

暗黒物質実験の展開

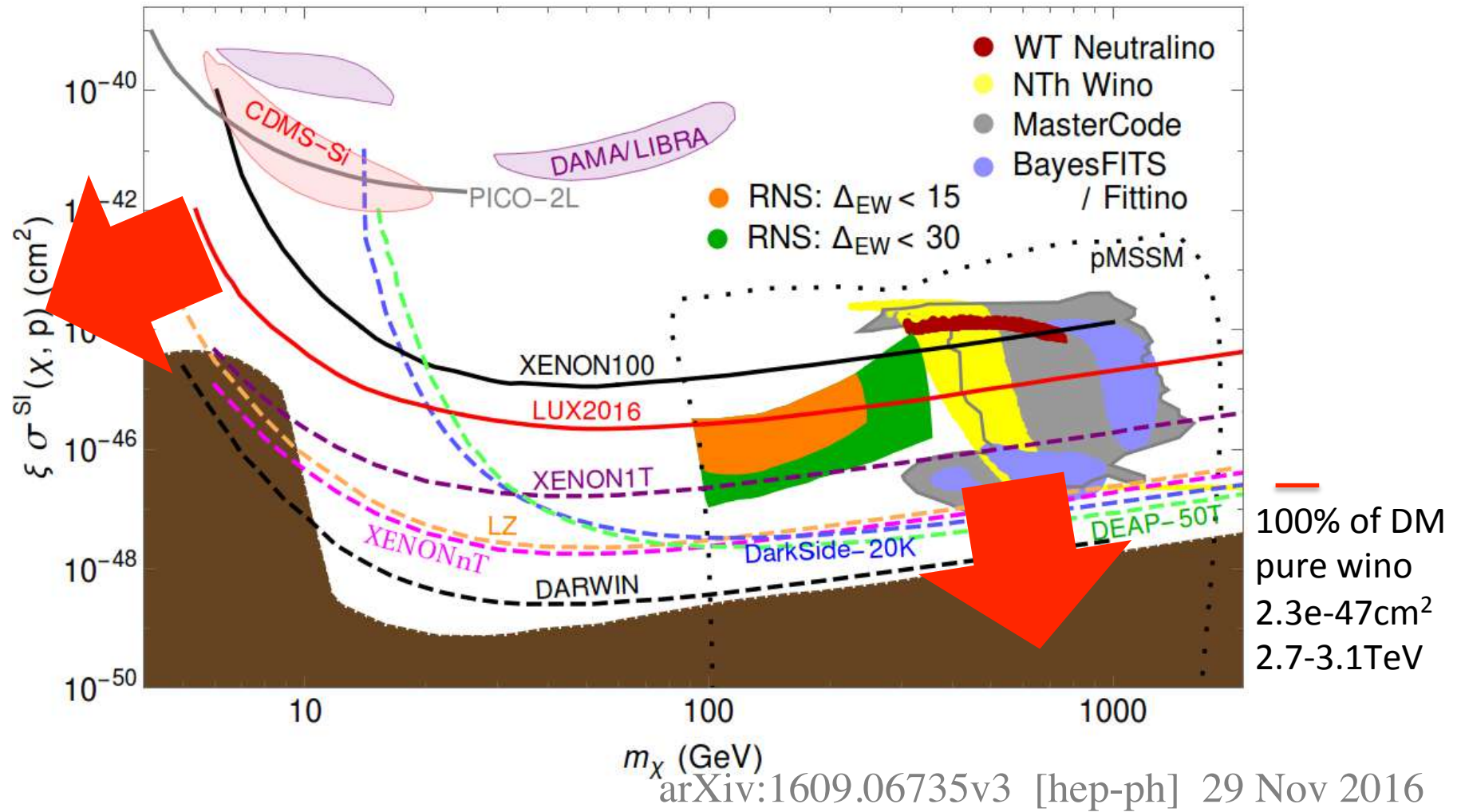
東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設

森山茂栄

新学術領域研究会 於 岡山大学

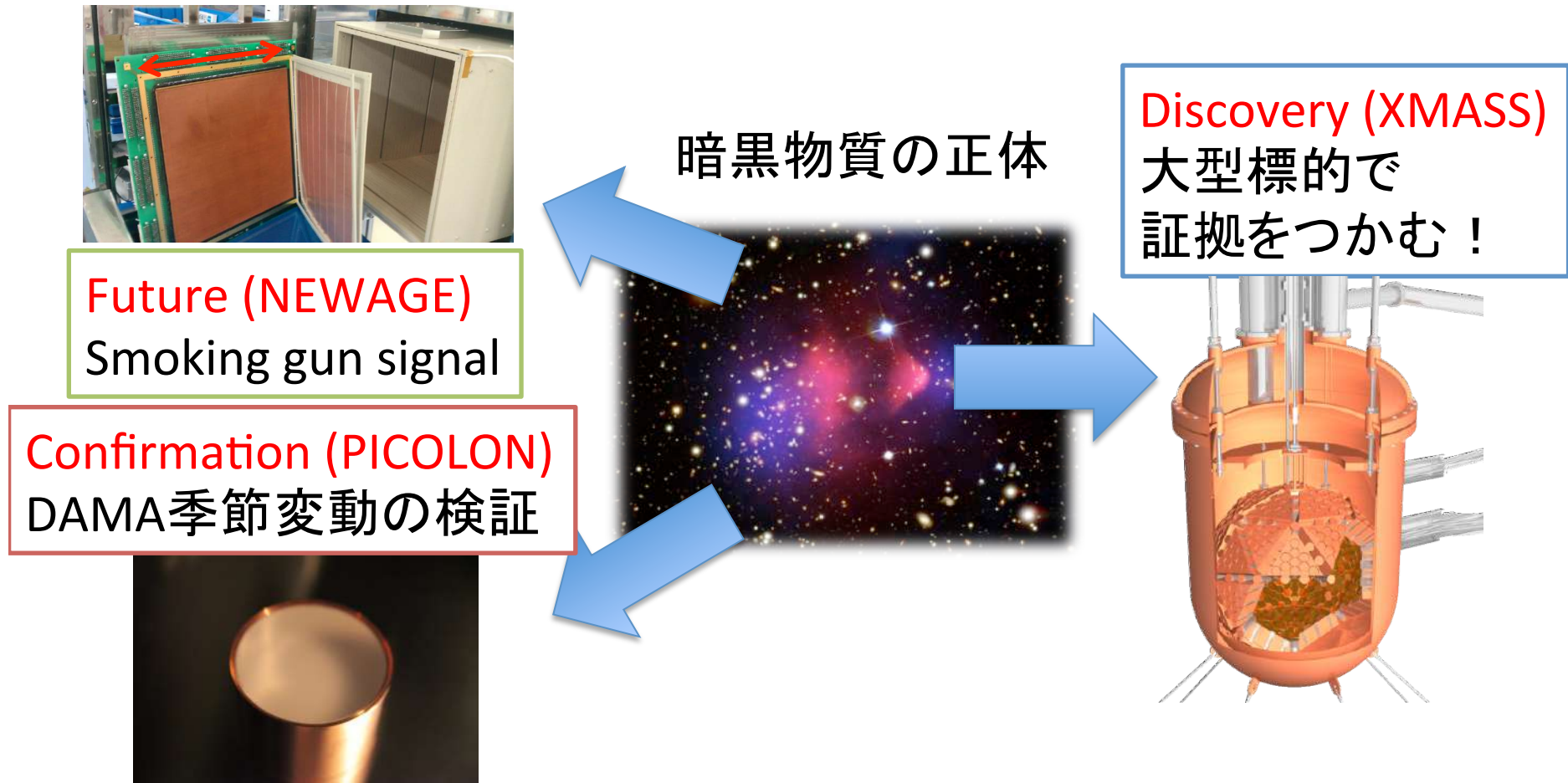
2017年5月23日

暗黒物質探索の将来の攻め口



この図に含まれない暗黒物質探索も重要 (axion)

神岡地下での暗黒物質研究の展開



- お互い異なったステージを目標とする研究が協力し、並行に進んできた。ANKOKなど新たな研究の参入も検討されている。今後の展開は？

NEWAGE 戦略 マイルストーン

現状 500pb

① DAMA領域 (10pb) 5年程度

② ガス最良 (0.1pb)

③ SD最良 SUSY(1e-3 pb) 国際協力

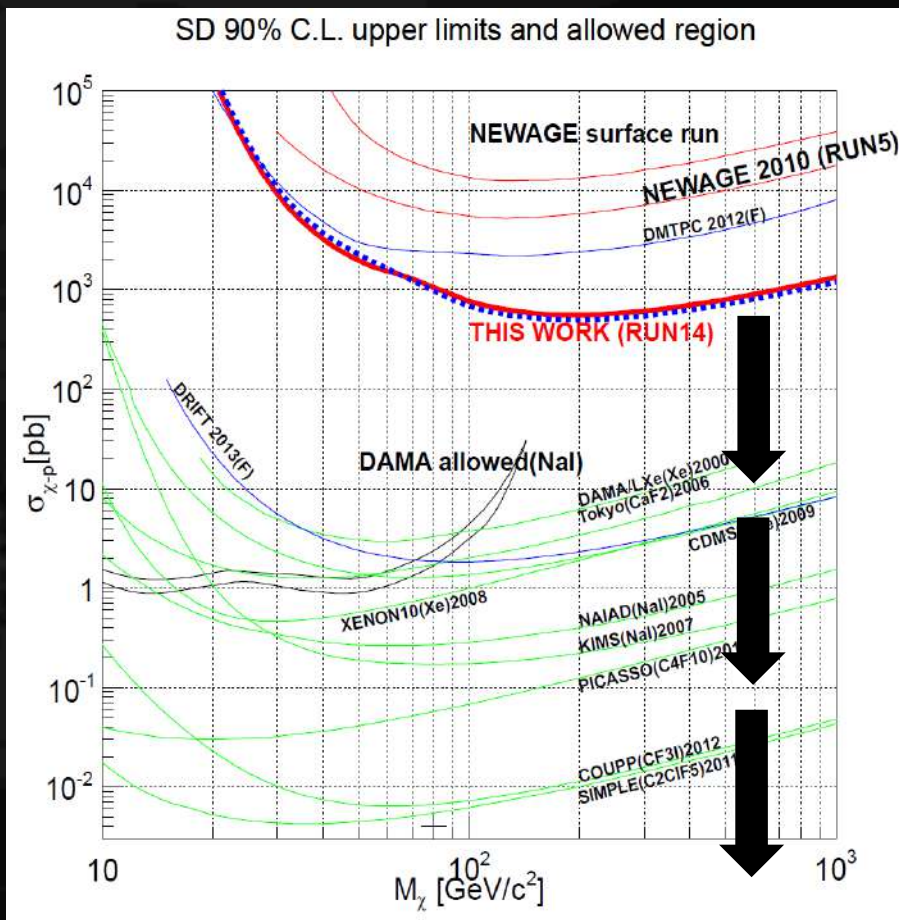
← 100dru @ 50keV_{ee} 30日×0.03m³

← 1dru @ 50keV_{ee} 100日×1m³

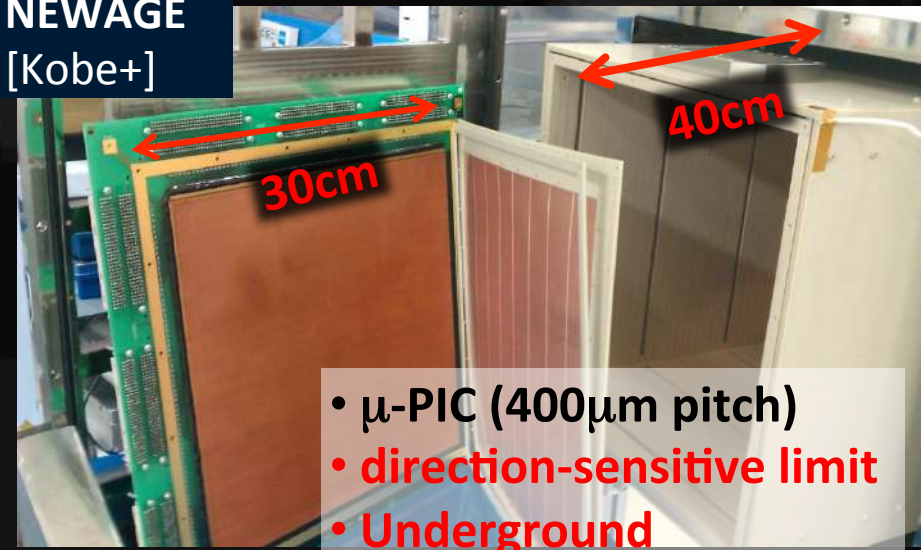
← 1e-2dru @ 20keV_{ee} 300日×10m³

← 1e-4dru @ 10keV_{ee} 1000日×100m³

dru=/kg/keV/day



NEWAGE
[Kobe+]



- μ -PIC (400 μ m pitch)
- direction-sensitive limit
- Underground

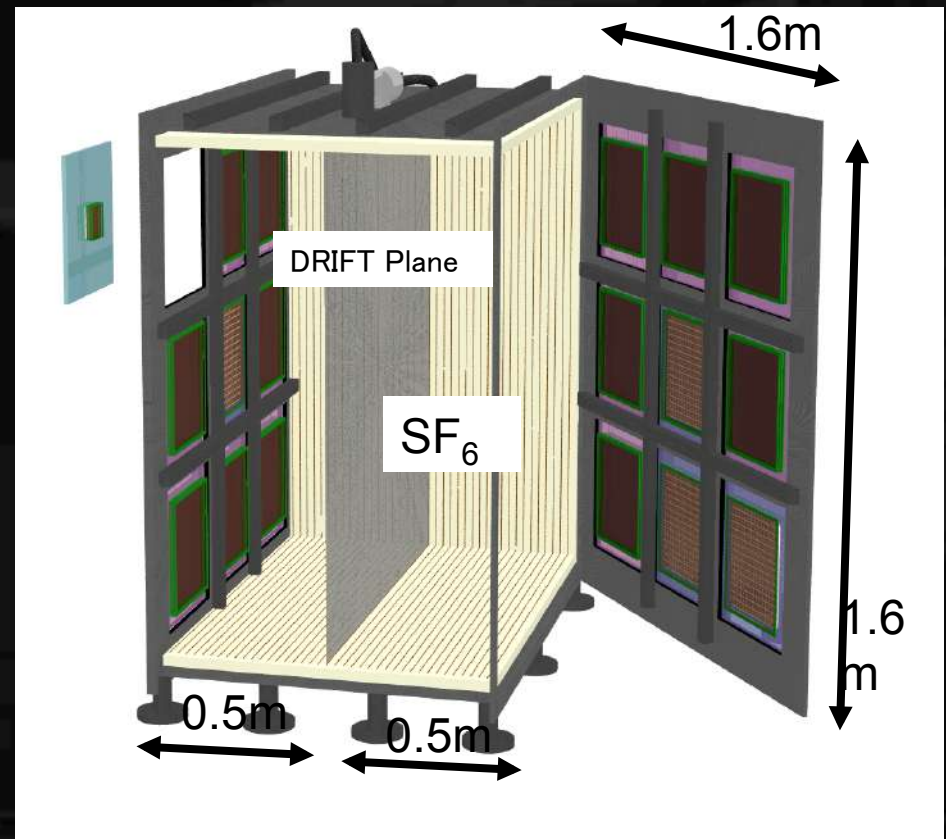
国際競争力・協力

CYGNUS proto-collaboration

- steering committee (N. Spooner (英 実質的な牽引), K, Miuchi, S. Vahsen (米), E. Baraccini(伊), E. Barbario(豪))
- 後半3名はDMの実績はなし。
- DRIFT → CYGNUS Large detector で予算申請
- NEWAGE → CYGNUS/NEWAGE チェンバー

- CYGNUS部分
(CYGNUS-KM Observatory) :
他グループのモジュール受け入れ。
- NEWAGE部分 :
 μ -PICでこれまでの延長を。
- (目論見) 既成事実で神岡主導で
大型検出器を稼働させたい

CYGNUS/NEWAGE
vessel
20torr \sim 100g/m³



PICO-LON計画 (NaI(Tl)による宇宙暗黒物質探索)

	DAMA	DM-Ice	Ingot 26~37 (2016)	Goal of PICO-LON	
^{nat}K (ppb)	<20	660	<4	<20	😊
^{232}Th (ppt)	0.5-0.7	2.5	0.3 ± 0.5	<4	😊
^{238}U (ppt)	0.7-10	1.4	4.7 ± 0.3	<10	😊
^{210}Pb ($\mu\text{Bq/kg}$)	5-30	1470	29.4 ± 6.6	< 30	😊

ほぼ目標に到達。

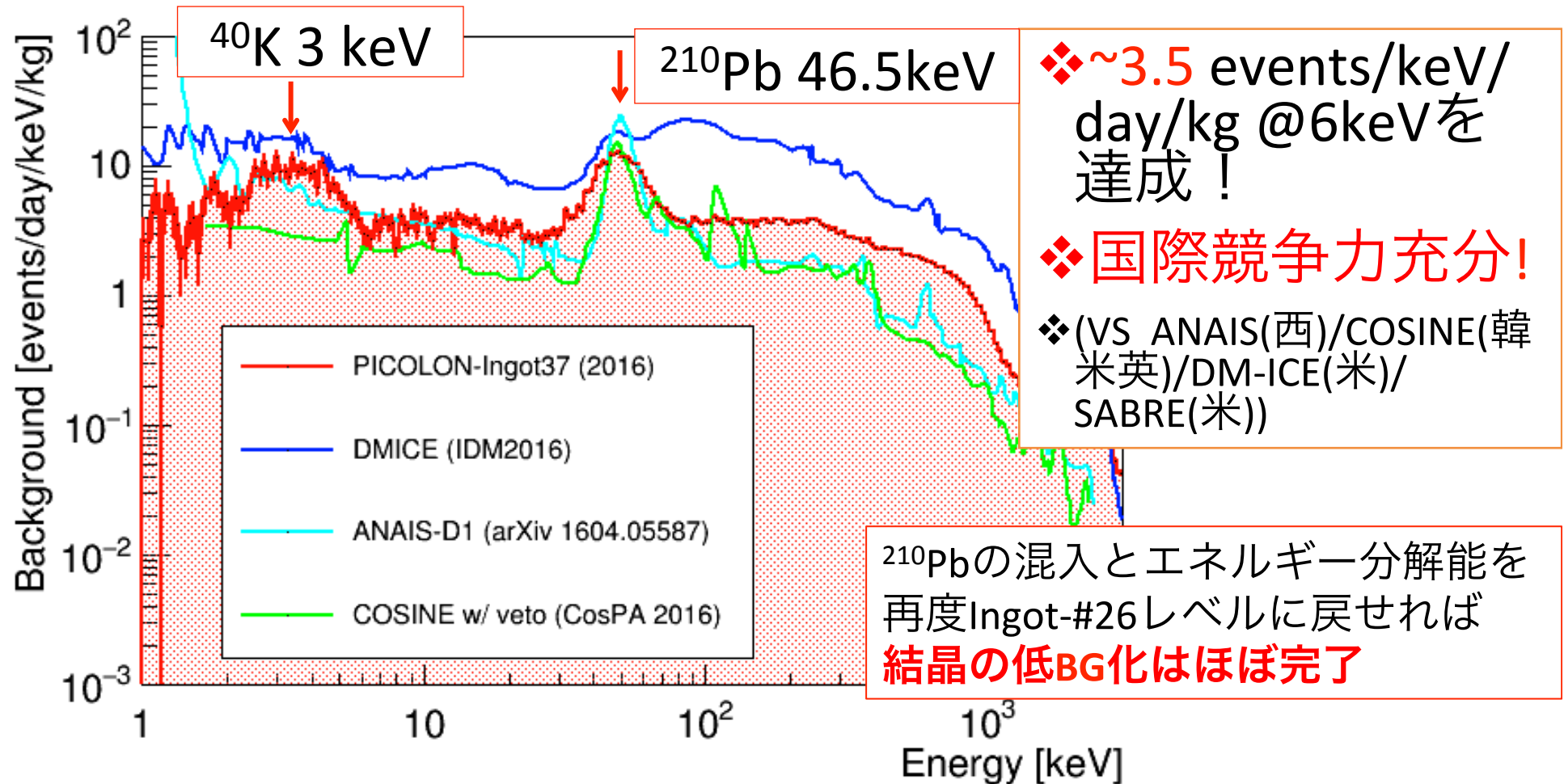
K.Fushimi et al., arXiv:1705.00110

DAMA: NIM A592 (2008) 297.

DM-ICE: Phys. Rev. D90 (2014) 092005.

極放射能NaI(Tl):Ingot #37

競合NaI(Tl)開発グループ最新値と比較



Scale up

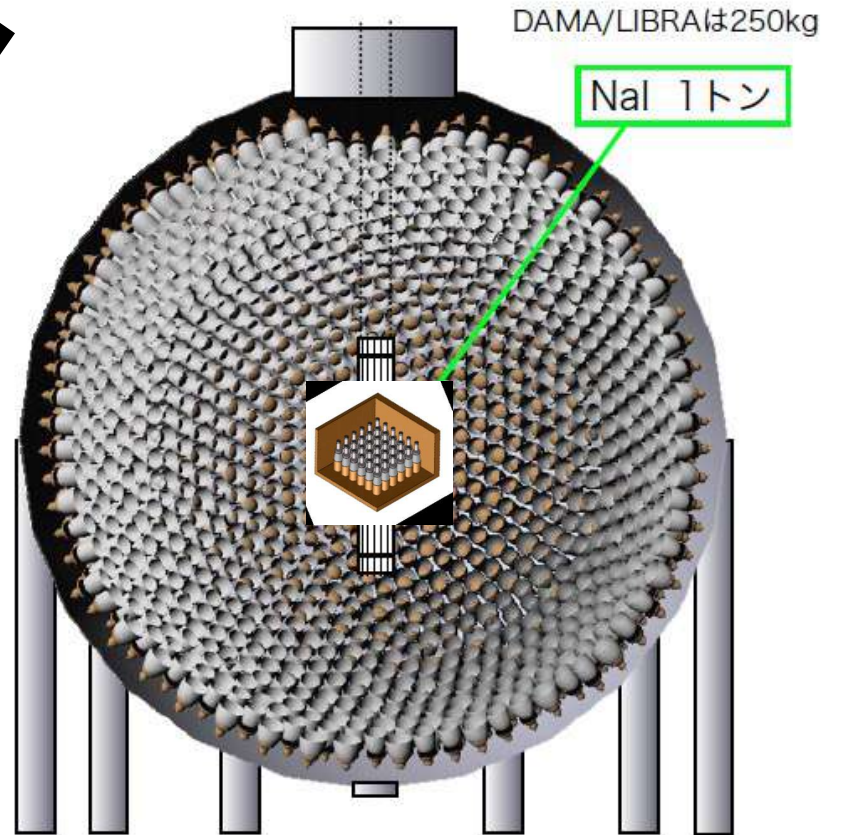
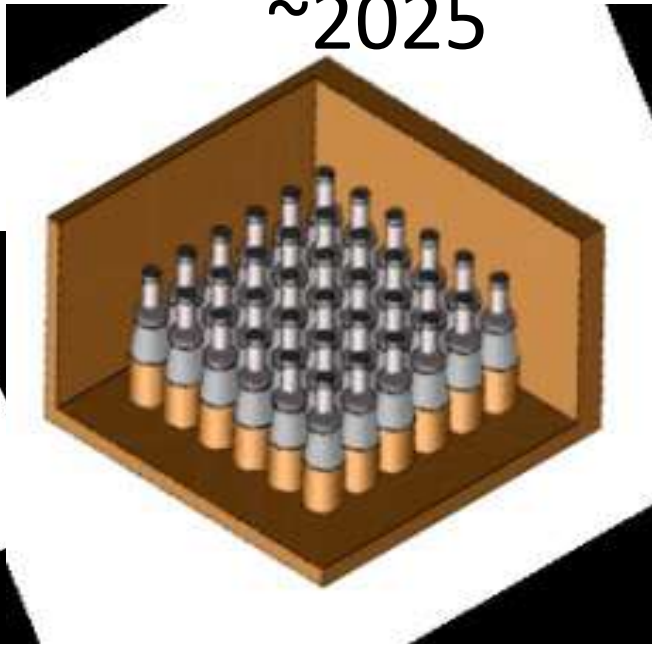
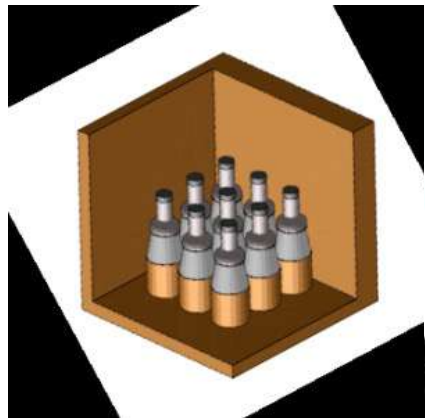
54 kg
~2020

250 kg
~2025

KamLAND-PICO: 1ton

DAMA/LIBRAは250kg

NaI 1トン



XMASS

Low Energy Solar Neutrino Detection by using Liquid Xenon

Y.Suzuki

(for the Xenon Collaboration [1])

*Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Higashi-Mozumi,
Kamioka, Gifu 506-1205, Japan*

(Talk presented at LowNu workshop, June-15-2000, Sudbury, Canada)

arXiv:hep-ph/0008296v1 29 Aug 2000

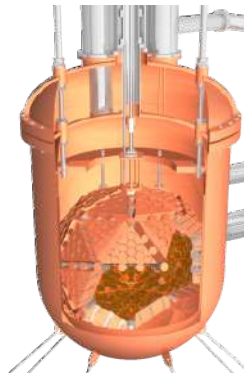
- 2000年に低エネルギー太陽ニュートリノの観測を目標に実験計画を立ち上げ。
- 大型の液体キセノン検出器を用いた、暗黒物質直接探索、 $0\nu\beta\beta$ 探索を標榜する宇宙素粒子実験の幕開け。

XMASSの目指す物理と方法

Multi purpose low-background experiment with liq. Xe

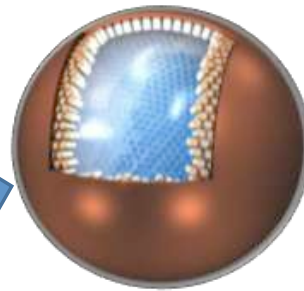
- Xenon **MASS**ive detector for solar neutrino (**pp/⁷Be**)
- Xenon neutrino **MASS** detector (**$\beta\beta$ decay**)
- Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (**DM search**)

XMASS-I



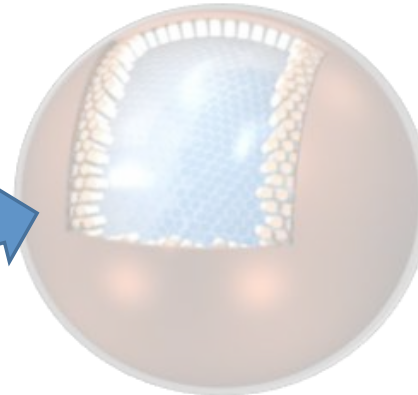
DM
100kg fid. (800kg)
0.8m ϕ , 642 PMTs
2010-
DM search

XMASS-1.5



DM
3 ton fid. (6 ton)
1.5m ϕ , ~1000 PMTs
pp solar ν limited
Ultimate BG for elec.
 $2 \times 10^{-47} \text{cm}^2$
Annual/spectral info.

XMASS-II

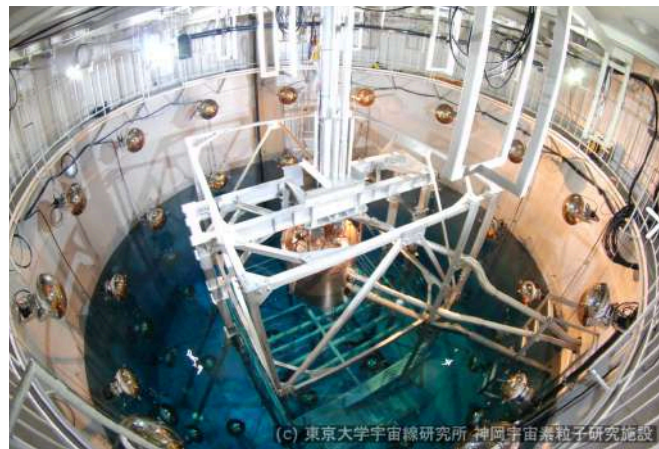


DM, solar, $\beta\beta$
10ton fid. (25ton)
Detailed study of DM
including e channel
pp Solar nu
 $\beta\beta \sim 30 \text{meV(IH)}$

- 太陽ニュートリノ、暗黒物質、 $0\nu\beta\beta$ を研究するために液体キセノンを使う。1相式と2相式を比較し進めた。

XMASSのもたらしたbreakthrough

- Krが多く見向きされないXeを、蒸留を用いて一気に低バックグラウンドの素材に**(世界標準)**
- 水チェレンコフ型遮蔽体の導入により大型検出器も建設が容易で、中性子の心配も極小**(世界標準)**
- PMTの低BG化を細々とやっていた浜松ホトニクスだが、XMASSとの協力関係で新素材の提案、スクリーニングで急速進化**(世界標準)**



水チェレンコフ型遮蔽体



蒸留塔

2001



R7281 Q, MgF2
glass tube (2")

2002



R8778
metal tube (2")
LUX used R8778 later

2008



R10789
(2 inch)
hex shape, metal (2")

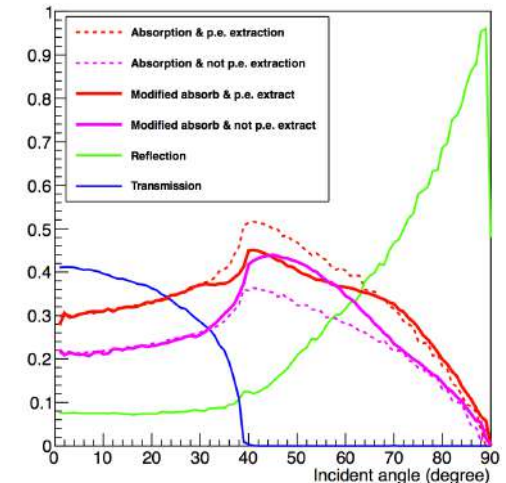
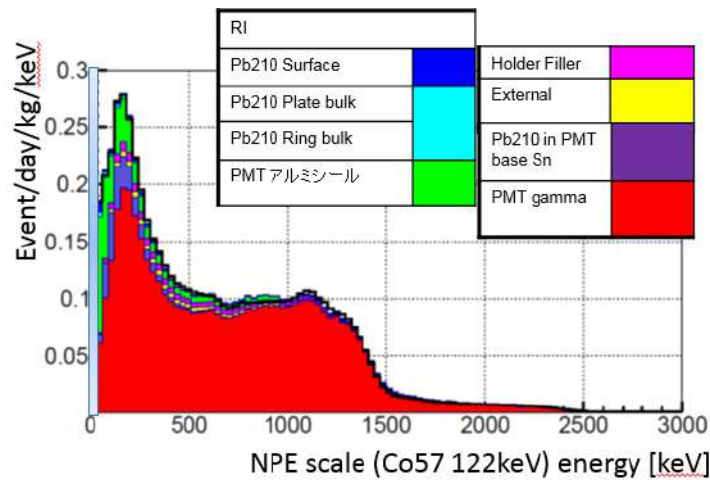
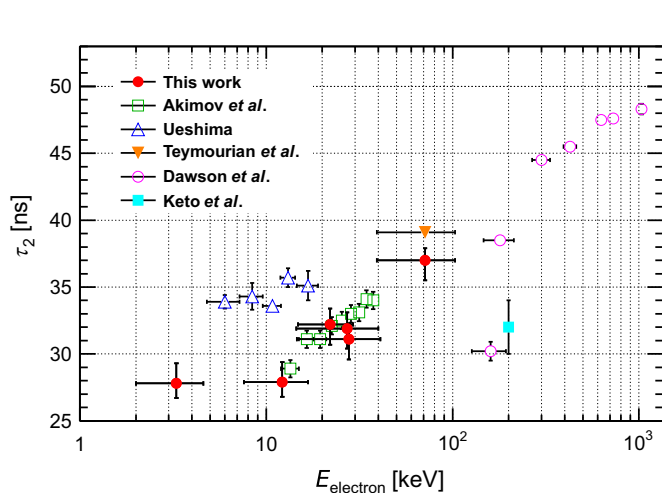
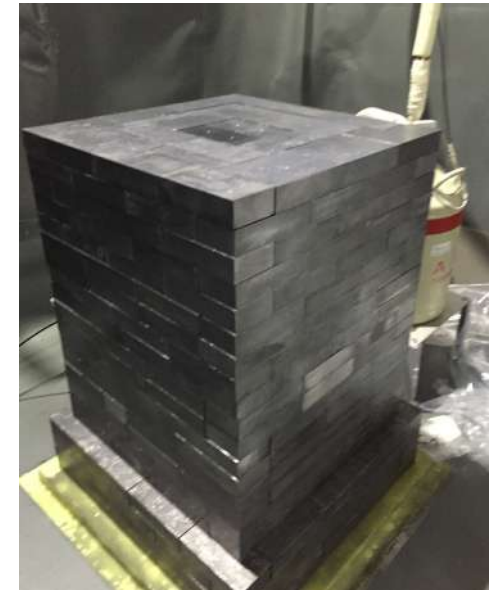
2014



R13111, Co free (3")

XMASSが磨き上げたノウハウ (一部SK, KLから輸入)

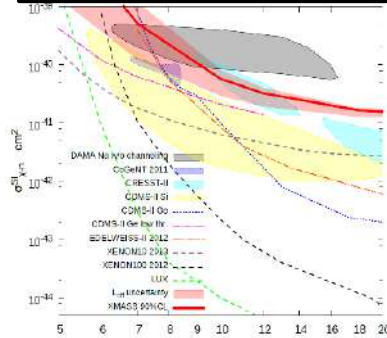
- スクリーニング関係
 - ゲルマニウム検出器
 - ラドン測定
 - α 線検出器
 - 帯電防止技術
- 検出器のモデリング技術
 - 液体キセノンの発光時定数、光学的特性
 - 検出器とバックグラウンドの精密モデリング
 - PMTの角度依存性・反射の詳細モデル化



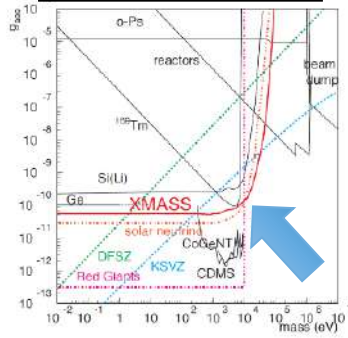
XMASSがもたらし、開拓した物理

Takeda@XeSAT2017

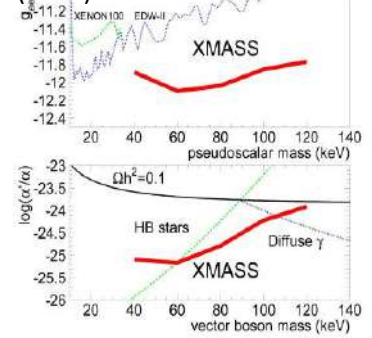
Low mass WIMPs search, PLB 719 (2013) 78



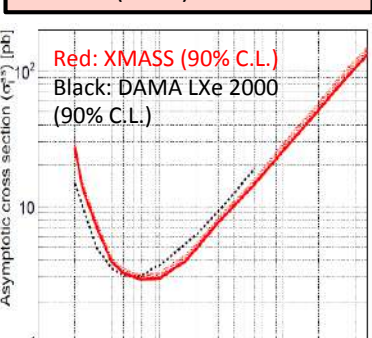
Solar axion search, PLB 724 46 (2013)



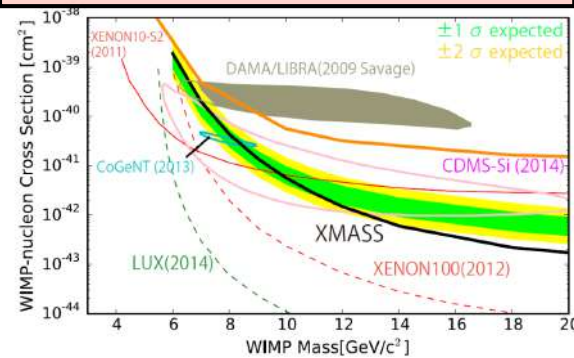
Bosonic super-WIMPs search, PRL 113, 121301 (2014)



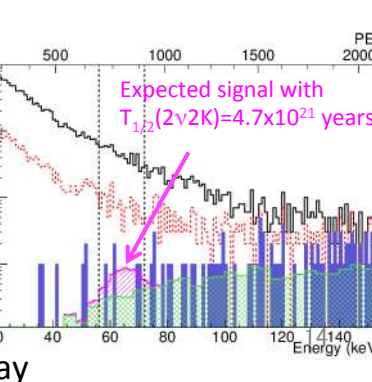
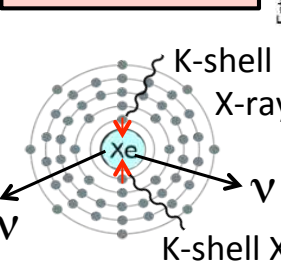
Inelastic WIMP nucleus scattering search, PTEP 063C01 (2014)



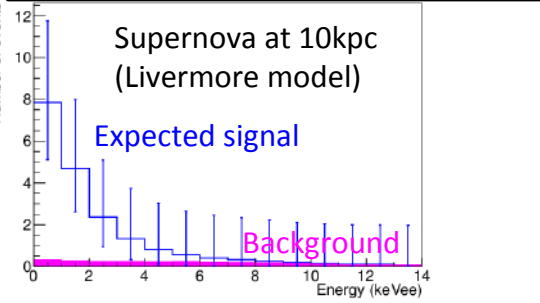
Annual modulation, PLB 759 (2016) 272



Search for 2ν 2EC on ¹²⁴Xe, ¹²⁶Xe PLB 759 (2016) 64

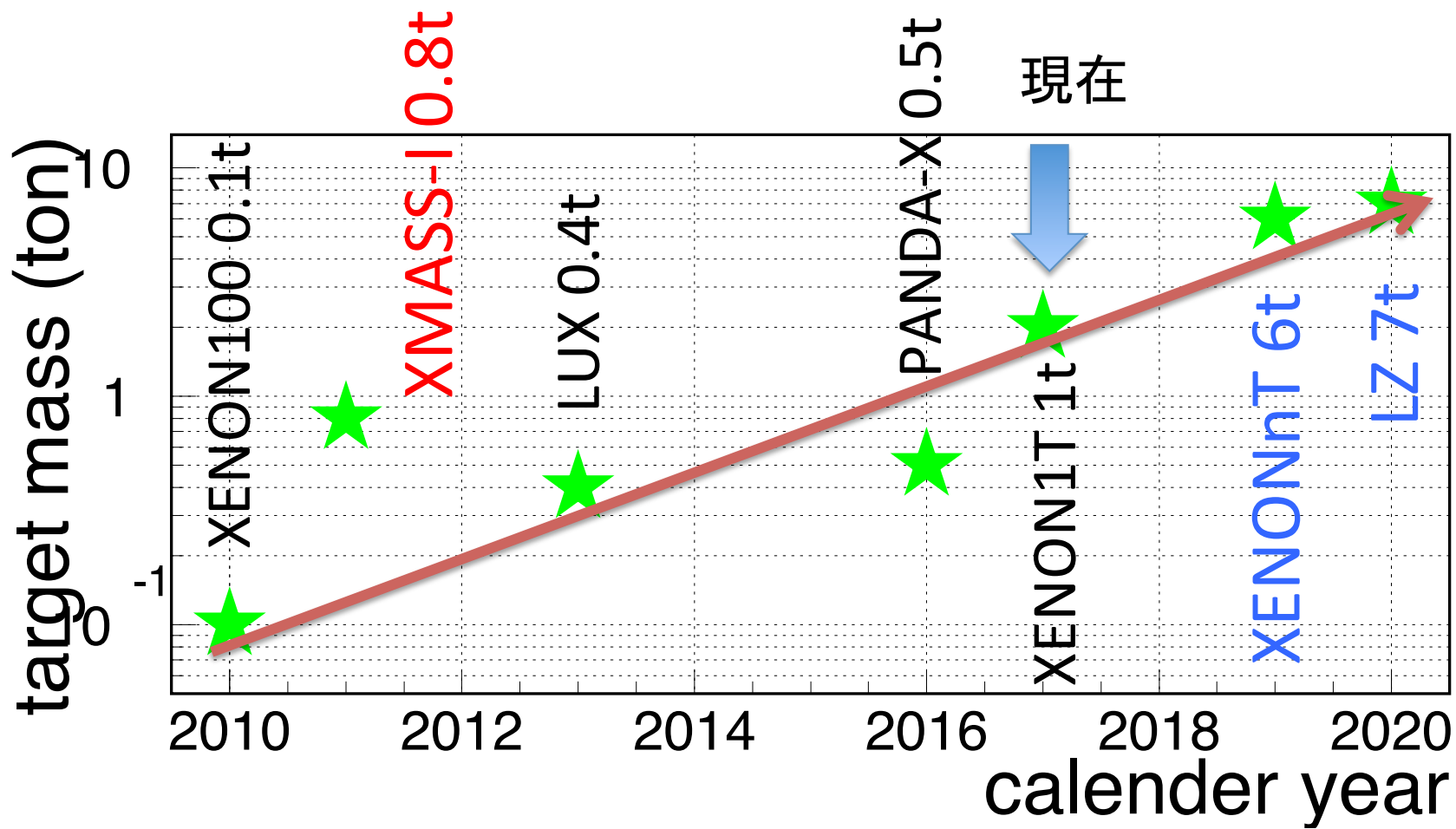


Possibility of supernova neutrino detection, Astropart. Phys. 89 (2017) 51



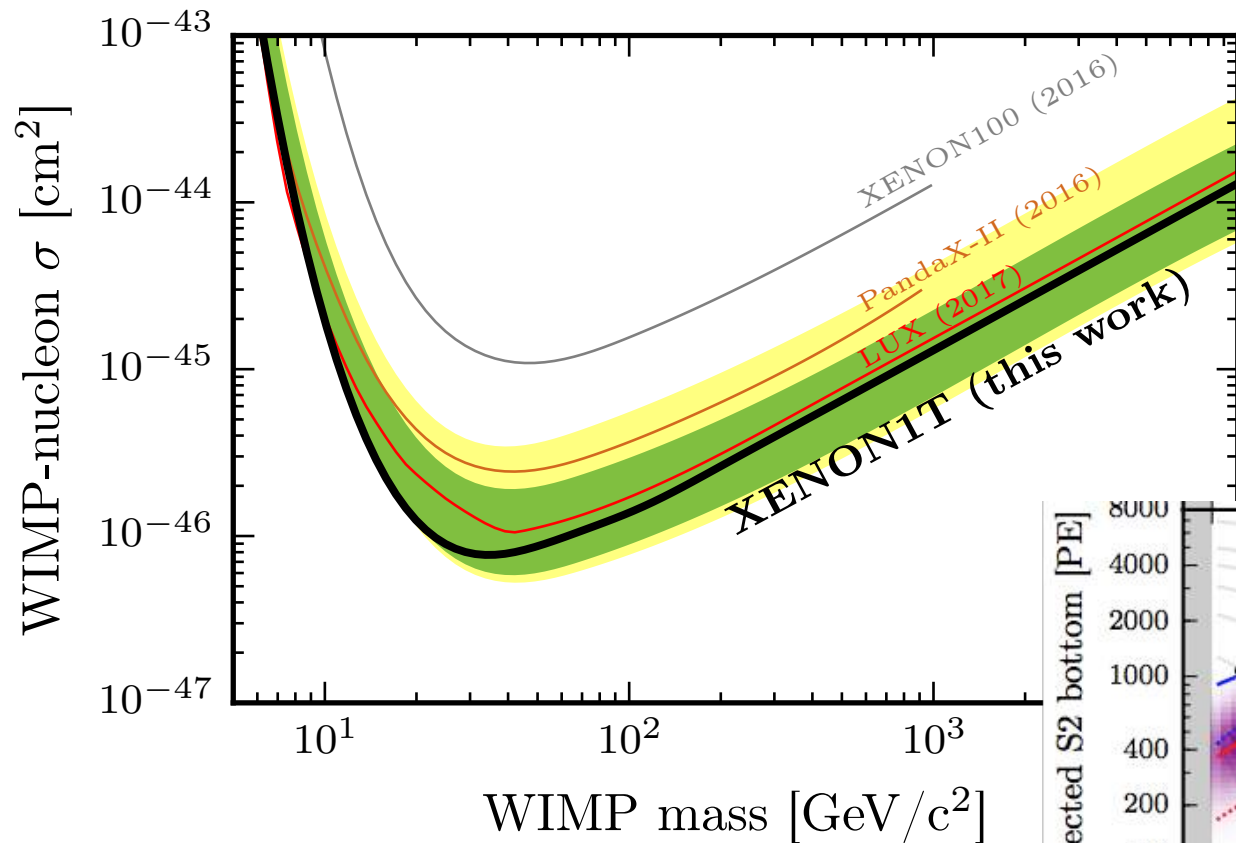
DAMAの検証、非弾性散乱、電子反跳を起こす種類の暗黒物質、太陽アクシオン、二重電子捕獲、超新星バースト、、

2相式LXe検出器の急激な大型化の成功



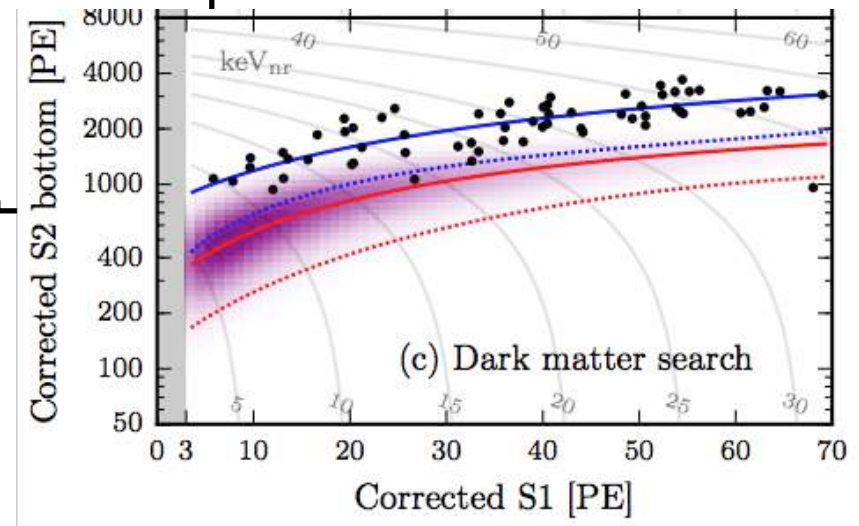
- これまでXMASS-1.5(有効質量3トン)は予算がつかず、今年始めてもサイズ上勝つのは難しい。強力な粒子識別も必要。

XENON1Tの最新結果



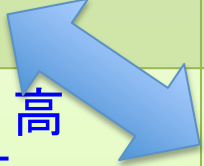
arXiv:1705.06655v1

- 0事象。34.2日のデータ。
- ラドン量はXMASS-Iに近い。
- 着実に感度を伸ばしている。



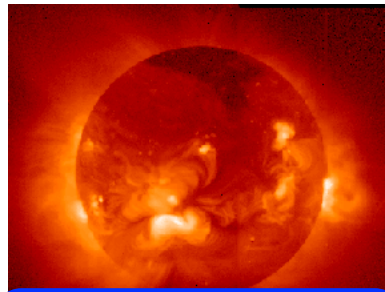
1相式と2相式のpros & cons

	Pros	Cons
1相式検出器	大型化 容易 構造 単純 ガンマベータ弁別 ラドン等対策 容易 不純物 強い	粒子識別能力 低 事象再構成(壁) ?
2相式検出器	粒子識別能力 高 事象再構成 高	HVが放電? アノードのサイズ? ラドン等対策 1/10-1/100? 電子捕獲不純物低減

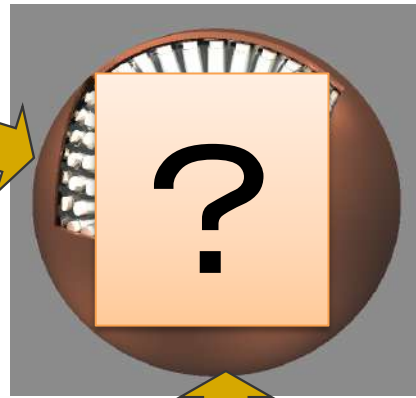


- 技術的なところで1相式のconsの解決が進まず、一方2相式はなんとかうまくやってきた。
- 1相式の得意分野は2相式の苦手分野をカバーする。

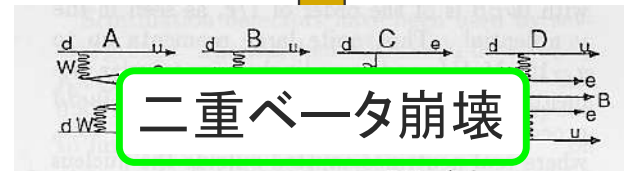
ディスクバリヤーを目指すためには



低エネルギー
太陽ニュートリノ



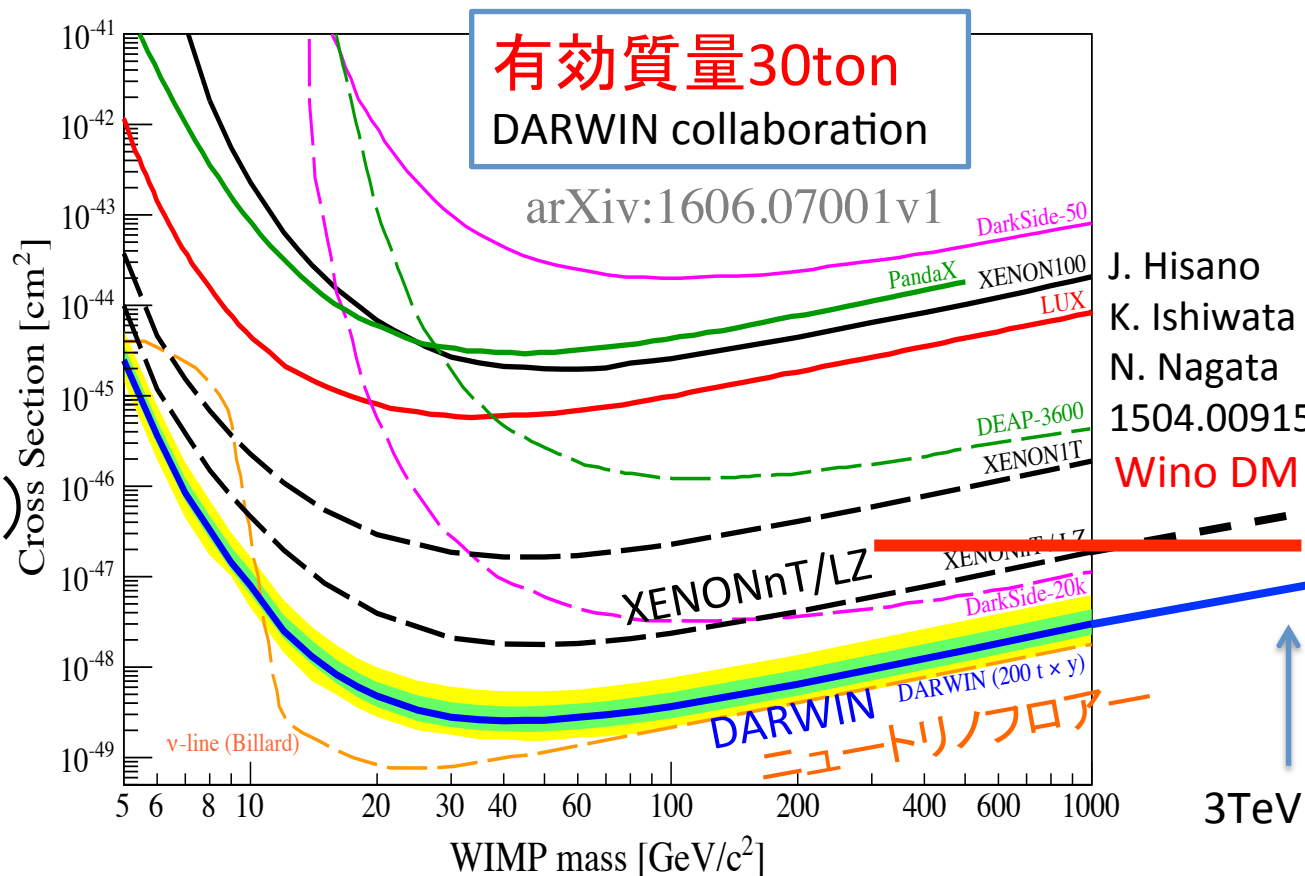
暗黒物質検出



- 根本的な興味は変わらず WIMPs, solar ν , $0\nu\beta\beta$ 。
- その実現には
 - 大きなターゲット
 - バックグラウンド低減
- この物理の展開を狙う以上、将来
 - 世界で一つしか作れない大型検出器へ向かう。
 - 当然のように大型共同実験になる。
 - あと2ステップ。今こそ合流して協力を開始すべき。

大型キセノン検出器で標榜する感度の例

右図：
唯一第3世代を
標榜し、形が見
えている計画の
DARWIN実験
(2相式LXe検出器)
の感度。
XENONnTの次に
進む予定。x400



J. Hisano
K. Ishiwata
N. Nagata
1504.00915

- 暗黒物質探索の感度はニュートリノフロー（太陽・大気ニュートリノが生じる原子核反跳がBGとなる感度）に至る
- 太陽ニュートリノは $7.2(pp)+0.9(^7\text{Be})$ 事象/日 $<30\text{keV}$
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索はdegenerateの途中までカバー

XMASSの理想的将来像

- XMASSのノウハウを生かし第2世代実験 (XENONnT/LZ)に参加して**格段に感度を上げる**。(そのことでヒントが得られると期待)
- 並行して神岡で第3世代の研究開発を進め、**新たなより大型の検出器を提案**できるように用意する。
- 神岡に戻り**第3世代の検出器を建設**し、暗黒物質の発見を行う。(\$ \$ \$ 人人人)

XMASSの第2世代実験 (有効質量～5トン)への参加

- XMASSの持っているノウハウや資産を生かしてグループとして合流する。XMASSの延長上。
- 宇宙線研として大学の活動を取りまとめ、XMASSの継続発展の実現ともなる。現在の人員でも実現が可能な高感度探索実験。
- XENONnTの場合、特に**液体キセノンの純化が必要**。
LZより1年早く始めるが若干キセノンが少ない。
 - **液体キセノン純化をこれまでのノウハウを元に開発**
 - 手持ちの低BGPMTを持って行く
 - 我々のキセノン1.9トンを貸す
- 設計変更から入っていきたい。

XMASSの神岡での研究

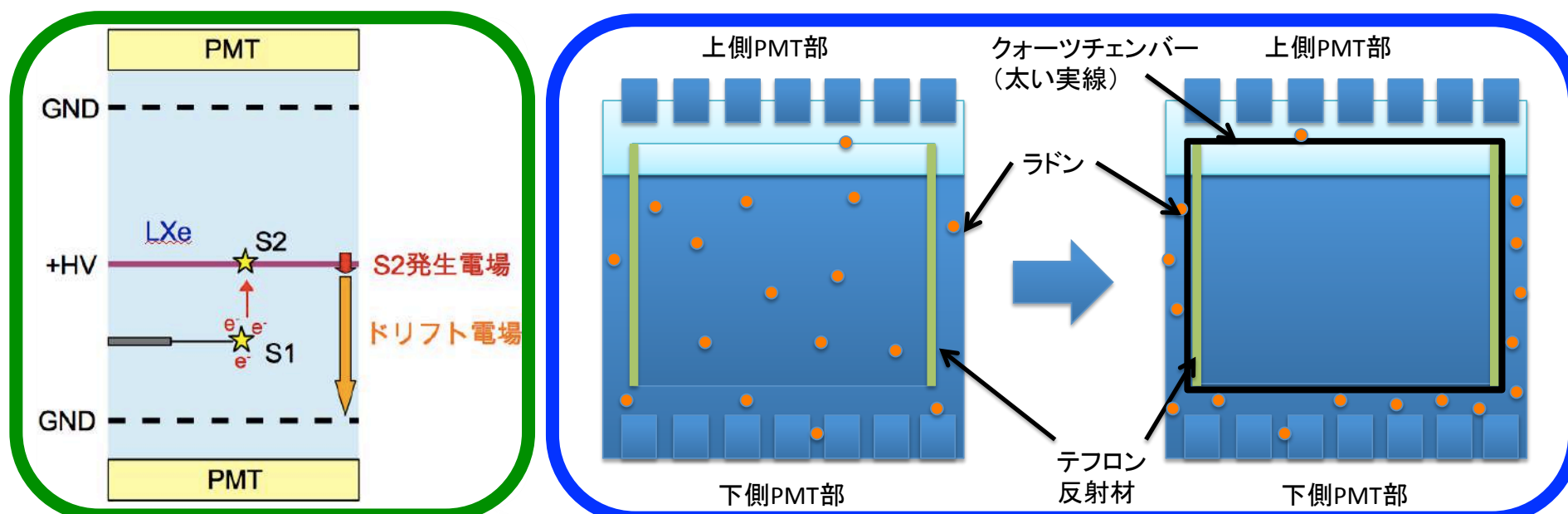
- XMASS-Iのデータはしゃぶり尽くし、超新星モニターとしてあと1年少し運転を続ける。第2世代検出器のテストベンチとしても活用する。
- 第2世代実験で何かしらの信号が見えれば第3世代実験の実現へ加速がつく。
- 神岡に持ってきたい。
 - 2相式検出器の弱点を解決しておく。
 - キセノン等のターゲットの入手方法の研究開発。
- 第3世代実現のための、将来のR&Dを行うことが必要で、神岡での低BG研究は継続する。

XMASS-Iからまだまだ出てくる物理成果等

- **目玉解析**
 - 有効体積カットを用いた暗黒物質探索
 - 季節変動の探索(データ追加、解析改善)
- **高感度化した探索**
 - 二重電子捕獲事象探索(beta/gamma)
 - ^{129}Xe の励起を伴う暗黒物質散乱
 - Hidden photon探索
- **新物理・現象の探索**
 - 太陽KKアクシオン探索
 - 光子発生を伴う(低質量)WIMP探索2種?
- **低バックグラウンド技術**
 - 無酸素銅中の ^{210}Pb などの同定と評価
 - 光電子増倍管の開発成果
- ○○○

将来へ向けた神岡でのR&Dのいくつか

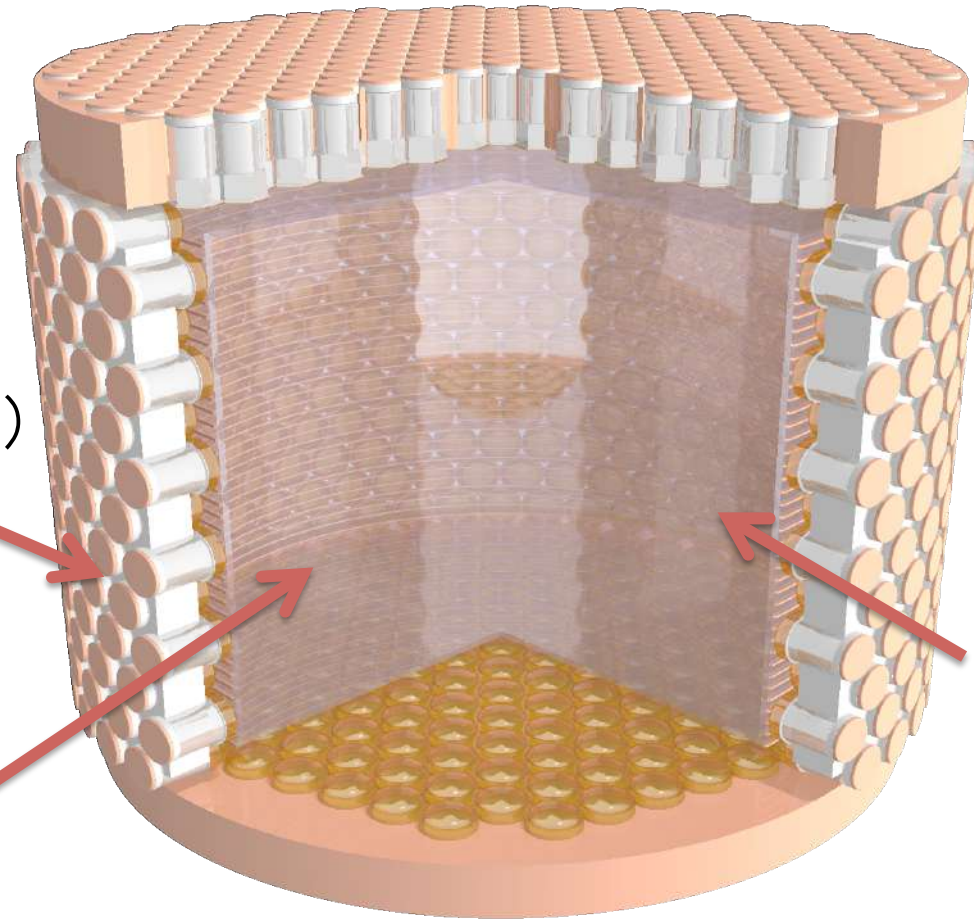
- 現在の大きな課題
 - ラドンなどの**内部放射能**
 - 電子を捕獲するようなテフロン等から出る**不純物**
 - S1信号の検出効率の**位置依存性**の低減, S2 only実験の遂行
 - **放電**の問題、**液面安定化**、**ワイヤー**にまつわる問題
- これらを解決するため様々なR&Dを神岡で進める。
 - 1相式液体キセノンTPC
 - 石英容器を用いた分離2相液体キセノンTPC(KamLAND型)



神岡における第3世代実験の例

XMASS(SK, KL)
の伝統 全面
フォトセンサー
(PMTに限らない)

キセノン
生産技術？



石英容器を
導入し、ラドン他
不純物を低減。
循環不要にする。
ワイヤーサギング
対策にも有用。
S2 onlyも推進。

- 2相式液体キセノン検出器に不純物低減と、側面よみ出しによる低しきい値化の工夫を施す。
- 側面のフォトセンサーはコストダウンを行う。
- Winoもカバーし、ニュートリノフロアーまで探索。

まとめ

- 神岡の地下実験の将来展望
 - DAMAの検証
 - さらに将来に向けた方向感度検出器の開発
 - 発見を目指した大型キセノン検出器
- XMASSは3つの物理目標を掲げて低バックグラウンド実験を進めてきた。多数のbreakthroughと物理成果を上げてきた。
- 究極感度を目指して共同実験を始めることを考えている。神岡での研究は続ける。DM究極感度、pp太陽ニュートリノ高統計実験、 $0\nu\beta\beta$ 実験を神岡で展開したい。