

# XMASS

平成18年度共同利用研究成果発表会  
2006年12月15日

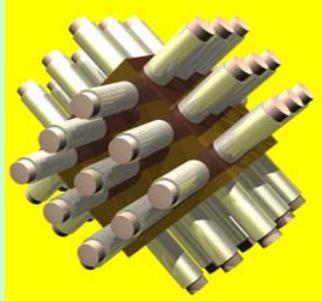
宇宙線研神岡施設 竹田敦

1. XMASS実験
2. 800kg 検出器のデザイン
3. prototype による暗黒物質探索実験
4. Summary

# 1. XMASS 実験

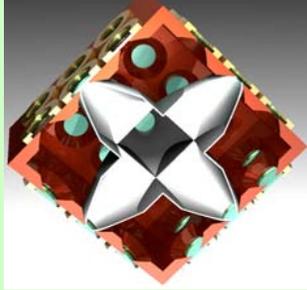
10 ton 検出器

100kg Prototype

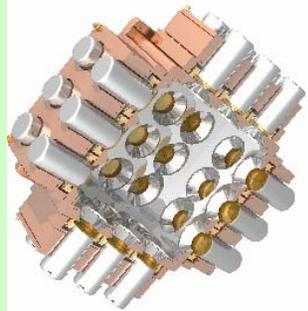


~30cm

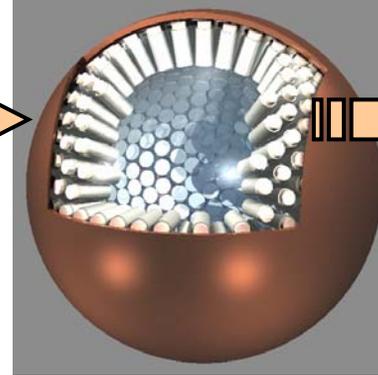
With light guide



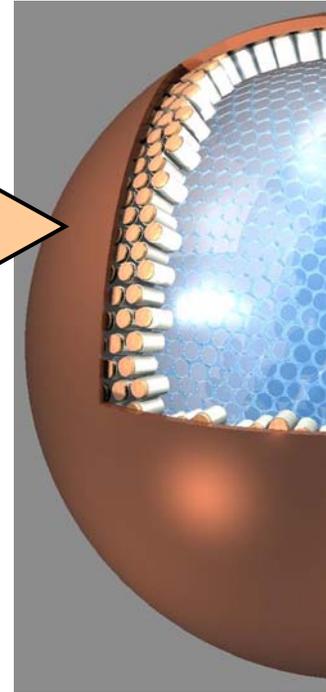
With Mirror



800kg 検出器



~90cm



~2.5m

R&D

- ✓ Vertex & energy reconstruction
- ✓ Self shielding power
- ✓ BG level

Dark matter search

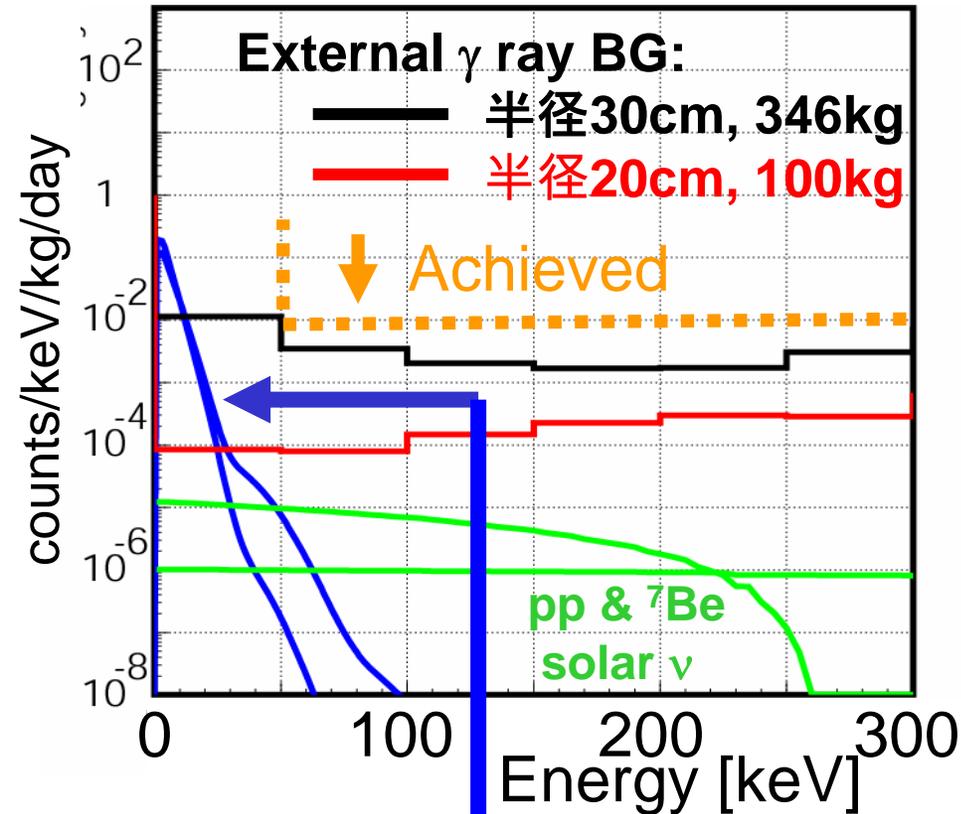
Multipurpose detector  
(solar neutrino,  $\beta\beta$  ...)

We are here !

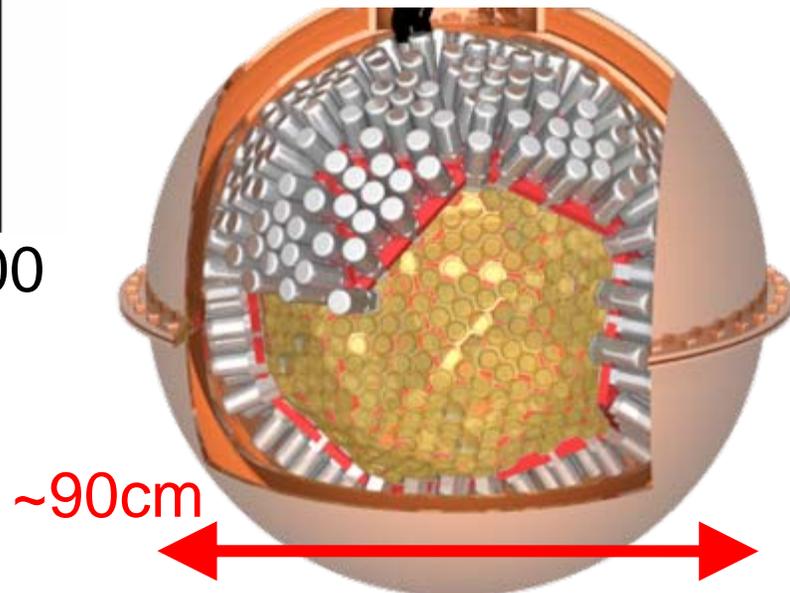
## 2. 800kg 検出器のデザイン

### ➤ 主目的: 暗黒物質の探索

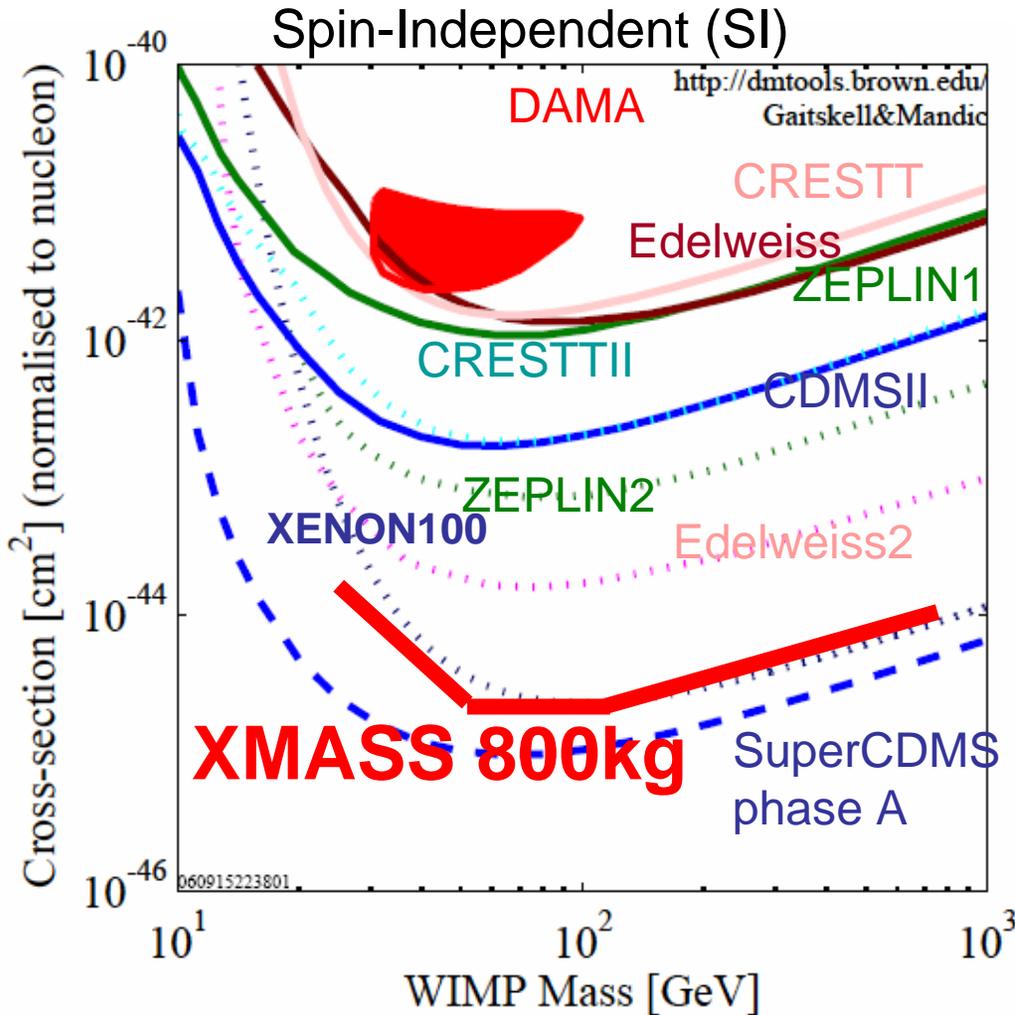
- ~1 tonの液体キセノンを用い自己遮蔽効果を使って100keV以下のBGを  $10^{-4}$  cpd/kg/keV まで減らし
- 低エネルギー領域に現れる暗黒物質からのシグナルを探索する



Expected dark matter signal  
(assuming  $10^{-6}$  pb, Q.F.=0.2  
50GeV / 100GeV,)



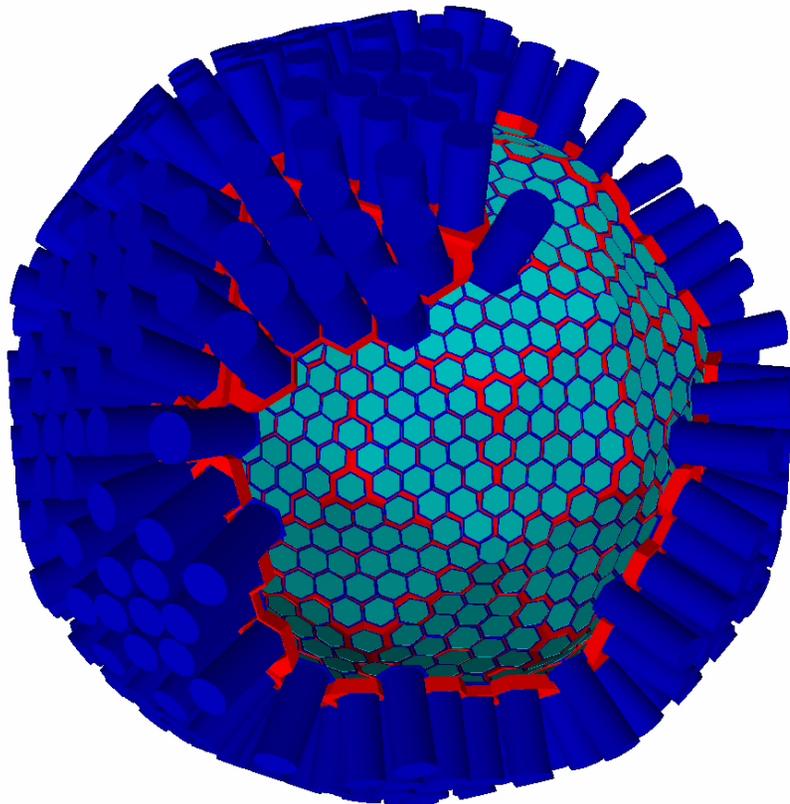
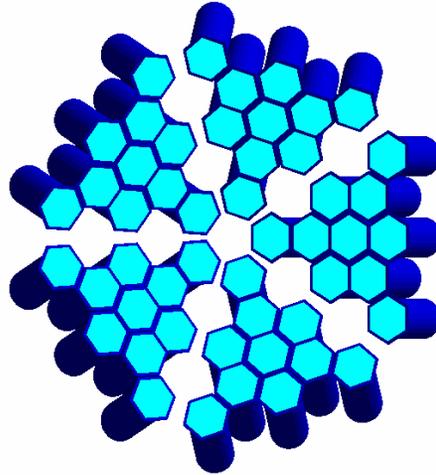
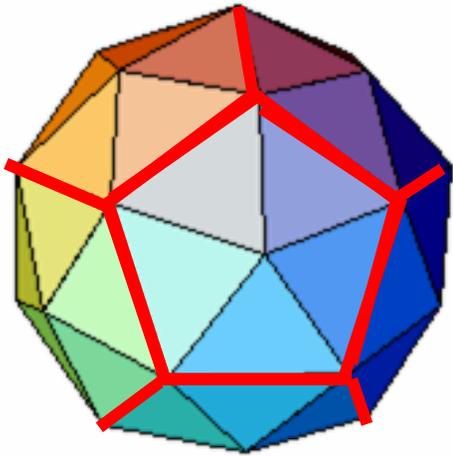
# ▶ 期待される暗黒物質の測定感度



XMASS FV 0.5 ton year  
 $E_{th} = 5 \text{ keVee} \sim 25 \text{ p.e.}$ ,  
 $3\sigma$  discovery  
 w/o any pulse shape info.

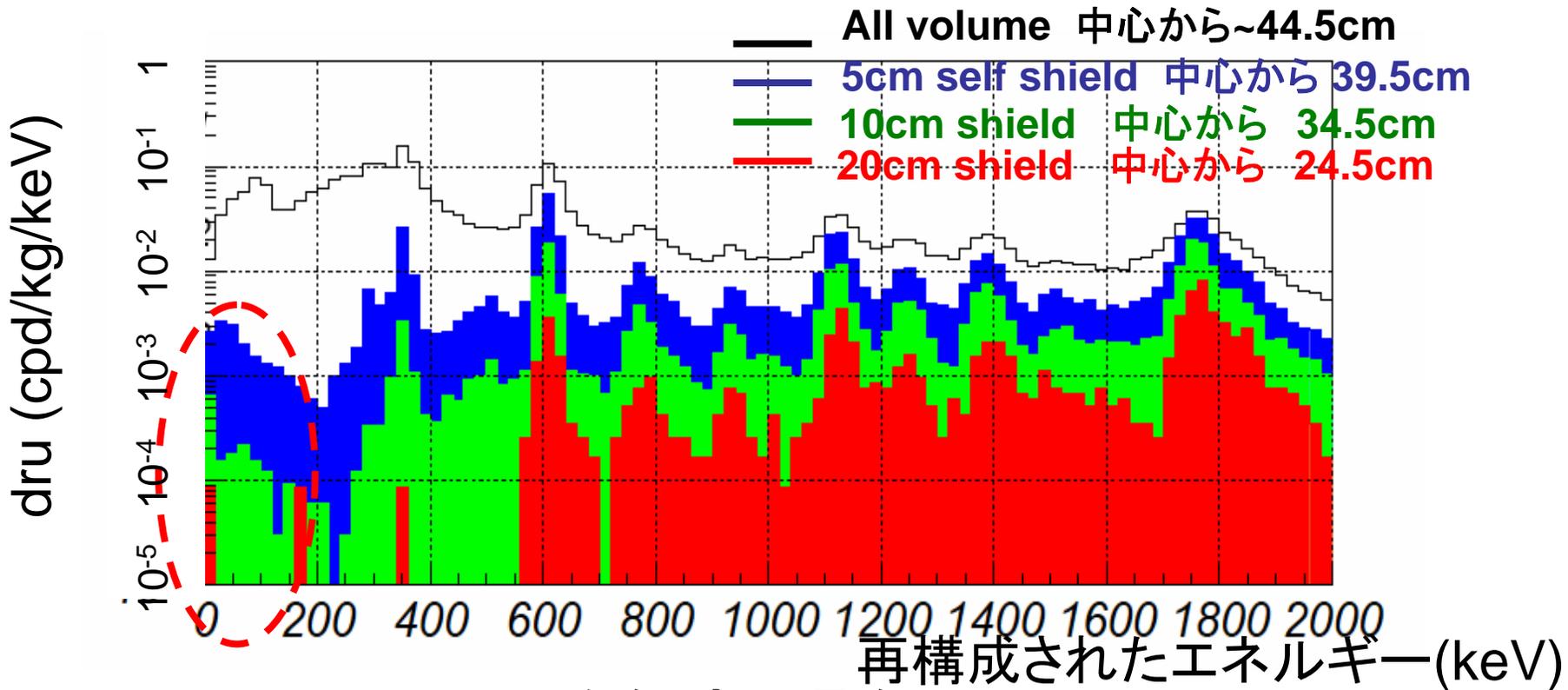
- SIで $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ まで探索できる
- 既存の観測の2桁近く高い感度で探索できる

## ➤ 800 kg 検出器の基本構造



- 合計60面の三角形
- $10\text{PMT}/\text{三角形} \times 60\text{面} = 600\text{PMT}$
- 三角形同士の境界の隙間にも212PMT
- 合計812PMT
- Photo coverage: 67.0%
- 中心から光電面まで  
~44cm
- 中心から25cmまでを  
fiducial volume として使う
- PMTは液体キセノンに  
浸っている

# ● BG from PMT $^{238}\text{U}$



- $1.6 \times 10^{-3}$  Bq/PMT を仮定 (現在の1/10)

- $<100\text{keV}$  のイベントレート

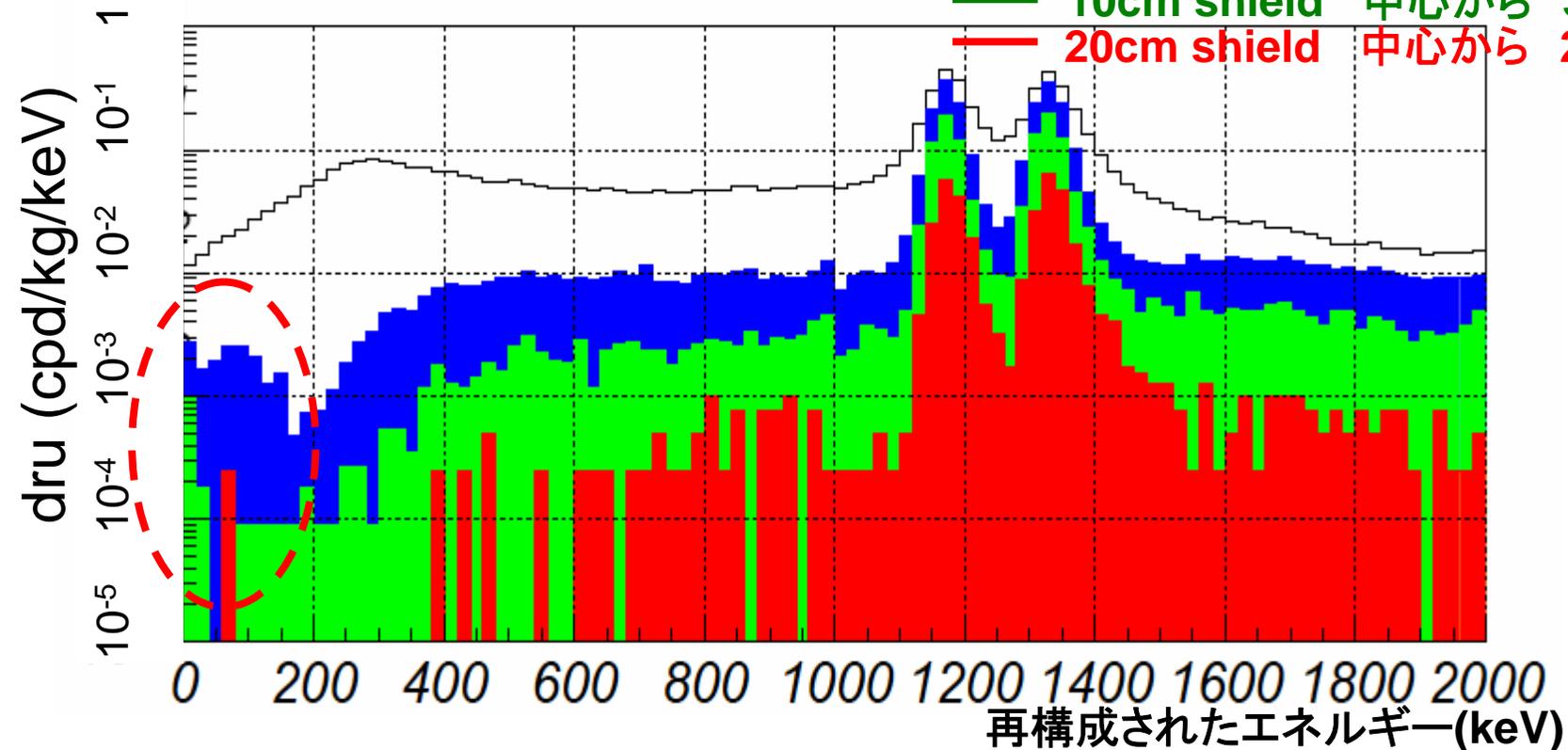
- 5cm shield  $\sim 10^{-3}$  [cpd/kg/keV]

- 10cm shield  $\sim 10^{-4}$  [cpd/kg/keV]

- 20cm shield  $\sim 10^{-5}$  [cpd/kg/keV]

# ● BG from PMT $^{60}\text{Co}$

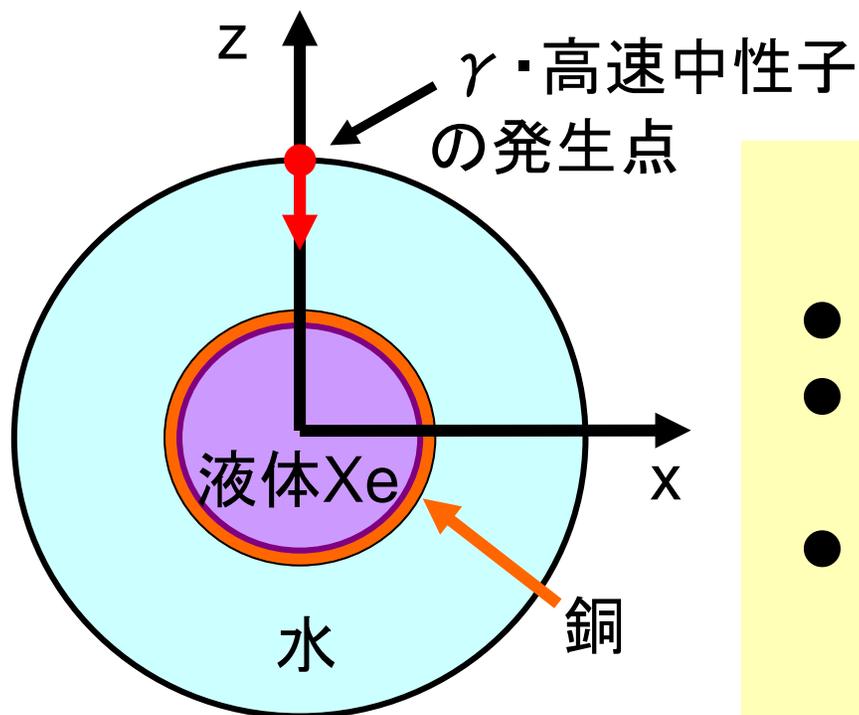
- All volume 中心から~44.5cm
- 5cm self shield 中心から 39.5cm
- 10cm shield 中心から 34.5cm
- 20cm shield 中心から 24.5cm



- $5.5 \times 10^{-3}$  Bq/PMT を仮定
- $<100\text{keV}$  のイベントレート:  
     $^{238}\text{U}$  と同レベル

## ➤ 検出器周りのシールドディンク

- PMT中の不純物からの放射線レベルより低減するのに十分な水シールドの厚みの見積もりを行った

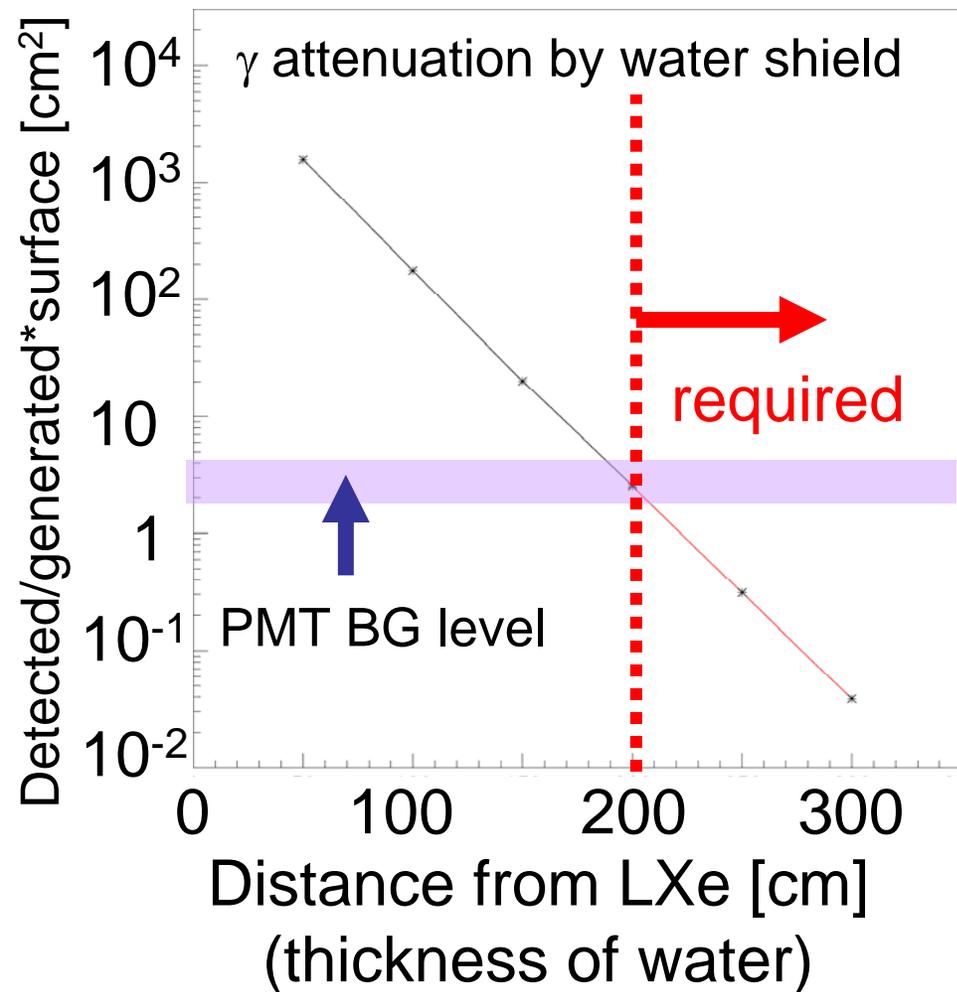


MC geometry

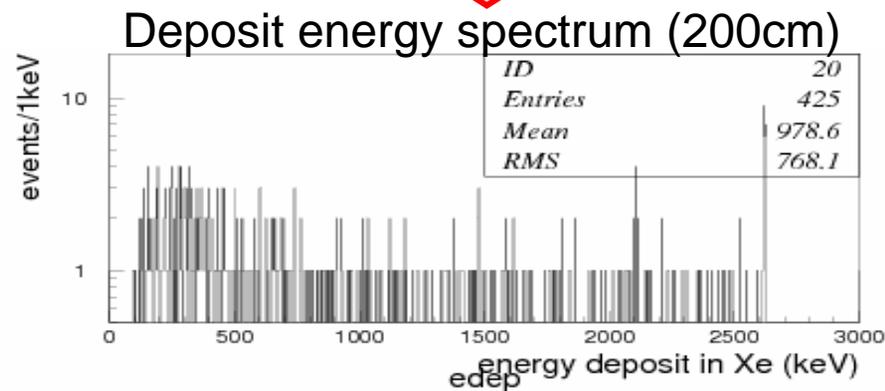
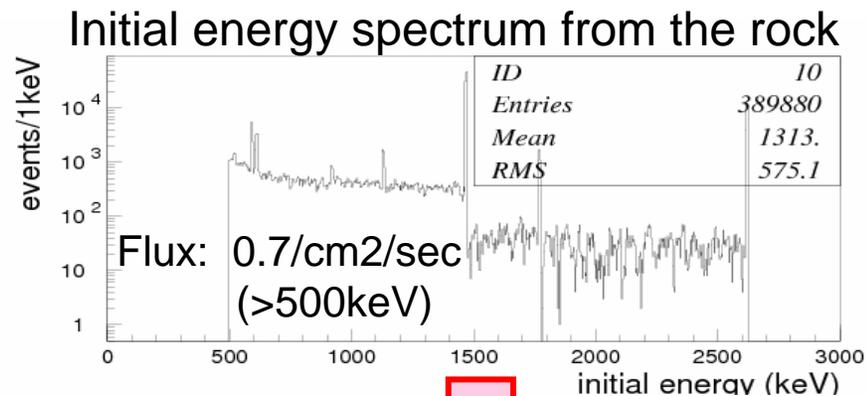
### 用いられたパラメータ

- 直径 80cm の液体 Xe
- 様々な厚みの水  
50, 100, 150, 200cm
- 液体 Xe と水 の間に厚さ 2cm の銅 (chamber)

# ➤ $\gamma$ 線の低減



\*縦軸は、水の厚みによる全表面積  
の変化を考慮した量



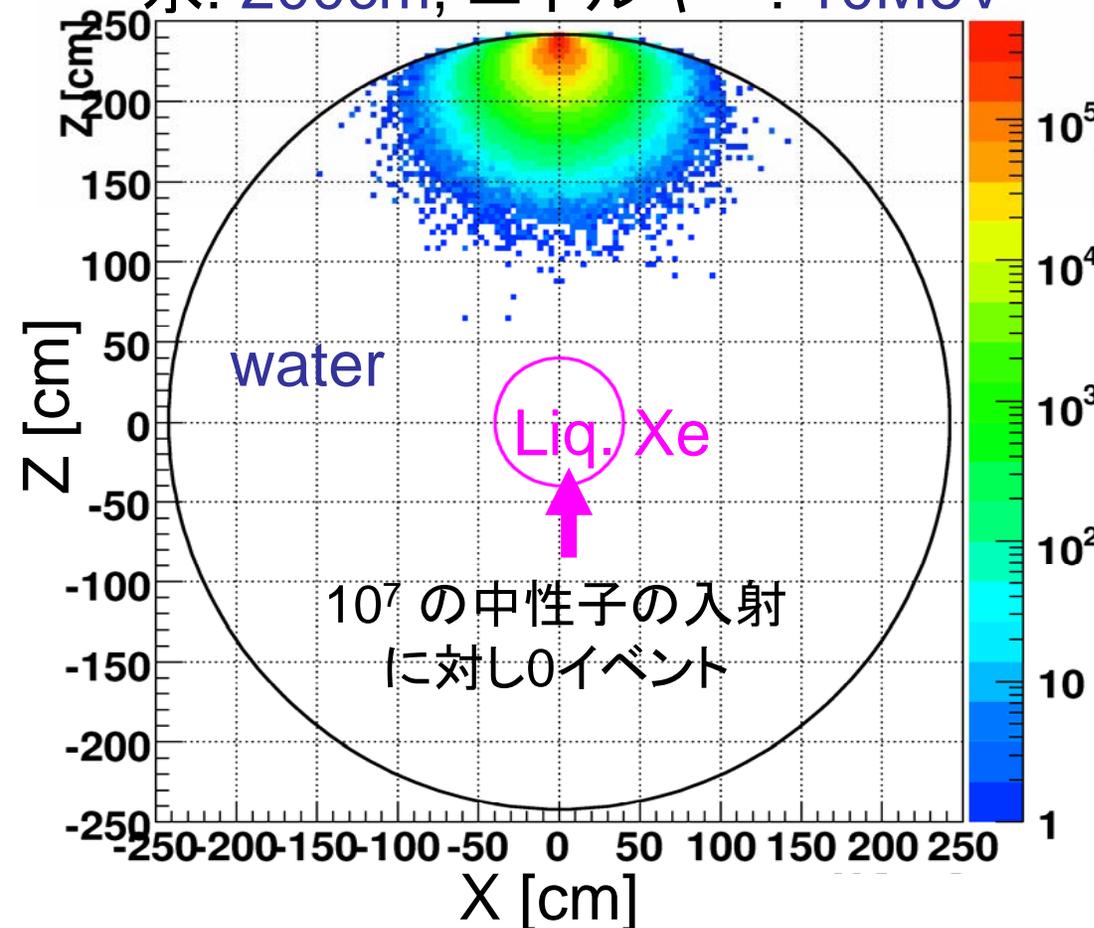
PMT からの  $\gamma$  と同レベル  
にまで低減するには、  
水200cm以上が必要

5 × 5 × 5m<sup>3</sup> 以上の広さがあれば  
よい (十分、現実的)。

# ▶ 高速中性子の低減

熱中性子になるまでに到達できる点

水: 200cm, エネルギー: 10MeV



発生中性子数:  $10^7$

- Fast n flux @Kamioka mine:  $(1.15 \pm 0.12) \times 10^{-5} / \text{cm}^2 / \text{sec}$
- Assuming all the energies are 10 MeV very conservatively



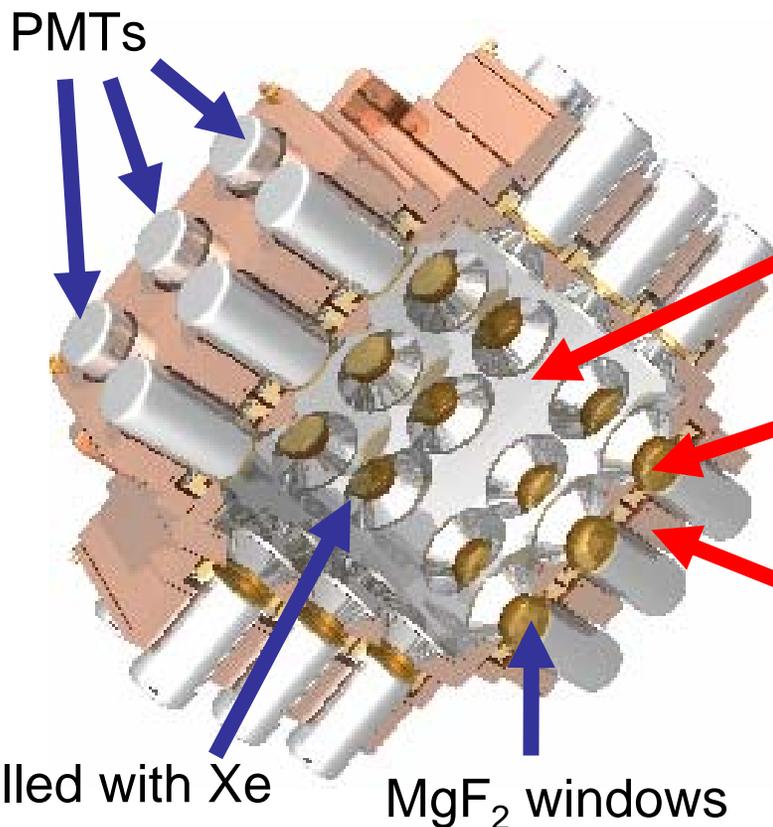
$< 2 \times 10^{-4} \text{ cpd/kg}$

水200cm あれば必要な  
レベルまで高速中性子が  
低減できる

〔 熱中性子によるBGの影響  
の見積もりはこれから 〕

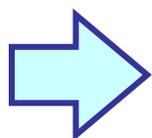
# 3. Prototype による暗黒物質探索実験

2006年11月21日～ 検出器がXeで満たされ、データ取得開始。  
現在データ取得・解析中



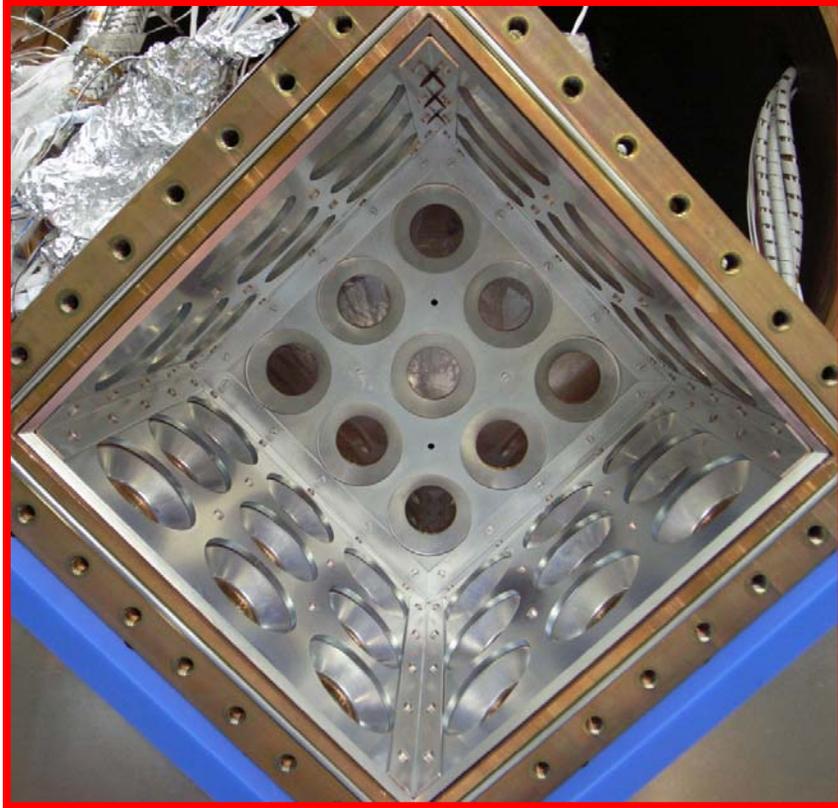
## ● 今回の測定の改良点

- Al 反射板による内面の被覆  
反射率改善により光子収率が向上
- PMTとMgF<sub>2</sub>窓の間の  
真空層を Krytox により充填  
全反射による光量損失を低減
- PMT周りに銅シールドを配置  
PMT由来の壁際低エネルギー事象で  
miss reconstruct によるBGを低減



これらの改良により、光量を増やし実効的なしきい値を  
下げることで暗黒物質に高い感度を持った測定を行う

## ➤ AI 反射板



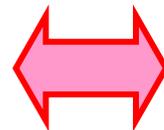
- 5mm 厚無酸素銅板 (6N)に  
Al (5N)  $\sim 1\mu\text{m}$ ,  $\text{MgF}_2$  数十nm を蒸着

アルミニウム: Xe シンチレーション光 ( $\sim 175\text{nm}$ )  
に大きな反射率をもつ

- テストチェンバーによるデータとMC  
の結果、さらにreference となる反射板  
の反射率データから、

AI 蒸着反射板(\*)の反射率:

69.9 (+15.0-10.6) % (Lamb.)

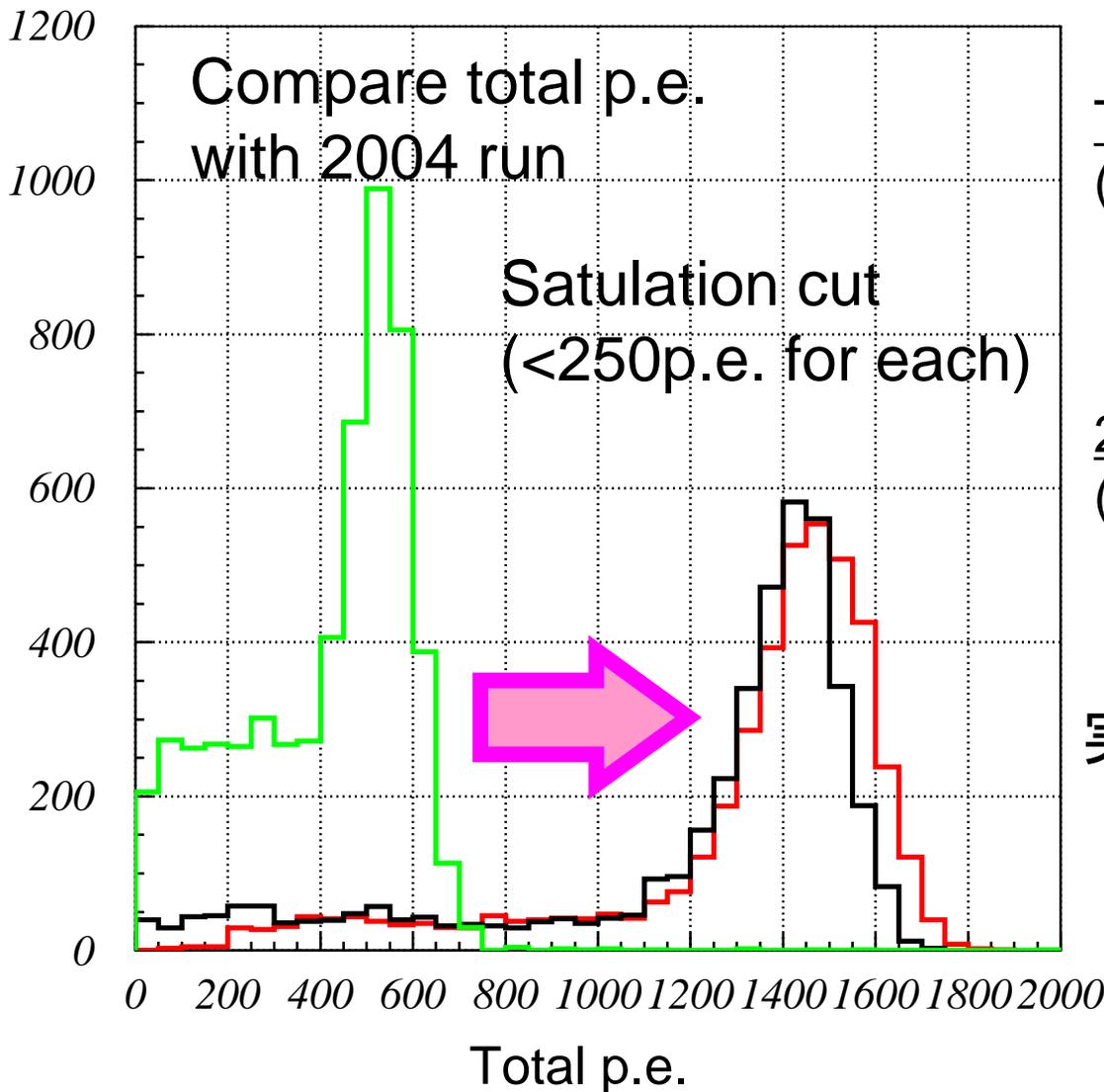


銅板:  $\sim 20\%$  (Spec.)

(\*) Al +  $\text{MgF}_2$  on S.E. Cu

# ➤ これまでに得られているデータ (preliminary)

$^{137}\text{Cs}$  from Hole A



This run

(A100cm, S55cm, R90%)

— Run3068( $8.25 \cdot 10^6$ )

— Run 3136( $0.35 \cdot 10^6$ )

2004 run

(A60cm, S55cm, R20%)

— Run1079 ( $8.25 \cdot 10^6$ )

実際に光量が増加している

# 4. まとめ

## ➤ XMASS 800kg 検出器

- 目標BGLレベル(<100keV):  $10^{-4}$  [cpd/kg/keV]
- 期待される暗黒物質探索感度:  $10^{-45}$  cm<sup>2</sup> (SI)
- MCによるBGの見積もりでは、現在のところ、  
20cm シールドで、 $\sim 10^{-5}$  [cpd/kg/keV] (PMT, <sup>238</sup>U, <sup>60</sup>Co)
- 水200cmのシールドで、岩石由来のBGを十分抑えられる

## ➤ プロトタイプ検出器による暗黒物質探索実験

- 光量を増やし、しきい値を下げる改良を行ったプロトタイプ  
検出器で現在データ取得・解析中
- これまでのデータから、光量は期待通り増加している

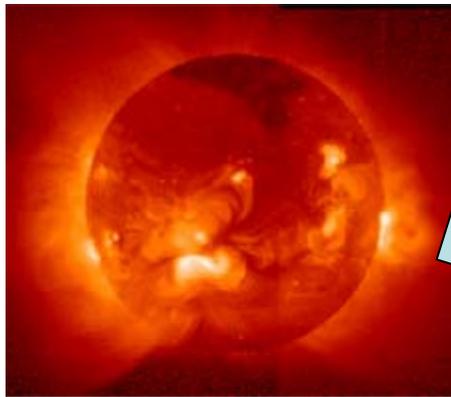
*Backup*

# 1. Introduction

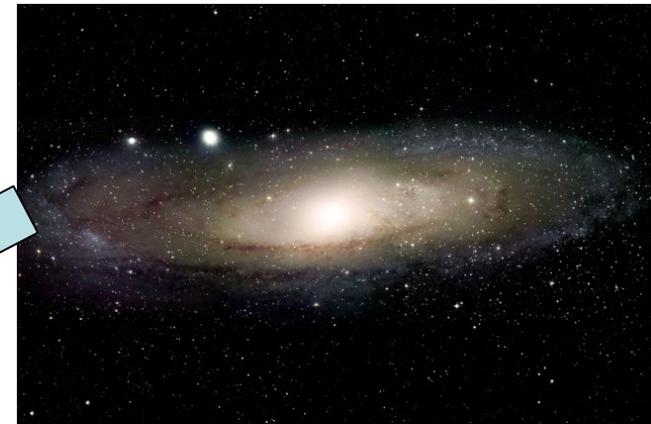
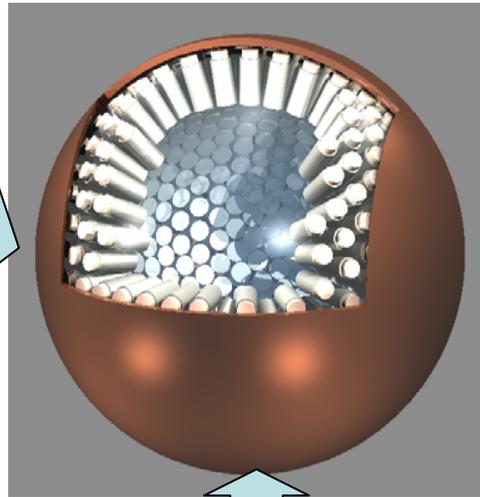
## ➤ What's XMASS

Multi purpose low-background experiment with liq. Xe

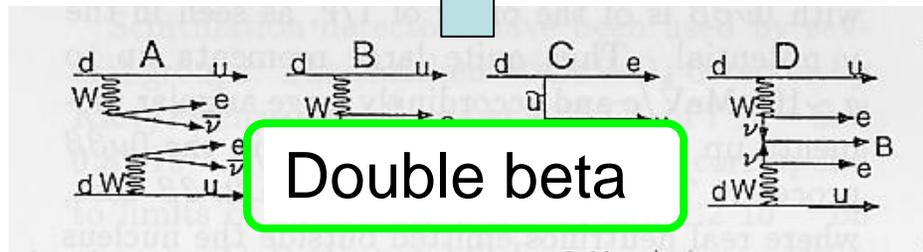
- **X**enon **MASS**ive detector for solar neutrino (**pp/** $^7\text{Be}$ )
- **X**enon neutrino **MASS** detector ( **$\beta\beta$  decay**)
- **X**enon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (**DM search**)



Solar neutrino



Dark matter



## ➤ 800 kg 検出器デザインの進捗状況

### ● プロトタイプ検出器(100kg)を用いた基本性能 study

- ✓ Vertex and energy reconstruction by fitter
- ✓ Self shielding power
- ✓ BG level

→これまでに報告済

### ● MC を用いた検出器デザイン

- 検出器の基本構造
- 事象の位置再構成
- BG の見積もり
- 検出器周りのシールドディング

→今回報告

# ➤ BG の見積もり

プロトタイプにより既に得られている値

Goal (800kg detector)

- $\gamma$  ray from PMTs  $\sim 10^{-2}$  cpd/kg/keV  $\xrightarrow{1/100}$   $10^{-4}$  cpd/kg/keV  
→ Increase volume for self shielding  
→ Decrease radioactive impurities in PMTs ( $\sim 1/10$ )

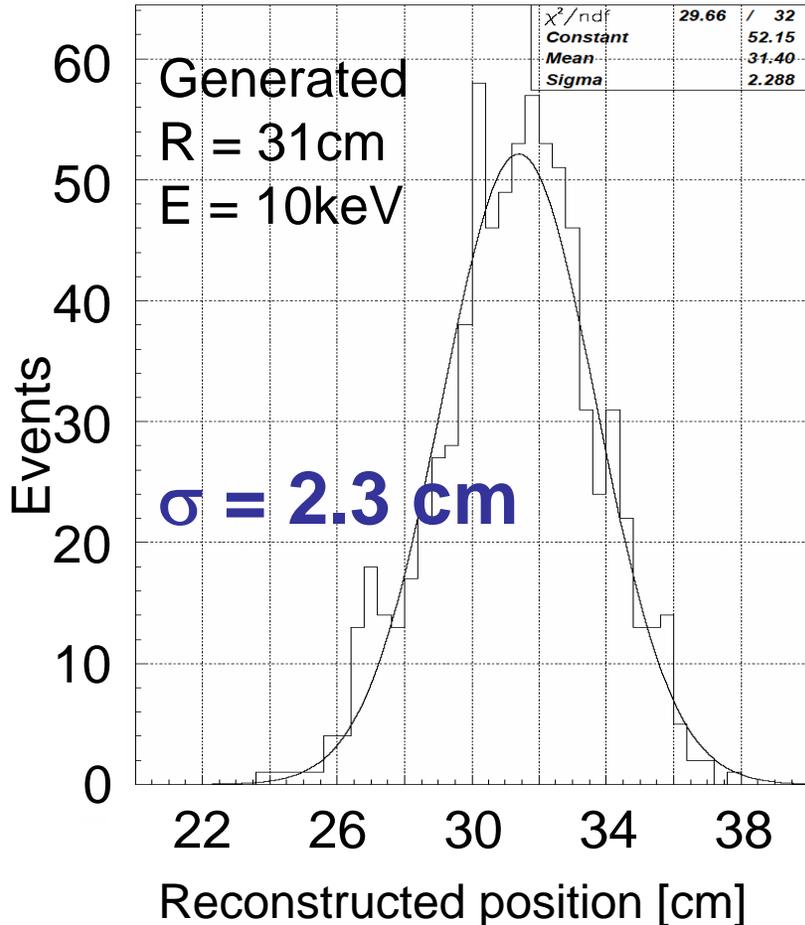


この目標が達成できるかどうかを見積もった

- $^{238}\text{U} = (33 \pm 7) \times 10^{-14}$  g/g  $\xrightarrow{1/33}$   $1 \times 10^{-14}$  g/g  
→ Remove by filter
- $^{232}\text{Th} < 23 \times 10^{-14}$  g/g (90% C.L.)  $\xrightarrow{1/12}$   $2 \times 10^{-14}$  g/g  
→ Remove by filter (Only upper limit)
- Kr =  $3.3 \pm 1.1$  ppt  $\xrightarrow{1/3}$  1 ppt  
→ Achieve by 2 purification pass

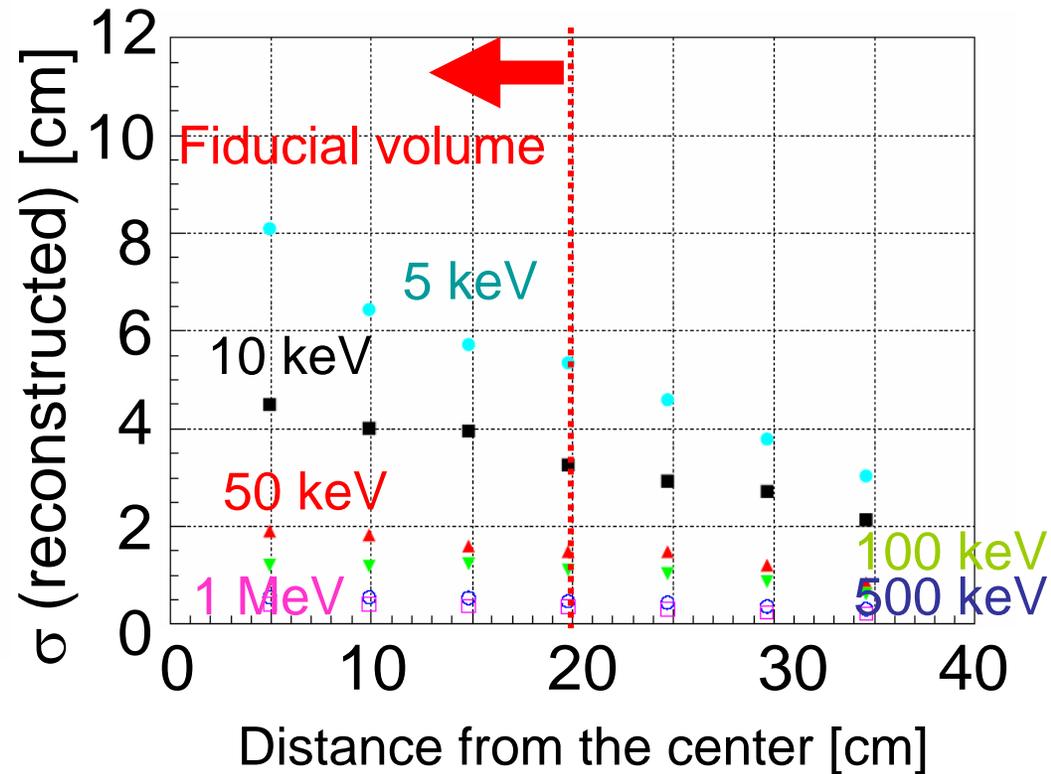
# 事象の位置再構成

## ● Position resolution

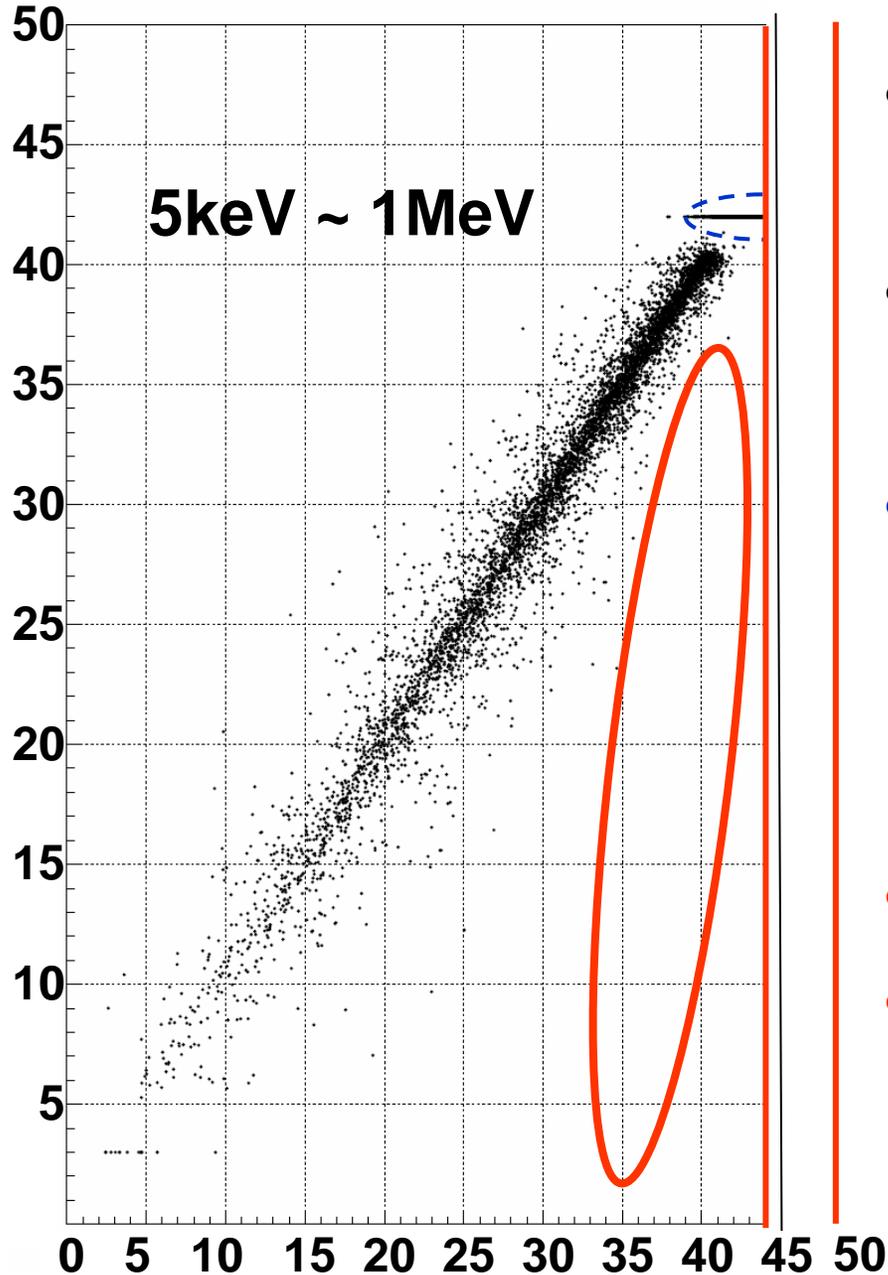


@Boundary of fiducial volume

$\left\{ \begin{array}{l} 10 \text{ keV} \sim 3.2 \text{ cm} \\ 5 \text{ keV} \sim 5.3 \text{ cm} \end{array} \right.$



R\_reconstructed(cm)



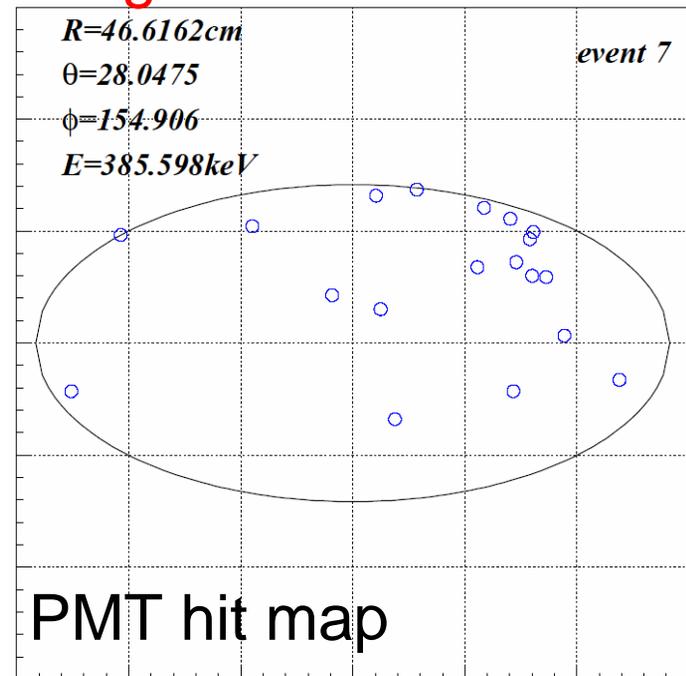
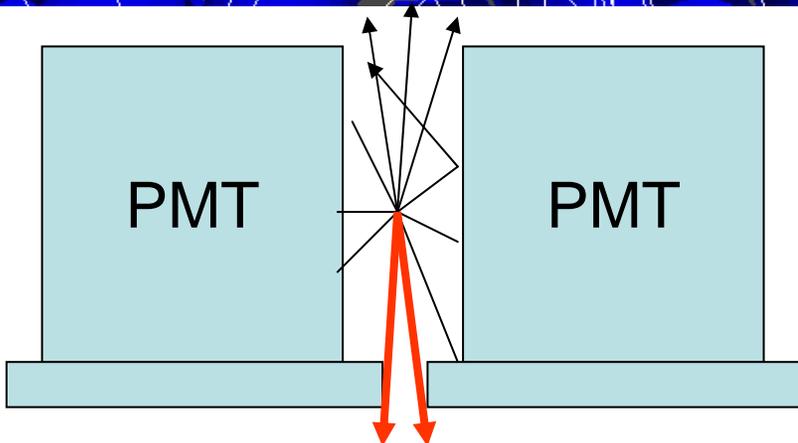
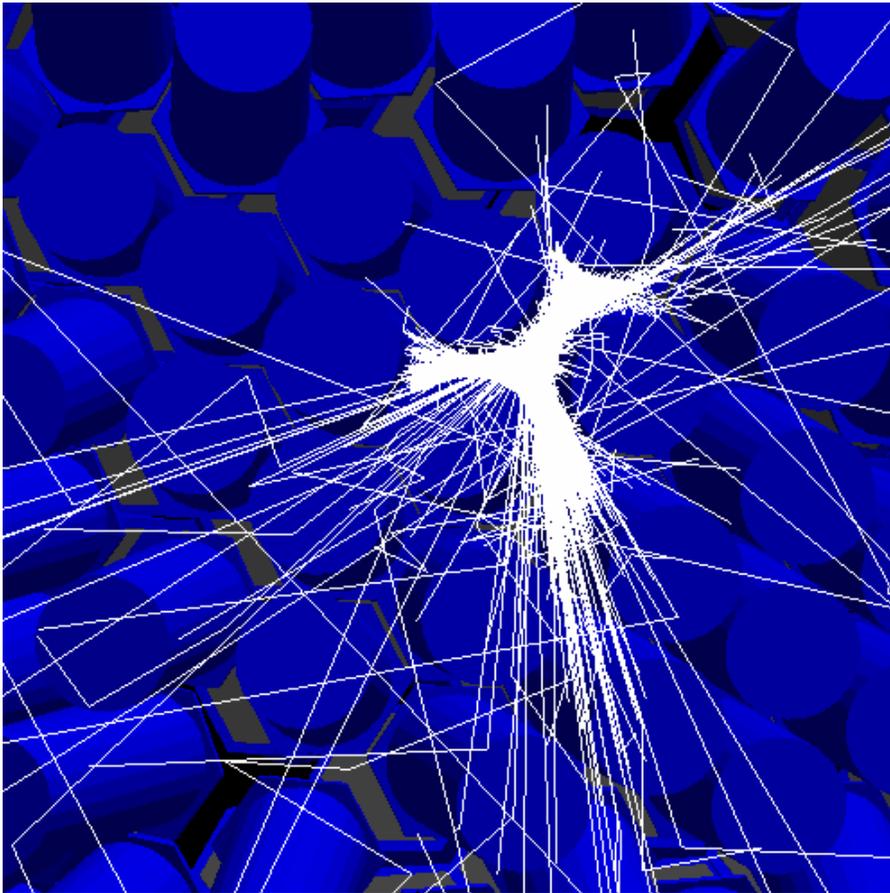
- Generated VS reconstructed
- Up to  $< \sim 40$ cm, events are well reconstructed with position resolution of  $\sim 2 \sim 5$ cm
- Out of 42cm, grid whose most similar distribution is selected because of no grid data
- In the 40cm $\sim$ 44cm region, reconstructed events are concentrated around 42cm, but they are not mistaken for those occurred in the center
- No wall effect
- Out of 45cm, some events occurring behind the PMT are miss reconstructed (light leak)

# Light leak events

Some scintillation lights generated behind the PMT enter the inner region



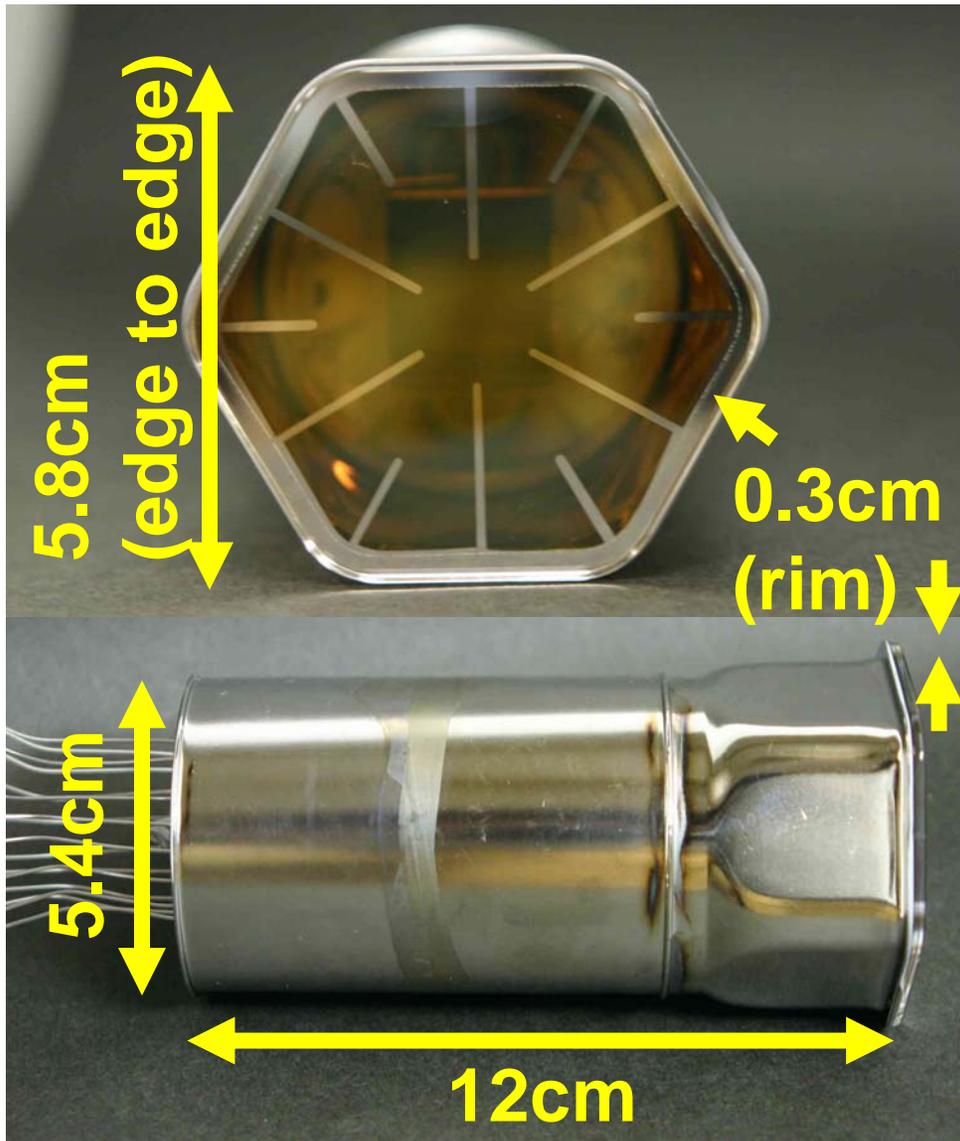
It is not problem if light shield is installed



# XMASS collaboration

- **ICRR, Kamioka** Y. Suzuki, M. Nakahata, S. Moriyama, M. Shiozawa, Y. Takeuchi, M. Miura, Y. Koshio, K. Abe, H. Sekiya, A. Takeda, H. Ogawa, A. Minamino, T. Iida, K. Ueshima
- **ICRR, RCNN** T. Kajita, K. Kaneyuki
- **Saga Univ.** H. Ohsumi
- **Tokai Univ.** K. Nishijima, T. Maruyama, Y. Sakurai
- **Gifu Univ.** S. Tasaka
- **Waseda Univ.** S. Suzuki, J. Kikuchi, T. Doke, A. Ota, Y. Ebizuka
- **Yokohama National Univ.** S. Nakamura, Y. Uchida, M. Kikuchi, K. Tomita, Y. Ozaki, T. Nagase, T. Kamei, M. Shibasaki, T. Ogiwara
- **Miyagi Univ. of Education** Y. Fukuda, T. Sato
- **Nagoya ST** Y. Itow
- **Seoul National Univ.** Soo-Bong Kim
- **INR-Kiev** O. Ponkratenko
- **Sejong univ.** Y.D. Kim, J.I. Lee, S.H. Moon

# Hamamatsu R8778MOD(hex)



- Hexagonal quartz window
- Effective area:  $\phi 50\text{mm}$  (min)
- QE  $< \sim 25\%$  (target)
- Aiming for 1/10 lower background than R8778

c.f. R8778

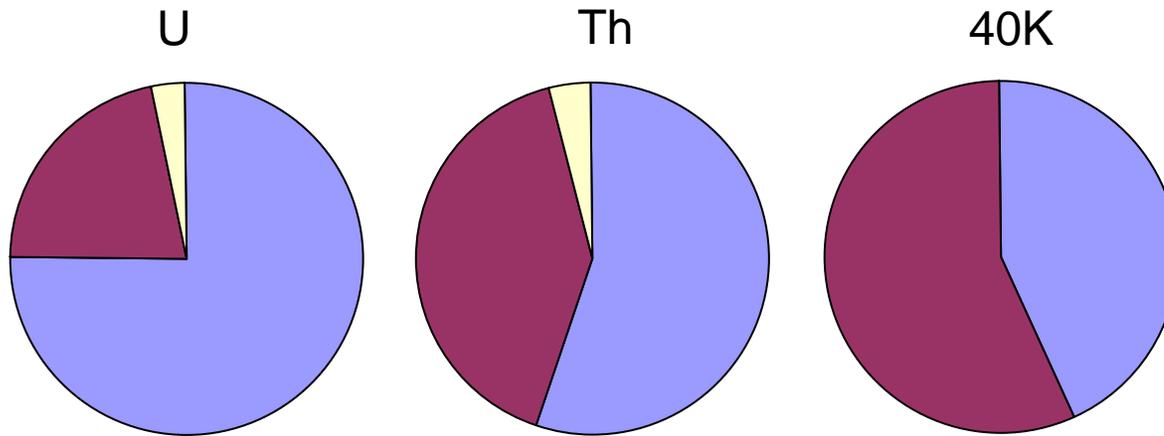
U	$1.8 \pm 0.2 \times 10^{-2}$ Bq
Th	$6.9 \pm 1.3 \times 10^{-3}$ Bq
$^{40}\text{K}$	$1.4 \pm 0.2 \times 10^{-1}$ Bq

- **Prototype has been manufactured already**
- Now, being tested

**c.f. R8778 (used for 100kg chamber)**

<b>U</b>	<b><math>1.8 \pm 0.2 \times 10^{-2}</math> Bq</b>
<b>Th</b>	<b><math>6.9 \pm 1.3 \times 10^{-3}</math> Bq</b>
<b><math>^{40}\text{K}</math></b>	<b><math>1.4 \pm 0.2 \times 10^{-1}</math> Bq</b>

※measured by  
HPGe detector  
in Kamioka



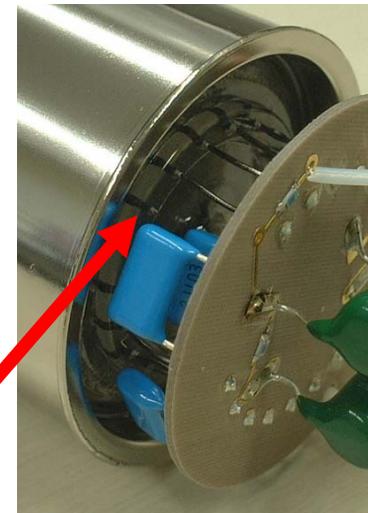
■ Ceramic dielectric parts to support dynodes

For R8778mod → using quartz

■ Glass parts for feed through & containment

For R8778mod → Reduce glass material

**Improvement result will be coming soon!**



# 800kg 検出器デザインのまとめ

## ● XMASS 800kg 検出器

- 液体キセノン~1 ton、直径90cm、60面体、812PMTs
- 目標BGLレベル(<100keV):  $10^{-4}$  [cpd/kg/keV]
- 期待される暗黒物質探索感度:  $10^{-45}$  cm<sup>2</sup> (SI)

## ● MCによる性能評価

### ■ 位置分解能

- 中心から25cmの位置で: 10keV ~3cm, 5keV ~5cm

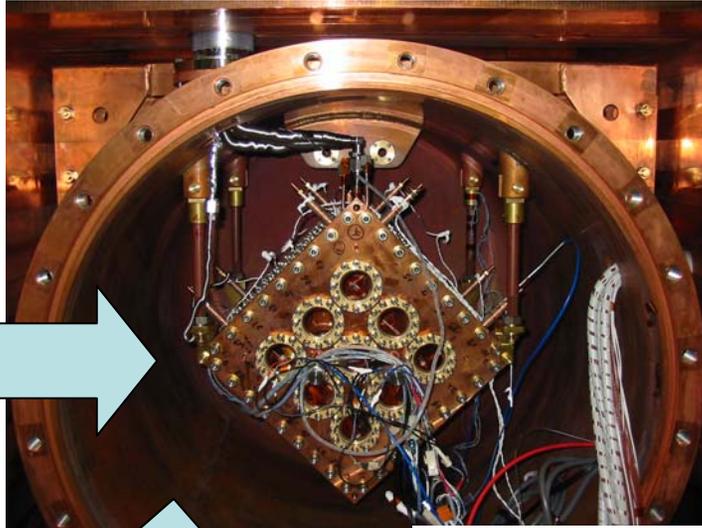
### ■ PMTからのBG (<sup>238</sup>U, <sup>60</sup>Co)

- 20cm シールドで:  $\sim 10^{-5}$  [cpd/kg/keV]

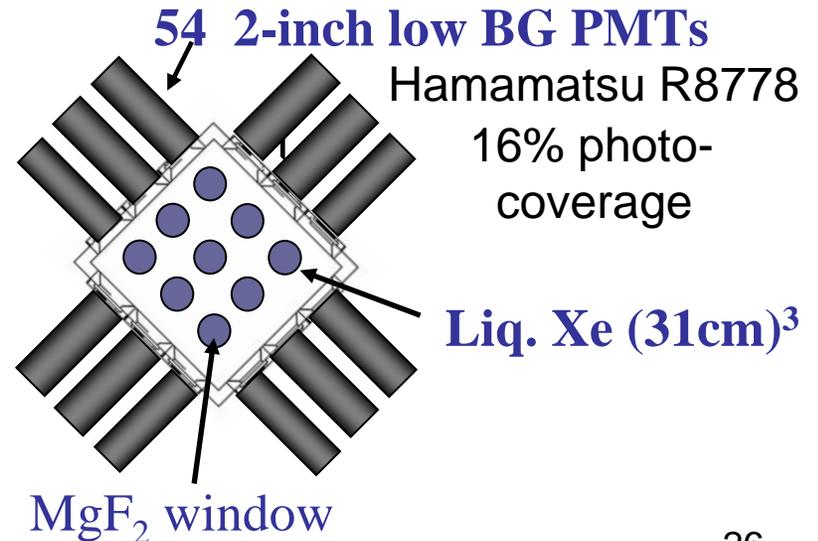
### ■ 検出器周りのシールドニング

- 水200cm で、岩石からの  $\gamma$  線、岩石中の放射性不純物起源の中性子による影響を目標レベル以下に低減できる

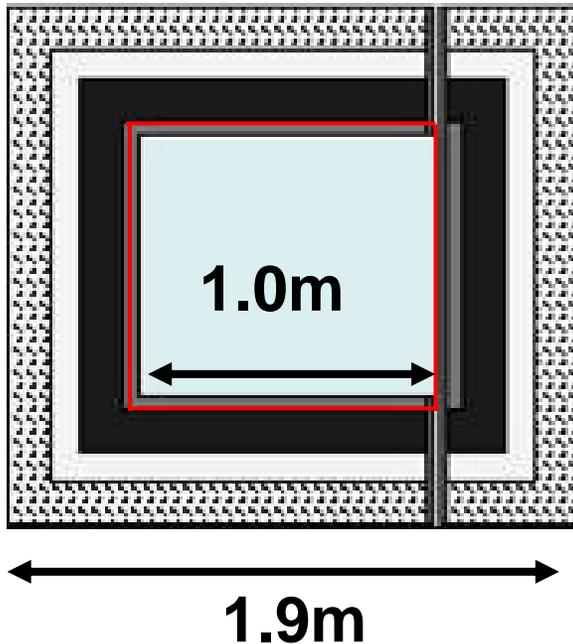
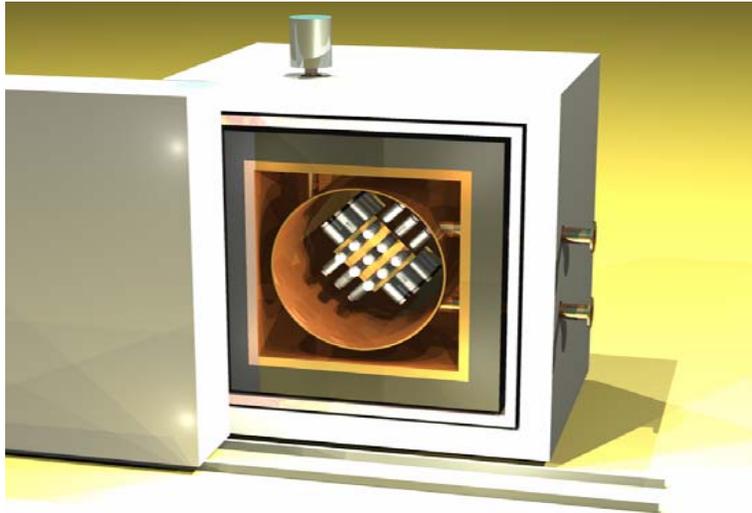
# ➤ 100 kg prototype detector



In the  
Kamioka Mine  
(near the Super-K)  
2,700 m.w.e.



# 4 $\pi$ shield with door



material	thickness
 Polyethylene	15cm
 Boron	5cm
 Lead	15cm
 EVOH sheets	30 $\mu$ m
 OF Copper	5cm

 Rn free air ( $\sim 3\text{mBq/m}^3$ )

# ➤ Vertex and energy reconstruction

Reconstruction is performed by  
PMT charge pattern (not timing)

Calculate PMT acceptances from various  
vertices by Monte Carlo.

Vtx.: compare acceptance map  $F(x,y,z,i)$

Ene.: calc. from obs. p.e. & total accept.

$$\text{Log}(L) = \sum_{\text{PMT}} \text{Log}\left(\frac{\exp(-\mu)\mu^n}{n!}\right)$$

L: likelihood

$$\mu: \frac{F(x,y,z,i)}{\sum F(x,y,z,i)} \times \text{total p.e.}$$

n: observed number of p.e.

$F(x,y,z,i)$ : acceptance for i-th PMT (MC)

VUV photon characteristics:

$$L_{\text{emit}} = 42 \text{ ph/keV}$$

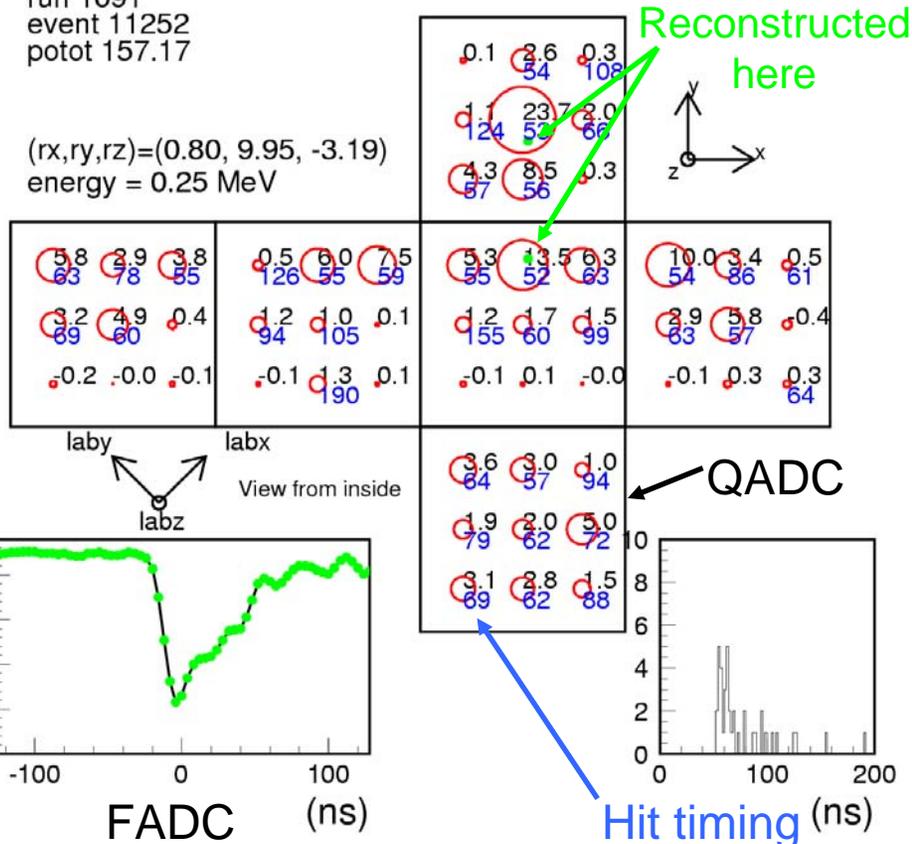
$$\tau_{\text{abs}} = 100 \text{ cm}$$

$$\tau_{\text{scat}} = 30 \text{ cm}$$

## XMASS prototype detector

run 1091  
event 11252  
potot 157.17

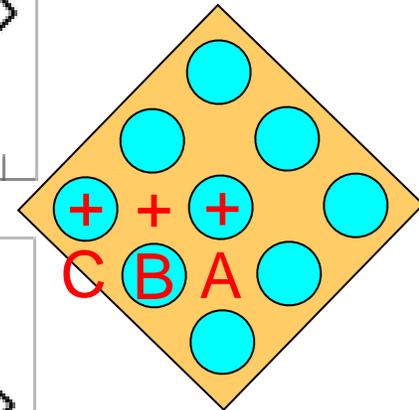
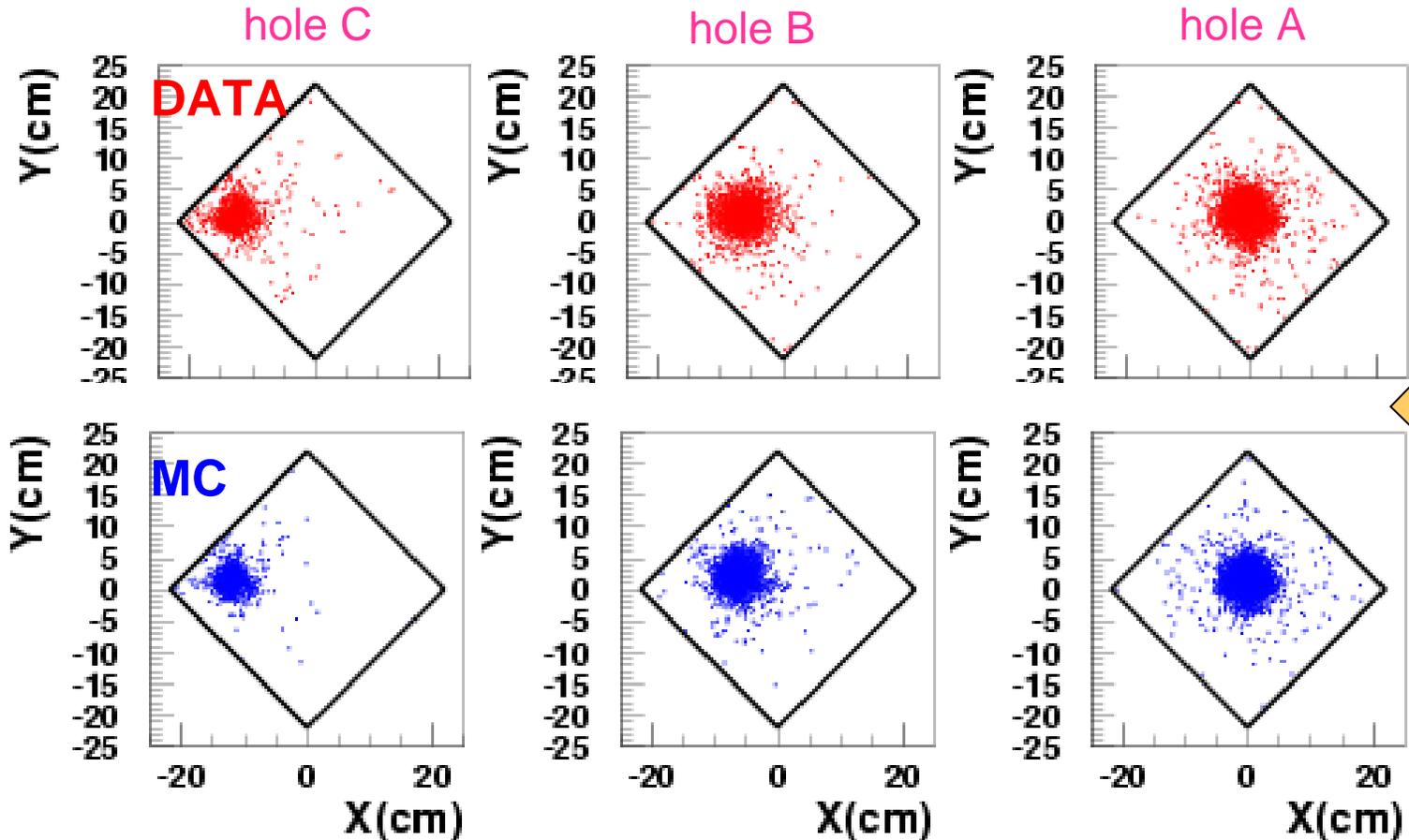
(rx,ry,rz)=(0.80, 9.95, -3.19)  
energy = 0.25 MeV



=== Background event sample ===  
QADC, FADC, and hit timing  
information are available for analysis

# Performance of the vertex reconstruction

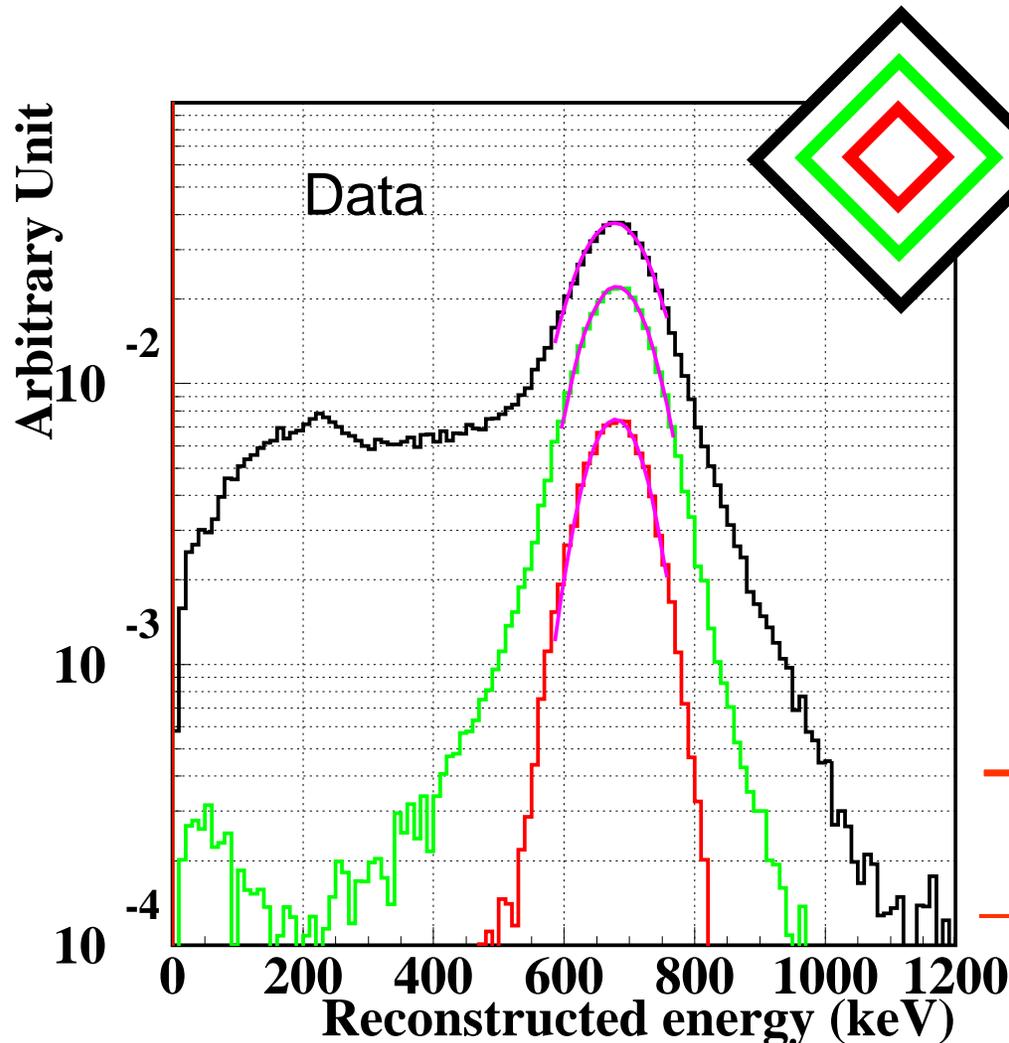
Collimated  $\gamma$  ray source run from 3 holes ( $^{137}\text{Cs}$ , 662keV)



→ Vertex reconstruction works well

# Performance of the energy reconstruction

Collimated  $\gamma$  ray source run from center hole ( $^{137}\text{Cs}$ , 662keV)



- All volume
- 20cm FV
- 10cm FV

$\sigma=65\text{keV}@peak$   
( $\sigma/E \sim 10\%$ )

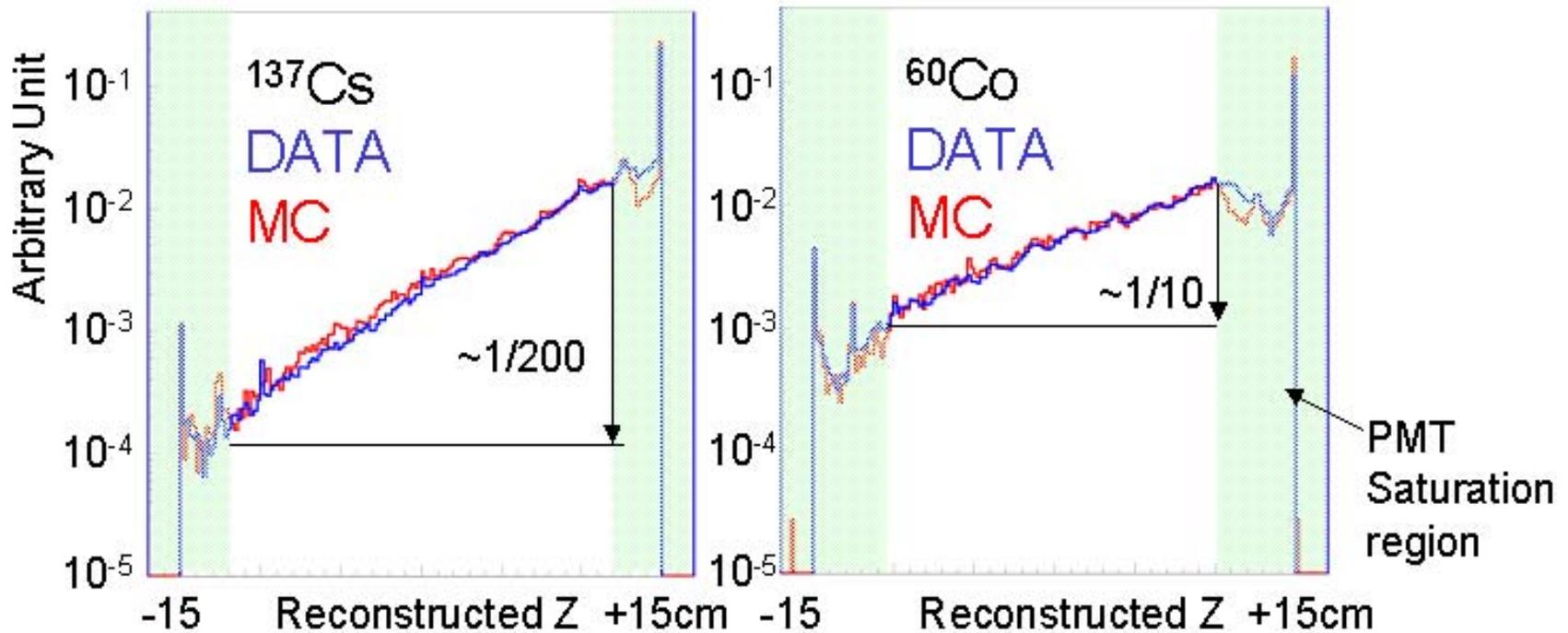
Similar peak position in  
each fiducial.

→ No position bias

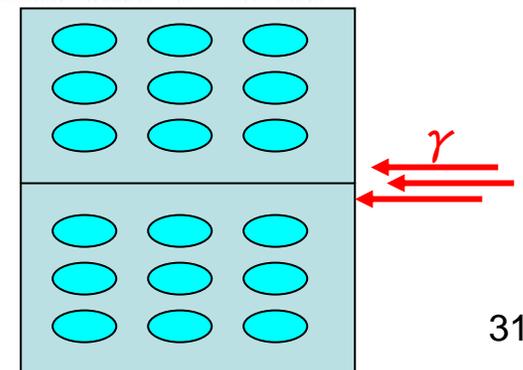
→ Energy reconstruction  
works well

# Demonstration of self shielding effect

z position distribution of the collimated  $\gamma$  ray source run



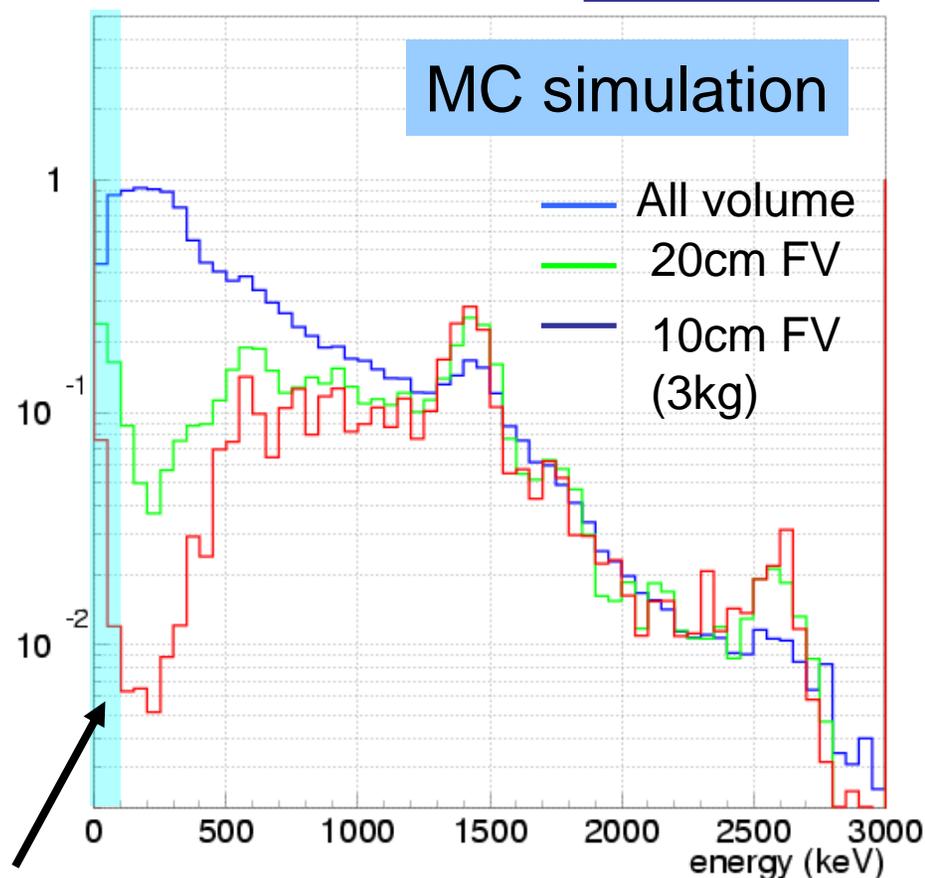
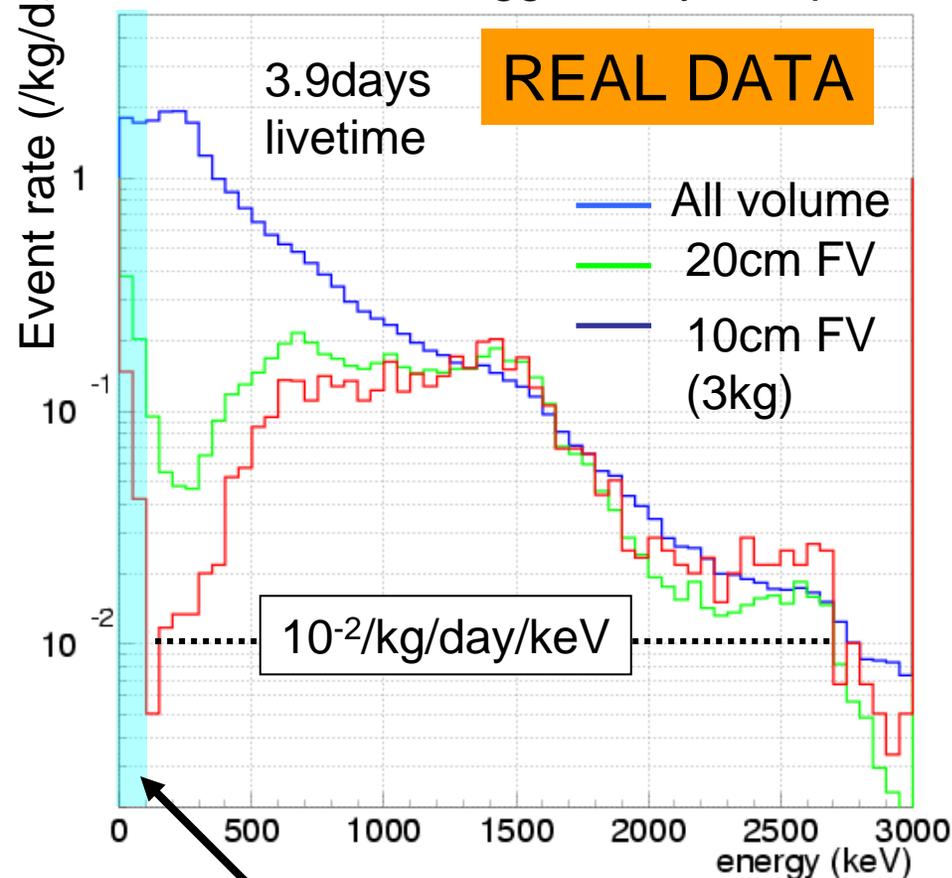
→ Data and MC agree well



# Shelf shielding for real data and MC

Aug. 04 run  
preliminary

~1.6Hz, 4 fold, triggered by ~0.4p.e.



Miss-reconstruction due to dead-angle region from PMTs.

- **Good agreement** (< factor 2)
- **Self shielding effect** can be seen clearly.
- **Very low background** ( $10^{-2}$  /kg/day/keV @ 100-300 keV)

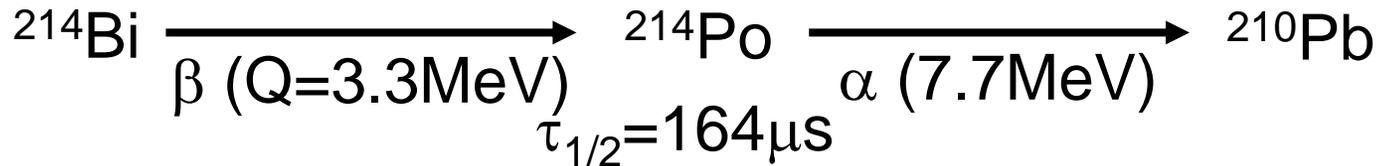
# ➤ Internal backgrounds in liq. Xe were measured

Main sources in liq. Xe are **Kr**, **U-chain** and **Th-chain**

- **Kr** =  $3.3 \pm 1.1$  ppt (by mass spectrometer)  
→ Achieved by distillation

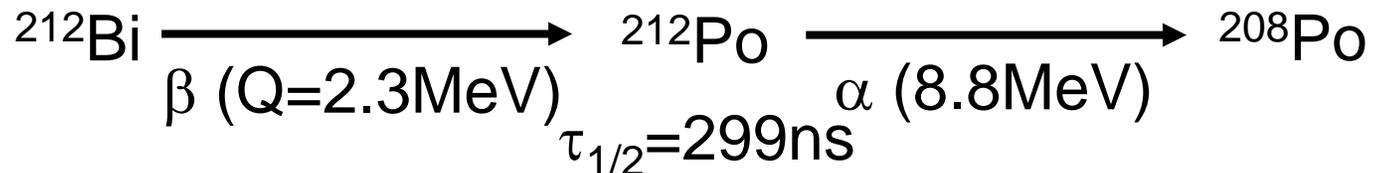
- **U-chain** =  $(33 \pm 7) \times 10^{-14}$  g/g (by prototype detector)

Delayed coincidence search (radiation equilibrium assumed)



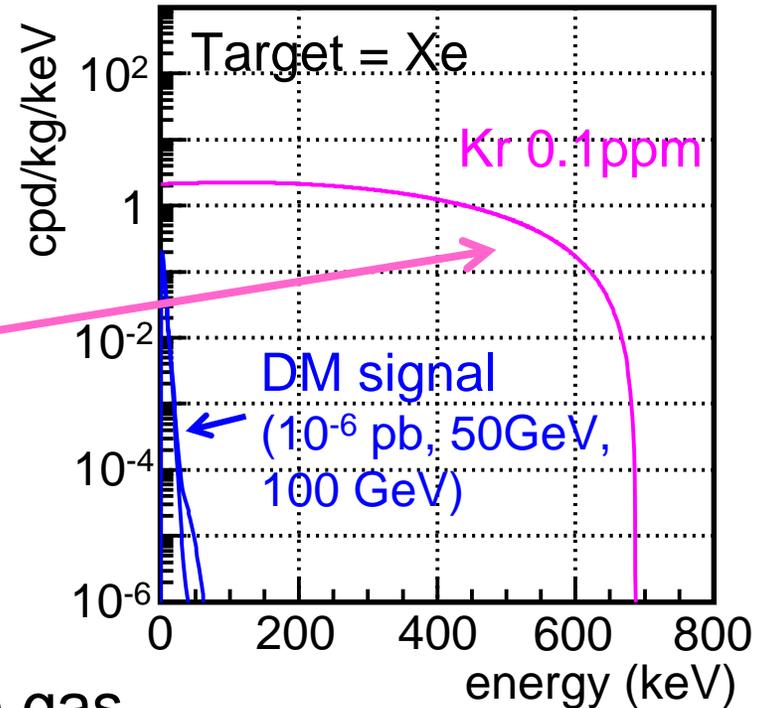
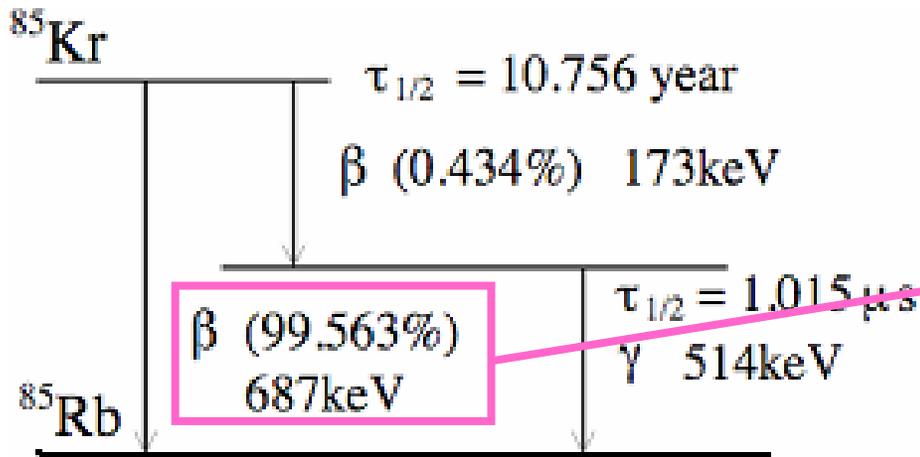
- **Th-chain** <  $23 \times 10^{-14}$  g/g (90%CL) (by prototype detector)

Delayed coincidence search (radiation equilibrium assumed)



# Kr concentration in Xe

- $^{85}\text{Kr}$  makes BG in low energy region



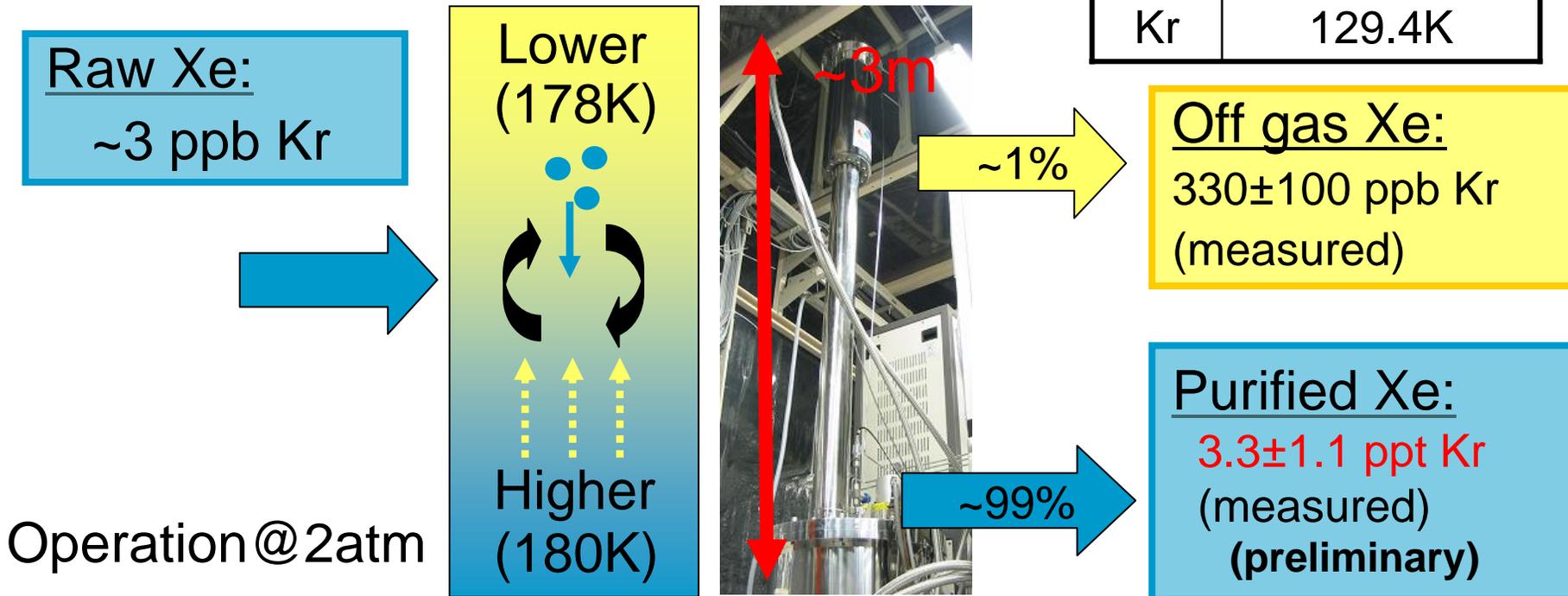
- Kr can easily mix with Xe because both Kr and Xe are rare gas
- Commercial Xe contains a few ppb Kr

# Xe purification system

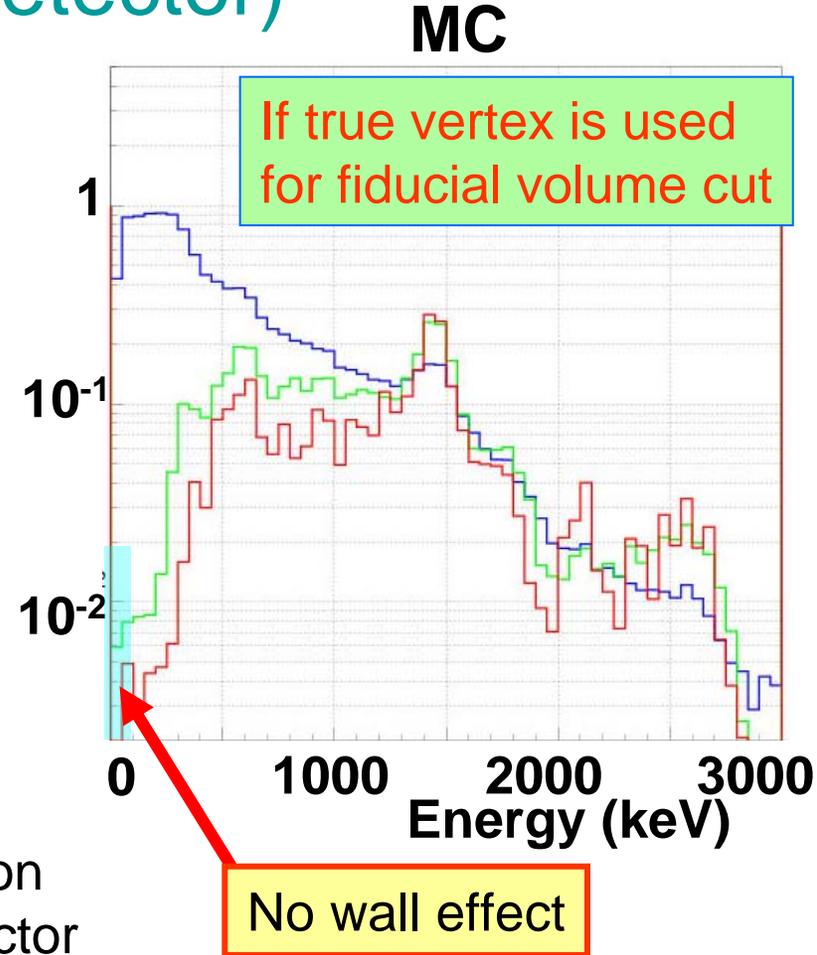
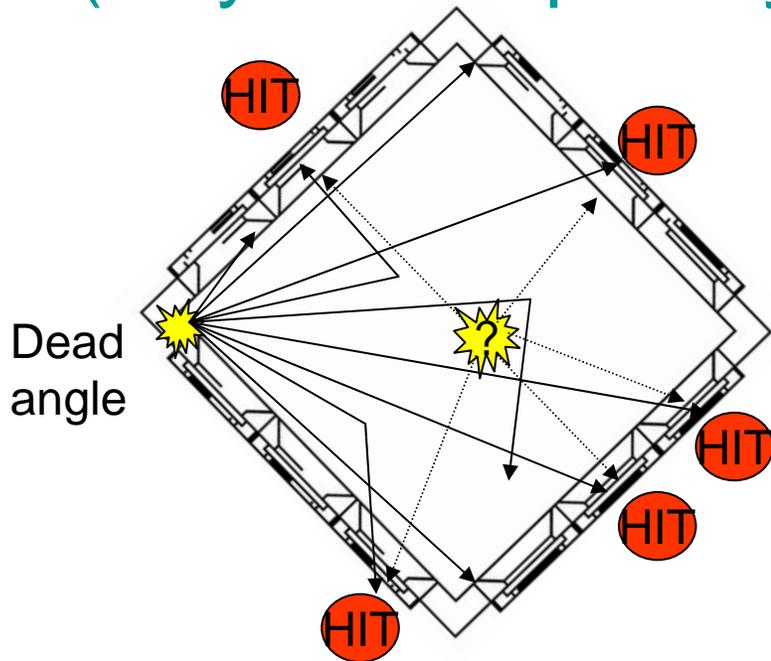
- XMASS succeeds to reduce Kr concentration in Xe from  $\sim 3$ [ppb] to  $3.3(\pm 1.1)$ [ppt] with one cycle ( $\sim 1/1000$ )

- Processing speed : 0.6 kg / hour
- Design factor :  $1/1000$  Kr / 1 pass
- Purified Xe : Off gas = 99:1

	Boiling point (@2 atm)
Xe	178.1K
Kr	129.4K



# ➤ Remaining problem: wall effect (only for the prototype detector)

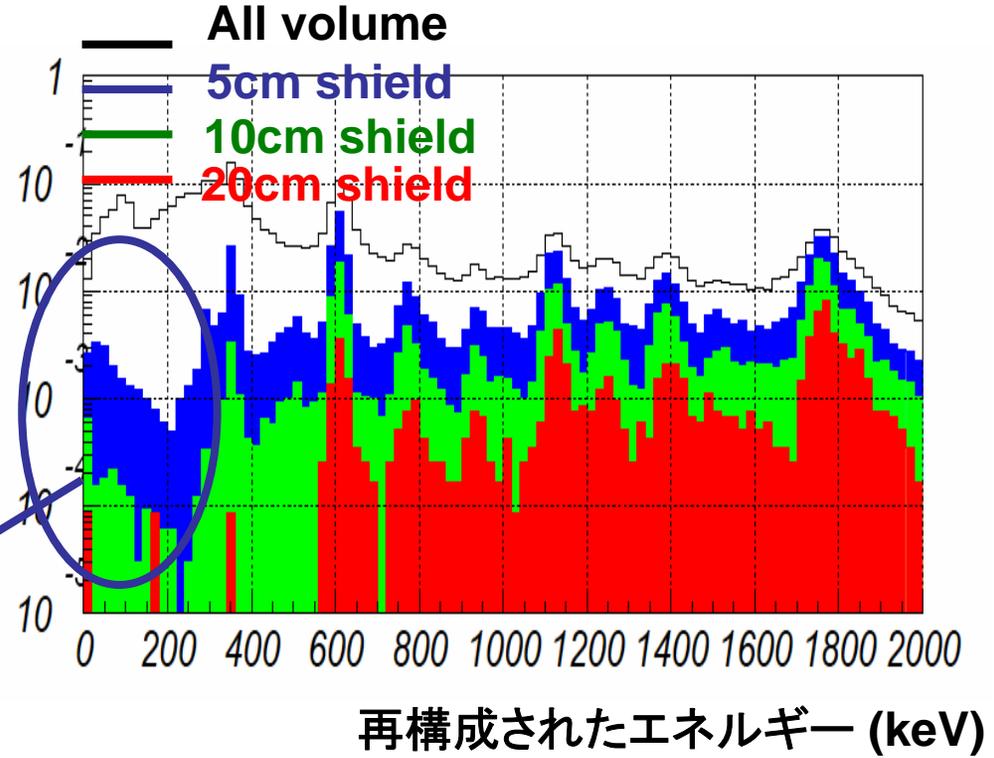
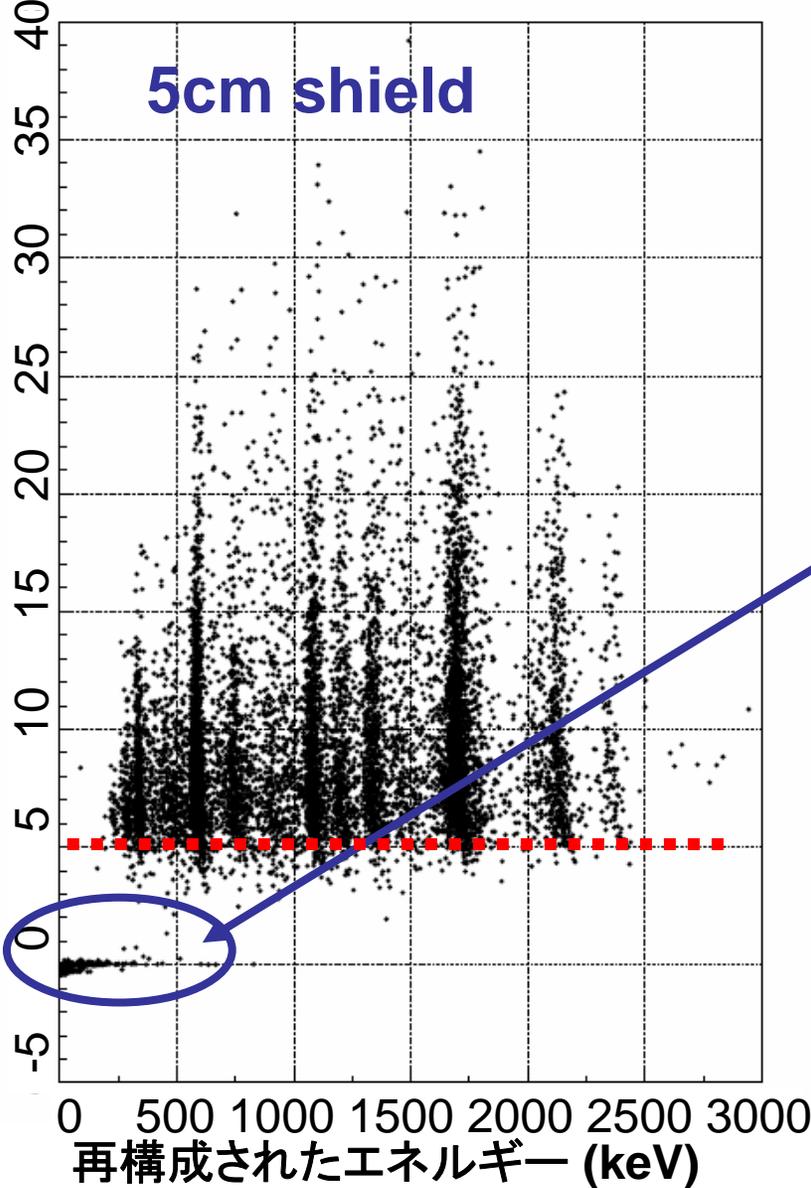


- Scintillation lights at the dead angle from PMTs give quite uniform 1 p.e. signal for PMTs, and this cause miss reconstruction as if the vertex is around the center of detector

➔ This effect does not occur with the sphere shape 800 kg detector

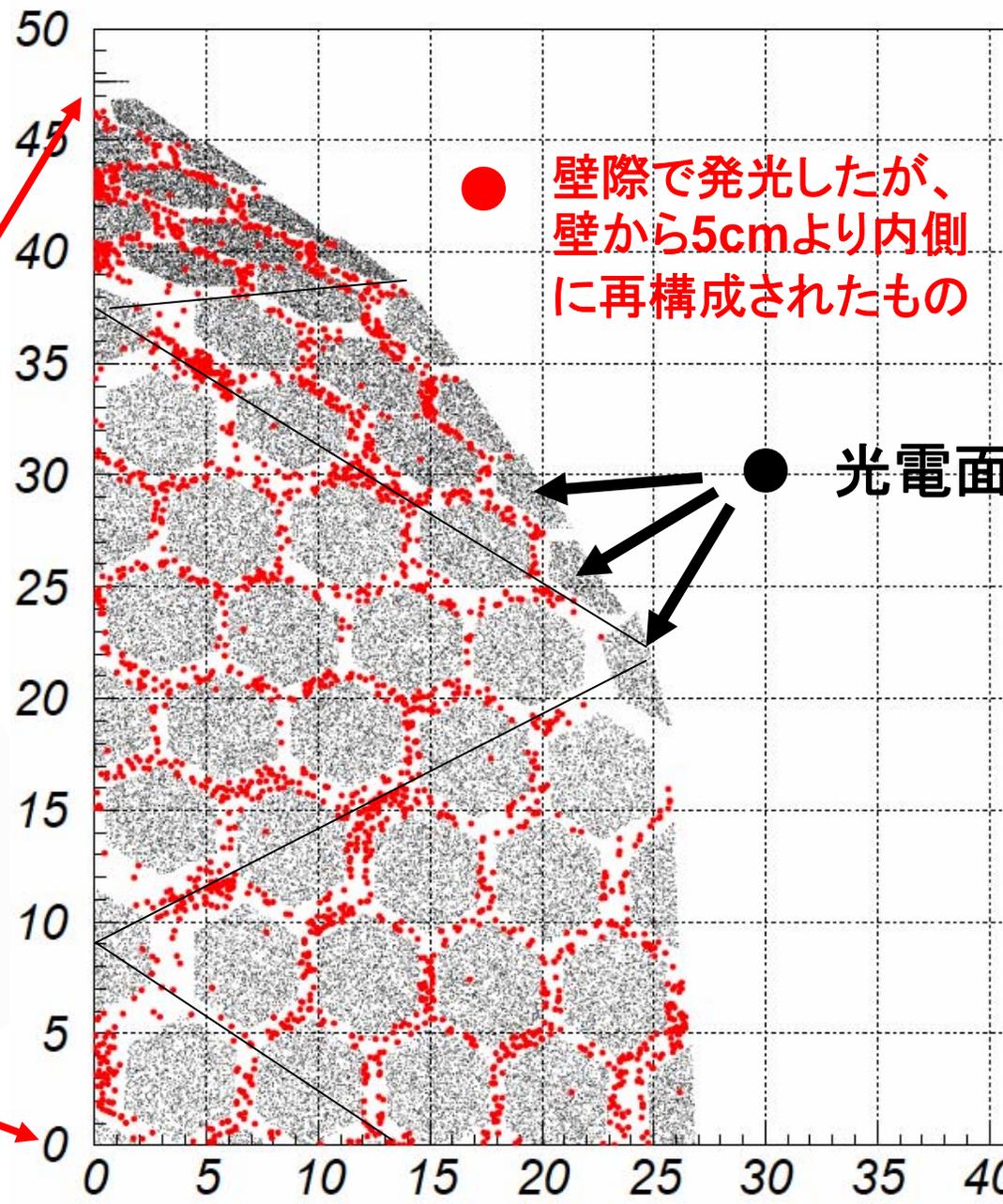
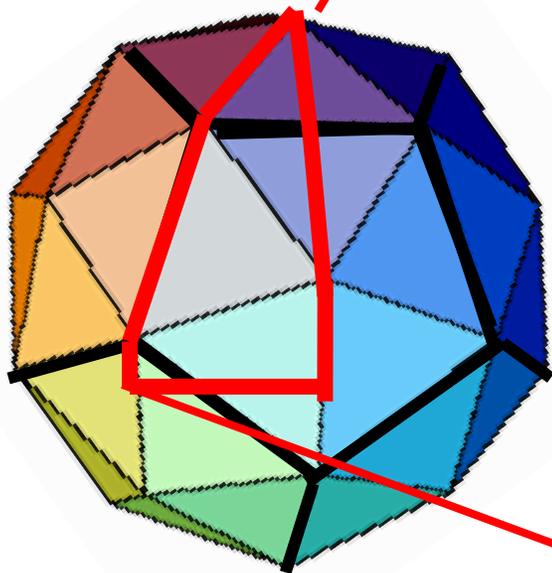
# Background study

発光点の壁からの  
距離(cm)

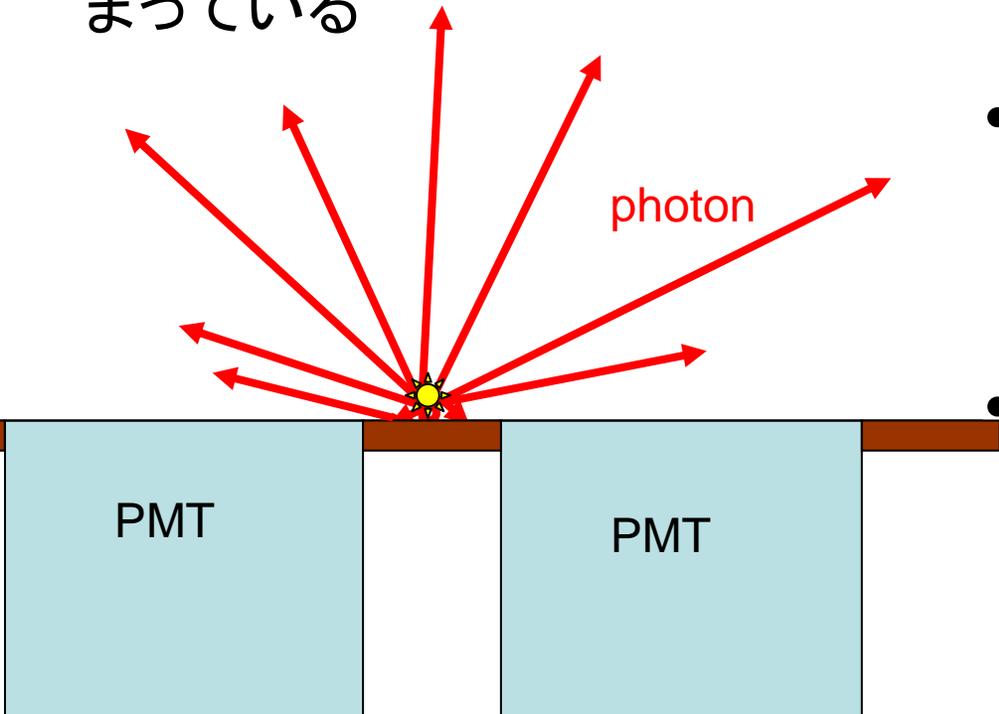
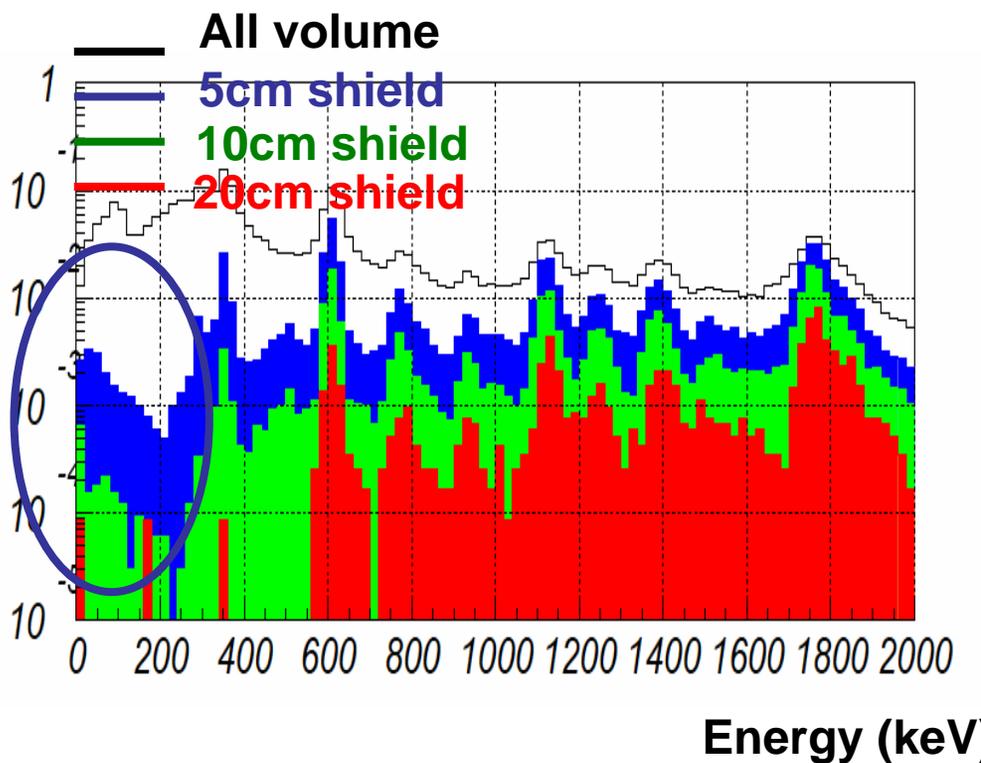


- 壁からの距離とエネルギーをプロット
- 200keV 以下にあるものは壁際のイベント

- これらのイベントが光った真の位置を光電面の位置と一緒にプロット
- PMTの隙間領域に集まる。



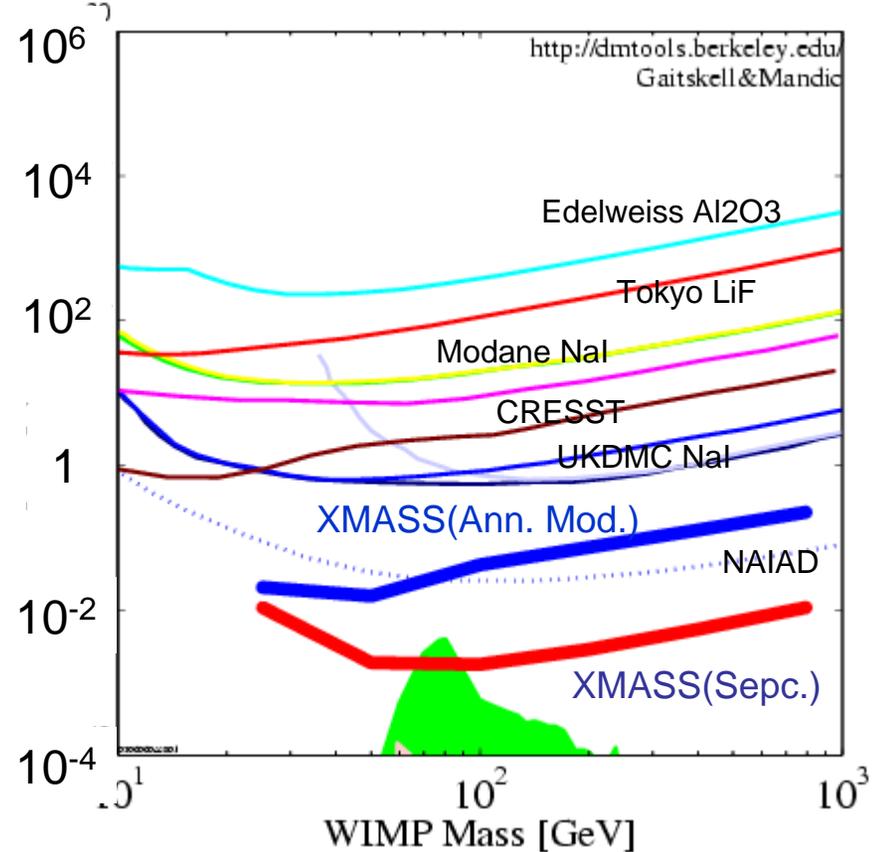
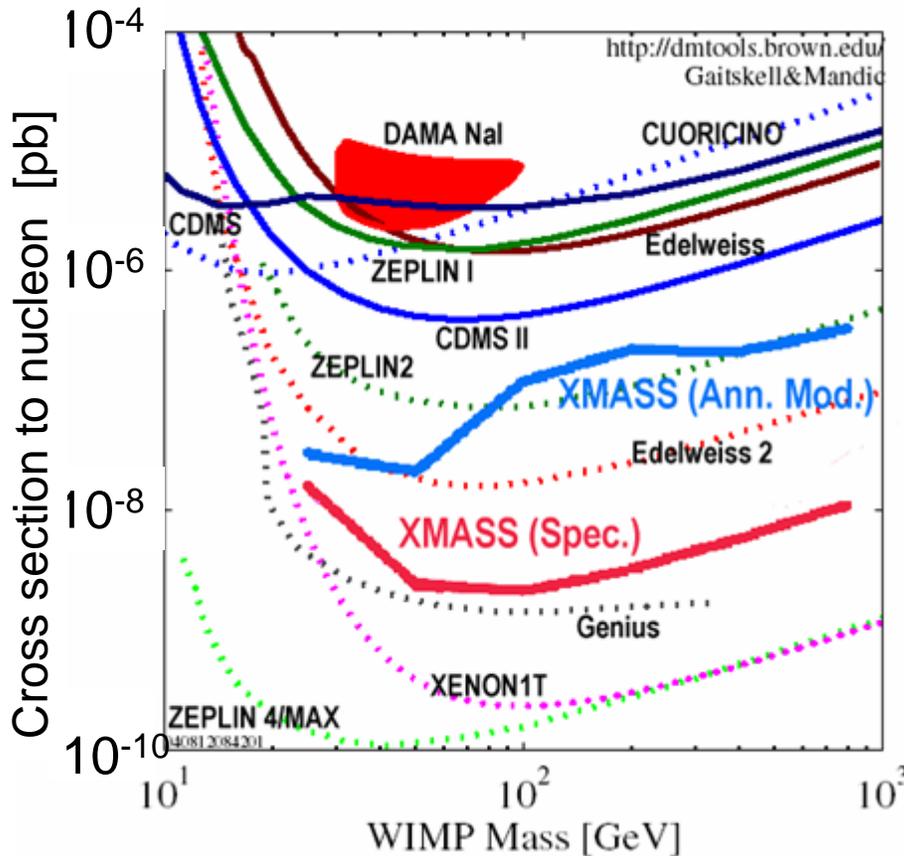
- 現在の再構成のアルゴリズムでは、壁のすぐ近くで発光して、壁方向へと向かう光が観測されにくく、壁と反対方向へ向かう光が観測されやすいため、壁から遠くに再構成されている



- 壁から20cmより内側の領域を使えば、このイベントによる影響も $\sim 10^{-5}$ druに抑えることができる
- 800kg検出器で目標としているバックグラウンド $\sim 10^{-4}$ druはクリアできる

# Expected sensitivities

XMASS FV 0.5 ton year  
 $E_{th} = 5 \text{ keVee} \sim 25 \text{ p.e.}$ ,  $3\sigma$  discovery  
 w/o any pulse shape info.

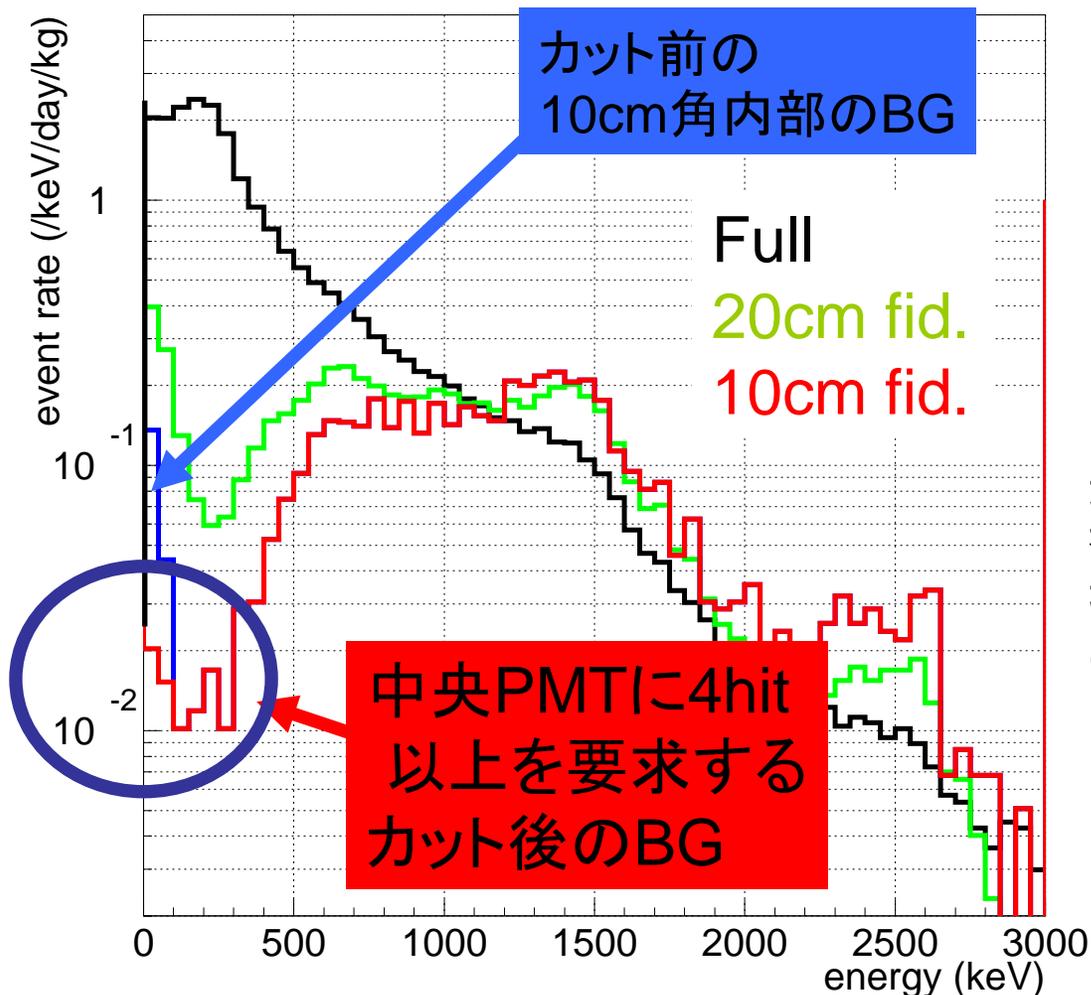


- Large improvements will be expected  
 $SI \sim 10^{-45} \text{ cm}^2 = 10^{-9} \text{ pb}$   
 $SD \sim 10^{-39} \text{ cm}^2 = 10^{-3} \text{ pb}$

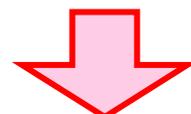
Plots except for XMASS:  
<http://dmttools.berkeley.edu>  
 Gaitskell & Mandic

# 3. Prototype による暗黒物質探索実験

- これまでの測定で得られた BG スペクトル



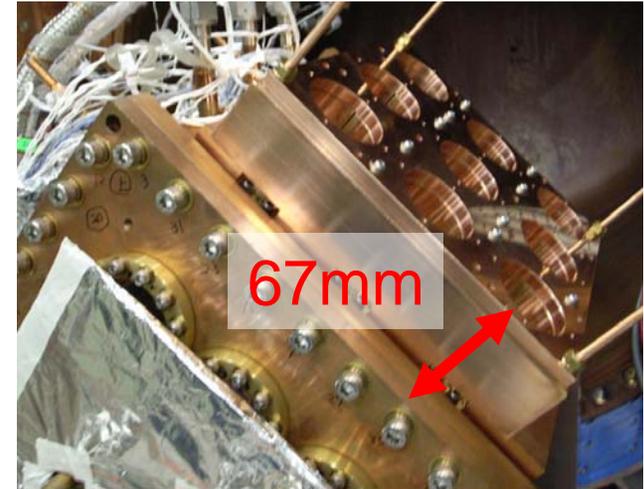
低エネルギー領域で非常に低BGだが、100keV以下でカット後もまだ少し立ち上がりがある



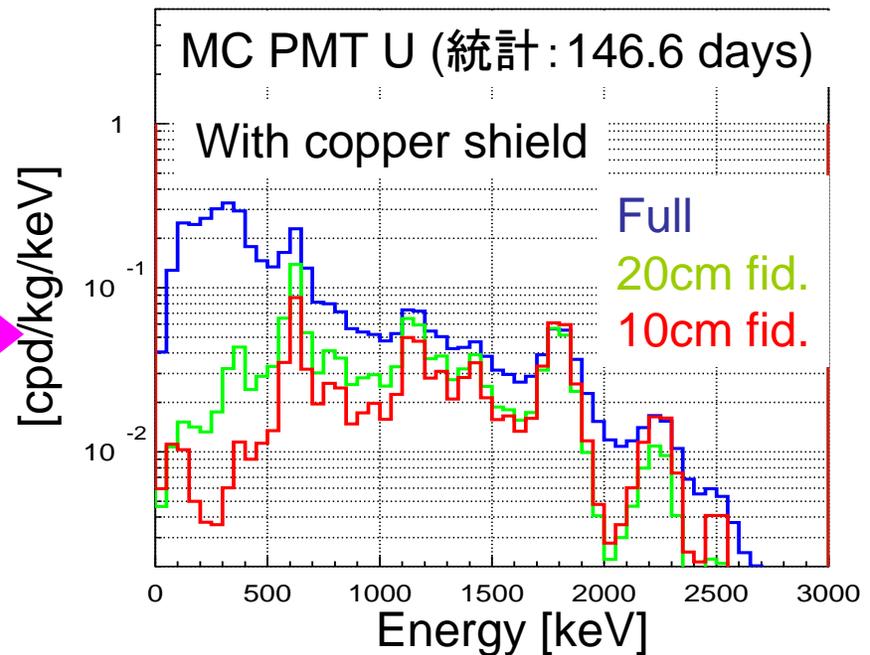
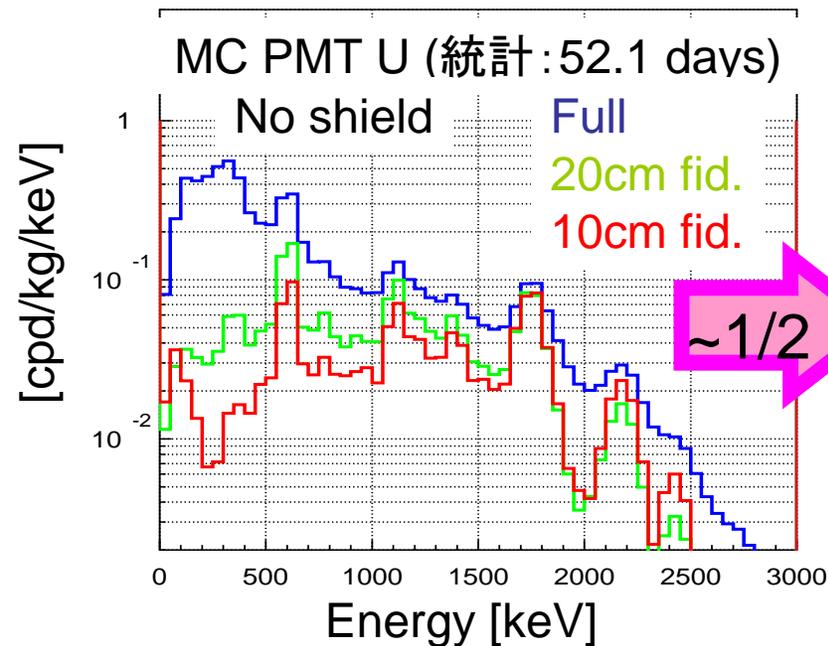
光量を増やすことで、立ち上がり成分を実効的により低いエネルギーへ押し下げることで、暗黒物質に感度のある測定が可能になる

# ➤ PMT まわりの銅シールド

- 67mm厚の無酸素銅 (4N)
- 全重量~223kg  
放射性不純物 <  $2.1 \times 10^{-1} \text{Bq}$   
(PMT54本に比べ無視できる)



- MC による BG 低減の見積もり



## 2. Copper case

- Need to check the long life RI generated in copper

${}_{29}\text{Cu}$ :  ${}^{63}\text{Cu}$  (69.17%)  
 ${}^{65}\text{Cu}$  (30.83%)  
 ${}^{64}\text{Cu}$  12.7h  
 ${}^{66}\text{Cu}$  5.1m  
 ${}^{67}\text{Cu}$  62h

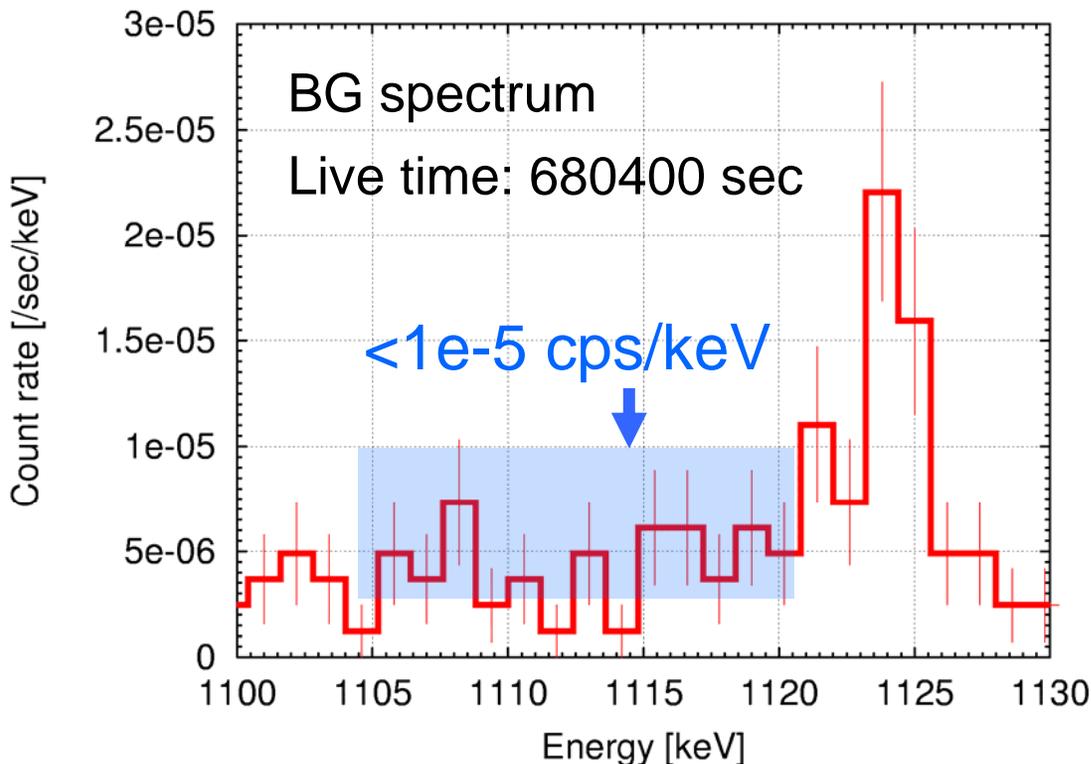
RI	$T_{1/2}$	generate	Main radiation from RI
${}^{65}\text{Zn}$	244.3d	${}^{65}\text{Cu}(p,n){}^{65}\text{Zn}$ ${}^{65}\text{Cu}(d,2n){}^{65}\text{Zn}$	1116keV $\gamma$ (50.6%)
${}^{67}\text{Ga}$	3.26d	${}^{65}\text{Cu}(\alpha,2n){}^{67}\text{Ga}$ ${}^{65}\text{Cu}(\alpha,\gamma){}^{67}\text{Ga}$	93keV $\gamma$ (39%) 185keV $\gamma$ (21%) 300keV $\gamma$ (17%)
${}^{64}\text{Cu}$	12.7h	${}^{63}\text{Cu}(n,\gamma){}^{64}\text{Cu}$	keV $\gamma$ (%)
${}^{62}\text{Zn}$	9.19h	${}^{63}\text{Cu}(p,2n){}^{62}\text{Zn}$	1039keV $\gamma$ (37%)
${}^{66}\text{Ga}$	9.49h	${}^{65}\text{Cu}(\alpha,n){}^{66}\text{Ga}$	1039keV $\gamma$ (37%) <sub>43</sub>

# ➤ Activity measurement using Ge detector

## ● Detection sensitivity

BG level:  $<1 \times 10^{-5}$  cps/keV

Detection efficiency for 1116keV  $\gamma$ :  $3.3 \pm 0.1$  %  
(sample size: 60mm dia., 40mm h)



$\sim 1 \times 10^{-3}$  [Bq/kg]

$\approx 1.7 \times 10^{-1}$  [Bq]  
(amount of copper is 174kg)

Ge has enough sensitivity

**c.f. R8778**

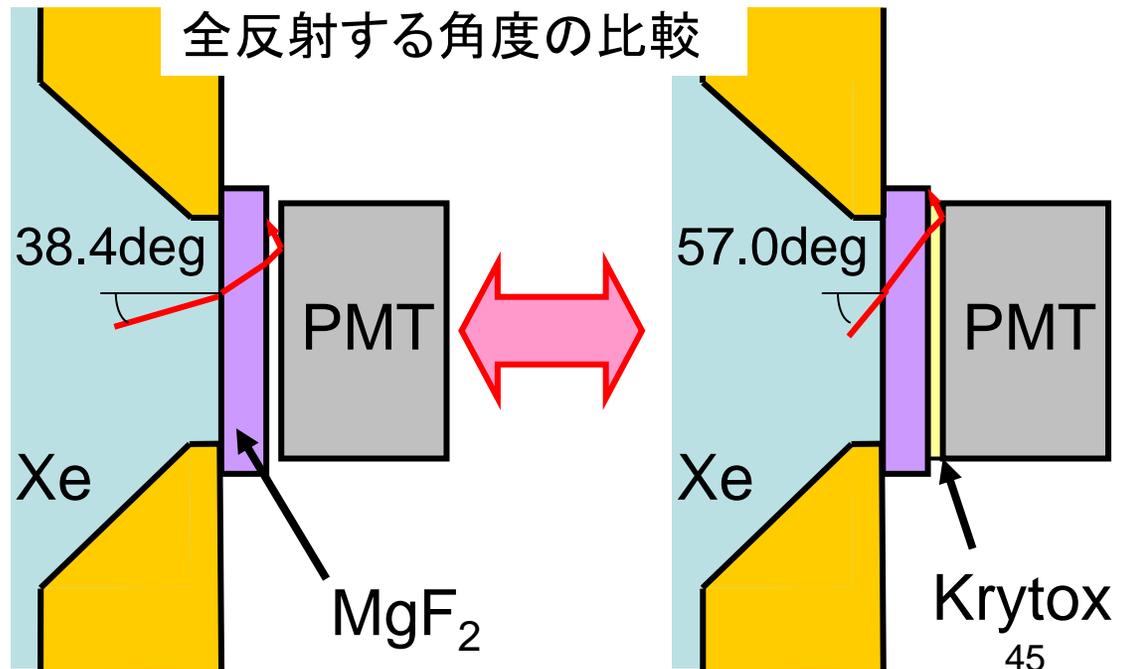
<b>U</b>	$1.8 \pm 0.2 \times 10^{-2}$ Bq
<b>Th</b>	$6.9 \pm 1.3 \times 10^{-3}$ Bq
<b><math>^{40}\text{K}</math></b>	$1.4 \pm 0.2 \times 10^{-1}$ Bq

## ➤ Krytox の充填

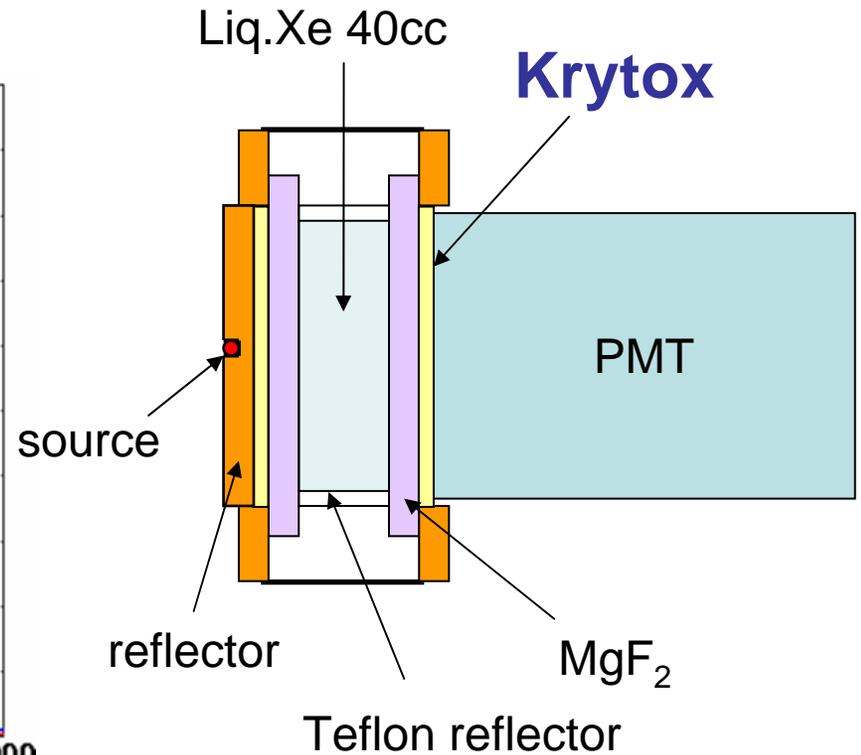
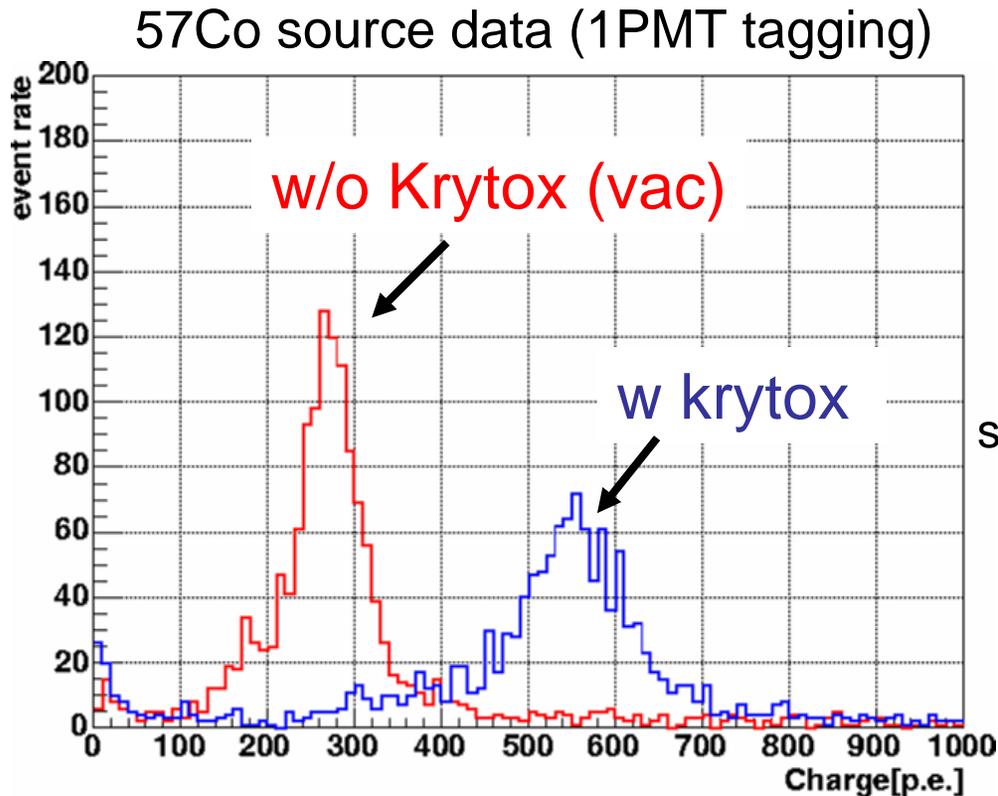
真空層の屈折率ミスマッチを低減し、光量を増加

### ● 屈折率

- |   |                           |   |   |                 |
|---|---------------------------|---|---|-----------------|
| { | ● Xenon : 1.61            | ⇔ | { | ● Krytox : 1.35 |
|   | ● MgF <sub>2</sub> : 1.44 |   |   |                 |
|   | ● vacuum : 1              |   |   |                 |



- テストチャンバーを用いて、実際に、光量の増加が確認された



- Krytox can be used to reduce mismatching of reflection indices even under low temperature
- The light yield increases factor 2 with Krytox.
- ~9p.e./keV has been achieved with 2PMT tagging measurement.