



液体キセノンを用いた暗黒物質探索

東大宇宙線研 平出克樹

2016年12月9-10日

平成28年度ICRR共同利用研究成果発表会

XMASS実験

- 液体キセノンを用いた多目的素粒子実験

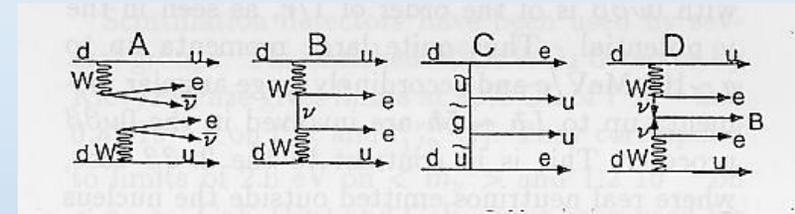
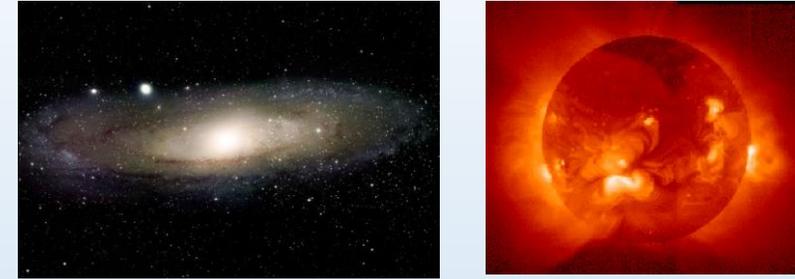
- 暗黒物質の直接探索
- pp/⁷Be太陽ニュートリノの観測
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索

- 神岡地下1,000 mに
極低放射性バックグラウンド環境を構築

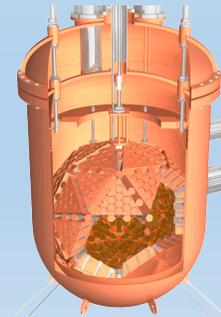
- γ 線に対する液体キセノン(密度3 g/cm³)
の高い自己遮蔽能力

- 第1段階: XMASS-1

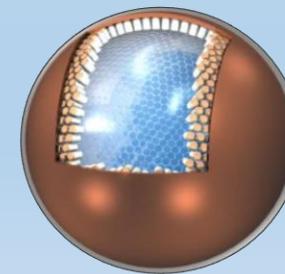
- 2010年12月- : コミッショニングラン
- 2012年5月- : 検出器改修作業
- 2013年11月- : データ収集再開



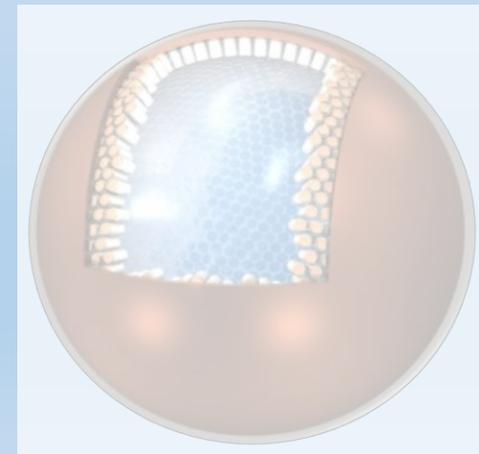
XMASS-1
(total ~1ton)



XMASS-1.5
(total ~6tons)

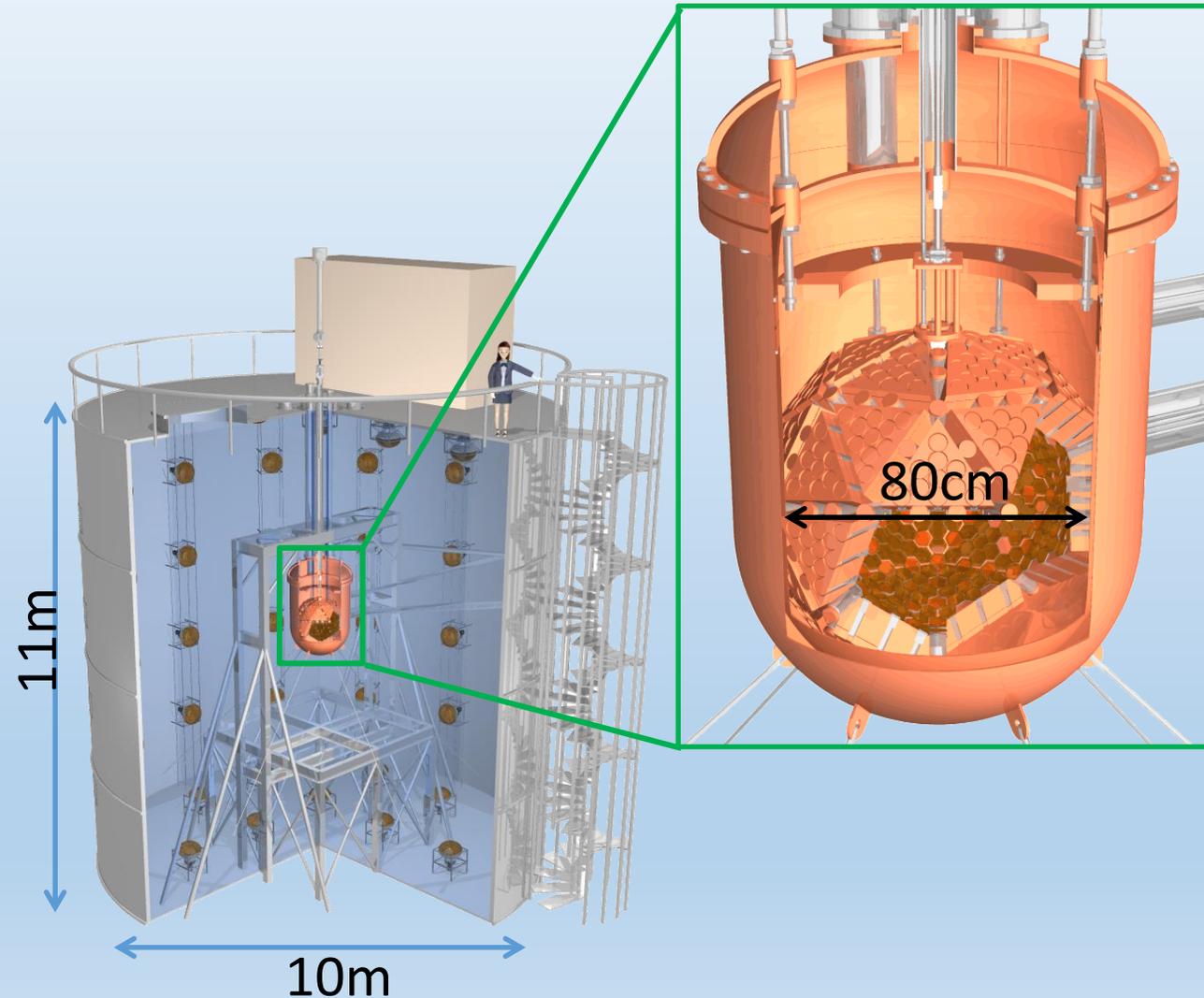


XMASS-2
(total ~24tons)



XMASS-1検出器

- **一相式液体キセノン検出器**
 - 832 kgの液体キセノン
 - 642本の光電子増倍管(光電被覆率>62%)
 - 高い光電子収量(~15 PE/keV)
→ 低エネルギー閾値を実現
 - 構造がシンプル
→ 低ラドンBG(~10 μ Bq/kg)、大型化が容易
 - シンチレーション光のみ
← 波形情報による粒子識別を研究中
- **水チェレンコフ検出器**
 - 72本の20インチ光電子増倍管
 - 宇宙線ミュオンのactive veto
 - 環境ガンマ線・中性子の遮蔽



平成28年度の主な活動と成果

- 発表論文

- 季節変動を用いた暗黒物質探索 *Phys. Lett. B 759 (2016) 272-276*
- ^{124}Xe の2 ν 二重電子捕獲の探索 *Phys. Lett. B 759 (2016) 64-68*
- 液体キセノンの発光時定数の測定 *Nucl. Instrum. Meth. A 834 (2016) 192-196*
- 超新星ニュートリノ観測の可能性の研究 *arXiv:1604.01218 (submitted to Astropart. Phys.)*

- 物理データ収集

- 2013年11月から継続中
- 様々な物理解析が進行中 (有効体積カットを用いた暗黒物質探索, Hidden photon暗黒物質探索, KKアクシオン探索, 季節変動探索, 二重電子捕獲探索, etc.)

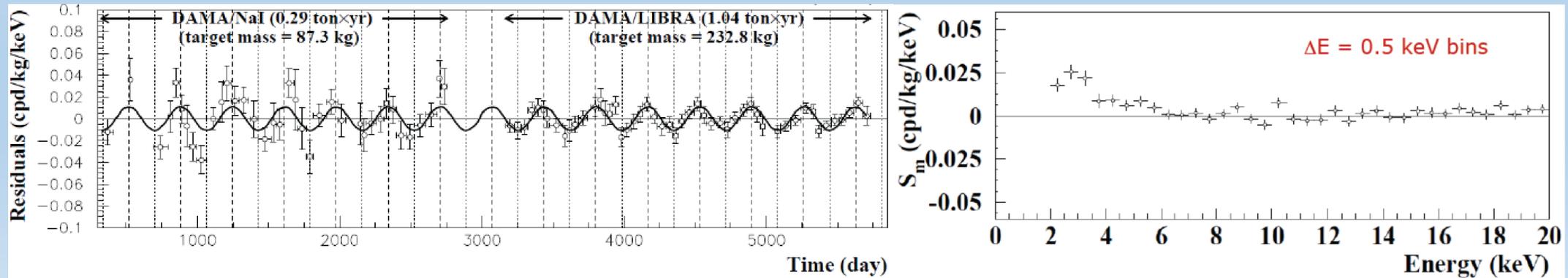
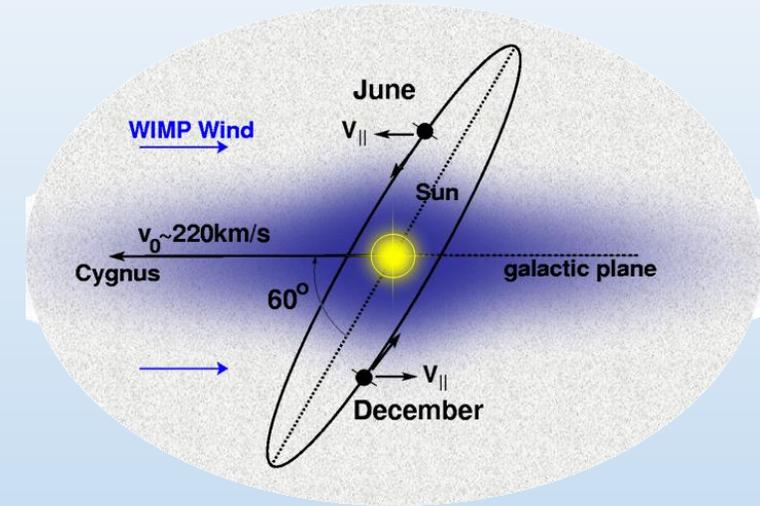
- 次のステップに向けた準備

- XMASS-1+, XMASS-1.5
- 検出器表面およびバルクからのBGのコントロール

- 共同利用研究費: 物品費(液体窒素等)20万円、旅費20万円

季節変動を用いた暗黒物質探索

- 暗黒物質との相対速度が地球の公転によって変動するため、暗黒物質のイベントレートは1年周期で変動すると考えられる。
 - 相対速度は、6月に最大、12月に最小になる(+/-7%の効果)
- DAMA/LIBRA実験が 9.3σ で季節変動を観測
 - 1.33 ton-year (14 cycles)
 - 粒子識別なし (電子事象・原子核反跳)
- これまで、DAMA/LIBRAに匹敵するexposureで季節変動の探索は行われていない。



1年間の観測データによる季節変動の探索

- 2013年11月-2015年3月 (359.2 live days)
- 全体積(832 kg)を用いた解析
- エネルギー閾値: $1.1 \text{ keV}_{ee} = 4.8 \text{ keV}_{nr}$

$$R_{i,j}^{\text{ex}} = \int_{t_j - \frac{1}{2}\Delta t_j}^{t_j + \frac{1}{2}\Delta t_j} \left(C_i + A_i \cos 2\pi \frac{(t - t_0)}{T} \right) dt$$

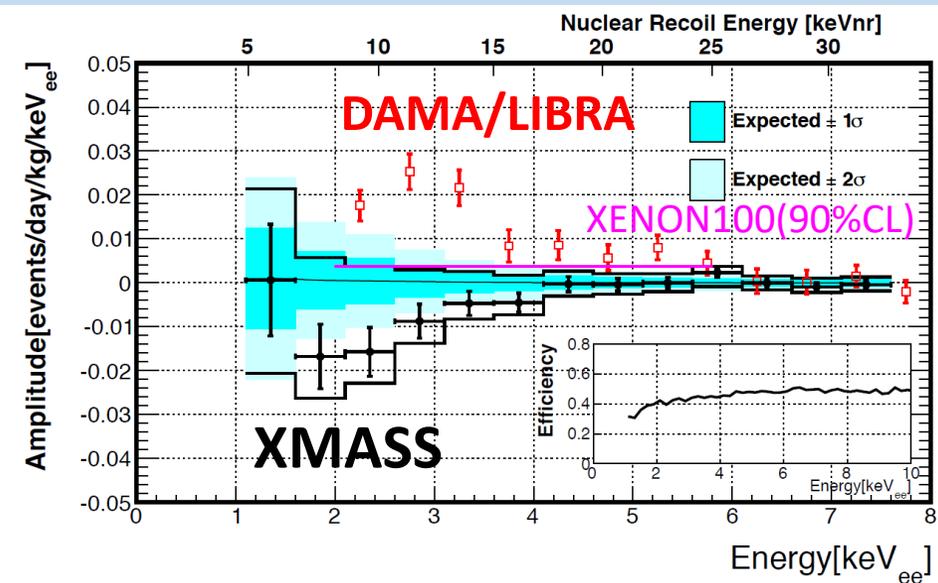
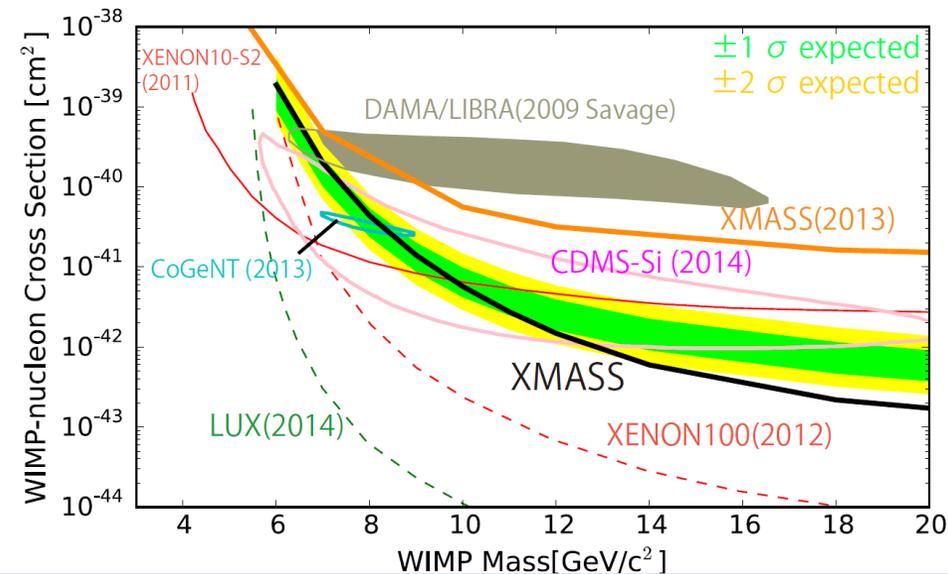
$T=365.25 \text{ days}$
 $t_0=152.5 \text{ day}$

WIMPsを仮定した探索

- DAMA/LIBRAの許容領域のほぼ全てを季節変動探索によって棄却した。

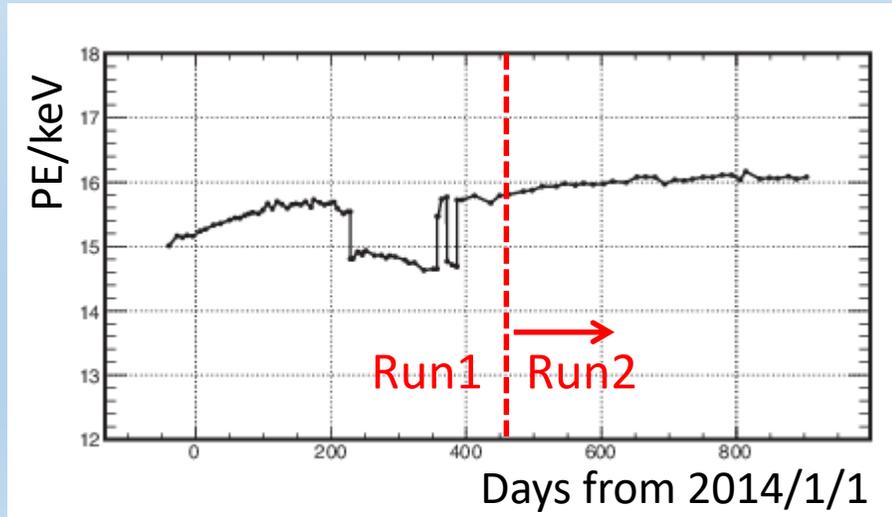
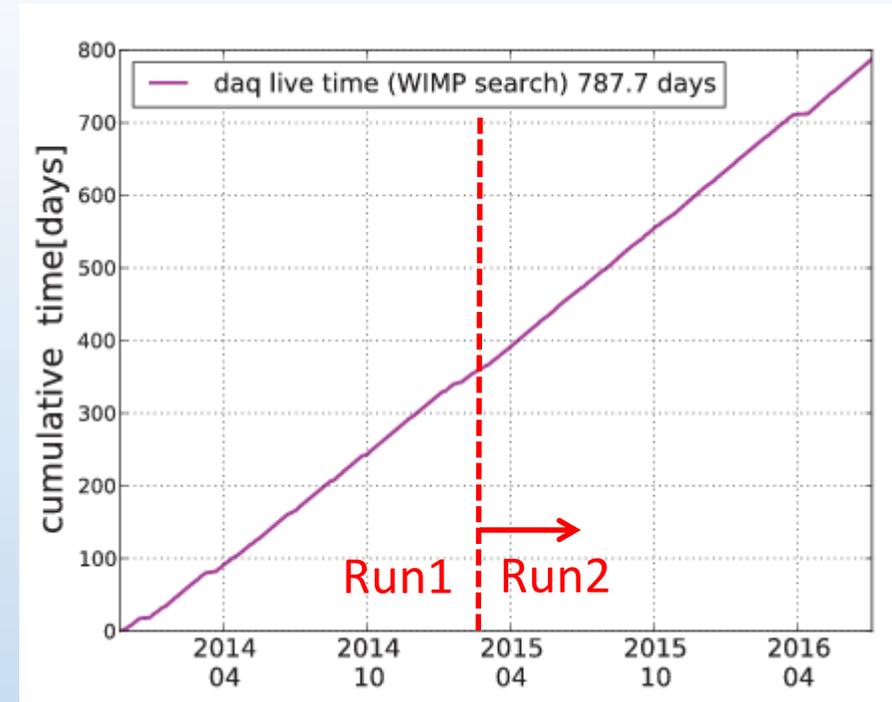
暗黒物質モデルに依存しない探索

- 僅かに負の振幅が観測されたが、有意ではない。
 p 値: 0.014 (解析1), 0.064 (解析2)
- 2-6 keV_{ee} において、最も厳しい制限を与えた。
 $<(1.7-3.7) \times 10^{-3} \text{ counts/day/kg/keV}_{ee} @90\%CL$



季節変動探索の現状

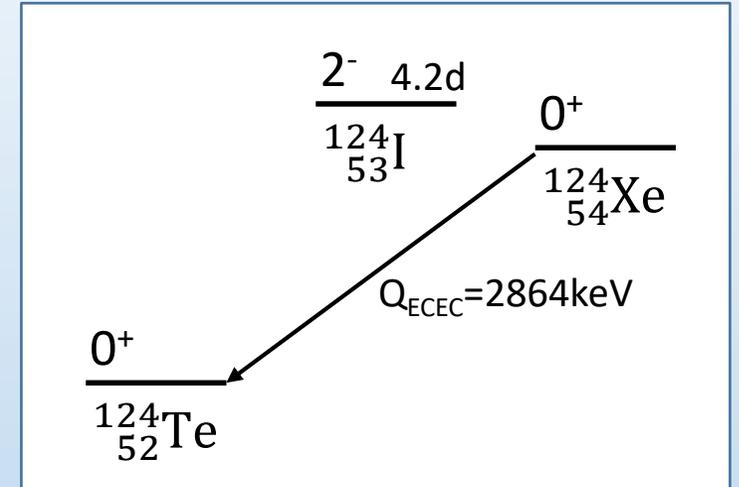
- 2015年4月以降も現在までデータ取得を継続中
 - Run1の2倍以上の統計量。
(DAMA/LIBRAの1.33 ton-yearを超えた)
- 液体キセノン光量の安定性の改善
 - 光量の変化は、液体キセノン中におけるシンチレーション光の吸収長の変化で説明できる。
 - Run2では、安定した(<1%)光量を実現。
 - エネルギー閾値を0.5 keV_{ee}まで下げられる可能性あり。
- 周期や位相などの情報も含めてより詳細な季節変動解析を行っていく。



^{124}Xe の 2ν 二重電子捕獲の探索

- 二重電子捕獲とは？

- 2つの軌道電子が同時に捕獲される
(Z,A) + $2e^- \rightarrow (Z-2,A) + (2\nu_e)$
- これまでに、 ^{78}Kr , ^{130}Ba のみで観測されている。
- ニュートリノを伴わない崩壊モードが観測されれば
レプトン数非保存、マヨラナニュートリノの証拠となる。

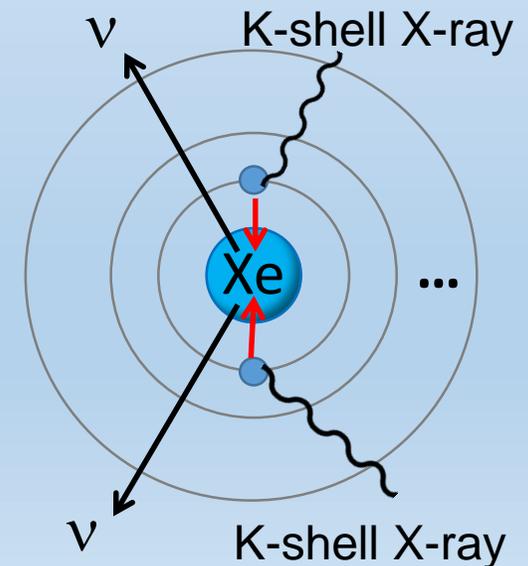


- 天然キセノンには、二重電子捕獲をする同位体
 ^{124}Xe (0.095%)、 ^{126}Xe (0.089%)が含まれている。

- ^{124}Xe 2ν 二重電子捕獲

- 半減期の理論計算は $T_{1/2} = 10^{20} \sim 10^{24}$ 年と非常に幅広い
- 観測できるのは、X線およびオージェ電子のみ。
- 2K-captureの場合、63.6 KeVのエネルギーピークを作る。

- ^{126}Xe は ^{124}Xe に比べQ値が小さいので半減期はさらに長い。



^{124}Xe の 2ν 二重電子捕獲の探索

- 2010年12月-2012年5月(132 live days)
- 有効体積 41 kg (そのうち ^{124}Xe は39g)

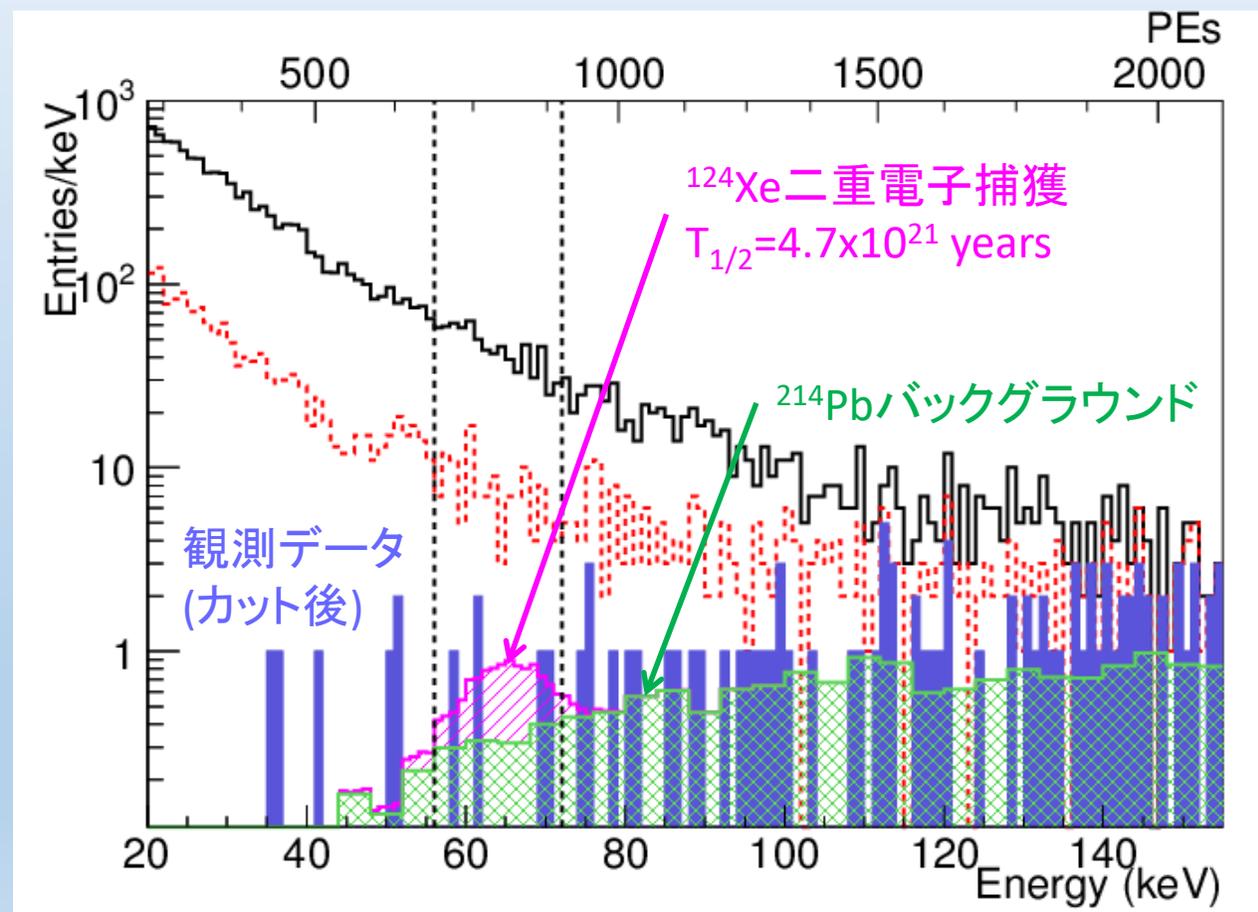
• 信号領域に5イベント残ったが、
液体キセノン中に含まれる
 ^{214}Pb バックグラウンドとコンシステント。

- ^{124}Xe および ^{126}Xe の半減期に対して
世界最高感度の制限をつけた。

$$\begin{aligned} T_{1/2}^{2\nu 2K}(^{124}\text{Xe}) &> 4.7 \times 10^{21} \text{ yrs} \\ T_{1/2}^{2\nu 2K}(^{126}\text{Xe}) &> 4.3 \times 10^{21} \text{ yrs} \end{aligned} \quad (90\% \text{CL})$$

Phys. Lett. B 759 (2016) 64-68

- 現在、検出器改修後に取得した約2年分の
解析を進めている。

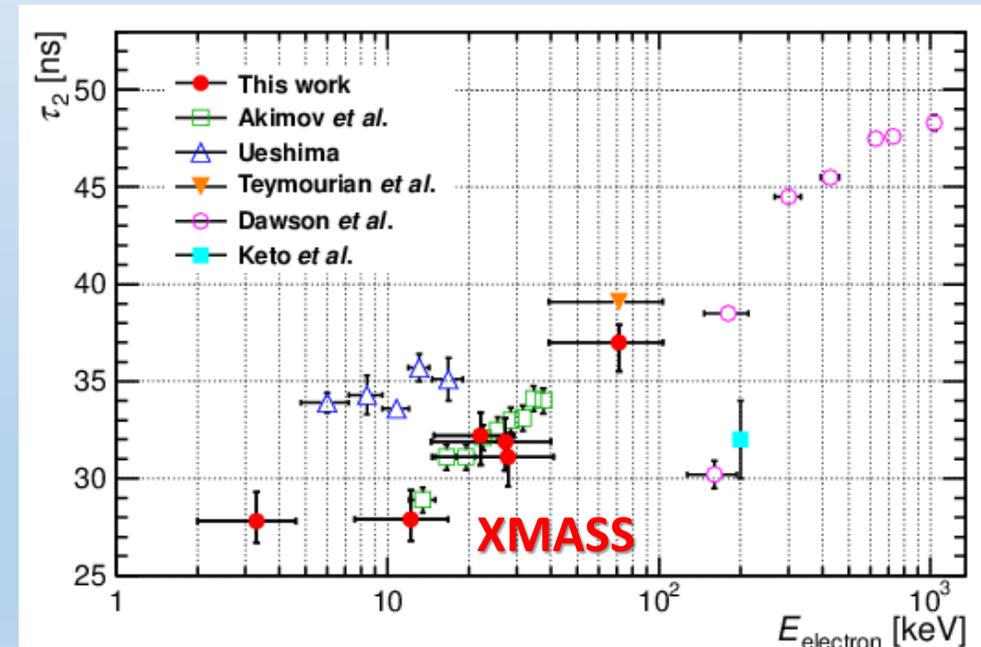


液体キセノンの発光時定数の測定

- 液体キセノンの発光プロセス
 - Excitation: $\tau \sim$ a few ns (singlet), $\tau \sim 20$ ns (triplet)
 - Recombination: $\tau > \sim 30$ ns
- 波形弁別による粒子識別や、位置再構成を行う上で重要。
- XMASS検出器を用いて、5.9keV~122keVのガンマ線に対する発光時定数の測定を行った。
 - $E_\gamma < 60$ keVで早い成分($\tau_1 \sim 2.2$ ns)が有意に観測された。
 - 暗黒物質探索において重要な低エネルギー領域での測定を実現した。

Nucl. Instrum. Meth. A 834 (2016) 192-196

$$f(t) = \frac{F_1}{\tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \frac{1 - F_1}{\tau_2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

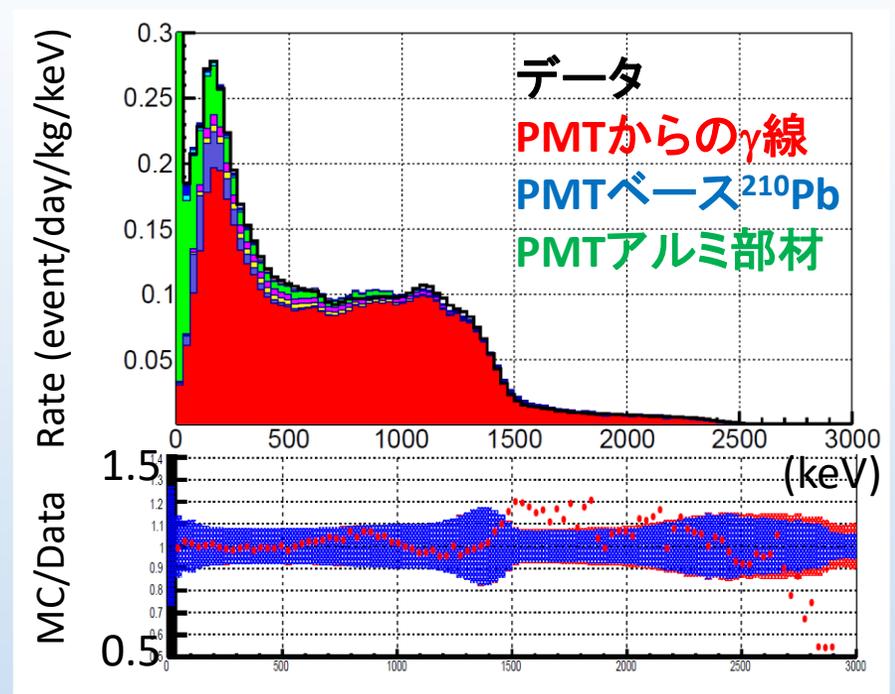
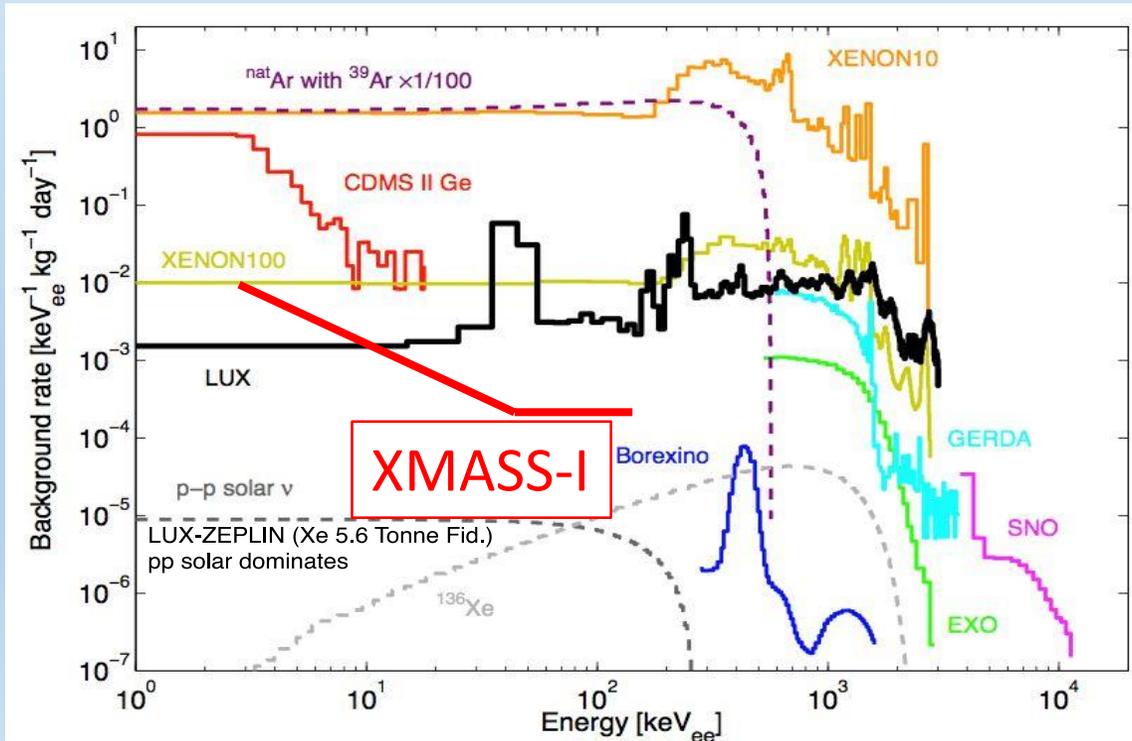


- 原子核反跳に対する時定数、波形弁別による粒子識別も研究中。

XMASS-1検出器のBGLレベル

- XMASS-1検出器の全体積でのエネルギースペクトルはよく理解できている。

有効体積内のBGLレベルの比較(粒子識別する前)



XMASS-1検出器の全体積におけるエネルギースペクトル

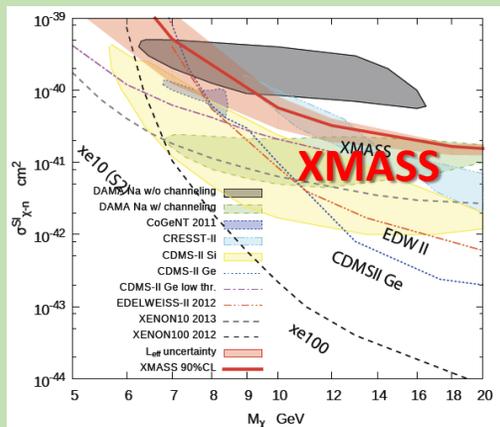
- 数十~100 keV領域でのBGLレベルはラドンなどの内部BGがメインで $O(10^{-4})$ event/day/kg/keVee
- e/ γ 事象も含めて低バックグラウンドを実現した。

Original figure taken from
D.C.Mailing, Ph.D (2014) Fig 1.5

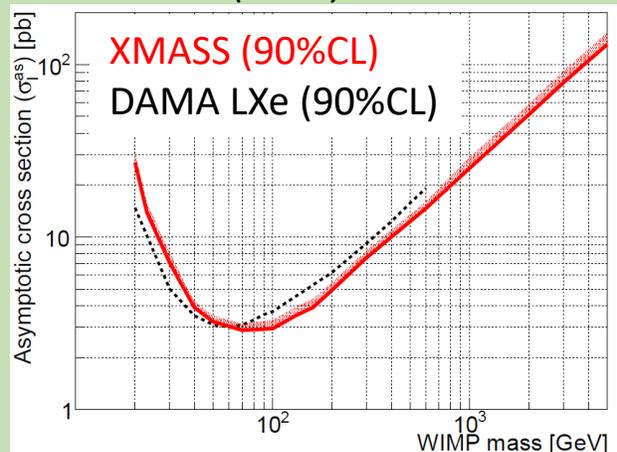
XMASS実験の多様性

■ 暗黒物質探索

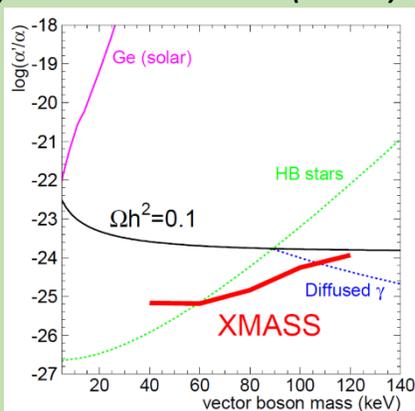
Low mass WIMP search
Phys. Lett. B719 (2013) 78



WIMP- ^{129}Xe inelastic scattering
PTEP (2014) 063C01

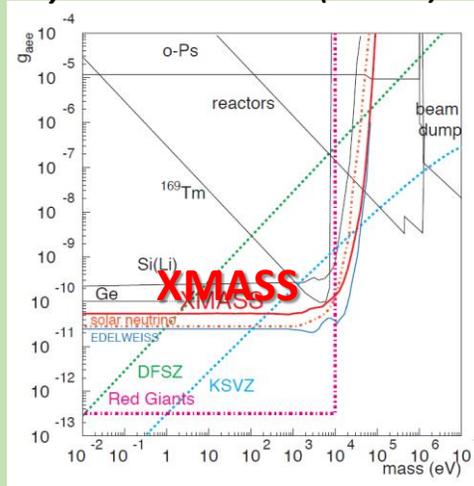


Bosonic super-WIMPs search
Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 121301



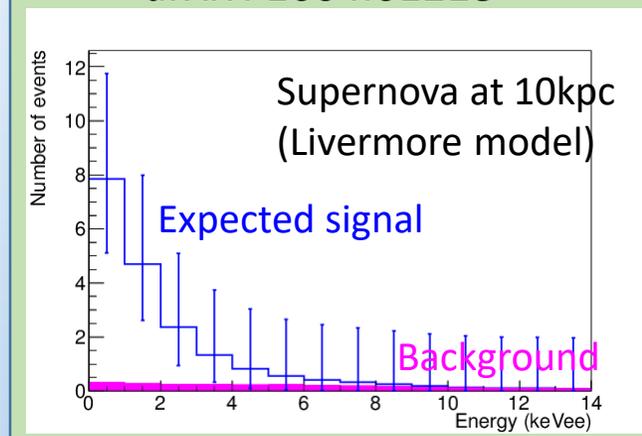
■ 太陽アクシオン探索

Phys. Lett. B724 (2013) 46



■ 超新星ニュートリノ観測の可能性

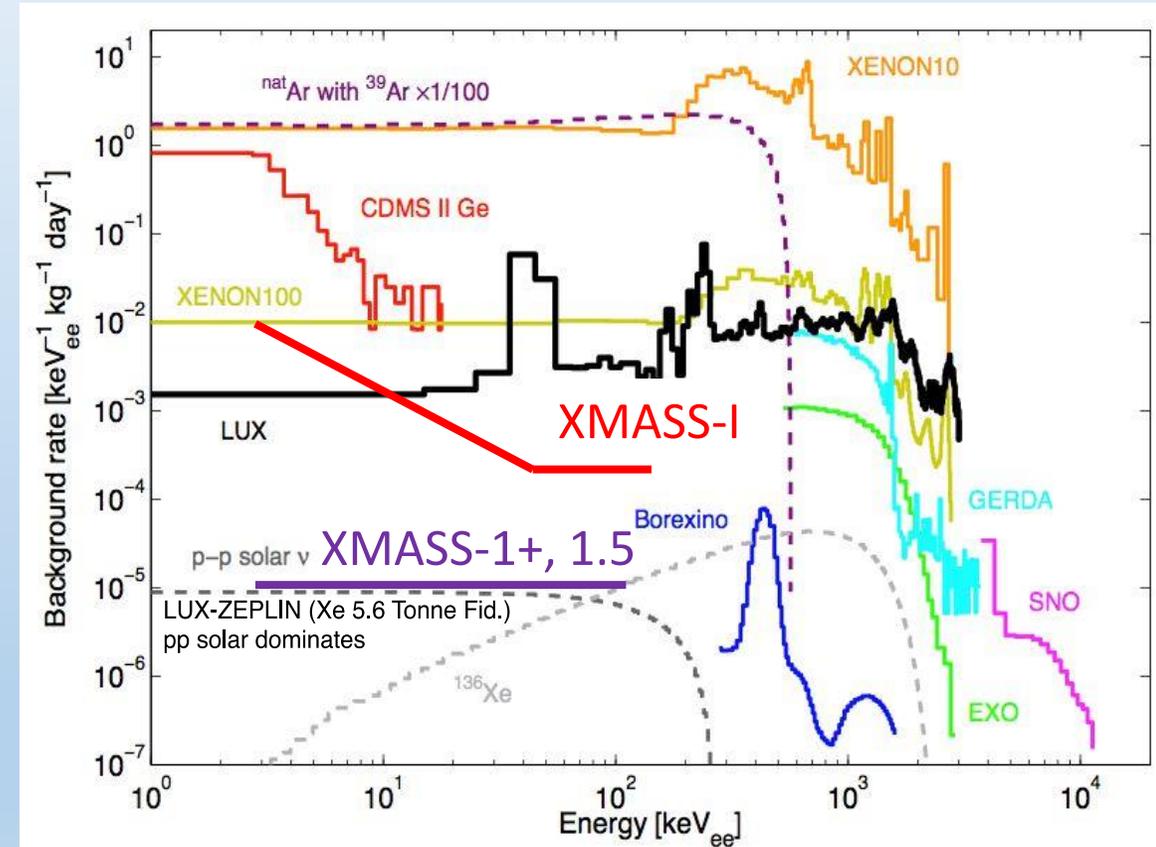
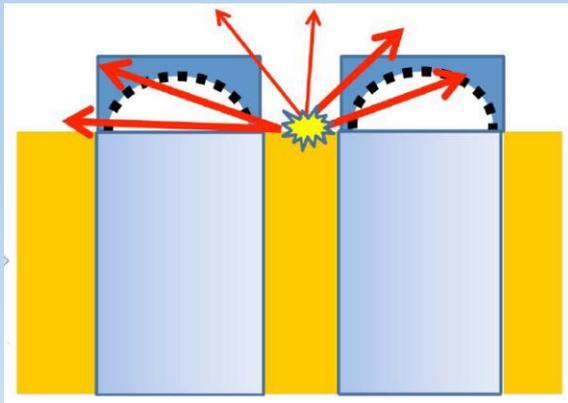
arXiv: 1604.01218



- さらに様々な物理解析が進行中
 - 有効体積カットを用いた暗黒物質探索
 - Hidden photon暗黒物質探索
 - KKアクシオン探索 など

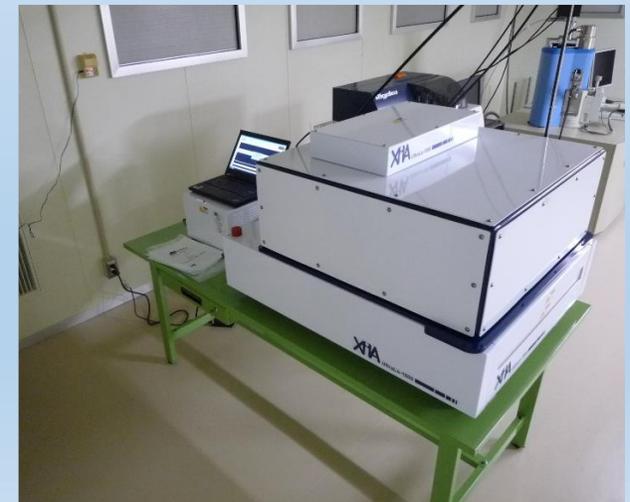
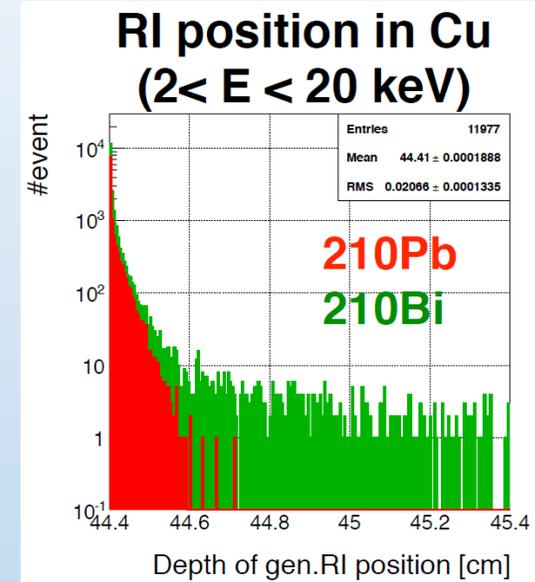
次のステップ: XMASS-1+, XMASS-1.5

- 低エネルギーでの主なBGは、検出器表面付近の事象
 - 検出器表面での発光を確実に識別できるようにドーム型の光電面を持つPMTを開発した。
- XMASS-1+
 - 現在のXMASS-1検出器のPMTとホルダーを新しいものに入れ替える。
 - 迅速にできて、XMASS-1.5の予定に影響しない。
- XMASS-1.5
 - 全体積6トン (有効体積3トン)



検出器表面およびバルクからのBGのコントロール

- 検出器表面およびバルクに含まれる ^{210}Pb の削減
 - MCシミュレーションを用いたスタディによると、銅表面から3 mm以内の深さにある ^{210}Pb がBG源となる。
 - 低バックグラウンドアルファカウンタ(XIA Ultra-Lo-1800)を用いた測定により、電解研磨した無酸素銅のバルクにも ^{210}Pb が存在することが分かってきた。
 - グレードの高い6N銅(三菱マテリアル)は3 mBq/kg以下でXMASS次期検出器の材料として有望。
- 検出器組み立て時の汚染防止
 - 検出器材料の保管・輸送・組み立ての際にどの程度付着するのか、いかにして付着させないか(作業環境のクリーン化、帯電防止、保存用の袋の検証など)



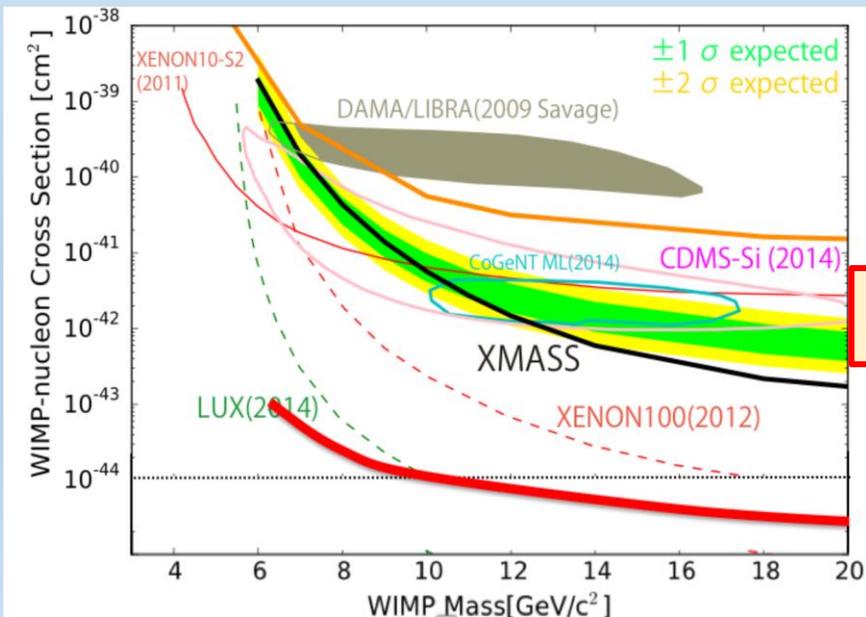
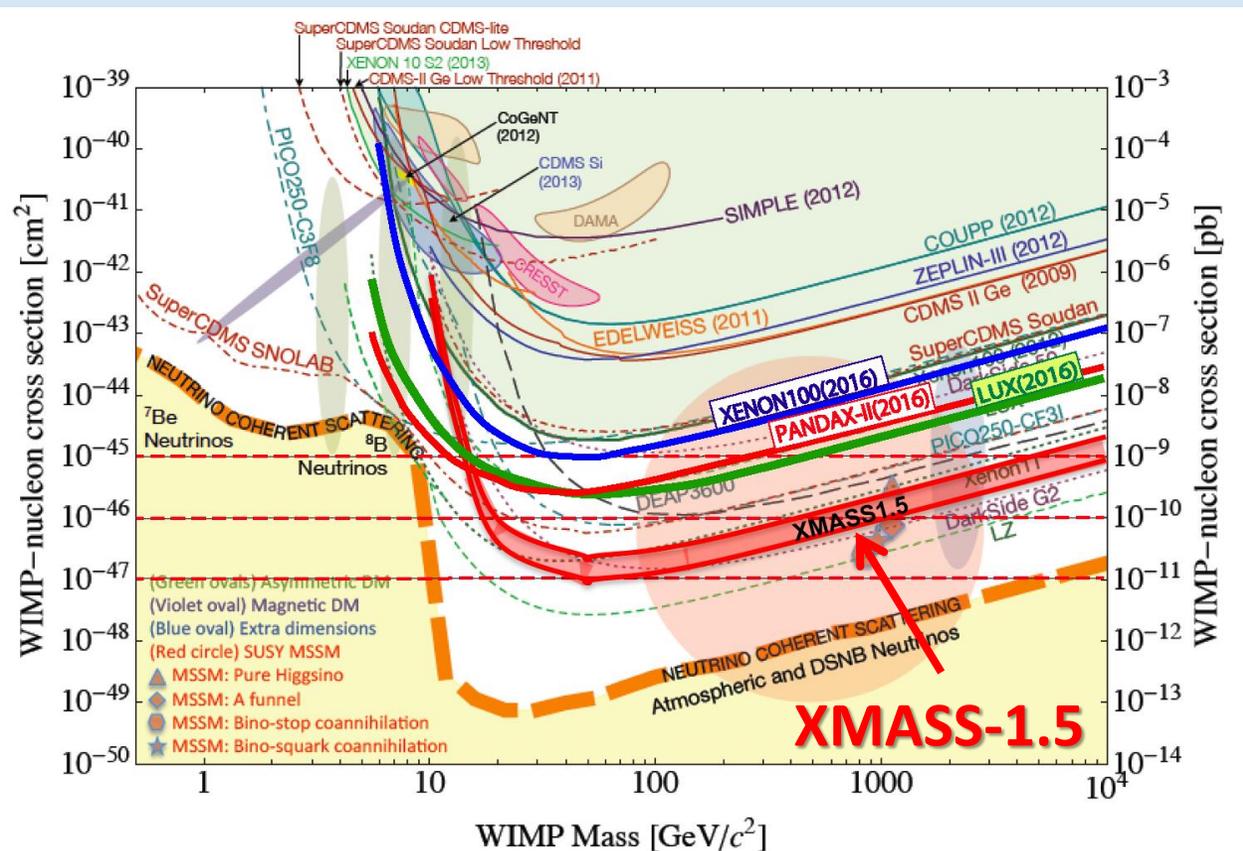
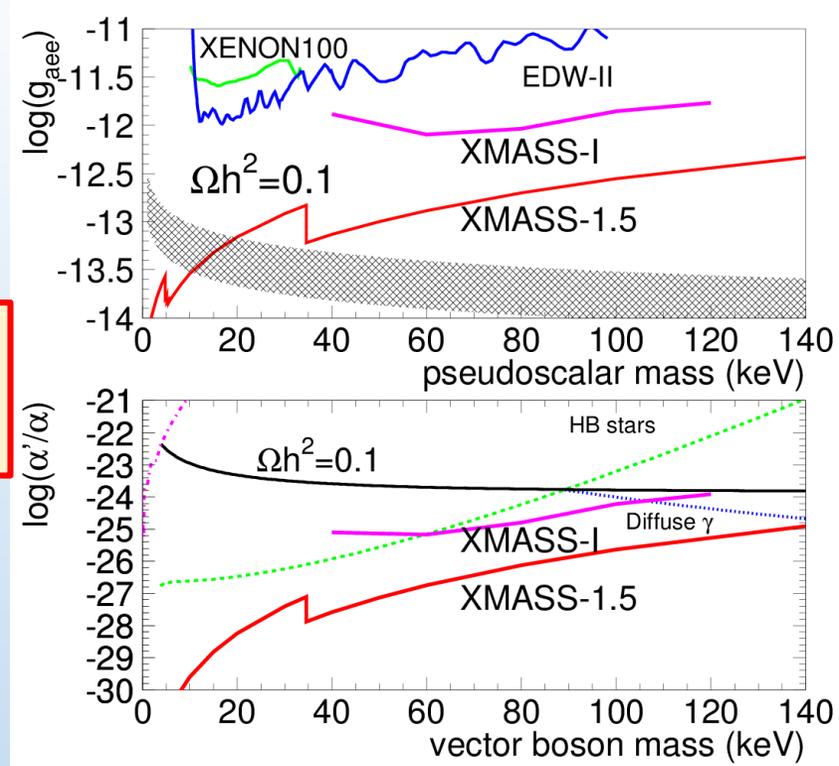
XIA Ultra-Lo-1800

XMASS-1.5で期待される感度

WIMPs探索

- 有効体積 3 tons
- BGLレベル 1×10^{-5} events/day/kg/keV

Bosonic super-WIMPs探索



季節変動探索

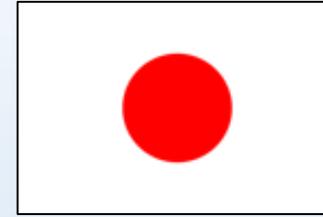
- 全体積(6 tons)
- 閾値 ~ 1 keV_{ee}

まとめ

- XMASS実験では、現在約1トンの液体キセノンを用いて暗黒物質の直接探索を行っている。
 - 2013年11月からの1年4ヶ月間のデータを用いて季節変動の探索を行い、DAMA/LIBRAが主張する季節変動をほぼ排除する強い制限を与えた。
- 数十~100 keV領域においてe/ γ を含めた低バックグラウンドを実現し、その特徴を活かした多様な物理解析を展開してきた。
 - ^{124}Xe の2 ν 二重電子捕獲の探索では、半減期に対し世界最高の制限をつけた。
- 今年度は4本の論文を発表、さらに様々な物理解析が進行中
- 次のステップは、XMASS-1+ (1 ton), XMASS-1.5 (6 tons)
 - ドーム型光電面をもつ光電子増倍管を開発
 - 検出器表面およびバルクからのBGのコントロール

Backup slides

XMASS Collaboration



Kamioka Observatory, ICRR, the University of Tokyo: K. Abe, K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, T. Norita, H. Ogawa, K. Sato, H. Sekiya, T. Suzuki, O. Takachio, A. Takeda, S. Tasaka, M. Yamashita, B. Yang

Kavli IPMU, the University of Tokyo: K. Martens, Y. Suzuki, B. Xu

Kobe University: K. Miuchi, N. Oka, Y. Takeuchi

Tokai University: M. Miyasaka, K. Nishijima

Yokohama National University: S. Nakamura

Miyagi University of Education: Y. Fukuda

STEL, Nagoya University: Y. Itow, K. Kanzawa, K. Masuda

Tokushima University: K. Fushimi, G. Kanzaki

KRISS: Y. H. Kim, M. K. Lee, K. B. Lee

Sejong University: N. Y. Kim, Y. D. Kim

10 institutes

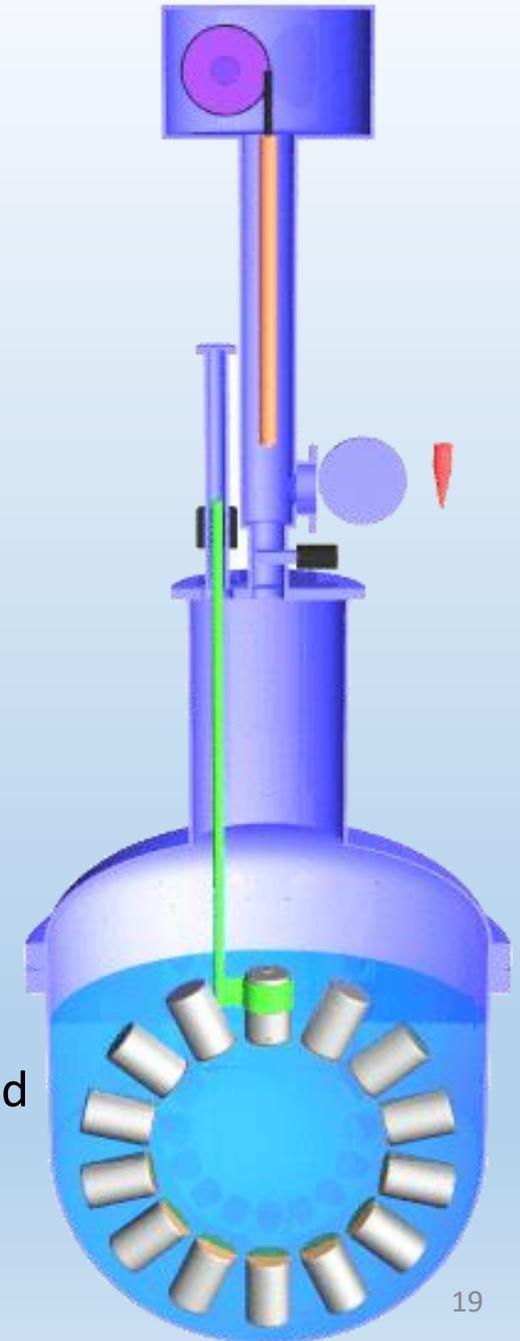
~40 physicists



Inner calibration system

- Various RI sources can be inserted
- Used for light yield monitoring, optical parameter tuning, energy and timing calibrations etc.

RI	Energy [keV]	Diameter [mm]	Geometry
^{55}Fe	5.9	10	2pi source
^{109}Cd	8, 22, 25, 88	5	2pi source
^{241}Am	17.8, 59.5	0.17	2pi/4pi source
^{57}Co	59.3 (W X-ray), 122	0.21	4pi source
^{137}Cs	662	5	cylindrical



^{57}Co source



Source rod (Ti)

Active region is concentrated on the 1.8 mm edge region

Modulation analysis

- Two different fitting methods

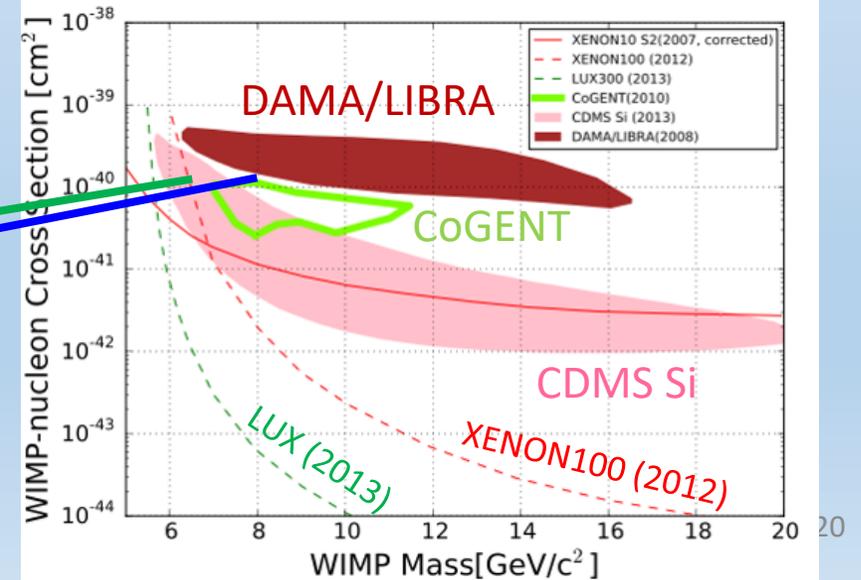
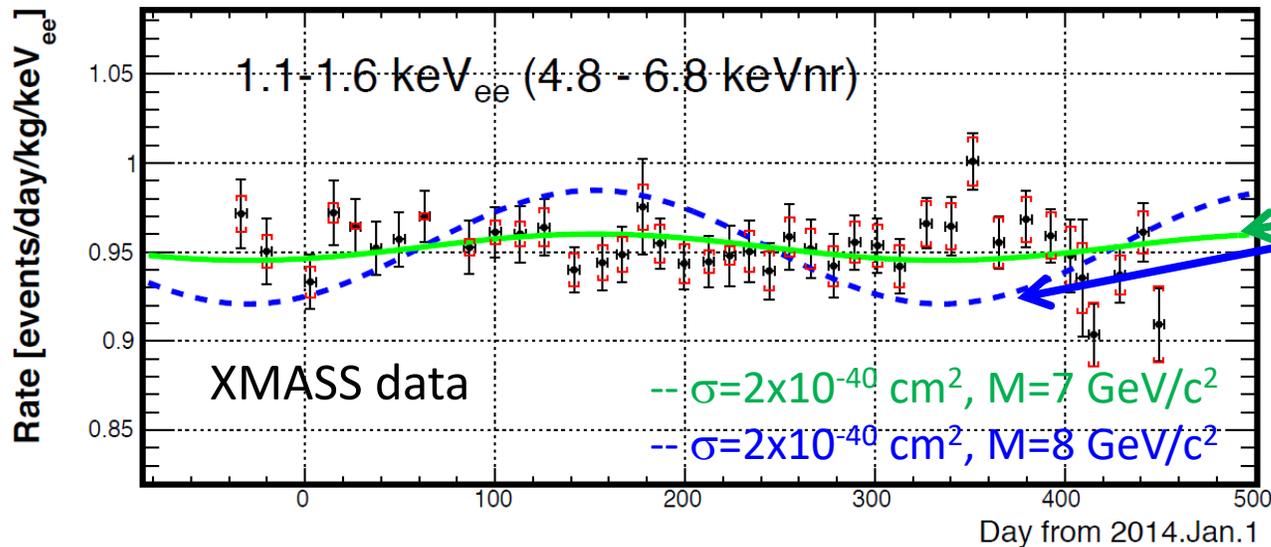
Pull term
(Method-1)

$$\chi^2 = \sum_i^{E_{bins}} \sum_j^{t_{bins}} \left(\frac{(R_{i,j}^{data} - R_{i,j}^{ex} - \alpha K_{i,j})^2}{\sigma(stat)_{i,j}^2 + \sigma(sys)_{i,j}^2} \right) + \alpha^2$$

Covariance matrix
(Method-2)

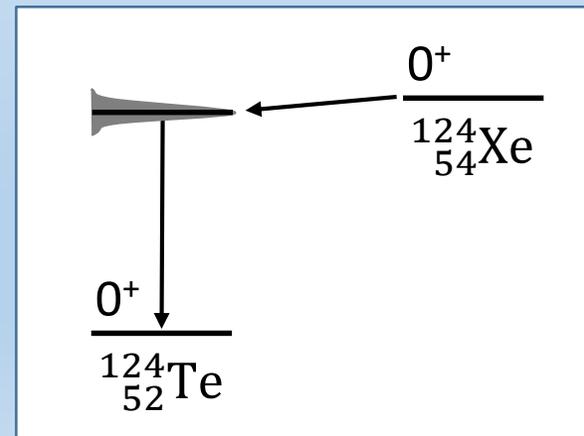
$$\chi^2 = \sum_{k,l}^{N_{bins}} (R_k^{data} - R_k^{ex})(V_{stat} + V_{sys})_{kl}^{-1} (R_l^{data} - R_l^{ex})$$

- Our data demonstrate high sensitivity to modulation



Why is ^{124}Xe interesting?

- ^{124}Xe has the largest Q-value among all the 35 ECEC candidates. It is large enough so that $\beta^+\text{EC}$ and $\beta^+\beta^+$ channels are also allowed.
 - $\beta^+\text{EC}$: $(Z,A) + e^- \rightarrow (Z-2,A) + e^+ (+2\nu_e)$
 - $\beta^+\beta^+$: $(Z,A) \rightarrow (Z-2,A) + 2e^+ (+2\nu_e)$
- The $0\nu\beta^+\text{EC}$ mode has an enhanced sensitivity to right-handed weak current.
 - It can help to disentangle the contributions of different mechanisms if observed.
- The $0\nu\text{ECEC}$ process may be resonantly enhanced if there exists an excited state with $\Delta = Q_{\text{ECEC}} - 2E_x - E_\gamma \sim 0$.
- And... any measurement of $2\nu\text{ECEC}$ will provide a new reference for the calculation of nuclear matrix elements.



Measurement of LXe scintillation time profile for low energy gamma-ray induced events

- Using ^{55}Fe , ^{241}Am , and ^{57}Co sources ($E_\gamma=5.9\text{-}122\text{ keV}$)
- Waveforms are decomposed into “single PE” pulses
- MC simulation takes into account optical parameters (absorption, scattering, ...), electronics response
- Timing distributions of data and MC are compared to obtain intrinsic decay time parameters.

