

直接探索の現状

東京大学宇宙線研究所

森山茂栄

2013年9月21日

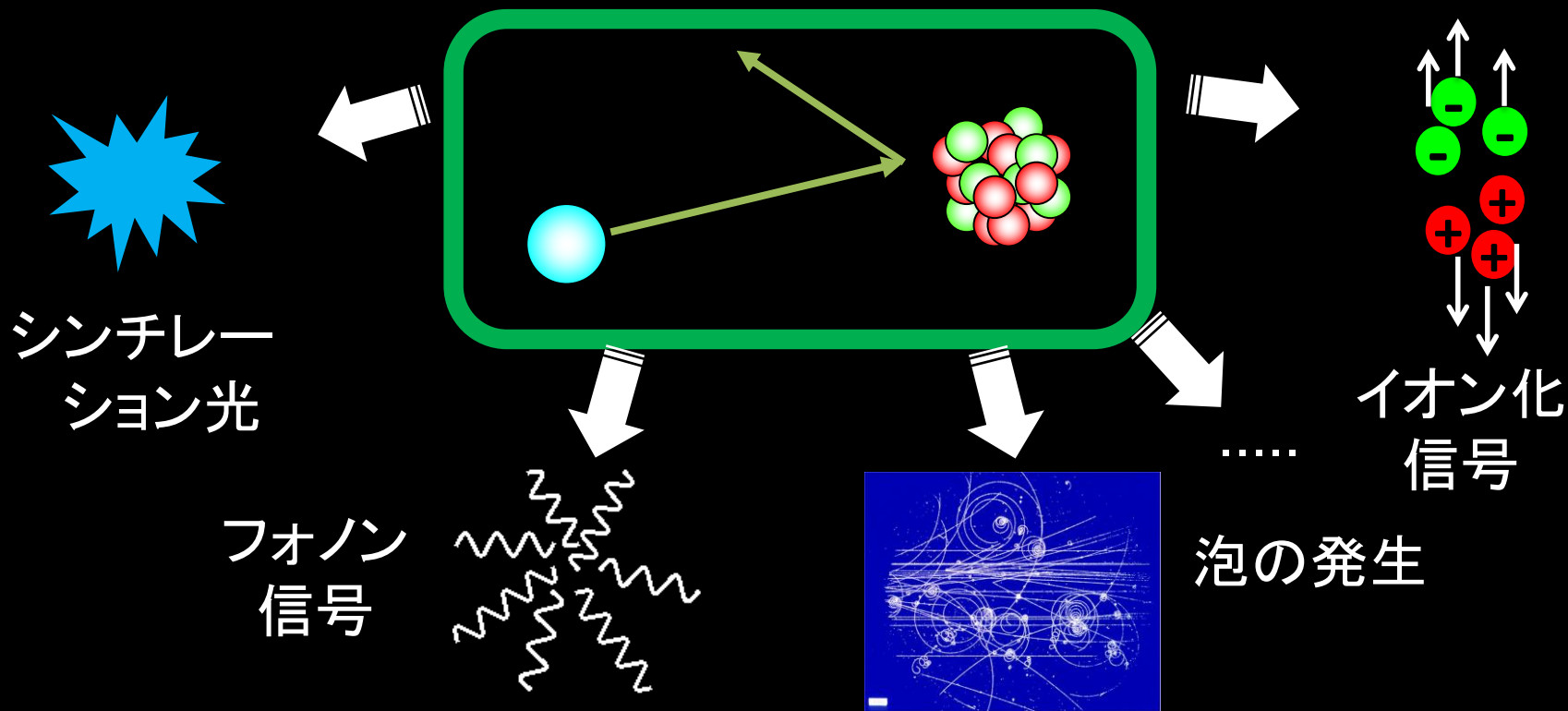
日本物理学会@高知大学

シンポジウム「ダークマター探索実験の現状と展望」

内容

- 直接探索の方法
- 直接探索に対する最近の動向
- 世界の直接探索の現状
 - DAMA
 - CDMSII/Super-CDMS/CoGeNT/MALBEK
 - XENON100/1T/nT, DarkSide, LUX, DEAP, XMASS-I/1.5

直接探索の方法：原子核反跳



- GeV-TeVの弱い相互作用程度の未知粒子を探索するための直接的な方法。 $\beta \sim 10^{-3} \rightarrow \frac{1}{2}m_\chi \beta^2 \sim 50\text{keV}$ for $m_\chi = 100\text{GeV}$

Nuclear recoil実験の端緒

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 31, NUMBER 12

15 JUNE 1985

Detectability of certain dark-matter candidates

Mark W. Goodman and Edward Witten

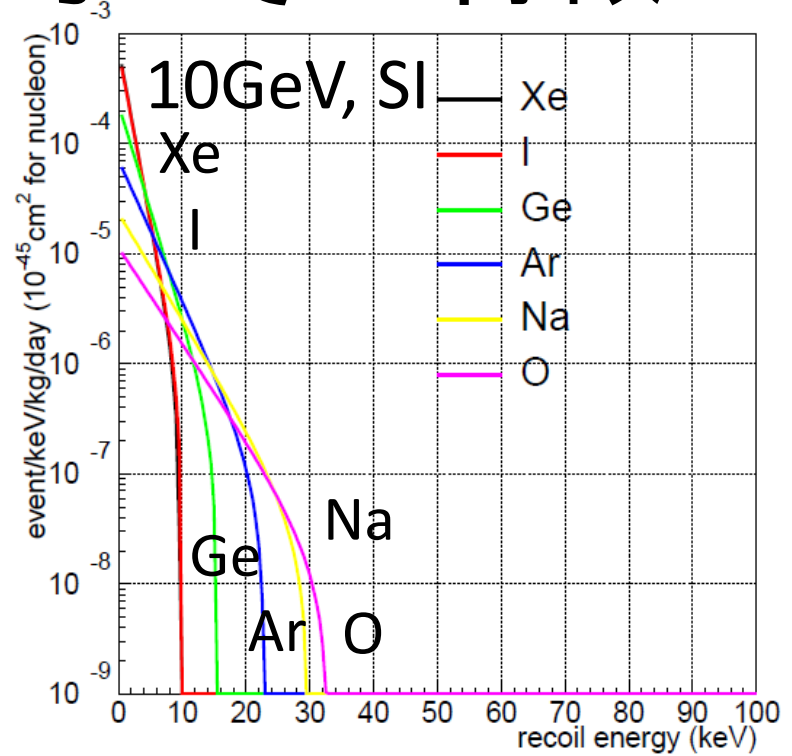
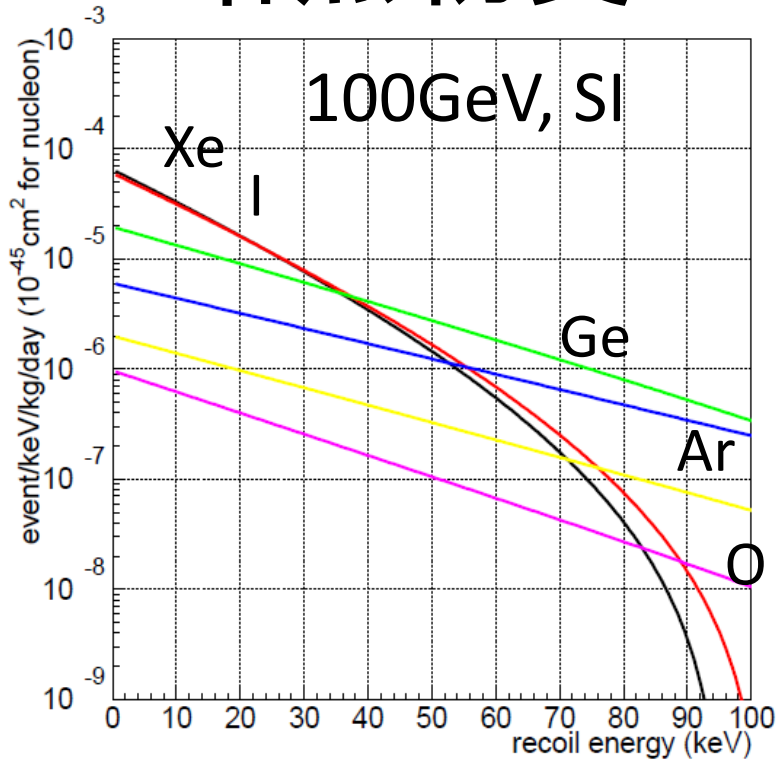
Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

(Received 7 January 1985)

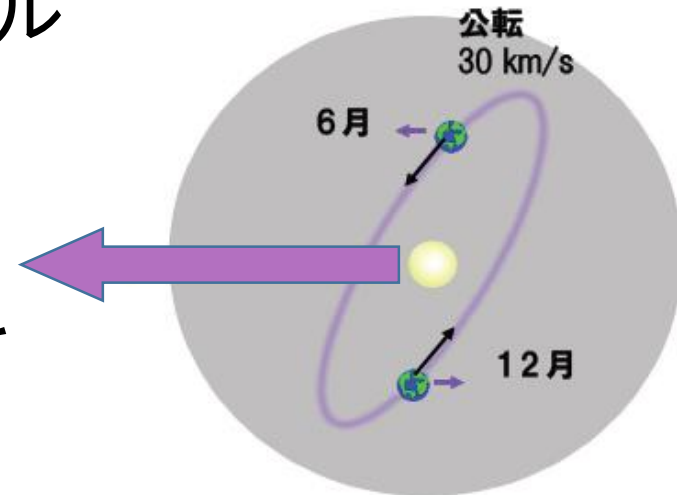
We consider the possibility that the neutral-current neutrino detector recently proposed by Drukier and Stodolsky could be used to detect some possible candidates for the dark matter in galactic halos. This may be feasible if the galactic halos are made of particles with coherent weak interactions and masses $1-10^6$ GeV; particles with spin-dependent interactions of typical weak strength and masses $1-10^2$ GeV; or strongly interacting particles of masses $1-10^{13}$ GeV.

- 1985年、ニュートリノの中性カレントを測定する検出器が提案されていたが、それを応用して暗黒物質を検出しようとの提案。
- 質量範囲、相互作用についても議論。
- 超対称性粒子でなくたって、感度の範囲内の相互作用があれば探せる。

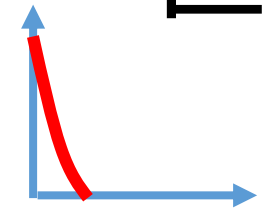
暗黒物質の信号とその特徴



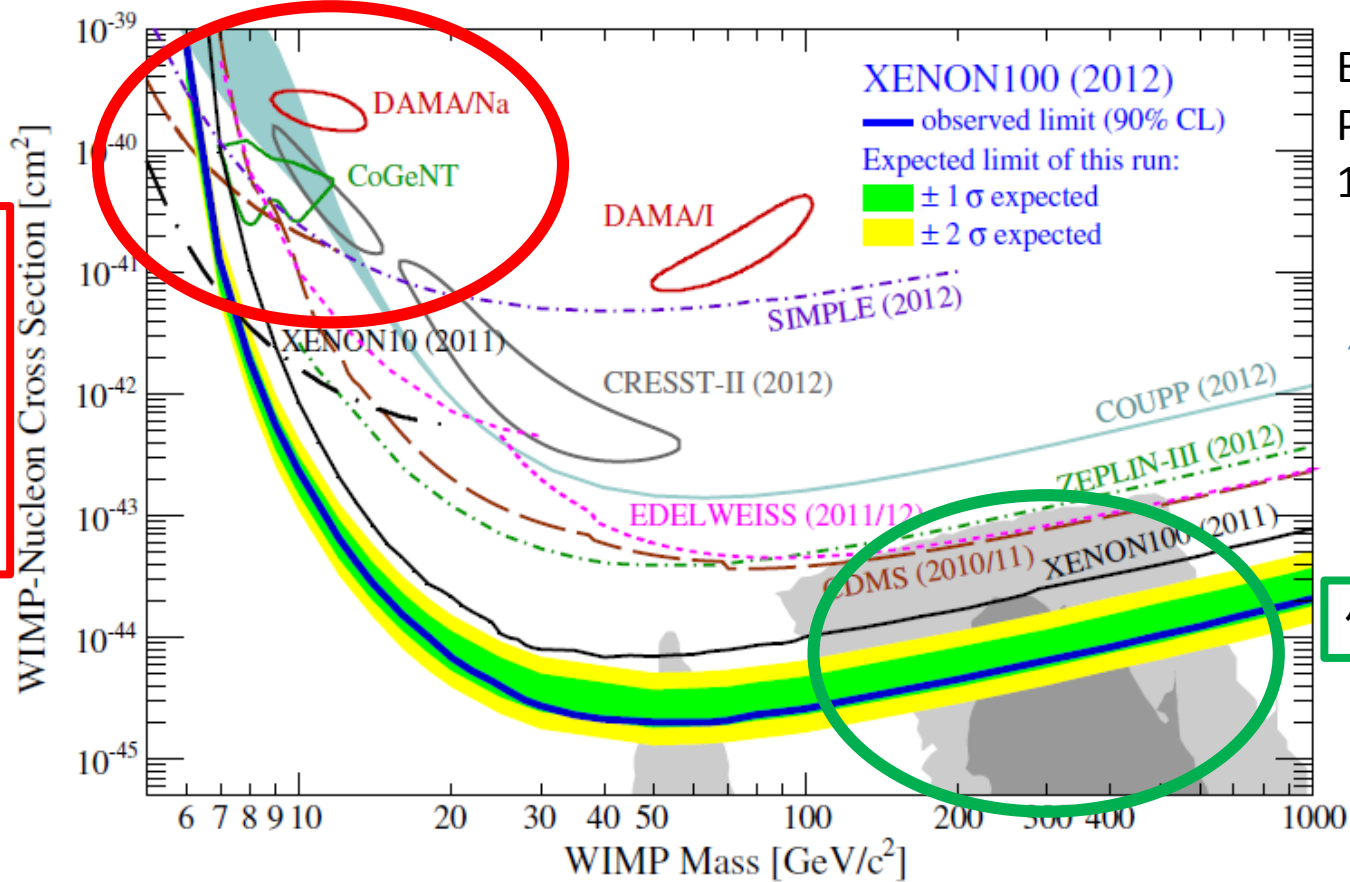
- 低エネルギー、指数関数(熱)スペクトル
- スピンに依存する・しない相互作用
- 季節変動、方向の偏りが期待される
- 「発見」の主張にはバックグラウンドを正しく理解することが必要とされる。



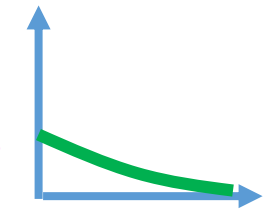
直接探索に対する最近の動向



低敷居値
肯定的結果
DAMA
CoGeNT
CDMS Si
CRESST



E. Aprile et al.,
PRL 109
181301 (2012)



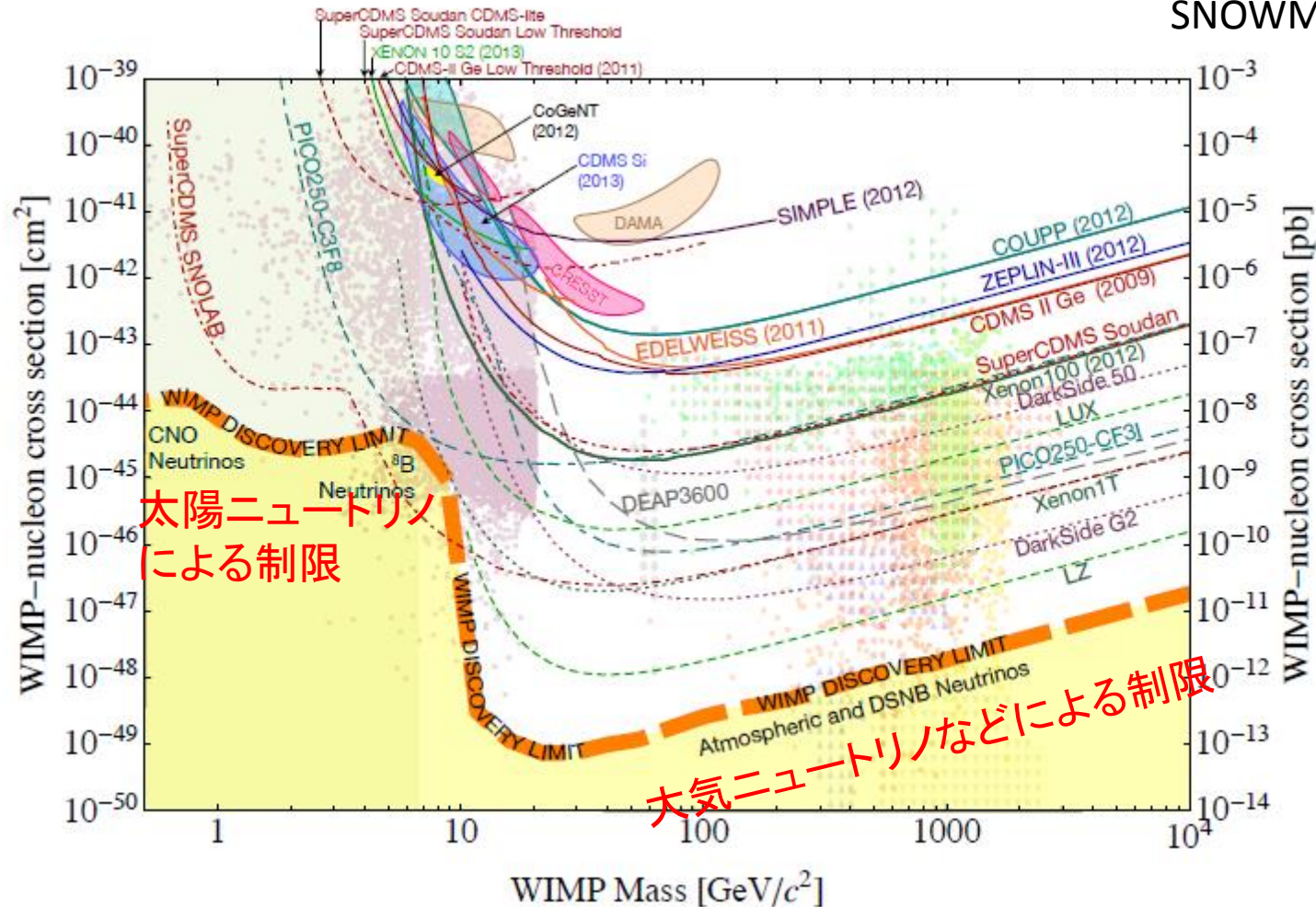
低BG

- LHCの結果から、制限のあるMSSMだと重い質量に押しやられるとともに、より高い感度が求められる。
- 軽い暗黒物質は実験の問題の可能性もあるが、徹底的に確認してゆく必要がある。
- 幅広い可能性を追求する必要があるだろう。

直接探索に対する最近の動向

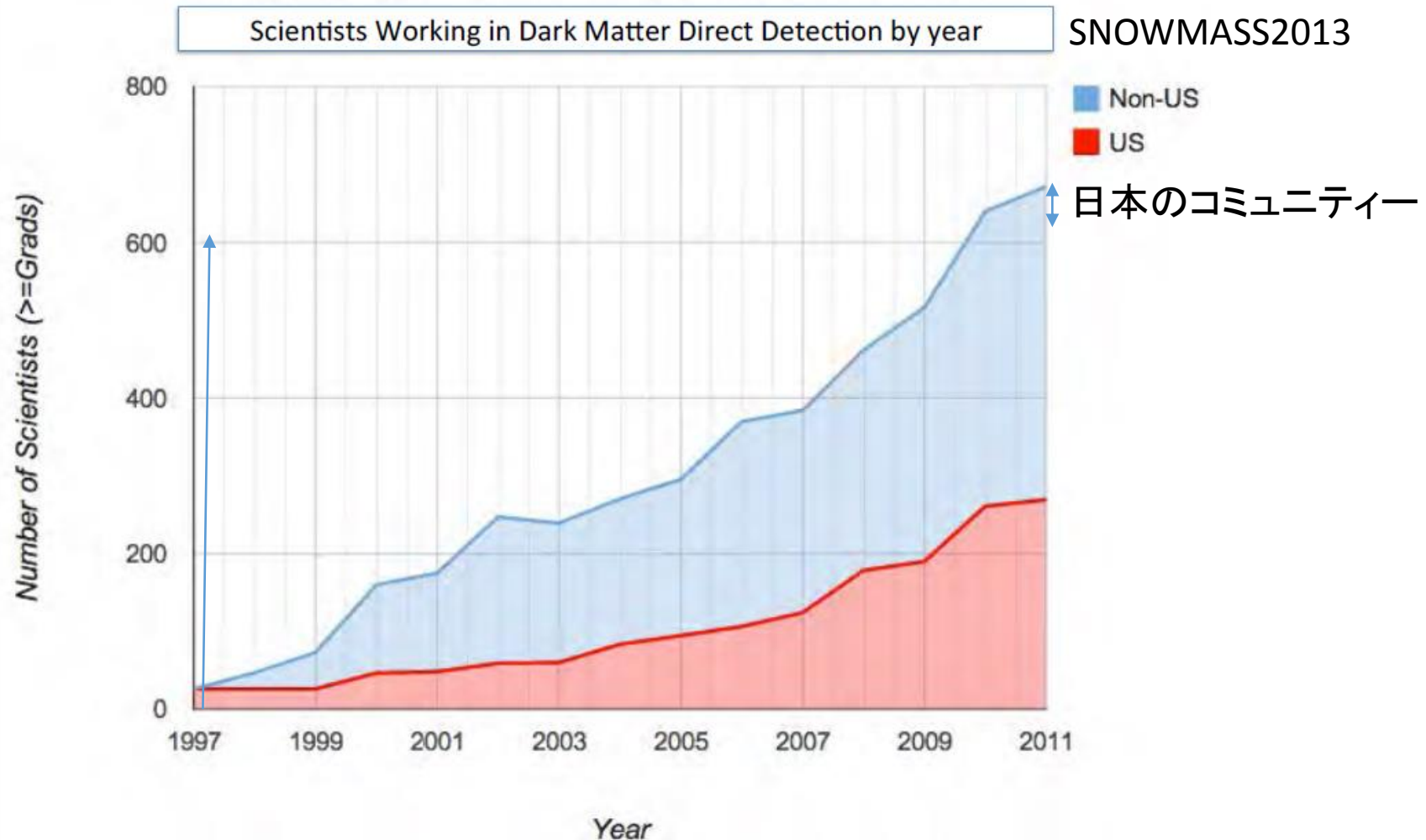
- 感度ぎりぎりまで探索する必要があるだろう(大気ニュートリノ、太陽ニュートリノのバックグラウンドが見えるまで(見えても))、積極的な姿勢。

SNOWMASS2013

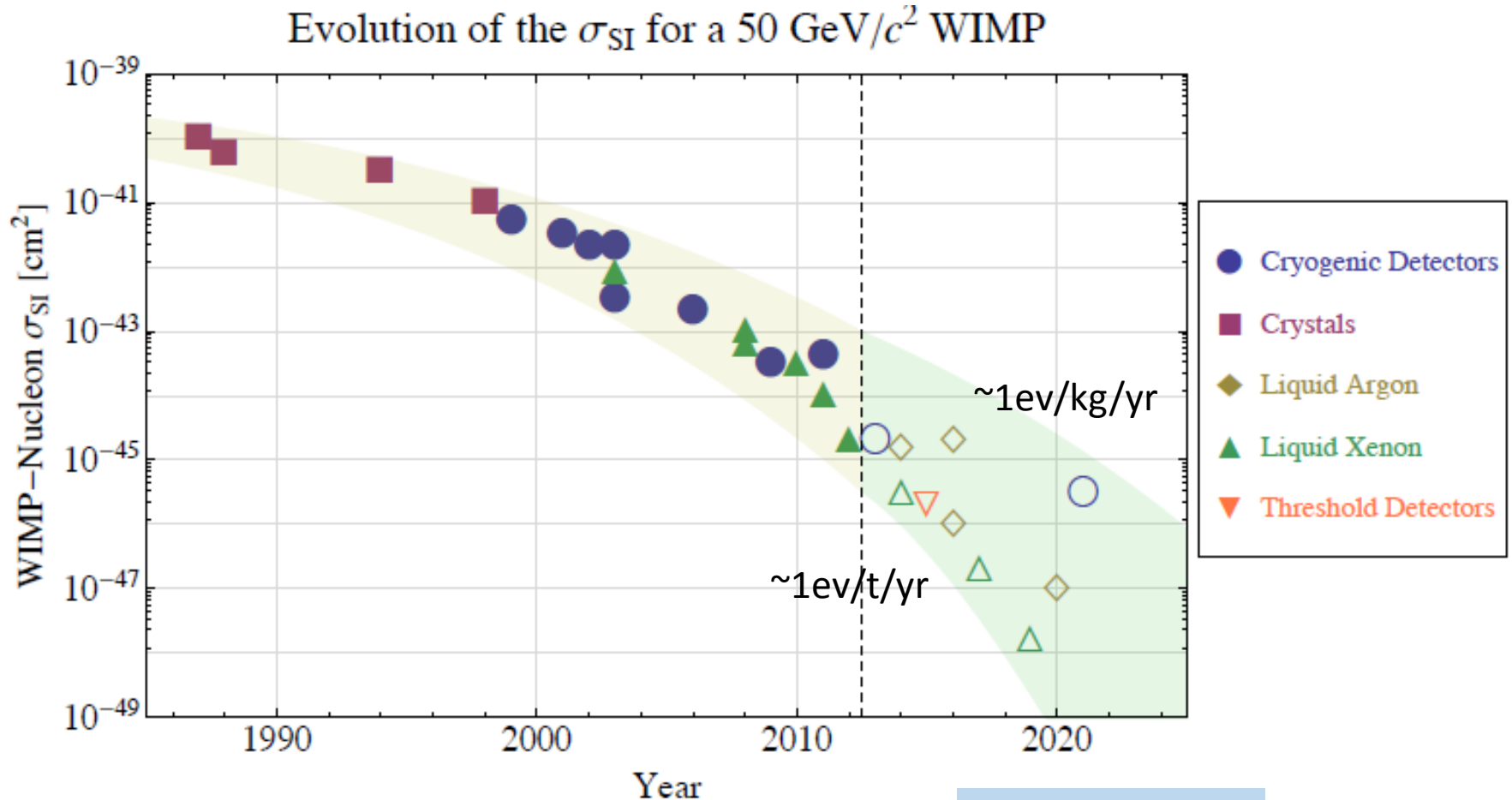


直接探索に対する最近の動向

- 感度ぎりぎりまで探索する必要があるだろう(大気ニュートリノ、太陽ニュートリノのバックグラウンドが見えるまで(見えても))、積極的な姿勢。



感度向上の見通し: 10年で1桁以上

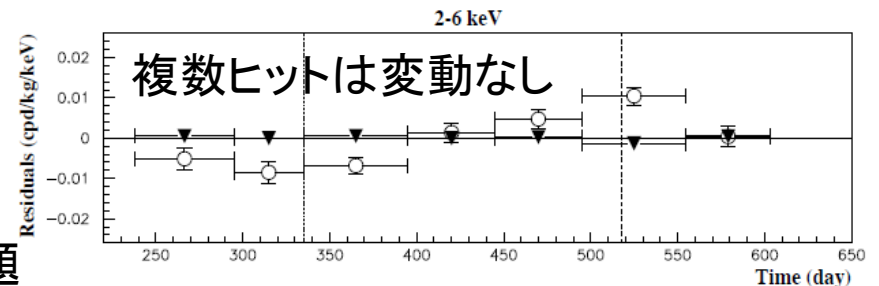
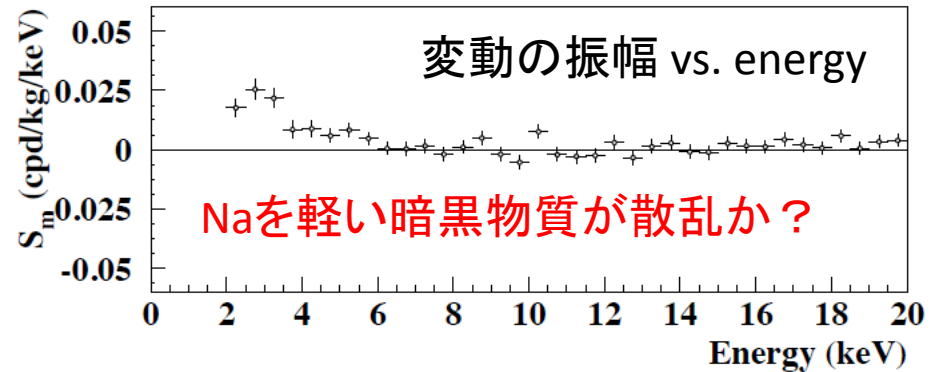
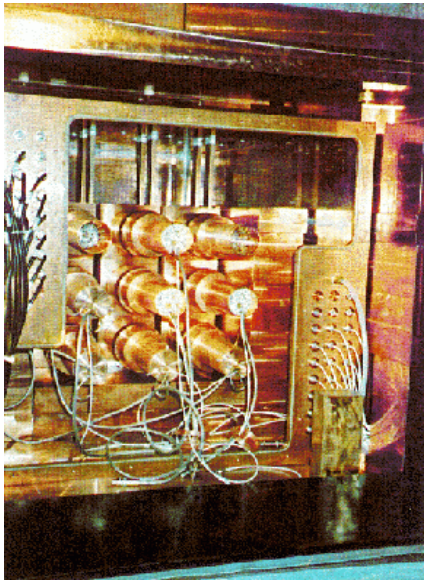
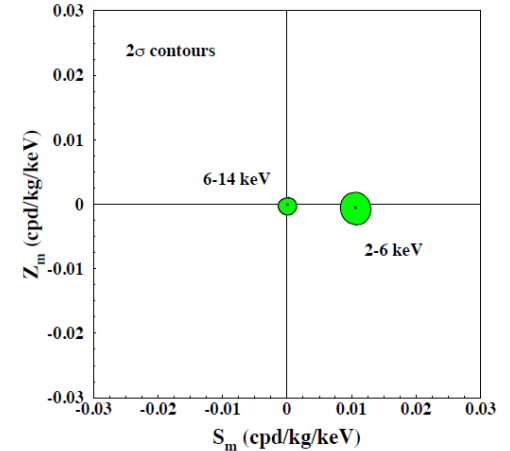
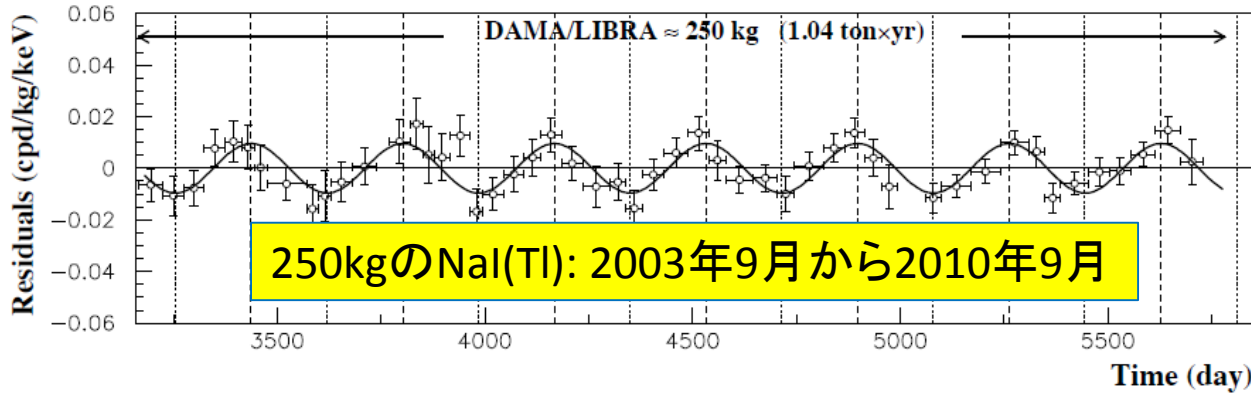


D. McKinsey

DAMA/NaI + DAMA/LIBRA phase 1

- Phase 1の最終結果を報告(arXiv: 1308.5109) **9.3シグマ**

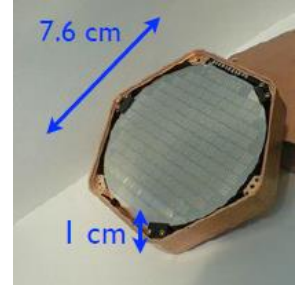
2-6 keV



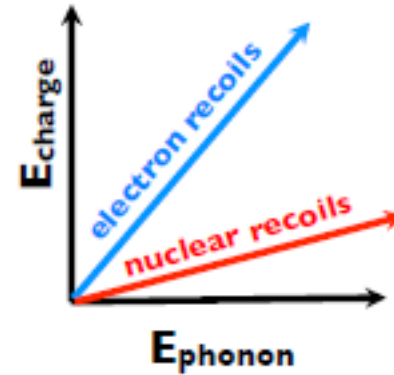
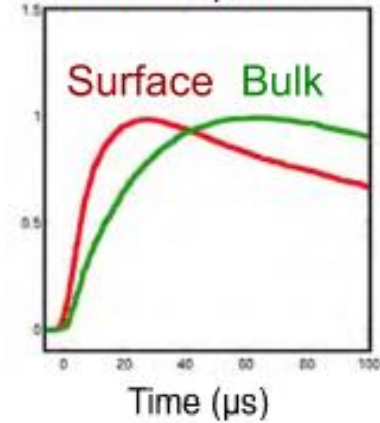
2010年12月からPMTをhigh QEに変えてphase 2
ANAIS, SABRE, DM-Ice, KIMS, KL-PICO... ^{40}K が問題

CDMSII-Si

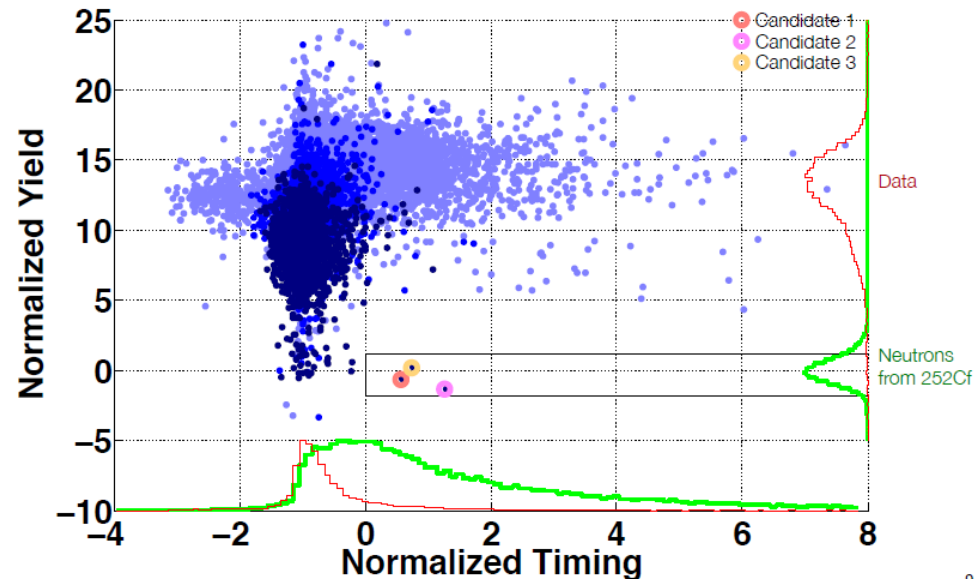
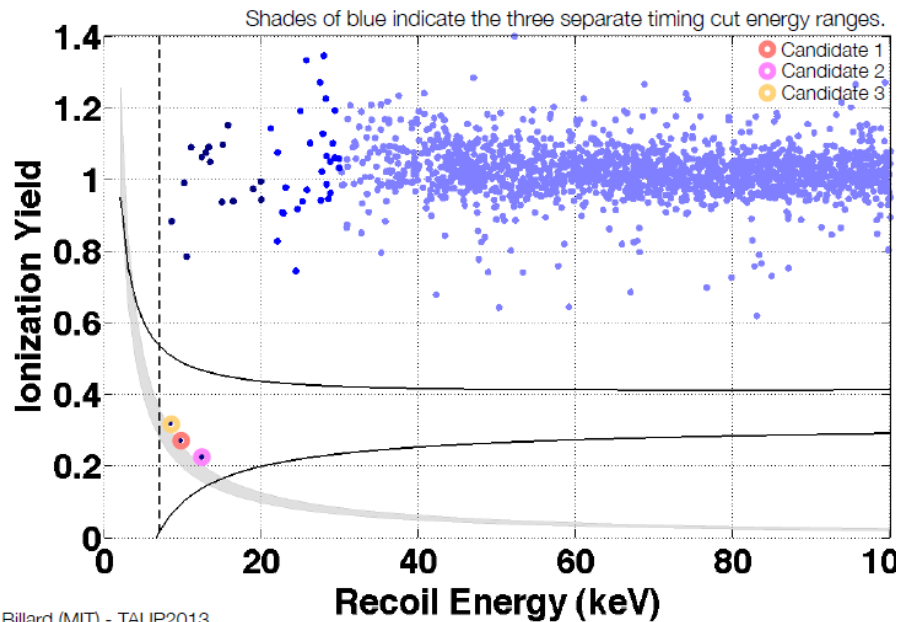
J. Billard@TAUP2013
arXiv: 1304.4279



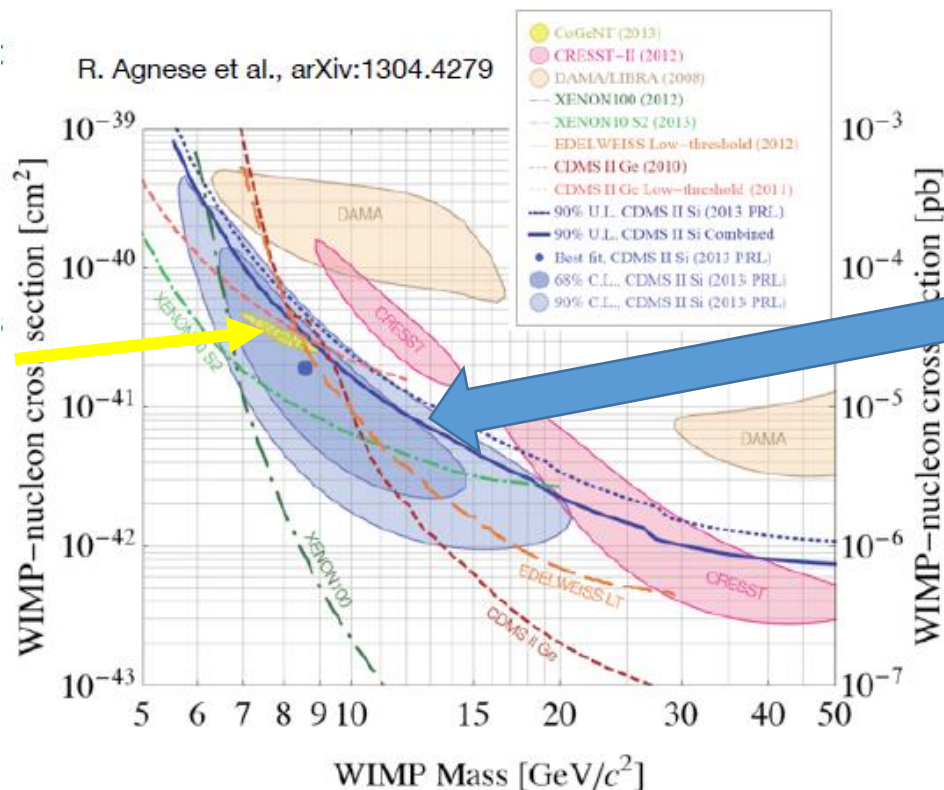
Phonon pulses



- CDMSII (Ge+Si)
- Siのほうが軽いため軽いDMに感度が高い。
- フォノンの情報と電荷情報を使ってe/ γ と原子核反跳を分けてBGを低減する。



CDMSII-Si



次の
CoGeNT

CoGeNTやCRESST
DAMAなどに近い
部分に許容領域

- >3事象の確率は5.4%だが低Eに集中: profile likelihood ratioで WIMP+BGがBG onlyより99.81%CLで好まれる。

“We do not believe this result rises to the level of a discovery, but does call for further investigation.”

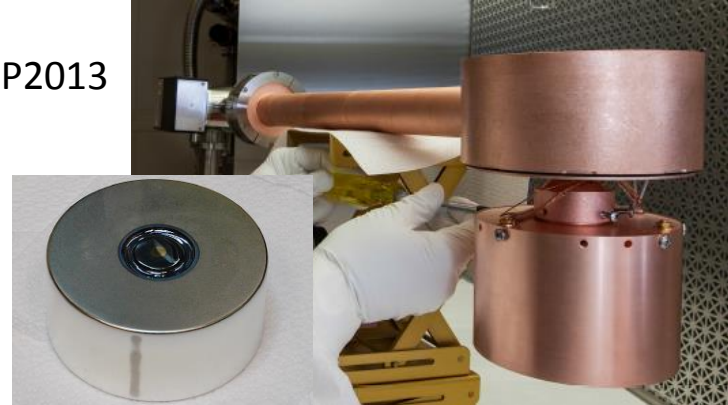
Super CDMSは表面BG低減の新技术を入れて2012年3月から Soudanで運転を続けている(9kg)。SNOLABで200kgの実験を狙う。

CoGeNT

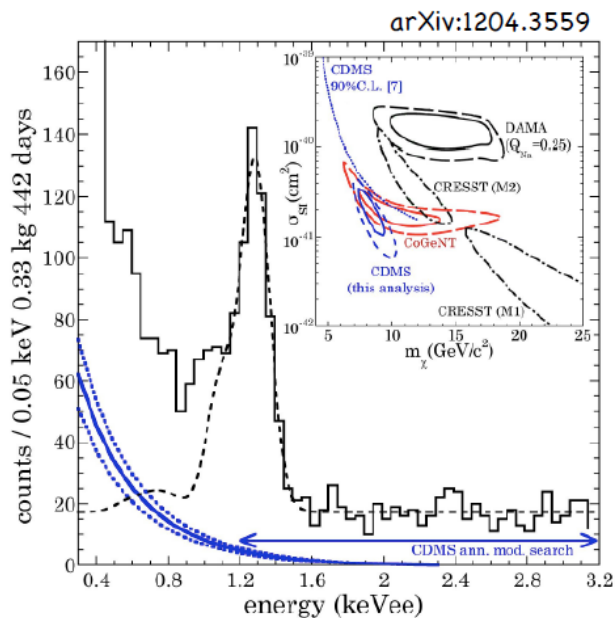
(説得力のある、という意味)

J. Collar @TAUP2013

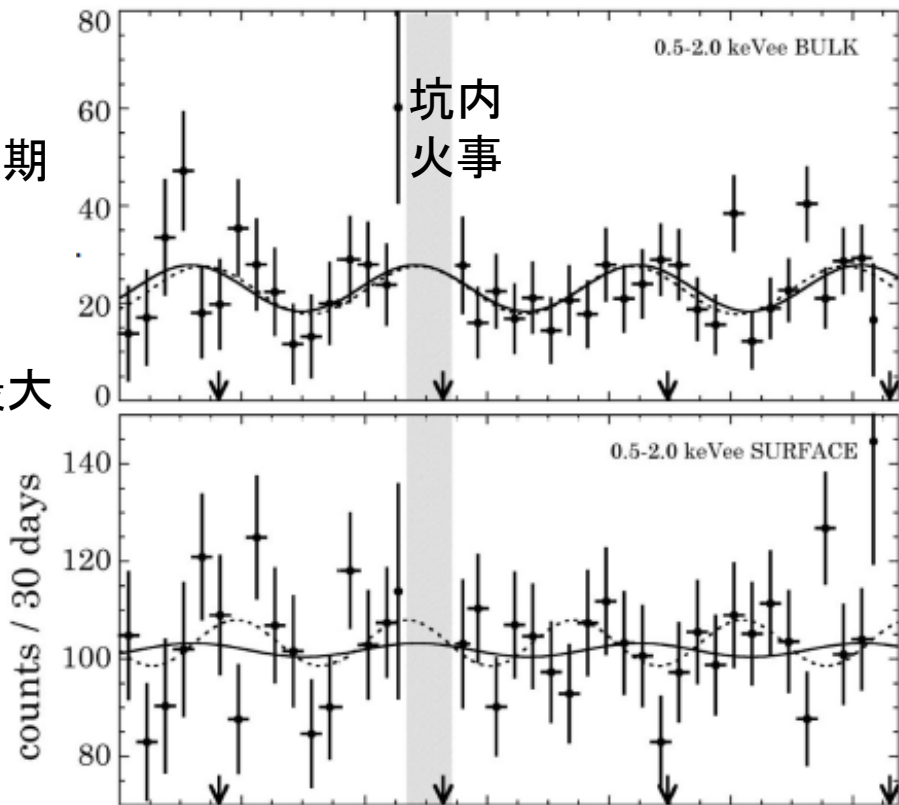
Preprint soon



- PPC (p-type point contact) or BEGe
- 静電容量が小さく敷居値が低い
- 新たに3.4年のseasonal variationのデータ
- ただし2.2シグマ(2011年の論文では2.8シグマ)
- さらに不明確に。

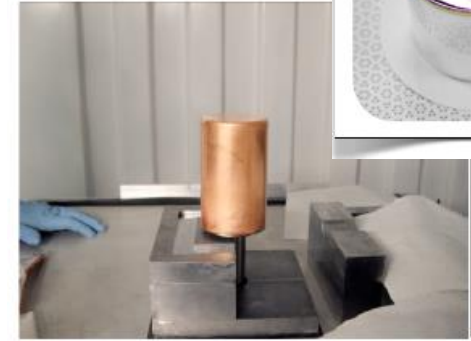
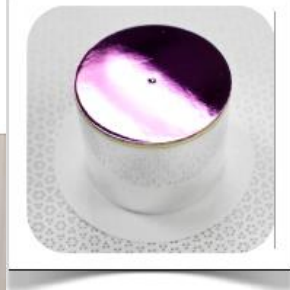


実線:
365日周期
点線:
フリー
矢印:
DAMA最大



MALBEK

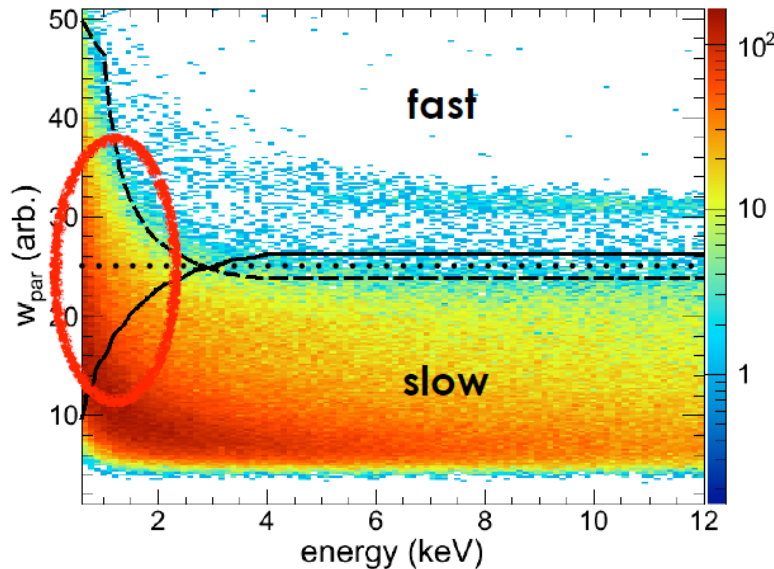
G. Giovanetti @ TAUP2013



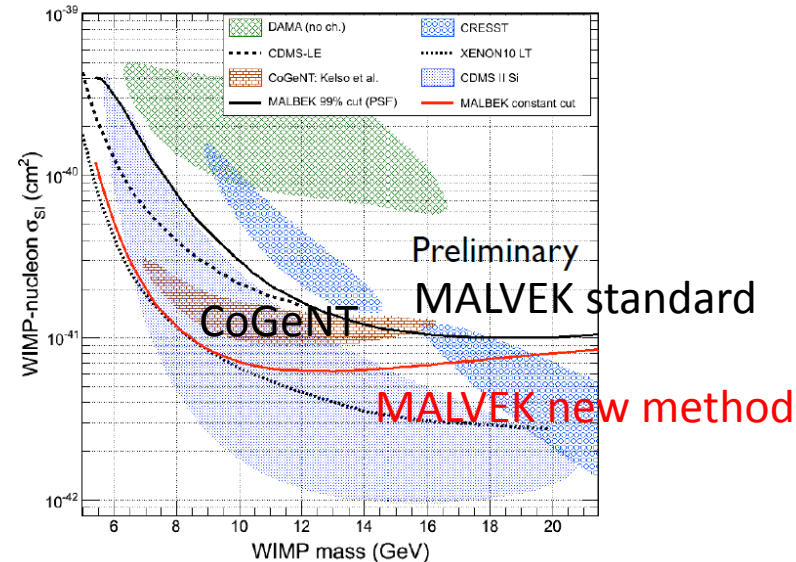
- $0\nu\beta\beta$ 用Majoranaグループのスタディ。
- キャンベラの結晶と、Collarから提供を受けたlow BG部品とを組み合わせで地下で測定。
- CoGeNTの事象は表面事象を落とさきれていないものではないか？表面事象は立ち上がりが遅いことで低減。

カットが不適切で
だいたいなだれ込みが
あることを確認。
カットを厳しくすると。。

^{241}Am flood data

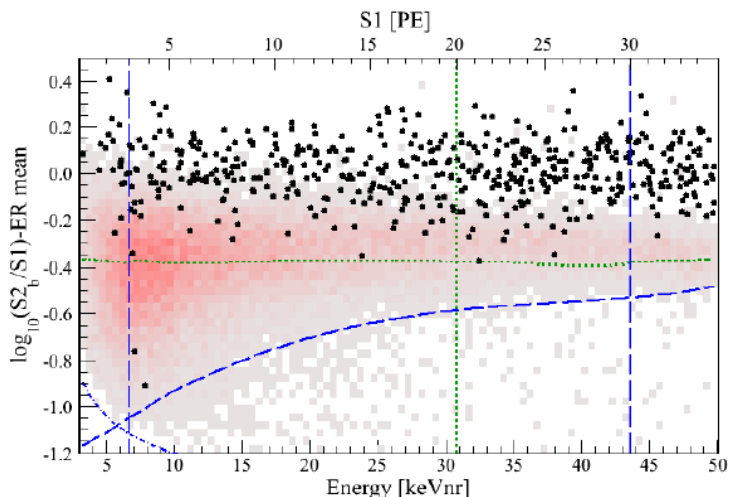
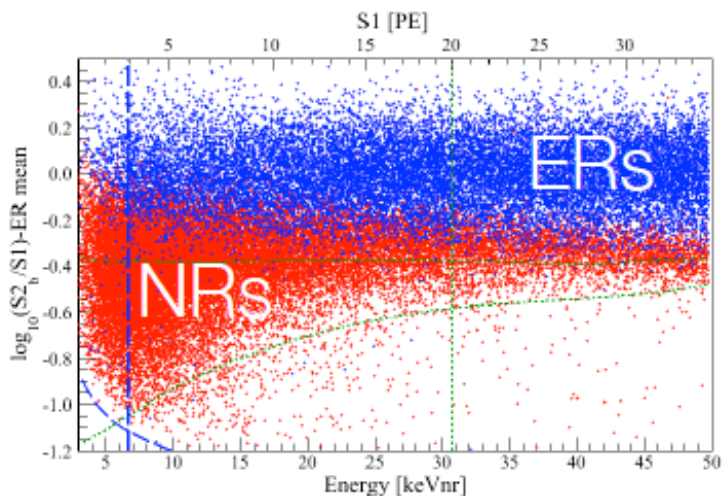


90% exclusions from 221 day dataset

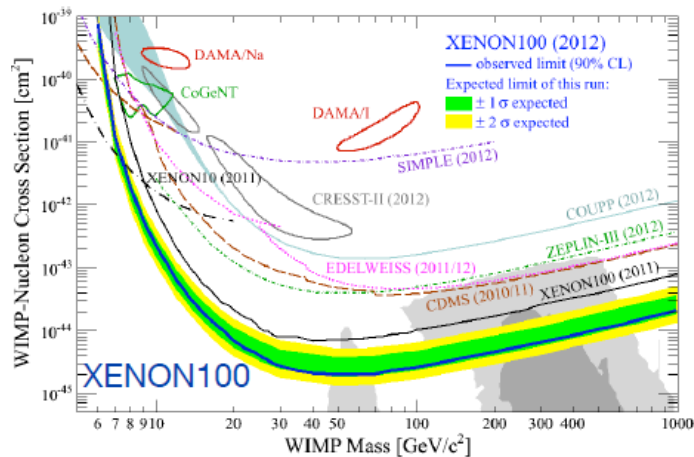
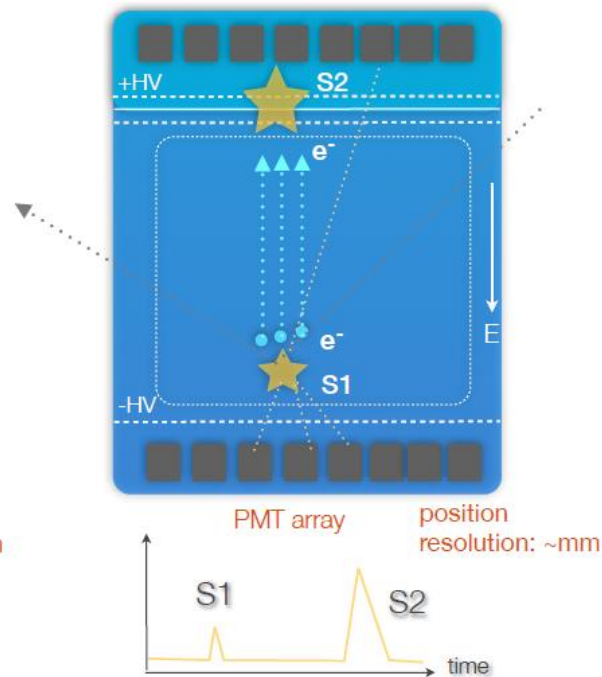


XENON100

- 液体TPC 直径30cm、高さ30cm
- $< 2 \times 10^{-45} \text{cm}^2 @ 50 \text{GeV}$
- 現在も運転中



Double phase (TPC)



E. Brown, L. Baudis
@ TAUP2013

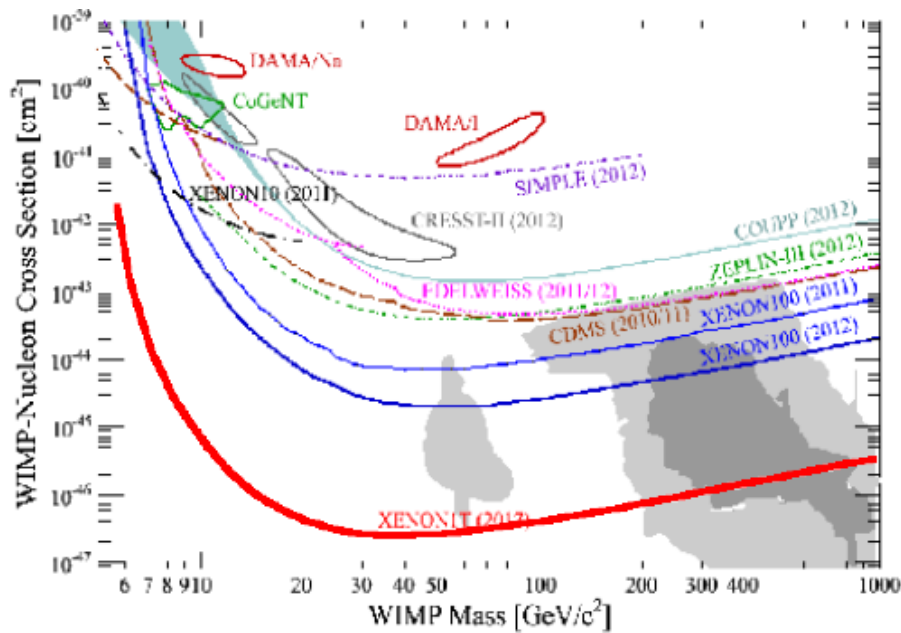
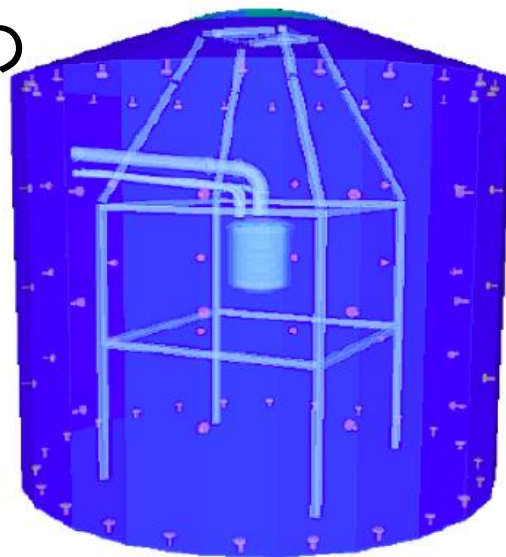
SDについては
Neutron coupling
 $3.5 \times 10^{-40} \text{cm}^2$
@ 45GeV

XENON1T/nT

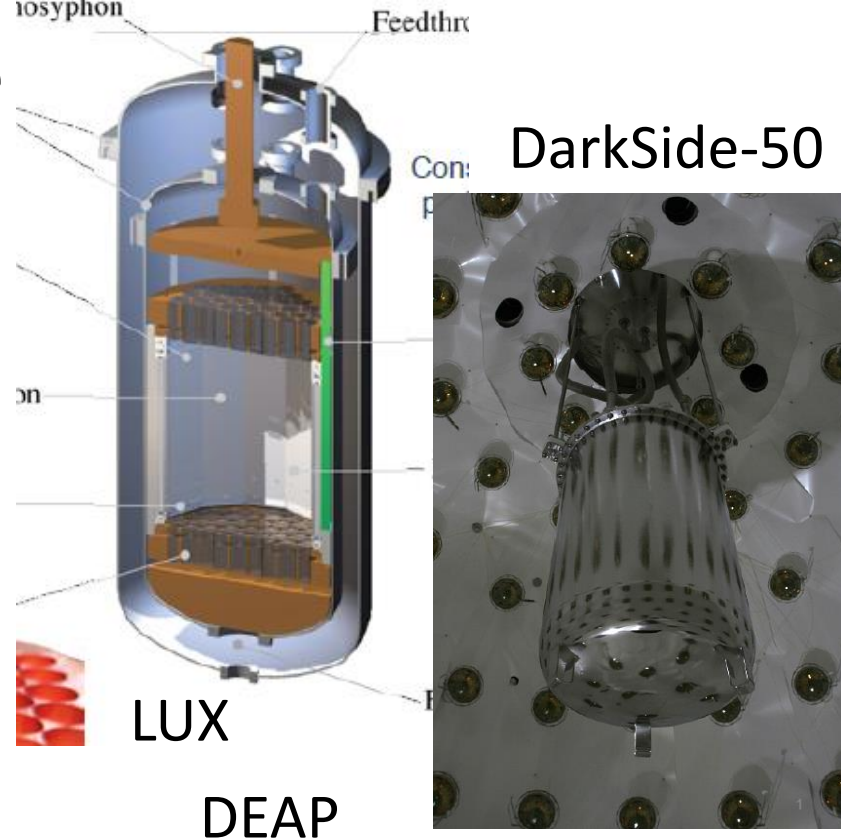
- 1T建設中(3.5t, 有効1t)
- 水タンクなど今年中
- 2014年コミッショニング
- 2015年サイエンスラン開始
- $2 \times 10^{-47} \text{cm}^2 (50 \text{GeV}) @ 2017$
- nTは20t yearsを目標, 2018-

水タンクで遮蔽
ラドンとクリプトンの
ベータ線事象を
低減する必要あり

E. Brown@ TAUP2013



LUX/DEAP/DarkSide



- LUX: 2層型, 350kg (100kg) LXe @ Sanford地下施設
 - 春から運転。秋には最初の結果を出そうと努力中。うまくいけばXENON100から2-3改善。2015年までに最終結果。

LArはXeに比べ

波形弁別ができる

^{39}Ar が多い

発光を直接検出不可(波長変換)

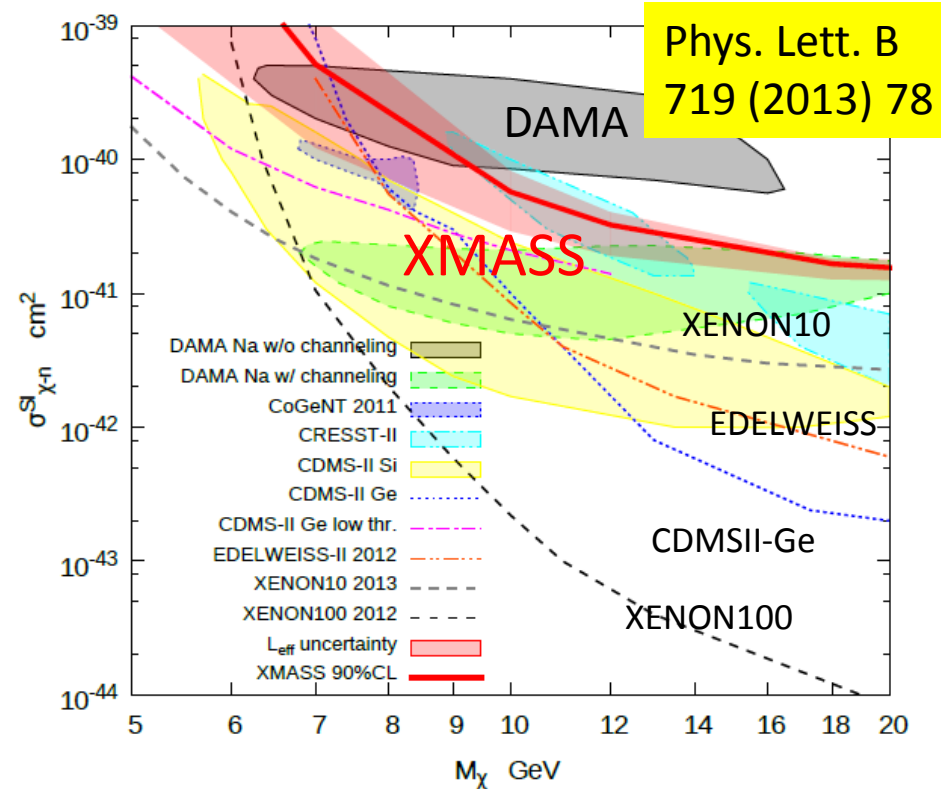
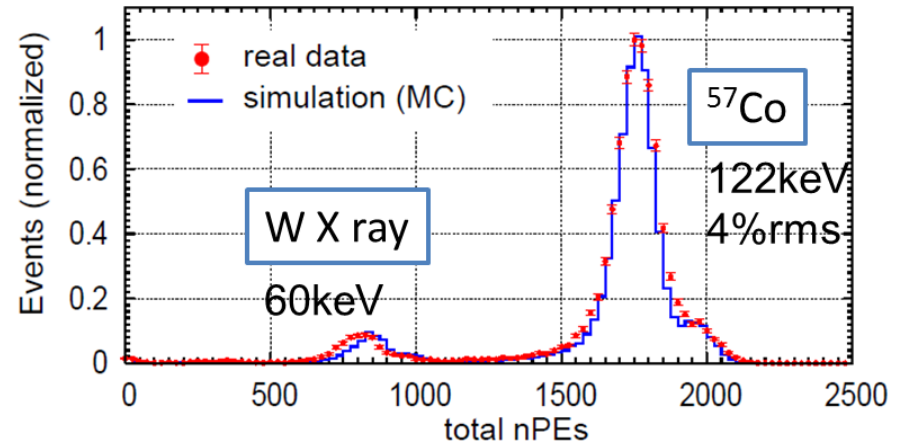
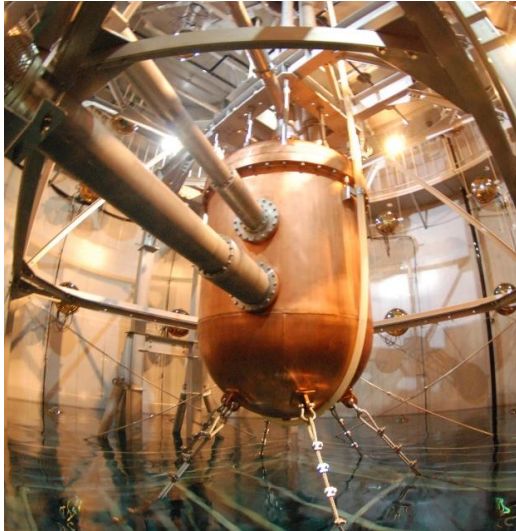
- DarkSide: 2層型、50kg(33kg) LAr @ GranSasso
 - Borexinoのテストファシリティを利用。液シンで困む。中性子同定。
 - テストラン開始。Xenon100近く行く。

- DEAP: 1層型、3600kg (1000kg) LAr @ SNOLAB
 - 建設は順調
 - 2014年春コミッショニング開始



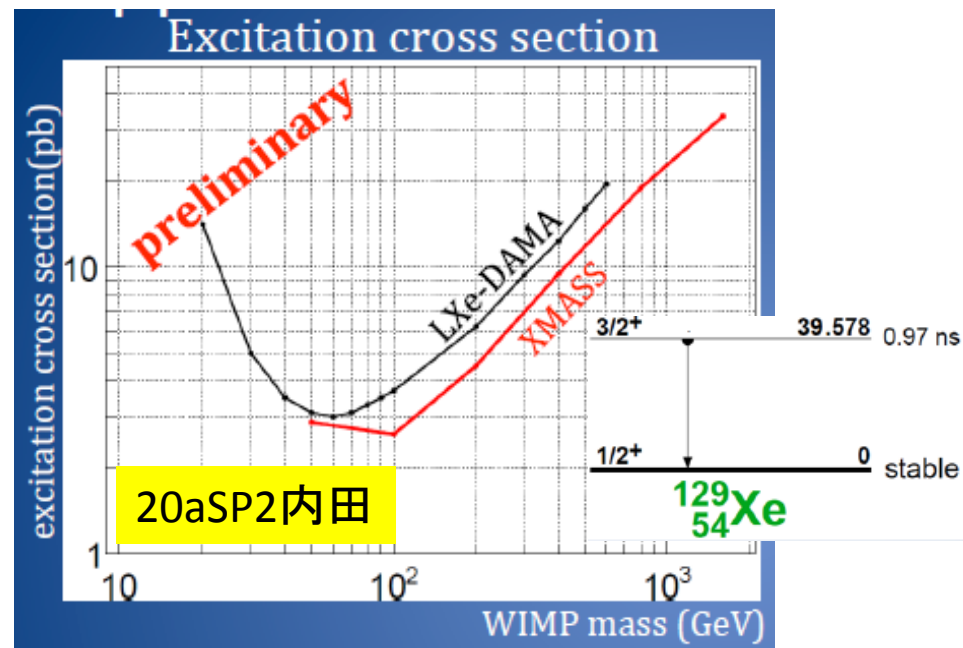
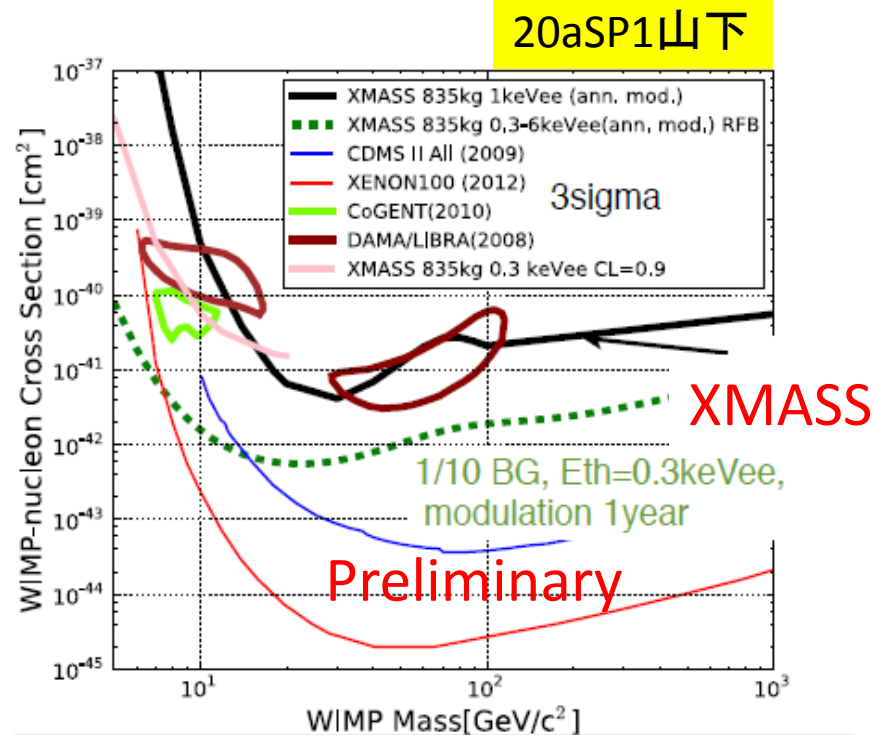
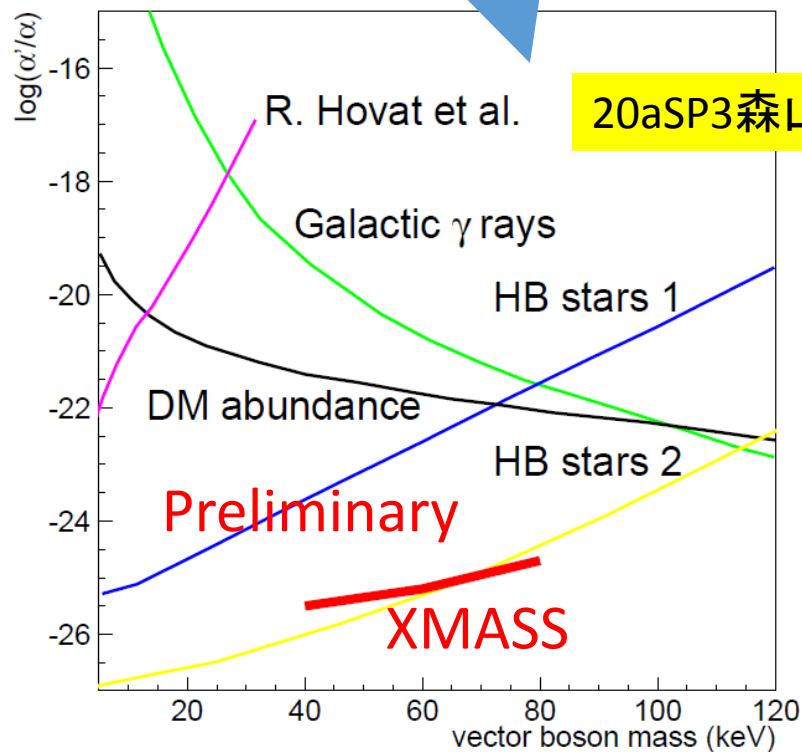
XMASS-I commissioning phase

- 2010年神岡施設に設置。
- 世界最大835kgの液体キセノン、1層型検出器。
- 世界最大14.7p.e./keV
- 低敷居値を実現し、低質量WIMPsや太陽アクシオンの探索も行った。



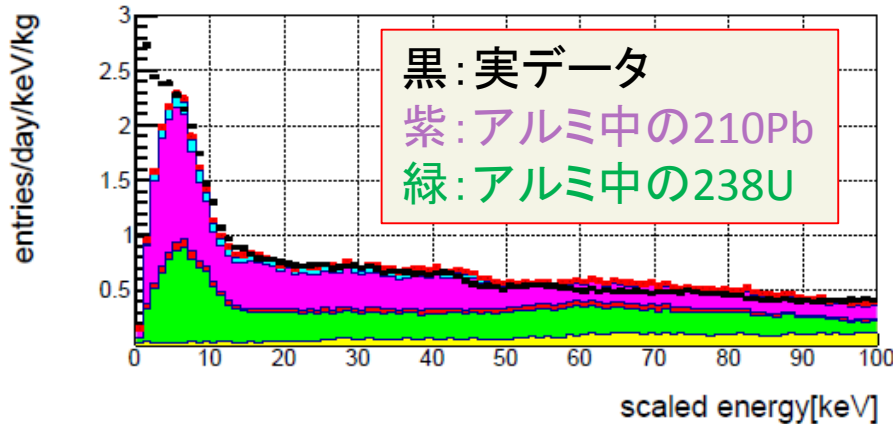
多方面の探索が活発に進んだ

- 季節変動の探索
- ^{129}Xe inelastic散乱の探索
- Super-WIMPsの探索

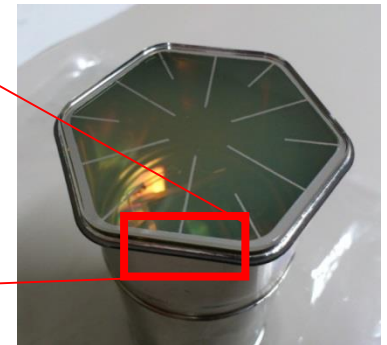


XMASS-I-RFB

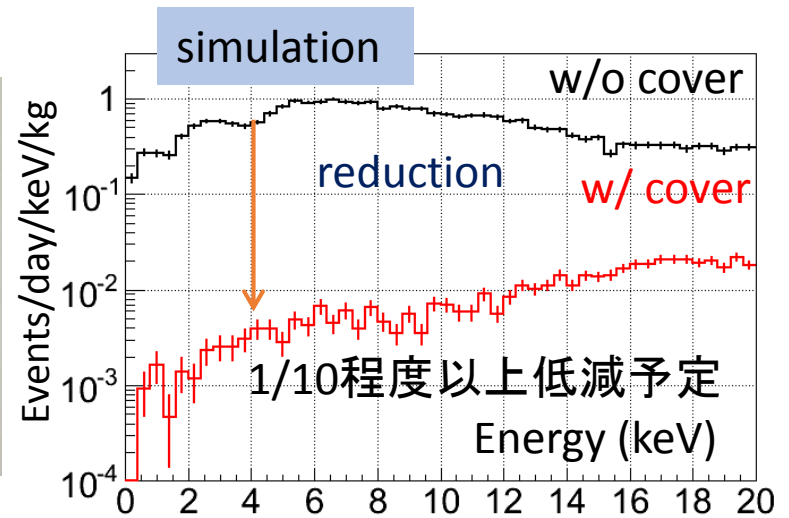
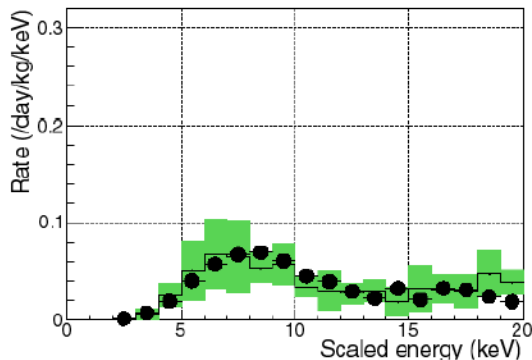
- ほとんどのBGはPMTのアルミシールからの低エネルギー β
- BGの理解の確認と次XMASS1.5へ向けたスタディ。
- 1年程度のデータで季節変動(0.8ton y!)と多種解析の継続



Aluminum

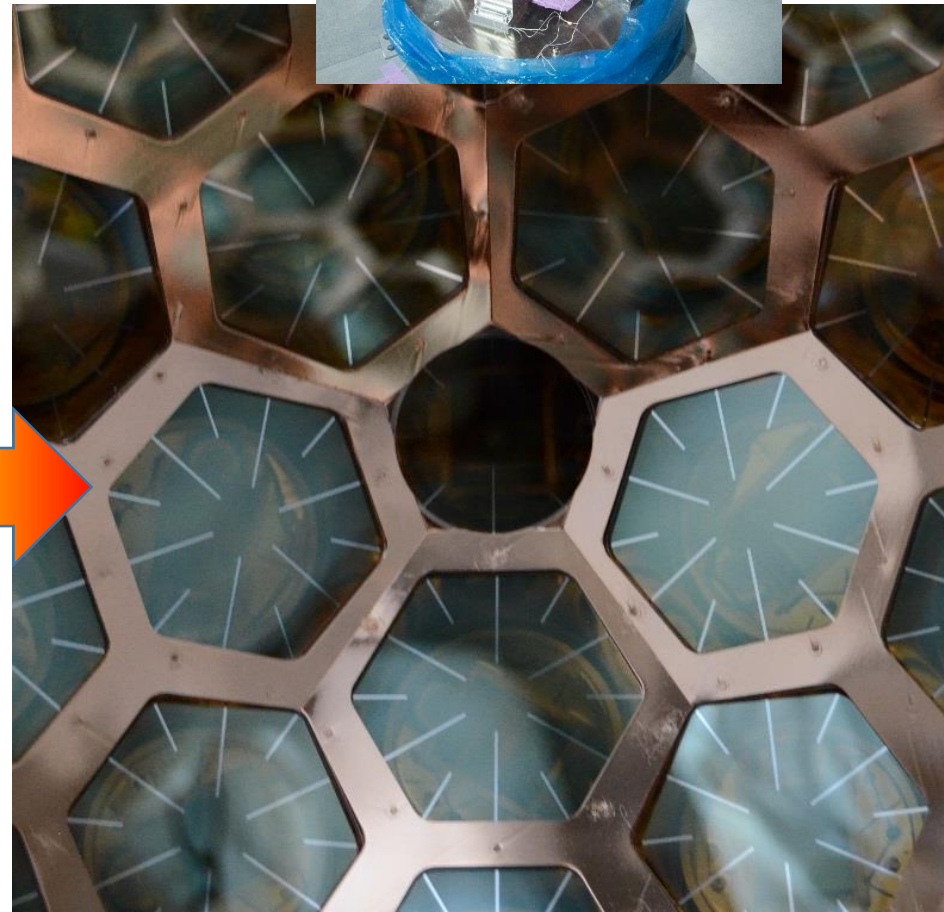
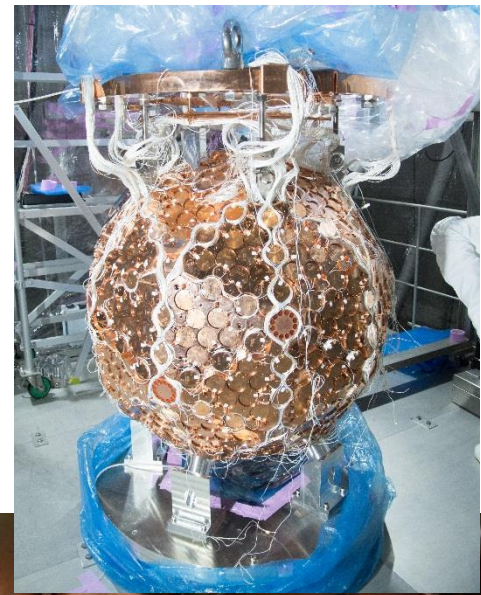


➢ R(PE)<20cm+R(T)<38cm カット後
(カット効率: 9%@5-6keV)



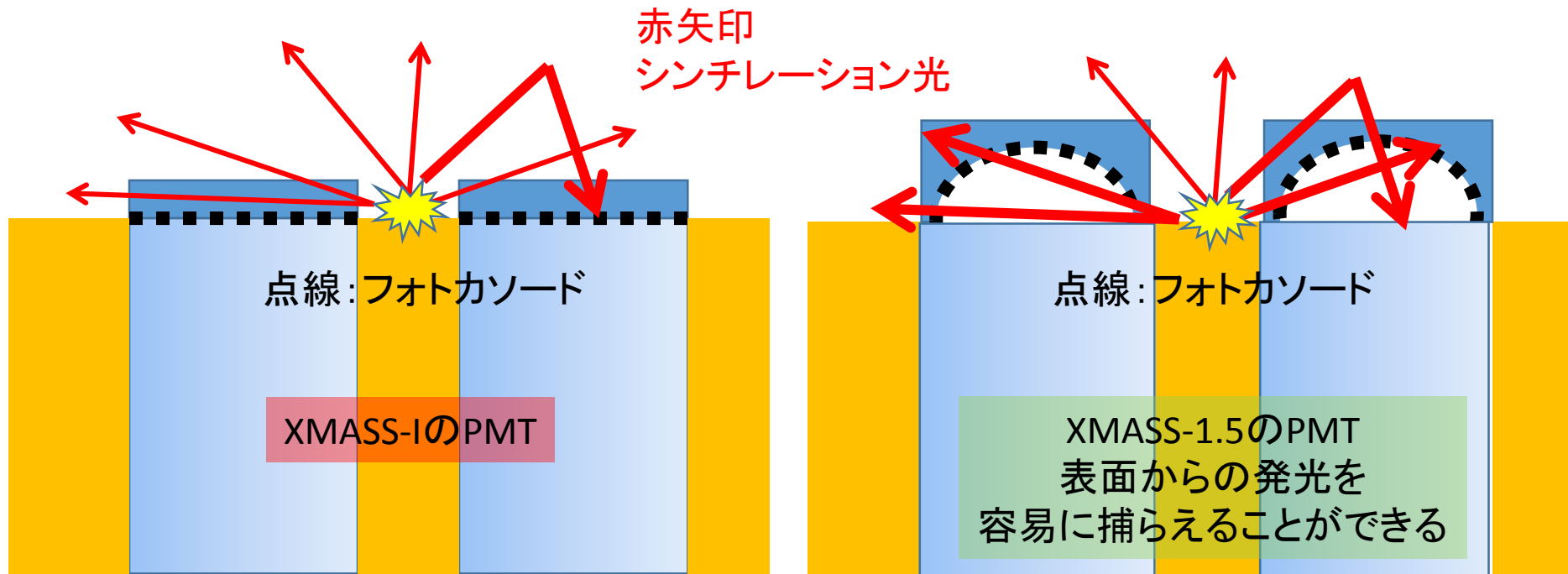
Refurbishmentの現状

- ほぼ完了。11月から
データ取得再開予定
BGの理解の確認＋物理



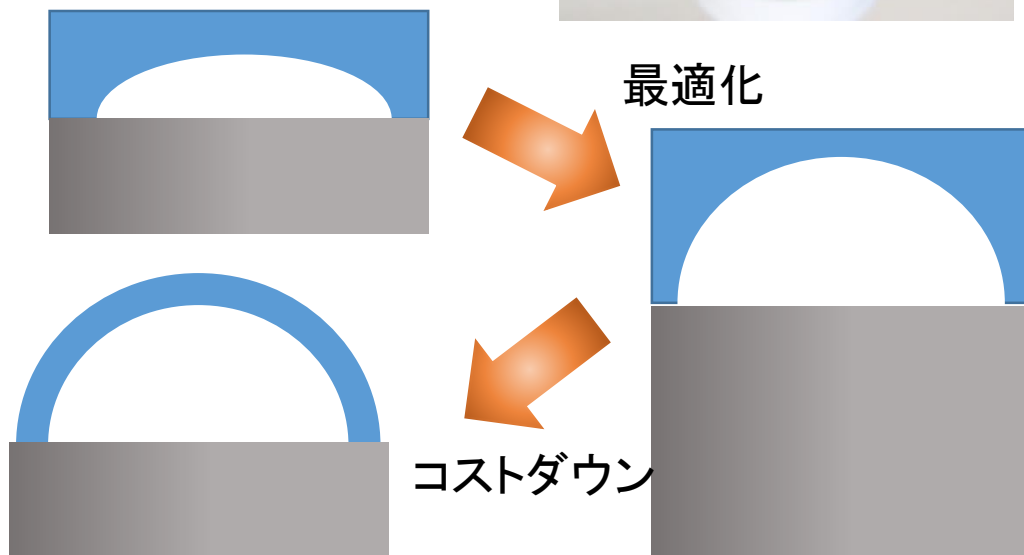
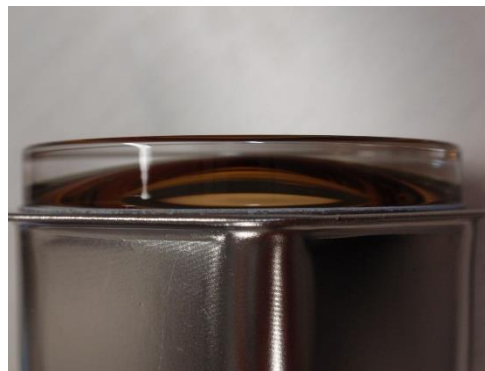
XMASS-1.5

- 液体キセノン5トン (有効質量1トン)
- バックグラウンドの低減が要
 - 汚いアルミ、不安なGORETEXは使わない
 - ただし表面バックグラウンドは0にはできない。隙間もある。
 - 凸型のPMTを使って、強かに表面バックグラウンドの低減を図る



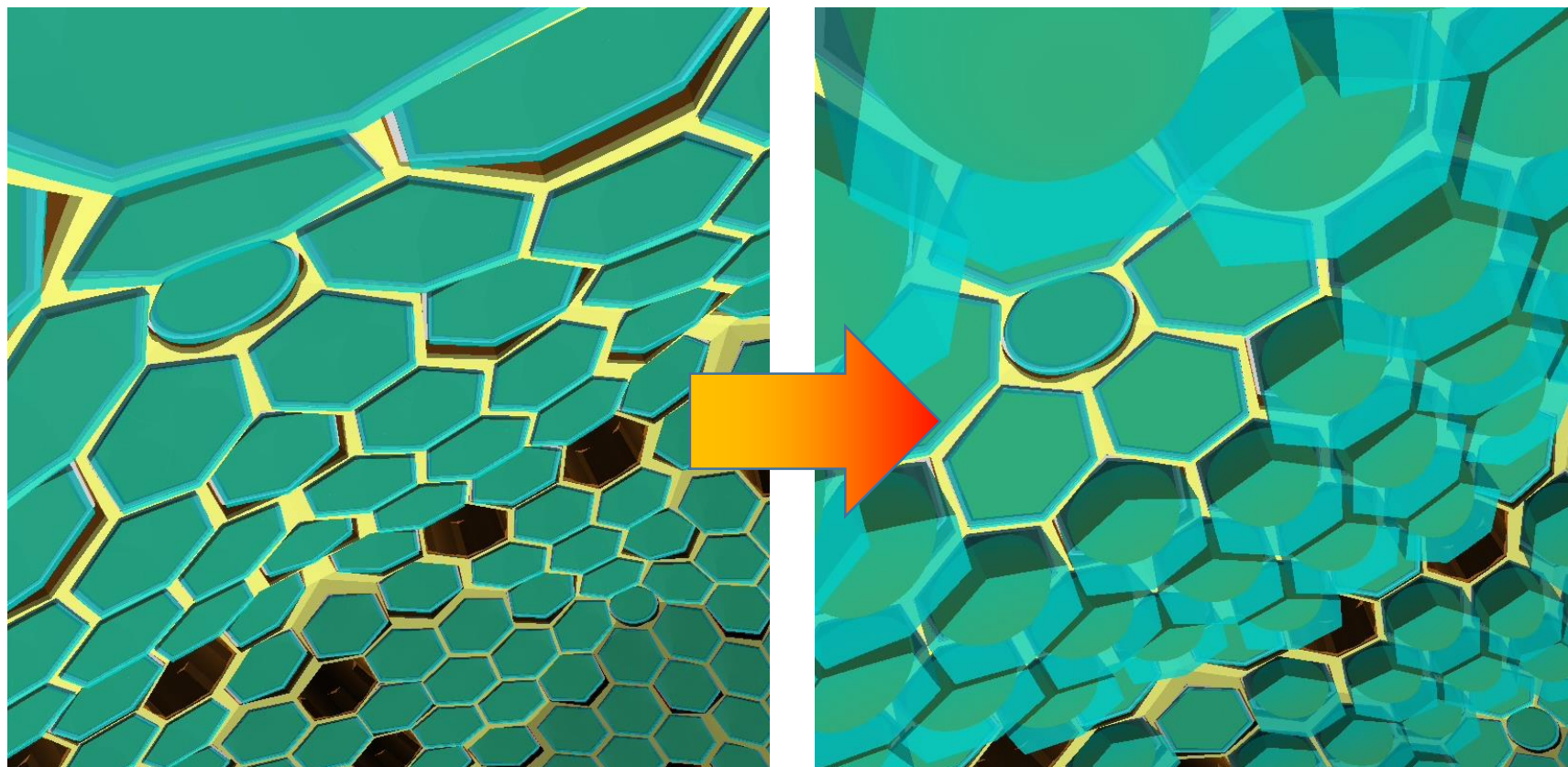
凸型光電子増倍管の製作状況

- プラノコーン型PMTは量産可能。
- 表面事象を効率よく捉えるための最適化、タイミング情報のための形状設計、コストダウンを行っている。
- 併せて光電子増倍管の放射性不純物をさらに低減する努力。



シミュレーションの構築

- プロトタイプ用のシミュレーションを改造し構築中
- 寒天のように見える部分が石英窓（実は石英とLXeの屈折率近い）
- 饅頭に見えるのがフォトカソード

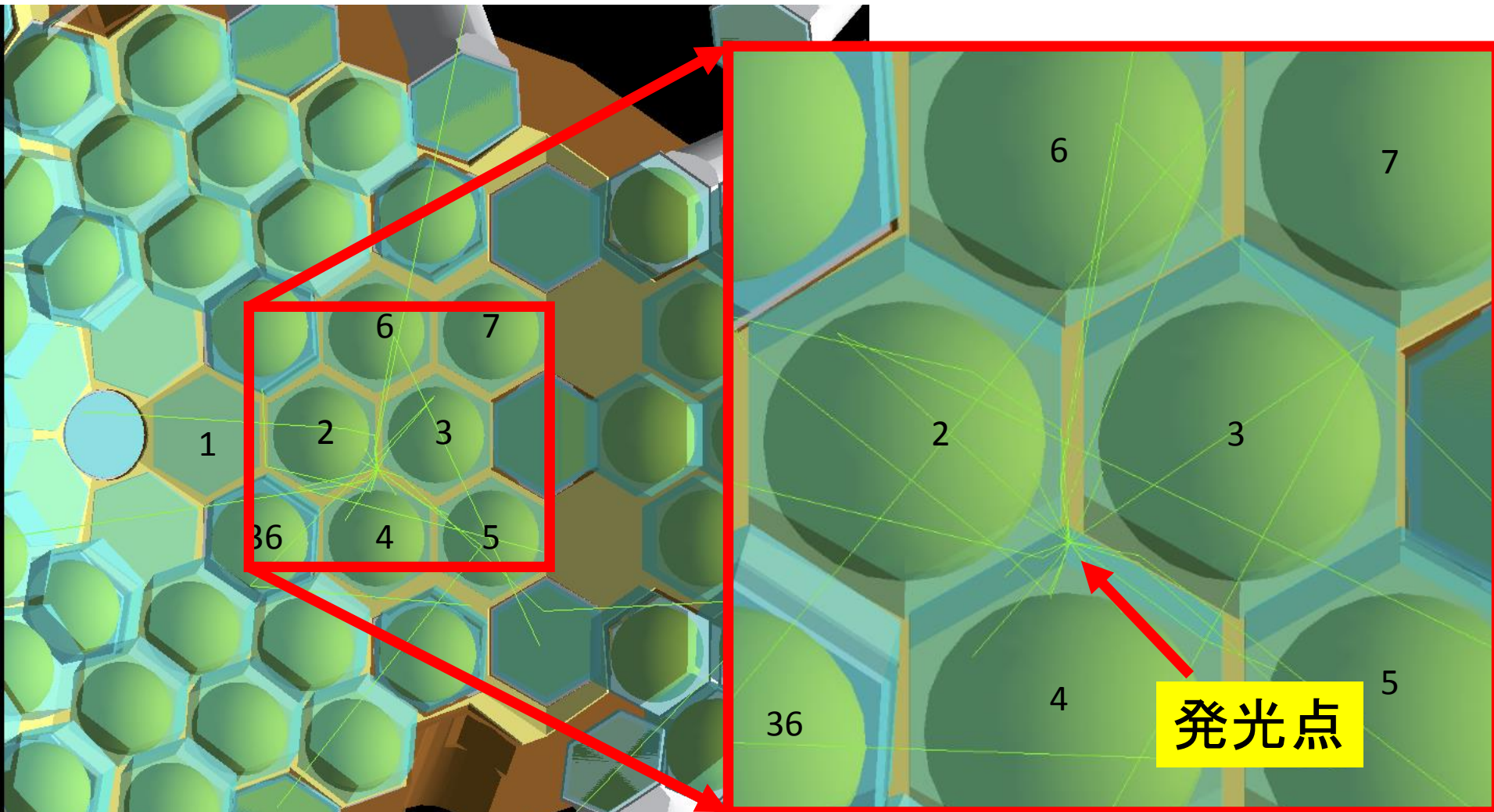


プロトタイプ検出器の構造（一部非表示）

一部を新規玉（仮形状）に交換

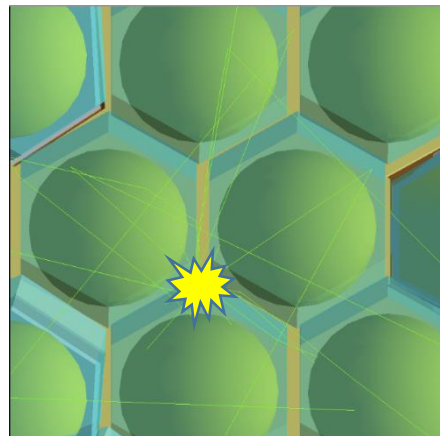
シミュレーションによる性能の確認

- フォトトラッキングによる「壁際事象」の振る舞い。
- 近傍の玉に光がよく入射できていることがわかる。

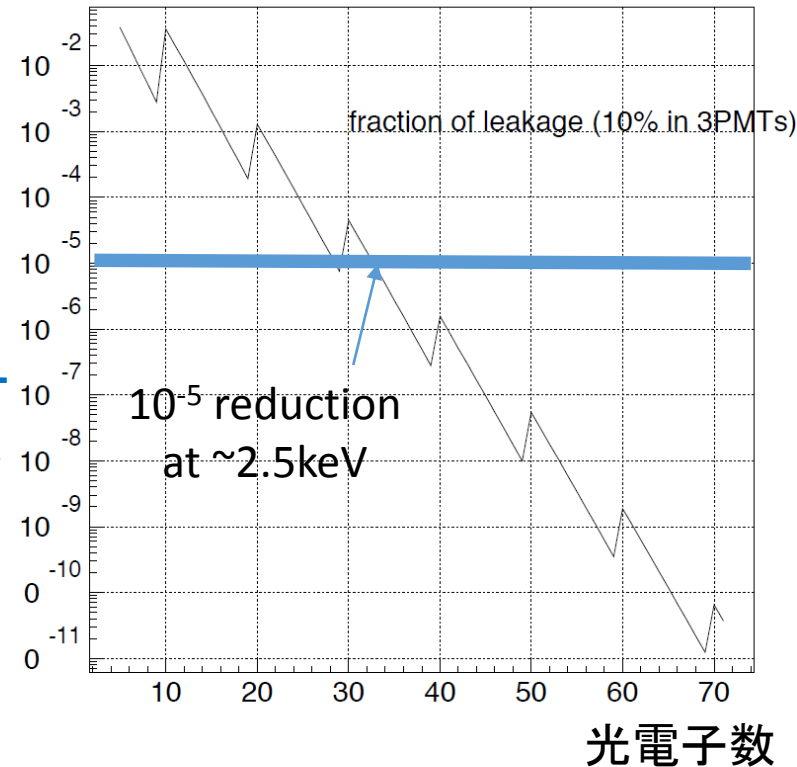


壁際事象同定能力の評価

- 表面の1点で発光させ、シミュレーションで性能を評価する。
- 周辺の3本が発光の48%を観測



壁際事象カットの例：
近接した3本が全光電子数の10%以上だとカット
→ 2.5keVの排除率 10^{-5}



- XMASS1.5目標値 $10^{-2}/\text{ton}/\text{d}/\text{keV}$

仮に表面BGがプロトタイプ検出器のものと同程度でも、目標を達成できる能力を示唆。

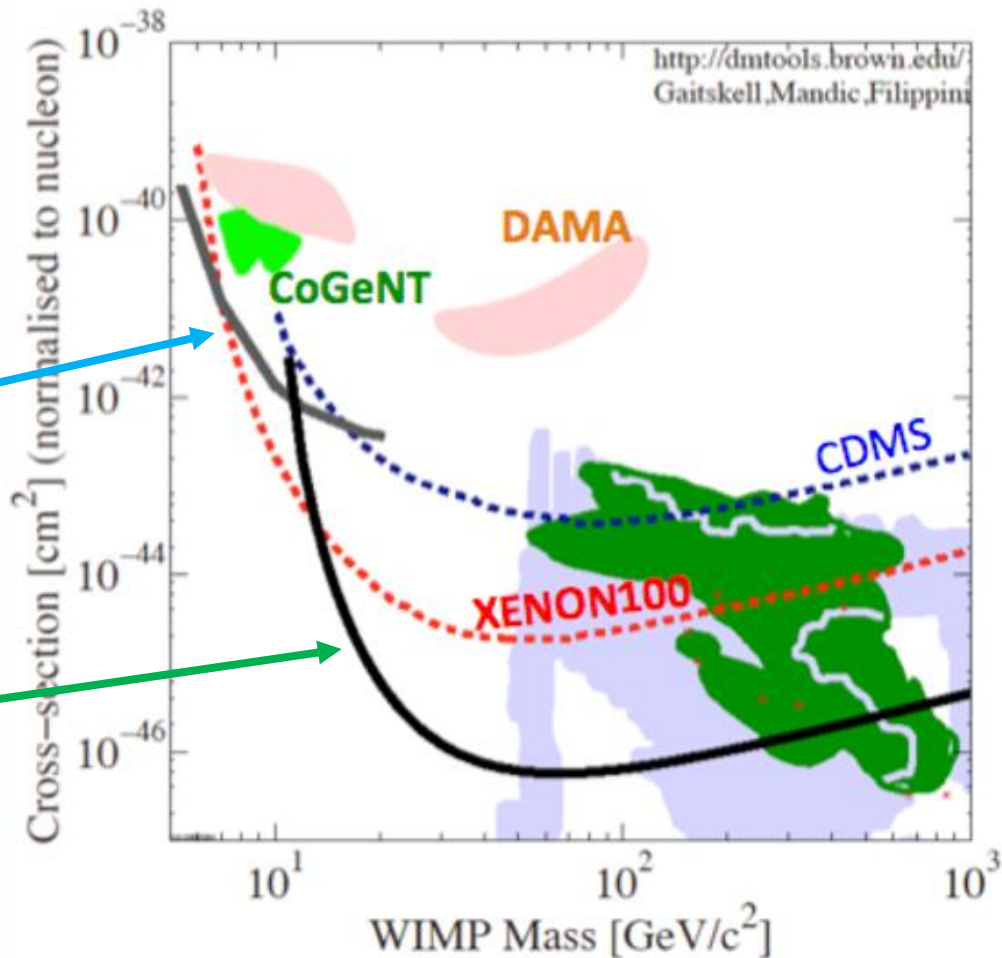
P=48%の2項分布を用いて
評価した排除率

凸型PMTの壁際事象排除への有効性が示された

期待される感度

XMASS 1.5の到達感度

- 話題になっている低質量DMに対しては、全ボリュウムデータを用いて探索。
 - $\sigma_{SI} \sim \text{a few} \times 10^{-42} \text{cm}^2$
- 重い質量を持つDMは、有効体積カットを用いる手法で探索。
 - $\sigma_{SI} < 10^{-46} \text{cm}^2 (> 5 \text{keV})$
- 他の核種探索については現在より2桁のバックグラウンド低減が見込まれる
- 2015年には開始したい
- XMASSIIへの移行



まとめ

- 暗黒物質の直接探索は近年極めて高いアクティビティを持つ分野になってきている。
- 多様な暗黒物質を探索する意義が高まっている。
- スケーラービリティのある希ガス液体がトップを走り、半導体検出器がそれを追う。急激な感度向上。
- 国内でも大型検出器を含む様々な研究開発が進められており(次のトーク)、本分野への強い支持を期待したい。

SDへの制限 (XENON100)

