

XMASSの現状と展望

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設

小林 兼好

kenkou@icrr.u-tokyo.ac.jp

平出 克樹

hiraide@icrr.u-tokyo.ac.jp

2013年(平成25年)2月12日

1 はじめに

近年の宇宙波背景放射の観測結果から、宇宙の組成のうち通常の物質は約4%にすぎず、その5~6倍は未知の物質(暗黒物質)が占めていると考えられている。暗黒物質は、銀河の回転速度分布や重力レンズ効果の観測、宇宙の大規模構造のシミュレーション結果等からもその存在が指摘され、我々の太陽系近傍にもおよそ 0.3 GeV/cm^3 の密度で存在すると考えられているが、その正体はいまだ不明である。暗黒物質の候補の一つはWIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) と呼ばれ、その中でも有力なのが超対称性理論(SUSY)で存在が予言されているニュートラリーノである。そのため、暗黒物質探索は宇宙物理の分野だけでなく素粒子物理の分野からも注目され、世界中の様々な実験グループが暗黒物質の発見を目指して熾烈な競争を繰り広げている。

XMASS (エクスマス) 実験は、低エネルギー閾値・低バックグラウンドの大型液体キセノン検出器を用いて、

- 暗黒物質の直接探索
(Xenon detector for weakly interacting MASSive Particles)
- $pp/\text{}^7\text{Be}$ 太陽ニュートリノの観測
(Xenon MASSive detector for solar neutrino)
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索
(Xenon neutrino MASS detector)

などを行う多目的実験である [1]。段階的に検出器を大型化していく計画で、2007年より第1段階の暗黒物質探索に特化した検出器の建設を始め、2010年末から2012年6月にかけてデータ収集を行った。予期せぬバックグラウンド源の特定に時間がかかったが、ついに物理結果が出始めてきた。以下では、最新の物理結果を報告するとともに、今後の展望について述べる。

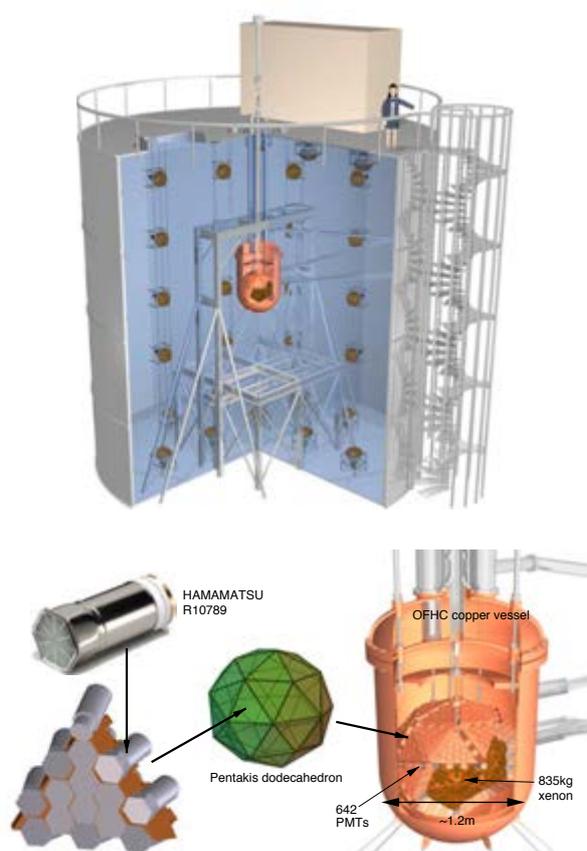


図 1: XMASS 検出器の概略図。

2 XMASS 検出器

2.1 検出器の概要

XMASS 検出器は、岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下 1,000 m に設置されている。図 1 に XMASS 検出器の概略図を示す。XMASS 検出器は、中心に配置された液体キセノン検出器 (Inner Detector; ID) とその外側を覆う水チェレンコフ検出器 (Outer Detector; OD) で構成されている。

液体キセノン検出器は、内部の約 1 トンの液体キセ

ノンを $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ に保つ必要があるため、無酸素銅製の真空断熱容器になっている。液体キセノンからのシンチレーション光は、無酸素銅でできた 60 面体の構造体に向きに取り付けた 642 本 (六角型 630 本, 丸型 12 本) の浜松ホトニクス社製光電子増倍管 (PMT) R10789 によって検出される。この PMT は、本実験のために開発されたもので、液体キセノンの発光波長 ($\sim 175\text{ nm}$) における量子効率は 28% 以上ある。また、光電面の形状を六角形にして蜂の巣状に敷き詰めることで、62.4% という高い光電面被覆率を達成した。この 60 面体の構造体が液体キセノンに直接浸っており、PMT に囲まれたアクティブな液体キセノンの総重量は 835 kg である。

外側の水チェレンコフ検出器は、直径 10 m、高さ 10.5 m の円筒形で、内壁に 72 本の浜松ホトニクス社製 20 インチ光電子増倍管 R3600 が設置されている。検出器外部からのガンマ線および中性子の遮蔽体としての役割だけでなく、宇宙線ミュオン起源のバックグラウンド事象の veto としても用いることができる。

液体キセノン検出器および水チェレンコフ検出器からの信号は、水タンク上部のエレクトロニクスハットで A/D 変換される。図 2 は XMASS データ収集システムの概略図である。液体キセノン検出器からの信号は、プリアンプで増幅後 2 つに分けられ、スーパーカミオカンデ I-III で使用されていた Analog-Timing-Module (ATM) によって電荷量および時間情報を記録するとともに、CAEN 社製 Flash-ADC V1751 を用いて波形情報を取得する。また、広いエネルギー領域でのバックグラウンド事象のスタディのために、およそ 10 本毎のアナログ信号和 (PMTSUM) の波形情報を CAEN 社製 Flash-ADC V1721 を用いて記録する。各チャンネルのヒットの閾値は 0.2 photoelectron (p.e.) 相当で、ヒット数に基づいてトリガーが生成される (ID トリガー)。水チェレンコフ検出器からの信号は、同様に ATM を用いて記録され (閾値は 0.4 p.e. 相当), OD トリガーを生成する。通常データ収集におけるトリガーレートは、ID トリガーが約 4 Hz, OD トリガーが約 7 Hz である。

また、安定したデータ収集を維持するために液体キセノン検出器の状態 (キセノンの温度・圧力・液面レベル・断熱真空の真空度など) や各光電子増倍管の印加電圧・

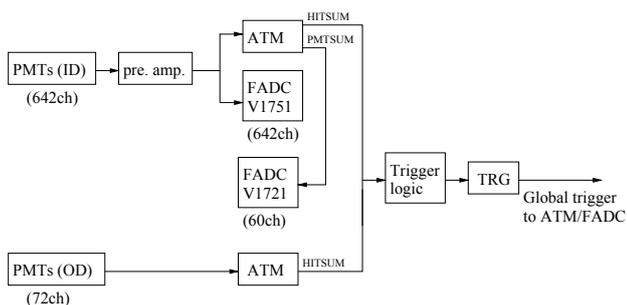


図 2: XMASS データ収集システムの概略図。

電流など約 1,000 チャンネルものセンサーを Web ベースの監視システムによって常時監視している。特に液体キセノンの状態に関するセンサーは 1 秒ごとにチェックされ、即座に異常を検知できるようになっている。

2.2 検出器の較正

光電子増倍管のゲイン安定性やトリガー効率を測定するために、60 面体の構造体の内壁にテフロン製のディフューザをつけた青色 LED が計 8 個取り付けられている。週一回低光量の LED データを取得し、各光電子増倍管の 1 p.e. ゲインの安定性をモニターした結果、約一年半におよぶコミッショニングラン期間中 $\pm 5\%$ 以内で安定していた。また、トリガー効率はモンテカルロシミュレーションとよく一致していた。

図 3 は液体キセノン検出器の内部線源較正装置の概略図である。 ^{57}Co , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{55}Fe , ^{137}Cs などの各種ガンマ線源を、無酸素銅製ロッドの先端に取り付け、検出器上部から z 軸に沿って検出器内部まで挿入する。 z 軸上の位置は、ステッピングモータにより 1 mm 以内の精度で制御できる。また、ゲートバルブを閉じることで検出器本体のオペレーションを止めることなく、線源の交換ができる。図 4 は ^{57}Co 線源 (主に、122 keV) を液体キセノン検出器中心 ($z = 0$) に導入した際の光量分布をデータとモンテカルロシミュレーションで比較したものである。その結果、光量は約 15 p.e./keV と、我々が想定した光量よりおよそ 3 倍多いことが分かった。これは当初は液体キセノン中の水などの不純物による吸収度を多く見積もっていたが、次節で述べる純化などの努力の結果、予想以上に不純物を少なくできたためである。

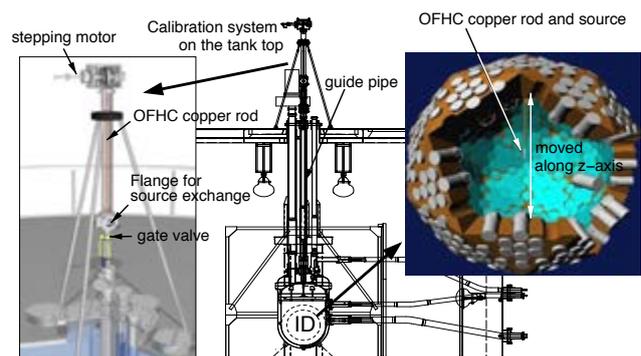


図 3: 液体キセノン検出器の内部線源較正装置の概略図。

図 5 にキャリブレーションデータとシミュレーションのエネルギースケールの比較を示した。データとシミュレーションの違いは、検出器応答モデルの不完全性のほかにシンチレーション光の発光量の非線形性のモデリングからのずれに由来する。我々のキャリブレーションでは ^{55}Fe からの 5.9 keV ガンマ線が最も低エネルギーのデータポイントで、さらに低エネルギーでのエネル

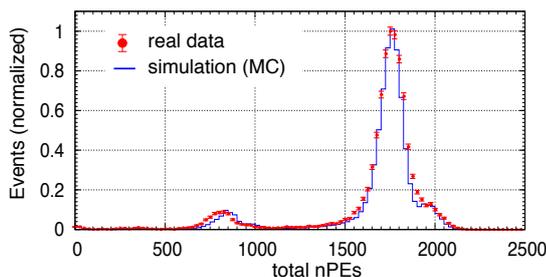


図 4: ^{57}Co 線源を検出器中心に導入した際の光量分布。

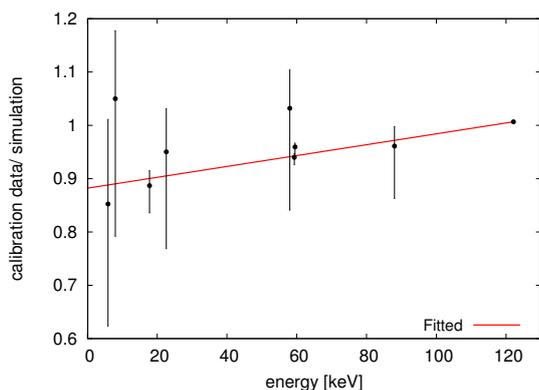


図 5: キャリブレーションデータとシミュレーションのエネルギースケールの比較。

ギースケールは図の直線フィットを用いて外挿して求めている。

なお、ここでは紹介しきれなかった検出器の詳細については文献 [2] を参照されたい。

3 建設およびコミッショニング

表 1 に XMASS 実験のこれまでの経緯をまとめた。2007 年 8 月より実験ホールの掘削工事が始まり、一年後の 2008 年 8 月に完成した。続いて水タンクの建設に着手し約半年間で水タンクが完成した。そして、いよいよ 2009 年 12 月より液体キセノン検出器の組み立てを開始した。組み立て作業は水タンク内に設置したクリーン

表 1: XMASS 実験のこれまでの経緯。

2007 年 8 月	実験ホール掘削着工
2008 年 8 月	実験ホール完成
2009 年 3 月	水タンク完成
2009 年 12 月	液体キセノン検出器の組み立て開始
2010 年 2 月	光電子増倍管の取り付け完了
2010 年 8 月	真空断熱容器の製作完了
2010 年 9 月	XMASS 検出器の建設完了 蒸留によるキセノンの純化
2010 年 10 月	検出器へ液体キセノンの導入 コミッショニングラン開始
2012 年 6 月	コミッショニングラン終了

ブース内で行われた。60 面体の構造体を組み上げ、光電子増倍管を取り付けるのにおよそ三ヶ月を要した。真空断熱容器の製作には想定外のような苦労があり予定より約半年遅れたが、2010 年 8 月に出来上がって無事液体キセノン検出器の設置が終了した。組み立て作業期間中、水タンク内の空気中のラドン濃度は約 200 mBq/m^3 (通常の大気中濃度の 1/100) に、空気の清浄度はクラス 1,000 ($0.5 \mu\text{m}$ 以上の微粒子数が $1,000 \text{ ft}^{-3}$ 以下) に保たれた。その後、約一ヶ月間でキセノン循環ラインの設置および水チェレンコフ検出器の 20 インチ光電子増倍管の取り付けを行って、2010 年 9 月に全ての建設が完了した。

ところで、市販のキセノンには $0.1\sim 1 \text{ ppm}$ のクリプトンが含まれており、その放射性同位元素 ^{85}Kr (半減期 10.76 年) が XMASS 実験にとってバックグラウンド源となり得る。そこで、我々は蒸留によるキセノンの純化装置を開発し [3]、キセノンを検出器に導入する前にキセノンの純化を行った。この装置は一回の処理でクリプトン濃度を 5 桁減少させることができ、純化されたキセノンの回収効率は 99% である。処理速度は 4.7 kg/h で、1.2 トンのキセノンの蒸留が約 10 日で完了した。蒸留後のクリプトン濃度を大気圧イオン化質量分析装置 (API-MS) を用いて測定したところ、有意な信号は検出されず Kr/Xe の上限値 2.7 ppt が得られた。

キセノンは蒸留後、リザーバータンクに液体の状態保持されていた。2010 年 10 月に初めてキセノンの検出器への導入が行われた。図 6 にキセノンの循環ラインのフロー図を示す。まず、リザーバータンク内に設置されたヒーターで液体キセノンを蒸発させる。蒸発したガスキセノンをキセノン純化ゲッターに通し、検出器に設置された冷凍機で再び液化して検出器に導入する。キセノンの導入はガス換算で 30 L/min のスピードで行われ、5 日間かかった。その後、液体キセノンをリザーバータンクに回収した。回収は液体の状態のまま 2 L/min のスピードで行われ、およそ 3 時間で完了した。この一連の純化・導入・回収作業を 2 回繰り返した結果、 ^{57}Co の光量が最初の導入時に比べ約 16% 増加した。定常状態に達した後は、蒸発したキセノンガスを冷凍機で冷却・液化して検出器に戻すことで検出器内の液体キセノンの温度をおよそ $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、蒸気圧 1.6 気圧 に保持する。

2010 年 10 月から 2012 年 6 月までコミッショニングランを行い、この期間中様々な条件でデータを取得してきた。検出器の特性を理解するために、液体キセノンの圧力 (密度) を変えたり、酸素を加えたり、検出器を温めて液体キセノンを対流させるなどして液体キセノンの光学特性を変化させてデータ収集を行った。また、外部起源バックグラウンド理解のために検出器内に液体キセノンの代わりにガスキセノンを満たしてデータ収集を行ったりした。

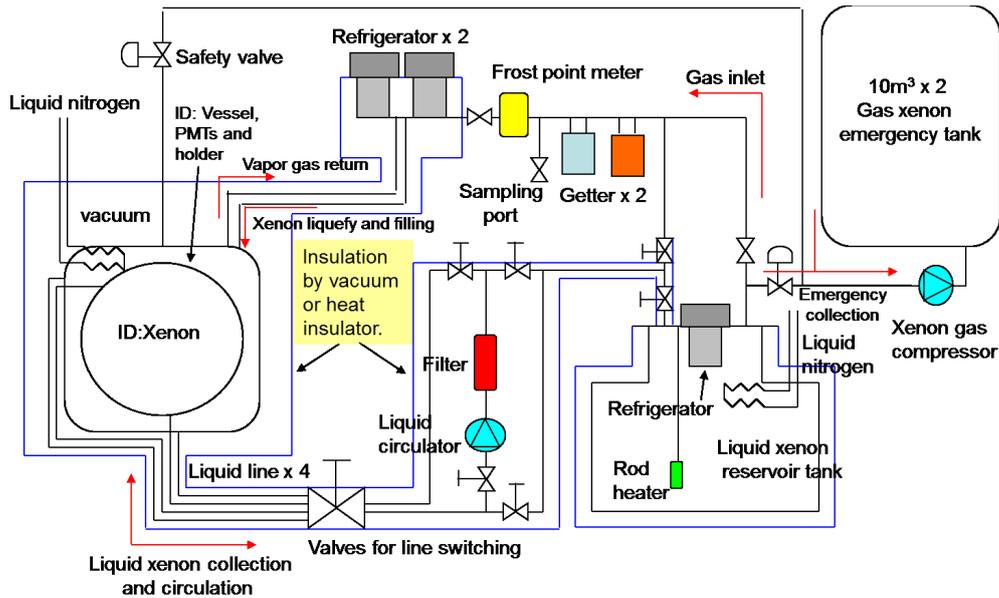


図 6: キセノンの導入および循環ラインのフロー図。

4 残存バックグラウンド

検出器の内部にある液体キセノン中のバックグラウンドを測定したところ、 ^{222}Rn が 8.2 ± 0.5 mBq、 ^{220}Rn が 0.28 mBq 以下、また、Kr に関しては前述の通り 2.7 ppt 以下とほぼ期待通りの結果となった。ところが、外部由来のバックグラウンドに関しては、想定よりも大きいことがわかった。最終的には発生点の再構成を行い、検出器の内側部分のみを使用するカット（FV カット）をかけて落とすが、FV カット前では目標バックグラウンドレベルからは約 2 桁高い。コミッショニングに際しさまざまなデータをとってきた結果、バックグラウンドの主な要因は図 7 に示す PMT のクォーツガラスと金属側面の間にシール材として使用したアルミニウムであることがわかった。我々はこのシール材のアルミニウムを含む全ての部材のバックグラウンドレベルはゲルマニウム検出器で測定してきたが、このアルミニウムはウラン系列でも検出効率の低い上流 ^{238}U と下流の ^{210}Pb が多く含まれることがわかった。

図 8 は次章で説明するカットを施したあとのデータとバックグラウンド MC の比較を示す。暗黒物質探索に重要な 70~140 p.e. (5-10keV_{ee}) ではほぼシール材のアルミニウムから期待されるバックグラウンドで説明できる。当初一番大きいと考えていたバックグラウンドは PMT 本体が含有する放射性不純物から期待されるバックグラウンドである。70 p.e. 以下の低エネルギー領域はクッション材として利用した GORE-TEX のバックグラウンド MC だが、仮定によっては図にあるように説明できるがまだはっきりとは理解できていない。またアルミニウムからのバックグラウンドよりはずっと小さいが PMT のホルダーである銅の表面にも ^{210}Pb が付着して

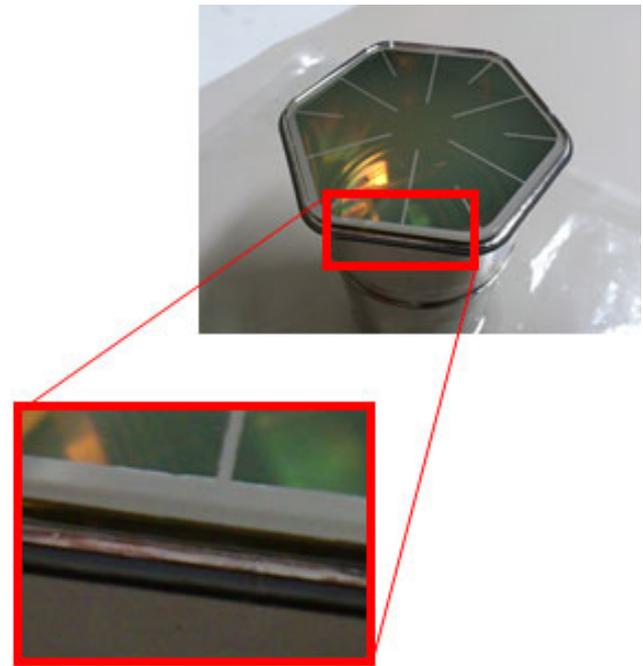


図 7: 上が XMASS の ID で使用されている PMT の光電面部分で、下が主なバックグラウンド源となっているクォーツガラスと金属側面のシール部分の拡大図。

いることがわかった。これら検出器表面についた放射性不純物から生じる事象は本来 FV カットにより落ちることを想定していたが、一部ヒットパターンが FV の内側で生じた事象と似て落ちないものがあり、現在そのようなバックグラウンドが落とせるプログラムの改良中である。FV カットを施すことより本来の暗黒物質探索が行われるが、FV カットを施さなくても XMASS のバックグラウンドレベルは低い。そこでこの低バックグラウンド性、液体キセノンの大発光量からくるエネルギー低閾値を利用し以下のような解析を行った。

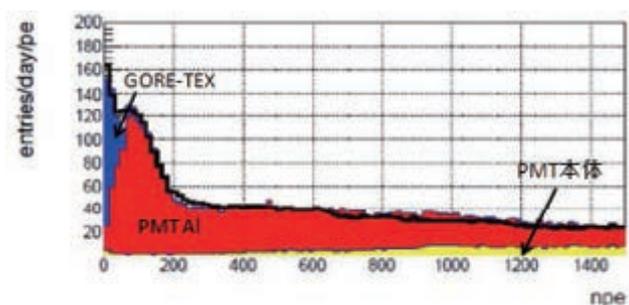


図 8: p.e. 分布。線がデータ、ヒストグラムがシール材のアルミニウムの MC、PMT 本体からくるバックグラウンド MC、GORE-TEX からくるバックグラウンド MC (但し、バックグラウンド源になりうる ^{14}C が含まれる最近生成された C が 7.5% 含まれ、GORE-TEX 内に含まれる液体キセノンが発光し、減衰長は 0.3mm とした場合) を示す。

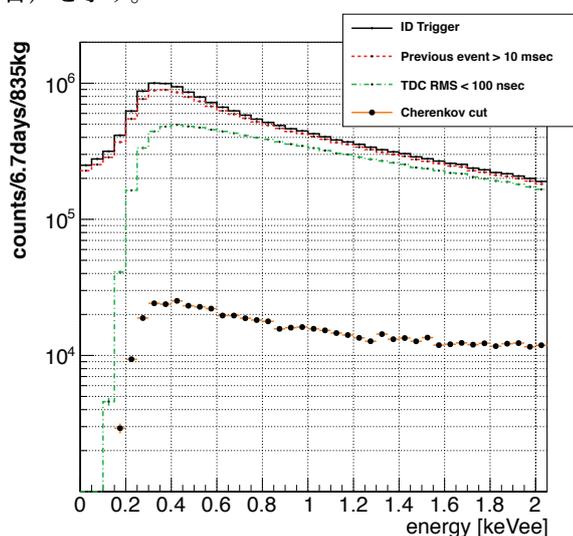


図 9: 各データリダクションステップにおけるエネルギースペクトル。

5 低質量の暗黒物質探索

暗黒物質の最も有力な候補である WIMPs は、原子核との弾性散乱による原子核反跳を観測することにより直接探索することができる。多くの超対称理論が質量が $100 \text{ GeV}/c^2$ 以上で、スピンの依存しない場合の WIMPs-核子断面積が $10^{-41} \sim 10^{-47} \text{ cm}^2$ というパラメータ領域を予言しているが、質量 $10 \text{ GeV}/c^2$ 付近で断面積が 10^{-40} cm^2 程度のパラメータ領域が最近注目を浴びている。この低質量の領域に DAMA, CoGeNT, CRESST が WIMPs の信号を示唆する結果を報告している一方で、CDMS II や XENON 実験ではその領域が排除されており、いまだに決着がついていない。

そこで、今回 XMASS 実験では粒子弁別を行わず、また検出器の全体積を用いることで系統誤差を小さく抑え、低エネルギー閾値で低質量の暗黒物質探索を行った。この解析は 2012 年 2 月に取得した 6.7 日分のデータを用いて行われた。

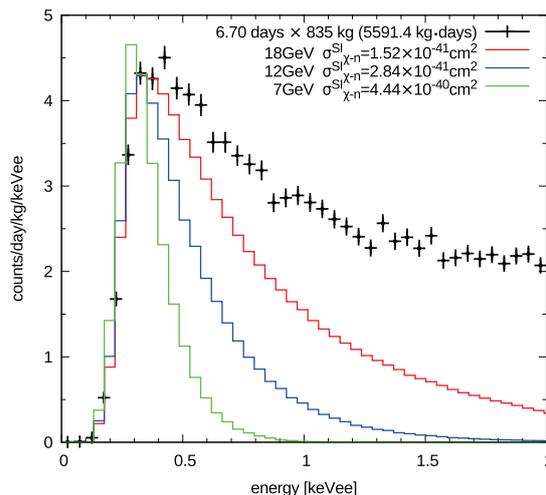


図 10: 期待される WIMPs のエネルギースペクトルとデータの比較。

図 9 に液体キセノン検出器でトリガーがかかった全事象のエネルギースペクトルを示す。バックグラウンド事象を除くために、時間情報を用いて以下のデータリダクションを行う。まず、高エネルギー事象の直後に生ずるノイズ事象を取り除くために、直前の事象との時間差が 10 ms 以上であることを要求する。次に、PMT アフターパルスを含む事象を除くためにヒットの時間分布の RMS が 100 ns 以内であることを要求する。最後に、光電子増倍管の光電面に含まれる ^{40}K の崩壊で生成した電子によるチェレンコフ事象を取り除く。チェレンコフ事象が液体キセノンの発光定数に比べ短時間の発光であることに着目し、全ヒットのうち最初の 20 ns の間に検出されるヒットの割合が 60% 以上の事象をチェレンコフ事象としてカットする。

図 10 は、期待される WIMPs のエネルギースペクトルとデータの比較である。スピンの依存しない場合の WIMPs-核子断面積に対する保守的な制限を求めるために、各 WIMPs 質量において期待されるスペクトルが観測されたスペクトルを超えない最大の断面積を求めて上限値とした。この解析において、エネルギー閾値はトリガー効率 50% 以上となる 0.3 keV_{ee} に設定された。こうして得られたスピンの依存しない場合の WIMPs-核子断面積に対する 90% CL の上限値を図 11 に示す。最も大きな系統誤差は、液体キセノンの反跳原子核に対するシンチレーション発光効率 (\mathcal{L}_{eff}) の不定性で、図中ではバンドとして示されている。DAMA や CRESST で報告されている信号領域の一部を排除する結果が得られた [4]。

6 太陽アクシオン探索

XMASS で実現された、低バックグラウンド、大質量検出器は暗黒物質探索以外で有効になる。その 1 つが太陽アクシオン探索だ。強い相互作用の CP 問題を解決す

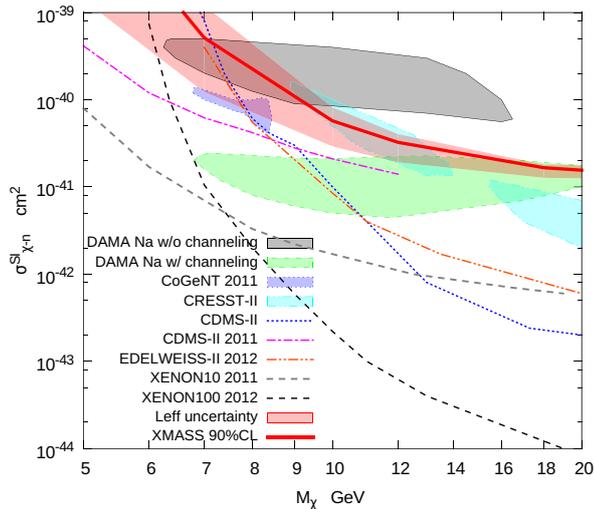


図 11: スピンに依存しない場合の WIMP_s-核子断面積。太実線は L_{eff} を除いたすべての統計，系統誤差を考慮に入れた XMASS による結果 (90% CL)，帯は L_{eff} による不定性を表す。

るために生み出されたアクシオンは、これまでに光子、核子、電子との反応を利用し、さまざまな実験で探索されてきたが、発見には至っていない。アクシオンと電子の反応の探索では、間接的な観測である赤色巨星の観測がもっとも強い制限を与えている (図 14 参照)。直接測定では太陽から来るアクシオン (太陽アクシオン) を探索し、ゲルマニウムやシリコンの検出器を用い探索されてきた。XMASS でも同様に太陽アクシオンと液体キセノン中の電子との反応を利用し探索する。図 12 は液体キセノン中で反応が起きたときに期待されるエネルギー分布である。アクシオン質量が 1 keV 以下の小さい場合はピークが 1 keV 以下に来ることから、XMASS の持つ特徴である発光量が大きいことが生きてくる。解析方法は前節同様のカットを施したデータを用いる。図 13 はエネルギー分布の比較を示す。点で示されたデータの分布はヒストグラムで示したアクシオン信号から期待されるシミュレーションのエネルギー分布とは合致しなかった。上限値を計算するために今回は低エネルギーのバックグラウンド源を理解していないので、保守的に 0.3 keV 以上のビンでデータを期待値が越えないような値をとった。

図 14 に過去の実験と我々の電子とアクシオンのカップリング、 g_{aee} に対する制限結果を示した。アクシオンの質量が低い領域では $g_{\text{aee}} < 5.4 \times 10^{-11}$ の制限を与えた。これはアクシオンとの反応を直接測定した実験では最良の結果である。また、10-40 keV の領域で与えた制限はこれまでのどの制限よりも強い結果である [5]。

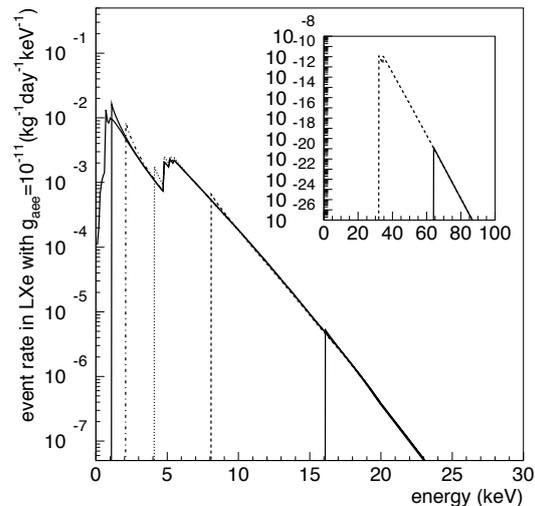


図 12: 液体キセノン中でのアクシオン反応で期待されるエネルギー分布 (検出器のエネルギー分解能は考慮されていない)。おのおの左からアクシオンの質量が 0, 1, 2, 4, 8, 16 keV の場合を示し、右上図は 32, 64 keV の場合を示す。5 keV 付近で減っているのはキセノンの L シェルの吸収による。

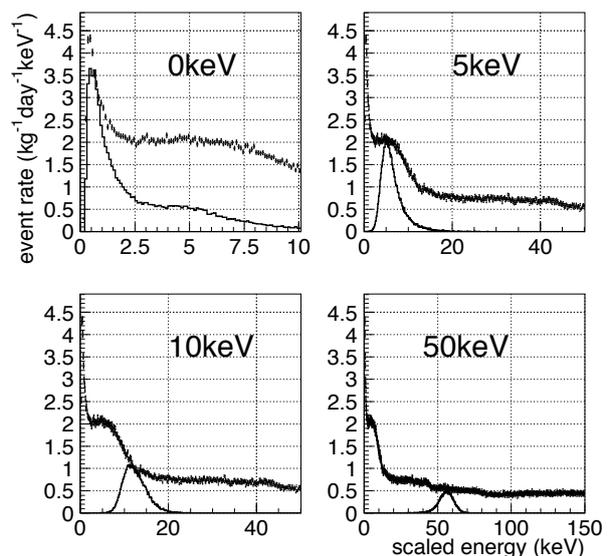


図 13: データ (誤差棒付き点) とアクシオンの信号シミュレーション (ヒストグラム) のエネルギー分布の比較。おのおのアクシオンの質量が 0, 5, 10, 50 keV のときを示す。アクシオン信号シミュレーションは 90% CL での許される最大の g_{aee} の場合を示す。

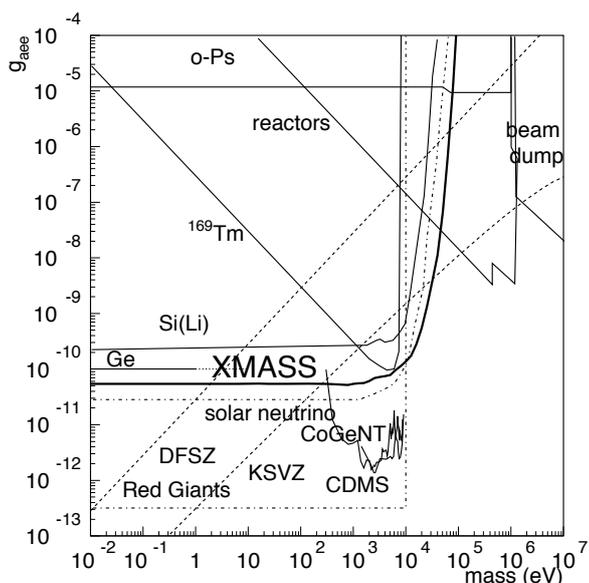


図 14: g_{aee} に与える制限。横軸はアクシオンの質量である。太実線が XMASS、その他の実線は他の実験、一点破線は赤色巨星、太陽ニュートリノフラックスからの制限、点線は DFSZ, KSVZ モデルからの予測値を示す。

7 展望

現在もっとも良い制限値を出している XENON100 実験の結果より 1 桁以上上回る感度をめざし XMASS-1.5 実験を計画している。この感度を達成するには有効体積でターゲット質量を 1 トンにし、検出器表面のバックグラウンドを減らす必要がある。前述の通り XMASS 検出器の主バックグラウンド源は PMT のシール材であるアルミニウムが原因であることがわかった。我々はすでにバックグラウンドのないきれいなアルミニウムを保有しているので、これを使用して PMT を抜本的に改造し、表面バックグラウンドのない検出器を製作する予定である。また、たとえ検出器表面で発生する放射線からおこる事象があっても近くでおきた事象により PMT に感度を持たせ検出器内側で起こった事象に似させないために、PMT の光電面を現状のフラットな形ではなく丸みを帯びた形に改良する計画を進めている。図 15 に XMASS-1.5 の感度曲線を示す。XENON100 の後継実験である XENON1T は 2015 年にデータ取得開始予定であり、我々はそれより速く XMASS-1.5 を稼働させたいと考えている。

現 XMASS 検出器に関しては最大限バックグラウンドを落とし今年の夏に再稼働させるべく改良を行っている。主要なバックグラウンド源であるシール材のアルミニウムは除去が難しいため、図 16 のような銅のカバーを着けることでバックグラウンドへの影響を小さくする。銅の表面についた ^{210}Pb については電解研磨を施し除去する。除去後に再度 ^{210}Pb を付着させない環境も構

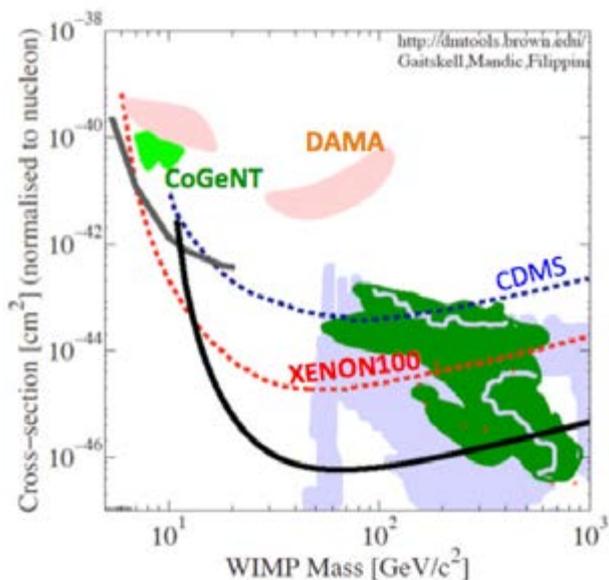


図 15: 暗黒物質探索実験の感度の比較。実線が FV カットを利用した XMASS-1.5 の感度曲線を示す。



図 16: シール材のアルミニウムを覆うための銅製カバー。

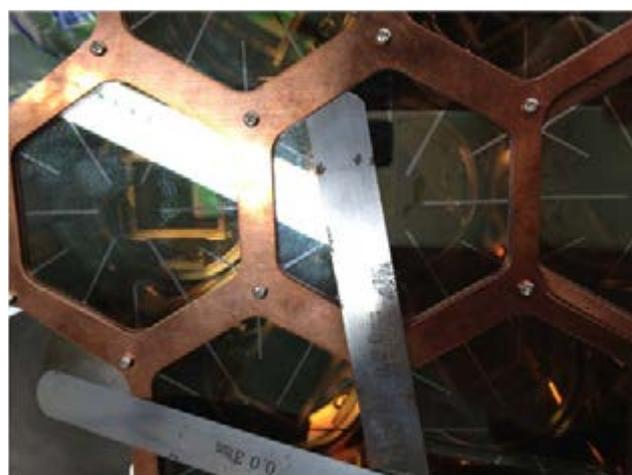


図 17: PMT 表面に溝をなくすための銅製のカバー。

築中である。また、表面の構造が複雑であると表面の溝で発生する事象が検出器内側で起こった事象に似たヒットパターンを作ることがある。このため図 17 のようにカバーを施し、溝を減らすデザインを検討している。シミュレーションでは改良後には暗黒物質の信号領域になる 5-10 keV_{ee} では現状のバックグラウンドレベルと比較し 2 桁落ちる見通しがたっている。改良後には通常の暗黒物質だけでなく、今回紹介した低質量の暗黒物質探索でも低バックグラウンド化に加え季節変動を探索することにより飛躍的に感度を向上させることができる。同様に太陽アクシオン探索でも感度の向上が期待される。

参考文献

- [1] Y. Suzuki, arXiv:hep-ph/0008296.
- [2] K. Abe *et al.* (XMASS Collaboration), arXiv:1301.2815.
- [3] K. Abe *et al.* (XMASS Collaboration), *Astropart. Phys.* **31**, 290-296 (2009).
- [4] K. Abe *et al.* (XMASS Collaboration), *Phys. Lett. B* **719**, 78-82 (2013).
- [5] K. Abe *et al.* (XMASS Collaboration), arXiv:1212.6153.