

■ 研究紹介

XENONnT 実験の最新結果：XENON1T LowER Excess の検証

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 宇宙線研究部

日本学術振興会 特別研究員 (PD)

小林 雅俊

kobayashi.masatoshi@isee.nagoya-u.ac.jp

2022 年 (令和 4 年) 11 月 1 日

1 はじめに

XENONnT 実験は欧米日を中心とした 12 カ国・27 の研究所が参加し、宇宙暗黒物質の直接探索を主な目的としている国際共同実験である。前身である XENON1T 実験の終了後、イタリアの Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) において 2019 年から検出器の建設が進められ、2021 年 7 月から本格的な物理データ (science run 0, 以下 SR0) の取得を開始した。暗黒物質の有力な候補である Weakly Interactive Massive Particles (WIMPs) に対する探索と並び、SR0 解析における最も重要な目的となったのが、XENON1T 実験で報告された低エネルギー領域における電子反跳事象のバックグラウンド (BG) モデルからの超過：XENON1T LowER excess[1] に関する検証である。

XENONnT 実験による XENON1T LowER excess の検証結果は、2022 年 7 月に公表された [2]。BG を削減するためのさまざまな努力の結果、XENONnT 実験では XENON1T のおよそ 1/5 となる電子反跳 BG を達成し、これは中国の PANDA-X 実験 [3]、米国の LZ 実験 [4] など同様の実験と比較しても世界で最も低い BG 量となっている。残念ながら XENONnT SR0 データにおいて有意な BG モデルからの超過は観測されず、結果として太陽アクシオン、アクシオン様粒子、暗黒光子などのモデルに制限を与えることとなっている [2]。本記事では、この成果を XENONnT 実験の概要と共に解説する。なお、都合上いくつかの図に関して国際会議での発表で使用された preliminary なものが含まれることを予めご了承ください。

2 XENON1T LowER Excess

XENON1T に関する詳細な解説は既に XENON 実験日本グループより報告させていただいた [5] ことから、本章では、要点のみを紹介する。

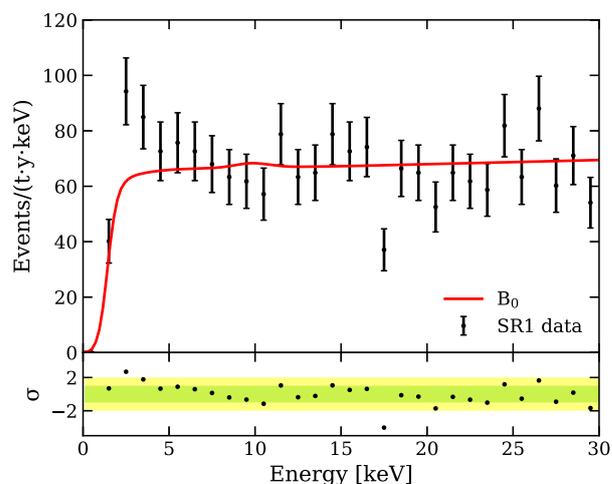


図 1: XENON1T 実験において観測された低エネルギー電子反跳事象のスペクトルと BG モデル [1]。上図の黒点は実データを、 B_0 は BG モデルからの予想を示す。下図バンドは実験を繰り返した時に 1σ , 2σ で期待される統計的なふるつきの範囲、点は観測データの差分を示す。

XENON1T 実験において観測された、電子反跳事象に対するスペクトルと BG モデルを図 1 に示す。0.67 t·yr のデータを用いた解析の結果、1-7 keV の低エネルギー領域において予想される BG 量の 232 ± 15 イベントに対し、実データで 285 イベントが観測された。この乖離はポアソン揺らぎにして 3.3σ に相当し、太陽アクシオンや 2.3 keV の単一ピークによるスペクトル、太陽ニュートリノが異常磁気モーメントを持つ場合などから予想されるスペクトルとよく一致していることから、新物理現象に由来する可能性が期待された。しかしながら、検出器内に極微量のトリチウムが存在することを仮定した場合放出される Q 値 18 keV の β 線による BG も超過スペクトルを説明しうることから、残留トリチウムの可能性も同時に議論された。観測された超過分を説明するトリチウム濃度はモル濃度で 6×10^{-25} mol/mol と極めて低く、直接測定を行うことが困難であったことから

XENON1T では結論を得ることができず、XENONnT 実験において BG を削減し、統計量を増加させた検証を待つこととなった。

3 XENONnT 検出器

3.1 気液二相式タイムプロジェクションチェンバー

XENONnT 実験を含む XENON プロジェクトは、2005 年の XENON10 実験 [6] からスタートし、検出器を徐々に大型化させていった。XENON 実験の検出器は一貫して気液二相式キセノンタイムプロジェクションチェンバー (TPC) と呼ばれる方式をとっており、当初 15 kg 程度であった検出器の有感質量は現在約 6 t までの大型化に成功している。

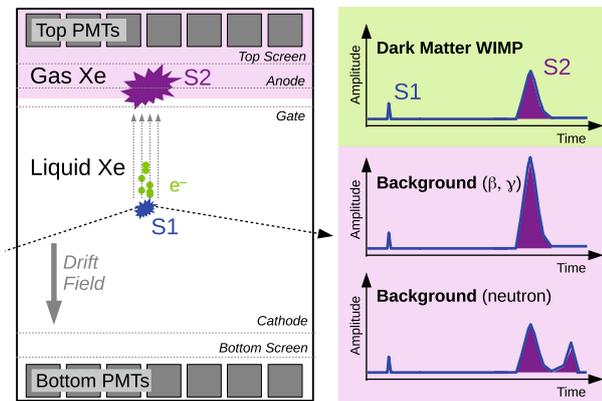


図 2: (左) 液体キセノン TPC の概念図 [7]。先発のシンチレーション信号 (S1) は上下の PMT によって直接観測され、後発の電離信号 (S2) は電場によって液面までドリフトされたのちにガス領域で比例シンチレーション光として観測される。(右) WIMPs や中性子が単発で原子核反跳した場合、 β 線や γ 線、アクシオンなどが電子反跳した場合、中性子が複数回原子核反跳した場合に期待される S1, S2 の概念図。

図 2 に、二相式 TPC の動作概要を示す。検出器内に入射した暗黒物質、あるいは BG となる放射線がキセノン原子と相互作用を起こしてエネルギーを落とすと、励起あるいは電離状態となったキセノン原子がシンチレーション光と電離電子を放出する。その内シンチレーション光は相互作用が起こった直後からおよそ 30 ns 程度の減衰時間で放出され、発生した VUV 光 (波長約 175 nm [8]) は上下面に配置された PMT によって直接観測される。一方、電離電子は放出された後、まず検出器にかかっている電場に沿って液面までドリフトされる。ガス相と液相の間には 0.7 eV 程度のポテンシャル差が存在すること

から、液面に数 kV の高電場をかけることで到達した電子を引っ張り出し、さらにガス領域において加速する。加速された電子は、その数に比例して比例シンチレーション光を生成し、その VUV 光が同じく PMT によって観測される。比例蛍光の増幅率は 1 電子あたり 200 光子と極めて大きく、XENONnT のような大型検出器でも 1 電子単位での測定が可能となっている。以下では、慣例に従って先発となるシンチレーション光を S1、後発の電離信号を S2 と呼ぶ。検出器内における平面方向 (XY 方向) の位置再構成は増幅率の大きい S2 信号を用いて行われており、光子シミュレーションによるパターンを用いた機械学習により数 mm 程度の精度で得ることができる。深さ方向 (Z 方向) の再構成は電子のドリフト時間を用いておこなわれており、S1 と S2 の時間差と、電場強度から計算された電子のドリフト速度を用いて再構成されている。

また重要な点として、S2/S1 の値はキセノンと入射粒子の相互作用のタイプに強く依存しており、電子反跳事象は原子核反跳事象に比べて大きな S2/S1 を持つ。このことから二相式キセノン TPC は原子核反跳事象の探索における非常に強い BG 排除能力をもっており、WIMPs 等の原子核反跳を起こすことが期待される暗黒物質に対して高い探索感度を発揮することができる。ただし本記事で解説するのは電子反跳事象に対する探索のため、放射性 BG 源そのものの純粋な削減が重要となる。

3.2 XENONnT TPC

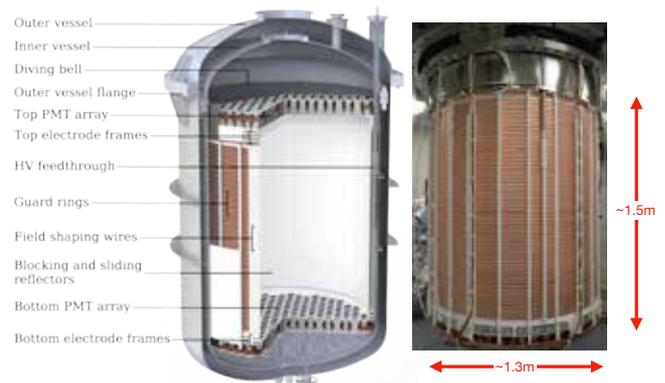


図 3: XENONnT TPC の概念図 (左) [9] と、実際の検出器 (右)。

XENON1T 実験における観測で最も大きな BG となったのは、 ^{222}Rn に由来する事象である。キセノンと同じ希ガスの一種であるラドン (Rn) はその全てが放射性核種であり、検出器の部材中に含まれる放射性不純物から放出される。その中でも特にウラン系列の ^{222}Rn は 3.8 日と比較的長い半減期を持っていることから検出器内部

にまで拡散し、その崩壊によって発生する娘核の一つである ^{214}Pb が放出する β 線が観測における BG となる。したがって XENONnT 検出器を建設するにあたっては単なる検出器の大型化だけでなく ^{222}Rn の削減が大きな課題の一つであり、検出器やサブシステムの部材に対して徹底的なスクリーニングを行うことで ^{222}Rn 発生源となるウランやトリウムといった放射性不純物そのものを減らす努力 [10] と共に、定常的に検出器中の ^{222}Rn を除去するための蒸留装置が建設されることとなった。これらの検出器の詳細に関しては、次の章で述べる。

図3に XENONnT 検出器の概形を示す。XENONnT TPC は総質量で 8.5 t、有感質量として 5.9 t のキセノンが用いられており、検出器内径が約 1.3 m、ドリフト長 (カソード・ゲート間の長さ) が約 1.5 m となっている。検出器上下には XENON1T 検出器と同型の PMT (浜松ホトニクス製 R11310) がそれぞれ約 250 本配置されており、一部の PMT は XENON1T 検出器からも流用されている [11]。SR0 では、検出器は 23 V/cm と XENON1T の 80 V/cm よりも低い電場でオペレーションされた。これはコミッショニング中にカソード電極とボトムスクリーン電極が導通してしまったため、カソード電極の電圧が -2.75 kV に制限されてしまった事による。最大ドリフト時間が 2.2 ms と計画の 2 倍になるなどいくつか問題が考えられたが、後述するキセノン純化装置の成功や、低電圧であれば電極の振る舞いが十分安定したことなどから、SR0 のデータ取得が進められることとなった。

検出器の建設に際しては、トリチウムの混入を可能な限り防ぐための方策が講じられた。トリチウムは HTO、あるいは HT として検出器中に混入することが予想されており、液体キセノンを導入すると検出器の温度が -100 度まで下がることから壁面に付着した水や金属内部に拡散する水素の放出速度が低下すると考えられるため、常温でのクリーニングに重点を置いたオペレーションが行われた。検出器を真空容器に導入したのち、まず約 1ヶ月間の乾燥窒素での静置と計 2ヶ月間の真空引きを行うことでアウトガスを可能な限り除去した。なお、このオペレーションは COVID-19 の蔓延に伴いイタリアがロックダウンとなっていた期間に合わせて行われた。しかしながら、検出器の構造上コンダクタンスが悪い箇所は真空引きによる水や水素の除去に限界がある。RGA (residual gas analyzer) で取得された残留ガススペクトルに大きな改善が無くなった段階で真空引きを終了、常温のガスキセノンを導入し、メタルゲッターを用いた純化が約 3 週間に渡って行われた。またこの際、同様にリザーブタンクのクリーニングも行われた。これらシステムのクリーニングが終了したのち、その後液体キセノンの導入が行われた。XENONnT では前身の XENON1T に比べ 6.3 t ほどのキセノンが追加されており、これらは全て



図 4: 液体キセノン純化システム。中央二つの真空容器に純化フィルターが、中央下の容器には純度モニターが収められている。

クリプトン蒸留装置によって純化済みとなっている。それに加え、XENON1T で用いられたものも含めた 8.5 t 全てのキセノンは必ず 1 回以上メタルゲッターにより純化されてから検出器へ導入されており、9 割程度のキセノンは 2 回の純化を受けている。

3.3 XENON1T 検出器からのアップグレード

前身である XENON1T 実験からのアップグレードにあたり、XENONnT 実験では TPC 本体と共に、検出器の高感度化のため複数のサブシステムが準備された。本節では、その中でも特に LowER 解析において大きな役割を果たした二つのシステムとして液体キセノン純化装置とラドン蒸留装置を解説する。

3.3.1 液体キセノン純化システム

前節で説明した様に、S2 信号を観測するためには液体キセノン中で電子をドリフトさせる必要があるが、酸素等の不純物はその電子を吸収することで信号を減衰させる。液体キセノン中で発生した電子が不純物によって吸収されるまでにかかる平均時間は電子寿命 (electron lifetime) と呼ばれる。キセノン TPC の運転に当たっては少なくとも TPC の最大ドリフト時間程度の電子寿命が必要であり、部材からアウトガスとして発生する不純物を除去するため、定常的に純化が行われている。XENON1T の純化システムでは、熱交換器によって一度液体キセノンを蒸発させ、ガスポンプ・ガス純化装置によって不純物を除去し、再び熱交換器で液化して検出器に戻す、という方式が取られていた。しかしながら本システムでは 50-80 standard little per minutes (SLPM) 程度の流量での純化が限界であり、8.5 t のキセノンを純化するには甚だ不十分であった。この問題を解決する



図 5: ラドン蒸留装置 [13]。右側が蒸留塔本体，左側が高流量・低ラドン放出ガスキセノンポンプ。

べく新たに建設されたのが液体純化システムである (図 4)。本装置ではクライオジェニックポンプにより-100 度の液体キセノンを経営循環することができ、ガス純化に相当して 500-1000 SLPM と、XENON1T の 10 倍の速度で純化を行うことを可能にする。フィルタ材としてはセラミックボール+銅パウダーのものとGetter材を用いたもの [12] があり、それぞれ異なる不純物除去性能や ^{222}Rn の放出量を持つことから、状況に応じて使い分けられている。SR0 における XENONnT 検出器の最大ドリフト時間はおおよそ 2.2 ms であるが、本装置の導入により電子寿命は 10-15 ms という数字を得ており、不純物による信号減衰の影響を極力抑えることに成功している。

3.3.2 ラドン蒸留装置

XENONnT 実験における、もう一つの重要なアップグレードがラドン蒸留装置である (図 5)[13]。先述の通り XENON1T 検出器における最も大きな BG は ^{222}Rn に由来しており、本装置は検出器中に放出された ^{222}Rn を崩壊する前に除去することで、 ^{214}Pb の β 事象を削減することを目的としている。ラドンはキセノンと同じ希ガスであるが、より高い沸点を持つ。そのため二相式キセノン検出器の中では気相よりも液相に留まりやすい性質を持っており、ラドン蒸留装置はその性質を利用している。検出器から蒸留装置に取り込まれたキセノンは蒸留塔内で液化・気化を繰り返す、 ^{222}Rn が濃縮されていく。逆に蒸留塔のガス相からは ^{222}Rn が除去されていくため、 ^{222}Rn フリーになったガスを取り出し、また検出器に戻すという仕組みである。 ^{222}Rn の発生源は検出器本体だけでなくガス相のケーブルなどもあるため、液相の直接純化だけでなく、ガス相において発生した ^{222}Rn を液相へ混入する前に除去することも重要である。SR0 では、運転の安定性の観点からこのガス相の

みの純化モードでの運転が行われた。SR0 の終了後さらなるテストを経て液相の直接純化モードが追加されており、現在進められている SR1 では ^{214}Pb の BG は SR0 からさらに半減することが期待されている。

なお、本装置の源流には日本の XMASS 実験で開発されたクリプトンを除去するための蒸留装置がある [14]。クリプトンはラドンとは逆に、キセノンよりも沸点が低く気相に留まりやすいことから、蒸留装置におけるクリプトンフリーなキセノンの取り出し口と、クリプトンが濃縮されたガスの取り出し口を逆向きに使うことで ^{222}Rn 除去に応用することができる。この手法は XENON100 や XENON1T 実験のクリプトン蒸留装置を用いてテストされており [15, 16]、XENONnT 実験でのラドン蒸留装置を開発するにあたってはこれらの結果に基づいてより効率的に ^{222}Rn を除去することのできる様、ガス・液体キセノンラインの接続方向などが決定されている。

4 データ解析

4.1 イベントセレクション

本解析では、2021 年 7 月から 2021 年 11 月にかけて取得された 97 日間のデータが用いられており、エネルギー範囲は 1-140 keV である。有効キセノン質量は $4.37 \pm 0.15 \text{ t}$ で、部材からのガンマ線 BG を削減するために検出器の内側部分のみを用いて解析を行なっている。図 6 に、有効体積領域 (FV) と観測されたイベントの位置を示す。

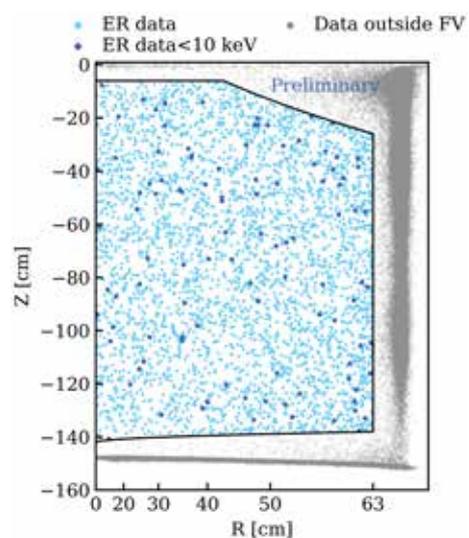


図 6: 検出器の有効体積 (FV) と、実際に観測されたイベント位置。太線が FV の領域を表しており、FV 内の事象のうち薄い点が $10 \text{ keV} < E < 140 \text{ keV}$ の事象、濃い点が Excess の領域に近い $E < 10 \text{ keV}$ の事象を表す。

データに対するイベントセレクションは主にアクシデンタルコインシデンスや多重散乱事象といったノイズ事象を排除することを目的としており、PMTのヒットパターン、S2のドリフト時間といったパラメータによるセレクションのほか、低光量におけるS1とS2の分別に関しては波形情報を用いた機械学習によるセレクションも取り入れられている。解析における閾値は主としてS1に対するヒット数で決まっており、本解析では3本のPMTによるコインシデンスが要求されている。図7に、電子反跳事象の信号に対するセレクション前後の検出効率を示す。セレクション後も2 keV以上でおよそ80%と比較的高い検出効率が保たれている。

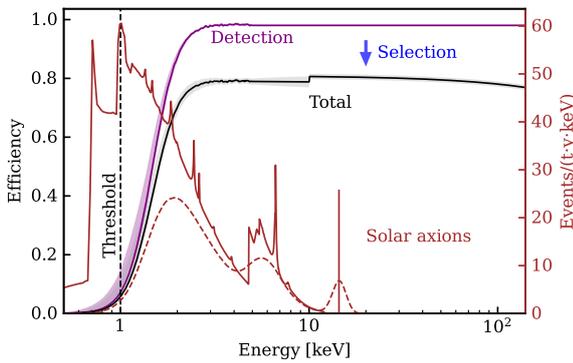


図7: エネルギー毎の検出効率と、太陽アクシオンの予想スペクトル。Detection: トリガー効率。ほぼPMTのヒット数に対する要求のみで決まっている。Total: ノイズ除去のセレクション後の検出効率。10 keV付近にある段差は、WIMPs探索のため原子核反跳事象の信号領域をブラインドしていることに起因する。各線に着く幅は1 σ の範囲を表す。Threshold: エネルギー閾値である1 keVを示す。Solar axions: 太陽アクシオンに由来する予想スペクトルを、検出器の効果を考慮する前と後を実線と点線で示す。カップリング定数はそれぞれ $g_{ae} = 3.1 \times 10^{-12}$, $g_{a\gamma} = 9.1 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$ と $g_{an}^{\text{eff}} = 8.3 \times 10^{-7}$ を仮定している。

4.2 キャリブレーションとエネルギー再構成

入射粒子がキセノンとの相互作用によって落とす全エネルギー E は、以下の様に表すことができる。

$$E = W(n_{\text{ph}} + n_{\text{el}}) = W \left(\frac{cS1}{g1} + \frac{cS2}{g2} \right) \quad (1)$$

ここで n_{ph} , n_{el} は入射粒子がキセノンとの相互作用によって落としたエネルギーから発生する、元々のシンチレーション光と電子の数である。 W はこれらの量子を発生させるのに必要な平均エネルギーで、本解析では13.7 eV/quantum という測定値が用いられている。 n_{ph} , n_{el} はそれぞれS1, S2の測定値と関連しており、検出

器の非一様性を補正した (=corrected な) 値である $cS1$, $cS2$ と、S1, S2信号にそれぞれに対する検出器のゲインを表す $g1$, $g2$ によって求めることができる。 $g1$, $g2$ の単位はそれぞれ PE/photon, PE/electron となる。

式(1)を変形すると、

$$Q_y = \frac{g2}{W} - \frac{g2}{g1} \cdot L_y \quad (2)$$

という式を得ることができる。ここで、 $L_y = \frac{cS1}{E}$, $Q_y = \frac{cS2}{E}$ である。この式を用い、単一エネルギー E を持つキャリブレーション線源に対して $cS1$, $cS2$ の値を測定して線形フィットを行うことで $g1$, $g2$ を決定し、イベントごとのエネルギーを再構成することができる。

XENONnT 検出器のキャリブレーションは、主に検出器の循環システムに放射性希ガス線源を混入し検出器内部に均等に拡散させるという手法で行われている。エネルギーの再構成においては $^{83\text{m}}\text{Kr}$ (内部転換電子: 合計エネルギー 41.5 keV), ^{37}Ar (K-shell 電子捕獲: 2.82 keV) 線源と、検出器外部から AmBe 線源を用いて中性子を照射するキャリブレーションによって副次的に発生するキセノンの同位体 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ (X線: 163 keV), $^{129\text{m}}\text{Xe}$ (X線: 236 keV) を用いている。

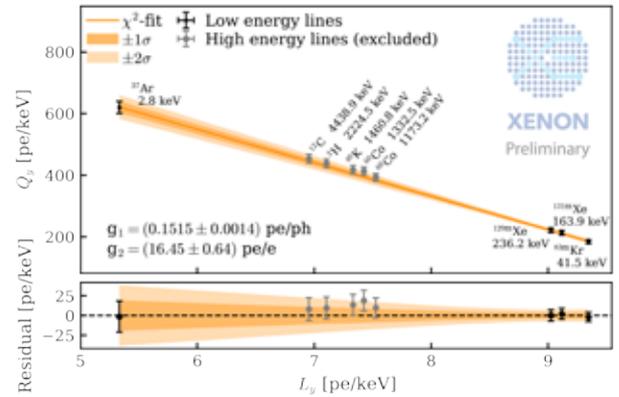


図8: キャリブレーション線源の光量 L_y と電子量 Q_y の分布 (点) およびそのフィット (バンド)。なお、BG線源からの高エネルギーピーク (薄い点) はフィットに用いられていない。下図はフィット線からの誤差を示す。

図8に、各線源によって測定された L_y , Q_y の値を示す。 $g1 = (0.151 \pm 0.001) \text{ PE/photon}$, $g2 = (16.5 \pm 0.6) \text{ PE/electron}$ という値が得られており、これらを用いてイベント毎のエネルギーの再構成をおこなった。エネルギー再構成の他、先述したセレクション、検出器の一様性、安定性、閾値の検証などがキャリブレーションをもとに評価されている。検出器の一様性や安定性の評価は主に $^{83\text{m}}\text{Kr}$ キャリブレーションが元となっており、検出器の各位置に対する光量や電荷量の相対値、2週間に1度キャリブレーションによる時間的な変動の評価などが行われている。セレクションに関しては、上記に

挙げた線源に加えて SR0 の最初に取得した ^{220}Rn 線源を用いたキャリブレーションが重要な役割を果たしている。 ^{220}Rn は検出器に混入後速やかに α 崩壊し、娘核の一つである ^{212}Pb が β 線を放出する。これは実際の検出器における最も大きな BG である ^{222}Rn および娘核の ^{214}Pb の崩壊とよく似た過程であり、低エネルギー部においては β 線のスペクトルもよく似たものとなることから、セレクションの決定や各エネルギーにおける最終的な検出効率の推定に用いられている。図 9 に、 ^{220}Rn 、 ^{37}Ar キャリブレーションのデータに対するモデルフィットを示す。 ^{220}Rn キャリブレーションにおいては閾値やフラットなスペクトル部分が、 ^{37}Ar キャリブレーションにおいては閾値やエネルギーピークがよく再現されていることがわかる。

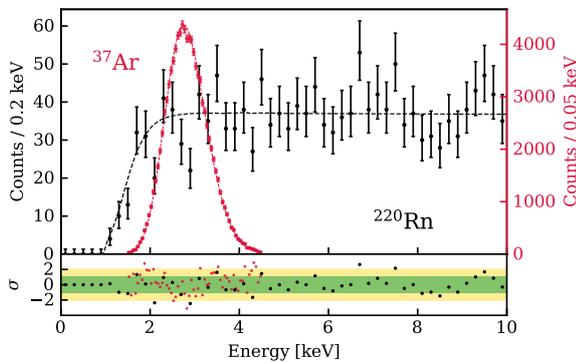


図 9: ^{220}Rn , ^{37}Ar 線源のスペクトル。各点は実データを、点線はモデルによるフィッティングを表す。

4.3 シグナルモデル

XENON1T LowER 解析と同様、シグナルモデルとして (1) 太陽アクシオン、(2) ニュートリノ異常磁気モーメント (太陽ニュートリノフラックスを仮定)、(3) ALPs や Dark photon などの Bosonic DM を仮定した。なお太陽アクシオンに関してはシグナルモデルのアップデートがあり、XENON1T で用いられたスペクトルではキセノンとの相互作用として axio-electric effect によるチャンネルのみが考えられていたが、本解析では逆プリマコフ効果も考慮に入れたスペクトルを用いている [17, 18, 19]。図 7 に検出効率と共に太陽アクシオン由来のスペクトルの計算値も示した。実線と点線がそれぞれスメアリングや検出効率などを考慮に入れる前と後となっている。ニュートリノの異常磁気モーメントや Bosonic DM に対しての計算は、XENON1T 解析と同様のものとなっている [1]。

4.4 バックグラウンドモデル

4.4.1 主要なバックグラウンド

BG モデルに関してもシグナルと同様、XENON1T のデータ解析が踏襲されている。最も大きな BG と予想されたのが ^{214}Pb のベータ崩壊による事象で、以下太陽ニュートリノ事象、検出器部材からのガンマ線の作るコンプトン散乱事象、 ^{85}Kr のベータ崩壊事象と続く。これらの事象は低エネルギー部ではほぼフラットなスペクトルを作っている。そのほか ^{136}Xe の二重ベータ崩壊や ^{124}Xe の二重電子捕獲事象や $^{83\text{m}}\text{Kr}$ キャリブレーションの残存事象などがあるが、これらは特徴的なスペクトルを作るため、XENON1T LowER excess の検証という観点ではほとんど影響しない。表 1 に主な BG 成分と、それぞれにつく外部測定からの制限をまとめる。最も大きな BG となる ^{214}Pb は上流・下流の核種からの α 線レートの違いが上限値・下限値となっている。その他、太陽 ν は Borexino 実験の測定値 [20]、検出器部材 BG はシミュレーションからの推定値、 ^{85}Kr ・ ^{136}Xe は RGMS (rare gas mass spectrometer) [21] による測定値がそれぞれ用いられている。

表 1: 主な BG 源と外部からの制限、実データのフィットから計算された 1-140 keV のイベント数。

バックグラウンド源	外部からの制限	フィット
^{214}Pb	(570, 1000)	960 \pm 120
太陽 ν	300 \pm 30	300 \pm 30
検出器部材	270 \pm 50	270 \pm 50
^{85}Kr	90 \pm 60	90 \pm 60
^{136}Xe	1560 \pm 60	1550 \pm 50

4.4.2 トリチウム BG の評価

先述の様に、XENON1T LowER Excess の候補として挙げられていたトリチウムは、直接的な測定による制限を与えることが難しいという問題があった。そのため XENONnT では、純化装置を一部バイパスすることで意図的に検出器中の水素量を増加し、そこに含まれるトリチウム量から物理データにおけるトリチウムを推定するという手法がとられた (トリチウムエンハンスドデータ, TED)。水素はキセノンに比べ沸点が低いことからガス相に蓄積することが期待されるため、ガス相の純化ループ上の水素除去装置がバイパスされた (液体キセノン純化に関しては通常通り行われた)。エンハンスファクターは水素のアウトガス量やガス相と液相における水素の濃度比などで不定性が大きいものの、コンザバティブに 10 倍以上と推定されている。TED は SR0 のデー

タ取得が終了したのち 14.3 日間に渡って取得された。観測された TED のスペクトルを解析した結果有意なトリチウムのスペクトルは観測されず、従って SR0 のデータ解析においては BG モデルにトリチウムは含めないということが決定された。

5 結果

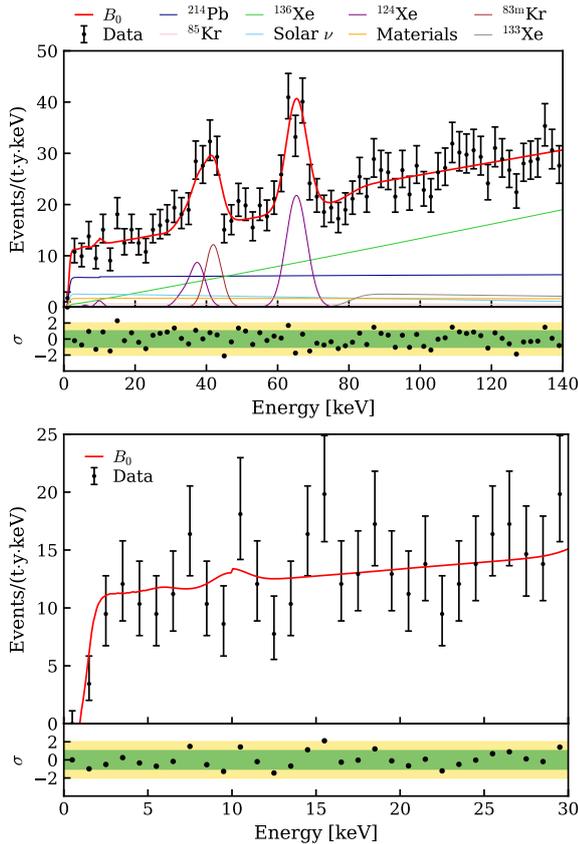


図 10: 観測されたスペクトルと、BG モデルとの比較。上図が 140 keV まで、下図が 30 keV までとなっている。上図には各 BG 成分も同時に示されている。

セレクションやエネルギー再構成、BG モデルが固まった段階で、まず始めに BG モデルの妥当性の検証としてサイドバンドである 20-140 keV にかけてのフィッティングを行なった。その結果 p-value で 0.2 という値を得たことから統計的に矛盾はないと判断し、信号領域におけるフィッティングが進められた。なお、WIMPs に対する解析も同時並行で進められていたことから原子核反跳事象の期待される領域はブラインドされたままとなっている。図 10 が、実際に観測されたデータと BG モデルの比較である。図ではビンニングされたデータを表示しているが、実際のフィッティングは XENON1T における解析と同様に unbinned maximum likelihood の手法で行われている。これらの図から分かるように BG モデルと観測されたデータは非常によく一致してお

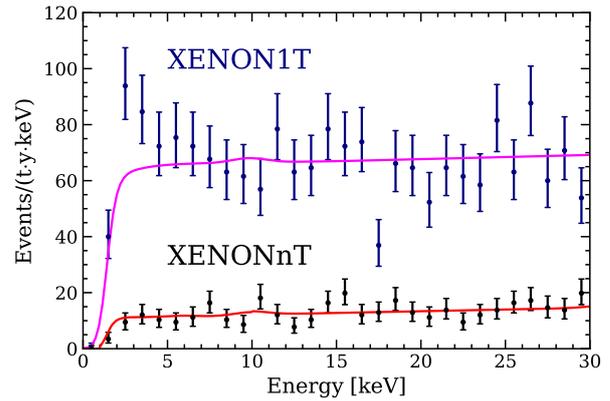


図 11: XENON1T と XENONnT で観測されたスペクトルの比較。ただし XENON1T 検出器のセレクション効率は XENONnT 実験よりも 10%程度高いが、その分の補正は含まれていない。

り、残念ながら XENON1T LowER Excess は再現されなかった。SR0 での 1-30 keV の電子反跳事象レートは $16.1 \pm 1.3 \text{ event}/(\text{keV} \cdot \text{t} \cdot \text{y})$ となり、XENON1T の 1/5 にまで減少した。これは同様の暗黒物質直接探索実験としては世界で最も低い BG レベルであり、 $2\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\text{ECEC}$ といったキセノンの稀崩壊が主要な BG となる段階にまで達している。図 11 に、XENON1T と XENONnT のスペクトルの比較を示す。

フィットの結果有意な信号を得ることができなかったことから、太陽アクシオン、ダークフォトン、ALPs、ニュートリノの異常磁気モーメントの 4 つの物理モデルに関し、あらためて 90% CL の上限値をつけることとなった。それぞれに対する上限値を図 12 に示す。太陽アクシオンに関しては、 g_{ae} 、 $g_{a\gamma}$ 、 g_{an}^{eff} の 3次元での計算を g_{ae} vs $g_{a\gamma}$ のスペースに射影している。また、 ^{57}Fe からの太陽アクシオンに由来する 14.4 keV ピークに対する上限値として $20 \text{ event}/(\text{t} \cdot \text{y})$ を得ている。Bosonic DM に関しては $^{83\text{m}}\text{Kr}$ キャリブレーションからの残留事象を除くため 39-44 keV の間がフィットから除かれており、探索範囲における Local significance の最大値は 1.8σ となった。また XENON1T LowER excess を最もよく説明する 2.3 keV のピークは、およそ 4σ で排除されている。太陽ニュートリノが持つ異常ニュートリノ磁気モーメントに対する上限値は $\mu_\nu < 6.3 \times 10^{-12} \mu_B$ となった。これらの物理現象に対する探索に加えてトリチウムのスペクトルを仮定した場合のフィットも行われており、ベストフィットはゼロ、上限値は $14 \text{ event}/(\text{t} \cdot \text{y})$ 、濃度に換算して $5.4 \times 10^{-26} \text{ mol/mol}$ に相当する。XENON1T LowER excess が残留トリチウムに由来するものであった場合、先述した XENONnT 建設時の水や水素を除去するための取り組みが功を奏したと考えられる。

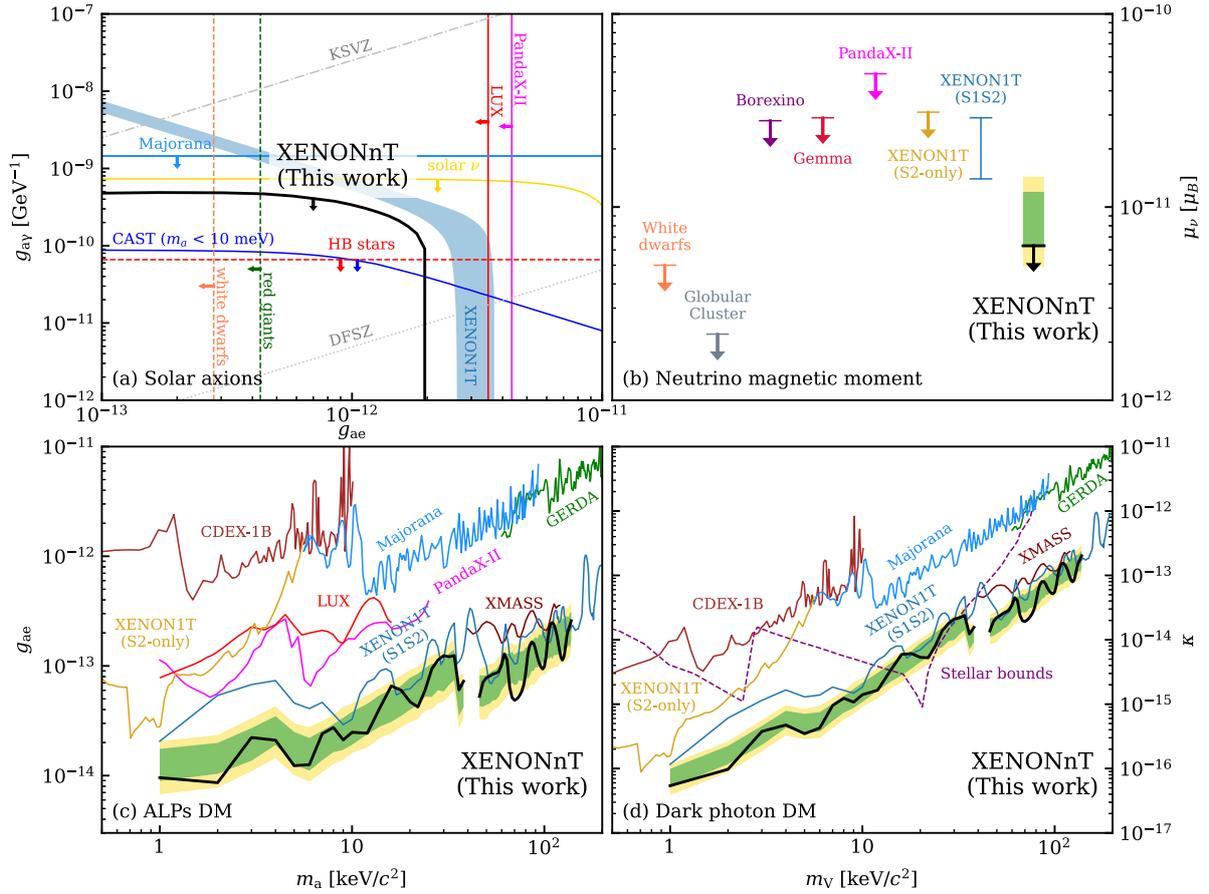


図 12: 各物理モデルに対する 90%CL の上限値 [2]。黒線が本解析による実測値，バンドは $1\sigma \cdot 2\sigma$ で期待される範囲を示す。他実験による制限値と天文観測からの制限値も同時に示している。

6 まとめと展望

本稿では、2022年7月に発表された、XENONnT実験の初期データを用いた低エネルギー電子反跳事象の観測を解説させていただいた。XENONnT実験において2021年7月から11月にかけて取得された約100日間のデータを用いた解析の結果、残念ながら前身のXENON1T実験で観測された様なBGモデルからの超過は見られなかった。BGレートは世界で最も低いレベルとなっており、太陽アクシオン、ニュートリノの異常磁気モーメント、Bosonic DM (ALPs, 暗黒光子) に関して世界最高となる上限値をつけている。

現在、XENONnT実験ではSR0のデータを用いたWIMPsに対する解析が進んでいると共に、SR1のデータ取得も進んでいる。既に述べた様に、SR1ではラドン蒸留装置の運転の改善によりSR0からの更なるBGの削減が見込まれている。XENONnT実験の今後の進展を是非ご期待頂きたい。

7 謝辞

本実験は、日本からは神戸大学・東京大学・名古屋大学が参加するコラボレーションにより行われた。また本研究はJSPS科研費，特別研究員制度(海外含む)，およびJST創発的研究支援事業の助成を受けて行われている。

参考文献

- [1] E. Aprile *et al.* (XENON). *Phys. Rev. D*, 102, 072004 (2020).
- [2] E. Aprile *et al.* (XENON). *Phys. Rev. Lett.*, 129, 161805.
- [3] Yue Meng *et al.* (PandaX-4T). *Phys. Rev. Lett.*, 127, 261802.
- [4] J. Aalbers *et al.* (LZ). *arXiv:2207.03764 [hep-ex]*.
- [5] 山下雅樹, 風間慎吾. 高エネルギーニュース 第39巻3号 (2020).

- [6] E. Aprile *et al.* (XENON). *Astropart. Phys.*, *34*, 679 (2011).
- [7] E. Aprile *et al.* (XENON). *Eur. Phys. J. C*, *77*, 881 (2017).
- [8] K. Fujii *et al.* *NIM-A*, *795*, 293 (2015).
- [9] E. Aprile *et al.* (XENON). *JCAP* 2020 (11), 031.
- [10] E. Aprile *et al.* (XENON). *arXiv:2112.05629 [physics.ins-det]*.
- [11] A. Antochi *et al.* *JINST*, *16*, P08033.
- [12] J. Howlett G. Plante, E. Aprile and Y. Zhang. *arXiv:2205.07336 [physics.ins-det]*.
- [13] C. Huhmann M. Murra, D. Schulte and C. Weinheimer. *arXiv:2205.11492 [physics.ins-det]*.
- [14] K. Abe *et al.* (XMASS).
- [15] E. Aprile *et al.* (XENON). *Eur. Phys. J. C*, *77*, 275 (2017).
- [16] E. Aprile *et al.* (XENON). *Eur. Phys. J. C*, *77*, 358 (2017).
- [17] L. T. Wang X. P. Wang W. Xue C. Gao, J. Liu and Y. M. Zhong. *Phys. Rev. Lett.*, *125*, 131806 (2020).
- [18] J. L. Newstead J. B. Dent, B. Dutta and A. Thompson. *Phys. Rev. Lett.*, *125*, 131805 (2020).
- [19] K. Hamaguchi T. Abe and N. Nagata. *Phys. Lett. B*, *815*, 136174 (2021).
- [20] M. Agostini *et al.* (BOREXINO). *Nature*, *562*, 505 (2018).
- [21] S. Lindemann and H. Simgen. *Eur. Phys. J. C*, *74*, 2746 (2014).