



# 液体キセノンを用いた暗黒物質探索

東大宇宙線研 小林兼好

On behalf of the XMASS collaboration

2018年12月21日

平成30年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

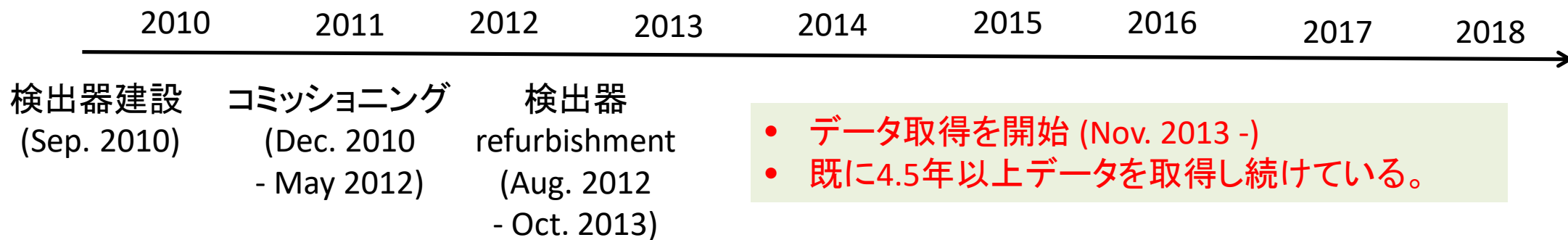
# XMASS 実験

## ➤ XMASS

- 液体キセノンを用いた低バックグラウンド、低閾値の多目的実験。現在の主ターゲットは暗黒物質探索
- 岐阜県神岡地下1000mで観測中

Purpose of the first phase is the dark matter search.

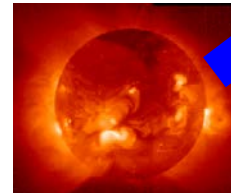
## history of XMASS



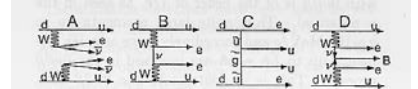
Dark Matter



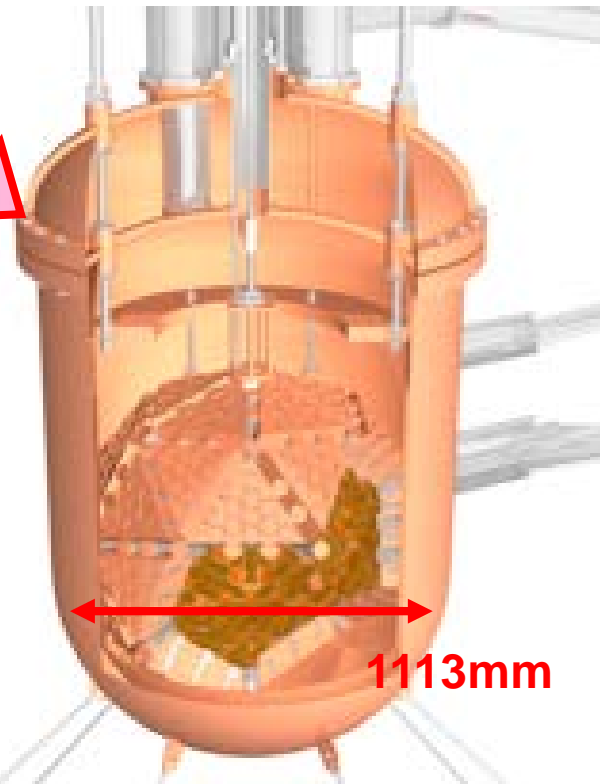
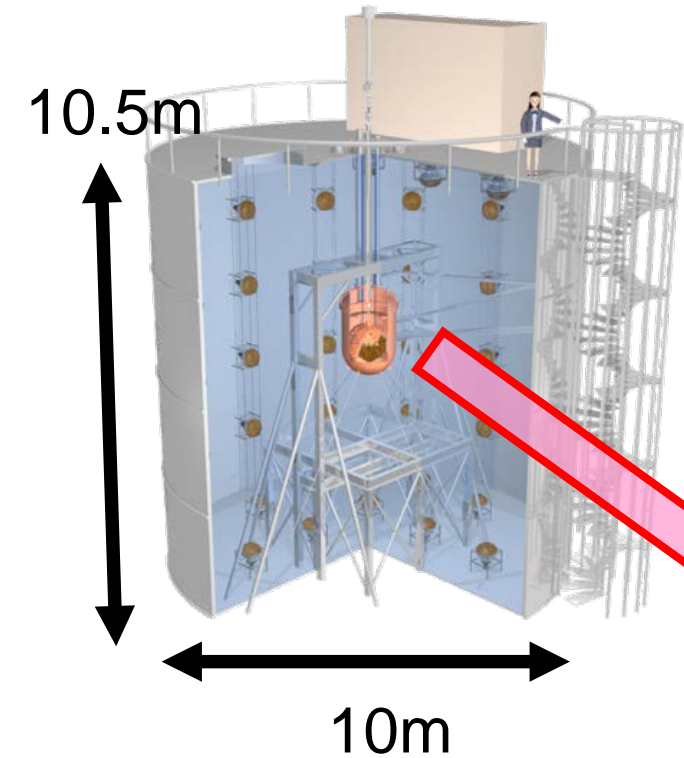
Solar neutrino



Double beta decay

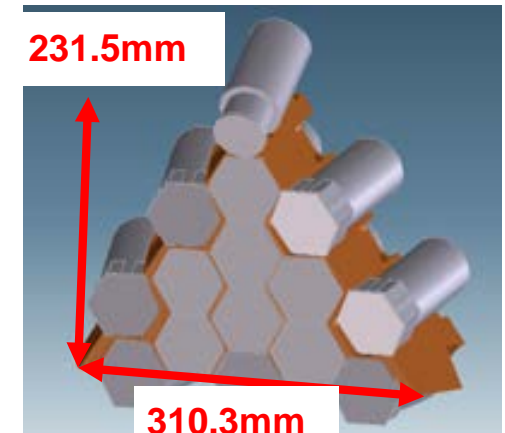
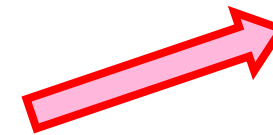


# XMASS検出器



NIM A716, 78-85, (2013)

- 一相式液体キセノン検出器
  - 832kgの液体キセノンを642本の2インチPMTで囲む。
  - 光電覆率: 62%
  - 検出器内側の直径: ~800mm
  - 高い光電子収量high light yield: ~15 PE/keV
- Outer detector (水タンク)
  - 72本の20インチPMTで宇宙線ミュオンをveto
  - 水による環境ガンマ線、中性子の遮蔽。



pentakis dodecahedron



Hexagonal PMT  
Hamamatsu R10789



# 平成30年度の主な活動と成果

## ● 発表論文

- 有効体積解析による WIMP 探索 (A direct dark matter search in XMASS-I) **PLB789 (2019) 45-53**
- 季節変動を用いた暗黒物質探索 (Direct dark matter search by annual modulation with 2.7 years of XMASS-I data) **PhysRevD97, 102006 (2018)**
- $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$  の2 $\nu$ 二重電子捕獲の探索 (Improved search for two-neutrino double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$  and  $^{126}\text{Xe}$  using particle identification in XMASS-I) **PTEP (2018) 053D03**
- Hidden photon 及び axion-like 粒子の暗黒物質探索 (Search for dark matter in the form of hidden photons and axion-like particles in the XMASS detector) **PLB787 (2018) 153-158**
- 液体キセノンでの原子核反跳事象の発光時定数の測定 (A measurement of the scintillation decay time constant of nuclear recoils in liquid xenon with the XMASS-I detector) **JINST 13 (2018) P12032**

## ● 投稿中の論文

- 低BG PMT (R10789) の開発 (Development of low radioactivity photomultiplier tubes for the XMASS-I detector) **arXiv:1808.03617**
- 季節変動を用いたsub-GeV領域の暗黒物質探索 (Search for sub-GeV dark matter by annual modulation using XMASS-I detector) **arXiv:1808.06177**
- WIMP核子、非弾性散乱の探索 (Search for WIMP- $^{129}\text{Xe}$  inelastic scattering with particle identification in XMASS-I) **arXiv:1809.05358**

## ● データ収集・解析・R&D

- 2013年11月から安定したデータ収集を継続中
- 様々な物理解析を遂行中

## ● 共同利用研究費: 物品費 20万円、旅費 20万円

# 有効体積解析による WIMP探索: データ

- データ

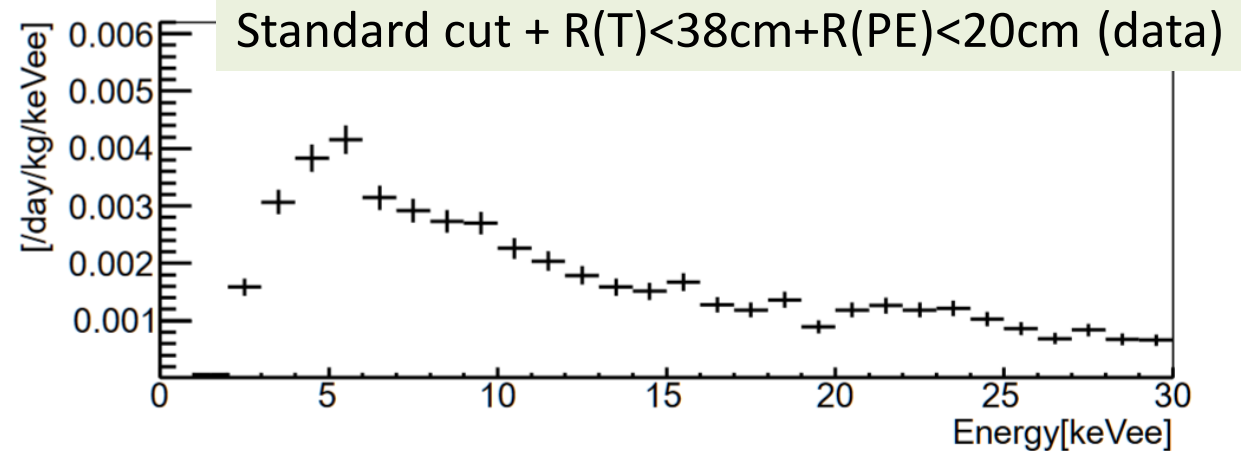
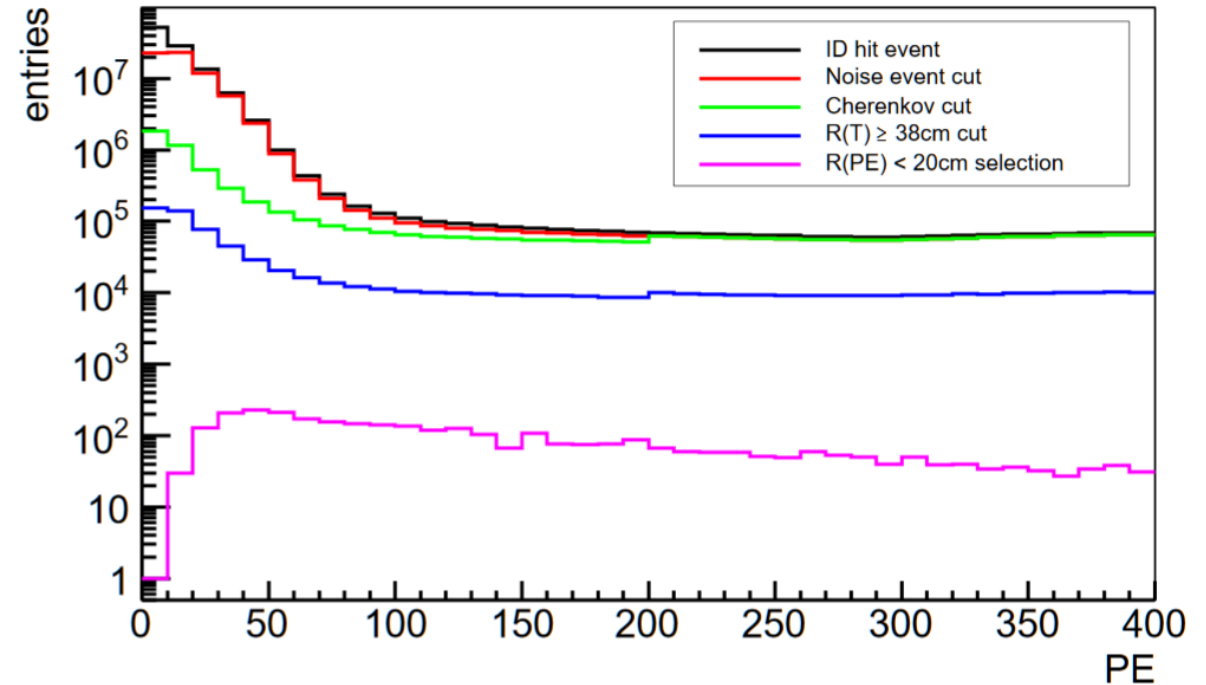
- Nov. 20<sup>th</sup>, 2013 – Mar. 29<sup>th</sup>, 2016
- Livetime: 705.9days.

- 事象選択

- Standard cut: ノイズ、チェレンコフ事象 (PMTカソードの<sup>40</sup>Kからのベータ線起因) を除去。
- 位置再構成による有効体積カット: 時間、光量のそれぞれから事象の位置を再構成し、時間では中心から38cm以内(R(T) cut)、光量では20cm以内(R(PE) cut)の事象のみを使用。検出器表面からくるバックグラウンドを除去、

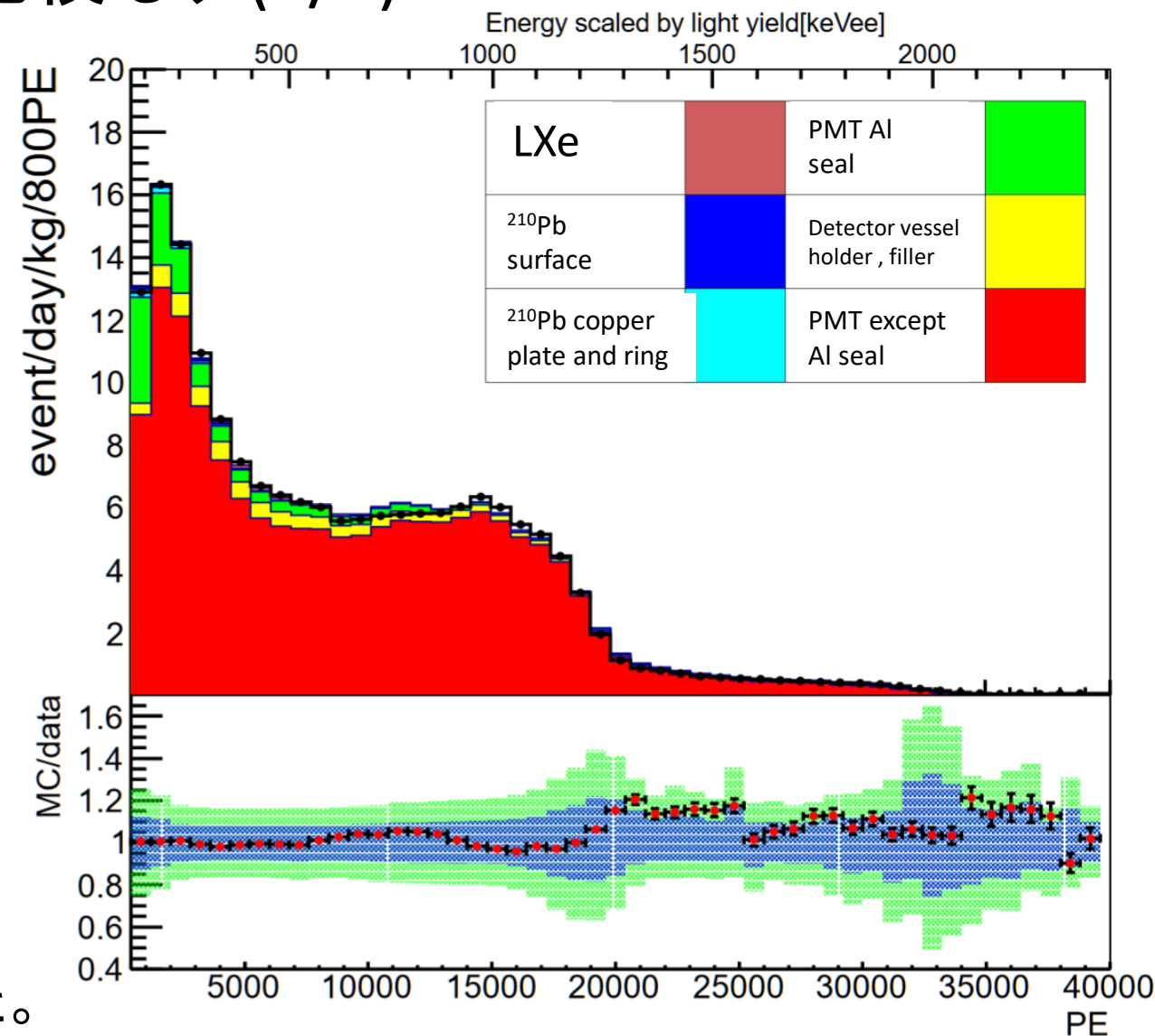
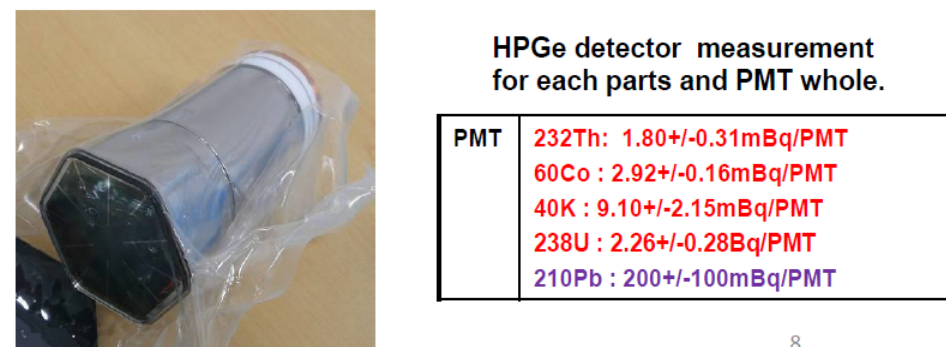
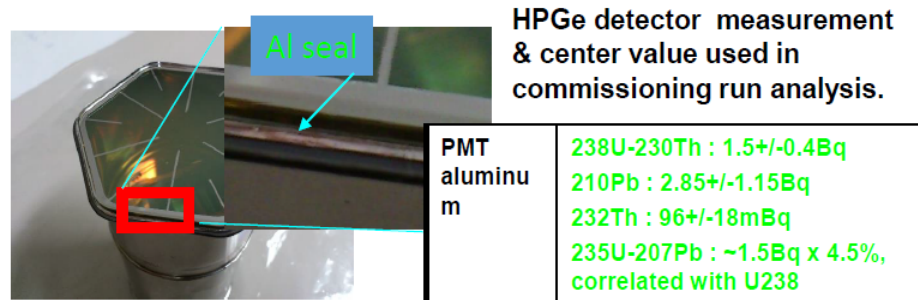
- すべてのカット (standard cut + R(T) cut + R(PE) cut) をかけると、レートは  $\sim 4 \times 10^{-3}$  /day/kg/keVee @ 5-5.5keVee になる。

event selection (data)



# 有効体積解析によるWIMP探索: バックグラウンド見積もり (1/3)

Only standard cut is applied



- 検出器に使用した材料は高純度ゲルマ検出器でスクリーニングを行った。
- 全体積を用いたPEスペクトラム ( $> 400 \text{ pe}$  ( $\sim 30 \text{ keV}$ )) をスクリーニングの結果を加味してfitすることにより各材料のRIを見積もった。

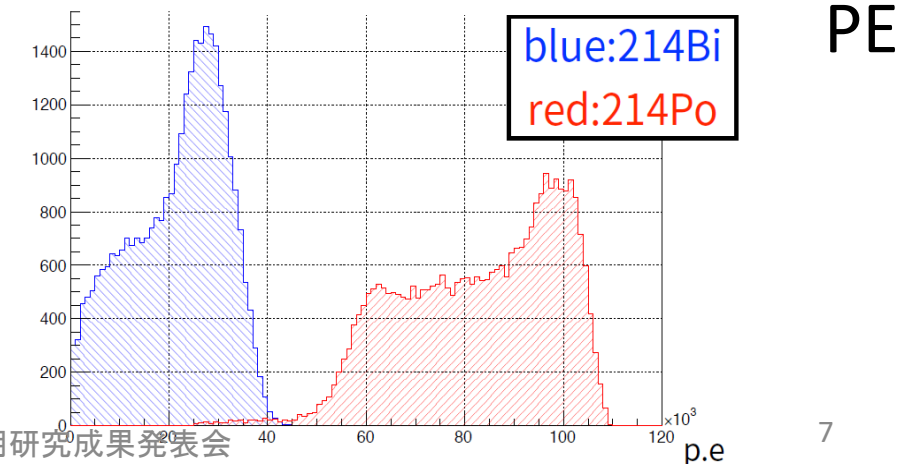
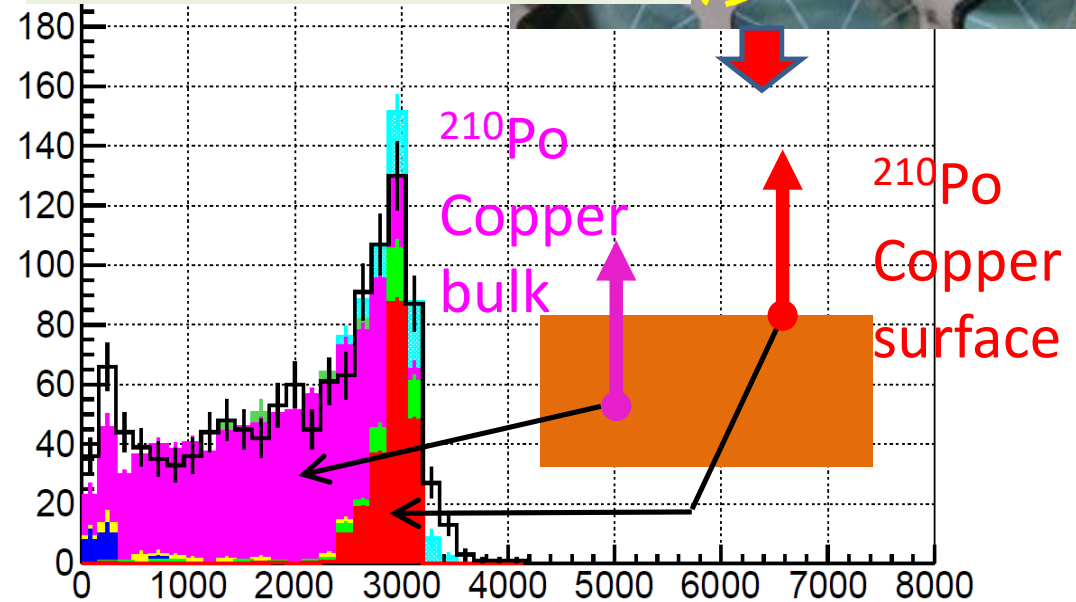
# 有効体積解析によるWIMP探索: バックグラウンド見積もり(2/3)

- 銅表面、バルク中の $^{210}\text{Pb}$

- アルファ線事象は発光時定数が異なるので判別できる。銅表面、バルク中の $^{210}\text{Pb}$ 含有量に $^{210}\text{Po}$ 崩壊から出るアルファ線から見積もられる。(バルク中から出るアルファ線はエネルギー分布で連続的になるので区別ができる。)
- 無酸素銅中の $^{210}\text{Pb}$ 含有量はスペア用の銅プレートをアルファ線検出器で測定したところ  $26 \pm 11 \text{ mBq/kg}$  になり実機の測定をconsistentだった(NIMA884 (2018)157-161)。

- 液体キセノン中のRI

- $^{222}\text{Rn}$  は $^{214}\text{Bi}$ - $^{214}\text{Po}$  ( $164\mu\text{s}$ )解析、 $^{85}\text{Kr}$ は beta-gamma ( $1.015\mu\text{s}$ ,  $0.434\%$ )により見積もった。
- $^{14}\text{C}$ と  $^{39}\text{Ar}$ はエネルギー分布をフィットすることにより見積もった。

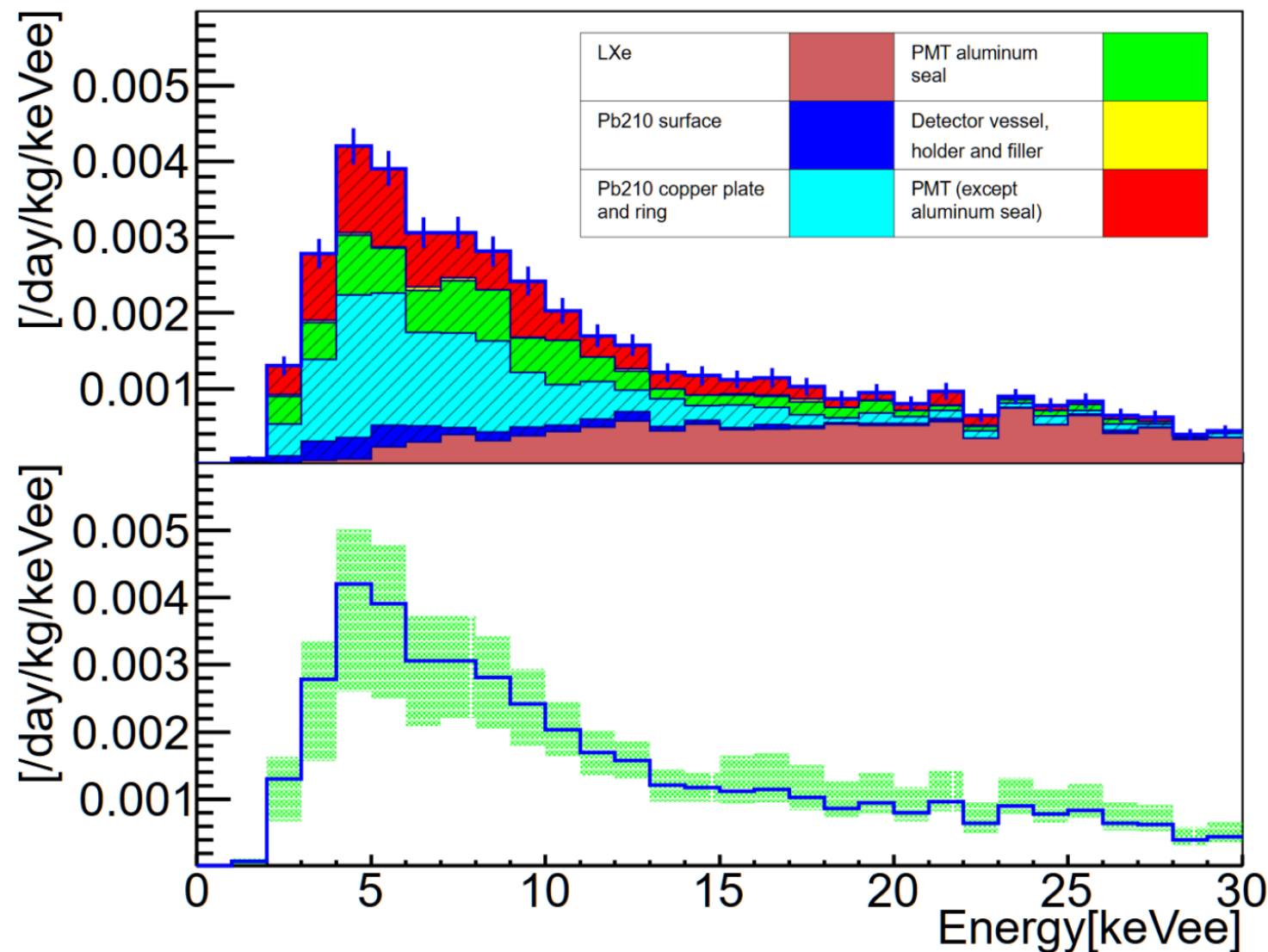




# 有効体積解析によるWIMP探索: バックグラウンド見積もり(3/3)

- データと同じ条件でバックグラウンドMCを作るため、定期的に取り得している  $^{57}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Co}$  のキャリブレーションでの液体キセノン中での発光光量を同期。
- データ同様のlifetimeのバックグラウンドMCを作り事象選択を行った。
- 残った~90%のバックグラウンド事象は検出器表面起因で事象再構成でvertexが内側にいった事象だった。

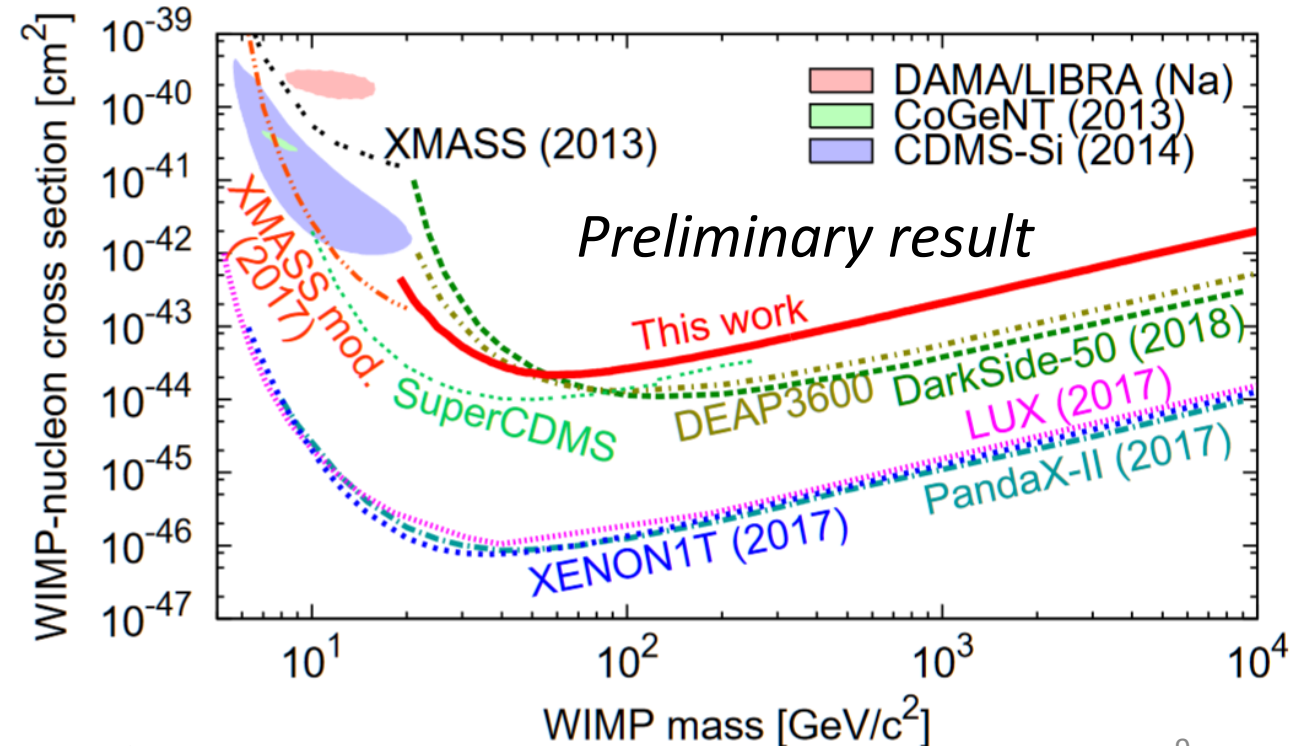
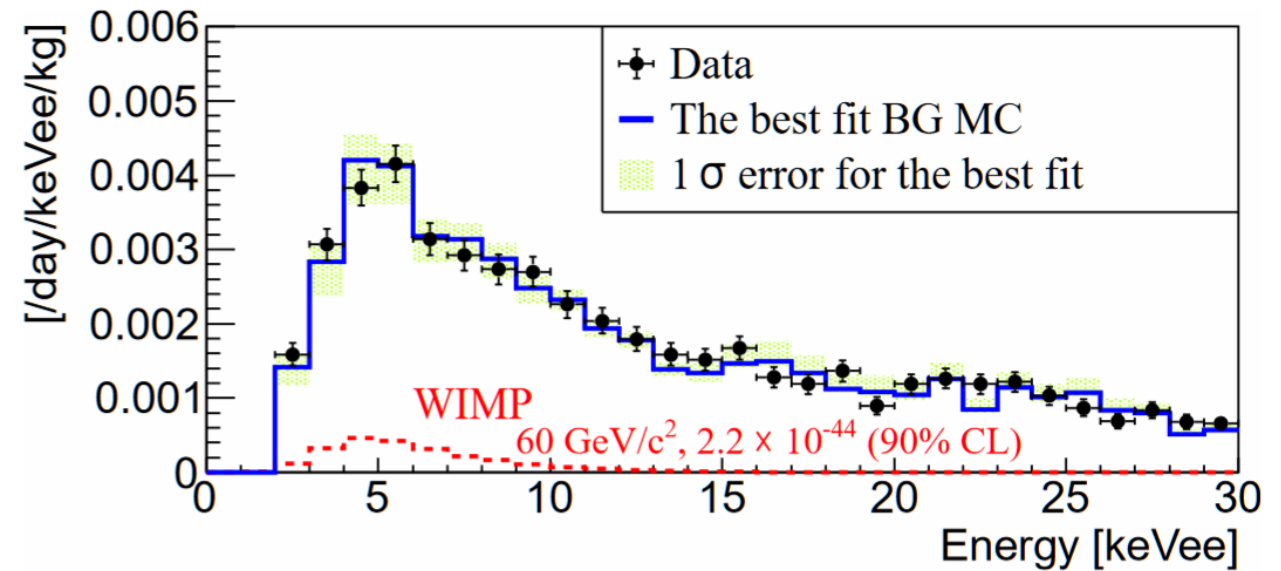
Standard cut +  $R(T) < 38\text{cm} + R(\text{PE}) < 20\text{cm}$  (MC)





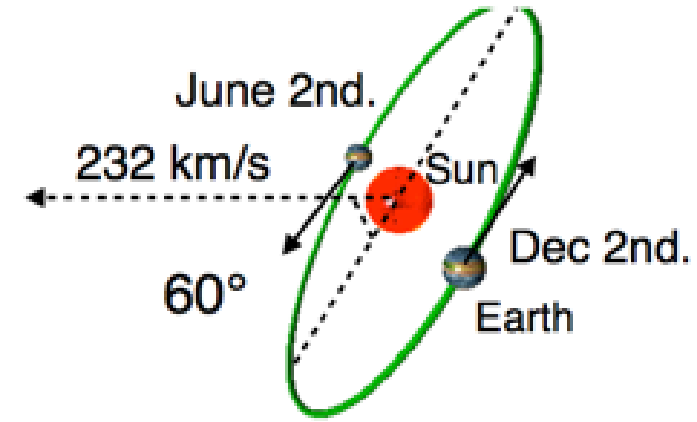
# 有効体積解析による WIMP探索: 結果

- データはバックグラウンドによる期待値と consistent。
- エネルギー分布 (2-15keVee) をバックグラウンドMCと WIMP MC で fit して見積もった。
- 90% CL での exclusion limit は 60 GeV WIMPs mass で  $2.2 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$  となった。
- PLB 789 (2019) 45-53. arXiv: 1804.02180.



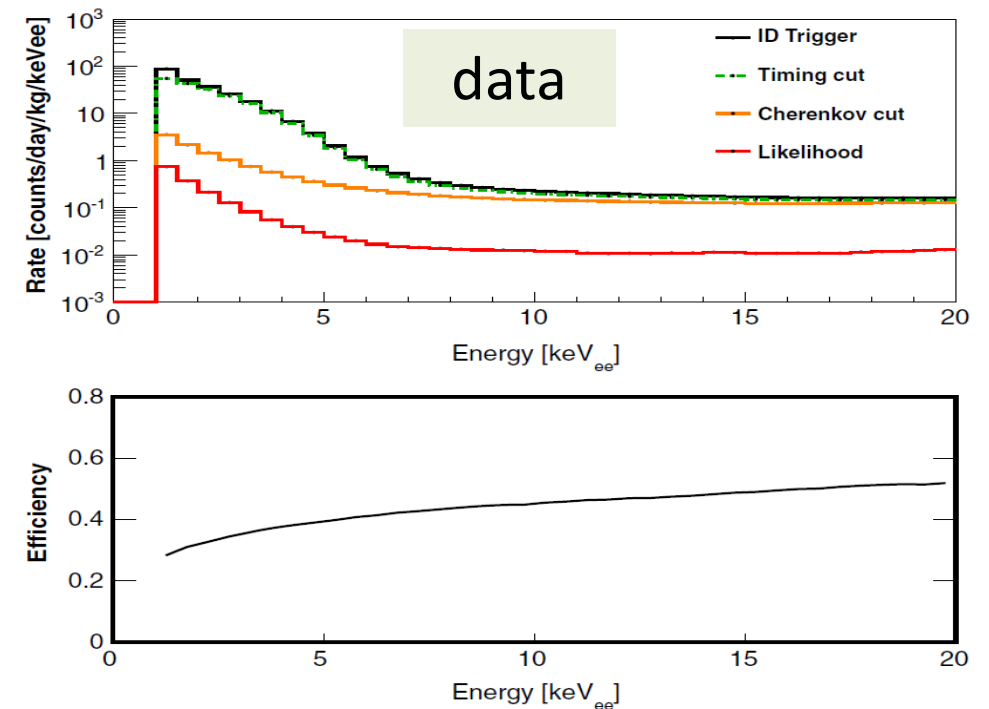
# 季節変動による暗黒物質探索

暗黒物質による事象は地球が太陽の周りを回っていることから季節変動することが期待される。季節変動の観測については DAMA/LIBRA実験がphase1+phase2合わせ  $11.9\sigma$  ( $1.04+1.13 \text{ ton} \cdot \text{year}$ , 13 cycles)で観測したと主張しているが、他実験では観測されていない。



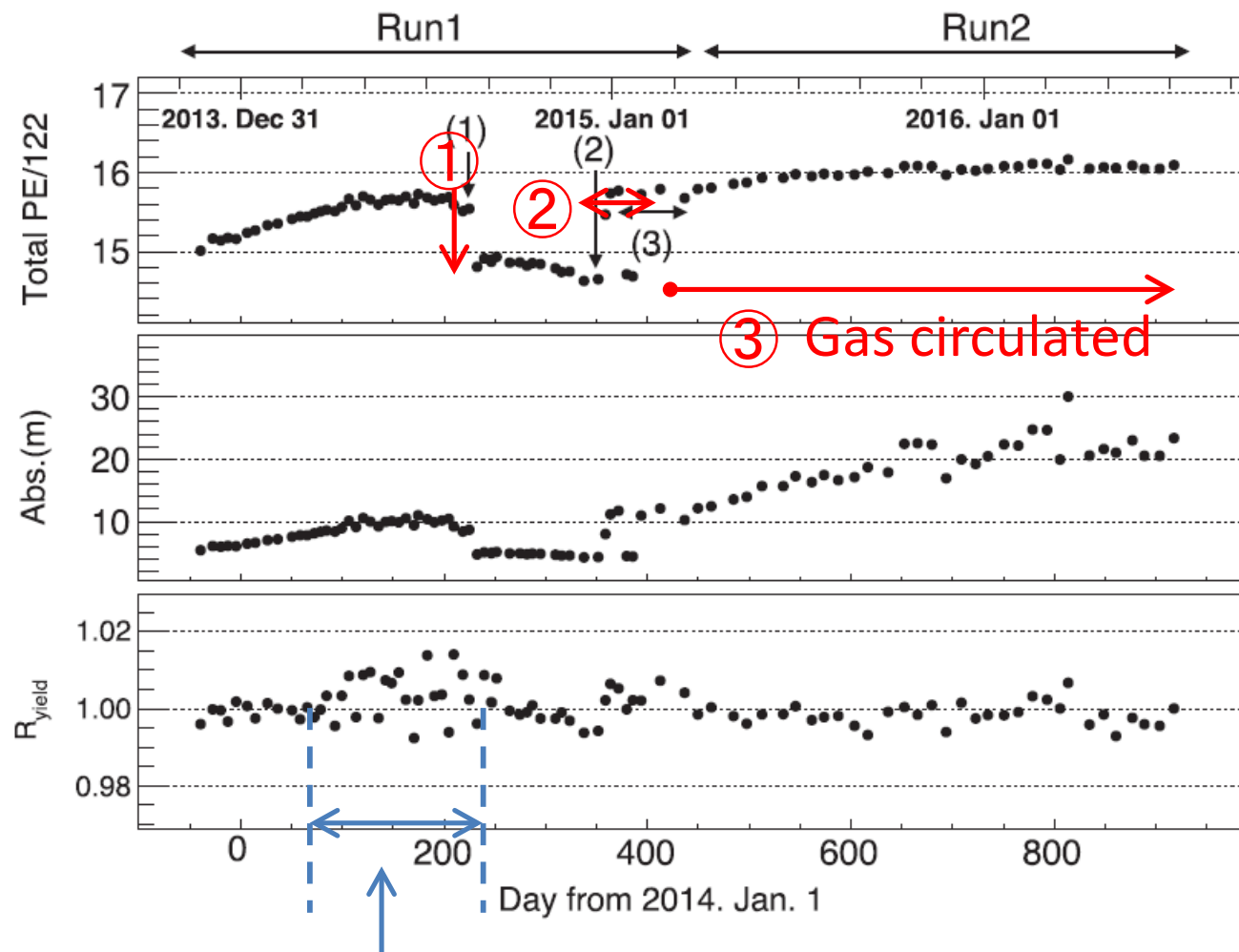
XMASSでも探索を行ってきたが(PLB759(2016)272-276)、統計を増やし結果をまとめた (PRD97 (2018) 102006)。

- データを>2年サイクル使用 ( $1.82 \text{ ton} \cdot \text{year}$ )、低閾値( $1.0 \text{ keVee}$ ,  $=4.8 \text{ keVnr}$ )
- 粒子識別は行わない (DAMA/LIBRA同様)



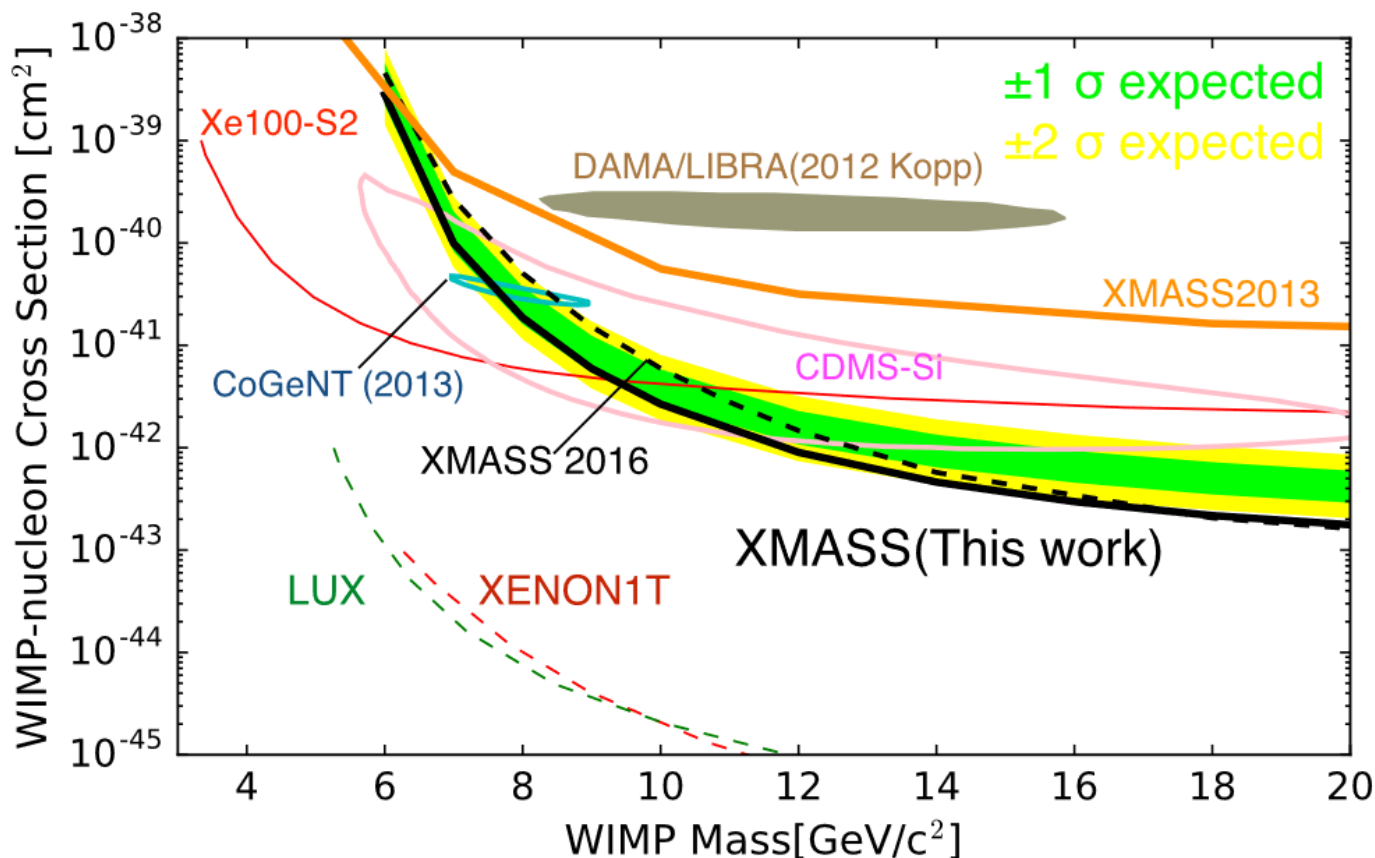
# 検出器の安定性

- Co57 線源によるキャリブレーションによりPEの変化を観測
  - ① 停電により突然下がった。
  - ② 純化作業
  - ③ キセノンガスを継続的に循環
- Run2はさらに安定 (Run1は前回の論文で使用した期間(PLB2016)).  
(RMS of P.E. yield : 0.5%)
- キャリブレーションとMCを用い検出器の安定性を解析した。
  - PEの変化は吸収長の変化で説明できる。
  - 相対光量のRMSは: Run1 - 0.6%, Run2 - 0.3%



FADCの gain calibrationの方法が異なりやや変動がある。

# 季節変動による暗黒物質探索：結果



- 我々の観測はDAMA/LIBRA領域を排除した。
- PhysRevD97, 102006 (2018)

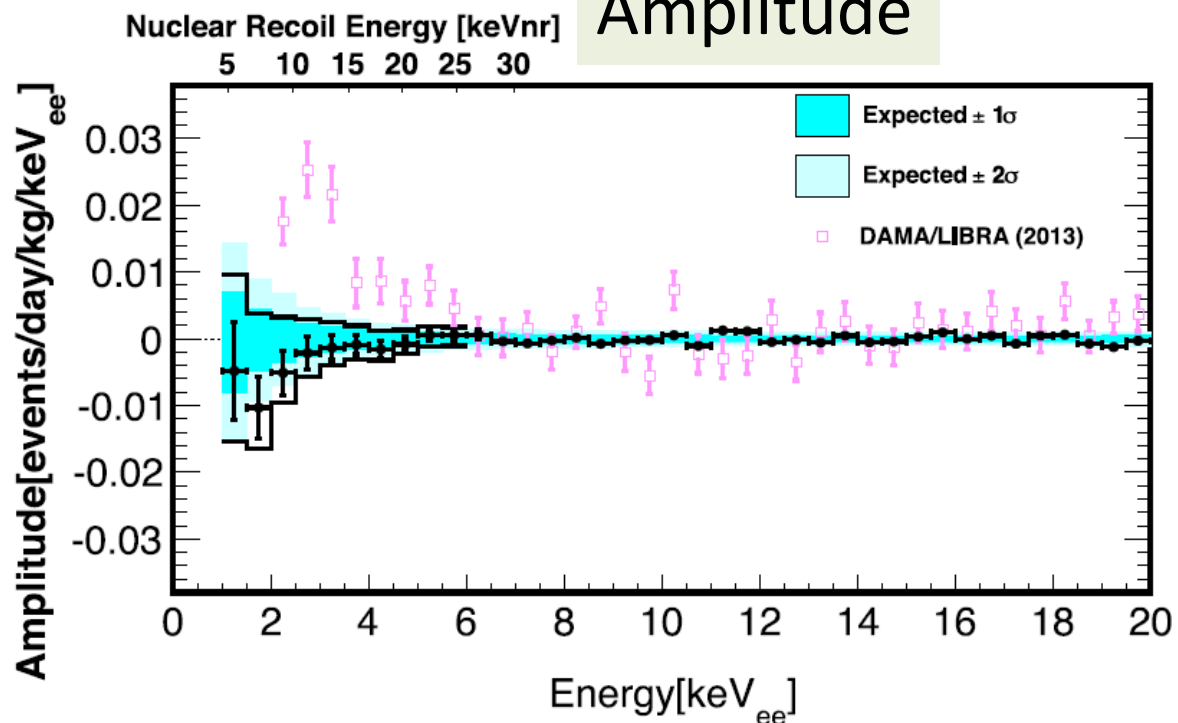
## Model assumption

T: 1 year,  $t_0 = 152.5$  day (fixed)  
 $V_0$ : 232.0 km/s  
 $V_{\text{esc}}$ : 544 km/s  
 $\rho_{\text{dm}}$ : 0.3 GeV/cm<sup>3</sup>  
Lewin, Smith (1996)

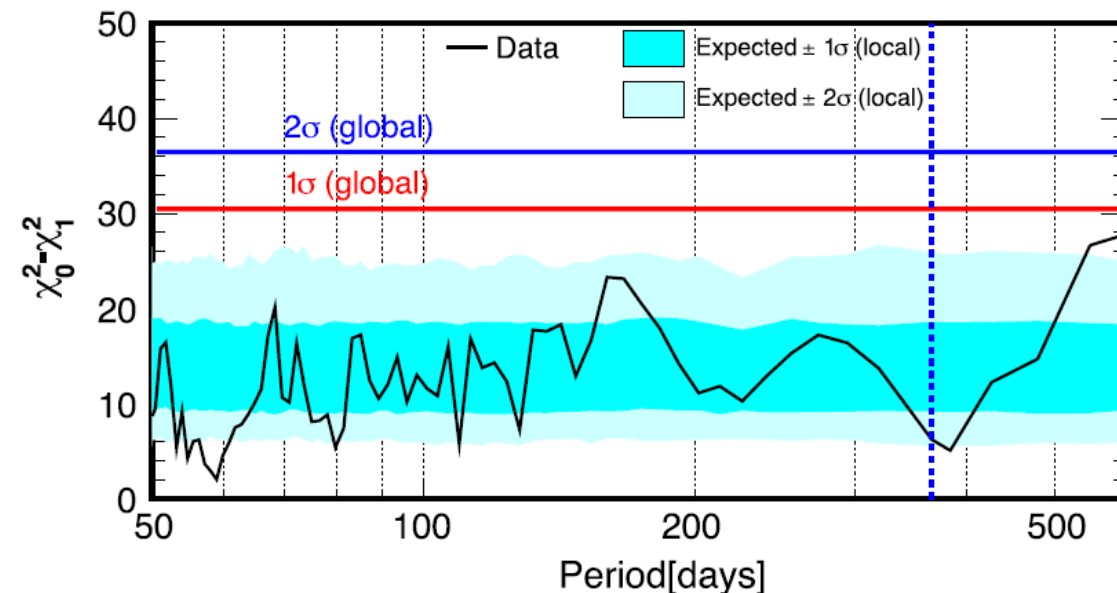


# モデルによらない季節変動の探索

Amplitude



Power spectrum



実験	Amplitude(events/day/kg/keV <sub>ee</sub> )
DAMA/LIBRA	~0.02 at 2.0-3.5keV <sub>ee</sub>
XENON100	$1.67 \pm 0.73 \times 10^{-3}$ at 2.0-5.8keV <sub>ee</sub>
XMASS	$<(1.3-3.2) \times 10^{-3}$ at 2-6keV <sub>ee</sub>

- Phase  $t_0$  : free parameter. 1–6 keV<sub>ee</sub>
- Test statistics :  $\Delta\chi^2$  of model independent analysis between null and periodic hypotheses.
- 有意に変動がみられる周期は 50～600日にはなかった。

# Hidden photon (HP)とAxion-like particle (ALP)暗黒物質探索: 動機

## HP (vector boson super-WIMPs)

- 散乱断面積 ( $\sigma_{\text{abs}}$ ):

$$\frac{\sigma_{\text{abs}} v}{\sigma_{\text{photo}}(\omega = m_V)c} \approx \frac{\alpha'}{\alpha}$$

( $\alpha'$ : the vector boson analogue to the fine structure constant.  $v$ : the vector boson速度)

- 光電効果と同様の過程で検出できる
- 検出器での計測数 ( $S_v$ ):

$$S_v \approx \frac{4 \times 10^{23}}{A} \frac{\alpha'}{\alpha} \left( \frac{\text{keV}}{m_V} \right) \left( \frac{\sigma_{\text{photo}}}{\text{barn}} \right) \text{kg}^{-1} \text{day}^{-1}$$

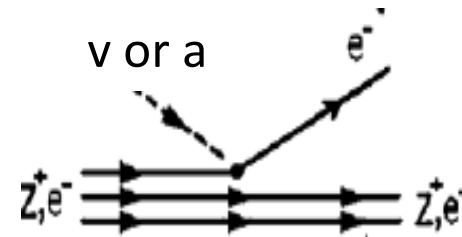
( $A$ : atomic mass, standard local matter density:  $0.3 \text{ GeV/cm}^3$ )

Pospelov et, al. Phys. Rev. D 78 115012 (2008)

## ALP (pseudo-scalar boson super-WIMPs)

- 散乱断面積 ( $\sigma_{\text{abs}}$ ):

$$\frac{\sigma_{\text{abs}} v}{\sigma_{\text{photo}}(\omega = m_a)c} \approx \frac{3m_a^2}{4\pi\alpha f_a^2}$$



( $v$ : vector boson速度,  $m_a$ : pseudoscalar mass,  $f_a$ : dimensionful coupling constant.)

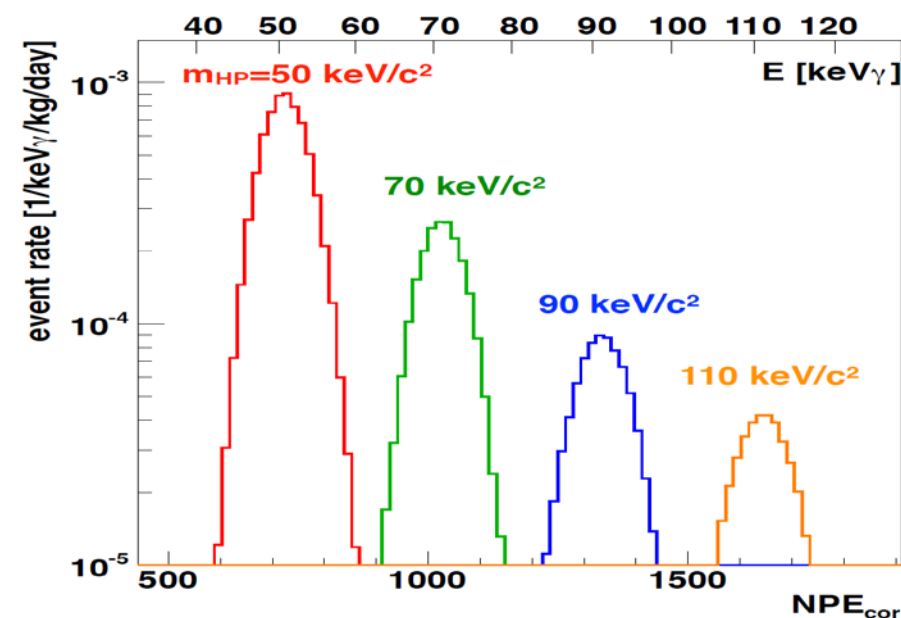
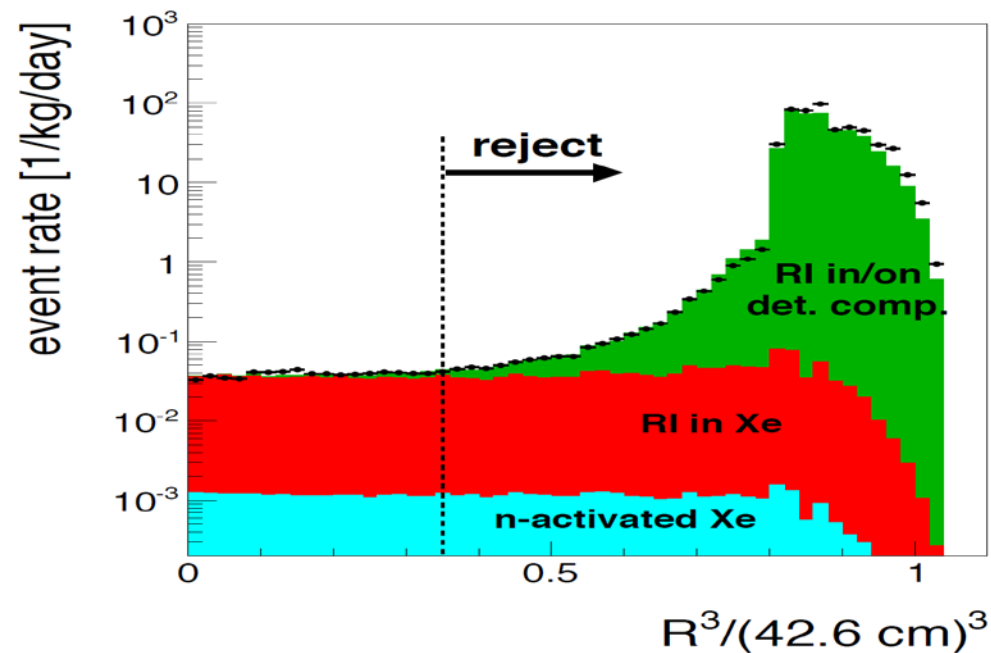
- 検出器での計測数:

$$S_a \approx \frac{1.2 \times 10^{19}}{A} g_{aee}^2 \left( \frac{m_a}{\text{keV}} \right) \left( \frac{\sigma_{\text{photo}}}{\text{barn}} \right) \text{kg}^{-1} \text{day}^{-1}$$

( $g_{aee} = 2m_e/f_a$ ,  $m_e$ : 電子の質量)

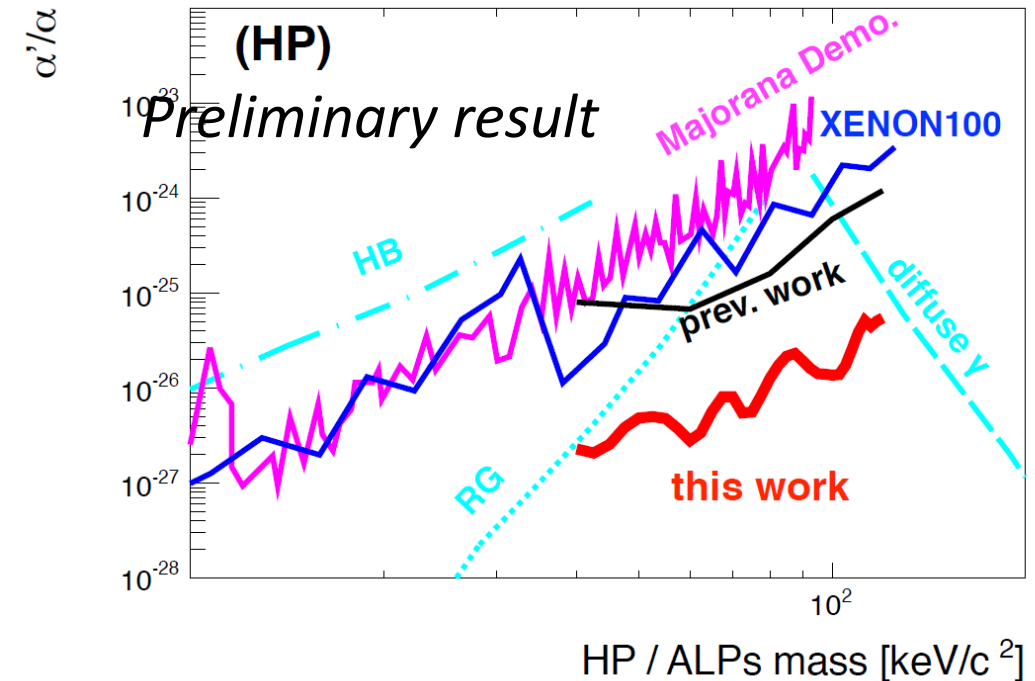
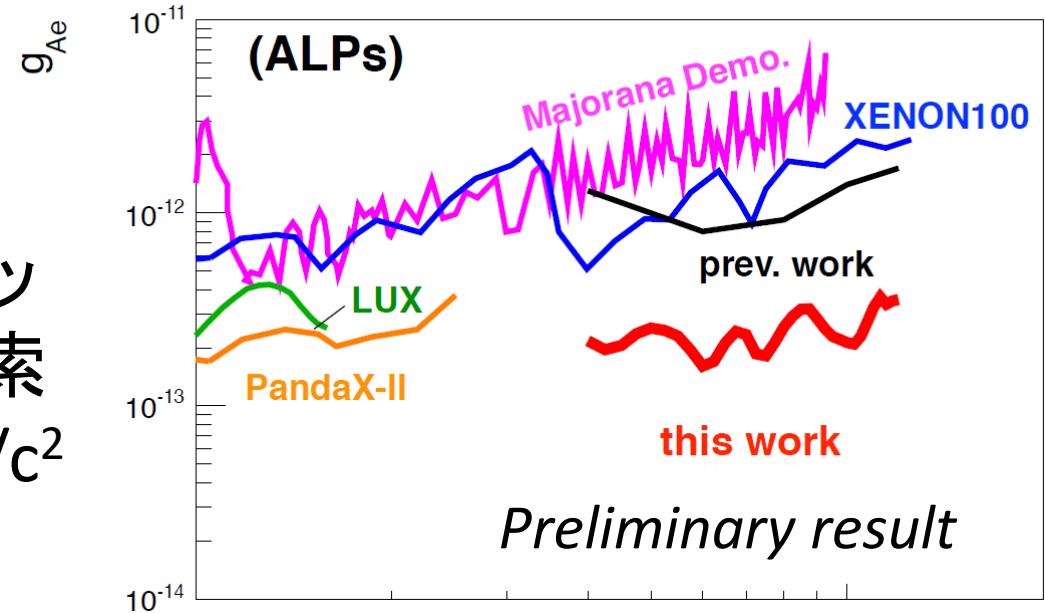
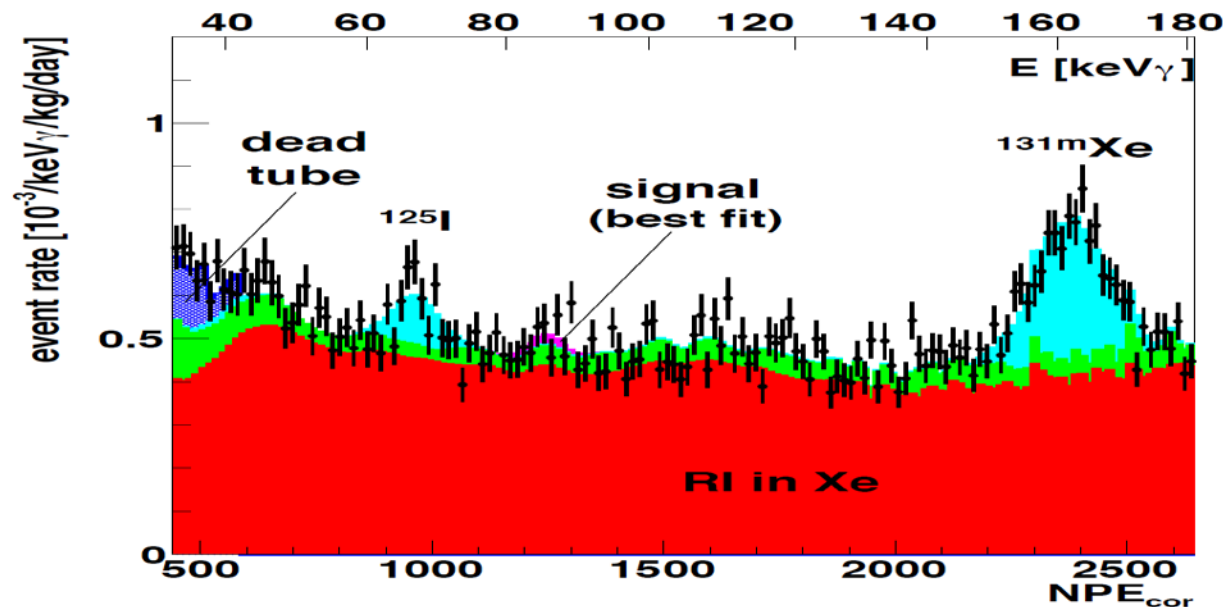
# HPとALP暗黒物質探索: 手法

- データ:
  - Nov. 2013 – Jul. 2016 (lifetime 800days)
- データ選別:
  - standard cut + fiducial volume cut ( $R < 30\text{cm}$ ) (327kg FV)
- NPE分布でピークとして観測できる。



# HPとALP暗黒物質探索:結果

- $440-2650 \text{NPE}_{\text{corr}}$  ( $30-180 \text{keV } \gamma$ )の領域をバックグラウンド+信号(ピーク)でフィットし探索
- 有意な信号は得られなかった。 $40-120 \text{keV}/c^2$ では共に最も強い制限を与えた。
- PLB787 (2018) 153-158



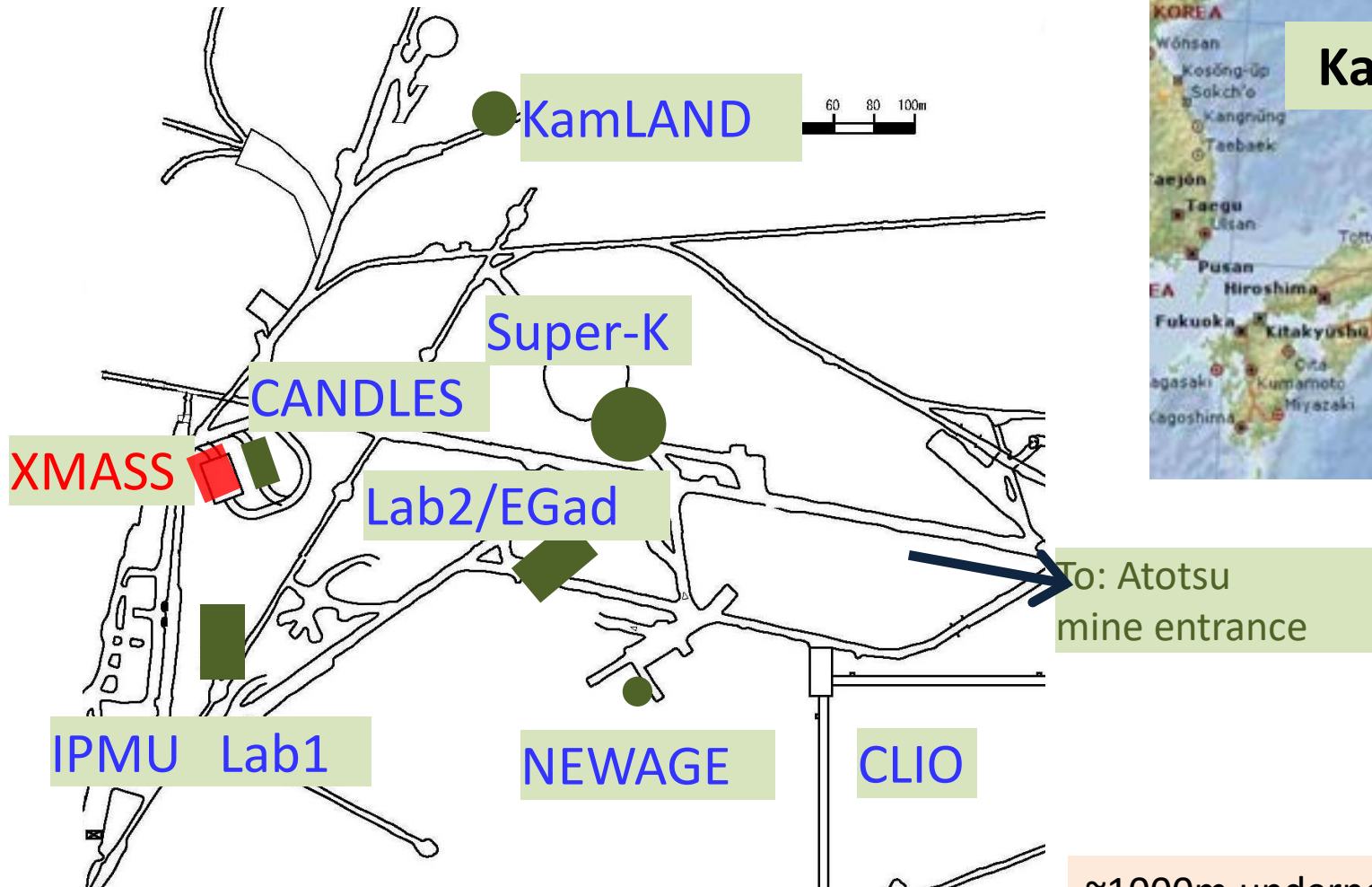


# まとめ

- XMASS実験は2013年から4年以上安定的に観測を続けている。
- バックグラウンドを精査し、有効体積解析によるWIMP探索をおこなったが有意なWIMP信号は観測されなかった。質量60GeVのWIMPsでは  $2.2 \times 10^{-44} \text{cm}^2$  まで排除した。
- 季節変動を用いた暗黒物質探索では1.82ton·yearという大統計でおこなったが有意なWIMP信号は観測されなかった。この結果 DAMA/LIBRA 領域を排除した。
- hidden photon and axion like particleの暗黒物質探索では信号はみつからなかったが40-120keV/c<sup>2</sup>で最も強い制限をつけた。
- 解析は継続して行っていく予定。新たに3本の論文が審査中。
- 2018年度内にデータ取得を終了予定。

backup

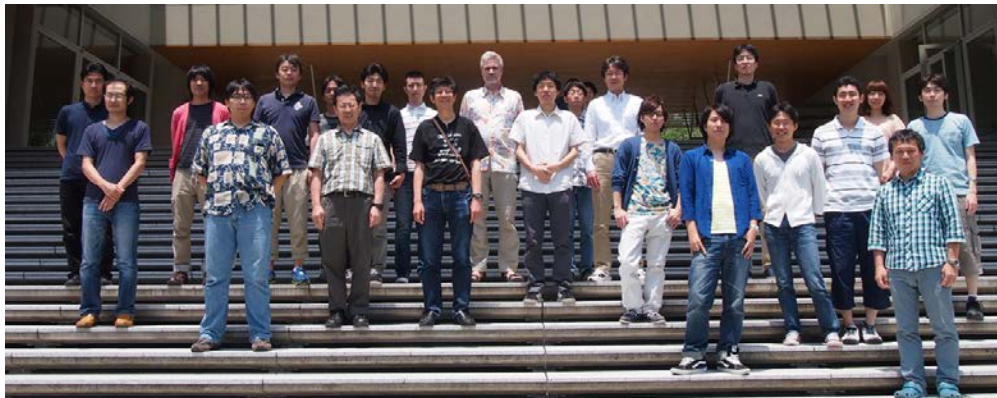
# Kamioka mine



~1000m underneath Mt. Ikenoyama

# XMASS collaboration

ICRR, University of Tokyo	K. Abe, Y. C. Chen, K. Hiraide, K. Ichimura, S. Imaizumi, N. Kato, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, K. Sato, H. Sekiya, T. Suzuki, S. Tasaka, A. Takeda, M. Yamashita
Kavli IPMU, University of Tokyo	K. Martens, A. Mason, Y. Suzuki, B. Xu
Kobe University	K. Miuchi, Y. Takeuchi
Tokai University	K. Nishijima
Tokushima University	K. Fushimi
Yokohama National University	S. Nakamura
Miyagi University of Education	Y. Fukuda
Nihon University	H. Ogawa
ISEE, Nagoya University	Y. Itow, K. Kanzawa, R. Ishii
IBS	N.Y. Kim, Y. D. Kim
KRISS	Y. H. Kim, M. K. Lee, K. B. Lee



11 institutes, 36 collaborators



# WIMP search in the fiducial volume

Location of RI	RI	Activity [mBq/detector]	Activity [mBq/detector]
		initial value of the fit	the best fit value
LXe	$^{222}\text{Rn}$	-	$8.53 \pm 0.16$
	$^{85}\text{Kr}$	-	$0.25 \pm 0.04$
	$^{39}\text{Ar}$	-	$0.65 \pm 0.04$
	$^{14}\text{C}$	-	$0.19 \pm 0.01$
copper plate and ring	$^{210}\text{Pb}$	-	$(6.0 \pm 1.0) \times 10^2$
copper surface	$^{210}\text{Pb}$	-	$0.7 \pm 0.1$
PMT quartz surface	$^{210}\text{Pb}$	-	$6.4 \pm 0.1$
PMT	$^{238}\text{U}$	$(1.5 \pm 0.2) \times 10^3$	$(2.0 \pm 0.2) \times 10^3$
(except aluminum seal and quartz surface)	$^{232}\text{Th}$	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^3$	$(1.1 \pm 0.3) \times 10^3$
	$^{60}\text{Co}$	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^3$	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^3$
	$^{40}\text{K}$	$(5.8 \pm 1.4) \times 10^3$	$(9.6 \pm 1.7) \times 10^3$
	$^{210}\text{Pb}$	$(1.3 \pm 0.6) \times 10^5$	$(2.2 \pm 0.7) \times 10^5$
PMT aluminum seal	$^{238}\text{U}$	$(1.5 \pm 0.4) \times 10^3$	$(9.0 \pm 4.1) \times 10^2$
	$^{235}\text{U}$	$(6.8 \pm 1.8) \times 10^1$	$(4.1 \pm 1.8) \times 10^1$
	$^{232}\text{Th}$	$(9.6 \pm 1.8) \times 10^1$	$(5.5 \pm 2.2) \times 10^1$
	$^{210}\text{Pb}$	$(2.9 \pm 1.2) \times 10^3$	$(3.4 \pm 1.2) \times 10^3$
Detector vessel, holder and filler	$^{238}\text{U}$	$(1.8 \pm 0.7) \times 10^3$	$(9.0 \pm 7.6) \times 10^2$
	$^{232}\text{Th}$	$(6.4 \pm 0.7) \times 10^3$	$(6.4 \pm 3.2) \times 10^3$
	$^{60}\text{Co}$	$(2.3 \pm 0.1) \times 10^2$	$(3.0 \pm 1.9) \times 10^2$
	$^{210}\text{Pb}$	-	$(3.8 \pm 0.5) \times 10^4$

Contents	Systematic error	
	2-15 keV <sub>ee</sub>	15-30 keV <sub>ee</sub>
(1) Plate gap	+6.2/-22.8%	+1.9/-6.9%
(2) Ring roughness	+6.6/-7.0%	+2.0/-2.1%
(3) Copper reflectivity	+5.2/-0.0%	+2.5/-0.0%
(4) Plate floating	+0.0/-4.6%	+0.0/-1.4%
(5) PMT aluminum seal	+0.7/-0.7%	-
(6) Reconstruction	+3.0/-6.2%	-
(7) Timing response	+4.6/-8.5%	+0.4/-5.3%
(8) Dead PMT	+10.3/-0.0%	+45.2/-0.0%
(9) LXe property	+0.7/-6.7%	+1.5/-1.1%