

# 大型実験装置による暗黒物質直接探索

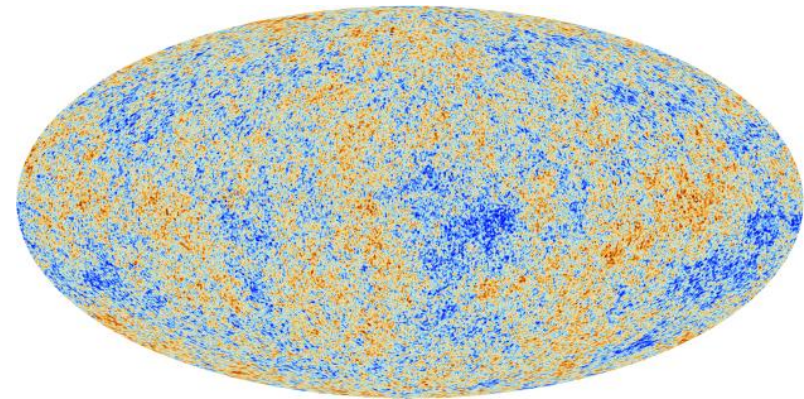
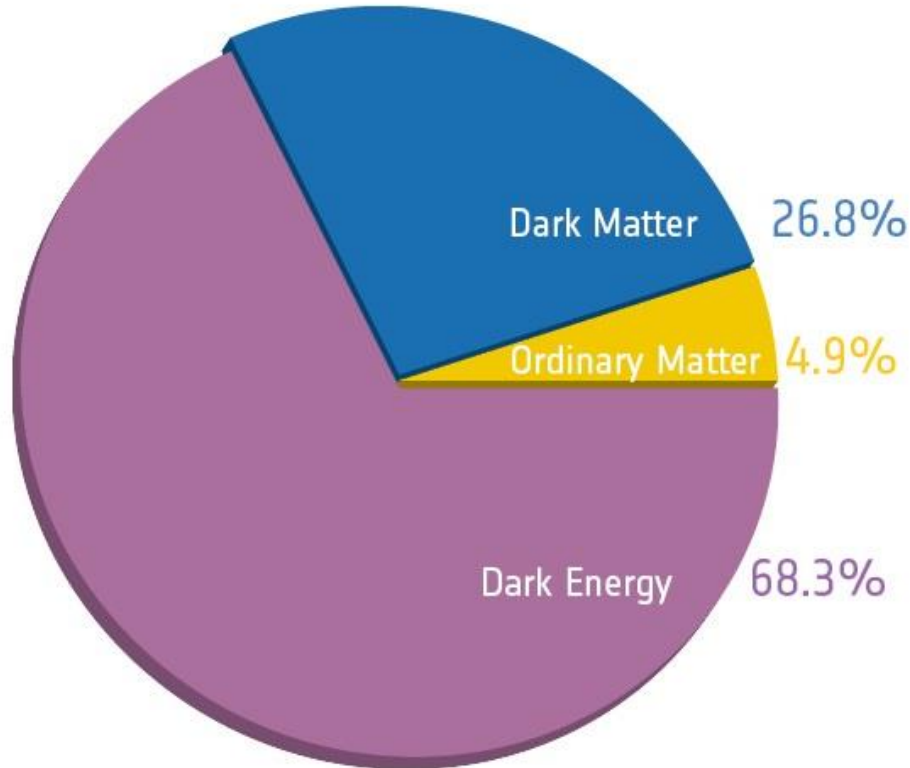
岸本 康宏

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  
 $\rho \sim 0.39 \text{ GeV/cm}^3$

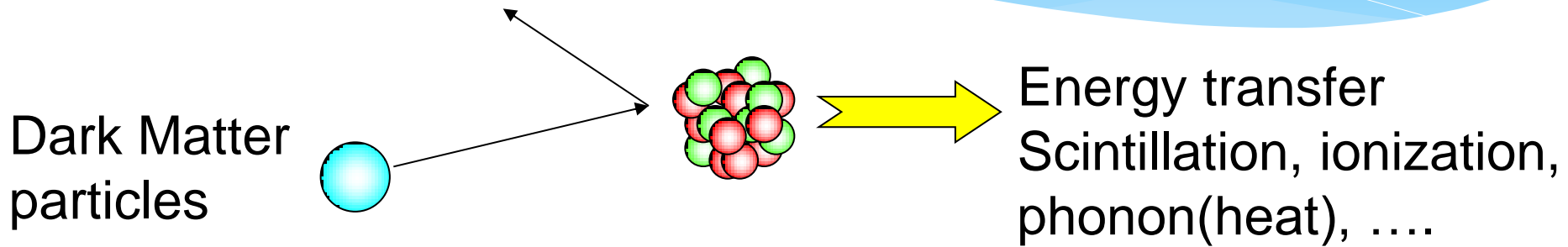
※この画像は想像図です。© NAOJ

# 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

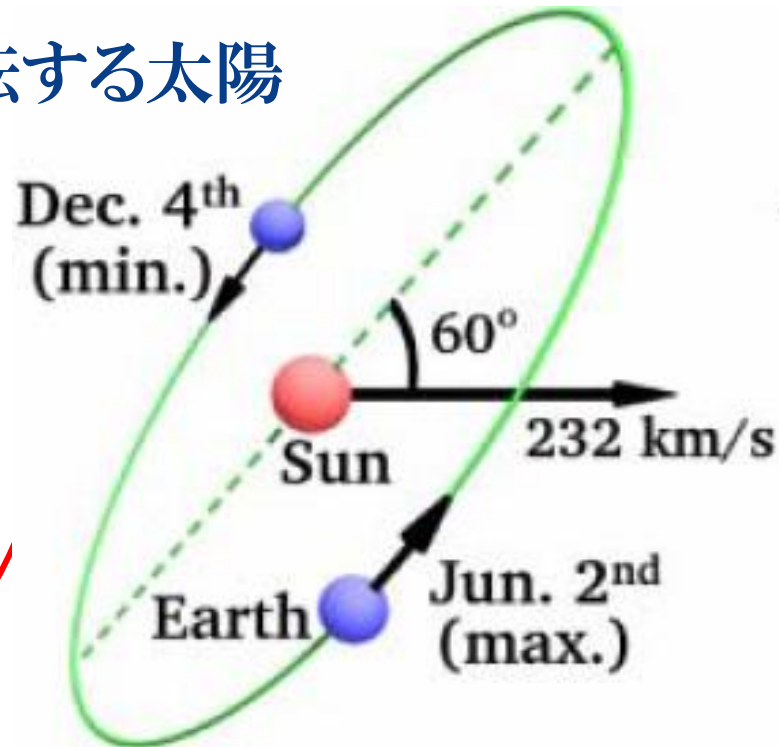
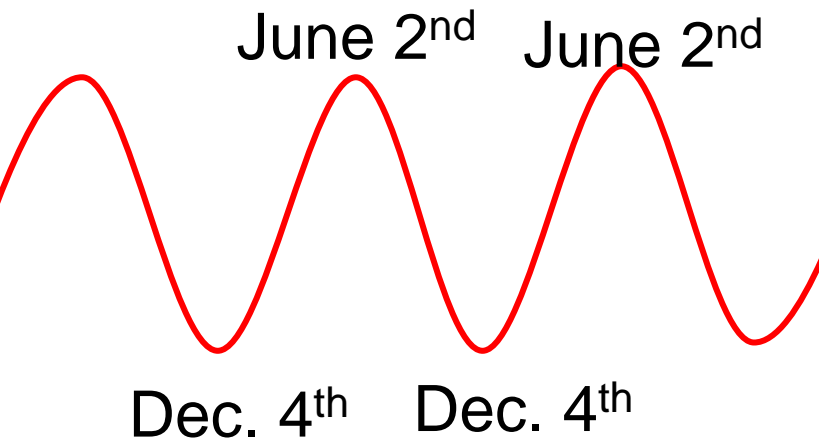


- \* 非常に稀で、非常に僅かなエネルギー移行を検出する
  - \* 暗黒物質探索で使われる、独自の単位“DRU”:  $\text{keV}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{day}^{-1}$
  - \* 事象のエネルギーは1~10keV程度
    - \*  $E \sim \frac{1}{2} m_{DM} \beta^2 \sim 0.5 \times 20\text{GeV} \times (10^{-3})^2 \sim 10\text{keV}$
- \* ⇒ 大型の極低バックグラウンド、低閾値の検出器が要請

# 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

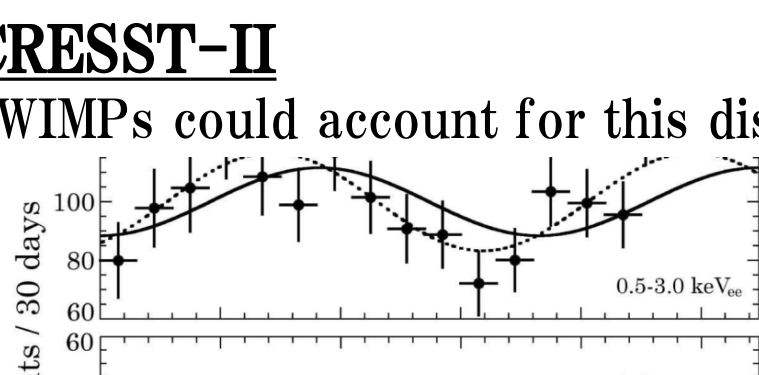
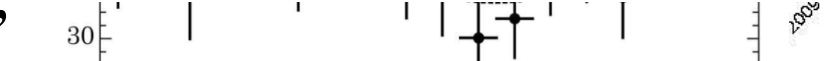
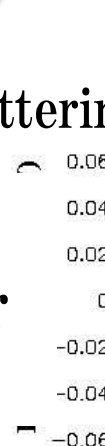
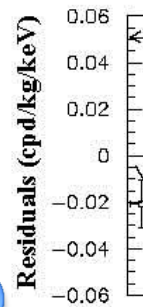
“Indication of annual modulation by “unknown origin”

### CDMS-Si

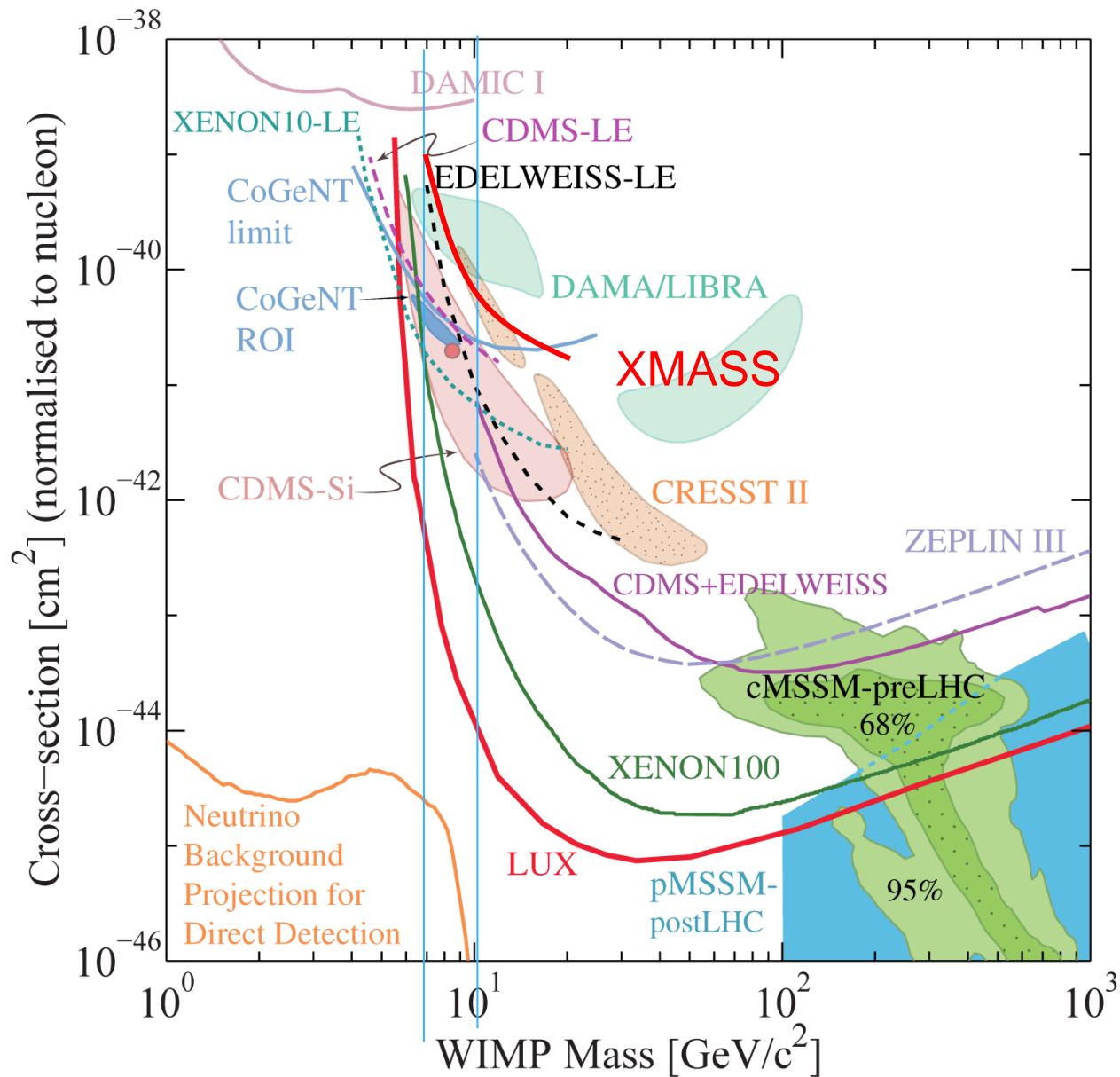
“disfavour WIPMs + BG hypothesis”

### CRESST-II

“WIMPs could account for this discrepancy”

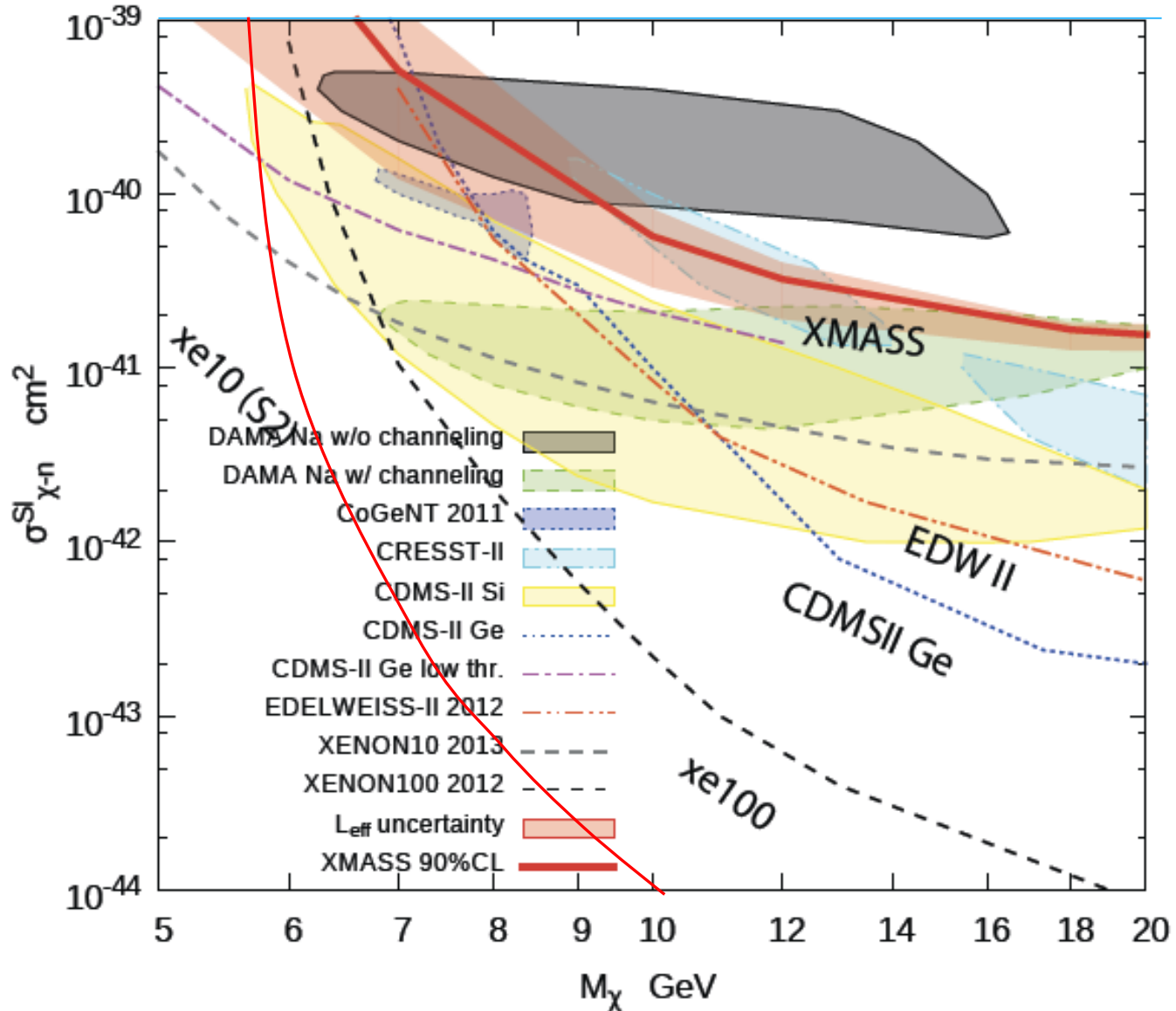


# 散乱斷面積 (核子) VS WIMPs質量





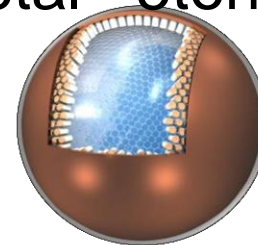
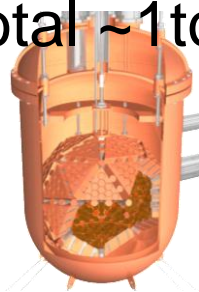
# 騒がしい領域を拡大



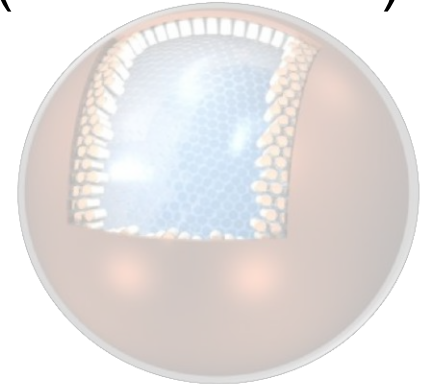
# 大型暗黒物質探索装置 XMASS

- \* 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,  $e/\gamma$  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)

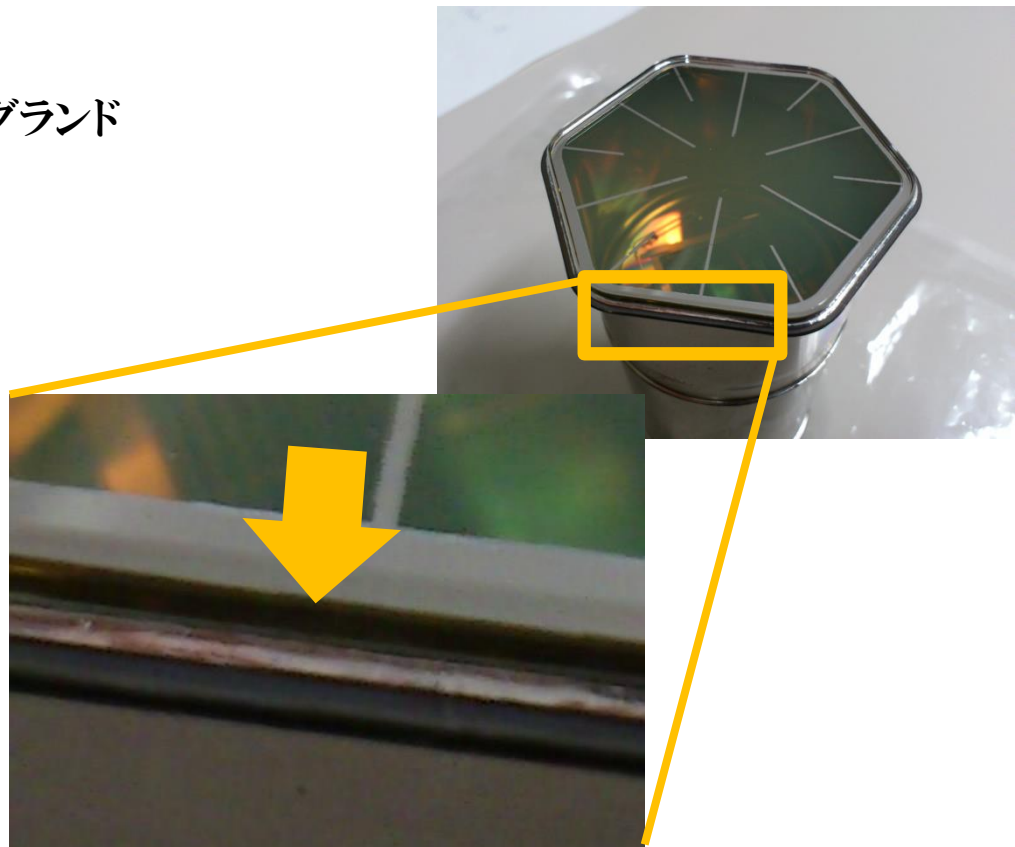
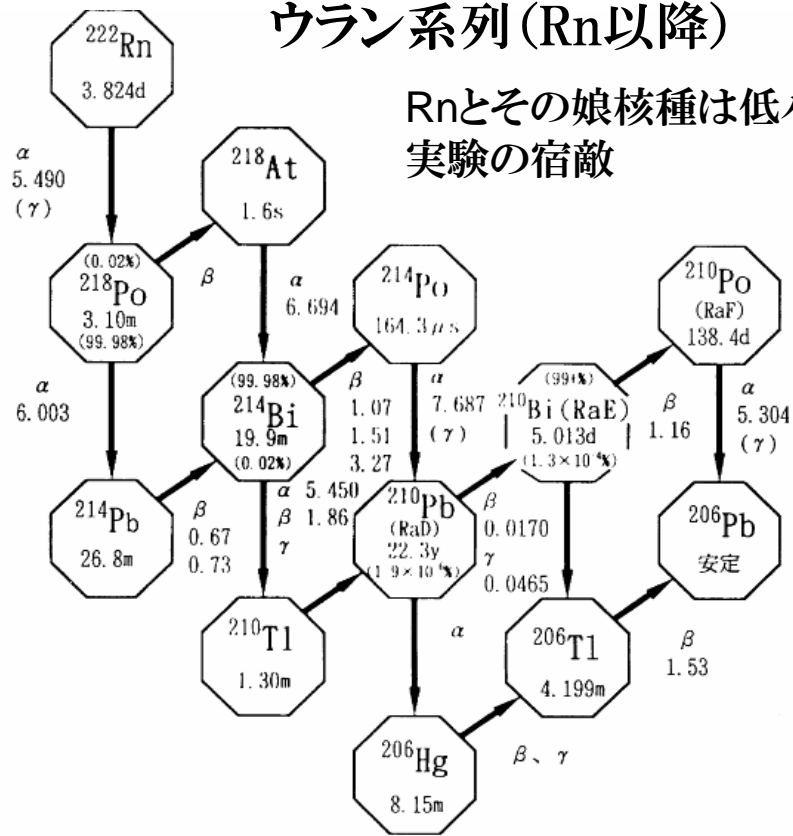
## \* 2010年9月に検出器完成

- \* 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, O<sub>2</sub> 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  $^{129}\text{Xe}$  inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- \* Search for bosonic super-WIMPs

(Accepted by PRL on Aug. 20<sup>th</sup>, arxiv:1406.0502v2)

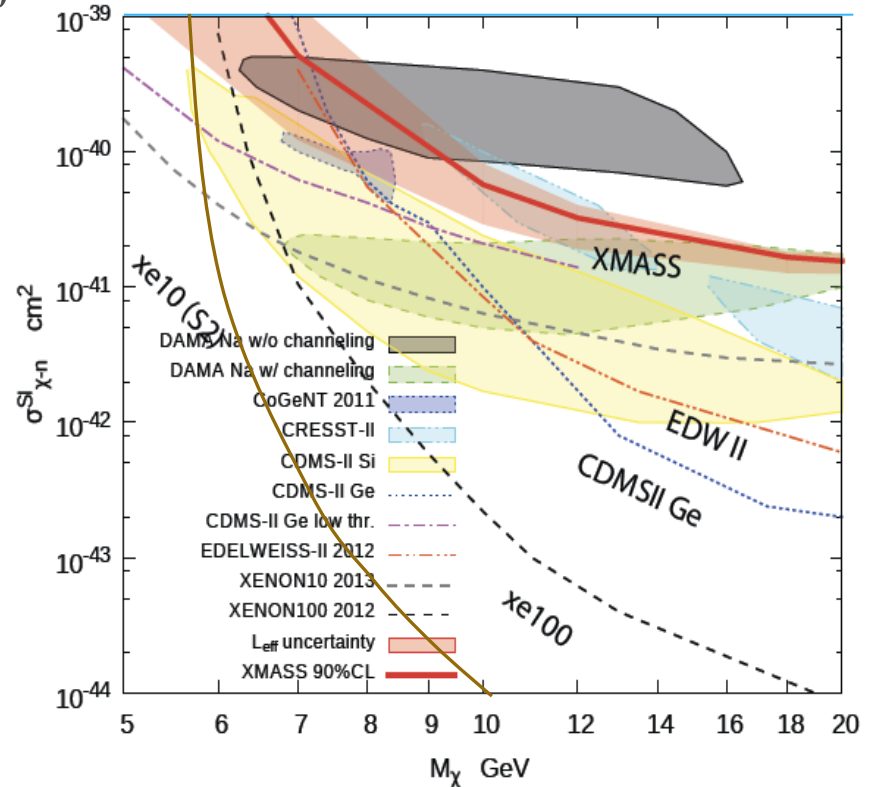
- \* WIMPs を6.7日間の低閾値データで解析

6.7day  $\times$  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

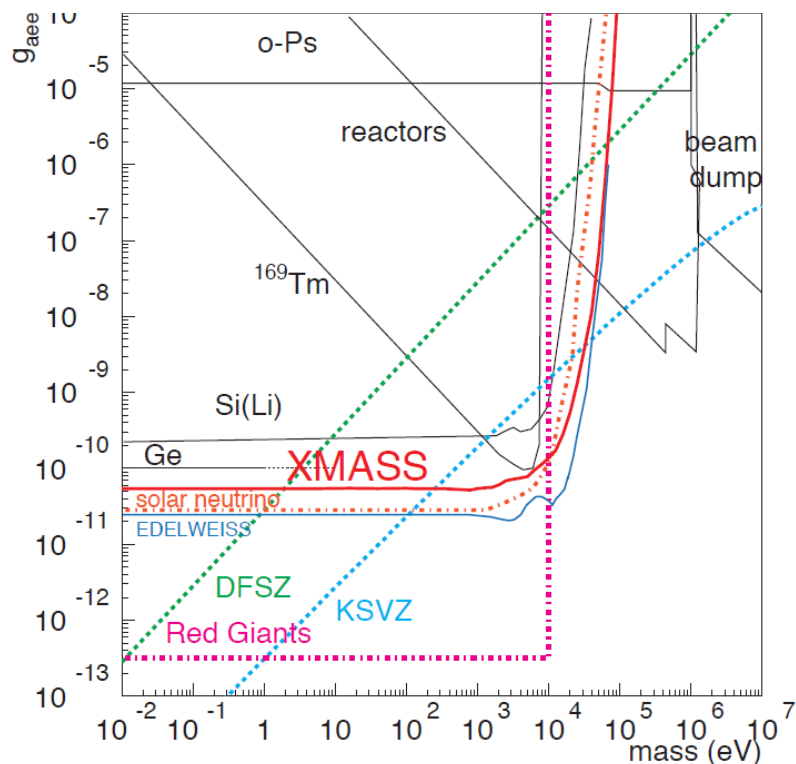


# XMASS Commissioning Runの成果

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

## \* Solar Axionの解析

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

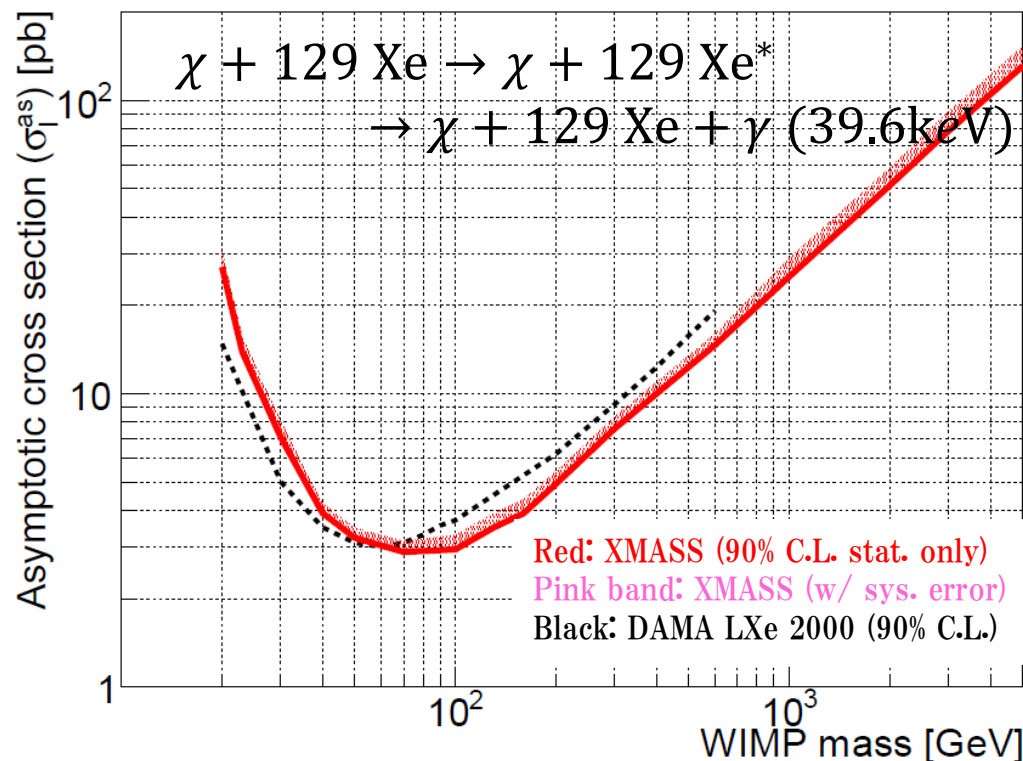


# XMASS Commissioning Runの成果

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

(Accepted by PRL on Aug. 20<sup>th</sup>, arxiv:1406.0502v3)

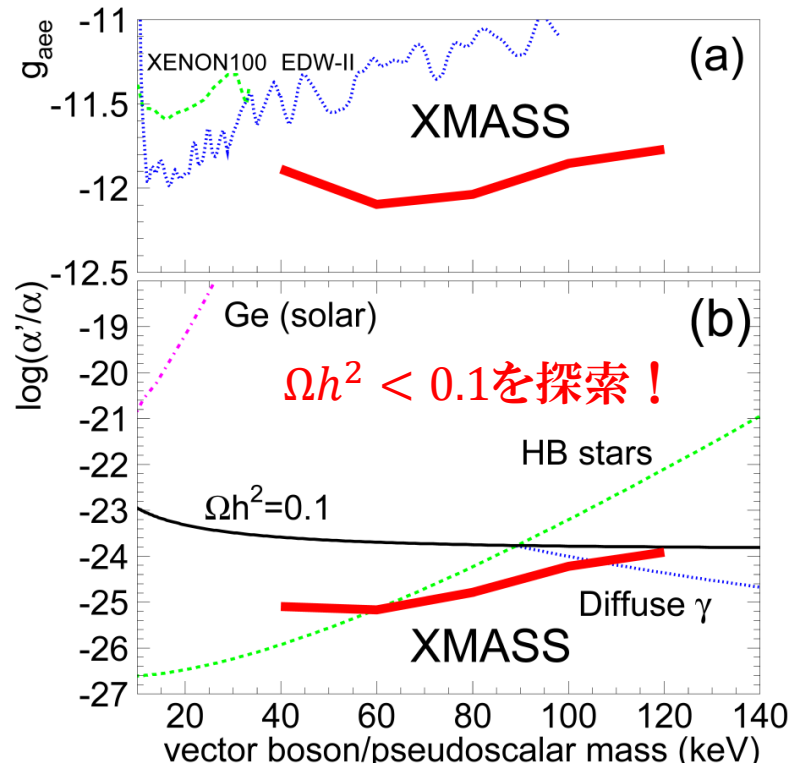
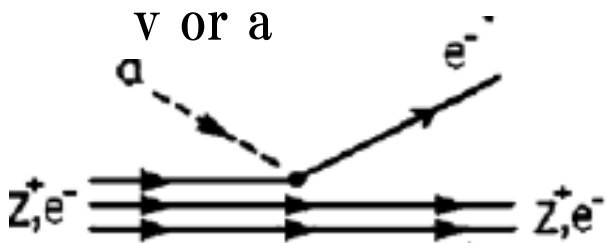
- \*  $^{129}\text{Xe}$  の励起エネルギーが小さいことを利用 ←やはり e/  $\gamma$  事象



# 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  $^{129}\text{Xe}$  inelastic scattering (PTEP 063C01(2014))
- \* Search for bosonic super-WIMPs  
(Accepted by PRL on Aug. 20<sup>th</sup>, 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、 $e/\gamma$  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

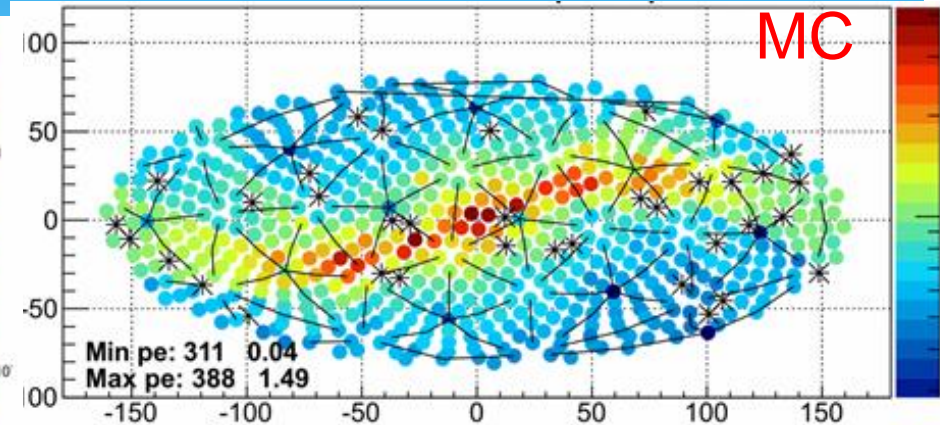
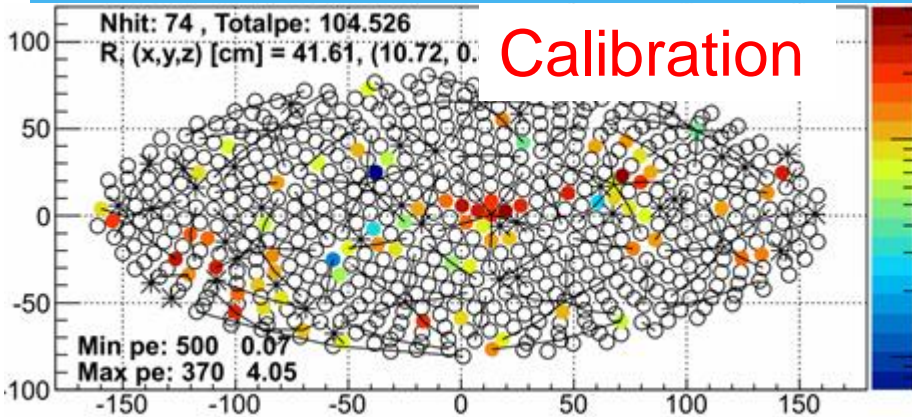
- \* 洗浄法の開発, 保存法の開発, 再汚染を最小限にするための組立手順と環境

#### \* 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



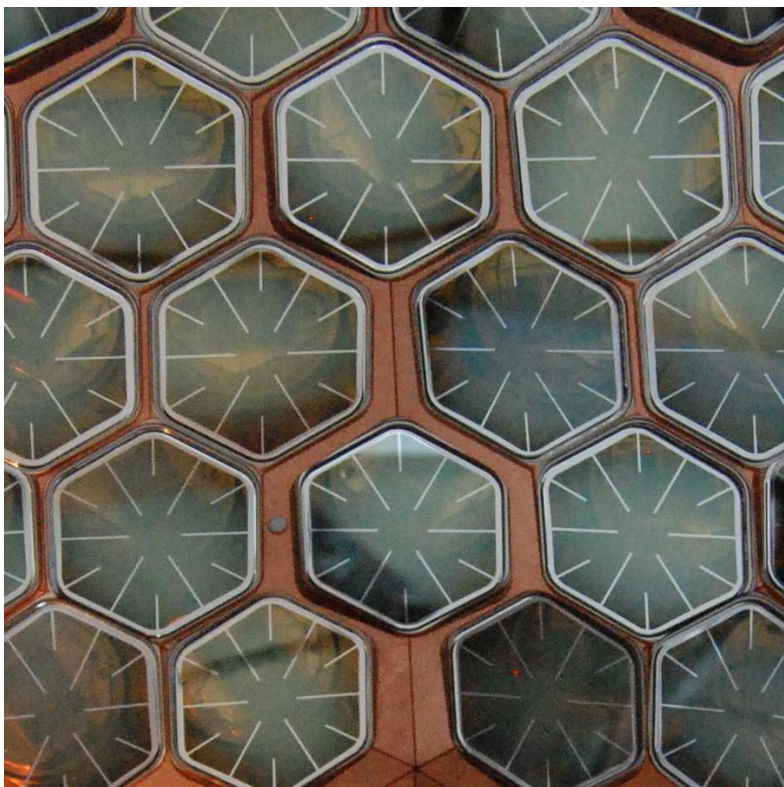
XMASSの外側から線源を当てた実データ  
シミュレーションを用いた詳細解析によって、  
PMTの間で生じた事象と推定  
⇒ これは雑音として除去

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

- \*  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ 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 $\alpha$ 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



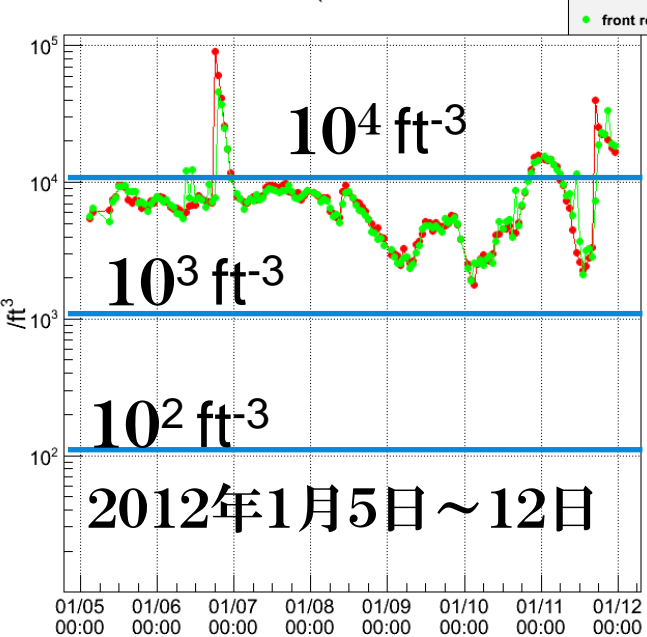
# \* XMASSを設置した神岡の地下実験室C全体をクリーン化

\* 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

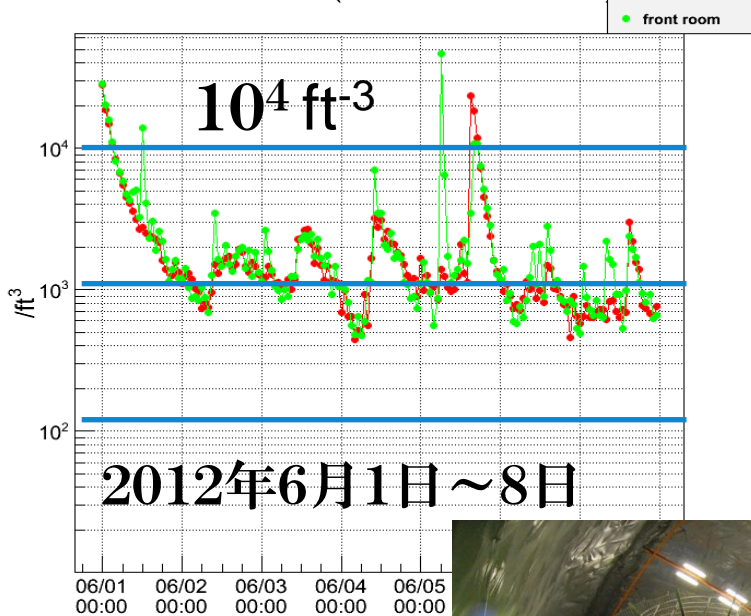
\* これを受け、実験室C全体をクリーン室化

\* 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 ~ 10mBq/m<sup>3</sup>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

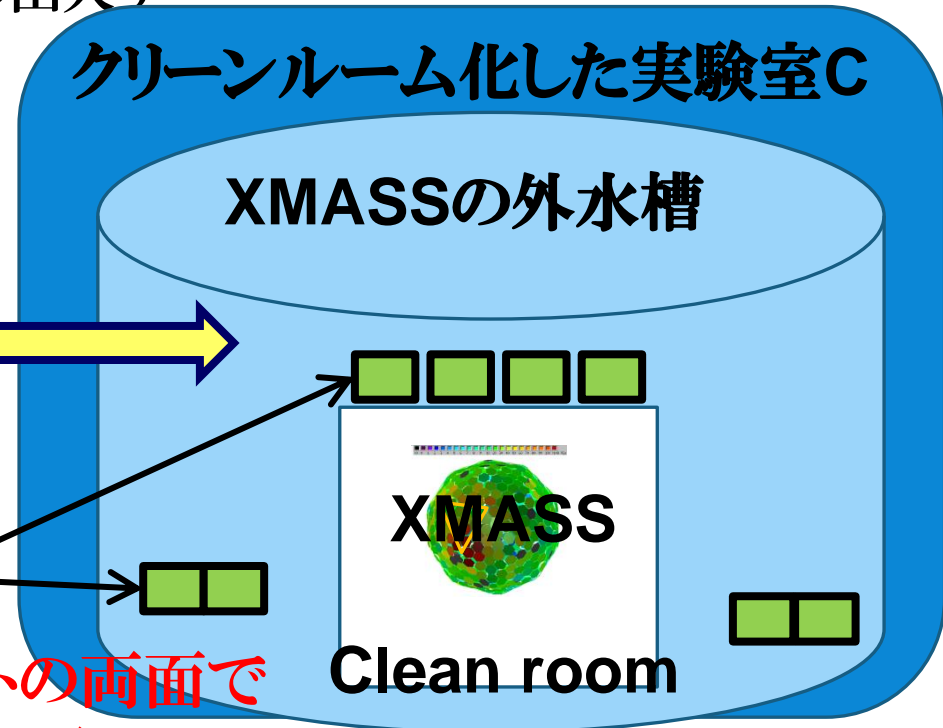
- \* 前室を設け, エアを交換

- \* 「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 

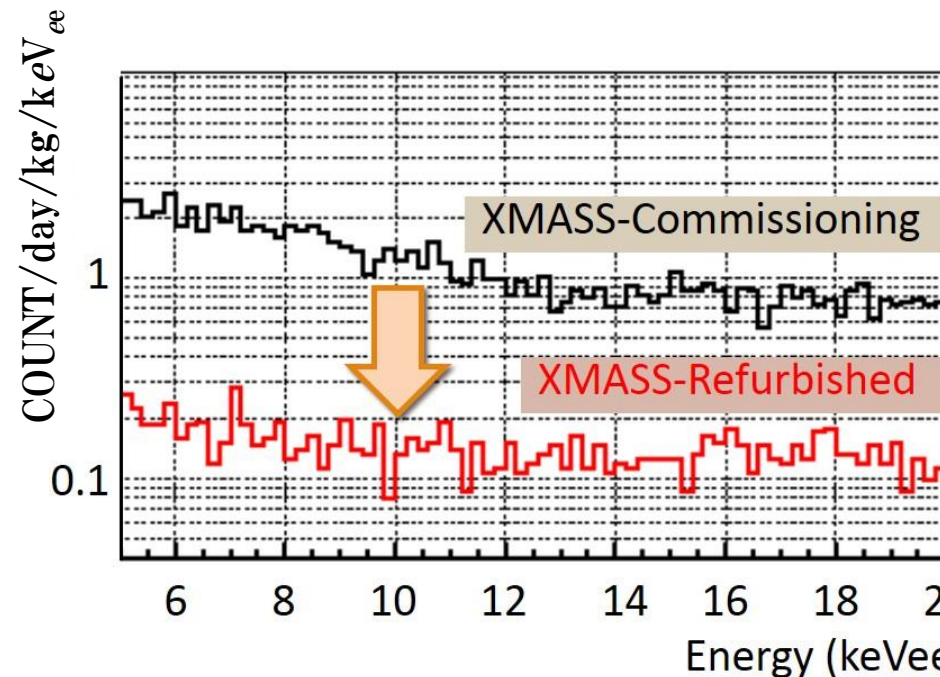
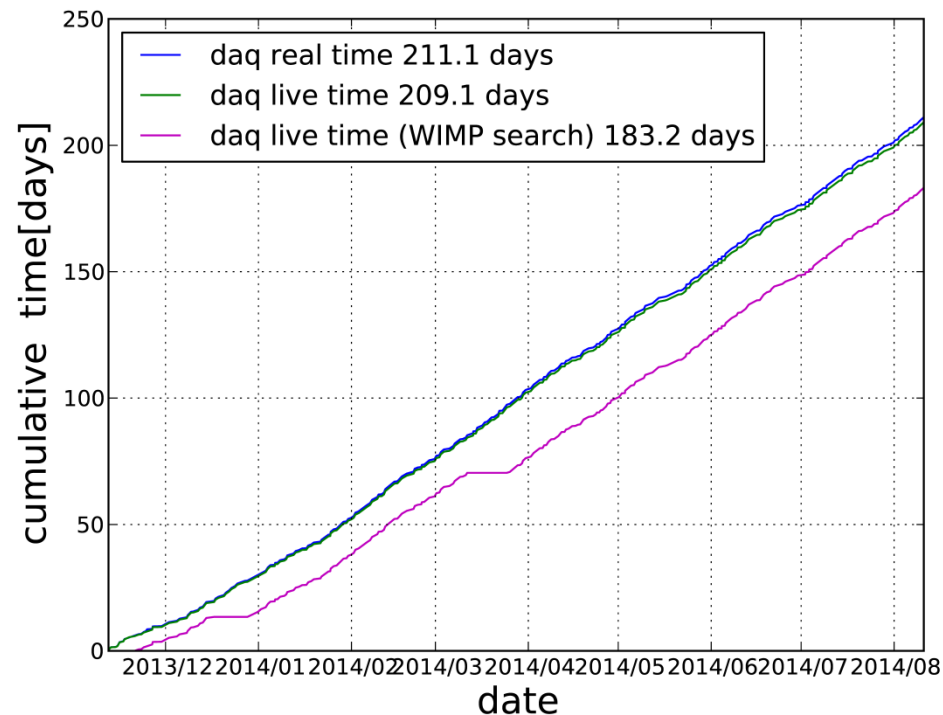
Filter Unit 



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



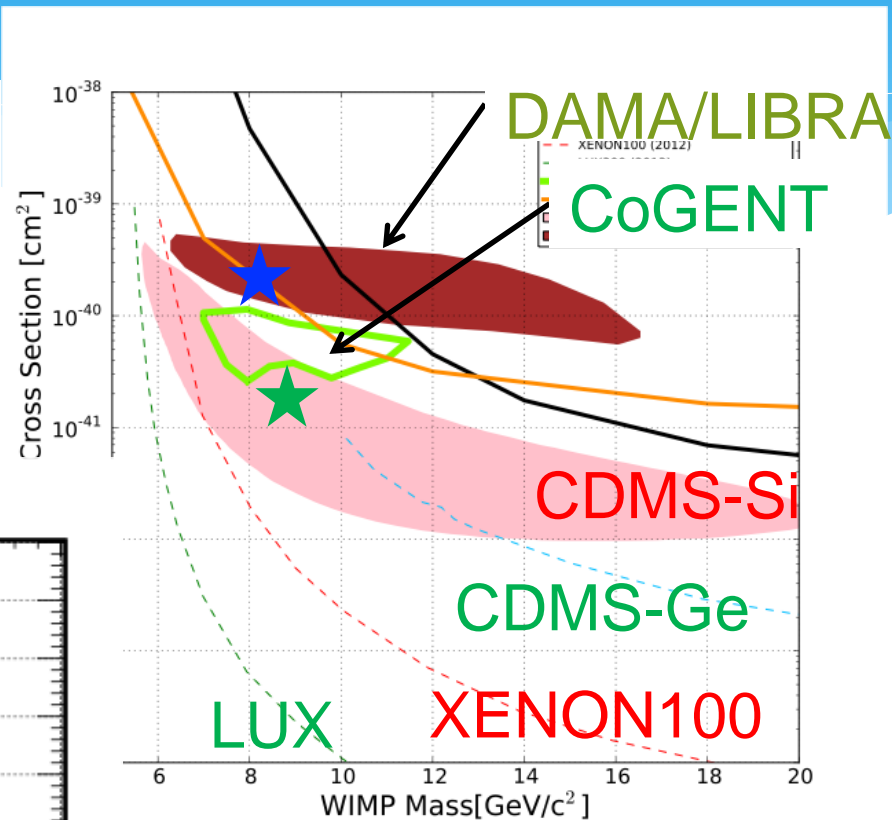
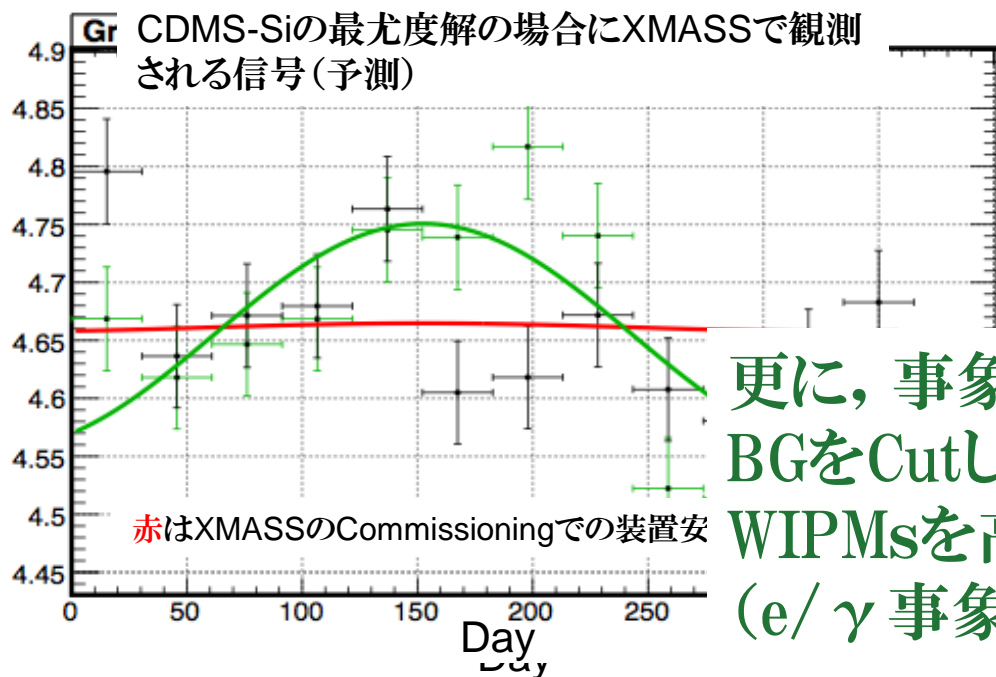


# ここ数年で期待される成果

## \* 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、 $e/\gamma$  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  
( $e/\gamma$  事象も含めた相補的追試)

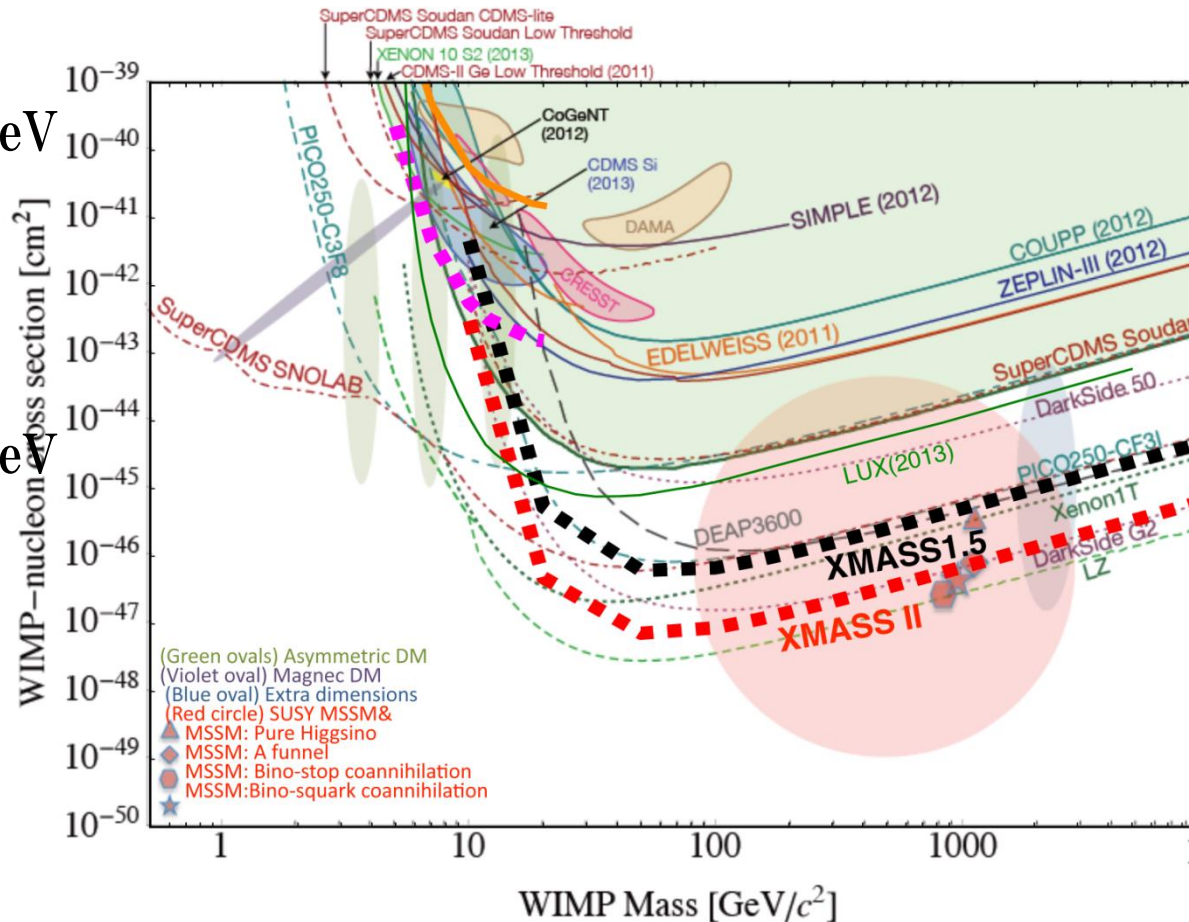
# 将来への取り組み

## XMASS-1.5

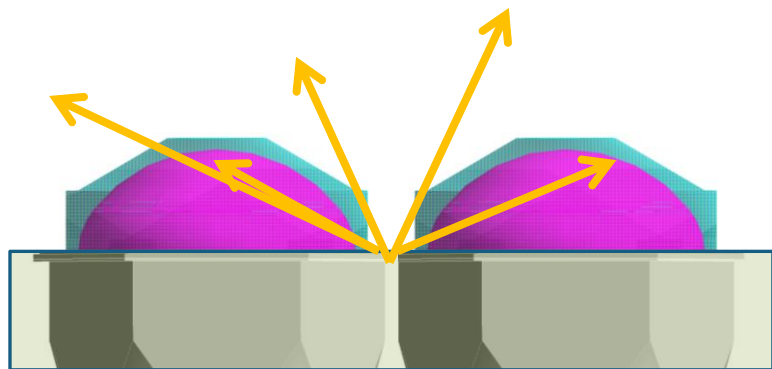
- \* 全質量5t(標的質量1t)
- \* 目標感度 $8 \times 10^{-47} \text{ cm}^2 @ 50 \text{ keV}$
- \* BG:  $1 \times 10^{-5} / \text{kg} / \text{day} / \text{keV}$

## 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:  $1 \times 10^{-5} / \text{kg} / \text{day} / \text{keV}$

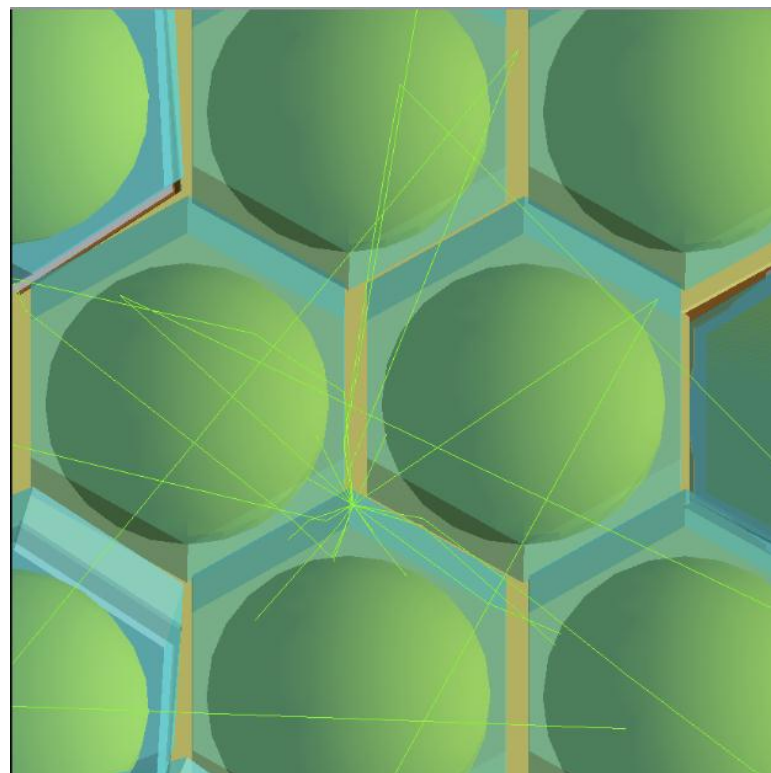


## \* 極低バックグラウンド 3in 凸型PMT



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。

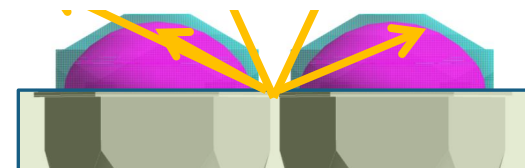


シミュレーション例

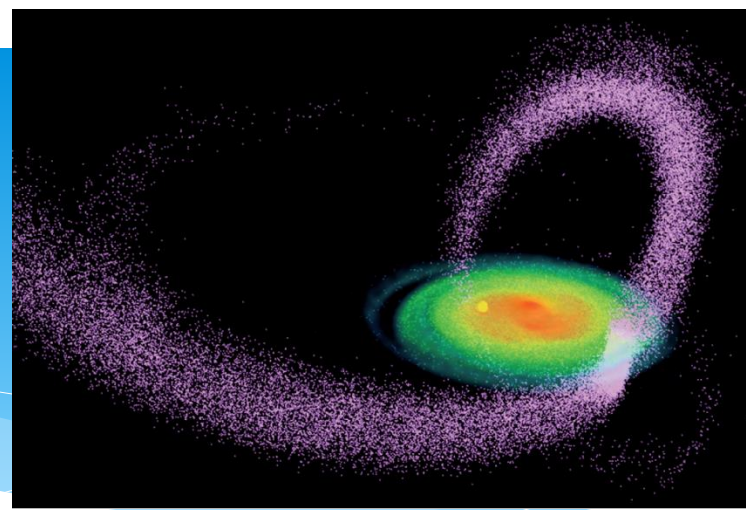
## \* 解決すべき課題

- \* 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

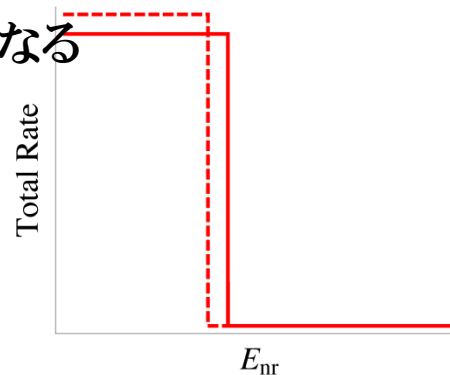
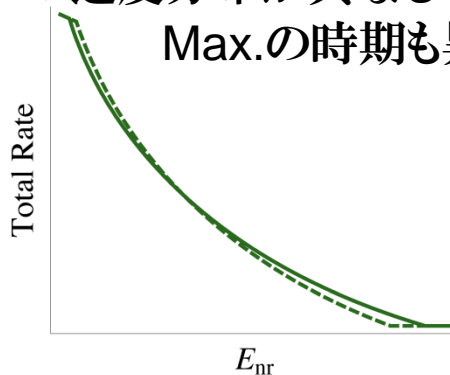
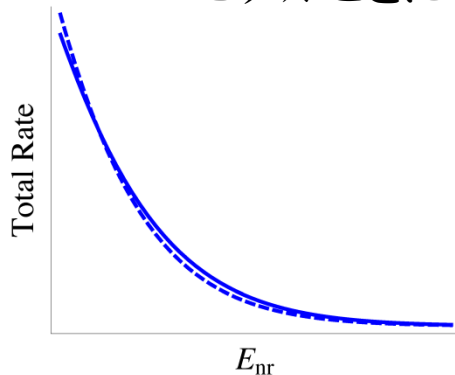
新学術「地核素核研究」B01班  
「大型実験装置による暗黒物質  
直接探索」は  
高い統計精度と超低BGにより,  
宇宙の謎と歴史に挑む

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/ $\gamma$  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

