

大型実験装置による暗黒物質直接探索

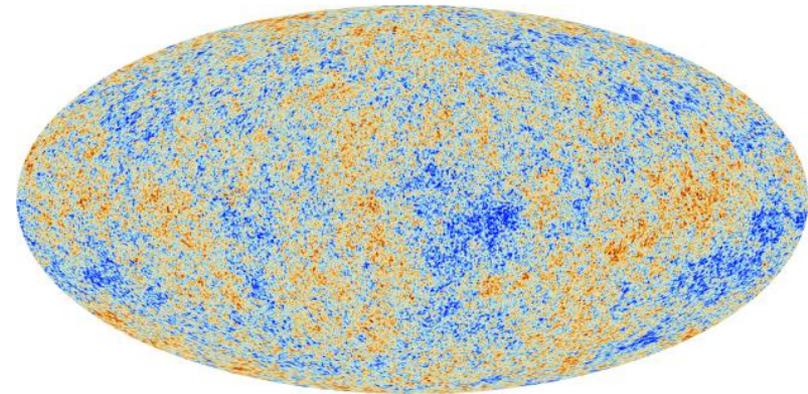
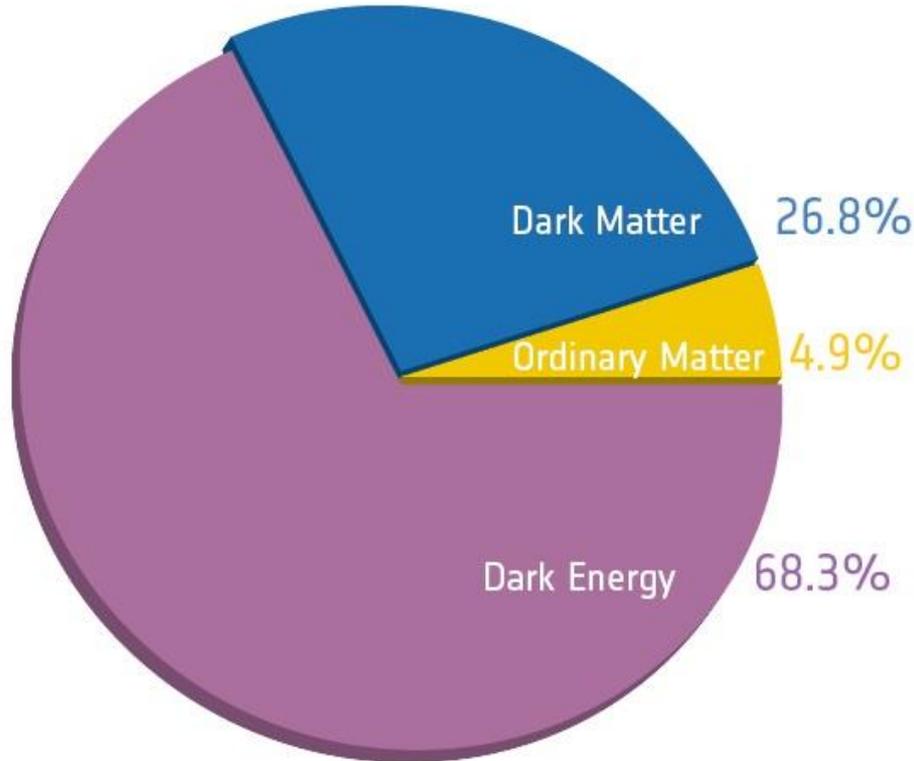
岸本 康宏

於 新学術「地下素核研究」第一回研究会

2014年8月23日

暗黒物質

* この宇宙のあらゆるスケールで、通常の物質とは異なる、未知の重力源が存在する証拠がある。



宇宙の歴史の中では、銀河の形成に重要な役割を果たしたと考えられる

天の川銀河の精密測量が明かす ダークマターの存在量

精密測量で得られた天の川銀河の基本尺度

天の川銀河の中心から
太陽系までの距離

26100光年

天の川銀河の中心

太陽系

太陽系の銀河回転の速度

240 km/s

天の川銀河の質量、
特にダークマターの質量は、
従来の推定より

20%増加

われわれの銀河にも暗黒物質
 $\rho \sim 0.39 \text{ GeV/cm}^3$

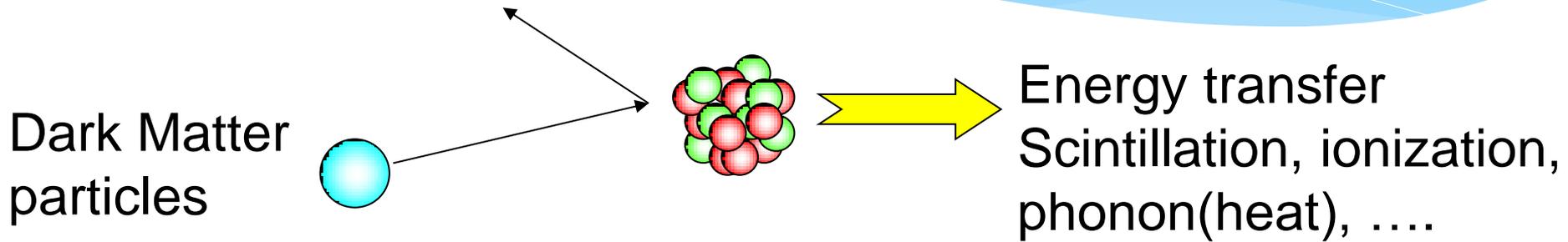
※この画像は想像図です。© NAOJ

素粒子暗黒物質



- * 暗黒物質の候補は色々考えられるが、恐らく、未知の素粒子
- * 超対称性理論などでは、Weakly Interacting Massive Particle (WIPMs)と呼ばれる、質量1~1000GeVオーダーの安定で中性な素粒子の存在を予言 ⇒ この講演
- * アクシオンも有力な候補 ⇒ 小川さんの講演

WIMPsの直接探索

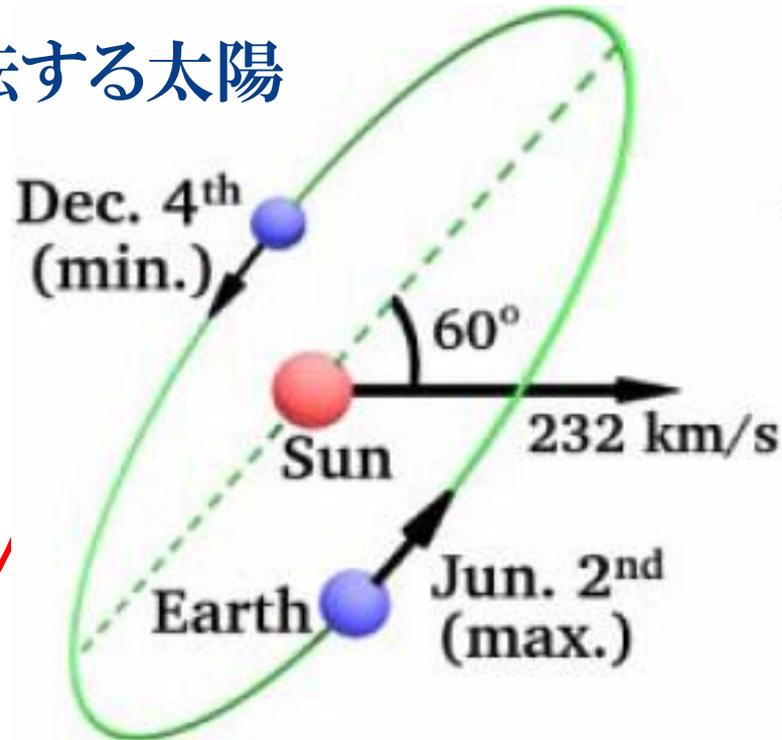
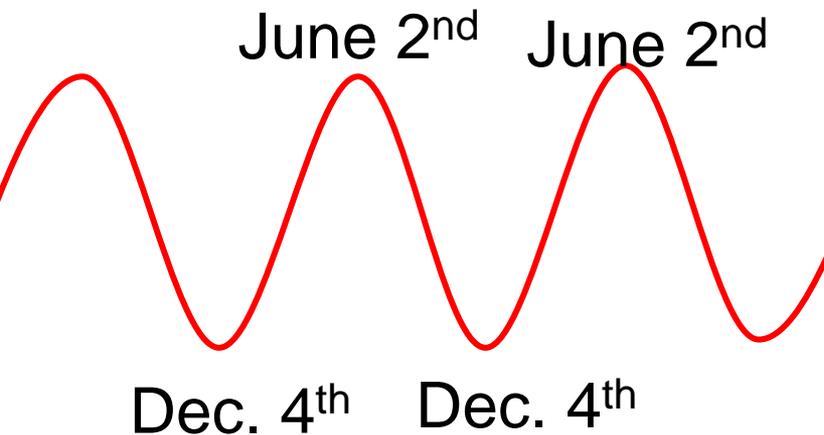


- * 非常に稀で、非常に僅かなエネルギー移行を検出する
 - * 暗黒物質探索で使われる、独自の単位“DRU”: $\text{keV}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{day}^{-1}$
 - * 事象のエネルギーは1~10keV程度
 - * $E \sim \frac{1}{2} m_{DM} \beta^2 \sim 0.5 \times 20\text{GeV} \times (10^{-3})^2 \sim 10\text{keV}$
- * ⇒ 大型の極低バックグラウンド、低閾値の検出器が要請

WIMPs信号の特徴

* 事象数の季節変動

- * 等方に運動するWIMPs
- * 天の川銀河の中で回転する太陽
- * 太陽を周回する地球



関連する, WIMPs信号の方向依存性は身内さんの講演

WIMPs直接探索の現状

* Crossing swords

LUX

“disagreement with WIMPs interpretation”

XENON100

SuperCDMS(Ge)

“disfavour a WIPM-nucleon scattering”

Upgraded CRESST-II

“clearly excludes the lower mass max”

DAMA/LIBRA

“No systematic or side reaction able to mimic the exploited DM signature”

CoGENT

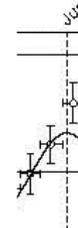
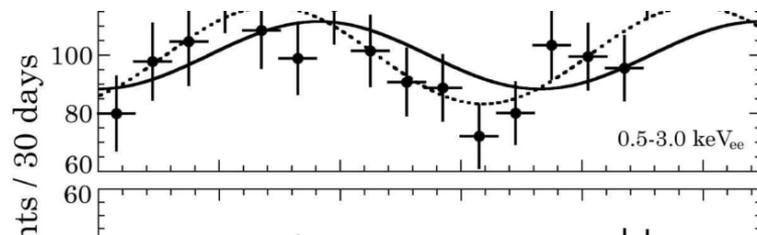
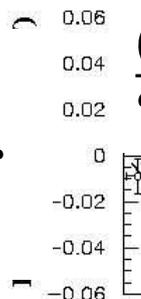
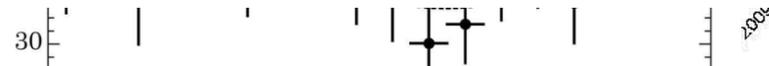
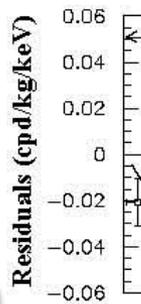
“Indication of annual modulation by “unknown origin”

CDMS-Si

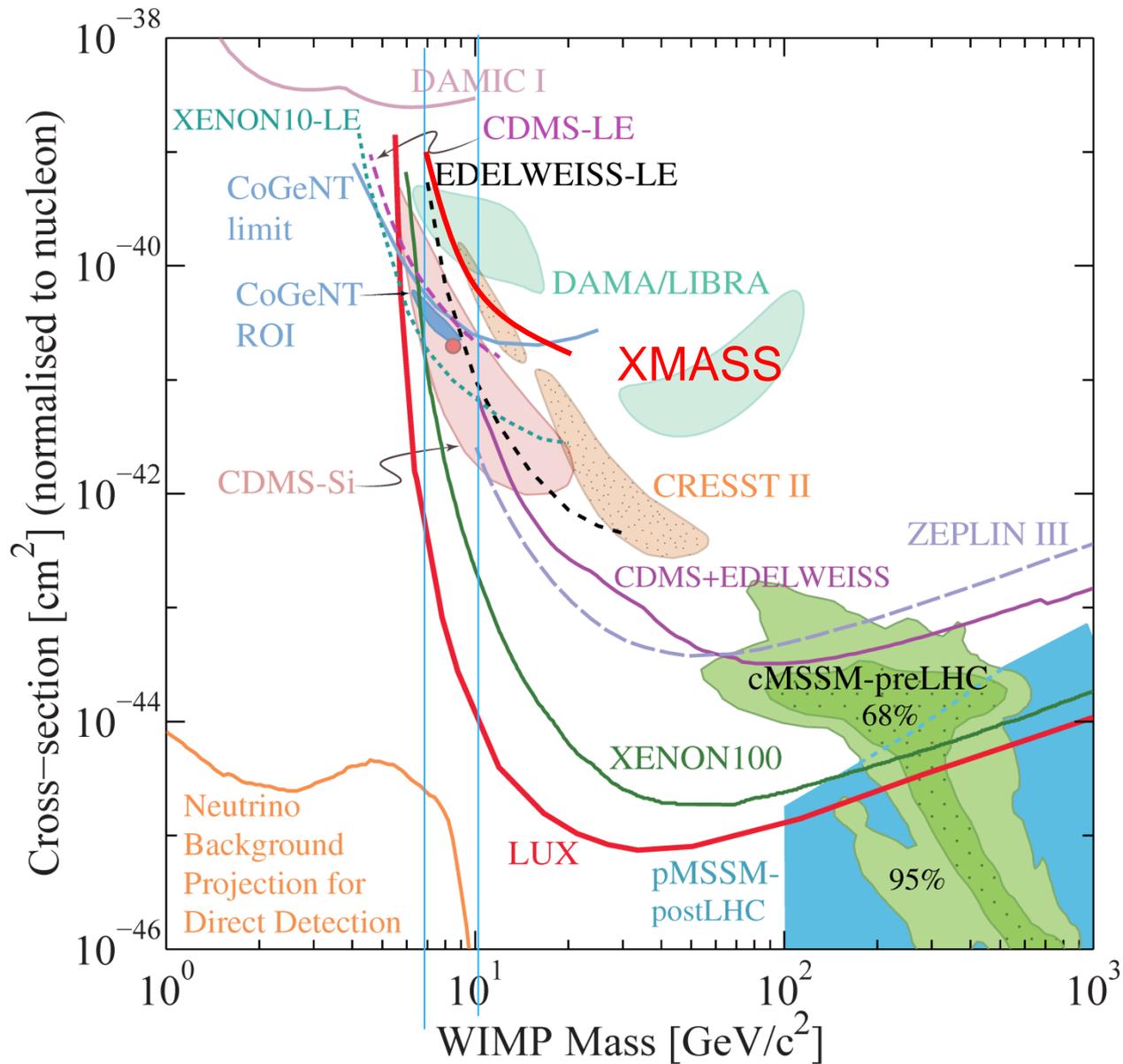
“disfavour WIPMs + BG hypothesis”

CRESST-II

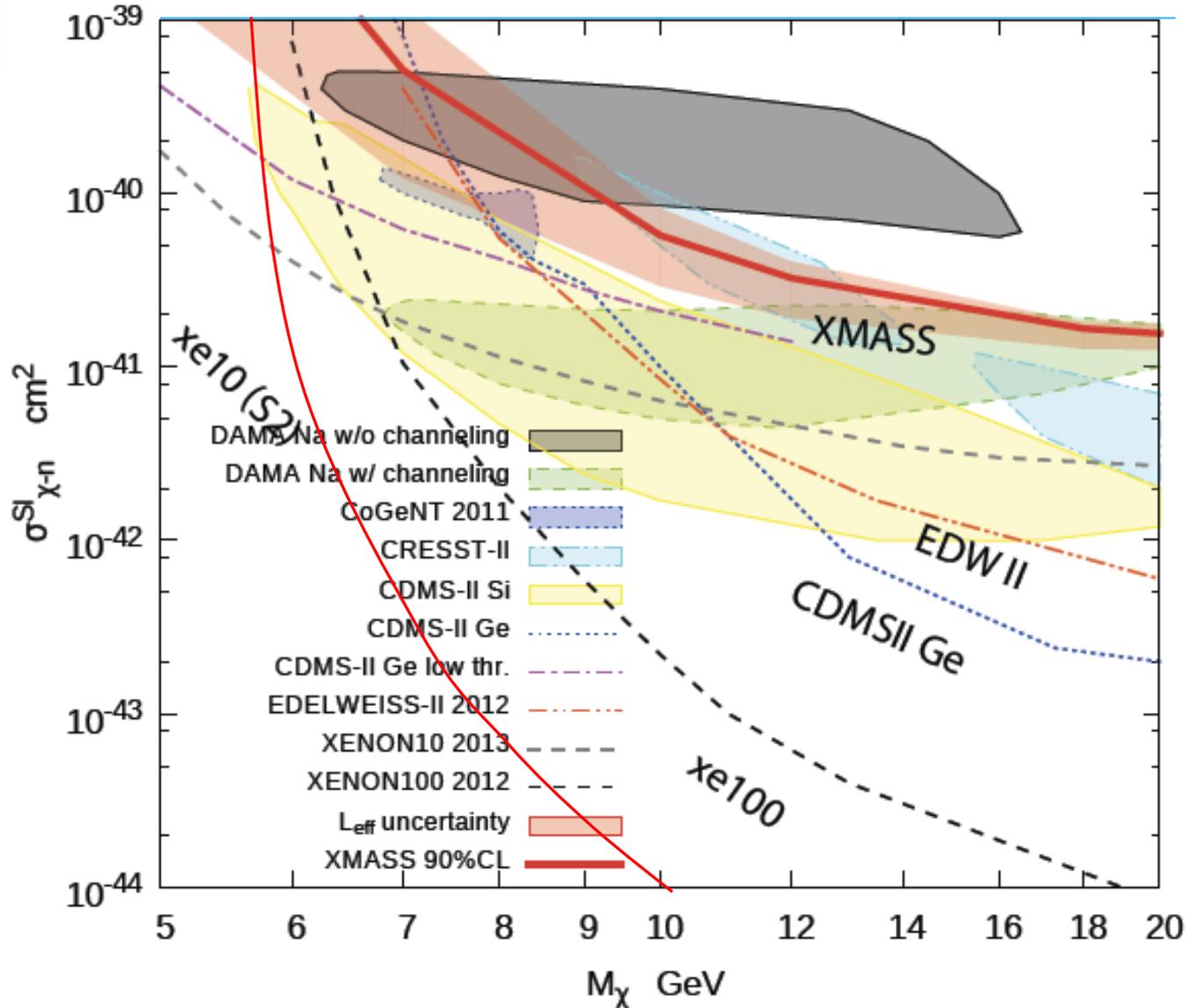
“WIMPs could account for this discrepancy”



散乱斷面積 (核子) VS WIMPs質量



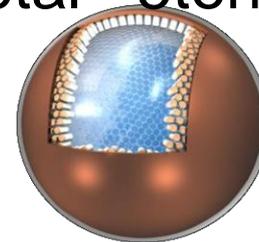
騒がしい領域を拡大



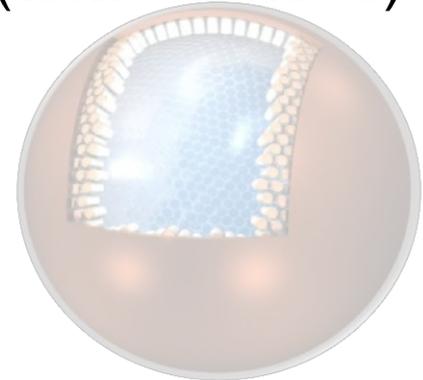
大型暗黒物質探索装置 XMASS

- * 液体キセノンを使った多目的大型実験装置
 - * 暗黒物質, 二重ベータ崩壊, pp -太陽ニュートリノ
 - * 現在のPhase-1では, 暗黒物質の探索に注力
- * 特徴
 - * 大発光量を利用した, 低エネルギー閾値
 - * 大質量を有し, 更に拡張可能なシンプルな構造
 - * 原子核散乱事象だけでなく, e/γ 事象にも感度

XMASS-1 XMASS-1.5
(total ~1ton)(total ~5tons)



XMASS-2
(total ~24tons)



XMASS実験装置の歴史



* 2010年9月以前

- * ネジ1本に至るまで部品全てのU/Th/Kを測定
- * 極低バックグラウンドPMT ⇒ 従来のPMTから一桁の低BGを実現
- * Xe純化用精留塔を完成 ⇒ Xe中のKr除去に成功
(0.1ppm → 1ppt)

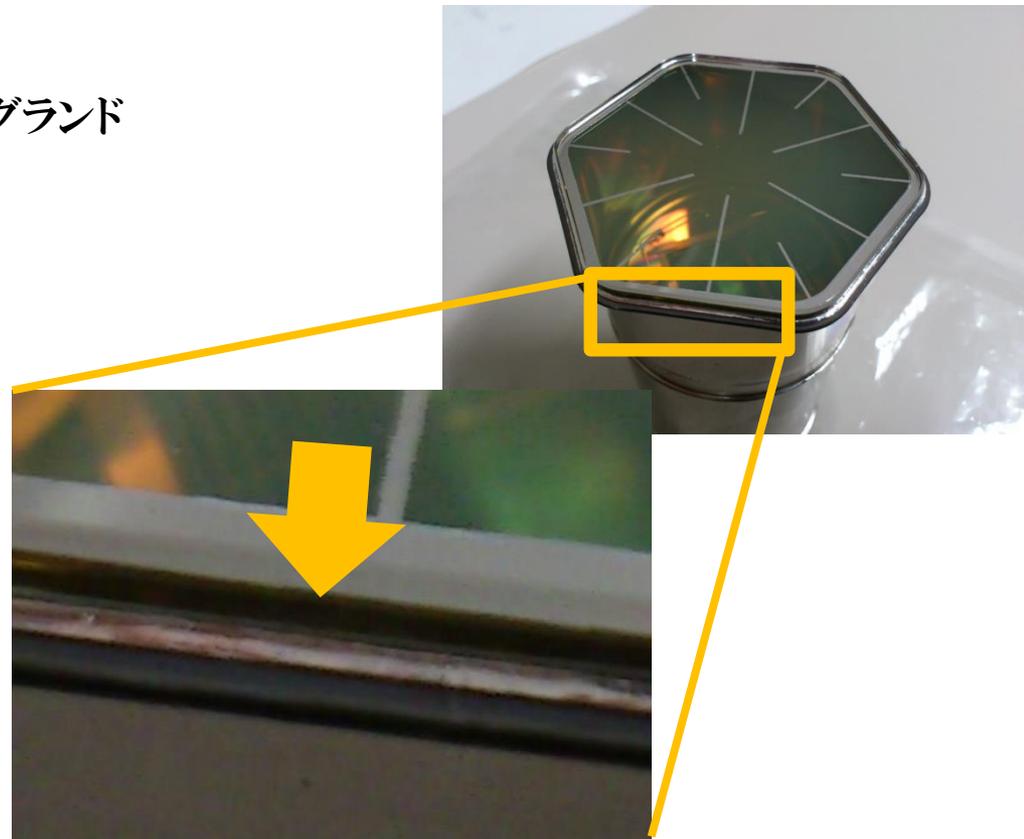
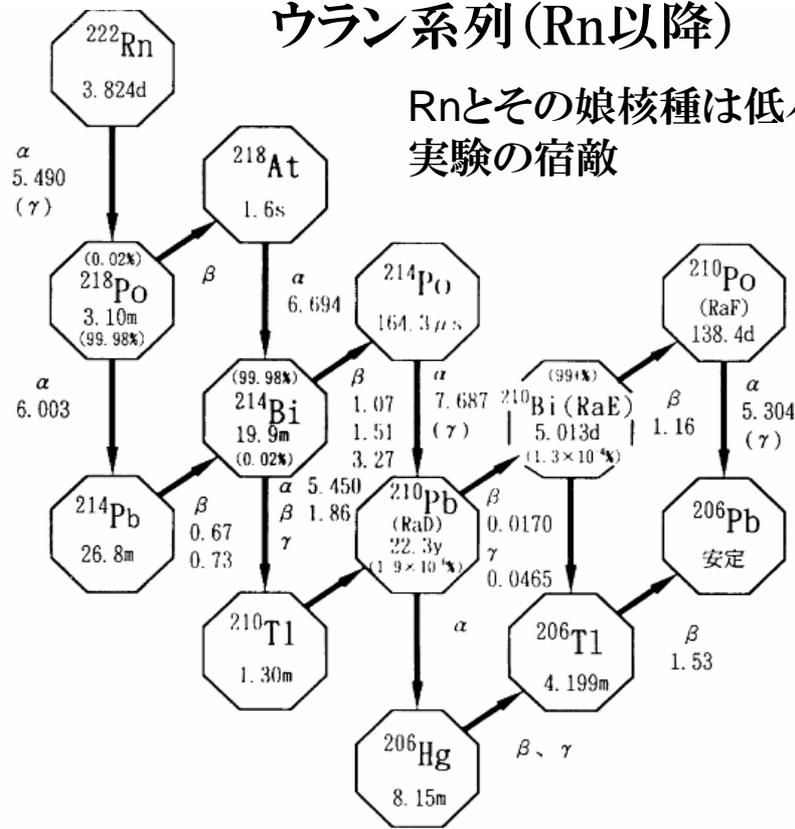
* 2010年9月に検出器完成

- * 外水槽が超純水チェレンコフ装置 ⇒ 現在のDM探索装置のスタンダードへ
- * OFHCによるPMT支持 ⇐ 銅を電解製錬から特注

- * 2011年初にCommissioning Runを開始 (2012年6月まで)
 - * Normal runに加え, Low Pressure run, High Pressure run, Gas run, O₂ run 等 (2012年6月まで)
 - * 検出器Responseについてのより深い理解と, 高BGの原因の特定に成功
 - * 幾つかの成果 (後述)
- * 2012年夏より, XMASS-1の改修(Refurbishment)へ

ウラン系列 (Rn以降)

Rnとその娘核種は低バックグラウンド実験の宿敵



XMASS Commissioning Runの成果

- * Search for light WIPMs (Phys. Lett. B 719 78 (2013))
- * Search for Solar Axion (Phys. Lett. B 724 46 (2013))
- * Search for ^{129}Xe inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- * Search for bosonic super-WIMPs

(Accepted by PRL on Aug. 20th, arxiv:1406.0502v2)

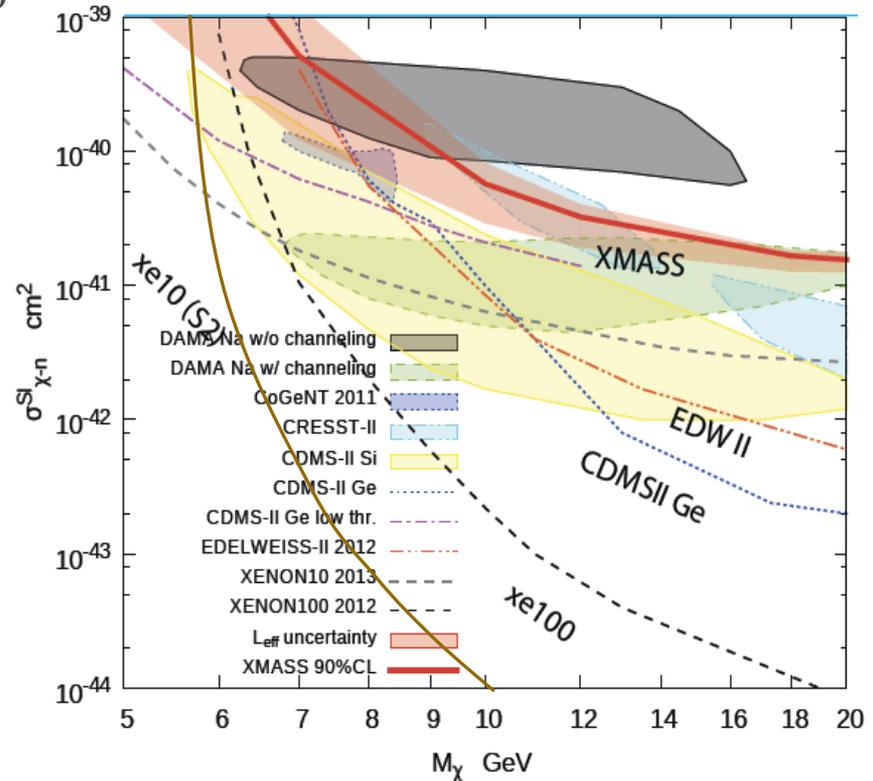
- * WIMPs を6.7日間の低閾値データで解析

6.7day × 835 kg

$E_{\text{th}} = 0.3\text{keV}_{\text{ee}}$

- * Eventを全てBGだと仮定した, Robustな解析

XMASSの低閾値と統計の優位性

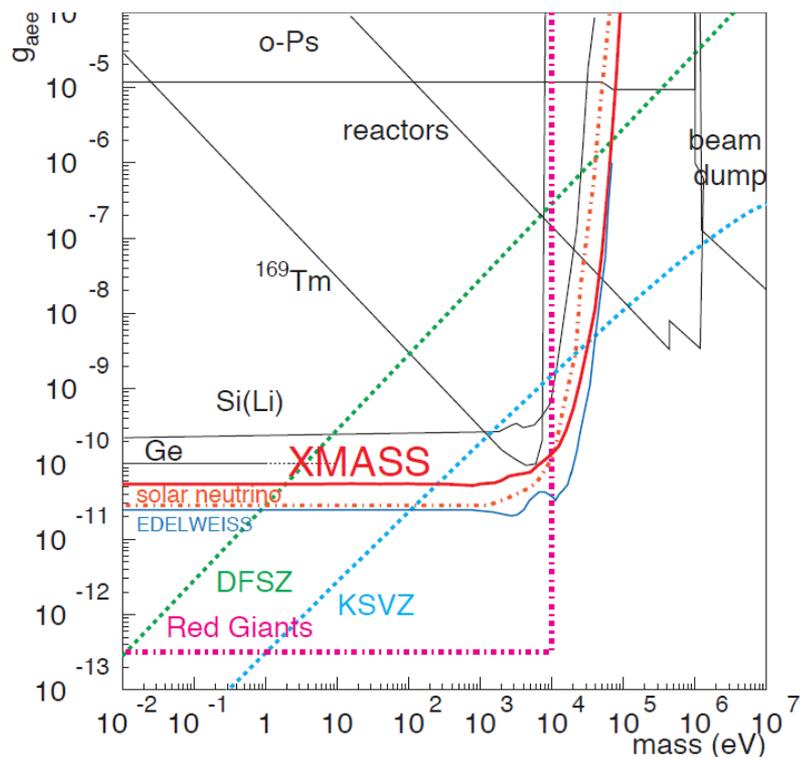


XMASS Commissioning Runの成果

- * Search for light WIPMs (Phys. Lett. B 719 78 (2013))
- * Search for Solar Axion (Phys. Lett. B 724 46 (2013))
- * Search for ^{129}Xe inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- * Search for bosonic super-WIMPs
(Accepted by PRL on Aug. 20th, arxiv:1406.0502v3)

* Solar Axionの解析

- * Axio-electric effect $\leftarrow e/\gamma$ 事象

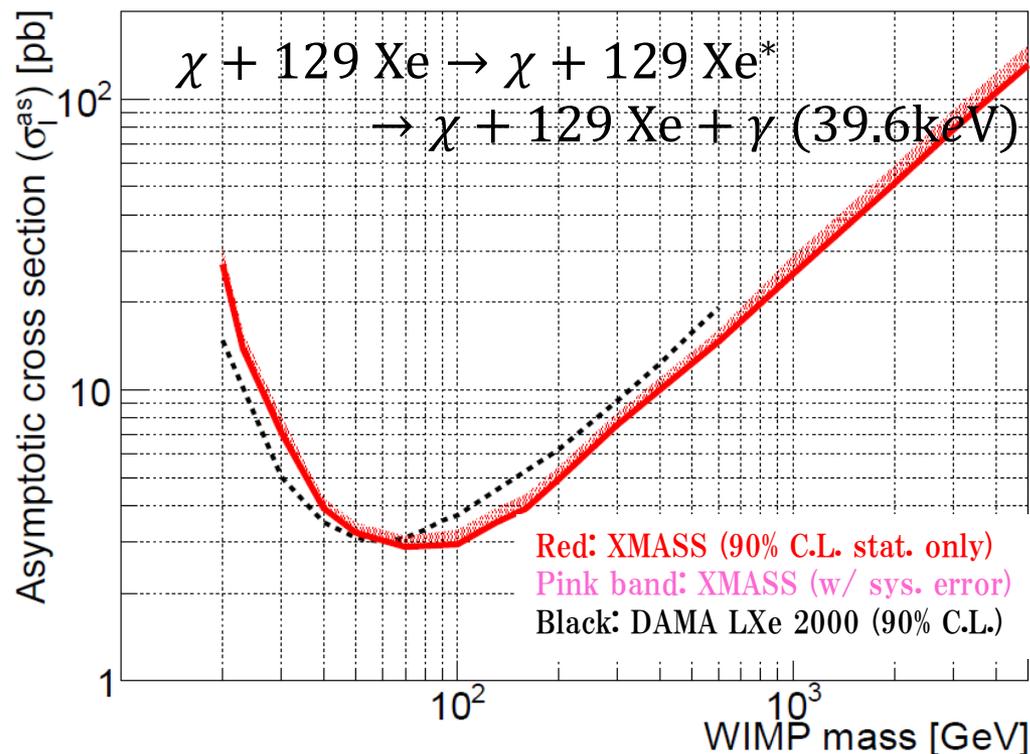


XMASS Commissioning Runの成果

- * Search for light WIPMs (Phys. Lett. B 719 78 (2013))
- * Search for Solar Axion (Phys. Lett. B 724 46 (2013))
- * Search for ^{129}Xe inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- * Search for bosonic super-WIMPs

(Accepted by PRL on Aug. 20th, arxiv:1406.0502v3)

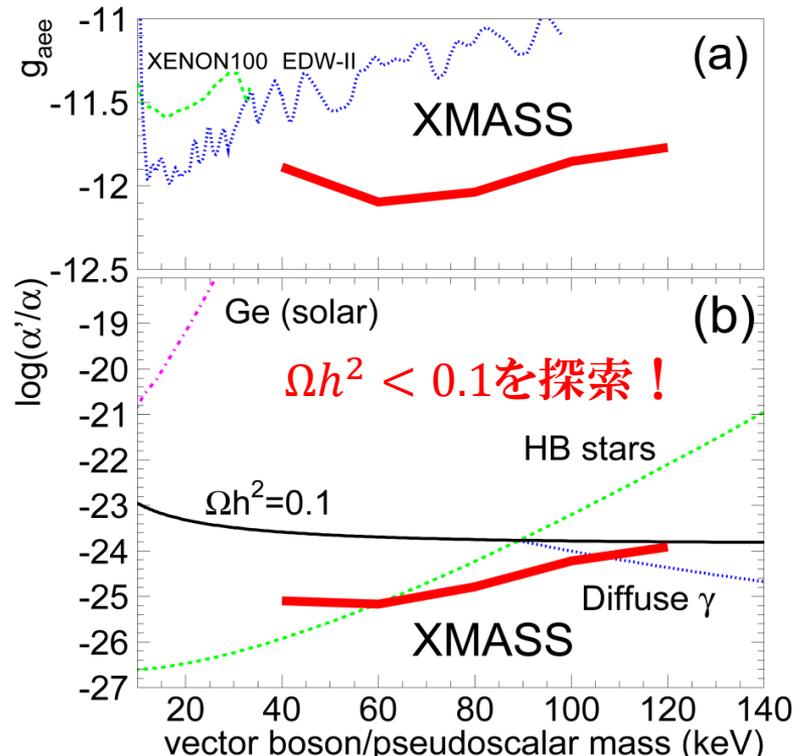
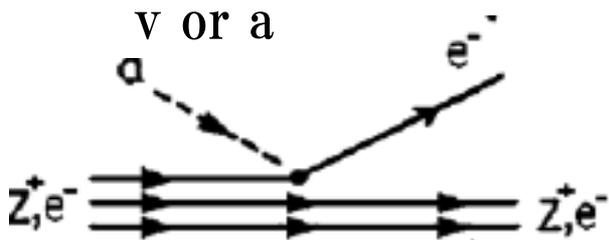
- * ^{129}Xe の励起エネルギーが小さいことを利用 ←やはり e/ γ 事象



XMASS Commissioning Runの成果

- * Search for light WIPMs (Phys. Lett. B 719 78 (2013))
- * Search for Solar Axion (Phys. Lett. B 724 46 (2013))
- * Search for ^{129}Xe inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- * Search for bosonic super-WIMPs
(Accepted by PRL on Aug. 20th, arxiv:1406.0502v3)

- * Warm DMの候補の1つ
- * 粒子に吸収され, 光電効果と同様な反応 $\leftarrow e/\gamma$ 反応
- * Single peakを作るので, それを目印に探す



Commissioning runの成果の特徴

- * 低エネルギー閾値
- * 大体積を用いた探索
 - * 6.7日データでDAMA領域の一部を排除
- * 原子核反跳事象だけでなく、 e/γ 事象も探索の対象
 - * LHCでSUSYの証拠が見つからない今、Warm DM等の可能性を含めた探索
 - * LUXの様な原子核反跳事象に絞った研究と相補的な探索が可能
- * XMASSは、標準的なWIPMsだけでなく、様々な未知の物理学をターゲットに、高い統計精度で探索を行うことが出来る！



XMASS実験装置と極低バックグラウンド

(主に2012年からのRefurbishmentについて)

* 2012年6月からXMASSの改修工事へ

* 対処項目

* PMTのアルミシール部分への対応

- * PMT自身を取り換えることは、時間的にも予算的にも不可能

* 「疑わしきは罰せよ」

- * テフロン製シートの撤去など

* 表面放射線源への対応

⇐ 通常はバルクのU/Th/Kがメイン, XMASSはそれを超えて, 表面が課題となっている

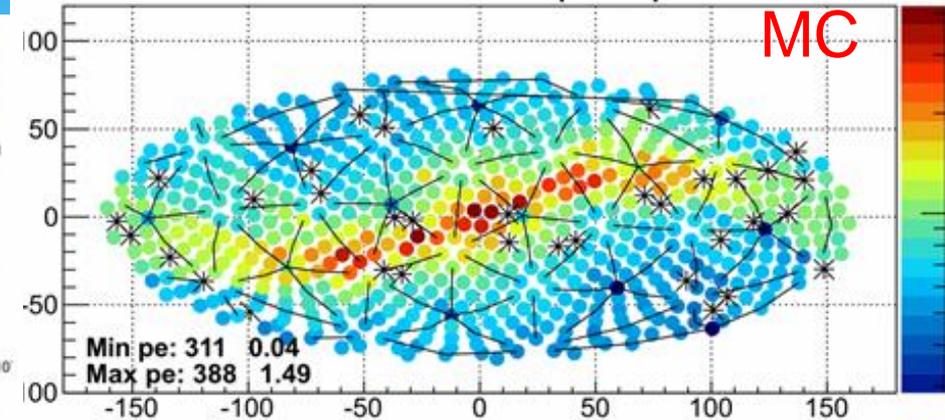
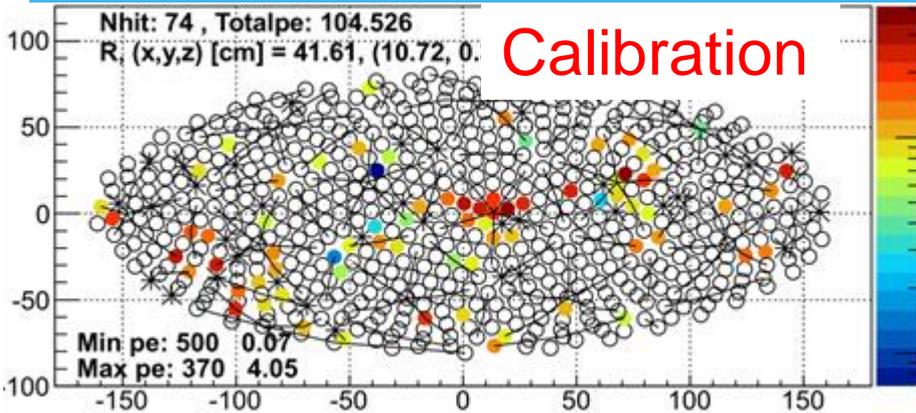
- * 洗浄法の開発, 保存法の開発, 再汚染を最小限にするための組立手順と環境

* Leakage Eventsへの対応

- * Monte-Carlo Simulation



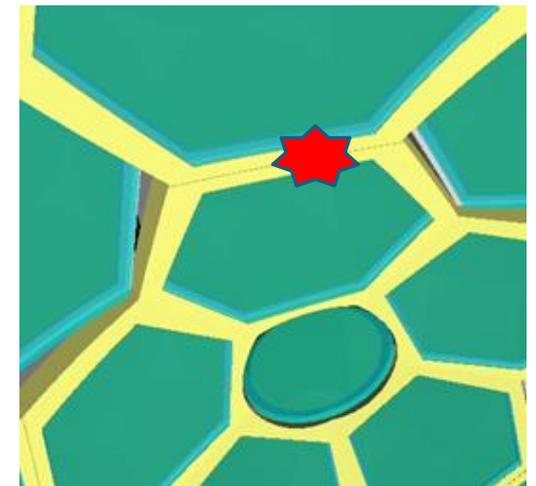
詳細シミュレーションによる表面事象削減



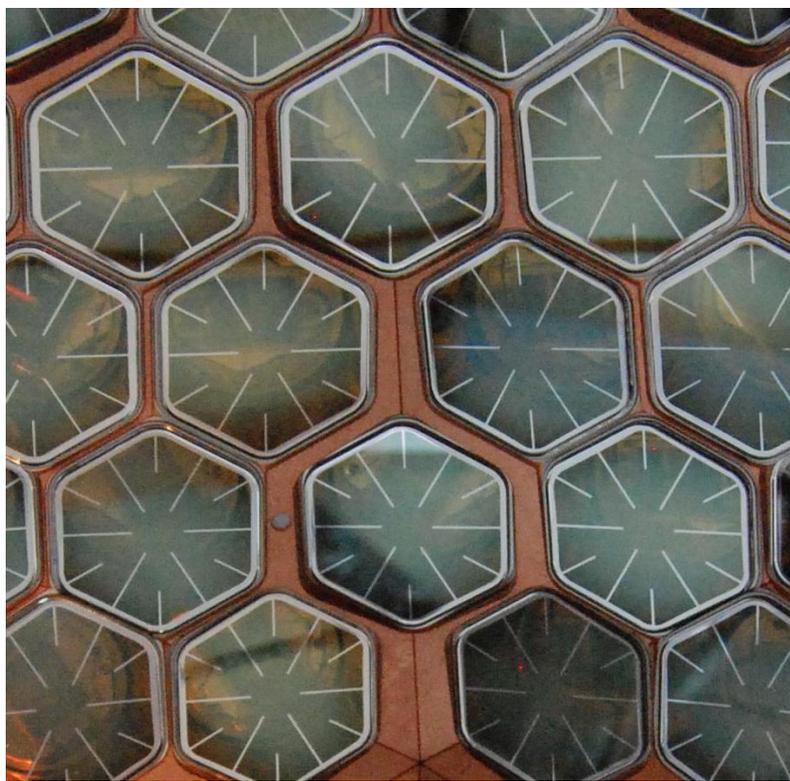
XMASSの外側から線源を当てた実データ
シミュレーションを用いた詳細解析によって、
PMTの間で生じた事象と推定
⇒ これは雑音として除去

六角形のPMTの間で生じた事象(MC)
PMT本体が影となって、一部の光が検出され
ないためこのような形状となる

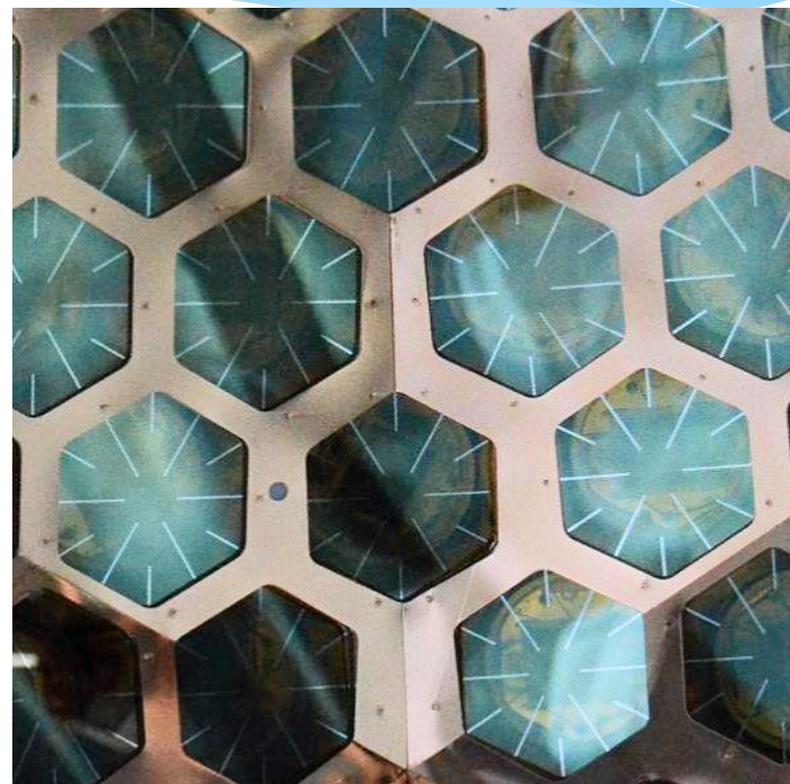
表面の形状を細かく再現したMCの結果から
表面のバックグラウンド事象を除去するため、
表面のミゾを徹底的に削減することとした



改造前



改造後



表面BGへの対応(例)

* 銅表面の電解研磨

- * ^{210}Pb , ^{210}Po 両方が電解研磨で削減できることを確認
 - * 先行研究として「NIMA 676 (2012)140-148, Zuzel and Wojcik」
 - * Rnを利用したReference Sampleの作成と α 線カウンタによる測定
- * \Rightarrow 実証された技術によって, XMASSの銅部品を洗浄

* 銅部品の保存

- * 空気中のRnを付着させないため, 帯電防止袋と高バリア樹脂内に窒素封入
- * 実はそれだけではダメ!
 - * (モノによっては) 帯電防止袋からRnがEmanateする
 - * 袋が帯電していると(物品も帯電して), そこにRn娘核種が埃と共に吸着する

* 帯電防止

- * 帯電しているとRn娘核の付着が増加することを確認
- * 帯電防止がなされていないと, クリーンスーツ, 手袋, ゴーグル等はRn対策の点で逆効果となる可能性も



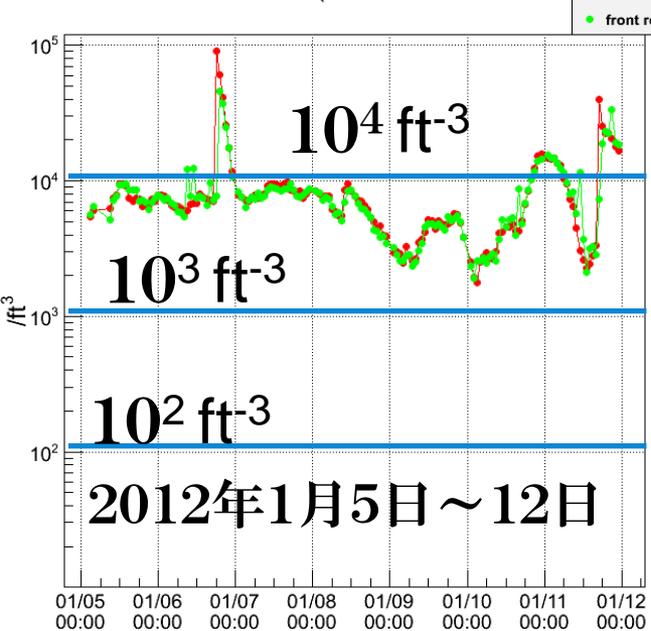
* XMASSを設置した神岡の地下実験室C全体をクリーン化

* パーティクルレベルとRn娘核種の吸着との間に相関があることを実証

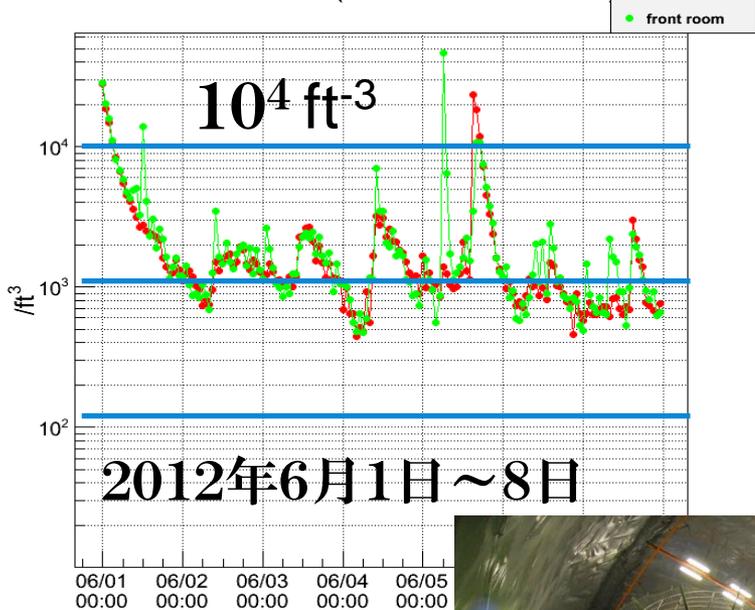
* これを受け、実験室C全体をクリーン室化

* タバコ厳禁、髭も剃る（頭丸坊主や、眉毛を剃るまでには、「今回は」至りませんでした）

Particle counter (2012/ 1/ 5-2012/ 1/ 11)



Particle counter (2012/ 6/ 1-2012/ 6/ 7)



- * 2重化されたクリーンルームでの組立作業

- * Class 10 の環境下で作業

- * Rn Freeな環境下での組立作業

- * Rn Free Air作成装置の, Rn除去能力と処理量を増強

- * Rn \sim 10mBq/m³のエアをXMASS外水槽内に導入

- * 残るは, 人の出入りの際の空気の出入り

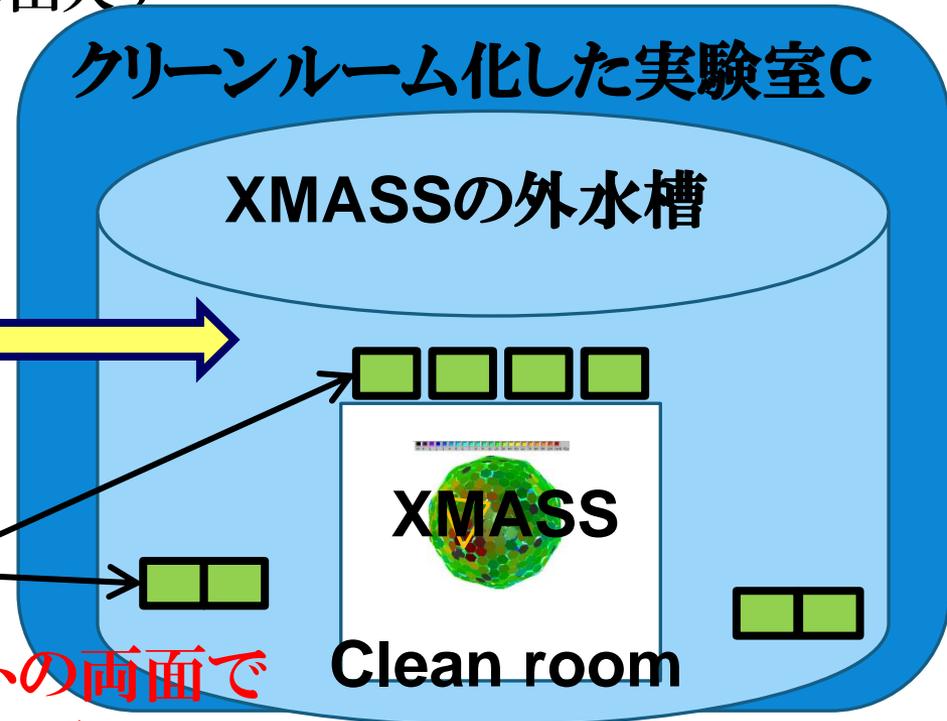
- * 前室を設け, エアを交換

- * 「肺の中のRnを吐き出せ！」

- * 本当に“Rn Free”なエアを供給すべく,
今年度, 再度改造を計画中

Rn Free Air 

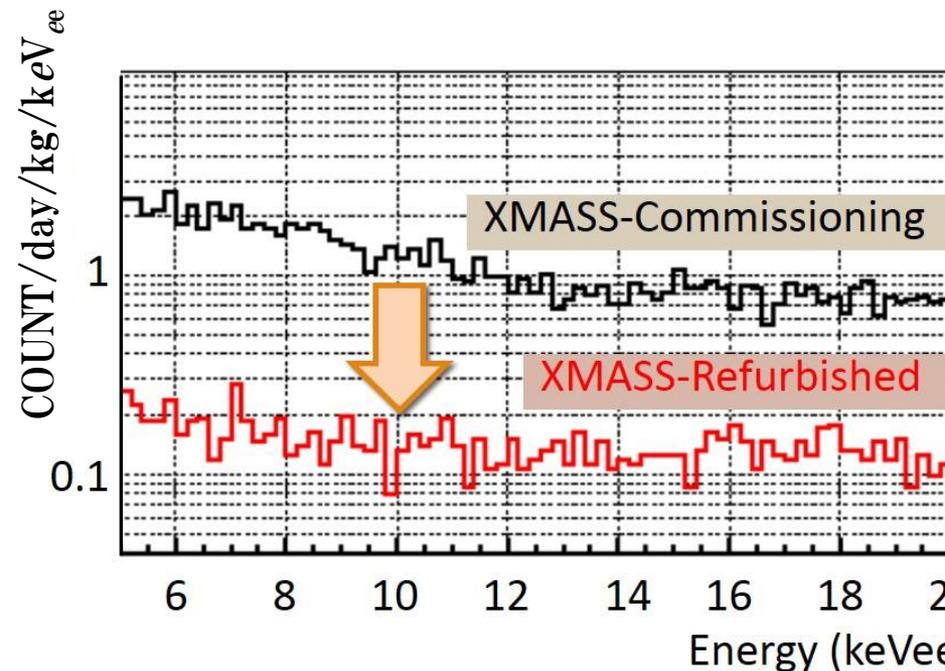
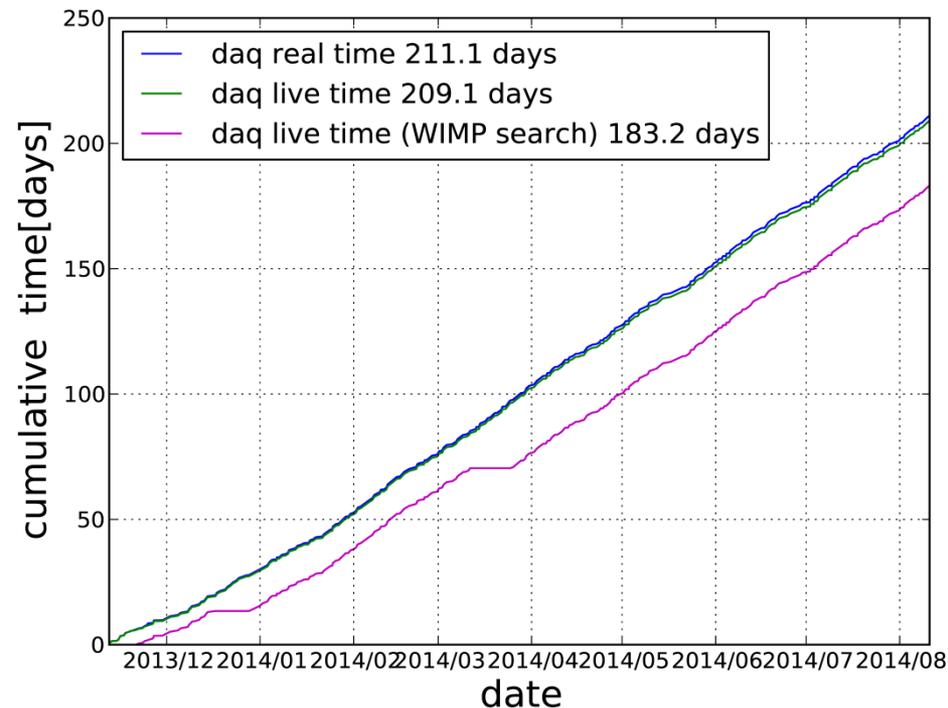
Filter Unit 



低BG実験のためには, ハード, ソフトの両面で非常に多くのKnow how と努力が必要で, これら情報の共有を図っていききたい.

XMASS実験の現状

- * 2013年11月より, Data Taking 再開
- * 順調に進行中
- * Quickな解析では, Commissioning に比べ, BGが1/10 ($E > 5\text{keV}$)
- * 現在, 解析を行っている最中

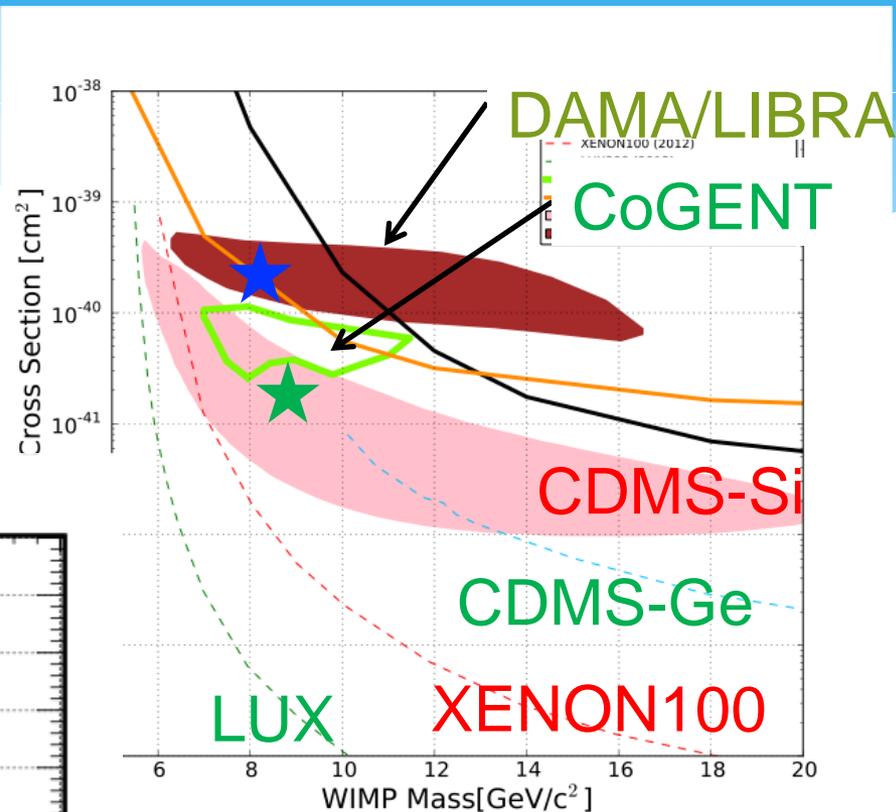
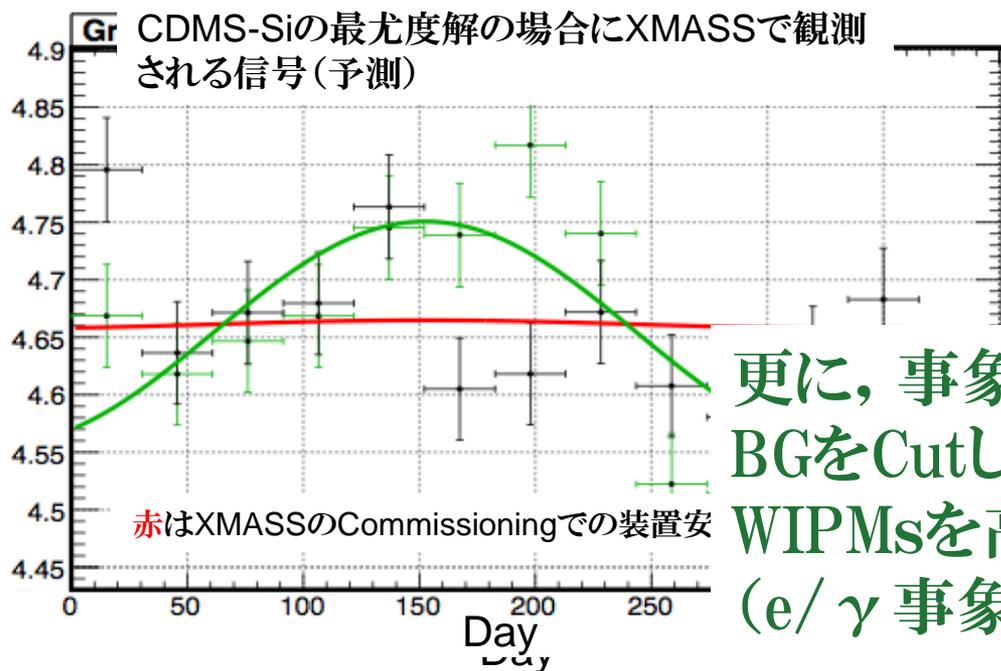


ここ数年で期待される成果

* 高統計を活かしたWIMPs探索

* DAMA/LIBRA等の高精度の追試

- * ※ WIMPsの可能性のある結果を出しているのは、CREST-IIを除き、 e/γ Discriminationを行っていない



更に、事象再構成によって、外部放射線BGをCutした解析により、100GeV付近のWIMPsを高感度に追試
(e/γ 事象も含めた相補的追試)

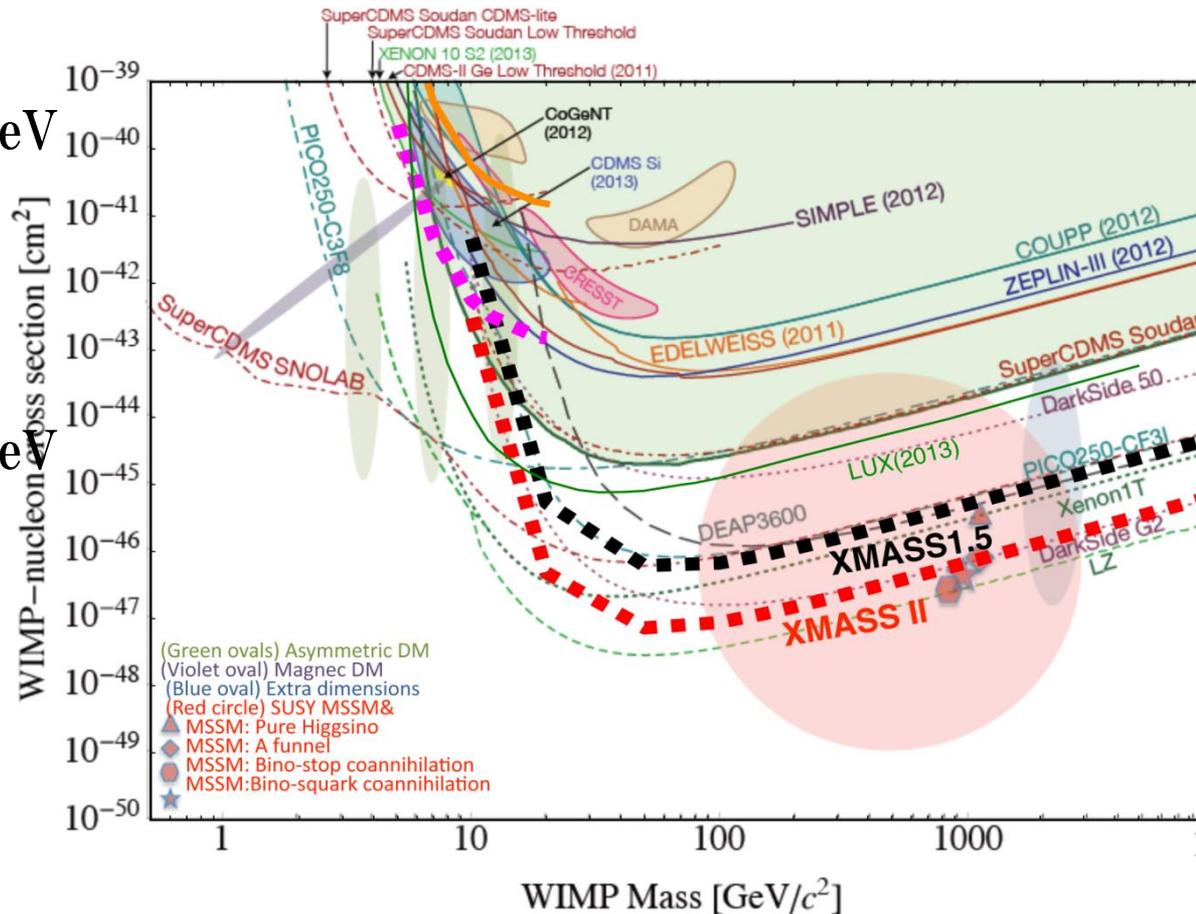
将来への取り組み

XMASS-1.5

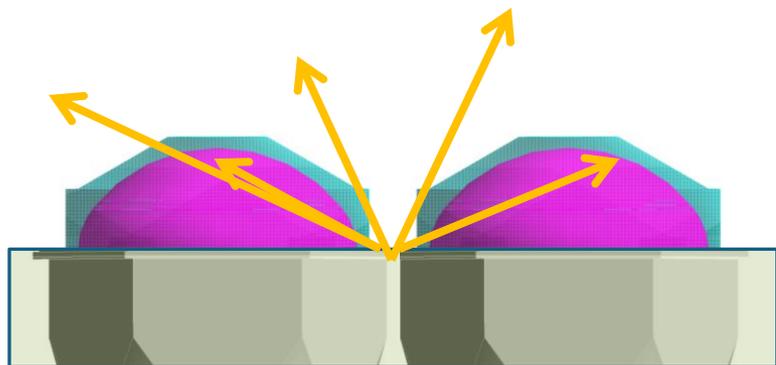
- * 全質量5t(標的質量1t)
- * 目標感度 $8 \times 10^{-47} \text{ cm}^2 @ 50 \text{ keV}$
- * BG: $1 \times 10^{-5} / \text{kg} / \text{day} / \text{keV}$

XMASS-II

- * 全質量20t(標的質量10t)
- * 目標感度 $1 \times 10^{-48} \text{ cm}^2 @ 50 \text{ keV}$
- * BG: $1 \times 10^{-5} / \text{kg} / \text{day} / \text{keV}$

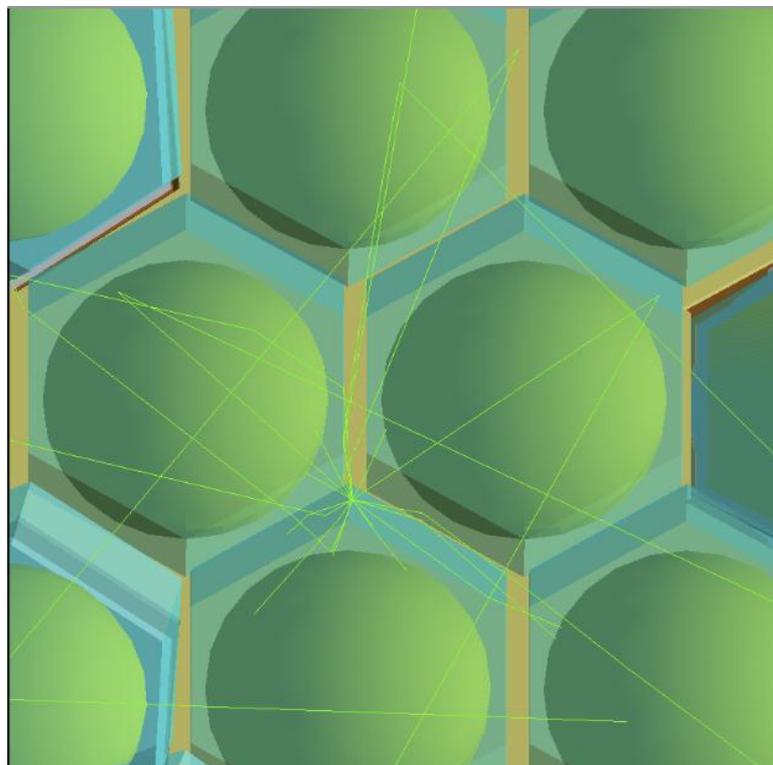


* 極低バックグラウンド 3in 凸型PMT



凸型にすることで、これまで
は死角であった表面領域が
激減

シミュレーションによると、
2.5keVの表面事象を、シンプルなカットで 10^5 倍の削減能力
⇒ 現在の表面BGLレベルでも、 10^{-5} DRUが達成可能！
プロトタイプによる実証をすすめる。

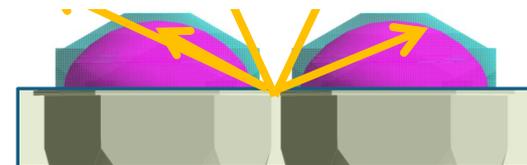


シミュレーション例

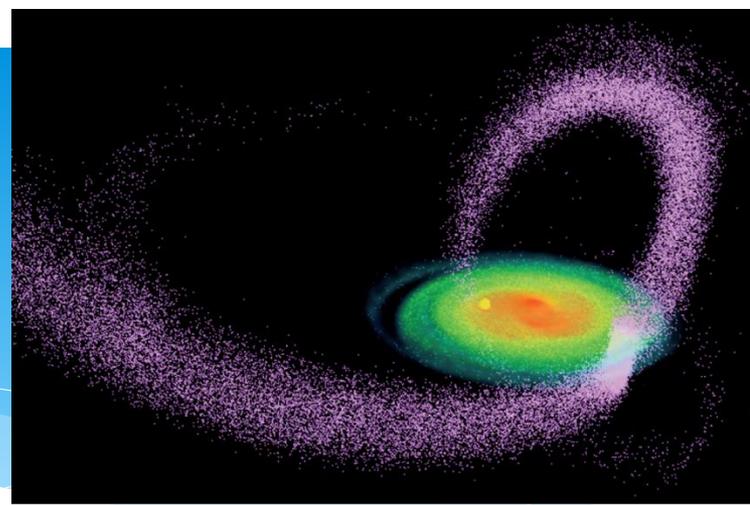
* 解決すべき課題

- * 現在のXMASSのBGに対する更に深い理解
 - * 詳細な Monte-Carlo Simulation や実証小実験等により、現在のXMASSのBG源を更に追求
- * これまでの経験に加え、これら成果を反映した究極のBG対策
 - * 最適な検出器デザイン
 - * 例：凸型PMT
 - * より効果的な洗浄法, 保存法
 - * Rn対策の更なる徹底
 - * 新素材開発

本領域の重要なテーマである極低放射能について、
情報交換と相互連携によって研究を加速させたい



WIMPs発見の先



* WIMPsの正体は？

* SUSY neutrino, ...?

* 質量, 反応断面積, 密度, ...の精密測

* 暗黒物質による銀河の歴史の解明？

* 例: 射手座矮銀河と天の川銀河の衝突

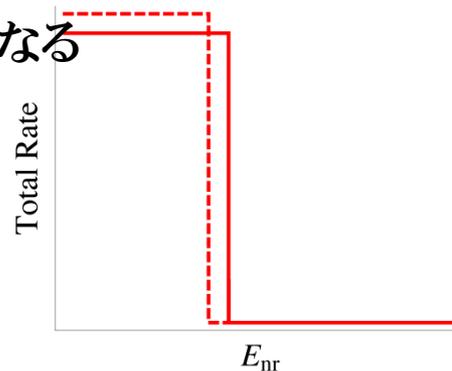
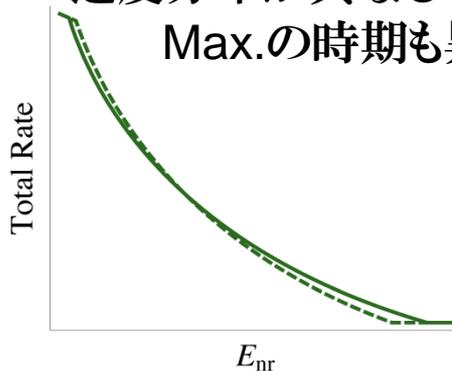
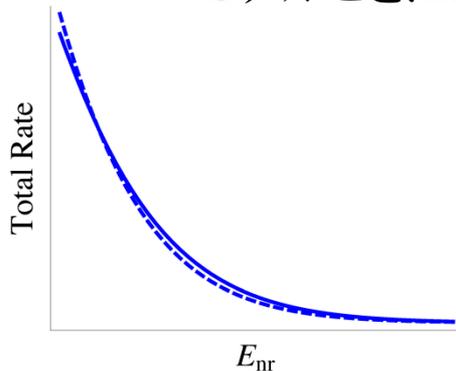
新学術「地核素核研究」B01班
「大型実験装置による暗黒物質
直接探索」は
高い統計精度と超低BGにより,
宇宙の謎と歴史に挑む

SHM

Debris Flow

モデルごとにDMの速度分布が異なる

Max.の時期も異なる



新学術「地核素核研究」

B01班「大型実験装置による暗黒物質直接探索」は、
e/ γ 事象の含めた全てのチャンネルを使い、低閾値である
という特徴を活かし、

超低BGと高い統計精度を武器に、

宇宙の謎と歴史に挑む

