通常使用される IAEA の LiveChart や Geant4 のどちらにおいても、重要となるスクリーニ ング効果 (電子雲が原子核の電荷を遮蔽する効果) [8] や Exchange effect [8] が考慮されておらず、低エネルギー 領域 (< 10 keV) では、これら全ての効果を取り入れた 記述が必要となる。そのため、本解析では専門家である X. Mougeot 氏と協力してその計算を行った。図 9 が、 ²¹⁴Pb に対する計算結果であり、10 keV 以下でそれぞれ のモデルの違いが顕著に現れている様子が分かる。本解 析では、すべての効果を取り入れたスペクトル (図 10) を BG モデルに取り入れている。

5 結果

前章までで得られた BG モデルと信号模型を用いた, 観測データに対するフィット結果をこの章で述べる。本



図 9: ²¹⁴Pbの β 崩壊事象の分布の比較。一番上に書かれ た線 (This work - final ²¹⁴Pb model) がスクリーニング 効果と Exchangeffect 効果を取り入れたモデルを表す。

解析では, Unbinned Profile Likelihood Fit を行ってい る点に注意いただきたい。

図 8 から明らかなように 1 - 210 keV の広範囲に渡 って実験データと BG-only フィット結果が非常に良く 合っている。また, 1 - 30 keV での BG 量は, (76 ± 2) events/(t·y·keV) と見積もられ, このエネルギー領域で 世界で最も BG が少ない検出器の実現に成功した。

5.1 超過事象

図 8 に示されるように, 広範囲のエネルギー領域で は実験データと BG 予測はよく合っているが, 図 1 の 7 keV 以下を拡大した分布を見ると, BG 予測に対して実 験データでは有意に超過事象があることが一目瞭然であ る。1-7 keV での BG 予測は 232 ± 15 事象であるのに対 して, 観測された事象数は 285 事象であり, これは 3.3 σ のポアソン揺らぎに相当する。

超過が最も多く出ている領域は 2.3 keV 付近であり, 検出効率の turn-on に近いことから,最初に疑われたの は検出効率の不定性である。XENON1T 実験では,電 子反跳事象のキャリブレーションに,主要な BG である ²¹⁴Pb と似た信号を形成する ²¹²Pb(²²⁰Rn の娘核) の β 崩壊を用いており,全く同じフィットをこれに行うこと で,その正当性の確認を行った。²²⁰Rn 線源をキセノンガ スの循環ラインに直接投入することで,²¹²Pb も ²¹⁴Pb と同様に検出器に一様な事象を得られ,この点からも ²¹⁴Pb と似た信号が期待される。図 10 に示される様に, ²¹²Pb の観測データとフィット結果は非常によく合って おり (p-value は 0.5), 2 keV 付近での不定性は十分小さ いことが確認された。

次に考えられるのは, 予想していなかった BG の寄与 である。本研究では, ¹²⁷Xe, ³⁷Ar, さらにはトリチウム など様々な可能性の検討を行った。このうち ¹²⁷Xe と



図 10: ²¹²Pb キャリブレーションデータに対するフィット結果。β 崩壊のエネルギー分布は ²¹⁴Pb や ⁸⁵Kr と同様にスクリーニング効果や Exchange effect が考慮されている。



図 11: トリチウム+BG モデルでのフィット結果 (H₁)。

³⁷Ar に関しては, 使用されたキセノンガスは導入前に数 年に渡って地下深くに保存されていたこと, 蒸留塔によ る除去などから, その可能性は排除され, 残る可能性は トリチウムのみとなった。トリチウムは, これまで液体 キセノン検出器を用いた暗黒物質探索では考慮されてこ なかった全く新しい BG であり, 本研究ではその可能性 に関して詳細な検討を行った。

5.2 トリチウム仮説

トリチウムは水素の放射性同位体であり, 半減期 12.3 年で β 崩壊 ($Q_{end} = 18.6 \text{ keV}$)をする。トリチウムが 検出器中にどのように混入するかは,可能性として二つ が考えられる。一つは,宇宙線によるキセノンガス自体 の放射化,もう一つは,検出器部材中に HTO (tritiated water)や HT (tritiated hydrogen) として取り込まれ, 検出器中に湧き出てくることによるものである。本研究 ではまず, トリチウムの β 崩壊分布が観測データに合う かどうか, フィットを行いその検証を行った。図 11 に示 されるように, トリチウムの β 崩壊分布は, 良くデータ と合っており, トリチウムを含まない BG モデルに対し てトリチウムを考慮したモデルの統計的有意度は 3.2 σ に達する。フィット結果は, トリチウムが XENON1T 検 出器中に 159 ± 51 事象/(t·y·keV) 程度含まれているこ とを示唆している。これは 6.2 ± 2.5 × 10⁻²⁵ mol/mol に相当し, キセノン 1kg 中に約 3 個程度のトリチウムが 含まれていることに相当する。この量は非常に微量であ るため, 現在の技術では本当にトリチウムがキセノン中 に含まれていたかどうか検証することは非常に難しい。

そこで本解析では、上述した宇宙線による放射化、 HT/HTO の湧き出しに関して、それぞれできる限り定 量的な検討を行い、トリチウムが BG として最もらしい かどうかの確認を行った。

5.2.1 宇宙線による放射化の場合

実験に使用されるキセノンガスは地下実験室に移動 するまでは地表で宇宙線による放射化が進む。そこで、 キセノンガスが地表にて十分長い時間さらされ,放射化 が飽和する量を考えるとキセノン中に生成されたトリ チウムの量に上限値を与えることができる(4×10⁻²⁰ mol/mol)。トリチウムの大部分はキセノンガス中の不 純物である水(ppm レベル)と反応しHTOを形成す ると考えられる[9]。しかし,地下実験室にキセノンガス が運搬された後,キセノン保持タンクが-100 ℃まで冷却 され水は壁にトラップされること,実験開始時にはゲッ ター(水素除去装置付き)を用いてキセノンガス中の水 分や水素は ppb レベルまで除去されることを考慮に入 れるとトリチウムの含有量は < 10⁻²⁷ mol/mol になる と見積もられ,宇宙線による放射化の影響は無視できる と結論付けられる。

5.2.2 HT/HTO の湧き出し

自然界に存在する HTO や HT の検出器部材 (PTFE 反射材や真空容器) への吸着・湧き出しも大きなトリチ ウム源となりうる。HTO や HT の H₂O, H₂ に対する自 然存在比は, およそ 5 - 10 × 10⁻¹⁸[10] 程度と考えられ ており, この値を仮定すると超過を説明するのに必要な H₂O+H₂ 量は, > 30 ppb 程度であると考えられる。

キセノン検出器中に H₂O が *O*(1)-ppb 程度混入して いると検出可能な光量が著しく減衰してしまうが, 実際 の実験ではその様な兆候は見られておらず, この影響は 直ちに棄却された。

H₂ に関する直接的な制限はないが,同様にゲッター で除去可能な O₂ が sub-ppb レベルまで除去できている ことが, 電子のドリフト長 (電子が O₂ に捕獲されるま でにどれくらいドリフトできるかの目安)の測定から判 明している。H₂ が O₂ に比べて 100 倍大きな不純物濃 度を持っている可能性も否定はできないが, H₂ に関す る直接的な観測値がないため, 現実的にその様なことが 起こりうるかどうかについて結論がつけられない状況と なっている。そのため, 太陽アクシオンなどの信号の仮 説検定を行う際は, 別途トリチウム BG も含めた検定も 行い, 信号模型のみを仮定した場合と比べて, どの様に 統計的有意度が変わるのかの確認を行うこととした。

6 信号解釈

この章では,発見された超過が全て標準理論を超えた 物理から来ているものと仮定した場合,どのようなパラ メータ領域が期待されるのかについて解説を行う。

まず太陽アクシオン模型について詳細を述べる。図12 のフィット結果に示されるように、太陽アクシオン模型 は超過を非常によく記述しており、その統計的有意性は 3.4σにも達する。前述したように、本解析では特定の アクシオン模型に寄らず g_{ae} vs. $g_{ae}g_{a\gamma}$ vs. $g_{ae}g_{an}^{eff}$ の三 つのパラメータを独立のものと考え、この3次元空間内 で超過に最も合うパラメータを探す様な解析を行ってい る。本誌ではこの結果のうち, 特に g_{ae} vs. g_{aγ} 平面内 での解釈に焦点を当てて解説を行う。図13のバンドで 覆われた領域は, g_{ae} vs. $g_{a\gamma}$ 平面内での 90% confidence region であり、超過を説明可能なパラメータ領域に相当 する。ABC 生成過程, プリマコフ効果のどちらも低エ ネルギー領域での信号を予言するため、二つのカップリ ングに対する制限は逆相関の関係にあり,発見された超 過はどちらかの寄与がゼロでないことを示唆している。 $g_{
m ae}$ に関しては, $g_{
m a\gamma}
ightarrow 0$ の極限で期待されるパラメー タ値は3×10⁻¹² 程度になるが、これは天体観測に基づ く制限 (red giant, white dwarfs など) により既に否定 されており、矛盾した結果となっている。ただし、逆プ リマコフ効果を用いた新たな測定 [11, 12] や, これら天 体観測からの制限を回避する理論的な解釈も進行中であ り, 確実な決着はついていない。

本解析では、太陽アクシオン模型に対して、トリチウム仮説を加えた場合のフィットも行い、仮にトリチウムが検出器中に存在していた場合、どちらがより超過に合うのかについても検証を行った。図14がその結果を示しており、分布の形状の違いからトリチウムの寄与はほぼゼロとなっていることが分かる。この場合のアクシオン模型の統計的有意性は2.0ヶに下がってしまうが、さらに統計を貯め、主要なBGである²¹⁴Pbを排除することで、分布の形状の違いからトリチウム仮説を棄却できるようになることが分かる。



図 12: 太陽アクシオモデルでのフィット結果 (H₁)。ABC, ⁵⁷Fe の M1 核遷移, プリマコフ効果のそれぞれの best-fit 結果も示す。



図 13: g_{ae} vs. $g_{a\gamma}$ 平面内での 90% confidence region(バ ンド線で囲まれた領域)。他の実験や天体観測に基づく 制限 (red giant, white dwarfs, HB stars) も示す。

ニュートリノの異常磁気能率や ALPs の場合の解釈も 行なっており, ニュートリノの異常磁気能率の場合, 図 15 に示される様に $\mu_{\nu} \in (1.4, 2.9) \times 10^{-11} \mu_B$ が超過 を説明する範囲であるが, こちらも天体観測からの制限 (globular clusters, white dwarfs) と矛盾が見られる。

一方で ALPs の解釈は, 太陽アクシオンやニュートリ ノの場合とは異なり, 天体観測からの制限とは矛盾せず, 図 16 に見られる様に, (2.3 ± 0.2) keV の質量を持った 信号が, 3.0σ global $(4.0\sigma$ local) の統計的有意性で好ま れる結果となっている。

7 まとめと今後の展望

本稿において, XENON1T 実験において見つかった 低エネルギー領域での電子反跳事象の超過について紹 介させていただいた。発見された超過は,太陽アクシオ ン,ニュートリノ異常磁気能率,そして 2.3 keV の質量 を持った ALPs からの信号を仮定すると説明が可能であ



図 14: 太陽アクシオモデル+トリチウムの β 崩壊分布 (Normalization free) を用いたフィット結果 (H₁)。



図 15: ニュートリノ異常磁気能率に対する制限 (This work)。その他の実験や天体観測からの制限も示す。

るが,検出器中に極微量ながらトリチウムが含まれてい た可能性も否定できず,その決着は未だはっきりとしな い状況となっている。

本稿ではスペースの関係で説明ができなかったが, 超 過事象の時間変動, 反応点の位置依存性, エネルギー閾値 依存性, SR2 と呼ばれる SR1 後の純化システムの R&D 期間中に取得されたデータなど, 様々な確認を行なって おり, どの点からも偽の信号を生み出すような振る舞い は見つかっていない。

XENONnT 実験 [13] は, XENON1T 実験を4倍大型 化し, 内部の放射性不純物を低減した後継実験であり, 来 年からデータ取得を開始する見込みである。XENONnT 実験では, 電子反跳事象の統計精度が1桁上がり, デー タ取得後3ヶ月でエネルギースペクトルの違いから太陽 アクシオン信号とトリチウム BG を区別でき, 来年度初 旬には決着がつくものと期待している。COVID-19 の ため, 現地イタリアに出向くことが難しい状況であるが, オンラインで現地研究者と協力して精力的に検出器のコ ミッショニングを行なっている段階にあり, 観測開始に 向けて非常に重要な局面 (楽しく忙しい時期) を迎えて



図 16: Axion-Like Particles (ALPs) に対する制限。黒 線 (XENON1T, this work) が実験結果を表す。2 keV 付 近に超過があることが分かる。

いる。

8 謝辞

本実験は、日本からは、神戸大学・東京大学・名古屋大 学が参画するコラボレーションにより行われています。 また、本研究は JSPS 科研費や海外特別研究員制度の助 成を受けて行われました。

参考文献

- E. Aprile *et al.*, Phys. Rev. D **102**, 072004 (2020).
- [2] T. Doke *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **41** 1538 (2002).
- [3] K. Abe *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A **716** 78 (2017).
- [4] 山下雅樹, 高エネルギーニュース 27-2, (2008).
- [5] E. Aprile *et al.*, Eur. Phys. J. C **77** 881 (2017).
- [6] T. Haruyama *et al.*, Cryocoolers **13**, 689 (2005).
- [7] E. Aprile *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 111302 (2018).
- [8] X. Mougeot and C. Bisch, Phys. Rev. A 90, 012501 (2014).
- [9] T. Ishida, J. Nucl. Sci. Technol. **39**, 407 (2002).
- [10] W. Plastino *et al.*, Radiation Measurements **42**, 68 (2007).

- [11] J. B. Dent *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 131805 (2020).
- [12] C. Gao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**, 131806 (2020).
- [13] E. Aprile et al., arXiv:2007.08796 (2020).