

^{136}Xe を用いた将来の $0\nu\beta\beta$ 実験

東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
鈴木洋一郎
2004年3月30日
@日本物理学会(九州大学)



Q-Value: 2.48 MeV

将来の代表的実験計画である
EXOとXMASSの話をする。

Gotthard

- Swiss Alps 3700mwe
- 60cm ϕ x 70cm; **5 atm gas TPC (~3.3kg)**
- 62.5% enriched; 12,800hours running
- $\Delta E \sim 6.6\%$ (FWHM) @2.48MeV
- $T_{1/2}^{0\nu} > 4.4 \times 10^{23}$ yr
- $T_{1/2}^{2\nu} > 3.6 \times 10^{20}$ yr
- Ref: Phys. Lett. B434(1998)407.

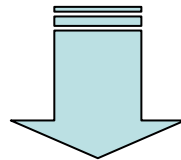
**BG: $2.5 \text{ kg}^{-1}\text{yr}^{-1}\text{FWHM}^{-1} \sim 4 \times 10^{-5} \text{dru}/(\text{keV}/\text{kg}/\text{day})$
(after reduction)**

DAMA

- Gran Sasso; 3 8 0 0 mwe
- **~6.5kg LXe Scintillation detector**
- Enrichment: 68.8% (136) and 17.1% (134)
- 8823.54 hours running
- $T_{1/2}^{0\nu} > 1.2 \times 10^{24}$ yr (^{136}Xe)
- $T_{1/2}^{2\nu} > 1.0 \times 10^{22}$ yr (^{136}Xe)
- $T_{1/2}^{0\nu} > 5.8 \times 10^{22}$ yr (^{134}Xe)
- $T_{1/2}^{2\nu} > 2.6 \times 10^{22}$ yr (^{134}Xe)

$^{136}\text{Xe}0\nu\beta\beta$ 実験の特徴

液体 ($\sim 160^\circ\text{K}$; (LNe $\sim 27^\circ\text{K}$; LHe $\sim 40^\circ\text{K}$)) と気体
Scintillation($\sim 173\text{nm}$; $\sim 42000\text{photon/MeV}$) と Ionization



–多様な技術的アプローチ

LXe scintillation \rightarrow XMASS

TPC(Liq or Gas) + Scintillation + Op.Sp. \rightarrow EXO

–低バックグラウンド実現の可能性も多様

蒸留、循環装置、電場による掃除、長寿命同位体がない。

–密度(液体) $\sim 3\text{g}$ 、 $Z=56$ 、輻射長 $\sim 2.4\text{cm}$

–自己遮蔽能力、小型(10トン、直径1.9m)

–手ごろな値段: 1トン1億円

- 同位体分離が比較的楽



10kgずつの同位体分離したXenonを入手した。(EXOは200kgのenriched Xeをもっている)

	124	126	128	129	130	131	132	134	136
Natural	0.096	0.089	1.919	26.4	4.07	21.18	26.89	10.44	8.87
136enriched(Even)								15.3	84.7
136depleted(Odd)			14.2	84.6	1.8				< 0.1

EXO (Enriched Xenon Observatory)

最終目標

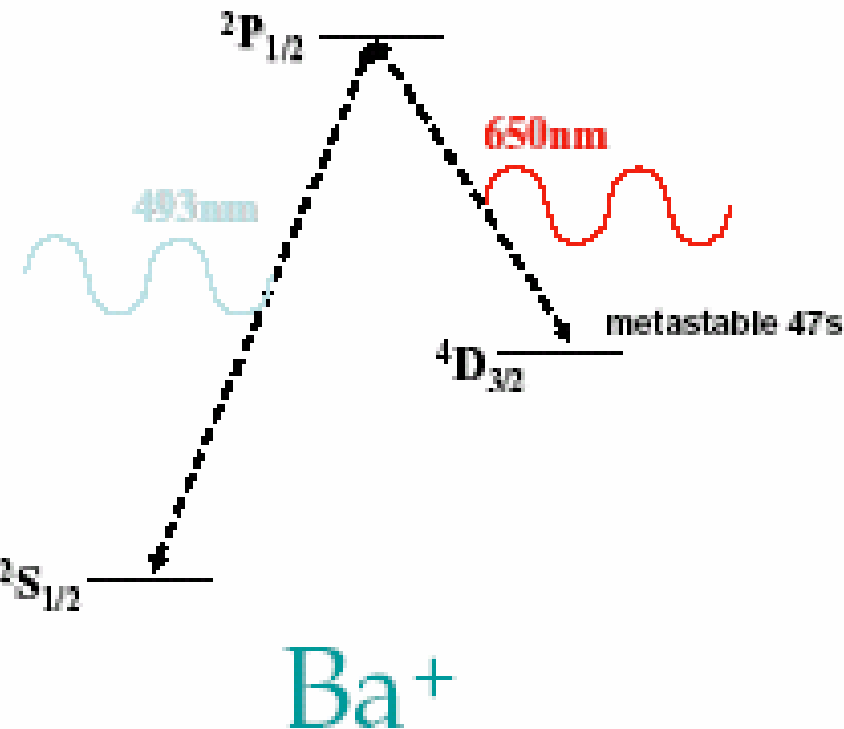
10トンのenriched¹³⁶Xe

$\sigma(E)/E = 2\%$

Mass (kg)	Enrich (%)	Time (yr)	$T_{1/2}$ (yr)	$\langle m \rangle$ (eV)
200	80	1	3.3×10^{25}	0.39 ~ 1.2
1,000	80	5	8.3×10^{26}	0.051 ~ 0.140
10,000	80	10	1.3×10^{28}	0.013 ~ 0.037

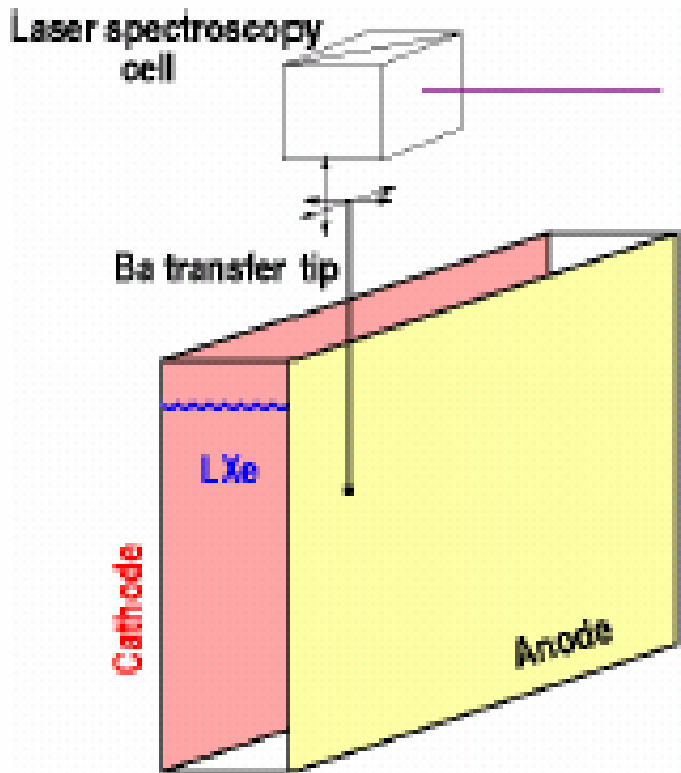
- Ba⁺イオンのレーザー同定による
2重ベータ崩壊の同定
 - (放射性不純物、外部からの放射線等による)
バックグラウンドの除去
- ~ 70% 検出効率

レーザータギング

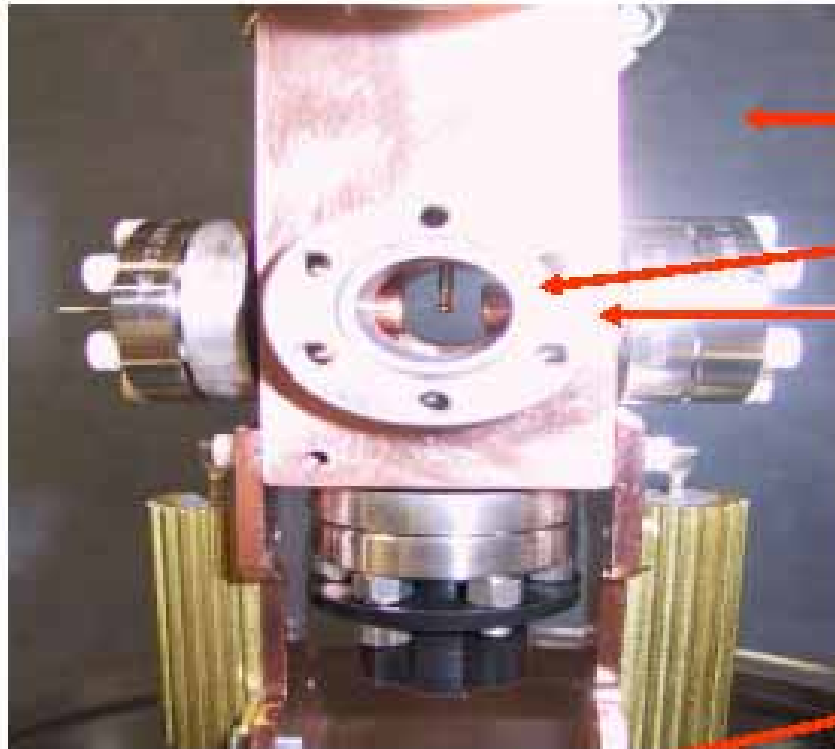


- 70% $\text{P} \rightarrow \text{S}$ (493nm)
- 30% $\text{P} \rightarrow \text{D}$ (658nm)
- 2つのレーザー
- ~8ns spontaneous decay
- 単一イオンからの発光
– $\sim 10^7$ photons/sec

イオンの捕獲と移動

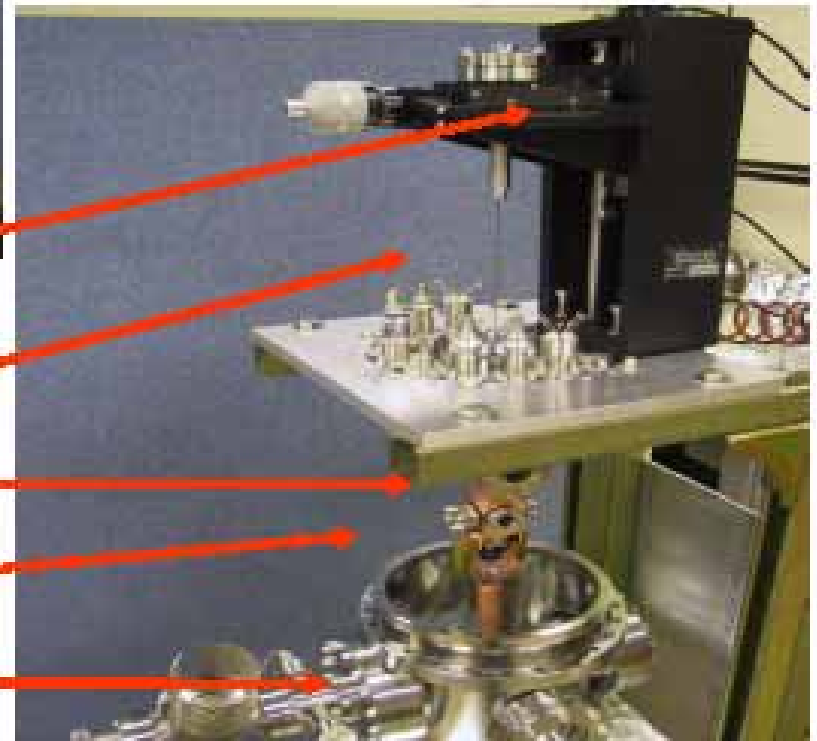


- シンチレーション信号
→ Probeのtrigger
- Extract & Transport
(capture and release)
- Trap in a optical cell
 - Long life time of Ba^+
 - Long life time of D
 - 47 sec?



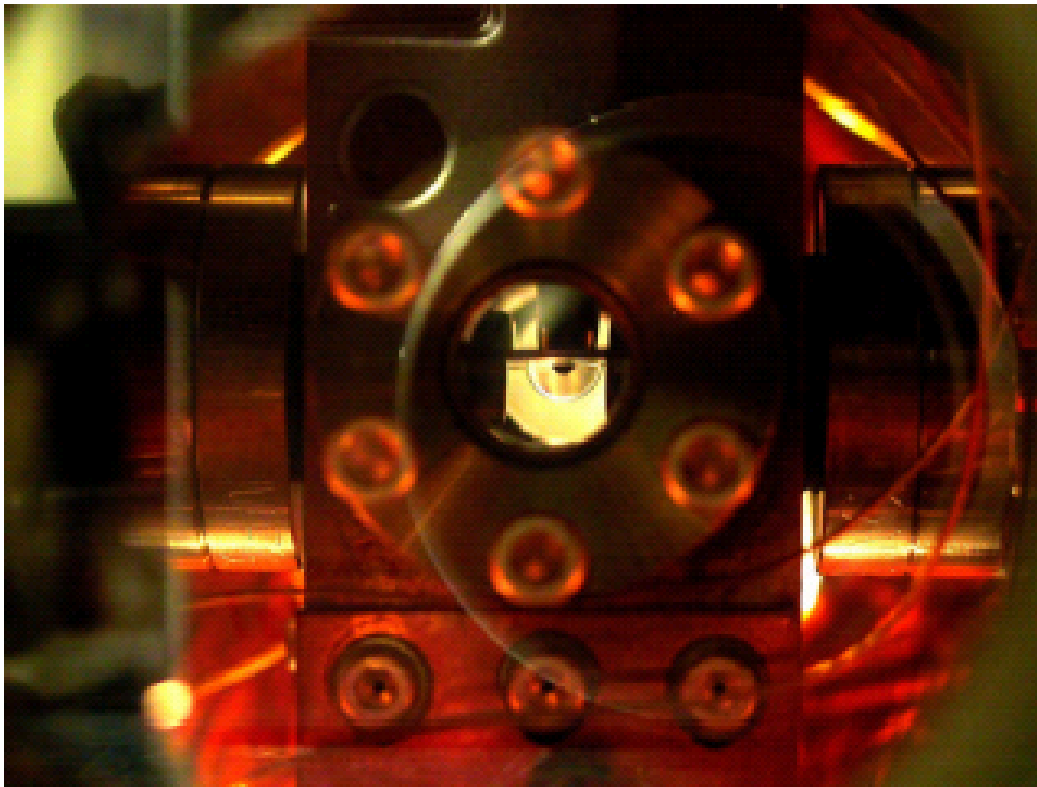
Xenon cell
Probe lowered
for ion collection
Electrode (source)
PMT

3-position
pneumatic actuator
probe (up position)
 α detector flange
(counting station)
Xenon cell
outer vac. vessel



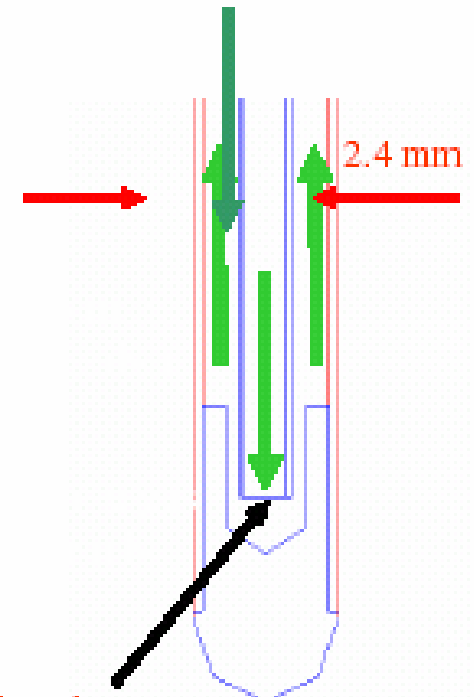
Releasing the ion

- Form Xe ice on tip (161 K)
- Grab ion
- To release ion, melt the ice.



Wamba @NOON2004

high pressure argon

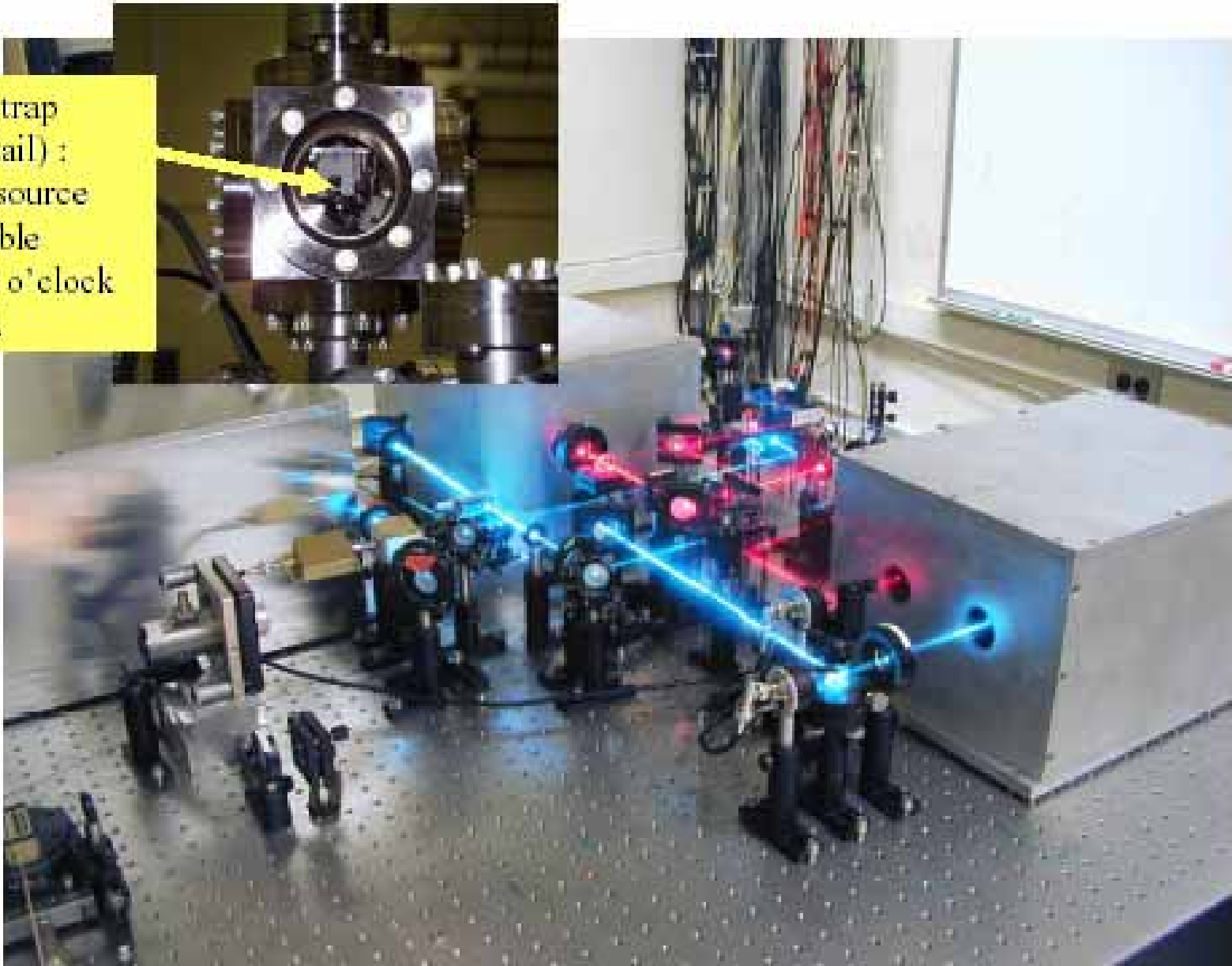


Joule-Thompson
expansion cools tip

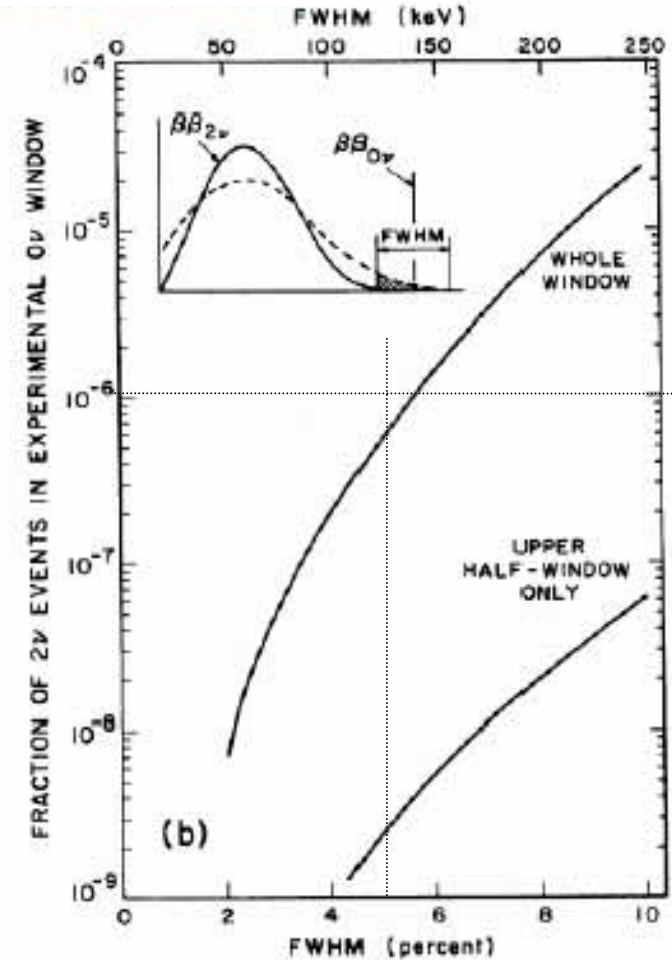
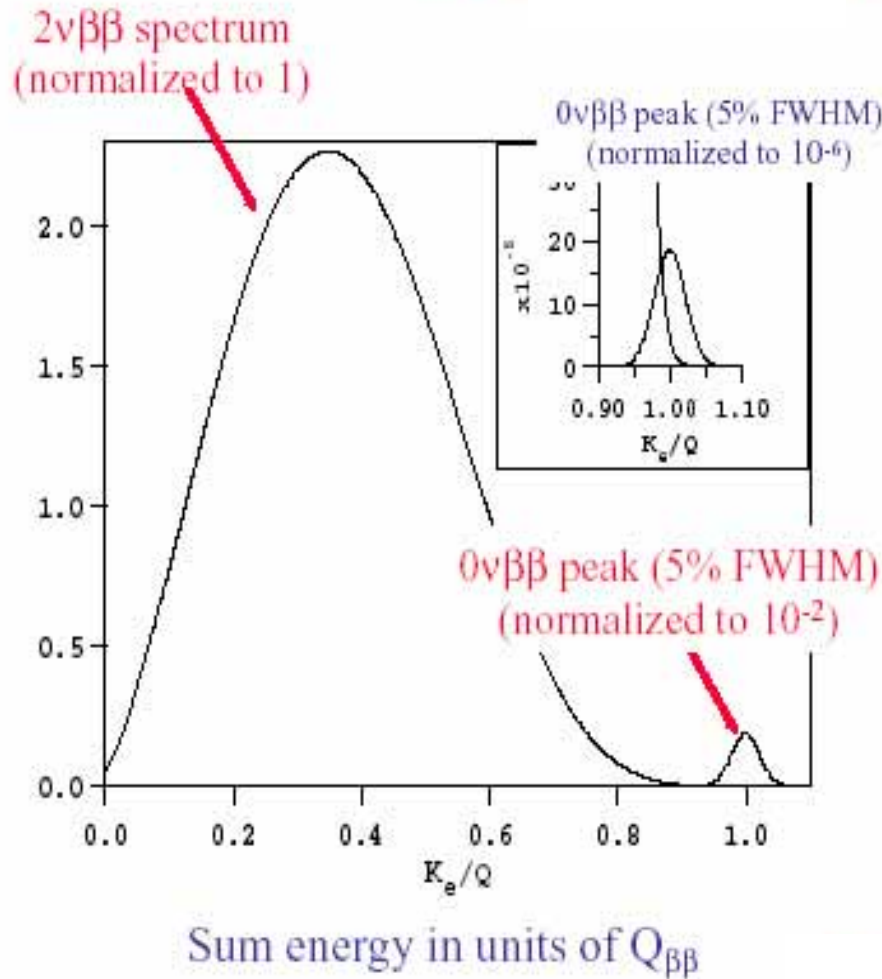
-initial test results are
promising

-Other techniques also under
consideration

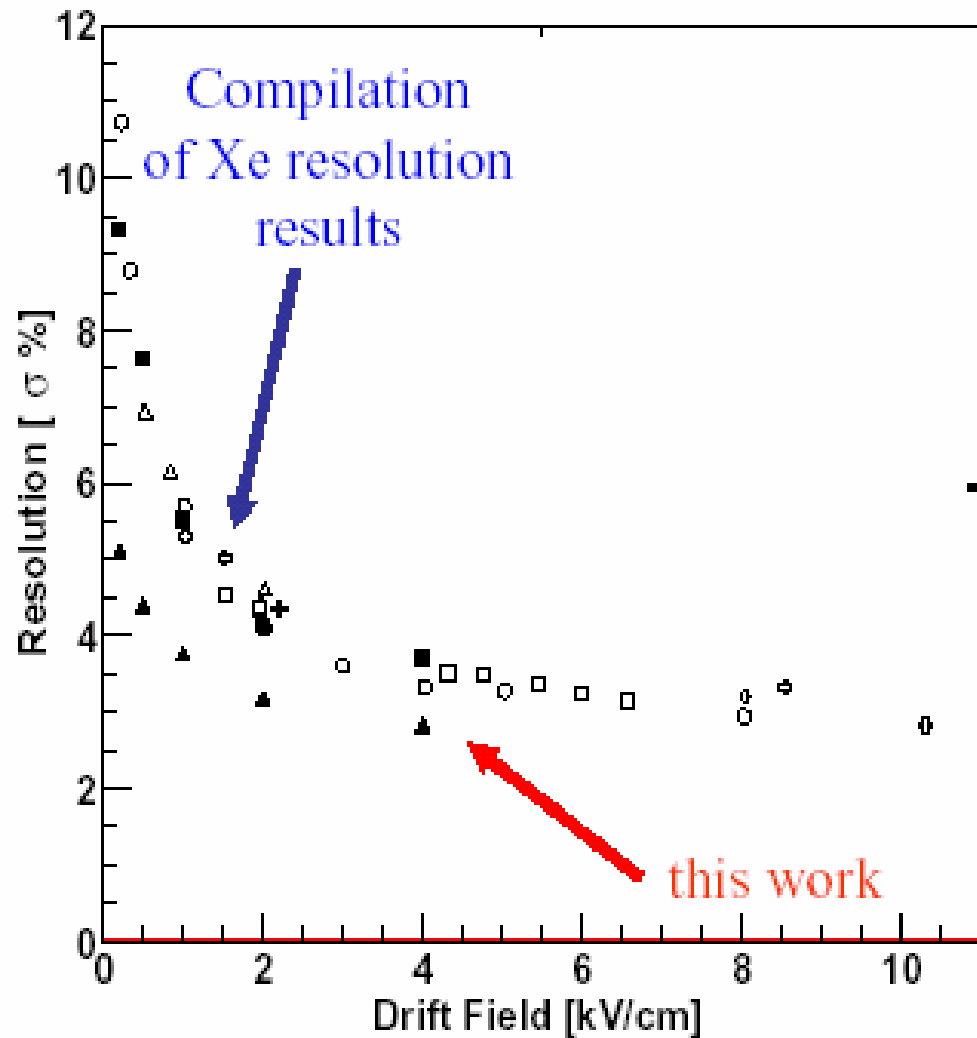
Ion trap
(detail) :
Ba source
visible
at 4 o'clock
pos.



エネルギー分解能



目標: $\sim 5\%$ (FWHM) @ 2.5 MeV



- シンチレーション + ionization
 - Ionizationのみ ~ 3.8%
@570keV
 - シンチレーションを加えて σ ~ 3% のエネルギー分解能の達成
 - Ref: PRB68,054201(03)

Schedule

- ~ 200 kgのprototype実験
 - Ba同定なし
- WIPPで準備中
 - Spaceの確保
 - 開発研究、発注
- 2年以内に測定開始予定

WIPP



XMASS

- 多目的宇宙・素粒子検出器 (10トン)
(シンチレーションのみの観測)
 - 低エネルギーニュートリノ
 - 暗黒物質
 - 2重ベータ崩壊

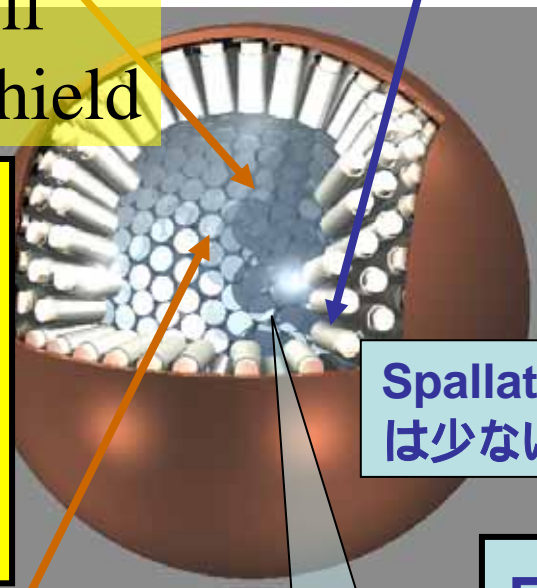
- ICRR, Kamioka observatory
Y. Suzuki, M. Nakahata, Y. Itow, M. Shiozawa, Y. Takeuchi, S. Moriyama,
T. Namba, M. Miura, Y. Koshio, Y. Fukuda, Y. Ashie, A. Minamino, R.
Nambu, J.Hosaka, Y.Taki
- ICRR, RCNN
T. Kajita, K. Kaneyuki, M. Ishitsuka
- Saga Univ.
H. Ohsumi
- Niigata Univ.
K.Tamura, K. Ito,
- Tokai Univ.
K. Nishijima, Y. Nakajima
- Gifu Univ.
S. Tasaka
- Waseda Univ.
M. Yamashita, S. Suzuki, K. Kawasaki, J. Kikuchi, T. Doke,
- Yokohama National Univ.
S. Nakamura, T.Fukuda, S.Oda, S.Kobayashi, Y.Hashimoto
- Seoul National Univ., Korea
Soo-Bong Kim
- INR-Kiev, Ukraine
Y. Zdesenko, O. Ponkratenko,
- UCI, USA
H. Sobel, M. Smy, M. Vagins, P. Cravens

実験のKeyポイント(Challenge)

γ (U/Th/K/
Co/Cs/...)

μ

Self
shield



外部BG:
↓
自己遮蔽
(PMTからのBGにも有効)
水タンク

H₂O
shield

neutron

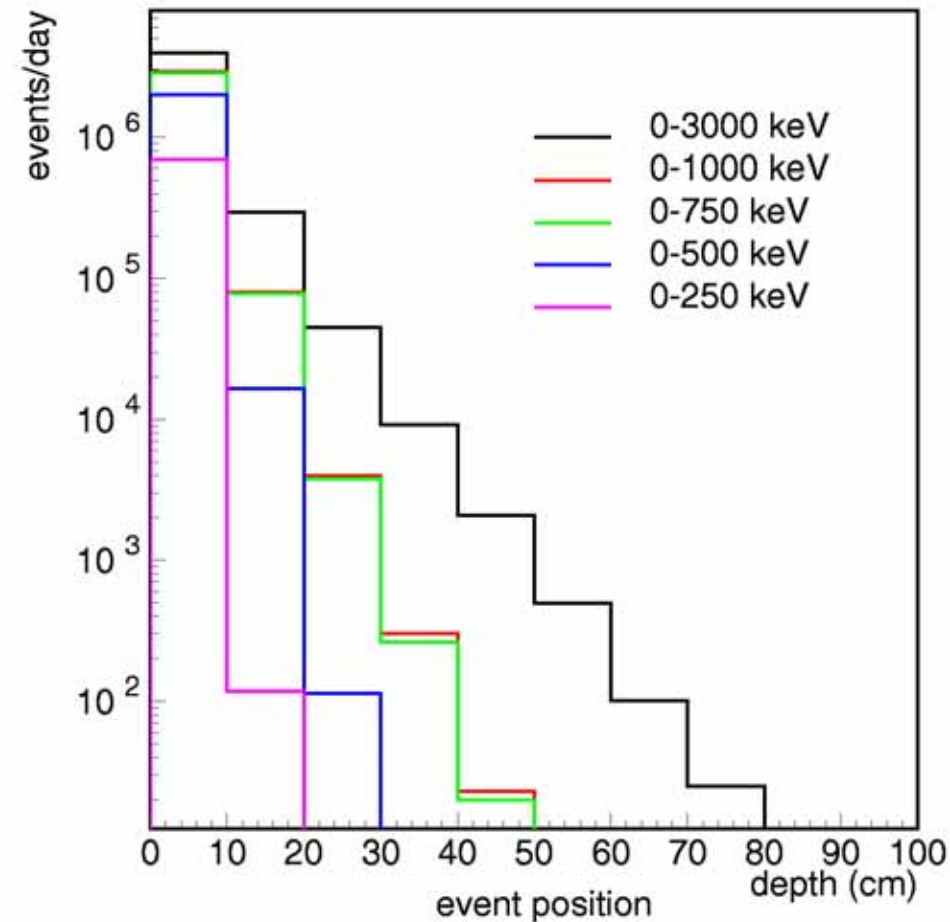
Spallation BG
は少ない

α, β, γ rays from
⁸⁵Kr, ⁴²Ar, U/Th

低エネルギー閾値:
高エネルギー分解能:
↓
大測定光量が必要:
70 ~ 80% PMT
coverage

内部バックグラウンド:
↓
蒸留、ゲッター、その他
による方策、循環可能

自己遮蔽能力

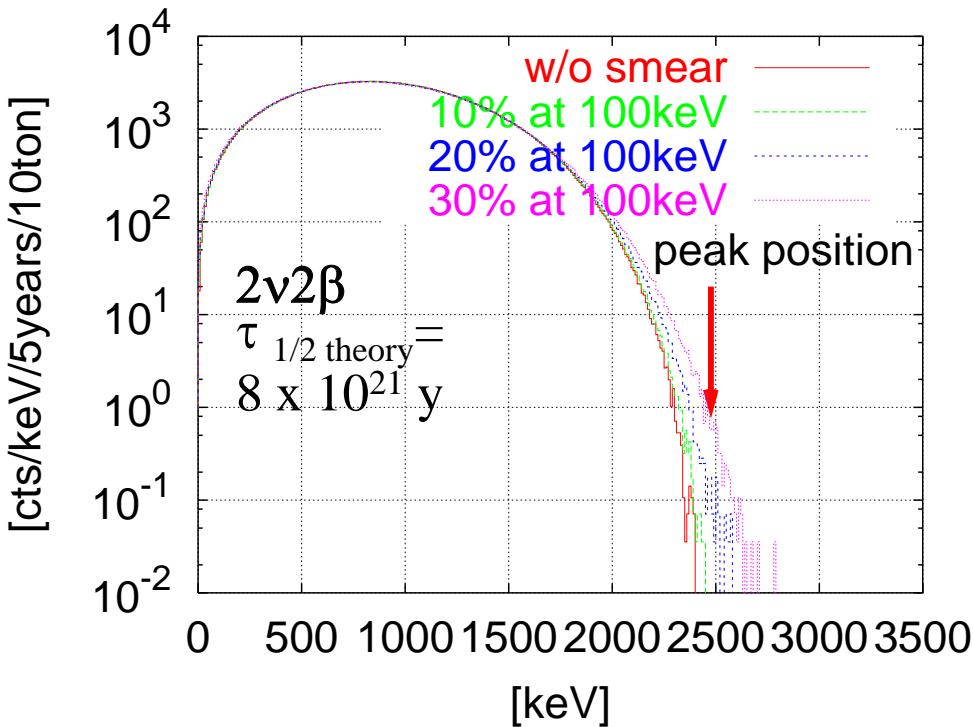


- ~ 500 keV以下には非常に有効
(DMと低エネルギーニュートリノ)
- 2重ベータ崩壊にはあまり有効でない

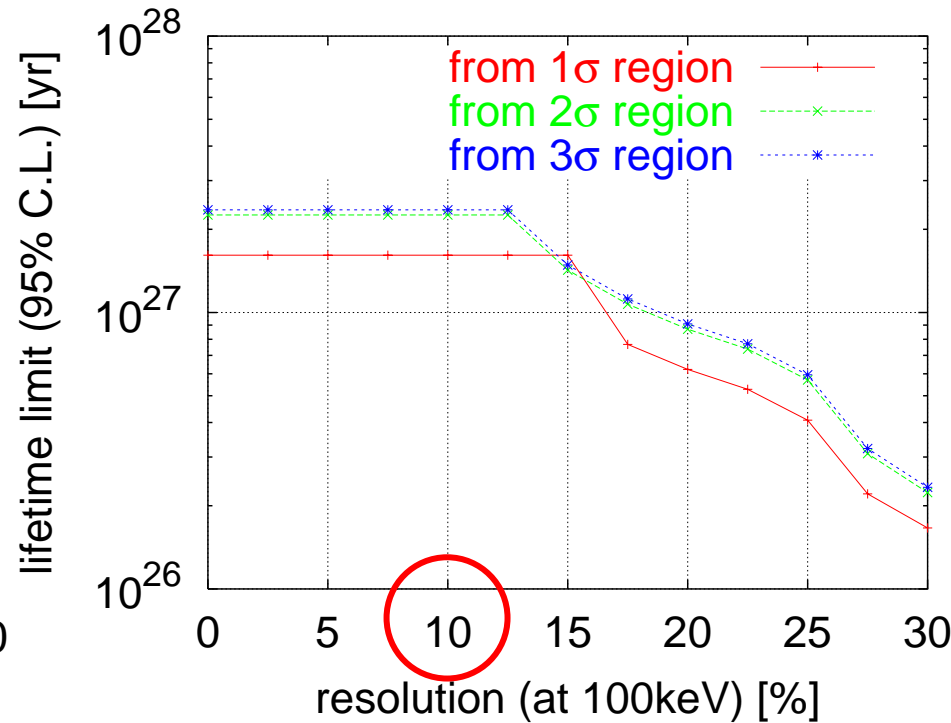
XMASS

2重ベータ崩壊探索

2重ベータ崩壊探索の理想感度



上半分の分布を利用



$2\nu\beta\beta$ からのBGのしみ込み
 を少なくするため、高いエネ
 ルギー分解能が必要

100keVで10%よりよければ良い
 究極の分解能: 3~4% @100keV

理想感度とバックグラウンドレベル

- 10トン、natural Xe、5年計測
- 最大理想感度
~ 3.3×10^{27} yr
 $\langle m_\nu \rangle \sim 0.02 \sim 0.06$ eV
- 2ν 以外のバックグラウンドが $S / N \sim 1$ になるには
~ B G レベル: 10^{-9} ev/keV/kg/day (@2.5MeV)
→ U/Th (Internal) ~ 10^{-16} g/g

Ev/keV/kg/day for SuperK

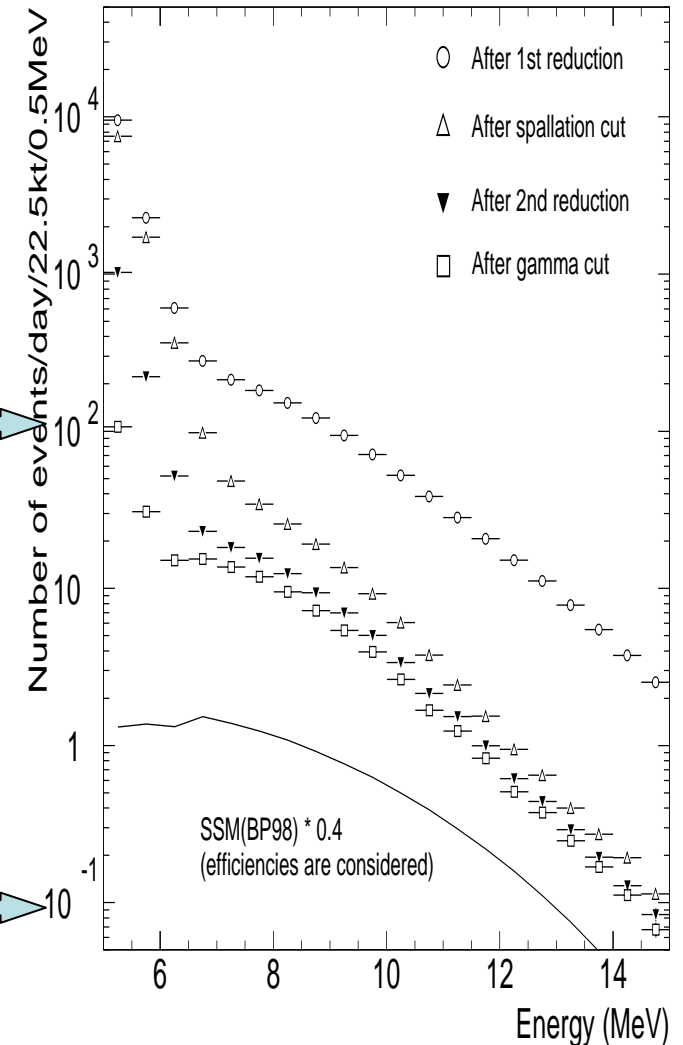
15 ev /day/22.5kt (solar ν signal)
210 ev day/22.5kt (background)

8.8×10^{-9} ev /day/keV/kg (5 MeV)

8.8×10^{-12} ev /day/keV/kg (14 MeV)

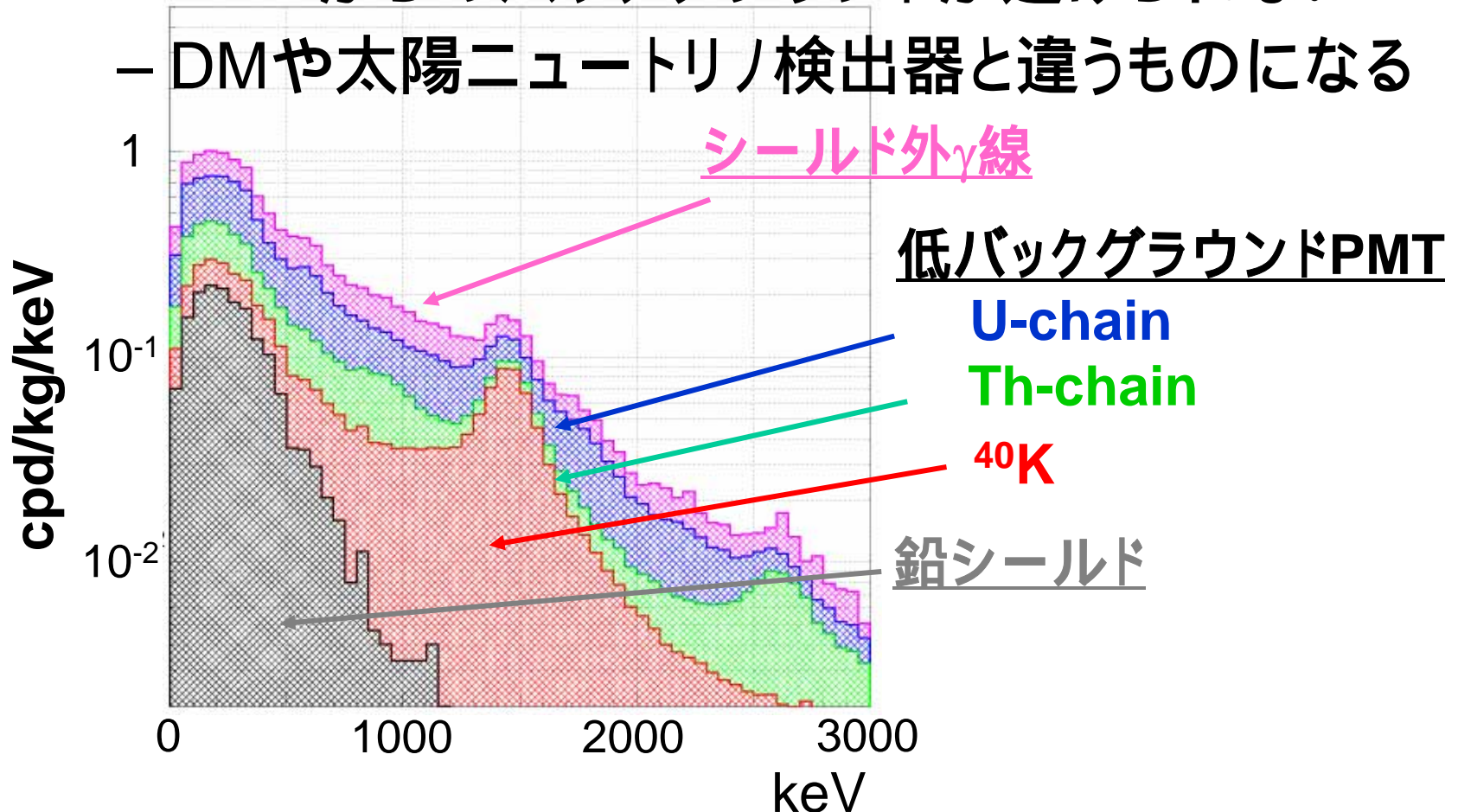


SK 1258day 22.5kt ALL (Preliminary)



Dedicated detector

- 2重ベータ探索には、自己遮蔽が効かない
 - PMTからのバックグラウンドが避けられない
 - DMや太陽ニュートリノ検出器と違うものになる



Dedicated detector

別のアイデアが必要

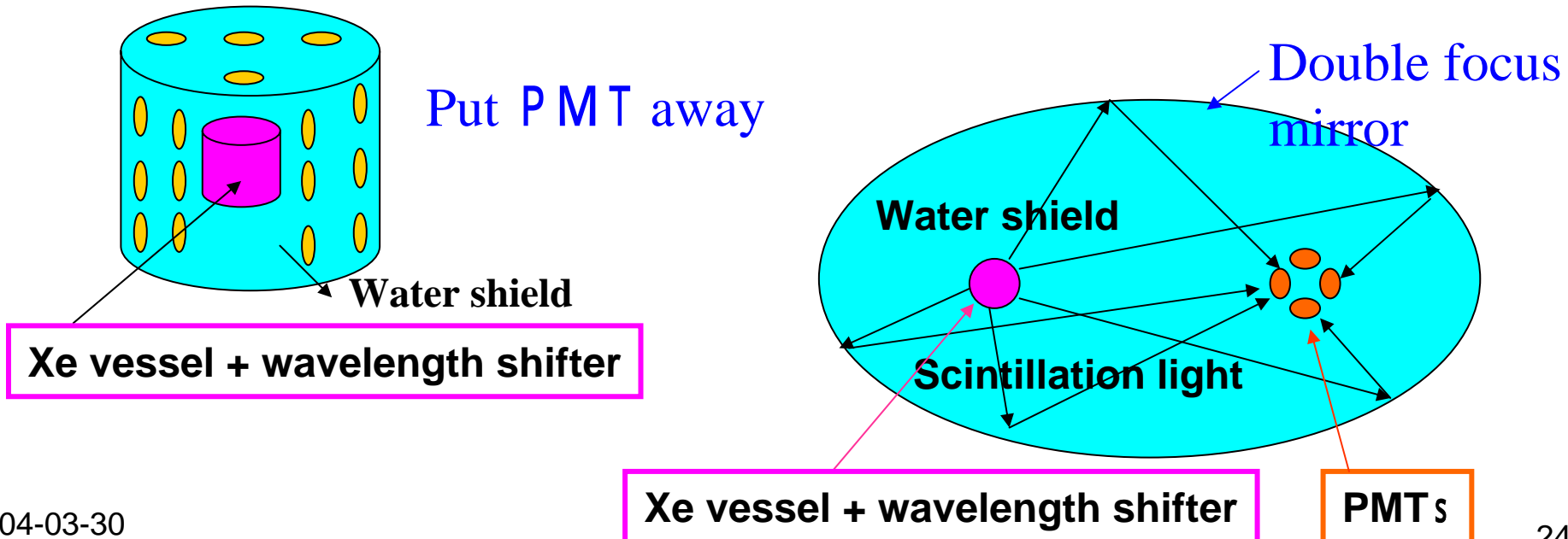
= > 50気圧のアクリルVessel

(森山君ら若人のアイデア)

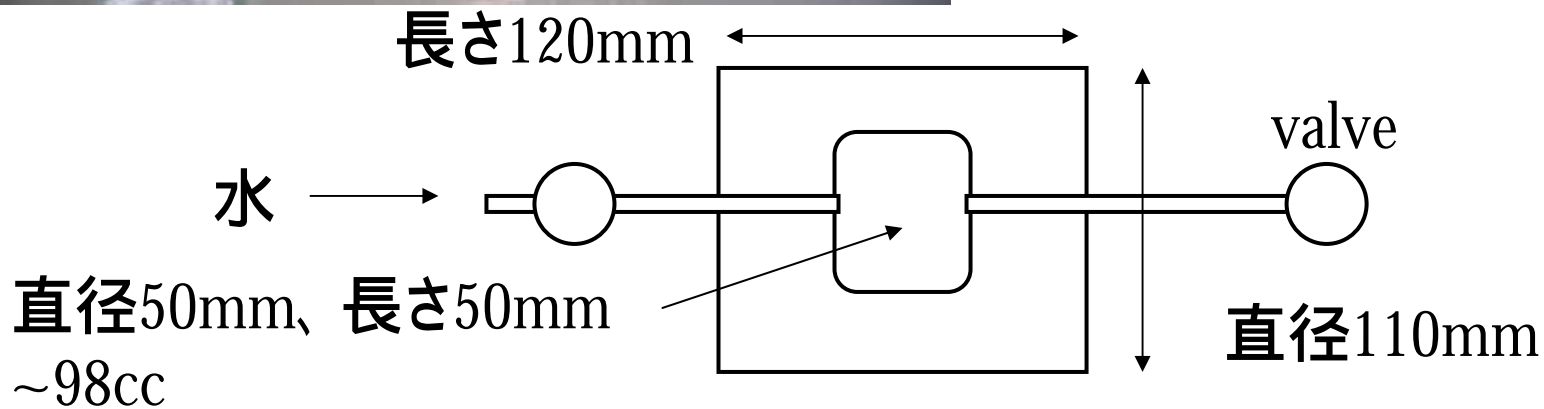
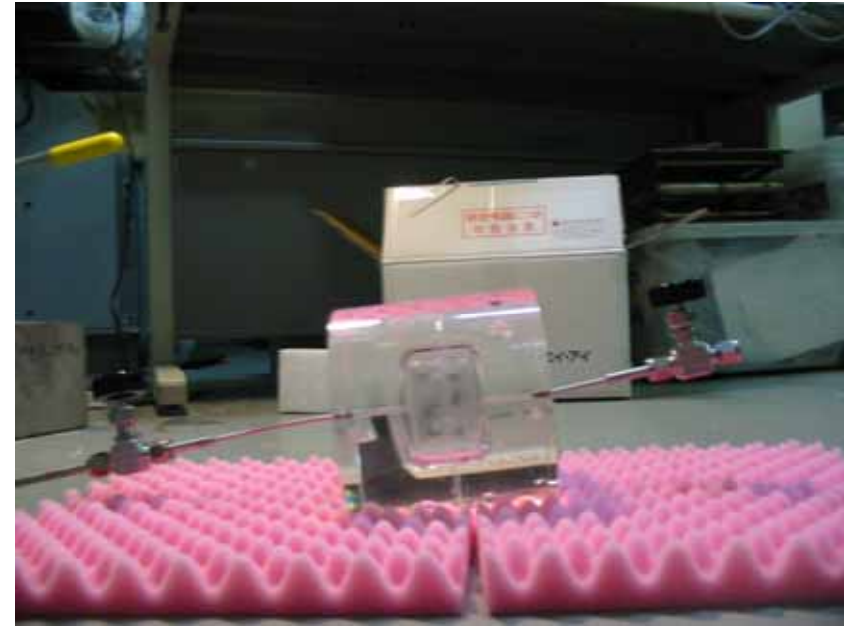
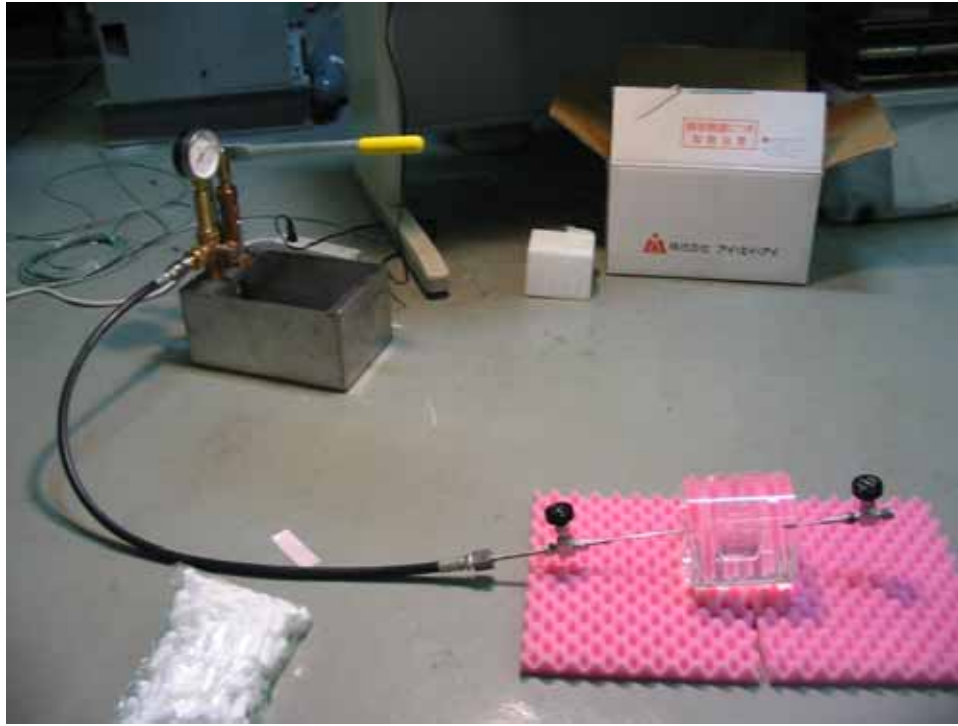
アクリルは高圧ガスに使えるい(?)

100cc(300g)までならOK

10kg → 30個作る



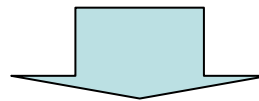
アクリル圧力容器のテスト



(常温) 水圧80気圧までもった。

手持ちの10kgでやるとしたら

- アクリルのBG: U,Th $\sim 10^{-12}$ g/g (これだけを考える)
 - 円筒形 (直径4cm LXe, 外径10cmの容器)
 - 10kg の濃縮 ^{136}Xe
 - 42000 photon/MeV
 - 20% PMT被覆, 25% QE, その他の効率36%とすると
- $\sigma = 2.2\% @ Q_{\beta\beta} = 2.48\text{MeV}$



1yr, 10kg measurement

1.5×10^{25} yr $\Leftrightarrow \langle m_{\nu} \rangle = 0.2 \sim 0.3\text{eV}$

c.f. DAMA $> 1.2 \times 10^{24}$ yr (90%)

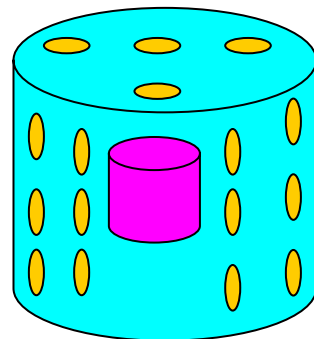
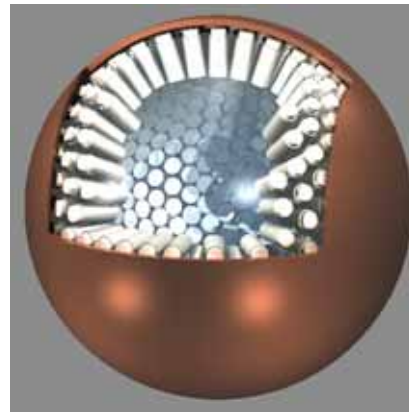
XMASSのStrategy

~10トン検出器
太陽ニュートリノ観測
暗黒物質探索

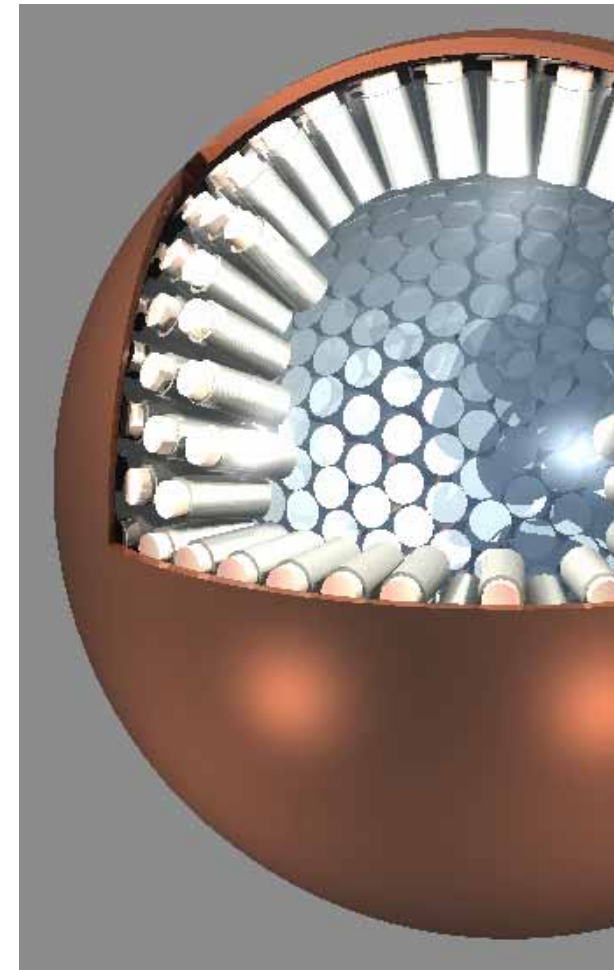
100kg検出器
R & D



~1トン検出器
暗黒物質探索



$\beta\beta$ 専用検出器



100kg 検出器による R & D

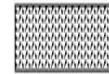
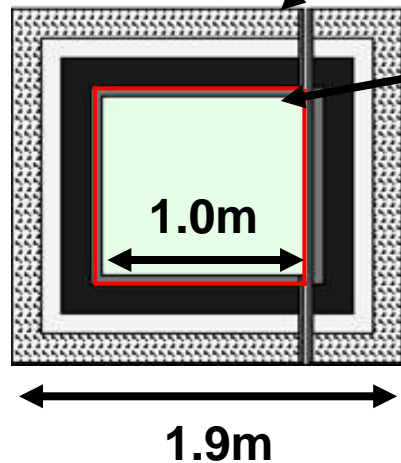


- 30リットル、液体キセノン
- 31cm角の無酸素銅容器
- 54本の低バックグラウンドPMT (2インチ)
 - 光電面被覆 ~ 16%
- 0.6p.e./keV (次のステップの800kg検出器の1 / 10)

• Feasibilityの証明

- バーテックス&エネルギー再構成
- 自己遮蔽能力の証明
- キセノンの性質
 - 光量、吸収長などの光学的性質の理解
- 外部BG, 内部BGの研究
- 低バックグラウンド環境の創出
 - シールド
 - 純化装置のテスト

- Shield for 100kg detector



ポリエチレン(15cm)



ホウ酸(5cm)



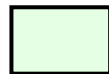
鉛(15cm)



EVOH シート(30μm)



無酸素銅(5cm)



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

低バックグラウンド PMTの開発

Q.E. ~ **30%** @ 175nm

Collection efficiency ~ **90%**

クォーツ窓

金属管 (低バックグラウンド)

部品の源泉 (HPGeでの計測)

→ 低バックグラウンド PMT base

これまでのほぼ~1/10

PMT base

U	$1.5 \pm 0.3 \times 10^{-3}$ Bq
Th	$3.2 \pm 4.6 \times 10^{-4}$ Bq
^{40}K	$1.7 \pm 2.9 \times 10^{-3}$ Bq

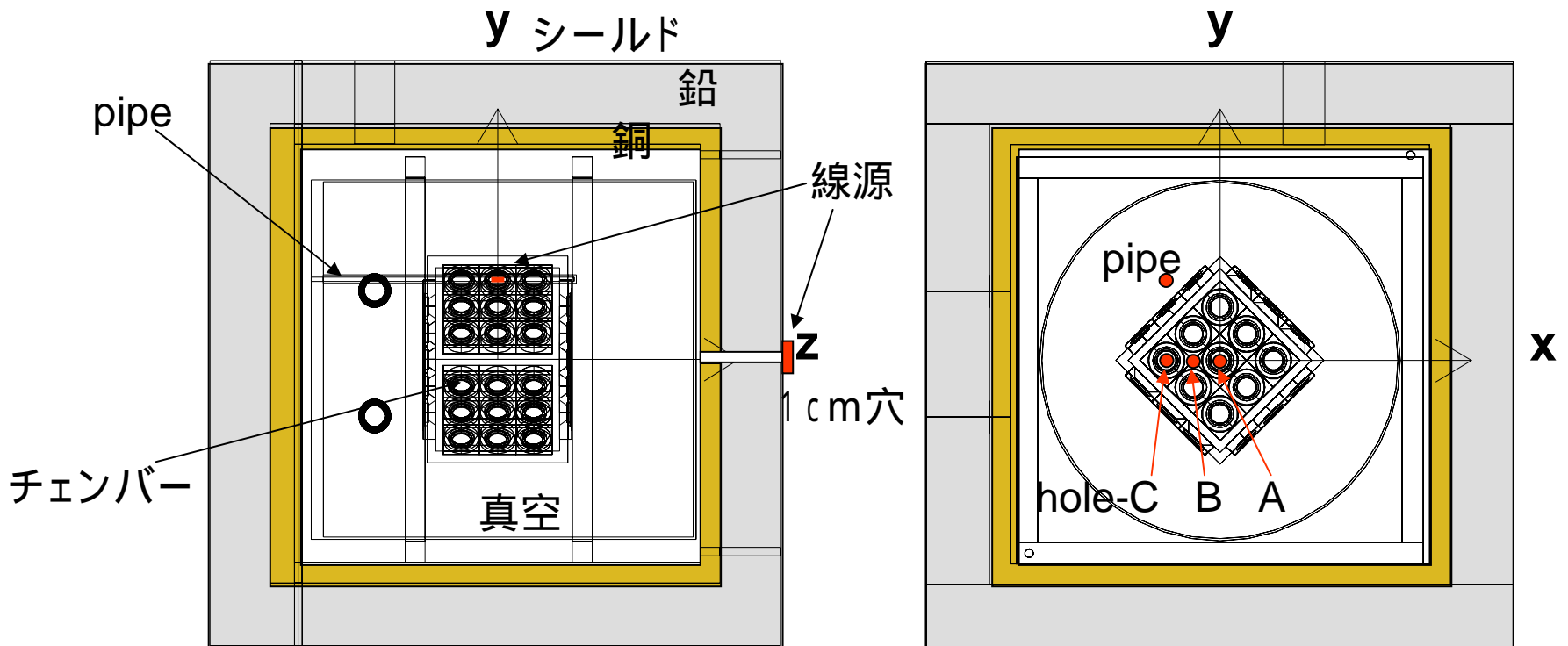


さらに、もう一桁のLow Background化を狙う

- **テスト実験: 2003年12月**
(結果は29日の宇宙線分科会で発表:Parker、難波、小汐、竹内、穂坂)

– データ収集 ~ 6日 (173°K、1.5気圧)

- Normal Run
- γ -source run

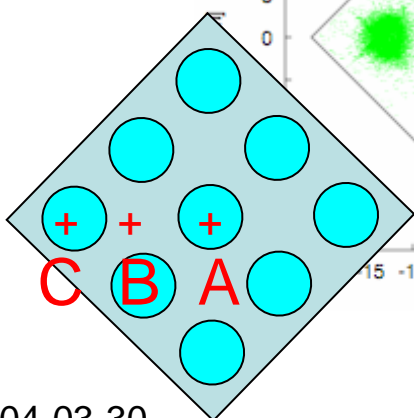
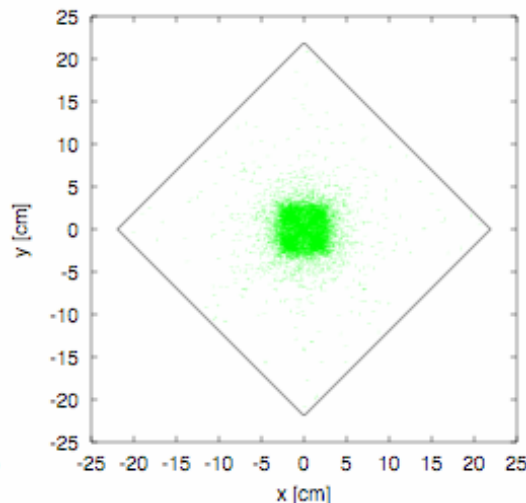
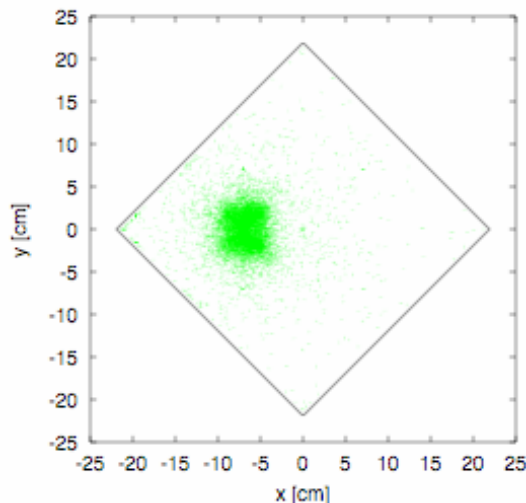
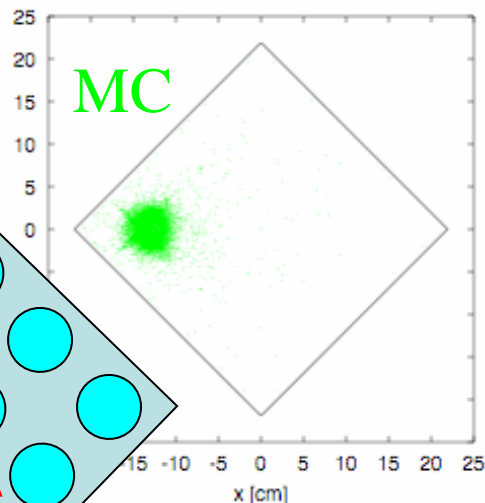
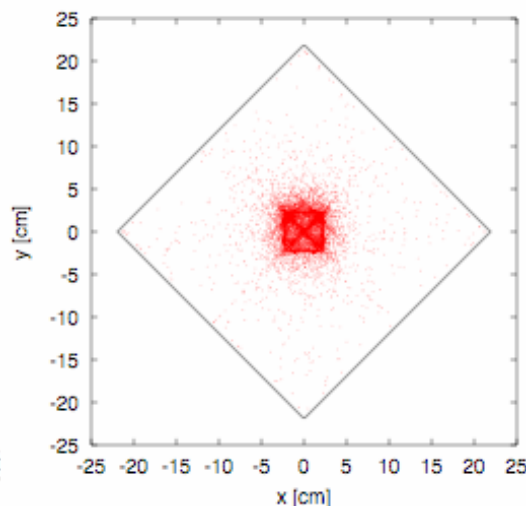
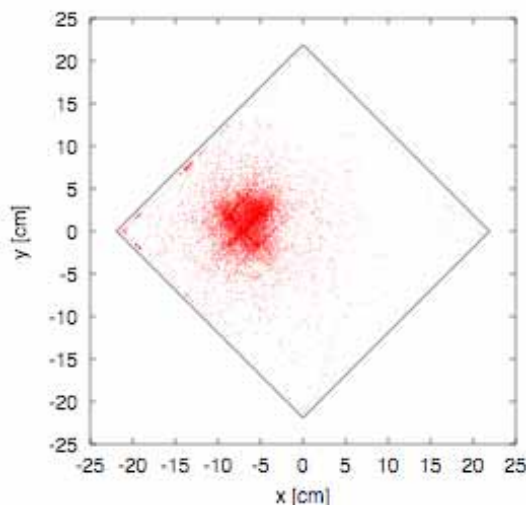
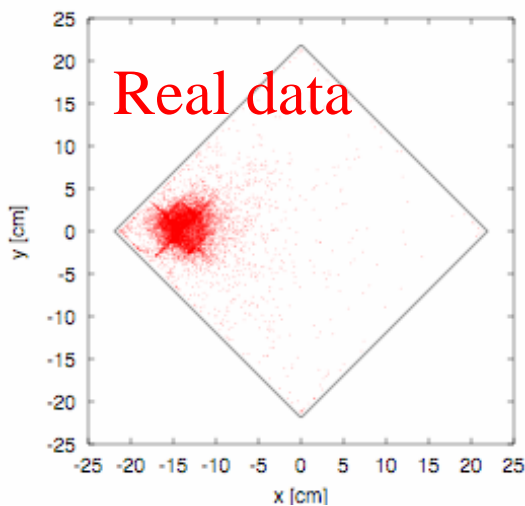


^{137}Cs 光電吸収ピーク分布

Hole C

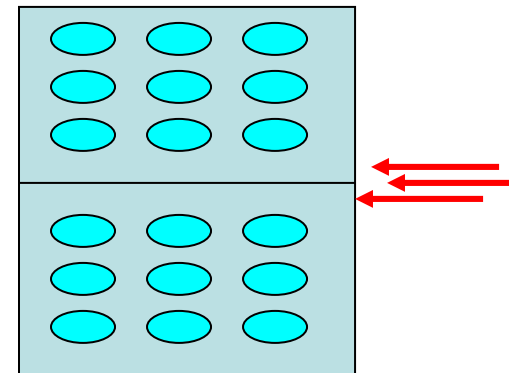
Hole B

Hole A

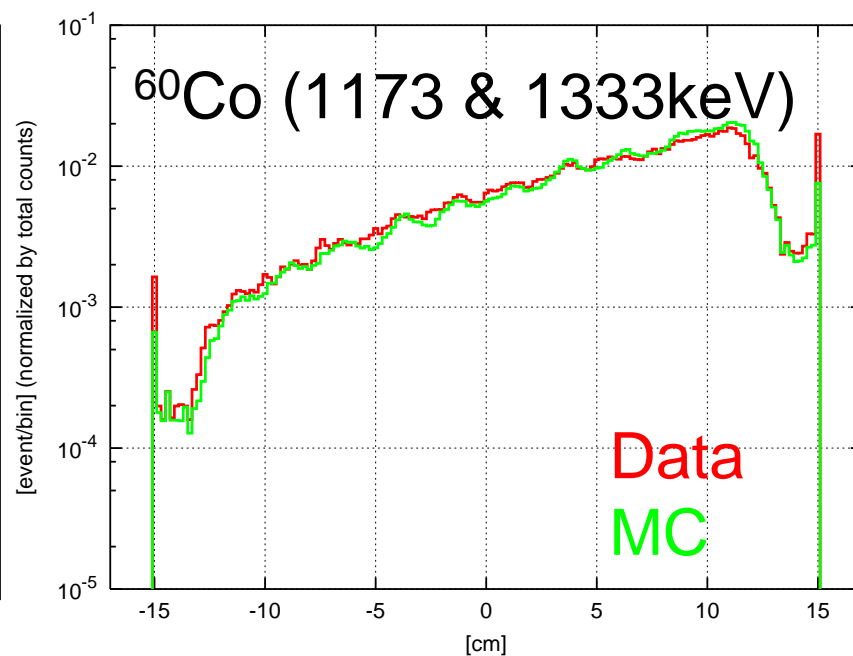
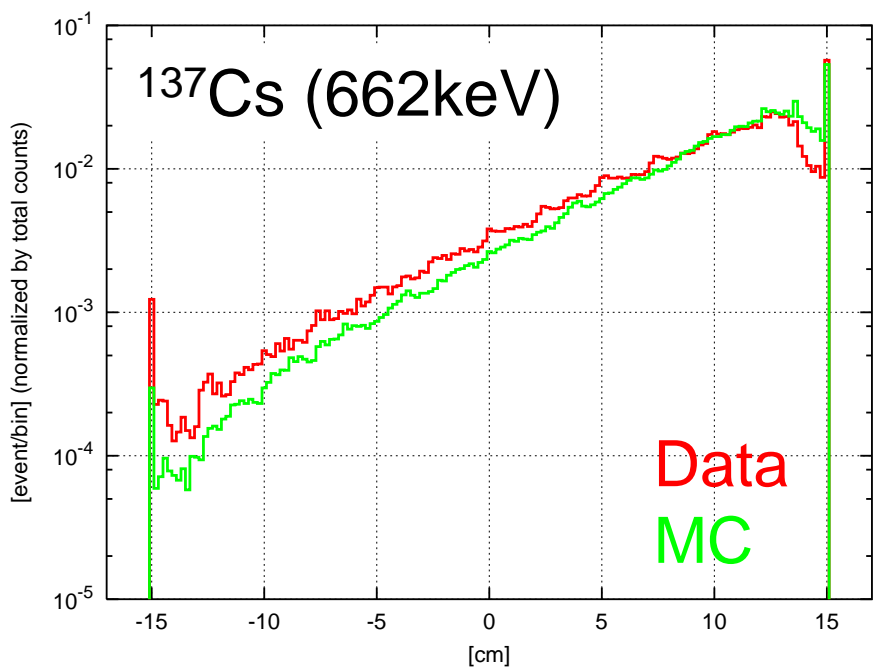


3つのコリメーターを用いた測定

● 自己遮蔽能力

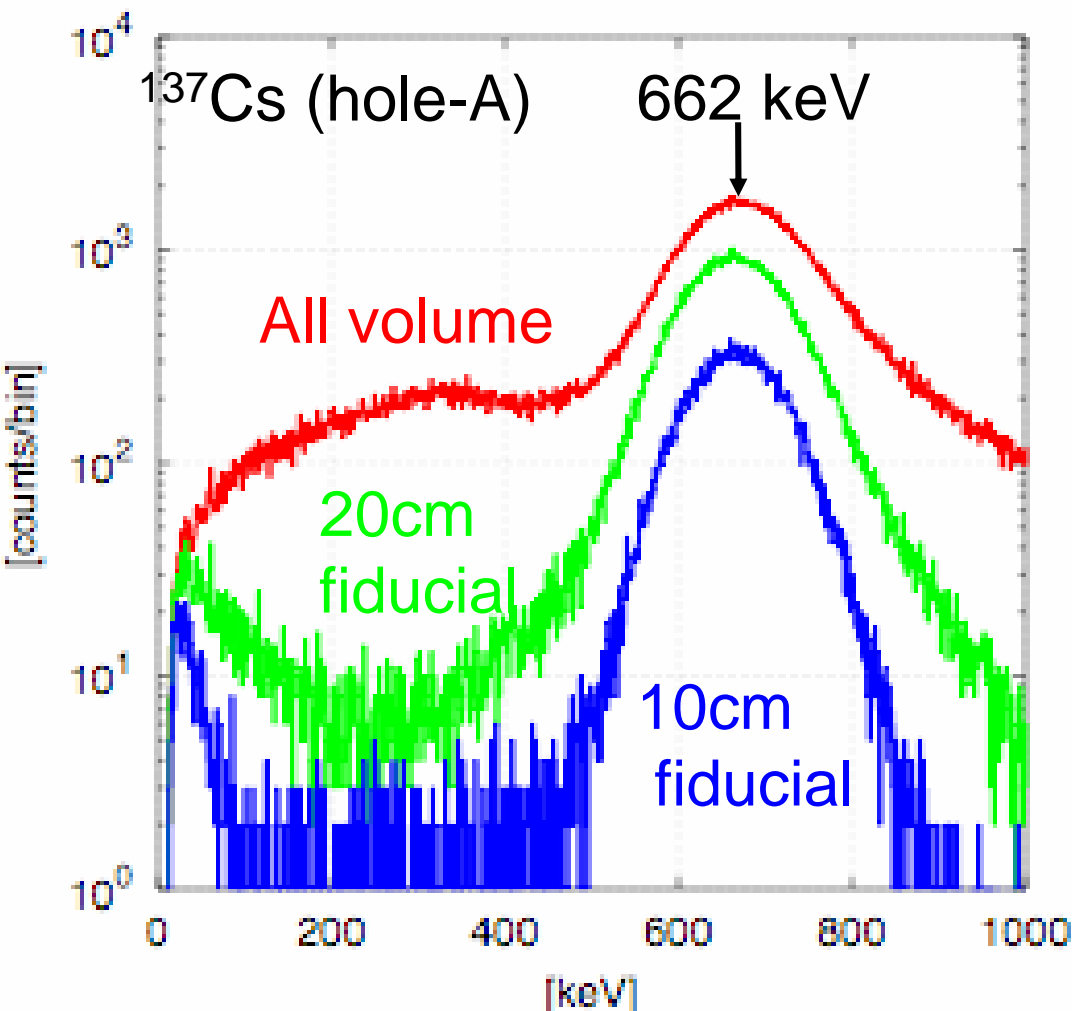


Z = -15 Z = +15

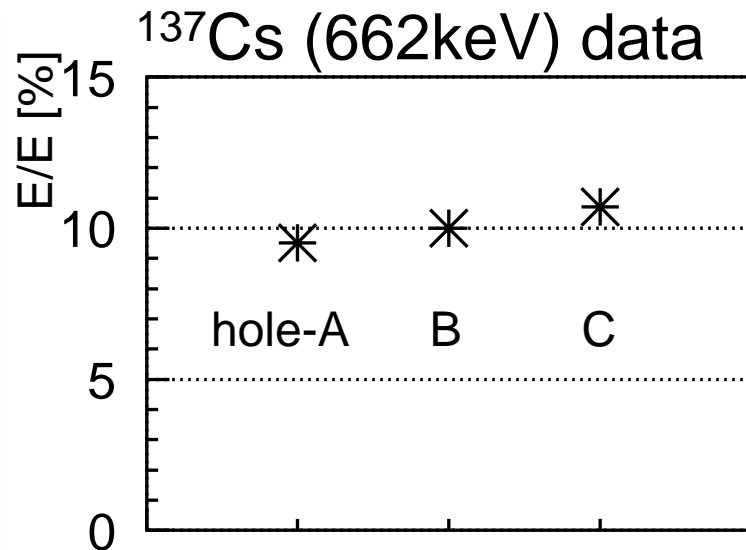


MCはデータをほぼ再現しており、自己遮蔽能力は期待される通りである

エネルギー分布



分解能の位置依存性



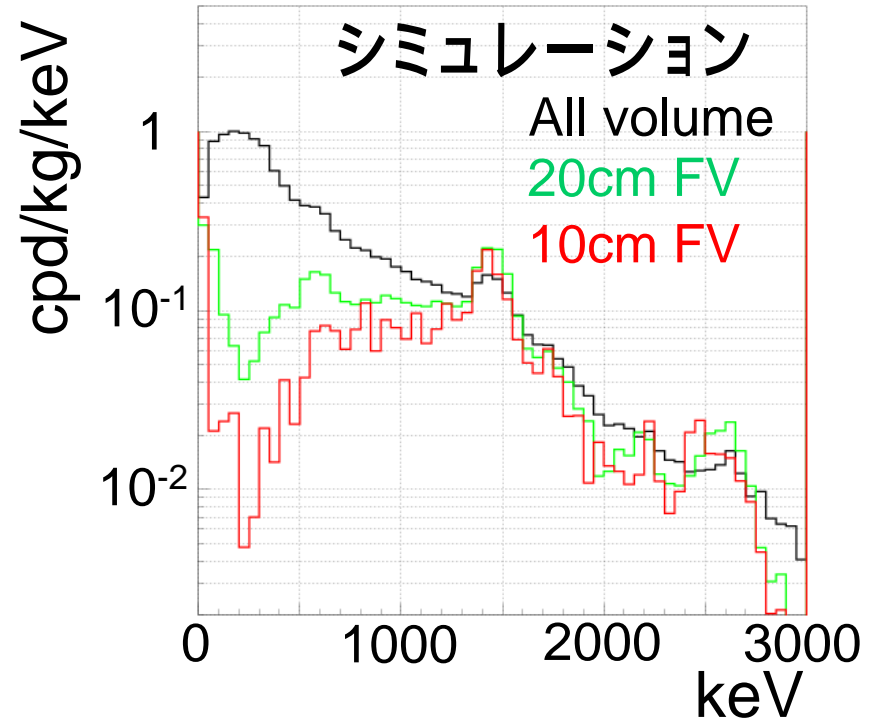
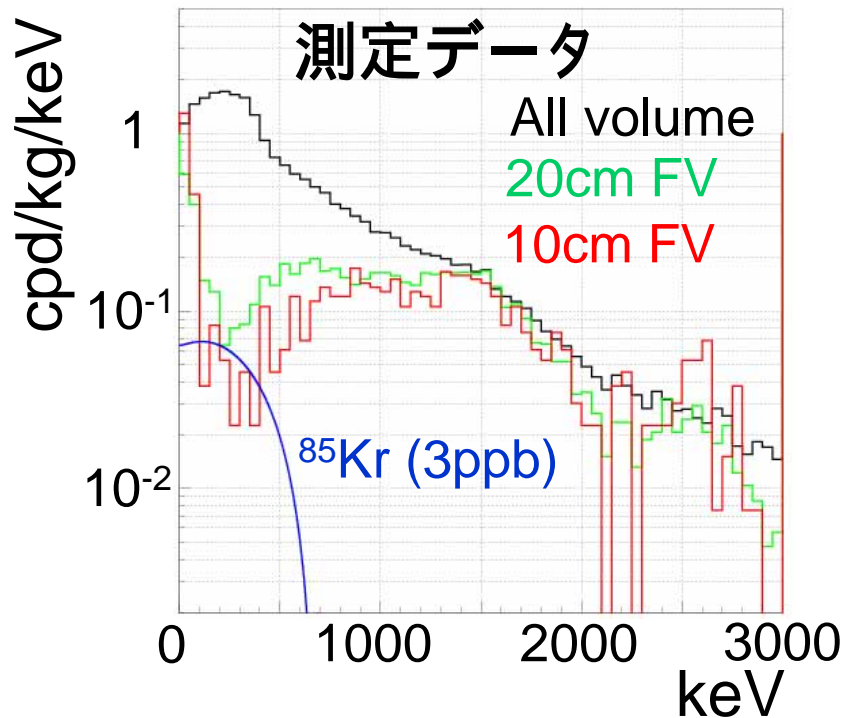
分解能

63keV @ 662keV

エネルギースケール、
分解能

→ 有効質量に依存しない

測定データと見積もりに対する自己遮蔽

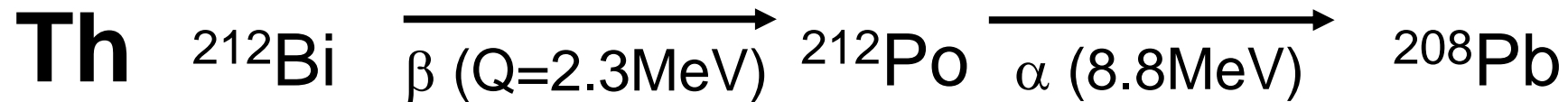
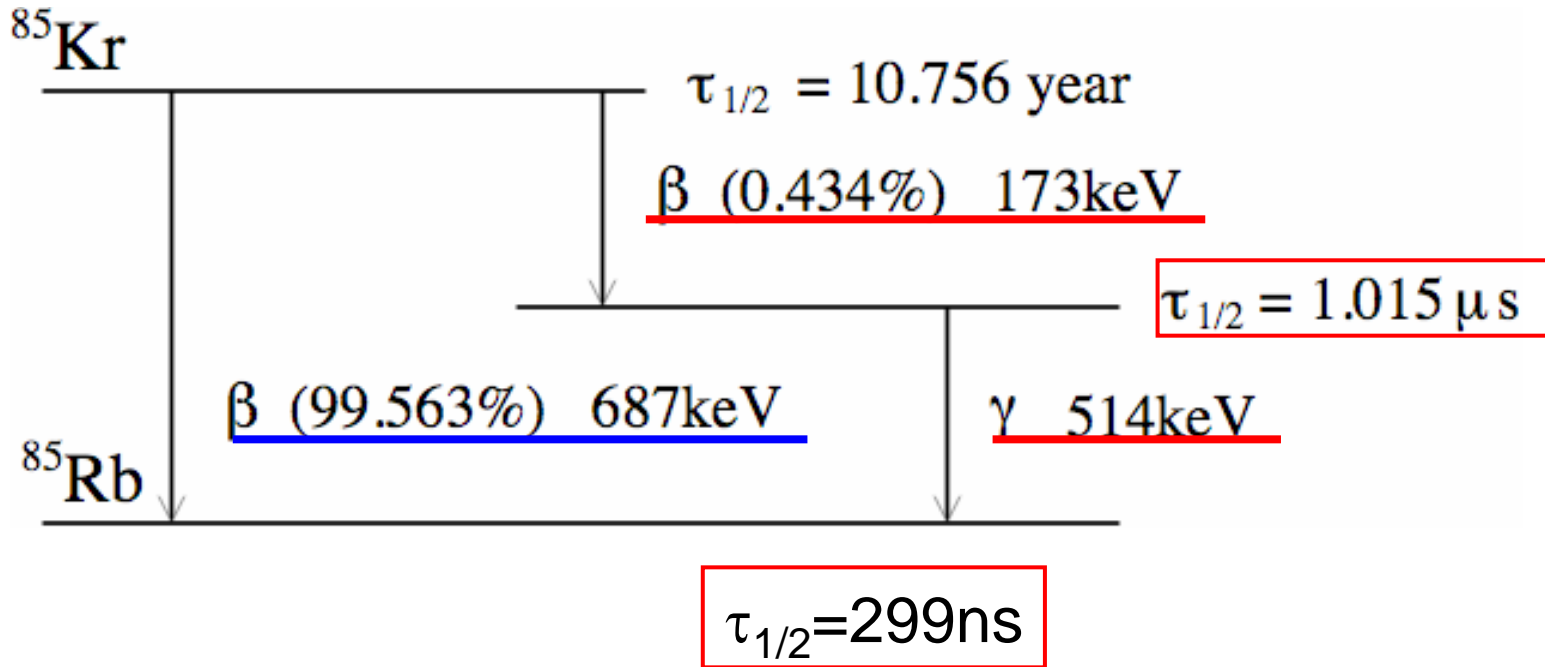


有効体積カットにより検出器中心部は低バックグラウンド
測定データの 300keV 以下に何かが存在

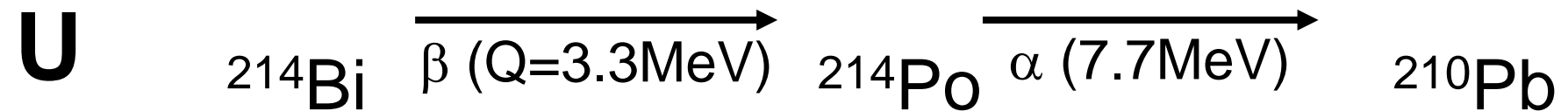
$E = 200\text{-}300\text{keV}$ 液体Xe中の ^{85}Kr (内部バックグラウンド)

$E < 100\text{keV}$ Wall effect (800kg検出器では起こらない)

Kr



$$\tau_{1/2} = 164 \mu\text{s}$$



内部バックグラウンドのまとめ

- The first measurements of the internal backgrounds in the 100kg detector were done.

- Results

- ^{238}U : = $(48 \pm 8) \times 10^{-14}$ g/g

- ^{232}Th : < 63×10^{-14} g/g

- Kr: < 2.2ppb ($\beta+\gamma$)
 \lesssim 2~3ppb (687keV β)

Goal (800kg)

1×10^{-14} g/g

2×10^{-14} g/g

1 ppt

Factor 30~50

Additional purification (filter, etc.)

Factor ~3000

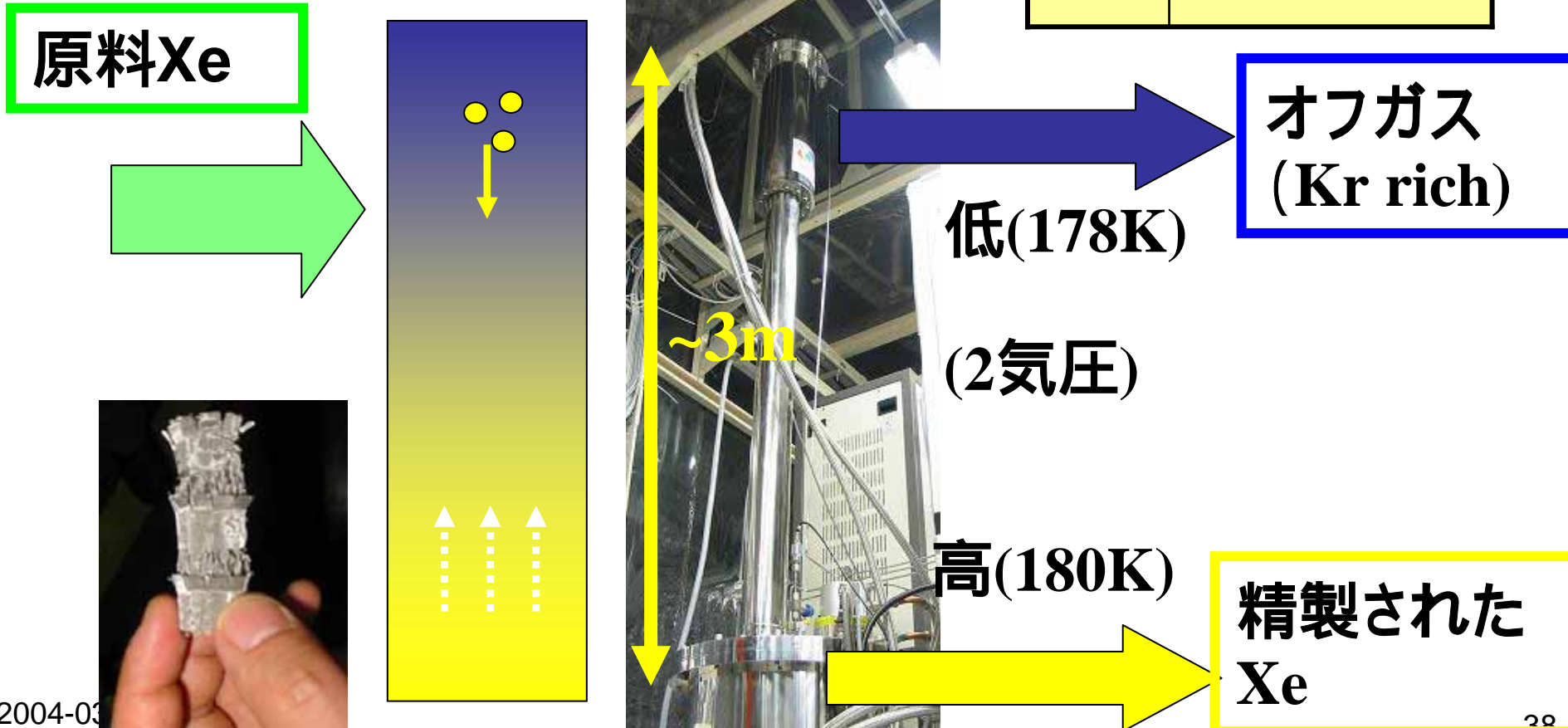
Next talk

- Our target background levels for the 800kg detector would be feasible!

蒸留によりKrを除去する。

XeとKrは沸点が異なる

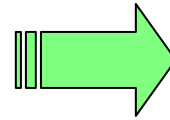
	沸点 (@1 atm)
Xe	165K
Kr	120K



100kg Xe 蒸留 (3月)

オフガス ~100倍濃縮

Kr
330 ± 100 ppb



原料Xe
(100kg)
Kr ~3 ppb

測定データより見積もられた濃度とほぼ一致

予想されるKr濃度

設計値 (~1/1000) → 0.003ppb

実績値 (<1/100以下) → <0.03ppb

まとめ

- EXO
 - 200 kg 2年後(タギングなしでやる)
 - レーザータギングはまだ働くか不明
 - 3×10^{25} 年 ~ ((遠い?)将来) 1.3×10^{28} 年(13~37meV)
- XMASS
 - 低エネルギーの低BG化は達成可能で、
 - 暗黒物質(DM)、太陽ニュートリノ検出器としては有望。
 - 2重ベータ崩壊には、
 - PMTを遠ざける別のアイデアを使う必要がある。
 - 人手、資金不足で、DMを優先。現在、足踏みしている。
 - コラボレーター(人、資金)募集
 - 1×10^{25} 年 ~ ((遠い?)将来) 3×10^{27} 年(20~60meV)