

XMASS

ダークマター懇談会2020(online)
2020年9月8日
日本大学理工学部
小川 洋 他XMASS collaboration



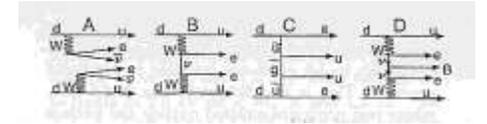
XMASS実験

- 1相式 (scintillation only) 液体キセノン検出器
- 神岡宇宙地下素粒子実験施設 Lab-C (~2700m.w.e.)に設置
- 世界初のton class暗黒物質探索実験
- 大光量~15pe/keV →低閾値 (~1keV)
- 液体キセノンを使った“極低バックグラウンド多目的検出器”
 - →暗黒物質探索だけでなく、低エネルギーの色々な物理事象の研究が可能。
- 2019年2月に観測完了

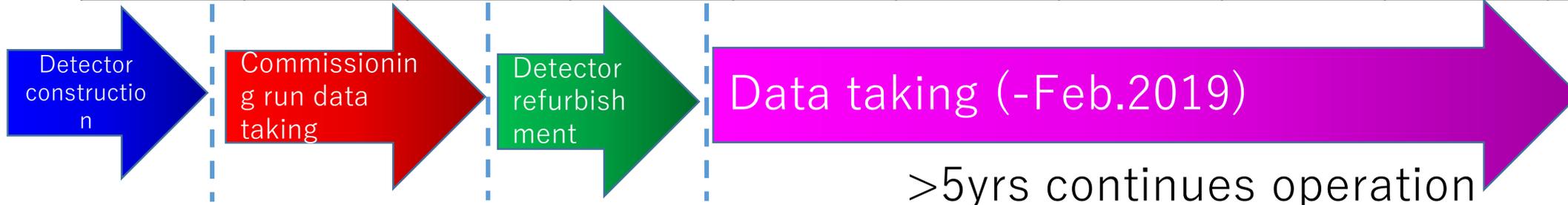
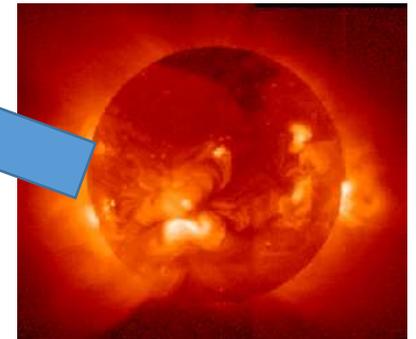


Neutrino-less double beta decay

Dark matter

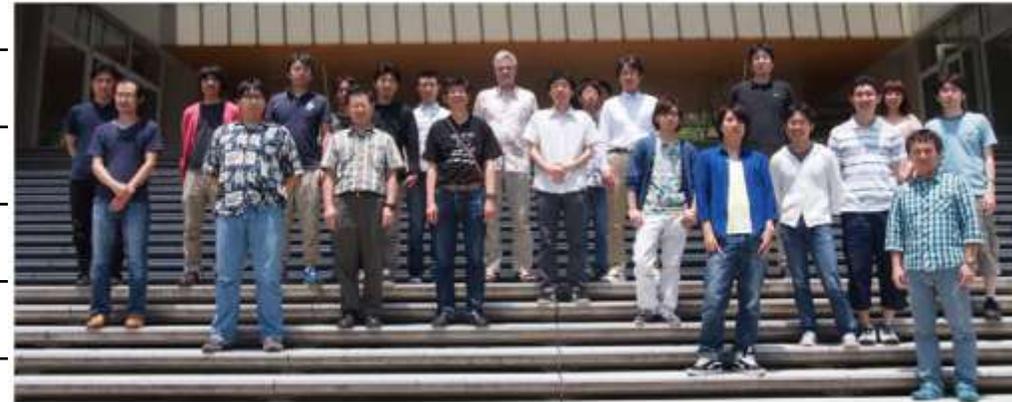


Solar neutrino



XMASS collaboration

ICRR, University of Tokyo	K.Abe, K.Hiraide, N.Kato, S.Moriyama, M.Nakahata, K.Sato, H.Sekiya, T.Suzuki, Y.Suzuki, S.Tasaka, A.Takeda
Kavli IPMU, University of Tokyo	K.Martens, A.Mason
Kobe University	Y.Takeuchi, K.Miuchi
Tokai University	K.Nishijima
Yokohama National University	S.Nakamura
Miyagi University of Education	Y.Fukuda
Nihon University	H.Ogawa
ISEE, Nagoya University	M.Yamashita, Y.Itow
RCNS, Tohoku University	K.Ichimura, Y.Kishimoto
KRISS	M.K.Lee, K.B.Lee
CUP, IBS	N.Y.Kim, Y.D.Kim, Y.H.Kim
CAPPR, IBS	B.S.Yang
Tsinghua University	B.D.Xu
WRISE, Waseda University	K.Kobayashi

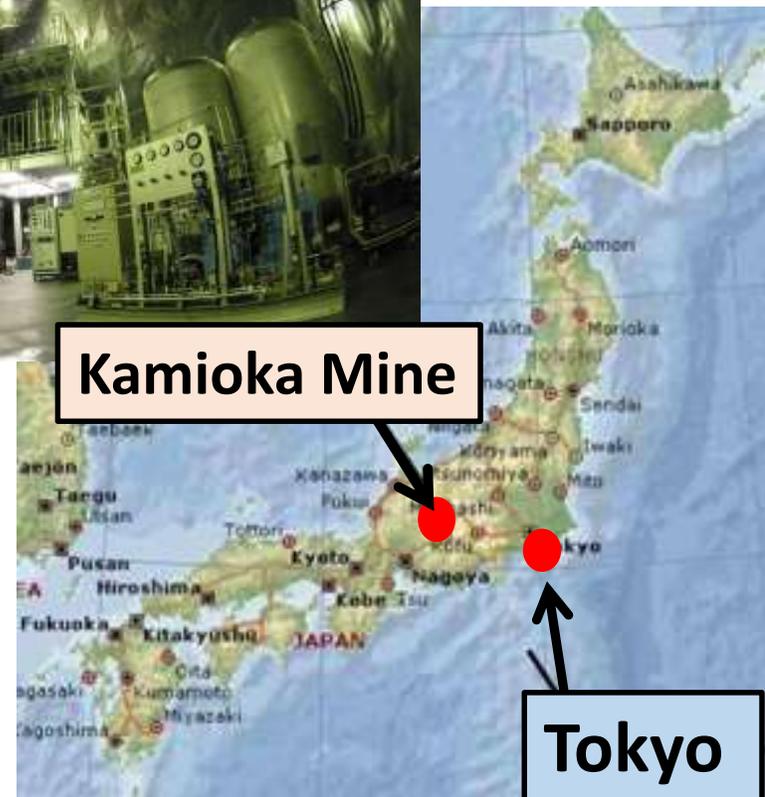


XMASS-I 検出器

- 1相式 (scintillation only) 液体キセノン検出器
- 神岡宇宙地下素粒子実験施設 Lab-C (~2700m.w.e.)
- muon veto用の10x10m 水タンク + 70本20インチPMT
- 630 六角 & 12 円筒 光電子増倍管 (PMT) : 28-39% Q.E.
- photocathode coverage: ~ 62%
- 検出器内部感度領域の液体キセノン量 : 832kg (直径~80cm)

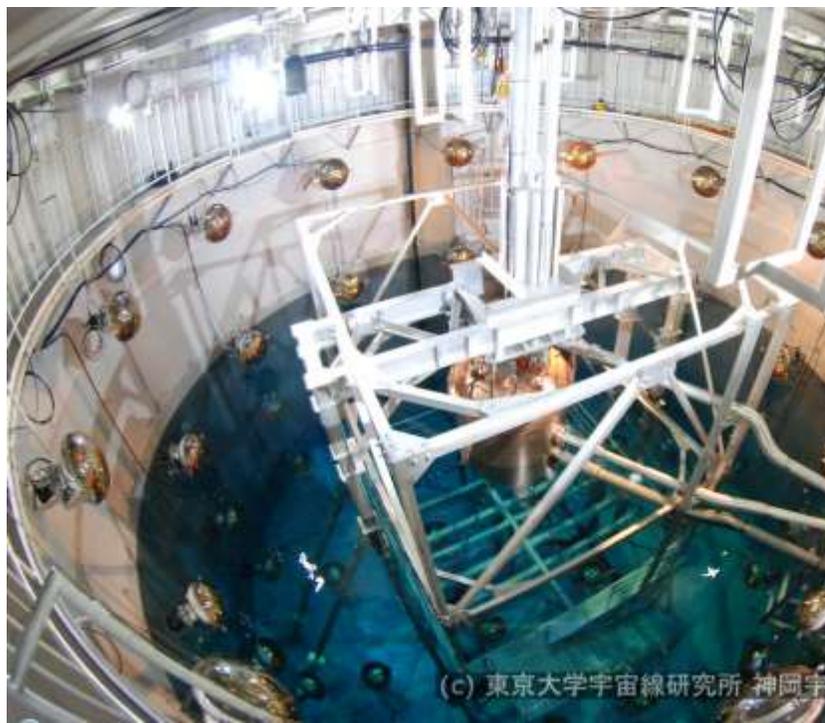


Japan

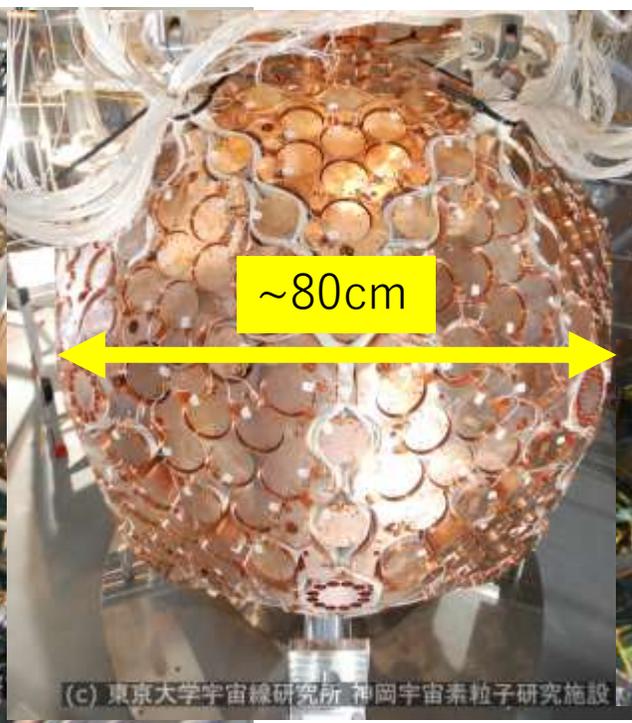


Kamioka Mine

Tokyo

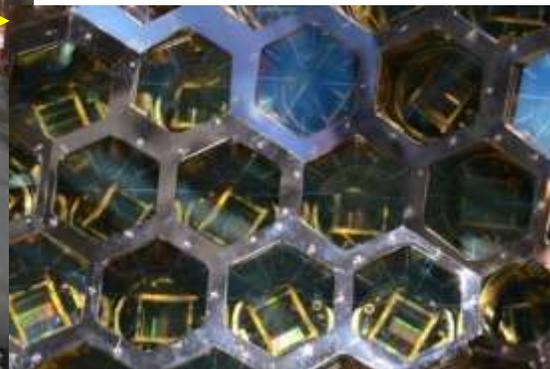


(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇



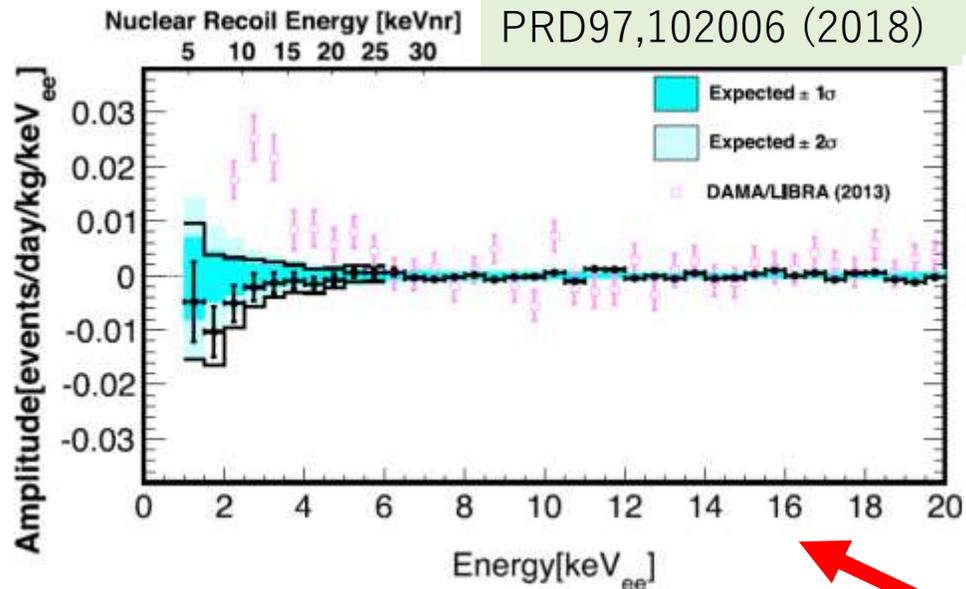
~80cm

(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

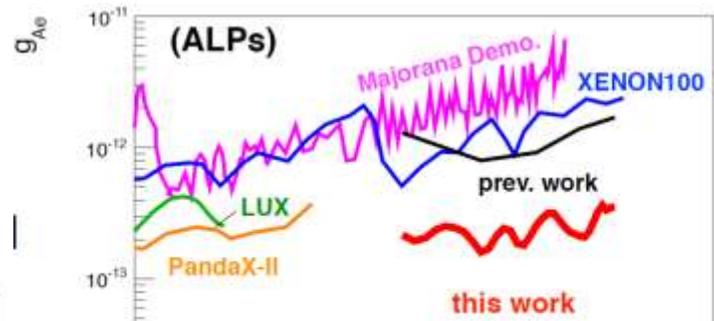
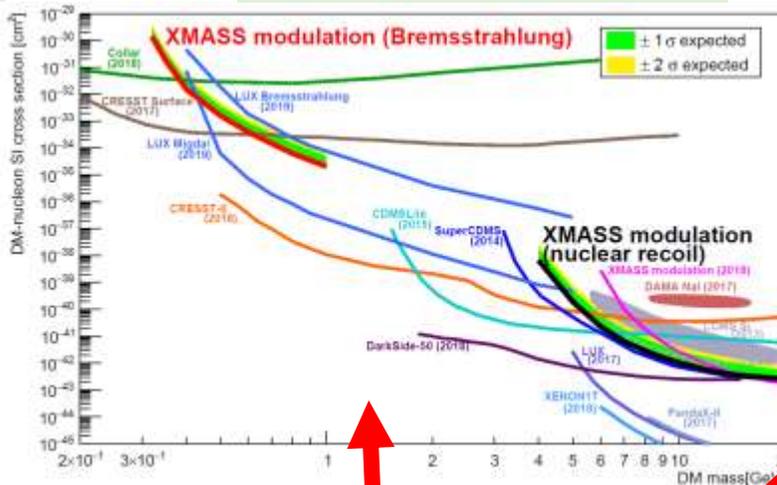


XMASS-I これまでの成果

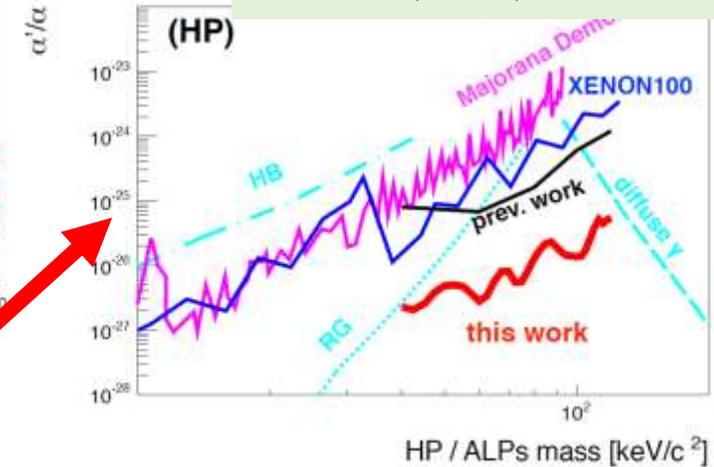
Annual modulation
PRD97,102006 (2018)



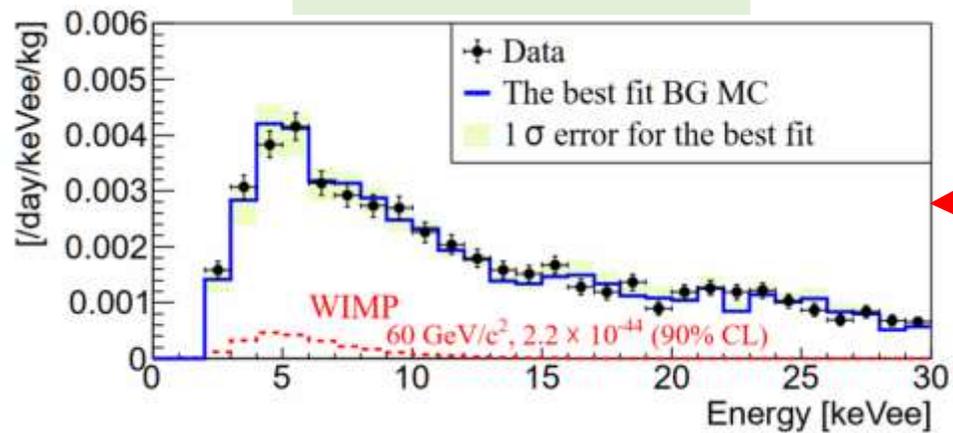
Sub-GeV DM search
PLB795(2019)308-313



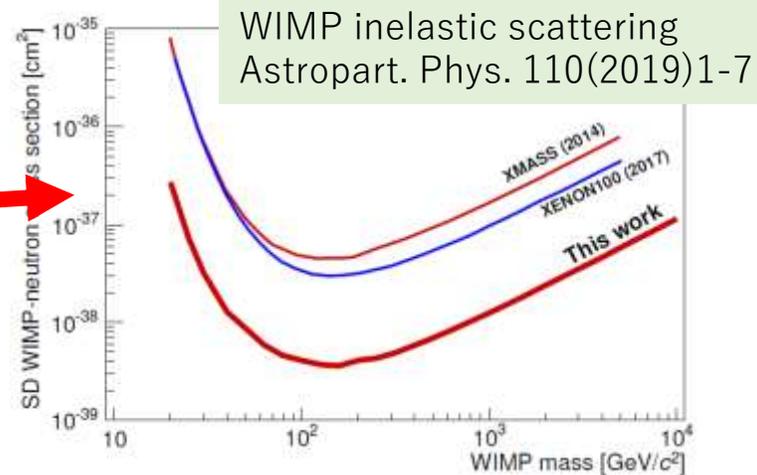
Hidden photon DM
PLB787(2018)153-158.



Direct DM search
PLB789(2019)45-53.

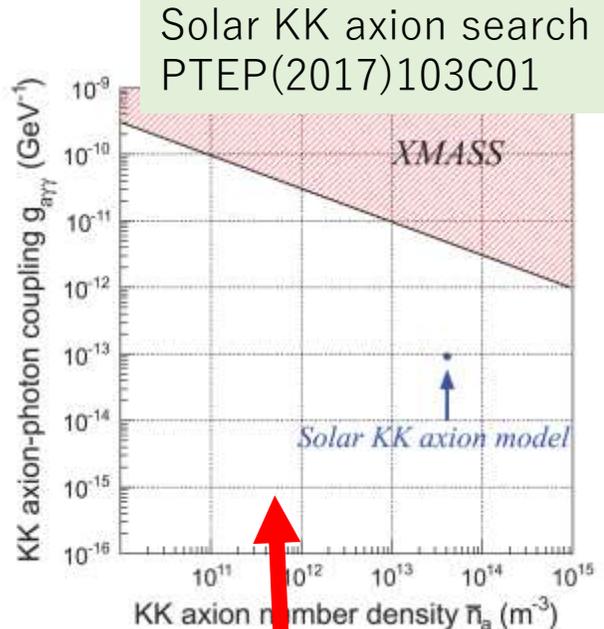
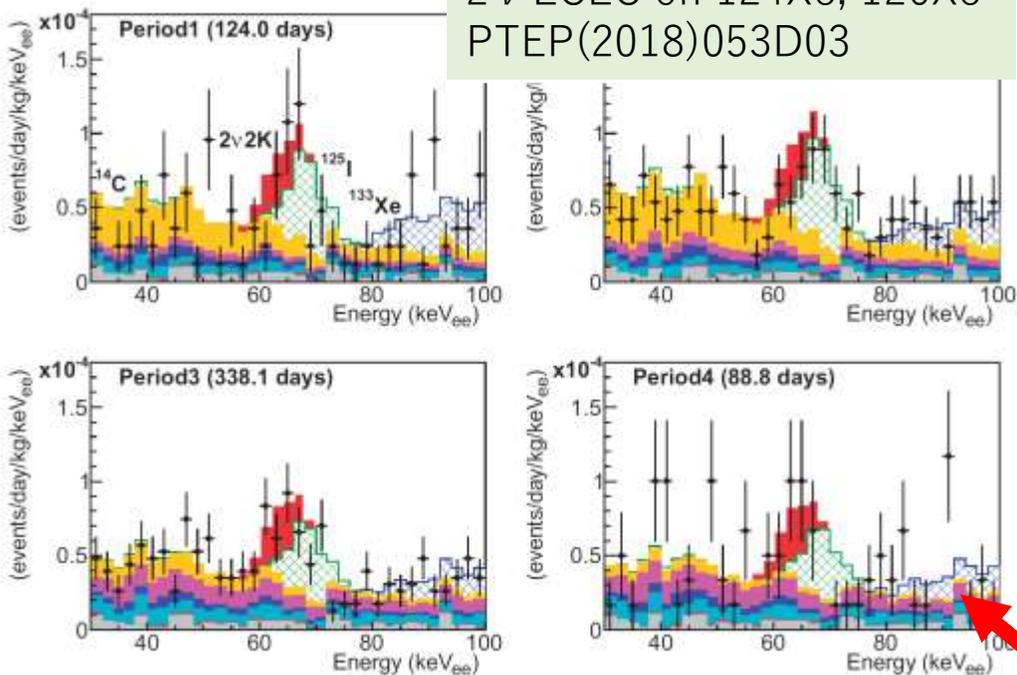


様々な手法でDM探索

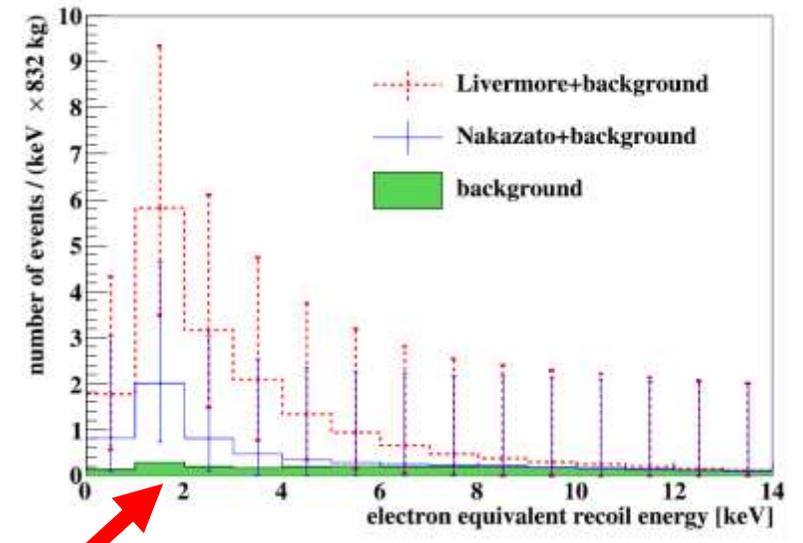


WIMP inelastic scattering
Astropart. Phys. 110(2019)1-7

XMASS-I これまでの成果

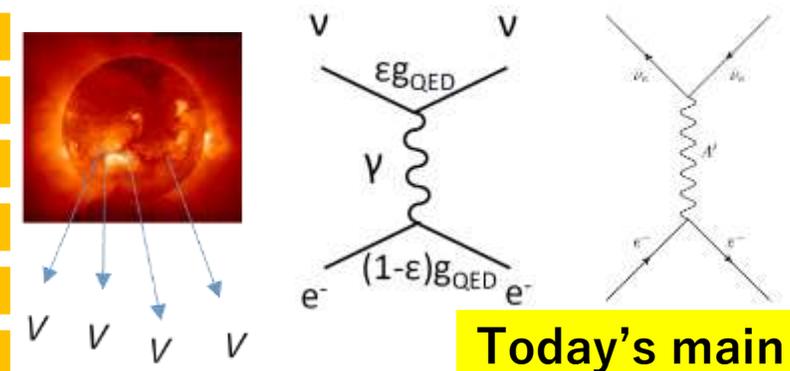


Possibility of SN neutrino detection
Astropart. Phys. 89(2017)51



GW related burst search
arXiv:2007.16046
Submitted to Astropart. Phys.

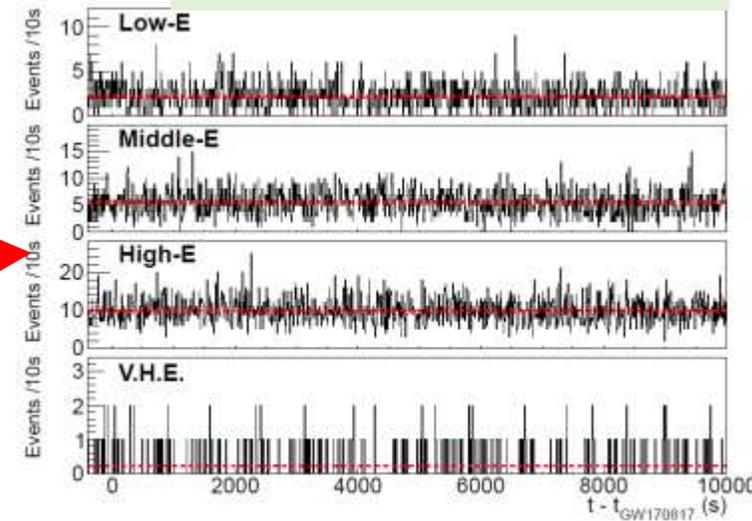
Exotic neutrino interaction search
PLB 809 (2020) 135741 [new!]



Today's main topic



DM以外の物理ターゲットでも成果



XMASS-Iによるsolar axion探索

PLB 724 (2013) 46-50

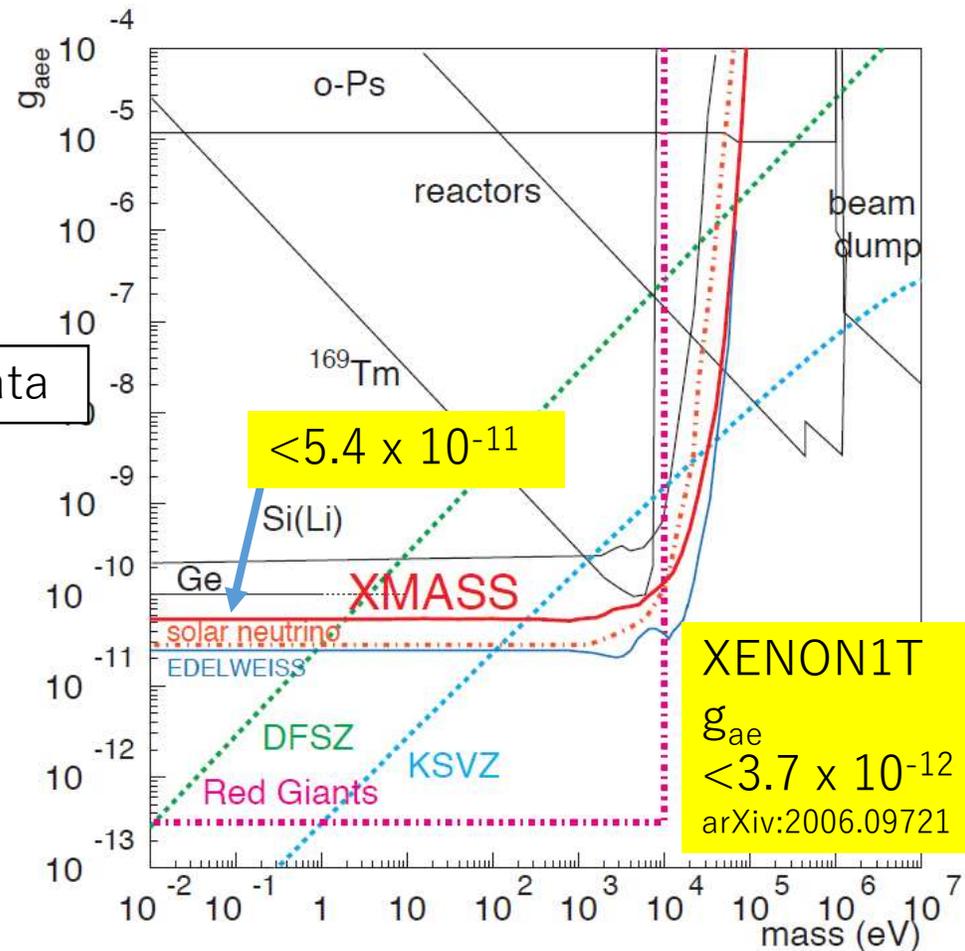
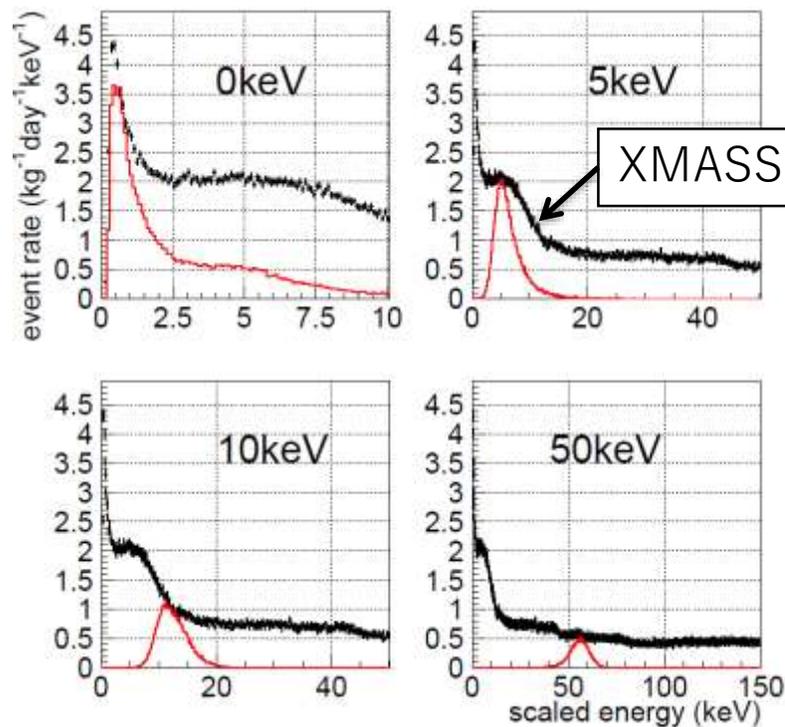
- Assumption of axion production in the sun : bremsstrahlung and Compton effect.
- detected by axio-electric effect in XMASS.
- Using commissioning run data (2012)

$$\Phi_a \propto g_{aee}^2$$

Bremsstrahlung and Compton effect

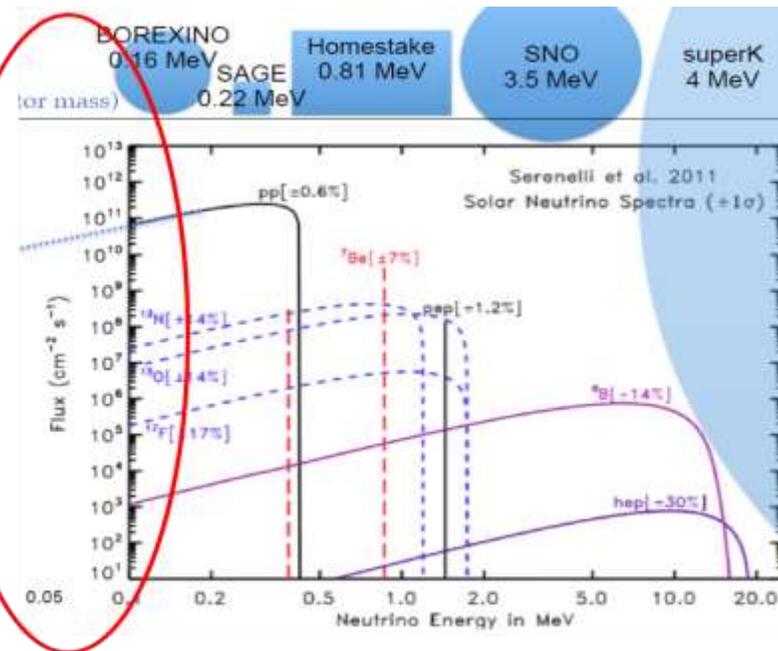
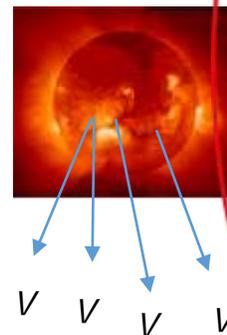


Axio-electric effect



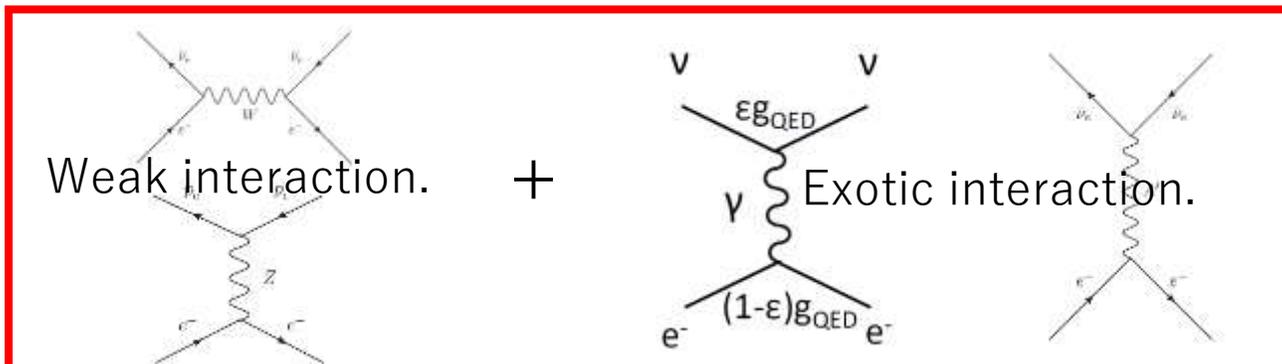
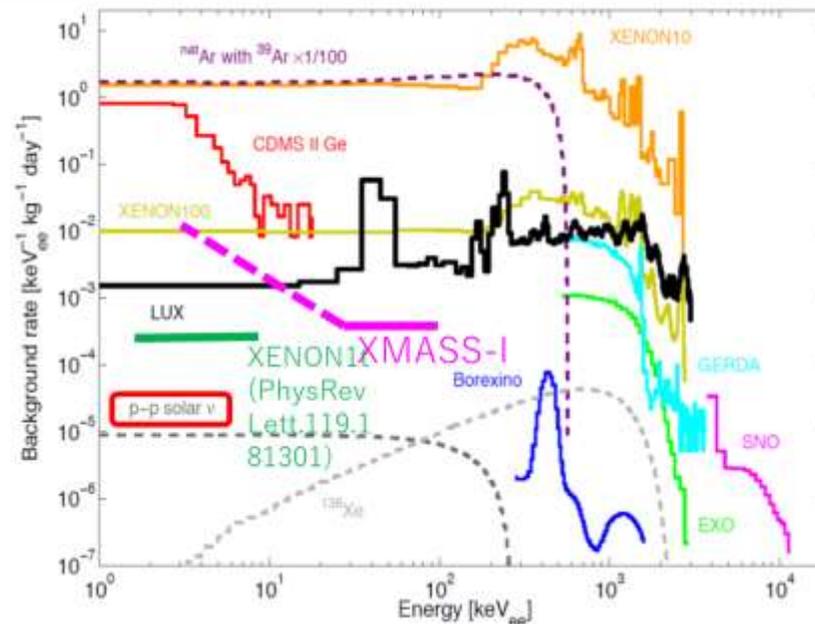
太陽ニュートリノによるエキゾチックなニュートリノ相互作用の探索

- 太陽ニュートリノをXMASS-I実験等の現行暗黒物質探索検出器で観測→1/100以上のバックグラウンド削減が必要。
- 標準理論の拡張で、エキゾチックなニュートリノ相互作用がある場合、低エネルギーでの事象の増加が期待される。→低閾値を持つ暗黒物質探索検出器が有利。
- 太陽ニュートリノとキセノン電子による、以下を介した相互作用をXMASS-I検出器で探索：
 - ニュートリノ微弱荷電(millicharge)
 - ニュートリノ磁気能率(magnetic moment)
 - Dark photon ($U(1)_{B-L}$) を介した相互作用



Peter Sorensen Neutrino2016

Original figure ; D.C.Mailing Ph.D (2014) Fig 1.5



ニュートリノの微弱電荷 (millicharge)

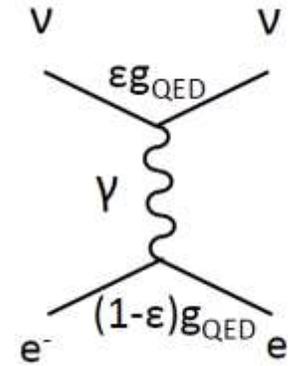
- 素粒子の標準理論で、ニュートリノの電荷はゼロと仮定している。
- 電荷の量子化が証明されていないので、ニュートリノが微電荷をもつ可能性がある。
- これまでの直接探索：
 - 原子炉からの反電子ニュートリノを用いた、ニュートリノ-電子電磁相互作用の探索 (GEMMA's data, A.Studenikin, Europhys.Lett. 107 (2014)39901) $\delta e < 1.5 \times 10^{-12} e$
 - 真空中の複屈折からの探索 (PVLAS, F.Della Valle et al., Eur. Phys. J. C 76(2016)24) $\delta_{e, \mu, \tau} < 3 \times 10^{-8} e @ m_\nu < 10 \text{meV}$

• XMASSでは..

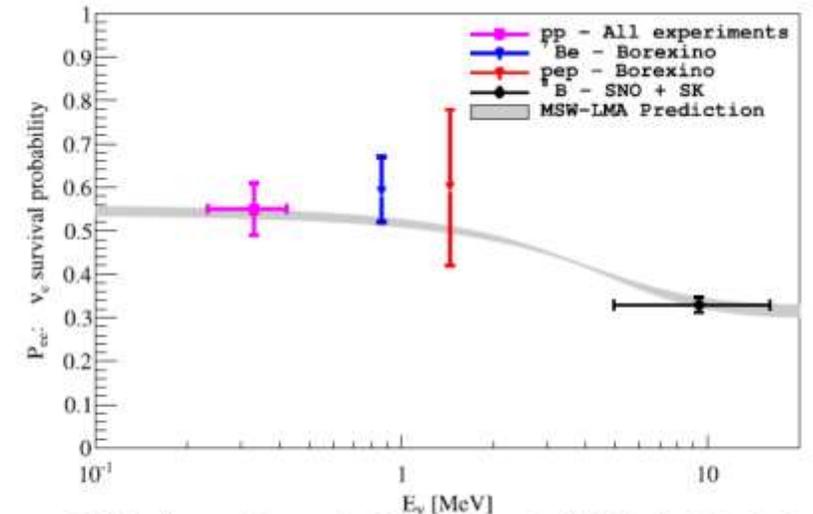
- 太陽ニュートリノによる電磁相互作用の探索

$$\left(\frac{d\sigma}{dT_e} \right)_{EM} \cong \frac{2\pi\alpha}{m_e T_e^2} \delta^2$$

- ニュートリノ振動により含まれる ν_e, ν_μ, ν_τ 成分により、各フレーバーごとに探索を実施する。



標準模型における微電荷をもつニュートリノと電子の反応



Phys. Of the Dark Univ. 4 (2014) 44-49
 Fig. 5. Survival probability for solar ν_e using the low-Z SSM. The LMA-MSW

ニュートリノの磁気能率(magnetic moment)

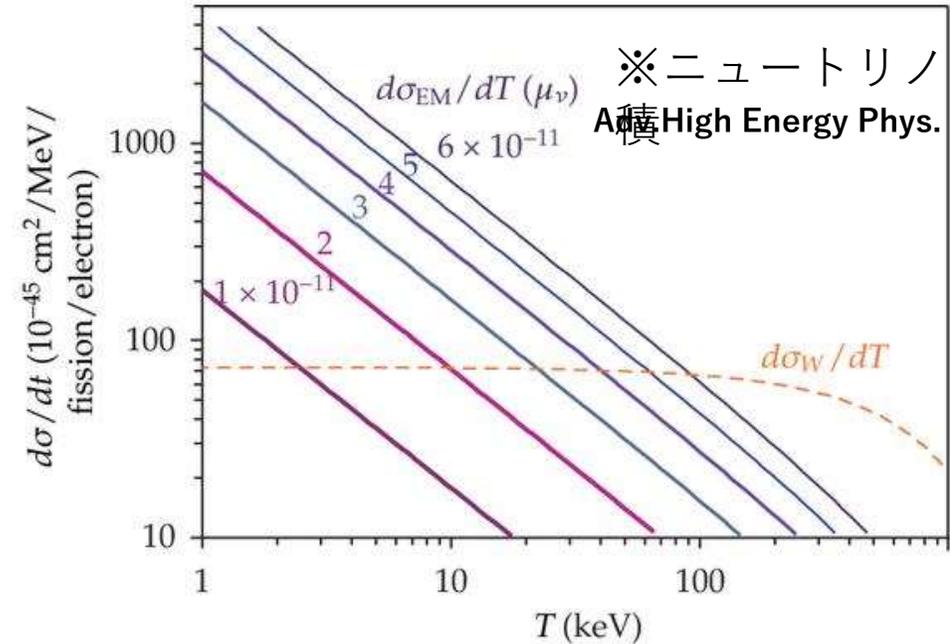
- ニュートリノの磁気能率：標準理論の少しの拡張によって予言：

$$\mu_\nu = \frac{3m_e G_F}{4\pi^2 \sqrt{2}} m_\nu \mu_B \approx 3.2 \times 10^{-19} \left(\frac{m_\nu}{1\text{eV}} \right) \mu_B$$

- 標準理論をさらに拡張すると、 $10^{-(10\sim 12)} \mu_B$ の磁気能率を持つ可能性 (PRL58.1807(1987))
 - ニュートリノがマヨラナである。
 - ※Diracニュートリノでは $<10^{-14} \mu_B$ の制限
- 磁気能率があったら、ニュートリノの相互作用に“電磁相互作用”の成分が加わる。

$$\frac{d\sigma_{\nu\ell e^-}}{dT_e} = \left(\frac{d\sigma_{\nu\ell e^-}}{dT_e} \right)_{\text{SM}} + \left(\frac{d\sigma_{\nu\ell e^-}}{dT_e} \right)_{\text{mag}}$$

$$\left(\frac{d\sigma_{\nu\ell e^-}}{dT_e} \right)_{\text{mag}} = \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{E_\nu} \right) \left(\frac{\mu_{\nu\ell}}{\mu_B} \right)^2$$



※ニュートリノ散乱断面
 積 High Energy Phys. 2012 (2012) 350150

先行研究：

Borexino $\mu_{\nu s} (E_\nu < 1\text{MeV}) < 2.8 \times 10^{-11} \mu_B$
 (90% C.L.) [太陽ニュートリノ]
 10.1103/PhysRevD.96.091103

GEMMA $\mu_\nu < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B$ (90% C.L.)
 [原子炉ニュートリノ]

Adv.High Energy Phys. 2012 (2012) 350150

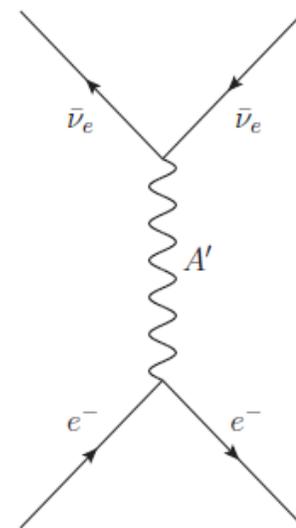
”Dark photon”を介したニュートリノ-電子相互作用

S.Bilmis et al, Phys.Rev.D 92, 033009 (2015)

- Hidden sectorに含まれるdark photonは、ゲージボゾンしてニュートリノ-電子相互作用に影響を与えることができるモデルがある。
- $\Rightarrow U(1)_{B-L}$ (baryon number - lepton number)

$$\left[\frac{d\sigma}{dT}(ne^- \rightarrow ne^-) \right]_{DP} = \frac{g_{B-L}^4 m_e}{4\pi E_\nu^2 (M_{A'}^2 + 2m_e T)^2} (2E_\nu^2 + T^2 - 2TE_\nu - m_e T)$$

- $M_{A'}$: Dark photon 質量
- g_{B-L} : coupling constant
- Muon g-2 anomaly を説明する候補の一つでもある。



※10MeVのニュートリノ

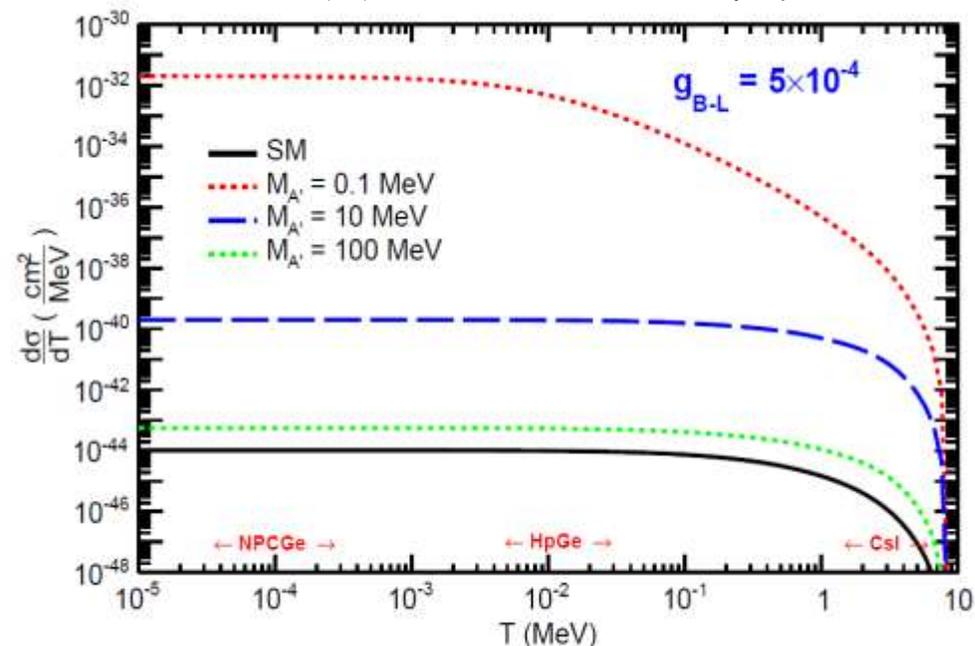


Figure 3. Cross-section vs recoil for various $M_{A'}$ by normalizing neutrino flux to 1.

キセノンで期待されるエネルギー分布

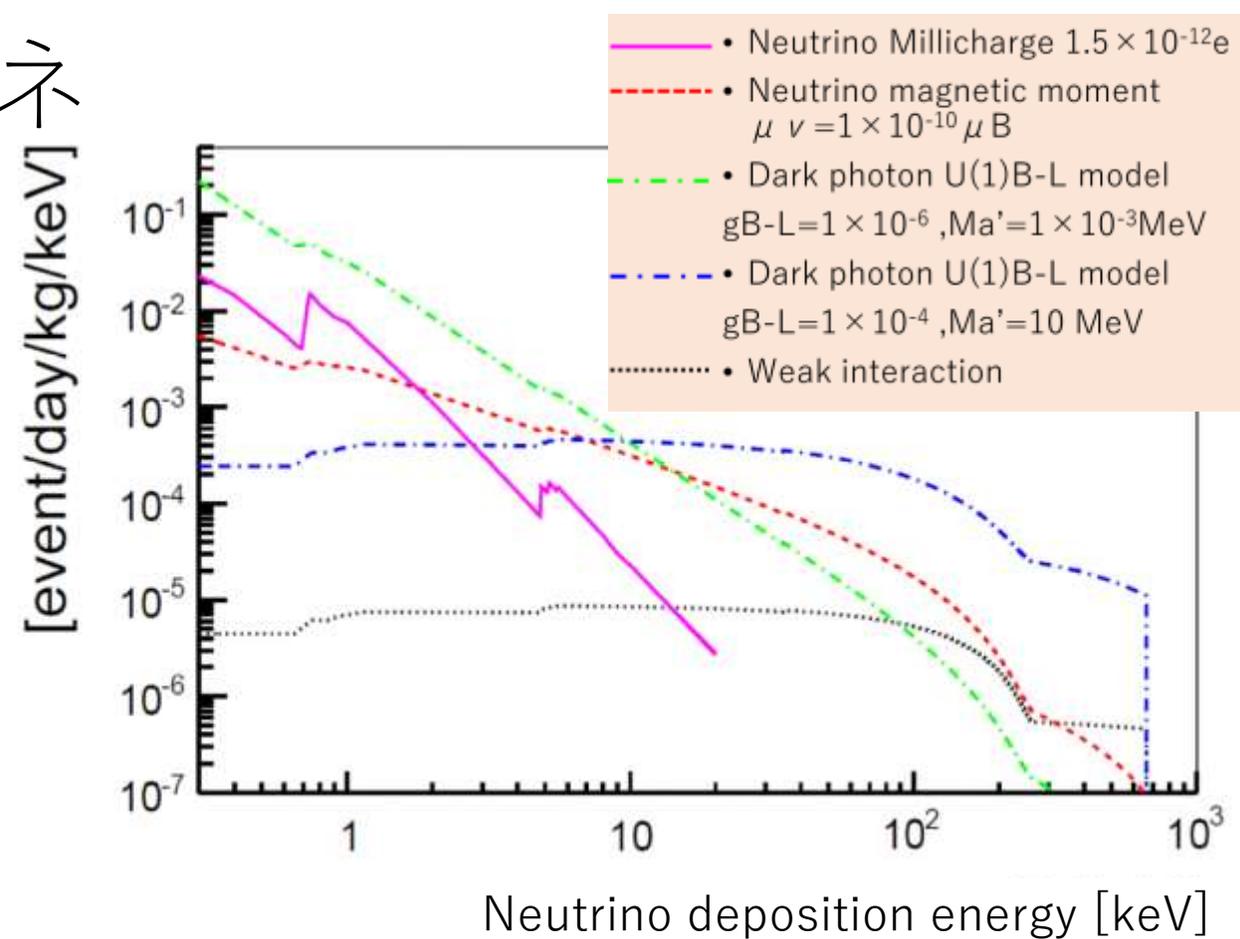
- 低エネルギーの太陽ニュートリノ (pp, 7Be) をニュートリノ源として探索する。
- ニュートリノーキセノン中電子との相互作用
 - 原子効果を考慮：キセノン原子と軌道電子の結合エネルギーにより、低エネルギーにおける散乱断面積が抑制。

- 微弱電荷・磁気能率: 低いエネルギーで急激に増加。 $\text{Rate} \propto (\delta)^2, \text{Spectrum} \propto 1/(T_e)^2$

$$\text{Rate} \propto (\mu_\nu)^2, \text{Spectrum} \propto 1/T_e$$

- Dark photon : 小さい質量では低いエネルギーで急激に増加するが、大きい質量では、エネルギー依存は少ない。

$$\text{Rate} \propto (g_{B-L})^4 / (M_{A'}^2 + 2m_e T)^2$$



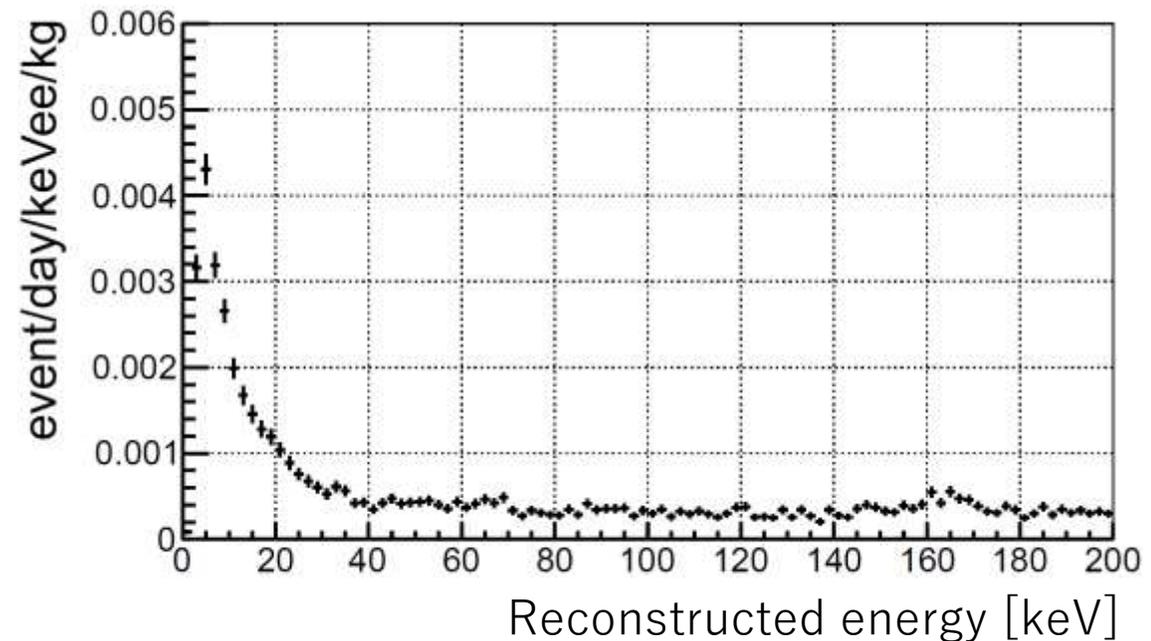
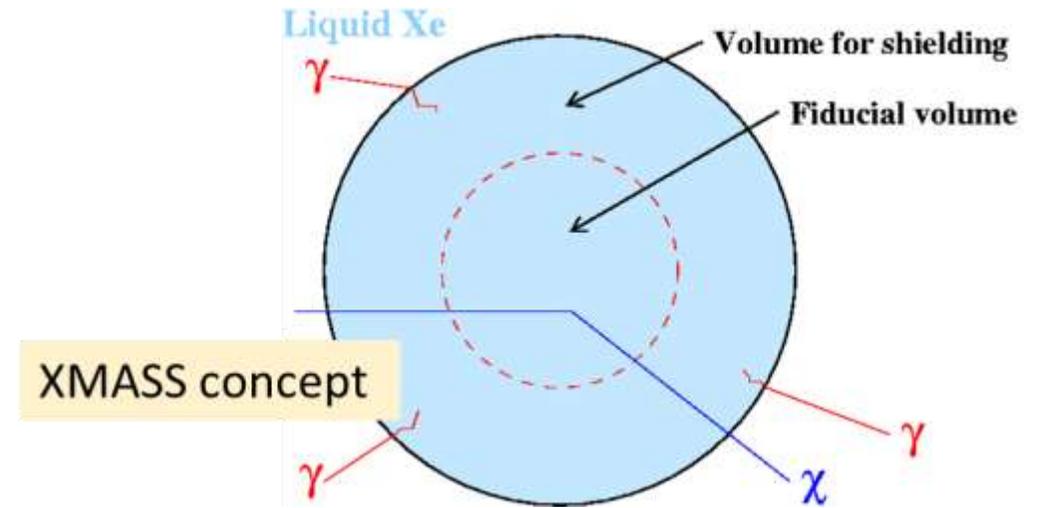
$$\frac{dN_{\text{tot}}}{dT} = t \times N \times \int \left[\left(\frac{d\sigma_{\nu e^-}}{dT} \right)_{\text{SM}} + \left(\frac{d\sigma_{\nu e^-}}{dT} \right)_{\text{ex}} \right] \sum_{i=1}^Z \theta(T - B_i) \left(\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu} \right) dE_\nu$$

(FEA case)

1. Φ : solar neutrino flux ($5.98 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ for pp chain and $5.00 \times 10^9 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 7Be chain)
2. Interference effect with weak interaction is assumed for dark photon analysis.
3. Assuming atomic effects : Free electron approximation for neutrino magnetic moment and dark photon analyses. Relativistic random phase approximation for neutrino millicharge analysis.

Event selection :

- データ :
 - 2013Nov-2016Mar livetime = 711 days
 - 解析エネルギー領域 :
 - **2-15 keV for millicharge analysis**
 - **2-200 keV for magnetic moment & dark photon analysis**
 - Event selection :
 - Noise, Cherenkov 事象カット
 - 有効体積カット
 - Timing base reconstruction $R(T) < 38\text{cm}$
 - PE base reconstruction $R(PE) < 20\text{cm}$
 - 有効体積 : 97kg
- 予想される信号 :
 - キセノンで期待されるエネルギー分布を XMASS MCで作り、データと同じevent selectionを実施
 - 系統誤差を評価 : scintillation efficiency ($\sim 15\%$ for the millicharge signal), event selectionの不定性など。



Background evaluation in XMASS-I

Gamma-ray of detector material origin.

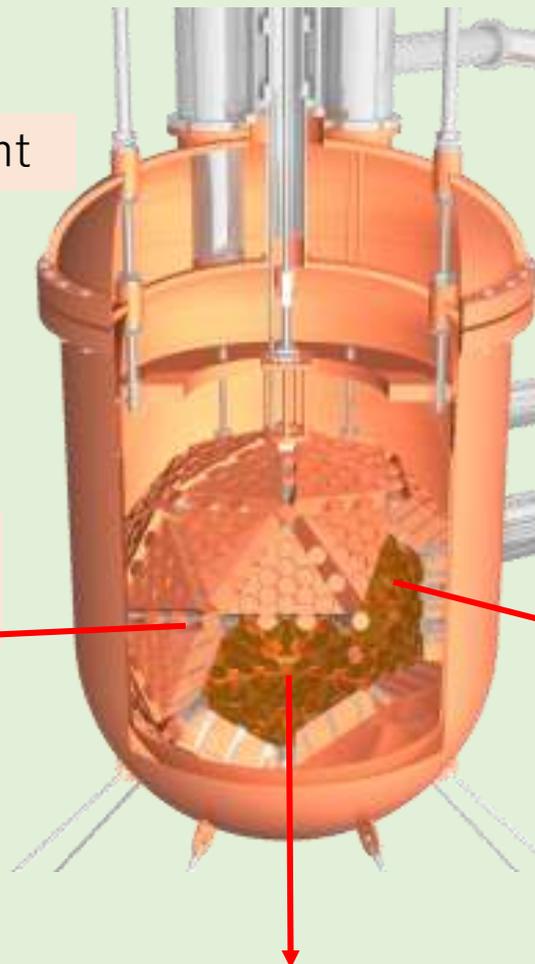


HPGe measurement

BG in detector surface : ^{210}Pb



Measurement by alpha counter
NIMA884(2018)157



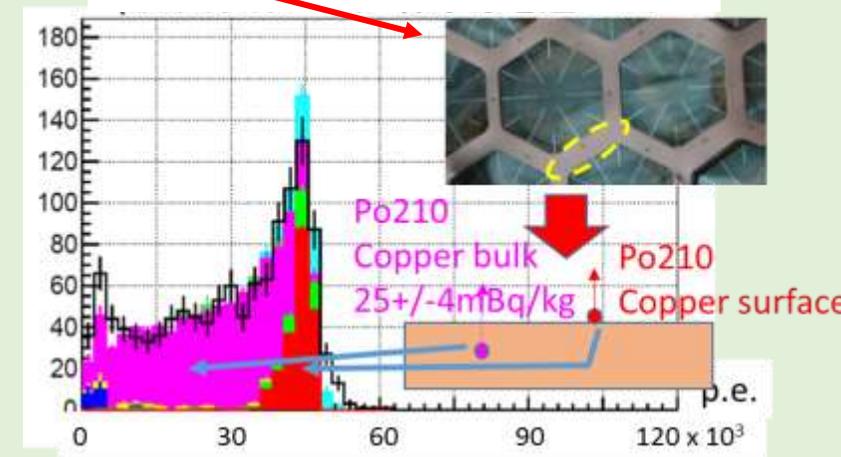
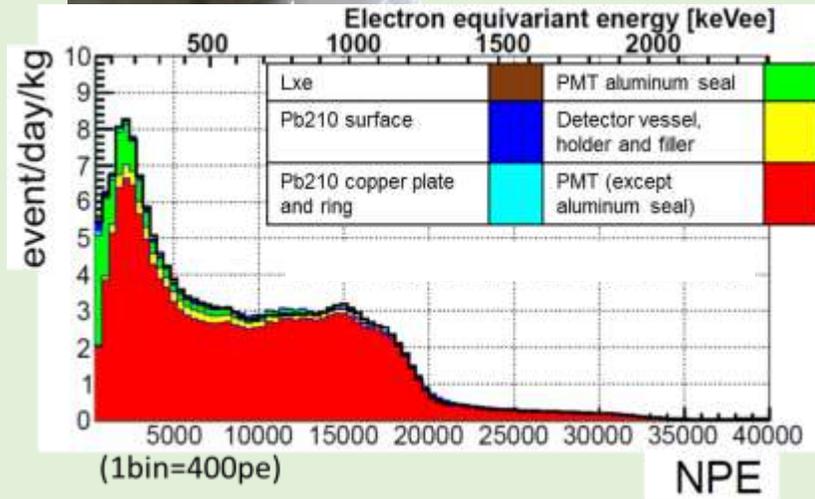
BG in LXe

^{222}Rn , ^{85}Kr , ^{39}Ar , ^{14}C
Xenon isotopes

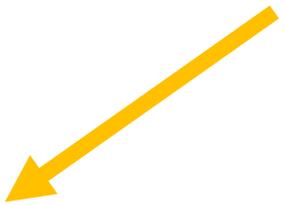
PMT origin is dominant.



Alpha event analysis



BG components in XMASS-I



- ✓ ^{222}Rn , ^{85}Kr : coincidence event analysis.
- ✓ ^{14}C , ^{39}Ar : R<30cm spectrum fitting above 30keV
 - ✓ 2-200keV 解析では,fitting constraintは除いた。
- ✓ Other RIs :
 - ✓ $2\nu\beta\beta$ of ^{136}Xe .
 - ✓ ^{125}I , ^{125}Xe : thermal neutron origin. +/-27 % error are applied in neutron flux.
 - ✓ ^{133}Xe , $^{131\text{m}}\text{Xe}$: fast neutron origin.

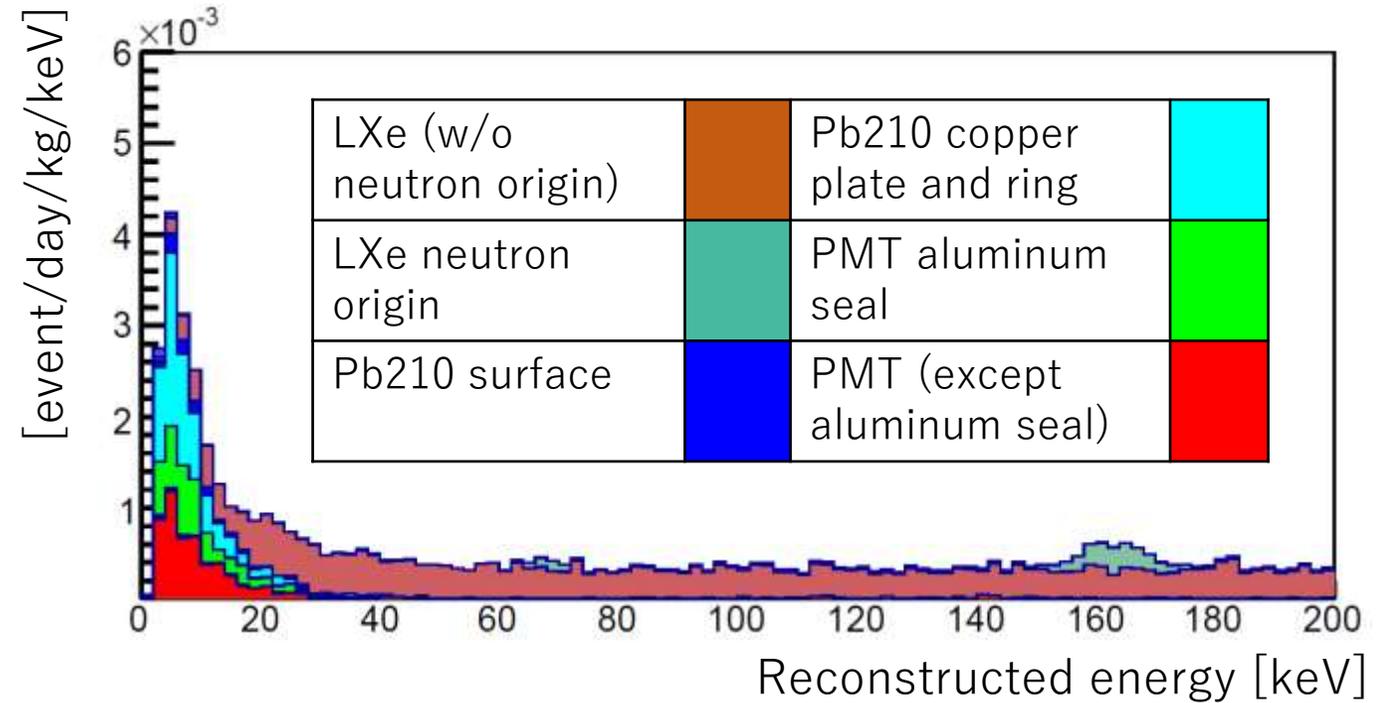
Location of RI	RI	Activity [mBq/detector] initial value of the fit	Activity [mBq/detector] the best fit value
LXe	^{222}Rn	-	8.53 ± 0.16
	^{85}Kr	-	0.25 ± 0.04
	^{39}Ar	-	0.65 ± 0.04
	^{14}C	-	0.19 ± 0.01
copper plate and ring	^{210}Pb	-	$(6.0\pm 1.0)\times 10^2$
copper surface	^{210}Pb	-	0.7 ± 0.1
PMT quartz surface	^{210}Pb	-	6.4 ± 0.1
PMT (except aluminum seal and quartz surface)	^{238}U	$(1.5\pm 0.2)\times 10^3$	$(2.0\pm 0.2)\times 10^3$
	^{232}Th	$(1.2\pm 0.2)\times 10^3$	$(1.1\pm 0.3)\times 10^3$
	^{60}Co	$(1.9\pm 0.1)\times 10^3$	$(1.6\pm 0.2)\times 10^3$
	^{40}K	$(5.8\pm 1.4)\times 10^3$	$(9.6\pm 1.7)\times 10^3$
	^{210}Pb	$(1.3\pm 0.6)\times 10^5$	$(2.2\pm 0.7)\times 10^5$
PMT aluminum seal	^{238}U	$(1.5\pm 0.4)\times 10^3$	$(9.0\pm 4.1)\times 10^2$
	^{235}U	$(6.8\pm 1.8)\times 10^1$	$(4.1\pm 1.8)\times 10^1$
	^{232}Th	$(9.6\pm 1.8)\times 10^1$	$(5.5\pm 2.2)\times 10^1$
	^{210}Pb	$(2.9\pm 1.2)\times 10^3$	$(3.4\pm 1.2)\times 10^3$
Detector vessel, holder and filler	^{238}U	$(1.8\pm 0.7)\times 10^3$	$(9.0\pm 7.6)\times 10^2$
	^{232}Th	$(6.4\pm 0.7)\times 10^3$	$(6.4\pm 3.2)\times 10^3$
	^{60}Co	$(2.3\pm 0.1)\times 10^2$	$(3.0\pm 1.9)\times 10^2$
	^{210}Pb	-	$(3.8\pm 0.5)\times 10^{45}$

Alpha counter & alpha event analysis

HPGe screening & spectrum fit

有効体積内のバックグラウンドの評価

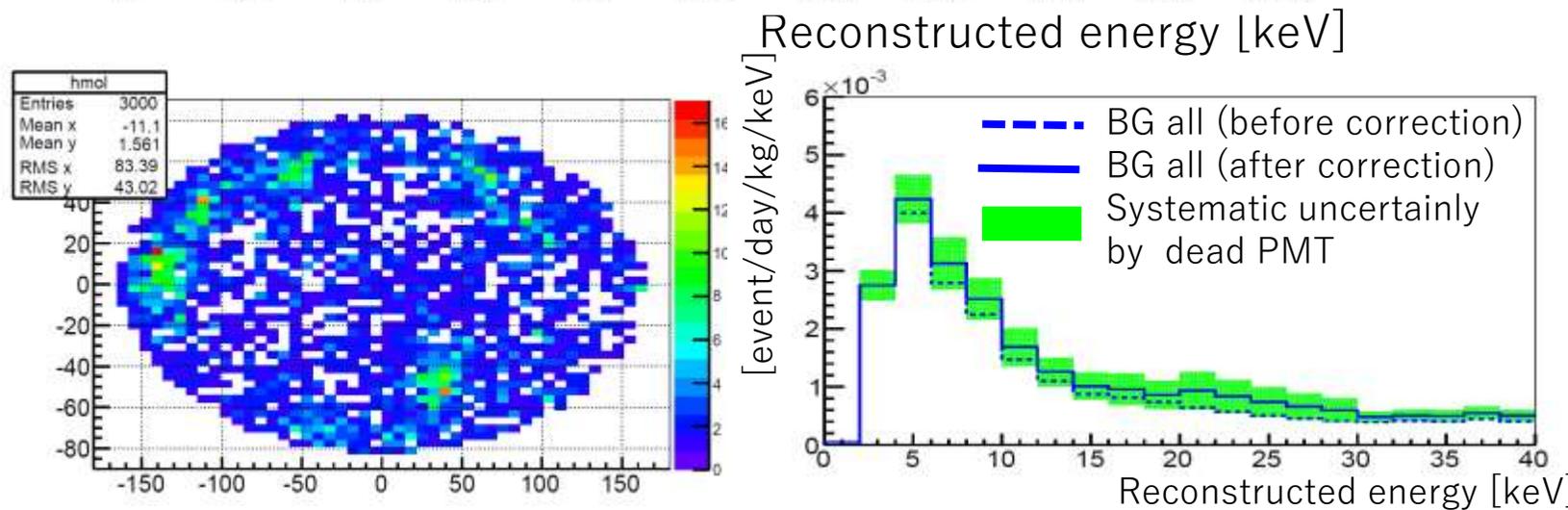
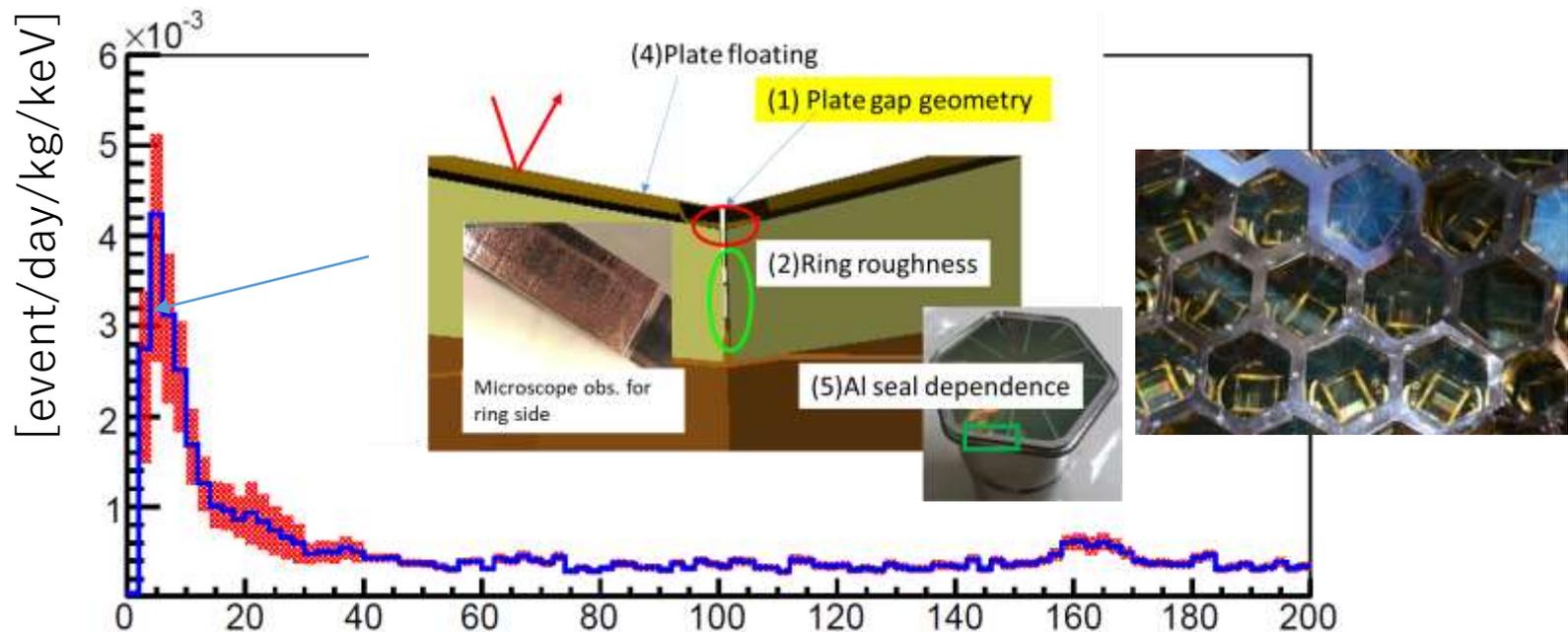
- Background MCは、XMASS MCによって、それぞれの部材・RIごとに発生させている。
- データと同じ統計量で、同じevent reductionを行う。
- 液体キセノンのoptical parameterのdataset期間における変化を追う。
 - 定期的なCo57・Co60 calibrationを実施している。
 - これによりキセノンの経時変化による系統誤差をキャンセルしている。



- <30keV : 主に、検出器表面起源の事象
 - PMT死角部分で起こった事象の光量分布が有効体積内事象と似てしまう。
- >30keV : 液体キセノン中の事象
 - Rn222, Kr85, Ar39, C14
 - 中性子起源のキセノン同位体
 - 一様に分布するため、有効体積カットで除くことができない。

バックグラウンドの系統誤差：

- 最も大きいのは、 $<10\text{keV}$ にある検出器表面構造の不定性。
- Dead PMTにより発生する有効体積内とされた事象がXMASS MCで再現されない分を独立に評価し、その補正と、系統誤差を見積もった。

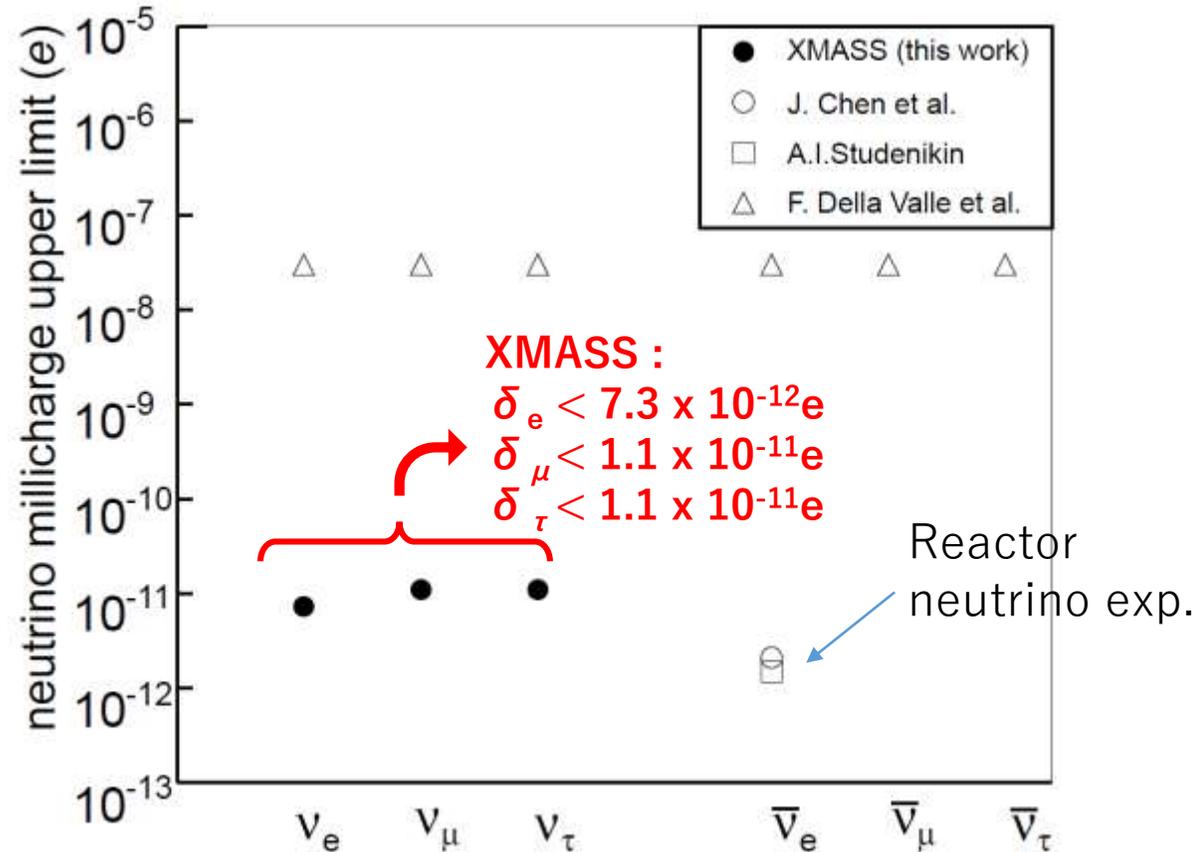
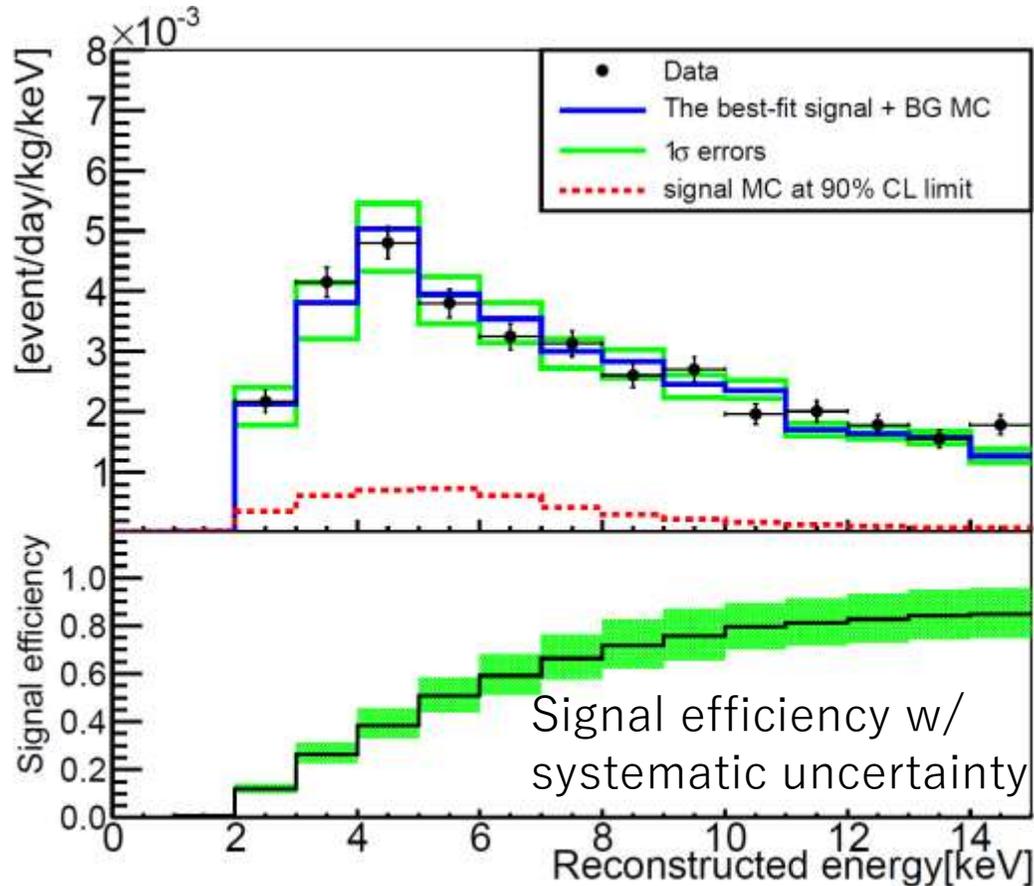


データ、予想される信号及びバックグラウンドMCのエネルギー分布を χ^2 フィットすることで、信号を探索した。

微弱電荷(Millicharge)の結果 (2-15keV)

- 有意な微電荷信号は見られず。
- Upper limit 90% C.L. : $5.4 \times 10^{-12} e$

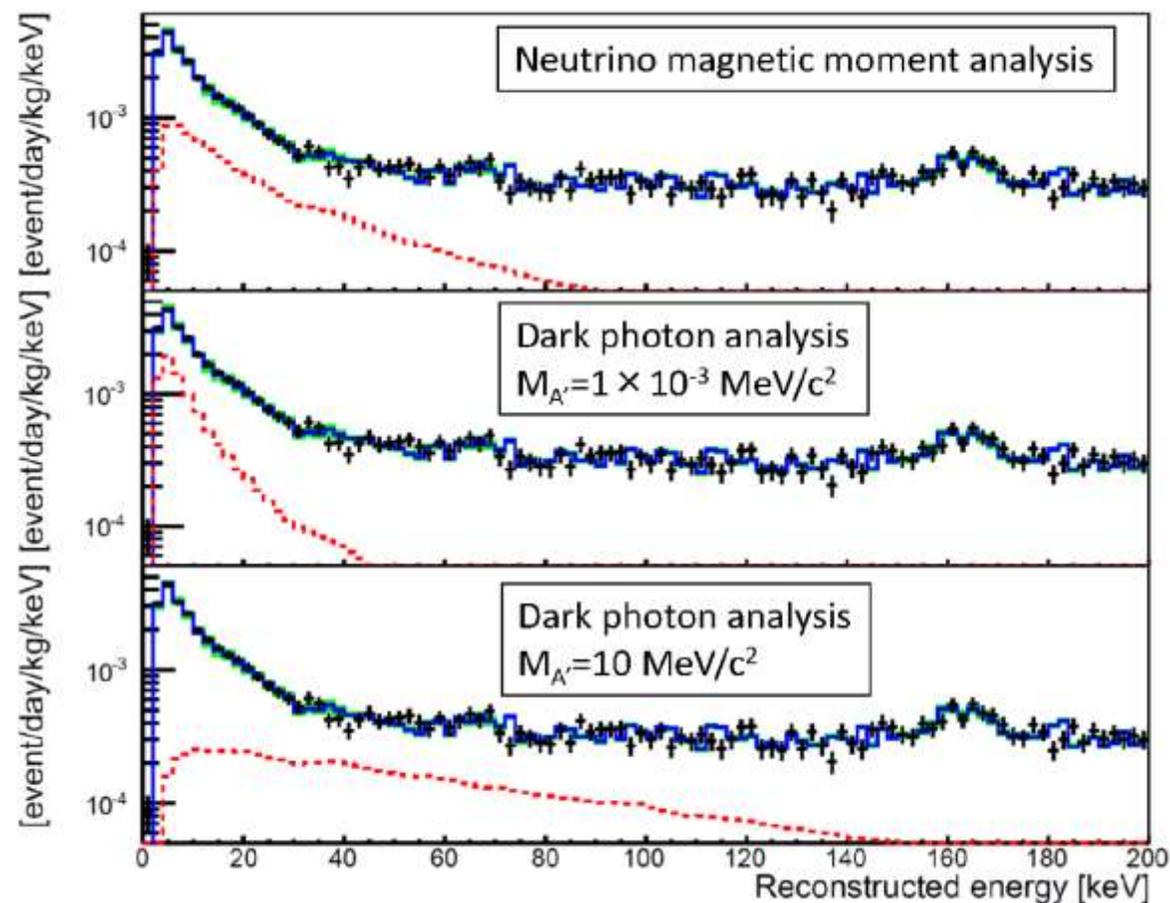
- 各フレーバーごとの上限値を求め、正ニュートリノに関しては、最も強い制限を与えた。



ニュートリノ磁気能率, dark photon(U(1)ゲージボソン) の探索結果

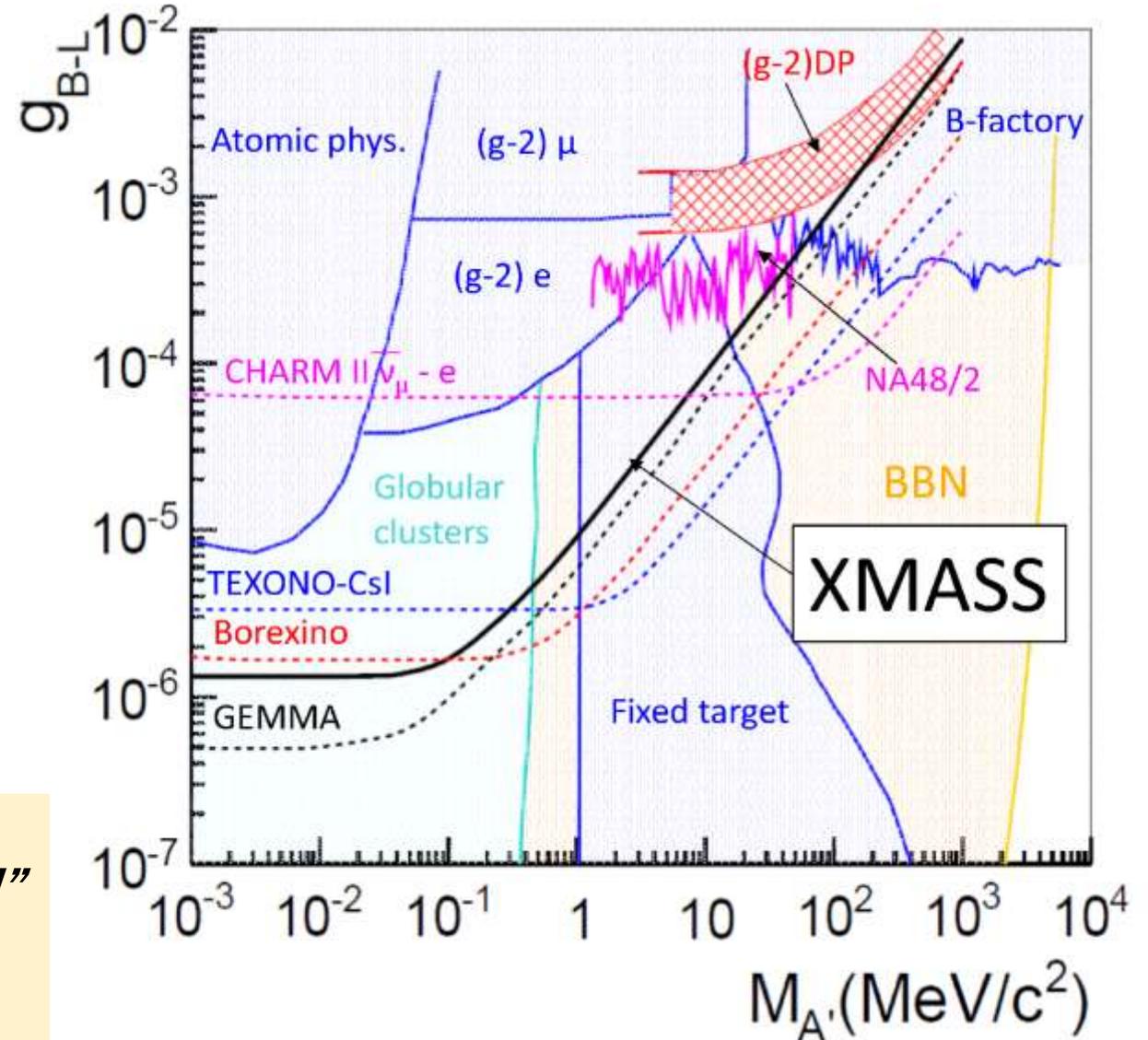
Data
BG+signal (best fit)
BG+signal (1sigma err)
Signal (90% upper limit)

- 共に有意な信号は観測されず。
- ニュートリノ磁気能率:
 - Best fit : $\mu_\nu = 1.3 \times 10^{-10} \mu_B$ ($\chi^2/\text{d.o.f} = 85.9/98$)
 - Null signal : $\chi^2/\text{d.o.f} = 88.2/98$
 - 90% CL upper limit : $\mu_\nu = 1.8 \times 10^{-10} \mu_B$
- dark photon :
 - $M_{A'} = 1 \times 10^{-3} \text{MeV}/c^2$
 - Best fit : $g_{B-L} = 1.1 \times 10^{-6}$ ($\chi^2/\text{d.o.f} = 85.3/98$)
 - 90% CL upper limit : $g_{B-L} = 1.3 \times 10^{-6}$
 - $M_{A'} = 10 \text{MeV}/c^2$
 - Best fit : $g_{B-L} = \text{Null}$ ($\chi^2/\text{d.o.f} = 88.2/98$)
 - 90% CL upper limit : $g_{B-L} = 8.8 \times 10^{-5}$



Dark photon (U(1)ゲージボゾン)の排除領域：

- 他実験、観測による排除領域：
S.Bilmis et al, Phys.Rev.D 92, 033009 (2015)
- XMASSの結果は、他ニュートリノ実験におけるニュートリノ-電子散乱からの見積もり（点線）と同程度
- (g-2) anomaly をdark photon で説明する領域をほぼ排除した。

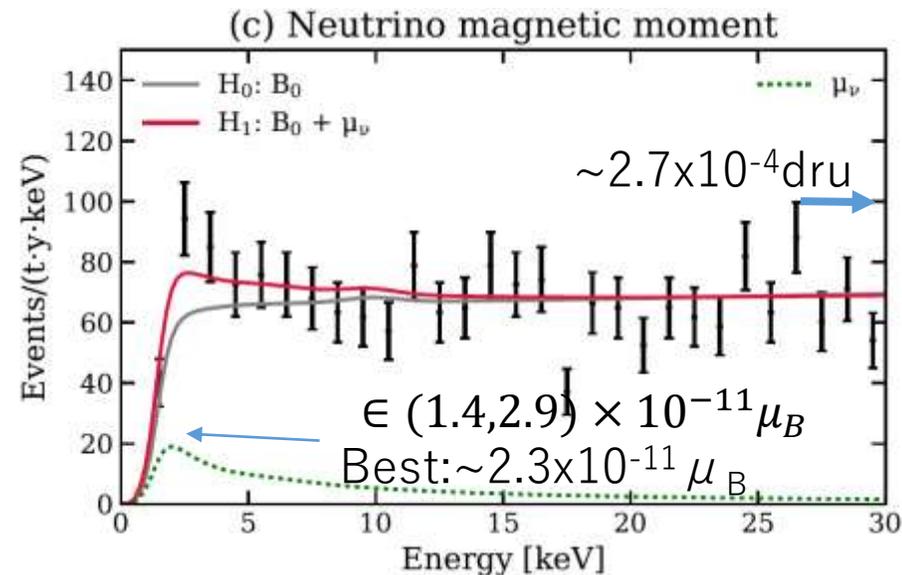


*“search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I”
K. Abe et al. (XMASS collaboration),
Published to PLB 809 (2020) 135741*

Comparison with the result of XENON1T (magnetic moment analysis)

Contents		XMASS	XENON1T
~2keV	Rate	$\sim 2 \times 10^{-3}$ [dru : /day/kg/keV]	$\sim 2 \times 10^{-4}$ [dru]
	Sig. eff @ 2keV	~ 10 %	~ 70 %
	Dominant BG	Detector surface origin	Internal RI
>30keV	Rate	$\sim 3-4 \times 10^{-4}$ [dru]	$\sim 2 \times 10^{-4}$ [dru]
	Sig. eff	~ 75 %	~ 85 %
	Dominant BG	Internal RI	Internal RI

XENON1T arXiv:2006.09721

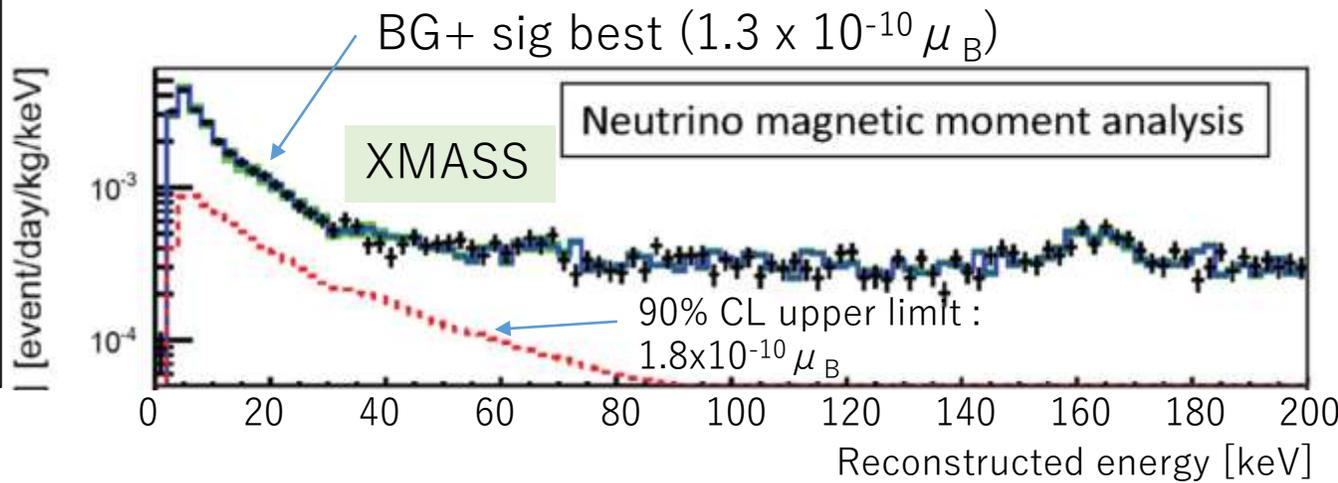


XMASS best : $1.3 \times 10^{-10} \mu_B$
 Rate XENON1T/XMASS (@5keV) $\sim 1/10$
 Sig. eff. XENON1T/XMASS : ~ 7
 estimated ν_μ by XENON1T/XMASS \sim

$$\sqrt{\frac{(\text{rate ratio})^{0.5}}{\text{eff ratio}}} = \sqrt{\frac{(0.1)^{0.5}}{7}} \sim 0.21$$

\Rightarrow (XENON1T) $2.8 \times 10^{-11} \mu_B$

Difference btw XMASS and XENON1T is mainly introduced by BG rate & efficiency in low energy.



Conclusion :

- XMASS : ~ 1 トンの液体キセノンによる極低バックグラウンド多目的検出器。2019年2月に観測完了。
- ニュートリノの微弱電荷、磁気能率及びdark photonを介した相互作用の探索を、XMASS検出器で実施した。=> [published newly : PLB 809 \(2020\) 135741](#)
- 2-15keV, 2-200keVのエネルギー領域において、データ、予想される信号及びバックグラウンドMCのエネルギー分布を χ^2 フィットすることで、信号を探索した。
- 探索の結果、有意な信号は観測されなかったことから、上限を示した。
 - ニュートリノ微弱電荷 : $\delta_\nu < 5.4 \times 10^{-12} e$
 - 正ニュートリノでの微弱電荷探索としては、最高感度を達成
 - ニュートリノ磁気能率 : $\mu_\nu < 1.8 \times 10^{-10} \mu_B$
 - dark photon :
 - $g_{B-L} < 1.3 \times 10^{-6}$ ($M_{A'} = 1 \times 10^{-3} \text{MeV}/c^2$), $g_{B-L} < 8.8 \times 10^{-5}$ ($M_{A'} = 10 \text{MeV}/c^2$),
 - (g-2) anomaly をdark photon で説明する領域をほぼ排除した。
- XENON1Tとの比較 : low energyでのrateとsignal efficiencyの違いで説明できる。