



TOHOKU  
UNIVERSITY

# カムランド実験における ${}^7\text{Be}$ 太陽ニュートリノ観測

東北大学理学研究科ニュートリノセンター  
中島 恭平

第16回 ICEPPシンポジウム in 白馬、2009年2月15日

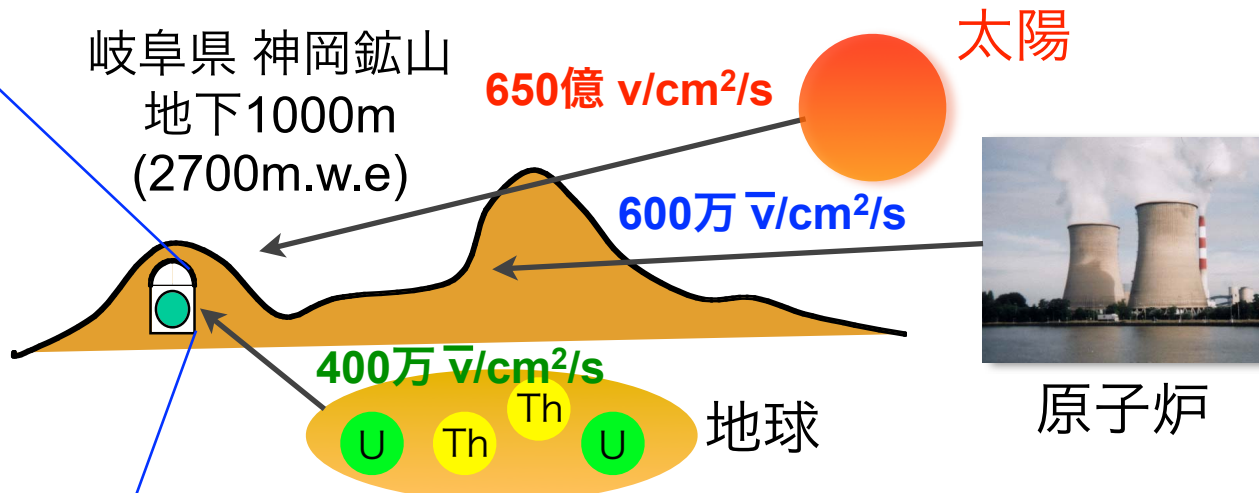
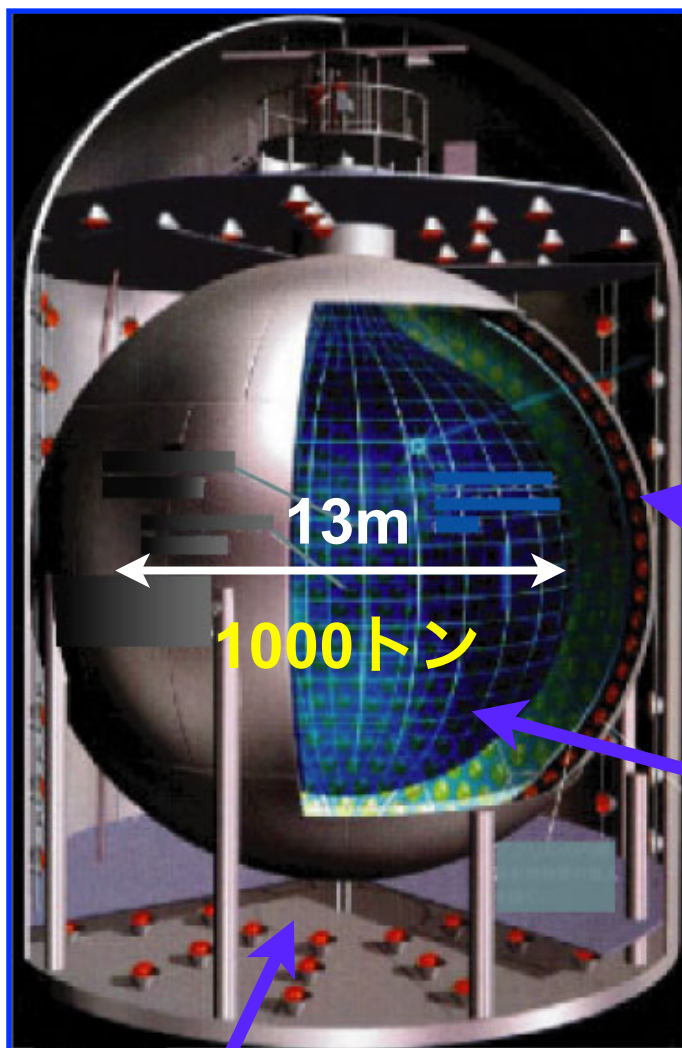
# もくじ

---

1. KamLAND実験
2. 太陽ニュートリノ
3. 液体シンチレータの純化
4. バックグラウンド、 ${}^7\text{Be}$ ニュートリノ解析
5. まとめ

# KamLAND

Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector



PMT 1879本 (17" 1325本 + 20" 554本)  
 ▶ 光電面カバー率 : 34%  
 ▶ エネルギー分解能 :  $6.9\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$

外部検出器  
 ▶ 水3200トン (Φ20m×H20m)  
 ▶ 宇宙線veto、外部γ線遮蔽

液体シンチレータ ( $\rho = 0.78\text{g/cm}^3$ )  
 450 p.e./MeV

CCCCCCCCCCCC ▶ ドデカン (80%)  
Cc1ccc(C)c(C)c1 ▶ プソイドクメン (20%)  
Cc1ccc(C)cc1 ▶ PPO (1.36g/l)

# これまで、これからのKamLAND



1st result  
原子炉 $\bar{\nu}_e$ の欠損を観測

2nd result  
スペクトルの歪みを観測

3rd result  
2周期のE/L分布を観測  
振動パラメータの精密測定

太陽 $\bar{\nu}_e$ の制限

地球 $\bar{\nu}_e$ の初観測に成功

液体シンチレータ  
の純化

Solar Phase (自分)

高橋永(ひさし)君の発表  
(‘02-’07の解析結果)

これまで

これから

構成メンバー

- スタッフ~10人
- 学生 ~20人
- コラボレーター~50人

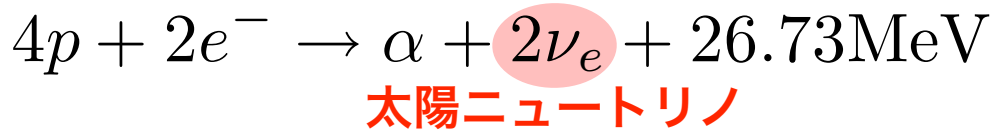
2011年以降、KamLANDは $0\nu 2\beta$ 観測を開始予定。

▶  $0\nu 2\beta$ 実験：渡辺寛子さん

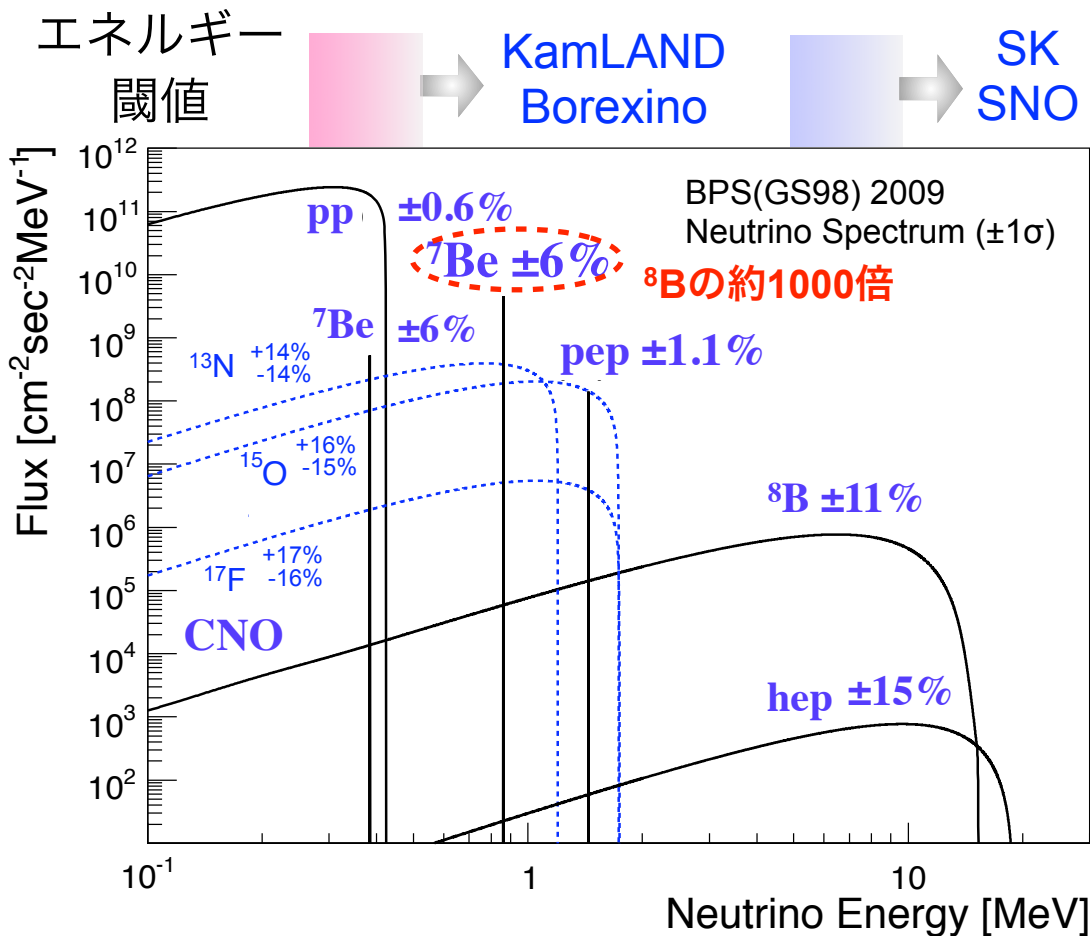
▶ 太陽 $\nu$ 観測、二重 $\beta$ 崩壊実験に向けた電子回路の開発：吉田学立(ひさたか)君

# 太陽ニュートリノ

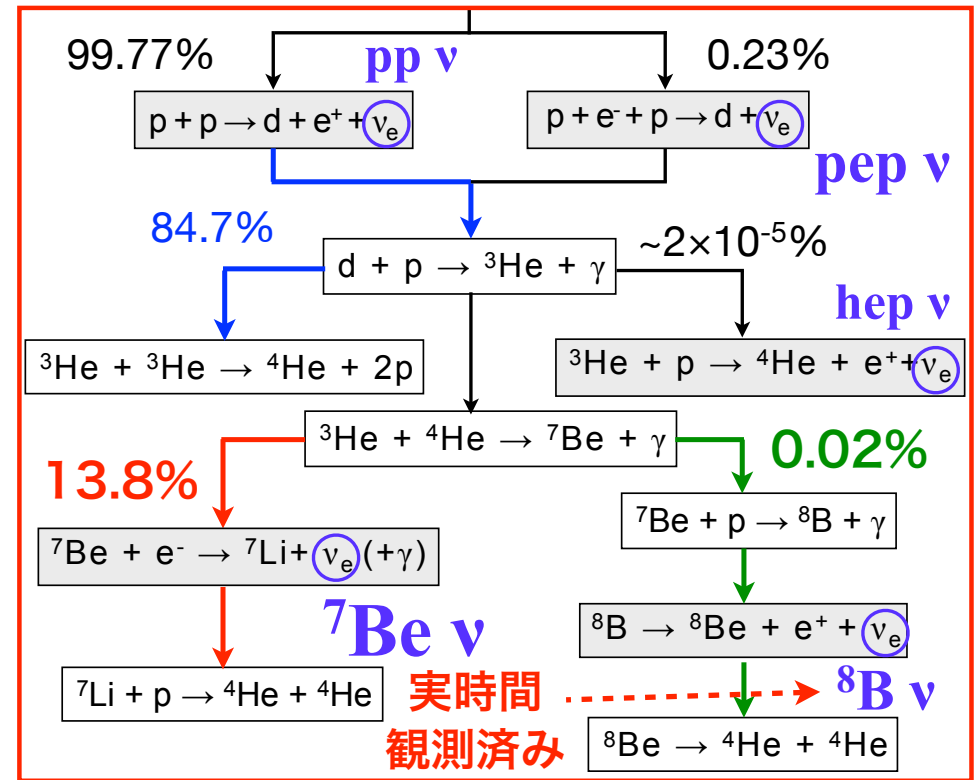
太陽は核融合反応で輝いている。



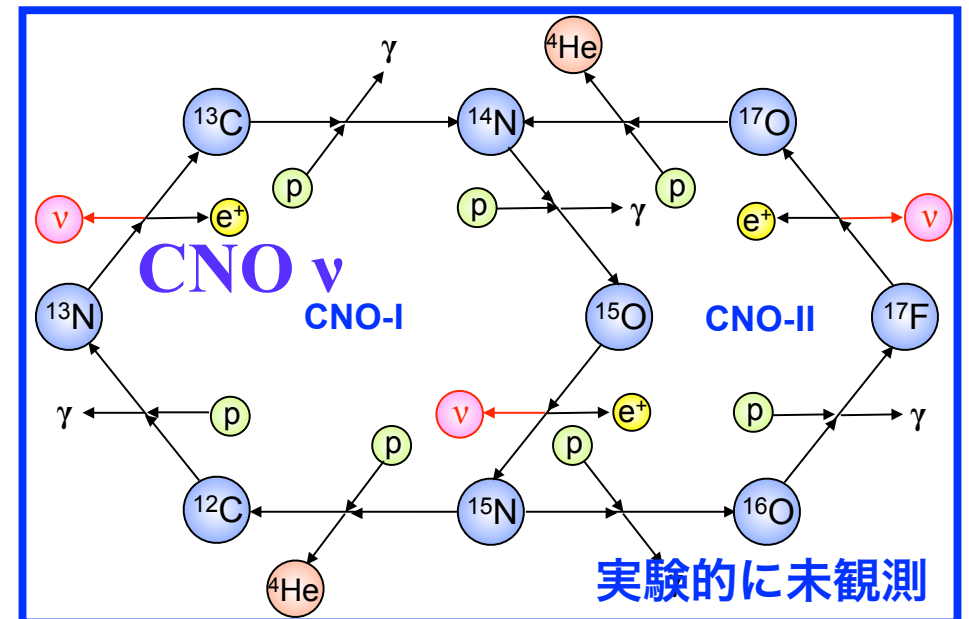
標準太陽モデル(SSM)によるフラックス



## pp連鎖反応 (エネルギー比 : 98.5%)



## CNOサイクル (エネルギー比 : 1.5%)



# 太陽ニュートリノ実験の歴史

塩素実験  
(1967-1994)

$E_{th} = 814 \text{ keV}$

- pp連鎖, CNOサイクルの区別
- 主に ${}^8\text{B}$   $\nu$ を観測
- 予想の約30%のイベント

ガリウム実験  
(1990-)

$E_{th} = 233 \text{ keV}$

- 主にpp  $\nu$ を観測
- 予想の約50%のイベント

放射化学実験

閾値以上の信号を  
積分値観測

太陽ニュートリノ問題の発生 (1970)

他の実験で確認へ

水チェレンコフ

Kamiokande  
(1983-1996)

$E_{th} = 7 \text{ MeV}$

- $\nu$ の飛来方向 → 太陽 $\nu$ の存在
- ${}^8\text{B}$   $\nu$ の初リアルタイム観測
- 予想の約40%のイベント  
→ 塩素実験の結果を追証

${}^8\text{B}$   $\nu$ は不定性大, pp  $\nu$ は不定性小  
pp  $\nu$ 測定へ

${}^7\text{Be}$   $\nu$ が0の可能性もある。  
更に高精度の実験へ

$E_{th} = 5 \text{ MeV}$

実時間観測

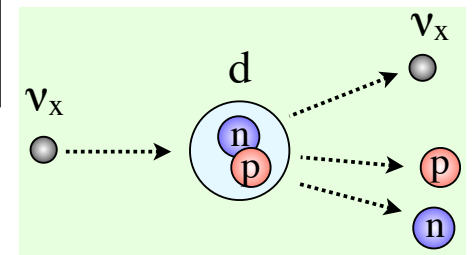
Super-Kamiokande  
(1996-)

- ${}^8\text{B}$   $\nu$ の精密測定

SNO  
(1999-)

- CC, NC, ES反応を観測
- $\nu$ のフレーバ変化を観測

中性カレント(NC)



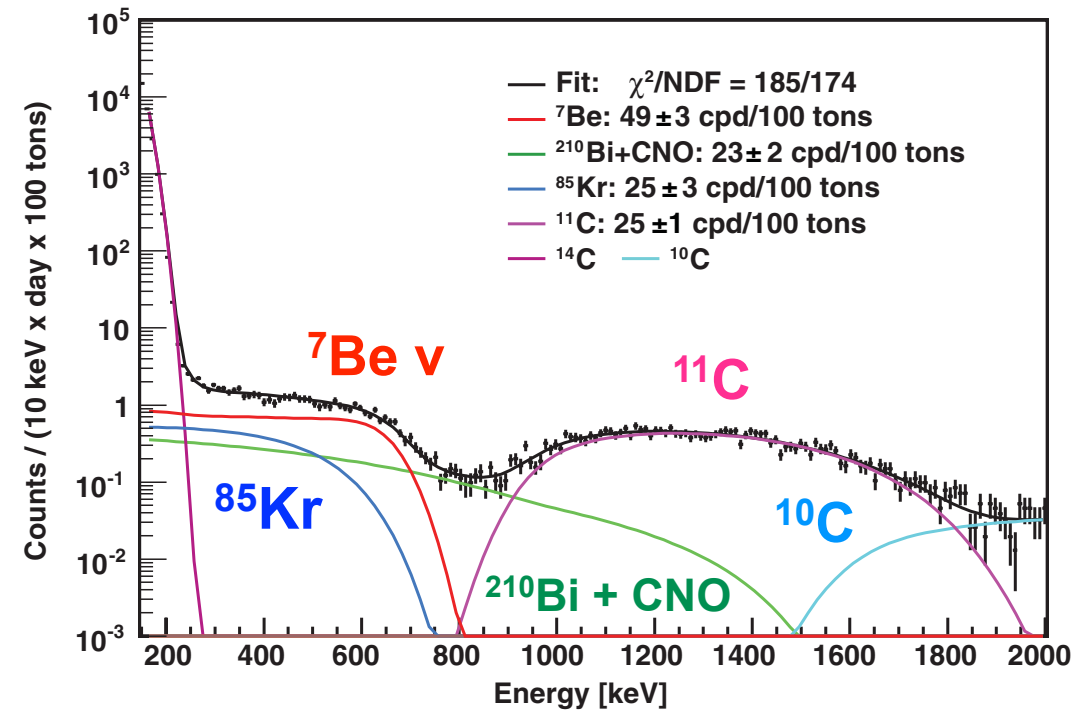
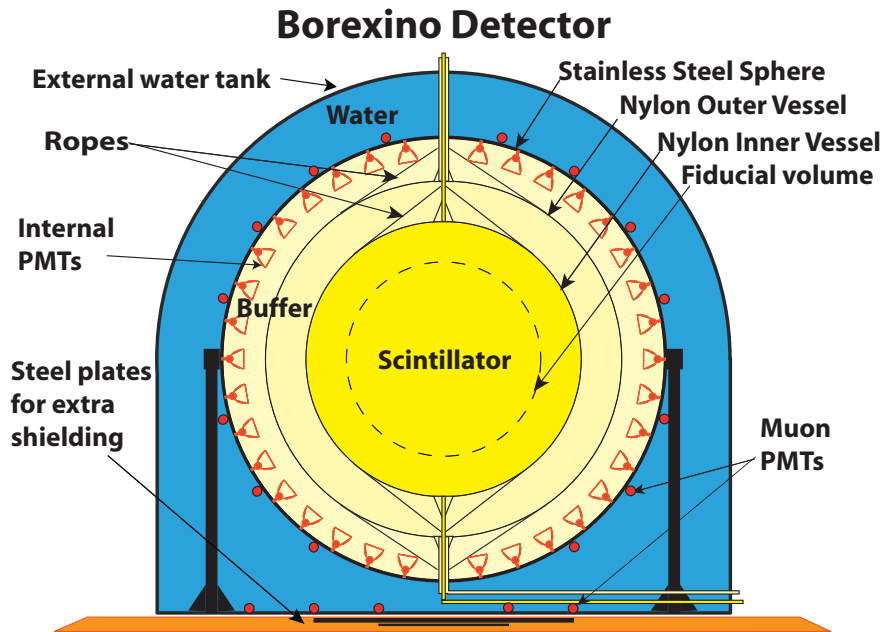
KamLANDでニュートリノ  
振動を観測 (2002)

太陽ニュートリノ問題の終焉

---> 当初の目的  
太陽内部の検証へ

# Borexino実験

- 2007年、 ${}^7\text{Be}$ ニュートリノの実時間観測に成功
- KamLANDと同じく、液体シンチレータ型検出器
- Borexino : 300 ton  $\Leftrightarrow$  KamLAND : 1 kton



${}^7\text{Be } \nu = 490 \pm 30(\text{stat. } 6\%) \pm 40(\text{syst. } 8\%) \text{ evt/d/kt (2008)}$   
(有効質量 78.5 ton, 192日の観測結果)

大有効質量を用いて、KamLANDでも ${}^7\text{Be } \nu$ 観測を目指す。

# 研究動機のみとめ

## Q. ${}^7\text{Be}$ ニュートリノ観測の意義は？

### 1. 標準太陽モデルの精密検証ができる。

- ▶  ${}^7\text{Be}$   $\nu$ はpp連鎖の主要な反応から生成
- ▶  ${}^7\text{Be}$   $\nu$ の理論誤差 6%  $\Leftrightarrow$   ${}^8\text{B}$   $\nu$  11%
- ▶ 高統計観測が可能(~500 evt/d/kt)

### 2. MSW効果の確認。

$\Leftrightarrow$   ${}^7\text{Be}$   $\nu$  : 真空振動(生存確率 ~ 0.54)

$\rightarrow$   ${}^8\text{B}$   $\nu$  : 物質振動(生存確率 ~ 0.3)

### 3. 低エネルギー太陽ニュートリノ観測の幕開け。

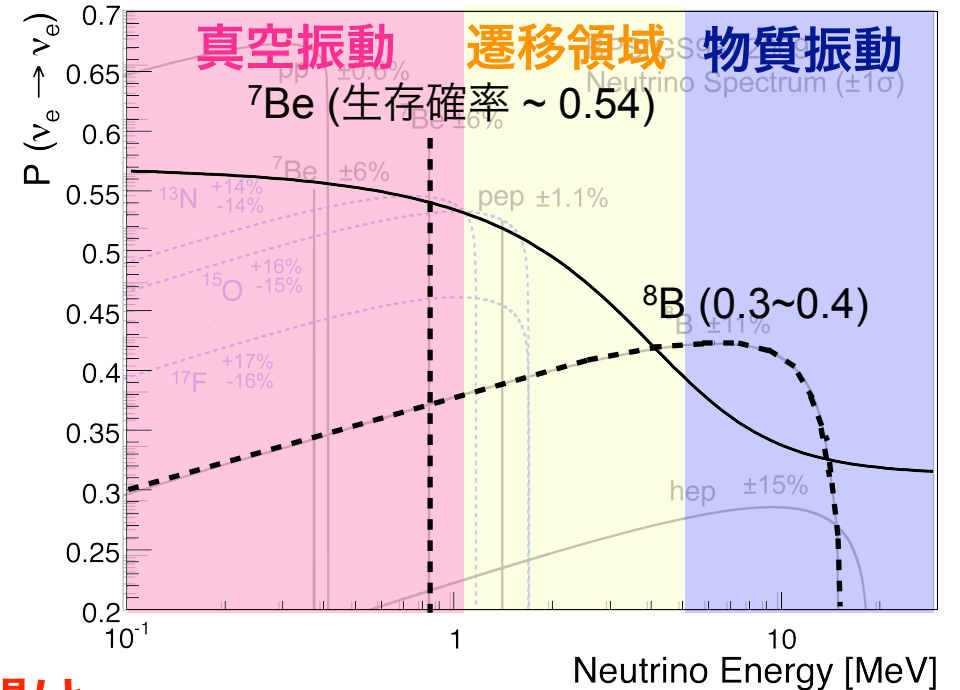
${}^7\text{Be}$   $\nu$ 観測は、将来のCNO, pep  $\nu$ へ向けた第一歩

$\rightarrow$  太陽組成問題の解決へ

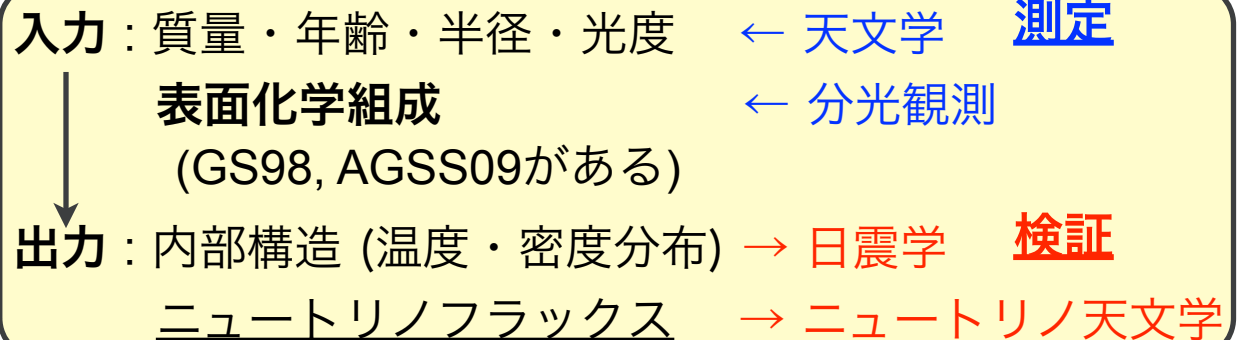
- 低金属モデル(AGSS09)は日震学と矛盾

- ${}^7\text{Be}$   $\nu$  : 9%、CNO  $\nu$ : 30%の差

MSW効果による $\nu_e$ の生存確率の変化の様子

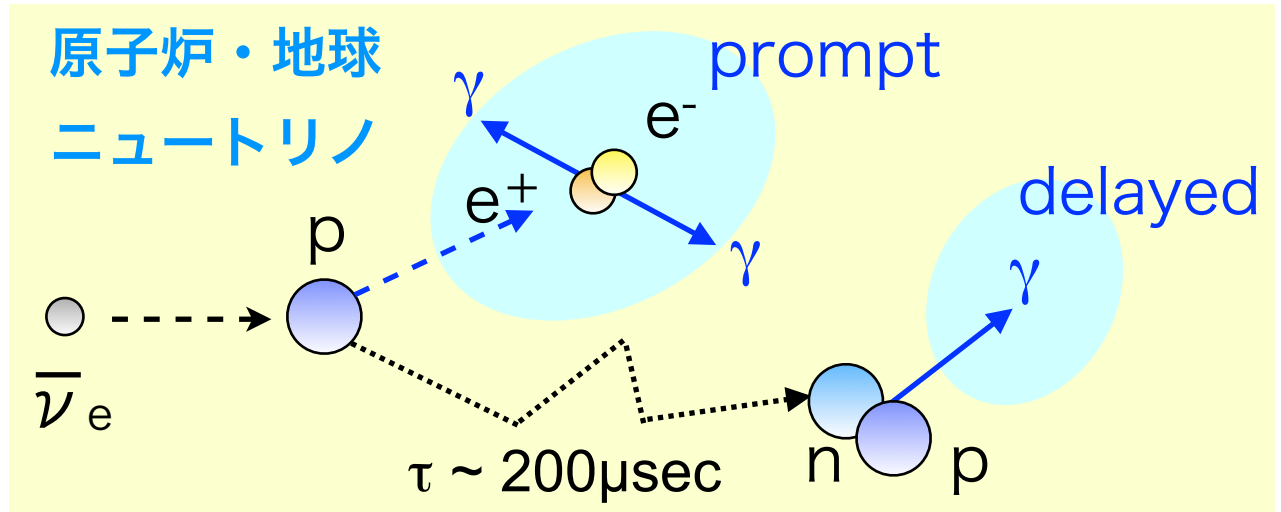
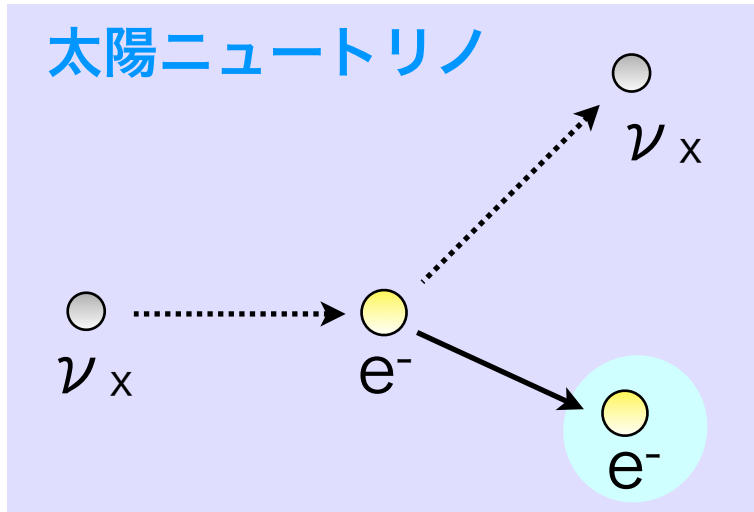


標準太陽モデルについて

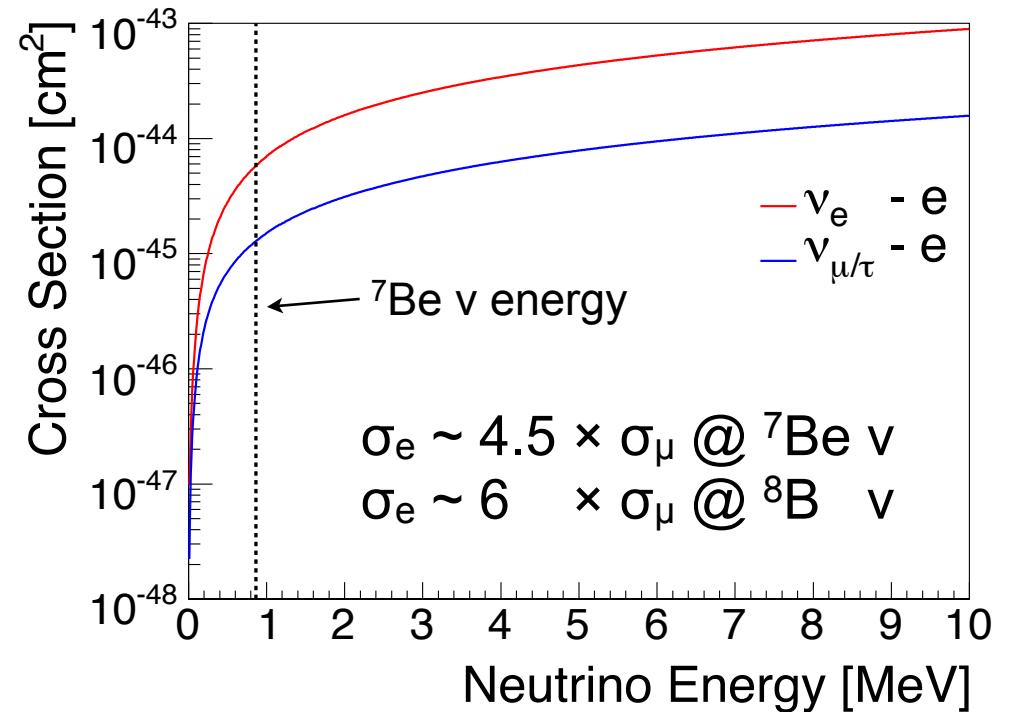
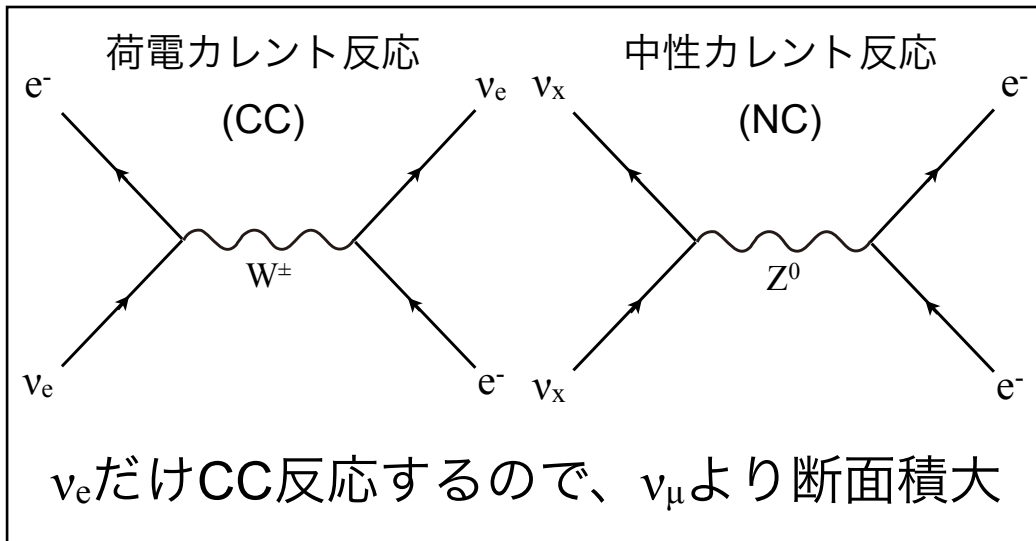




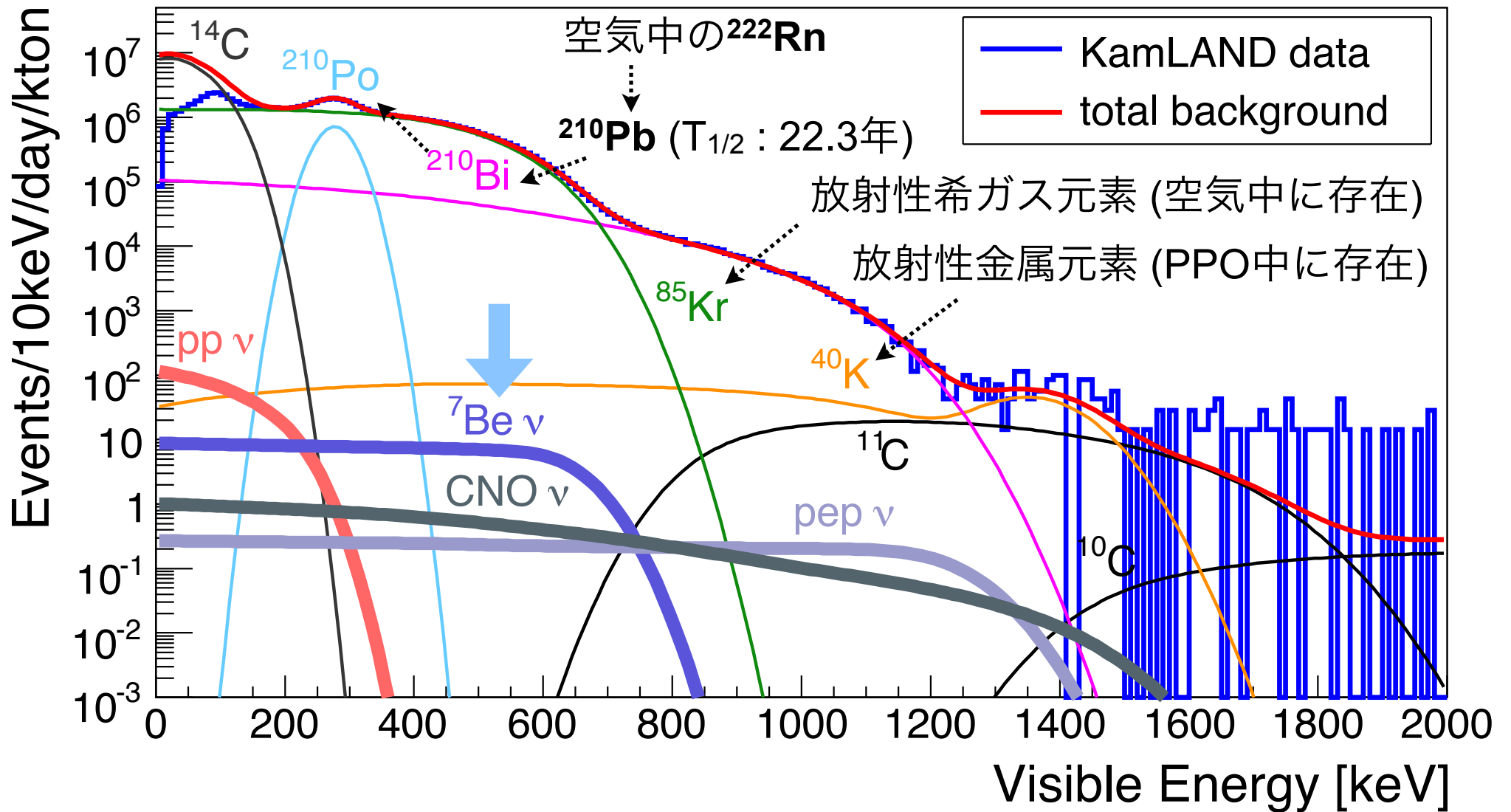
# 太陽ニュートリノの検出原理



- 反跳電子を観測
- シングルイベントなので、**BGの影響大**



# 純化前のスペクトル



$^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$  (金属) → 液体シンチレータの蒸留により除去

$^{222}\text{Rn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  (希ガス) → 高純度窒素パージにより除去

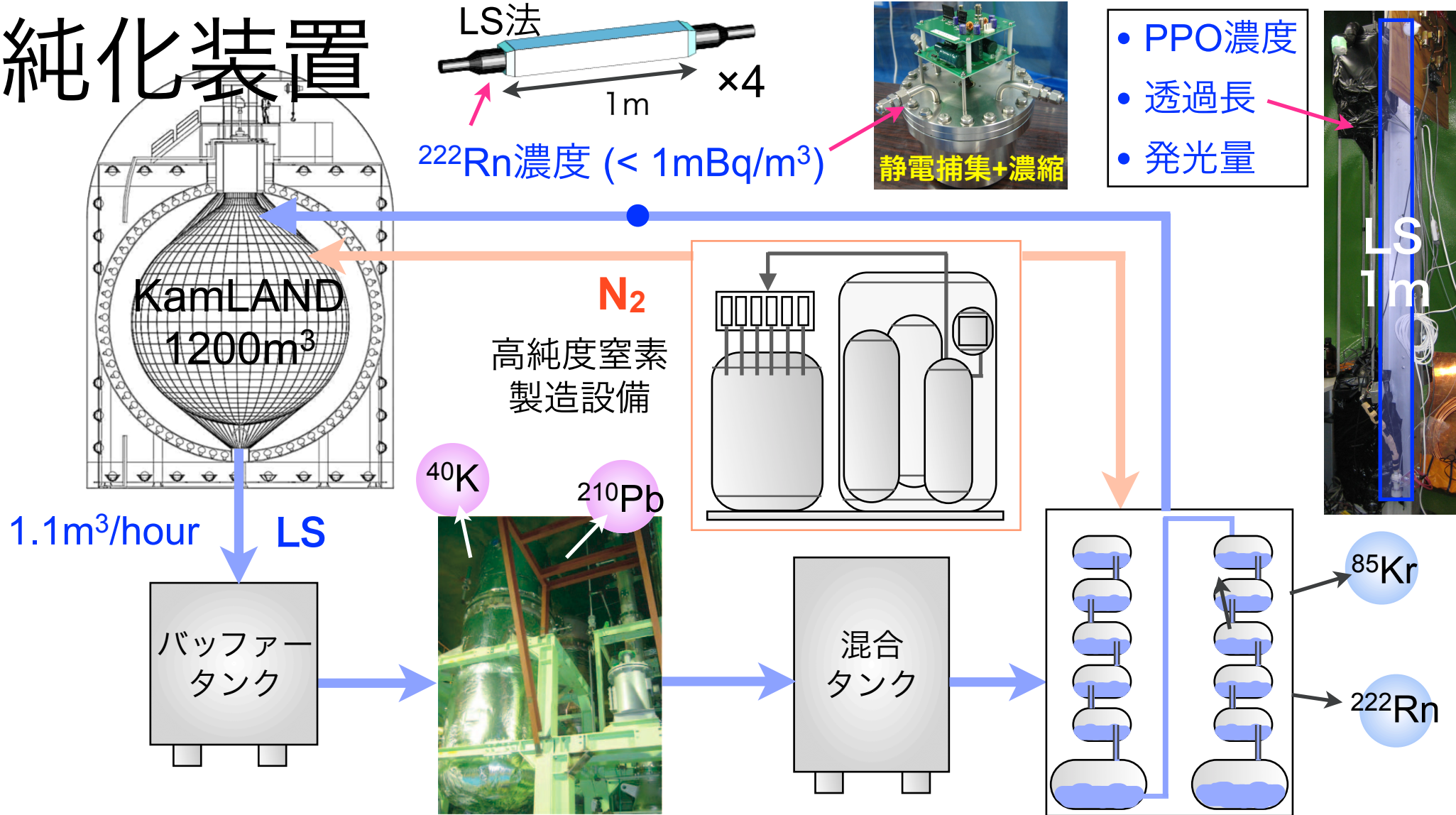
$^{11}\text{C}$  (宇宙線 $\mu$ 起因) → 新エレクトロニクス導入により、最大95%除去

目標除去率

$^{210}\text{Pb}$  : 4桁

$^{85}\text{Kr}$  : 5桁

# 純化装置



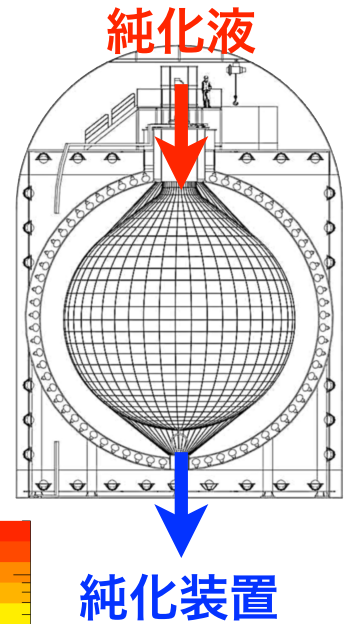
種類	圧力 [kPa]	温度 [°C]
PC塔	2.0 (±0.1%)	62 (±3%)
NP塔	2.0 (±0.2%)	97 (±1%)
PPO塔	0.60 (±0.5%)	175 (±1%)

プソイドクメン → ドデカン → PPO)  
 沸点 169°C                      216°C                      360°C

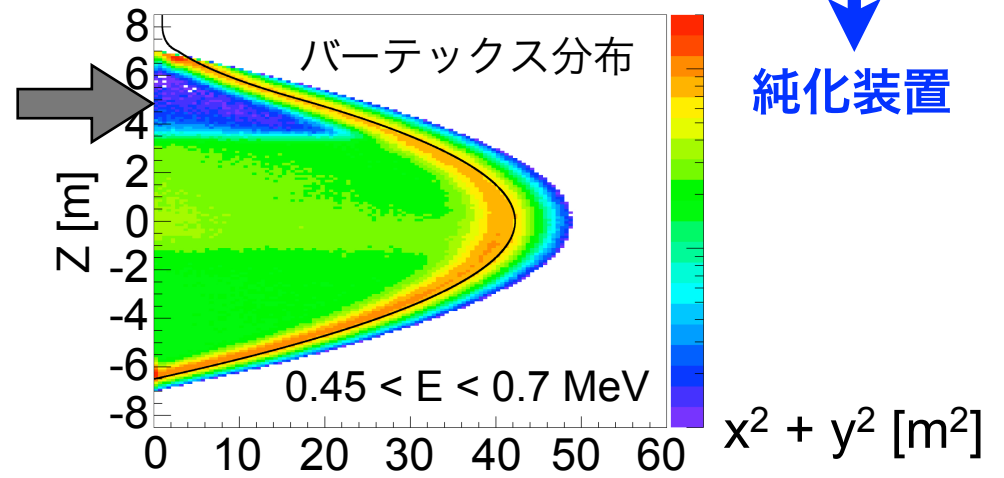
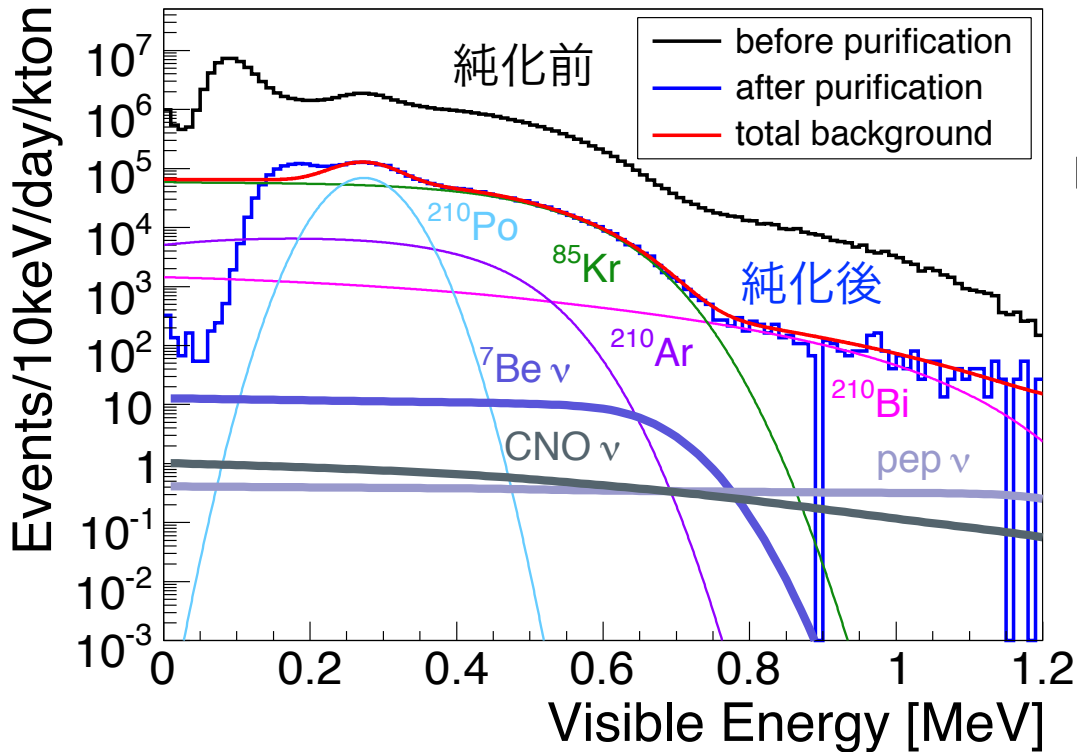
KamLAND全体の液を置換するのに約2ヶ月

# 液体シンチレータの純化 (第1回目)

- ▶ 第1回目純化 : 2007/5/12 - 2007/8/1
- ▶ 純化体積 : 1699 m<sup>3</sup> (1.4 × KamLAND)



Upper Part (R < 5.0m, Z > 3.5m)



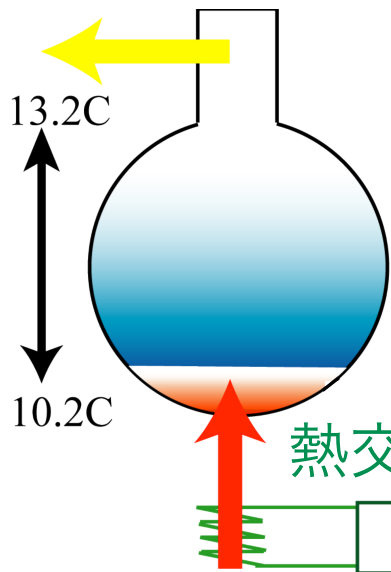
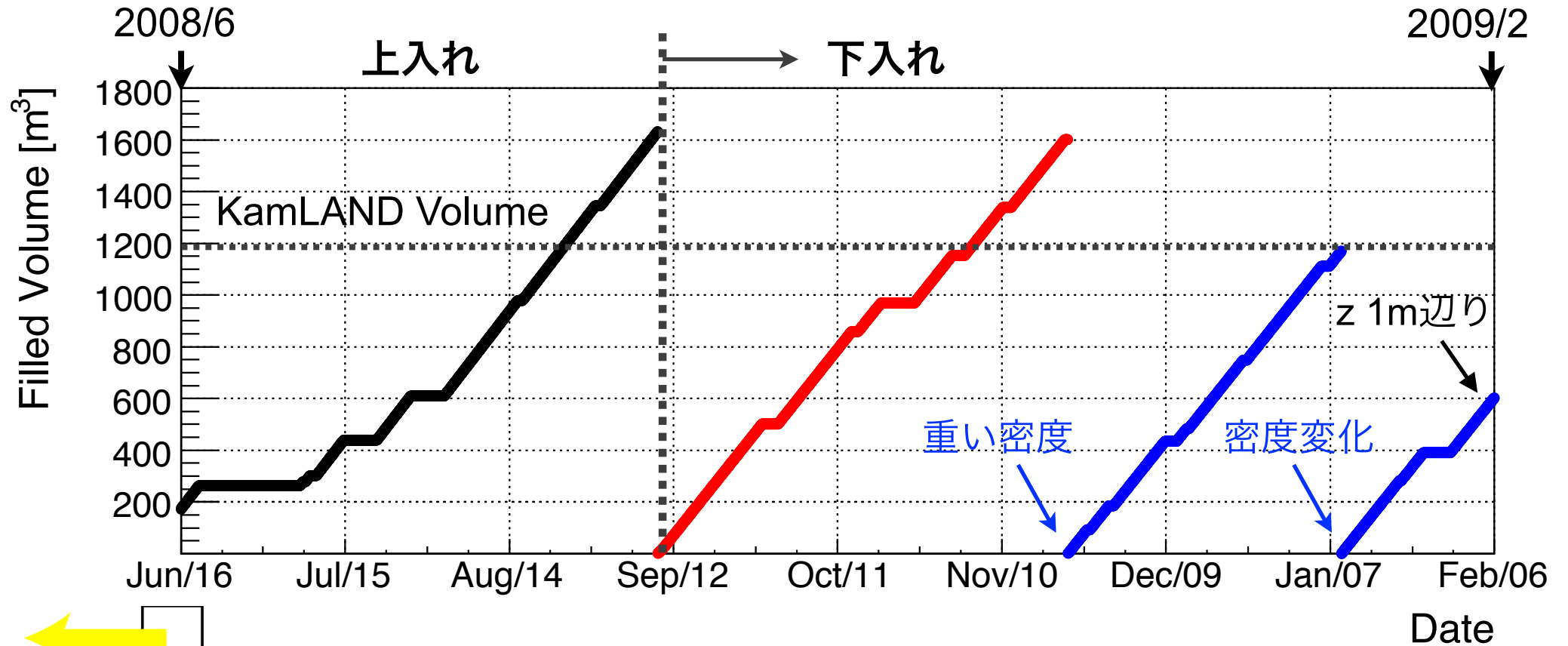
途中で液の混合が起きたが、最終的に密度差を与える事で分離に成功。

核種	不純物量	除去率	目標
<sup>210</sup> Bi	0.2±0.1 mBq/m <sup>3</sup>	(5±3)×10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
<sup>85</sup> Kr	14 <sup>+1</sup> <sub>-4</sub> mBq/m <sup>3</sup>	(3±1)×10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-5</sup>

1回の純化で2~3桁落ち  
 (目標<sup>210</sup>Bi 4桁、<sup>85</sup>Kr 5桁)  
 → 複数回蒸留で<sup>7</sup>Be観測へ

# 液体シンチレータの純化 (第2回目)

(2008/6 - 2009/2)



$\rho$  と  $T$  を調整

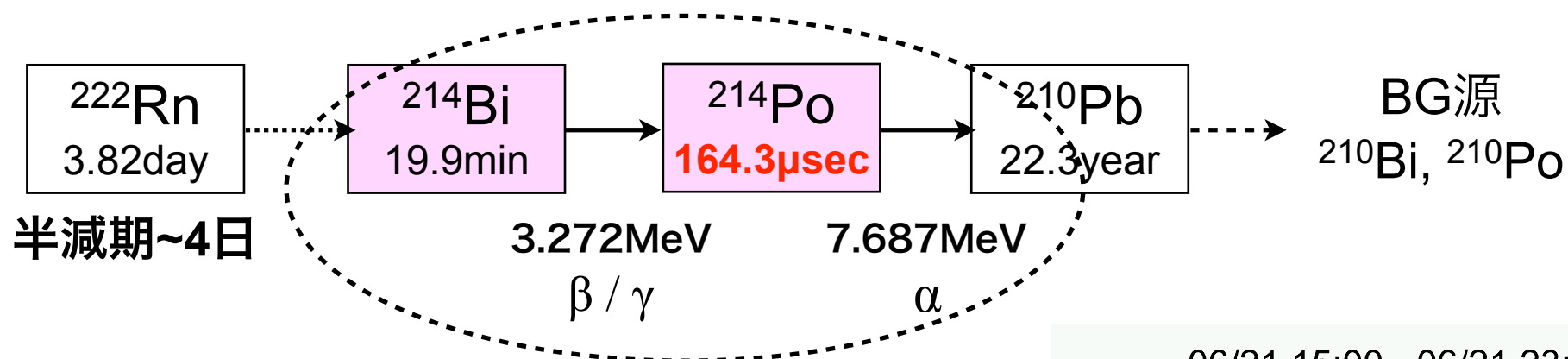
- ▶ 軽い液による全体の一様化、バルーン重量の調整
- ▶ 重い液によって純化液の境界を形成

総純化液量 : 4855m<sup>3</sup> (KamLANDの4.1倍)

実際には2~3回全体を純化

ラドンイベントは純化液のトレーサーとして使える。

(若干の漏れや、配管からの染み出しで入ってくる。)

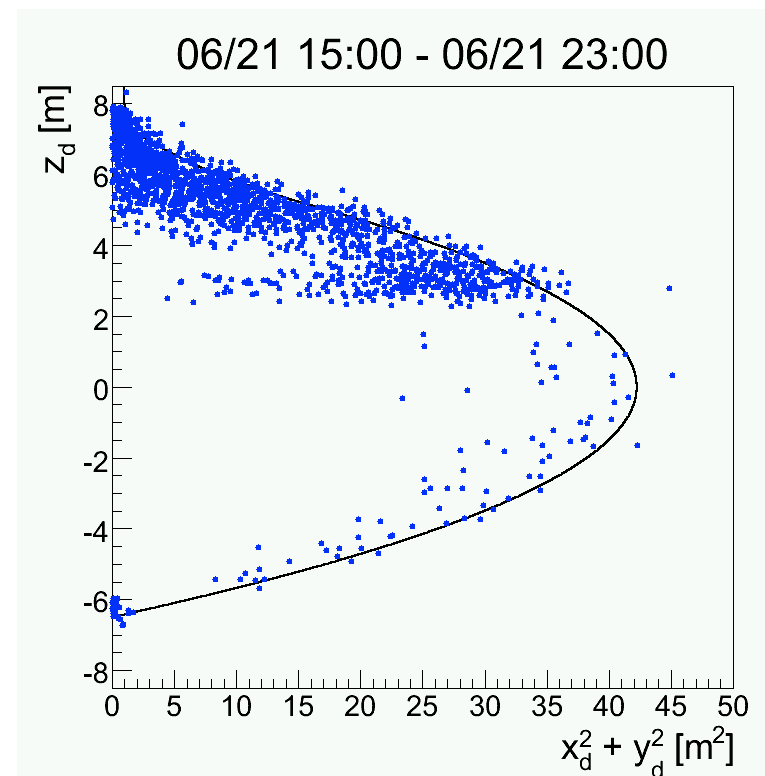


半減期~4日

遅延同時観測

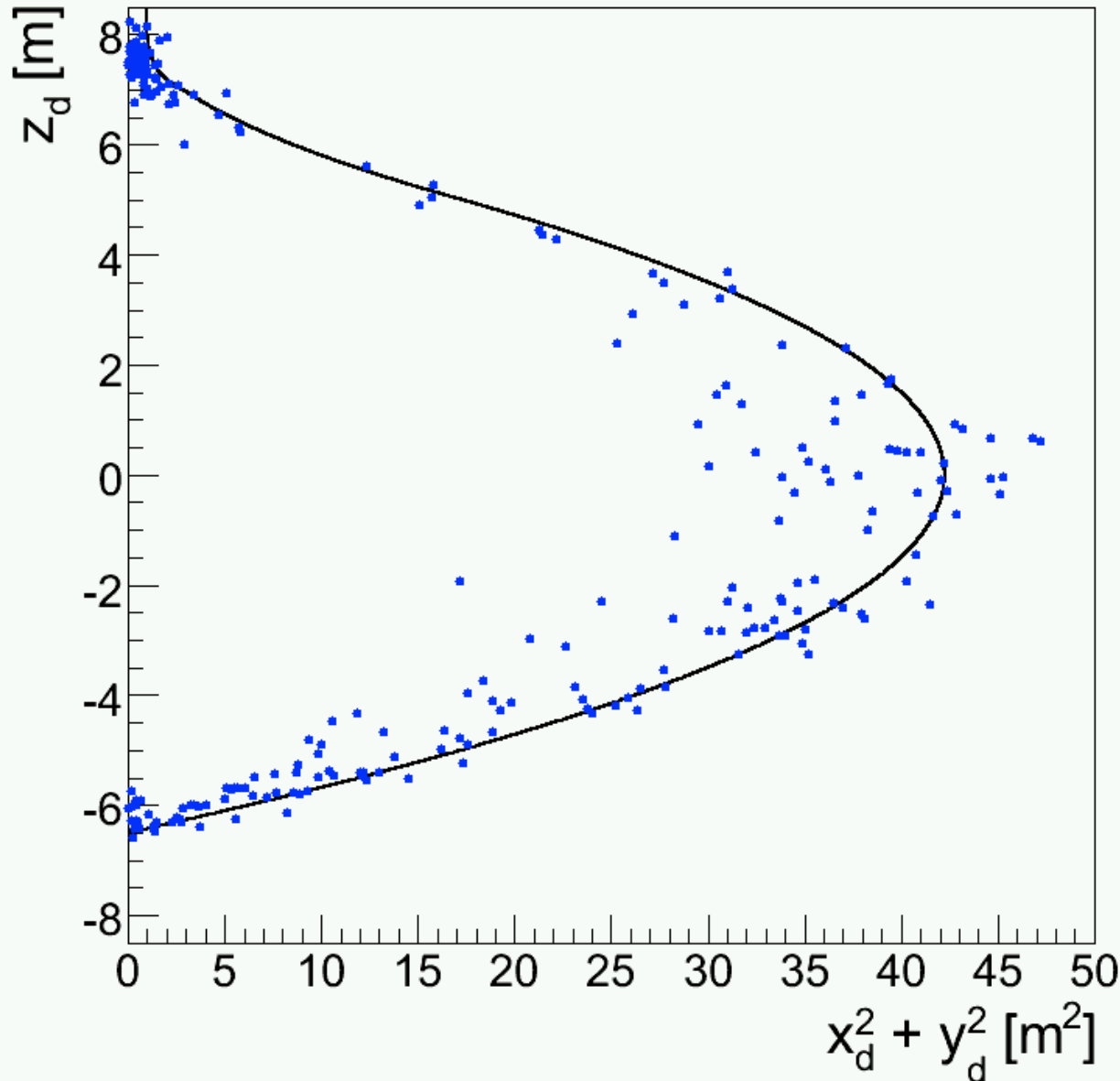


純化の進行をラドンの  
バーテックス分布で確認。



# 純化の様子 ( $^{222}\text{Rn}$ )

06/16 07:00 - 06/16 15:00



6月 - 9月

上入れ (境界保持)

9月 - 11月

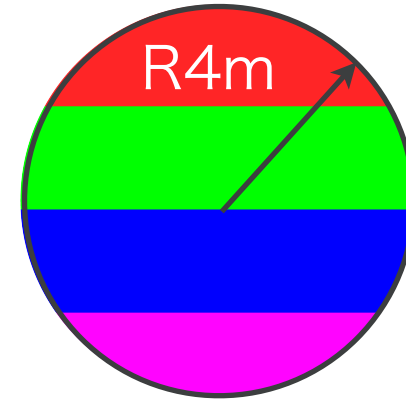
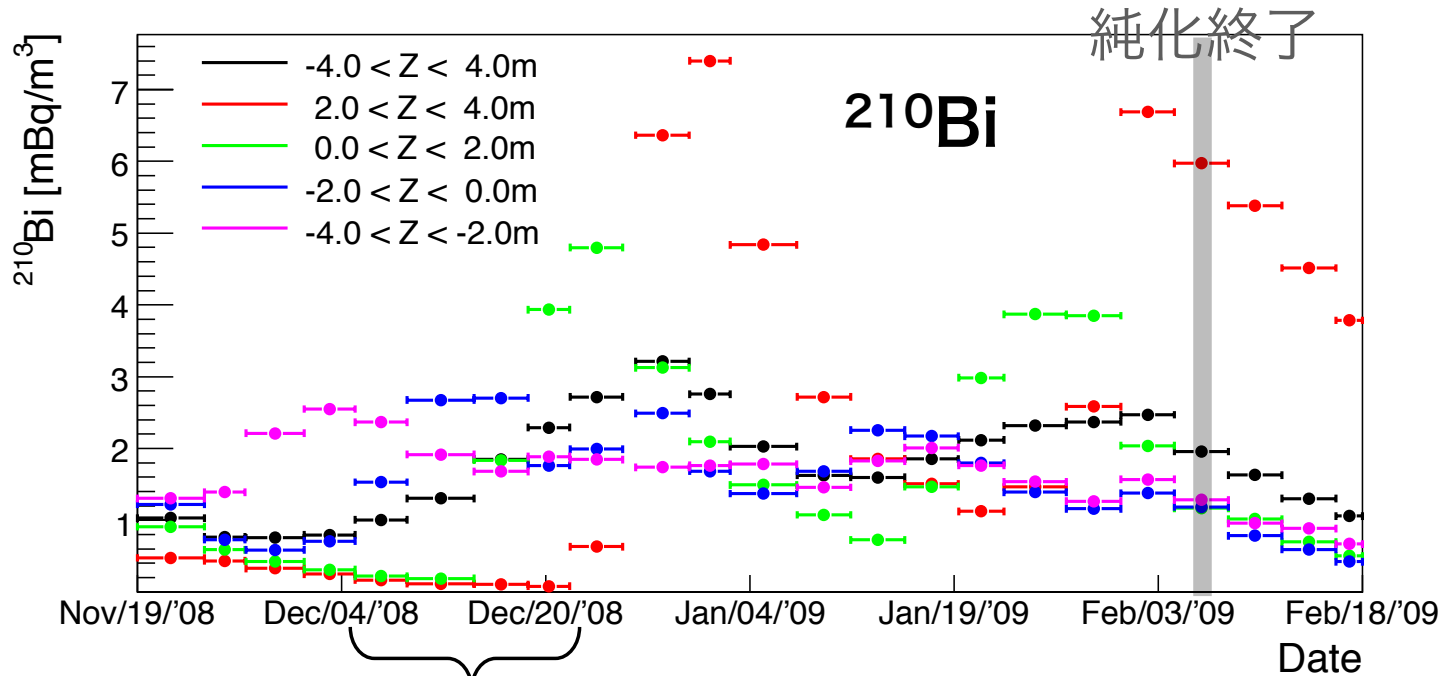
下入れ (かき混ぜ)

11月 - 2月

下入れ (境界保持)

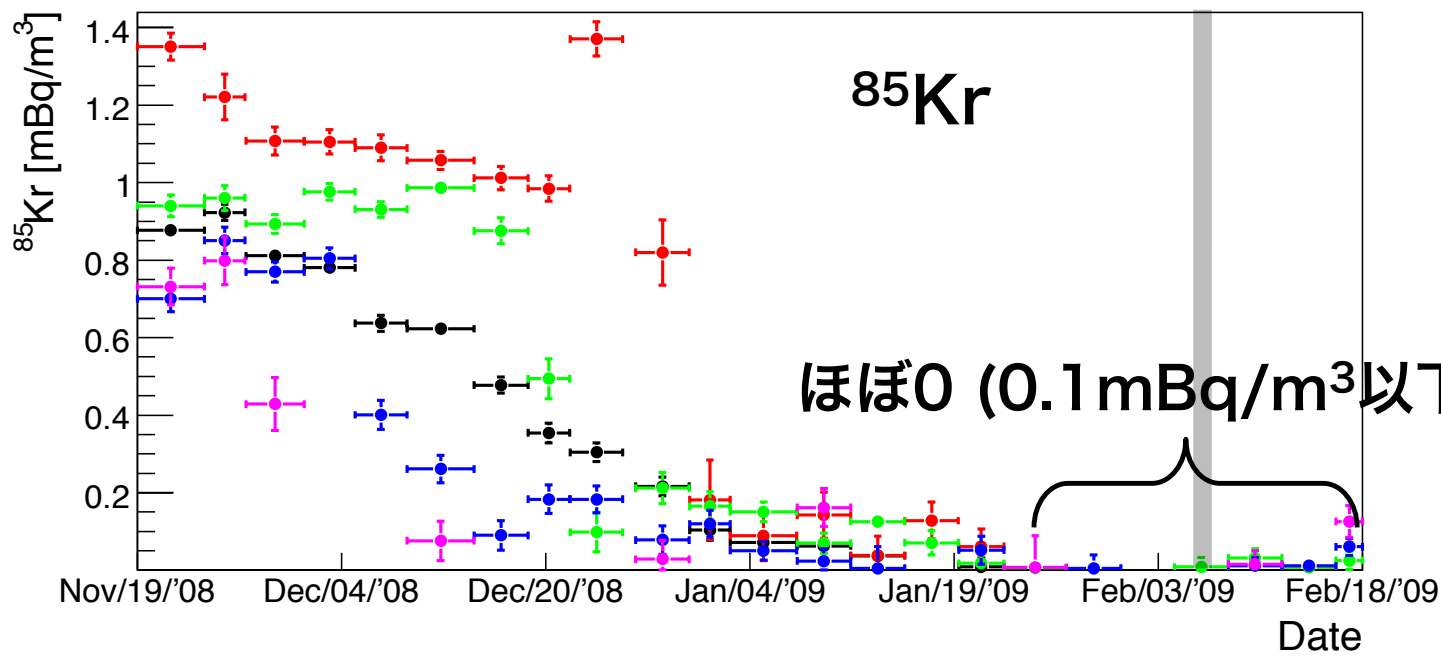
注： $^{222}\text{Rn}$ の半減期は約4日

# 210Bi / 85Kr濃度の時間変化



- 純化液が到達すると 210Bi濃度上昇
- 現在210Biは崩壊中

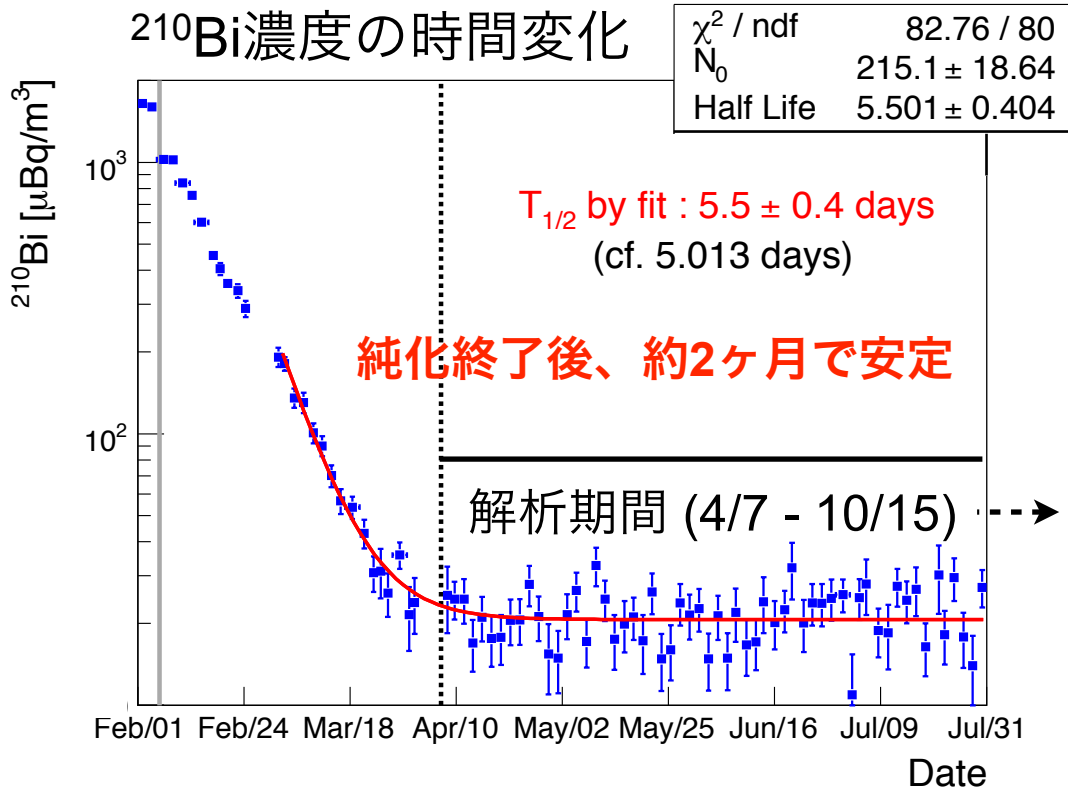
対流の影響の少ない時期 最高0.1mBq/m<sup>3</sup>まで



ほぼ0 (0.1mBq/m<sup>3</sup>以下)



# 純化後のバックグラウンド



**Live time : 161.2 days**  
(c.f. Borexino 192 day)

$^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Po}$ の放射平衡  
が崩れる。(10倍以上)

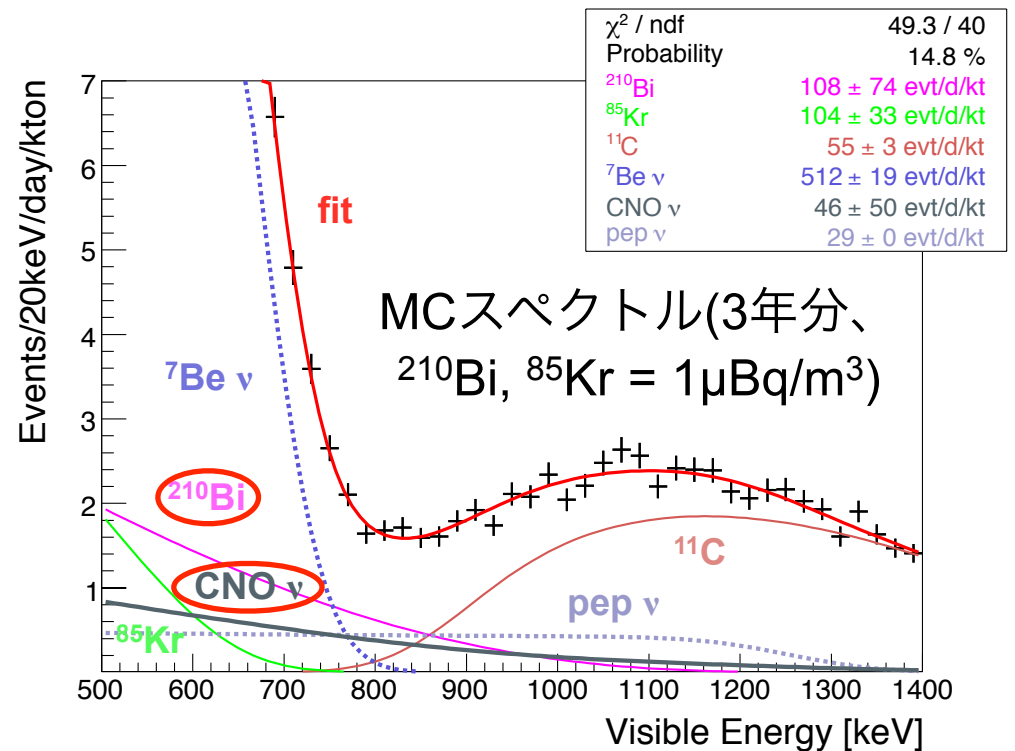
CNO  $\nu$ が困難に。  
→  
 $^{210}\text{Po}$ 濃度から  
 $^{210}\text{Bi}$ 濃度が  
制限出来ない。

## • $^{210}\text{Bi}$ 除去効率の低下

2回目の除去率は  
1回目の1/10程度。  
→ 純化の限界？

## • 発光量の低下

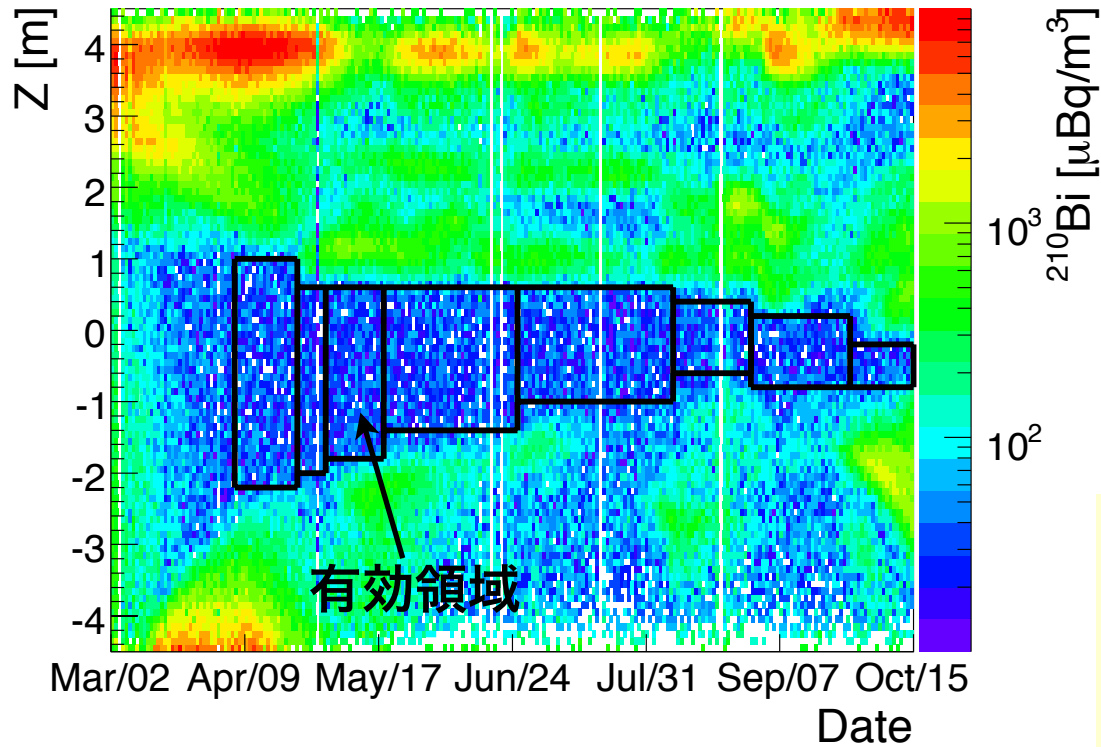
→ エネルギー分解能の低下  
- 1回目~6%, 2回目~15%



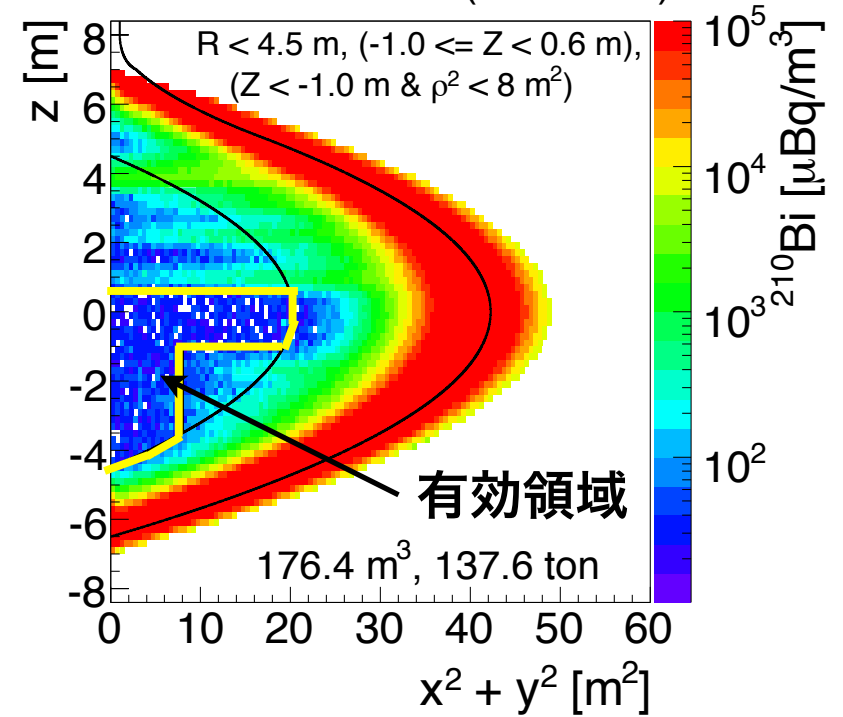
# 有効領域の選び方

- 対流の影響で、 $^{210}\text{Bi}$ の少ない領域が変化。  
→ 低BG領域をZと $\rho^2$  cutで選択。
- 環境 $\gamma$ 線の影響の少ない、 $R < 4.5$  mを選択。

$^{210}\text{Bi}$ のZ分布の時間変化 ( $R < 4.5$  m)



バーテックス分布 (6/25 - 8/8)



## 対流の原因

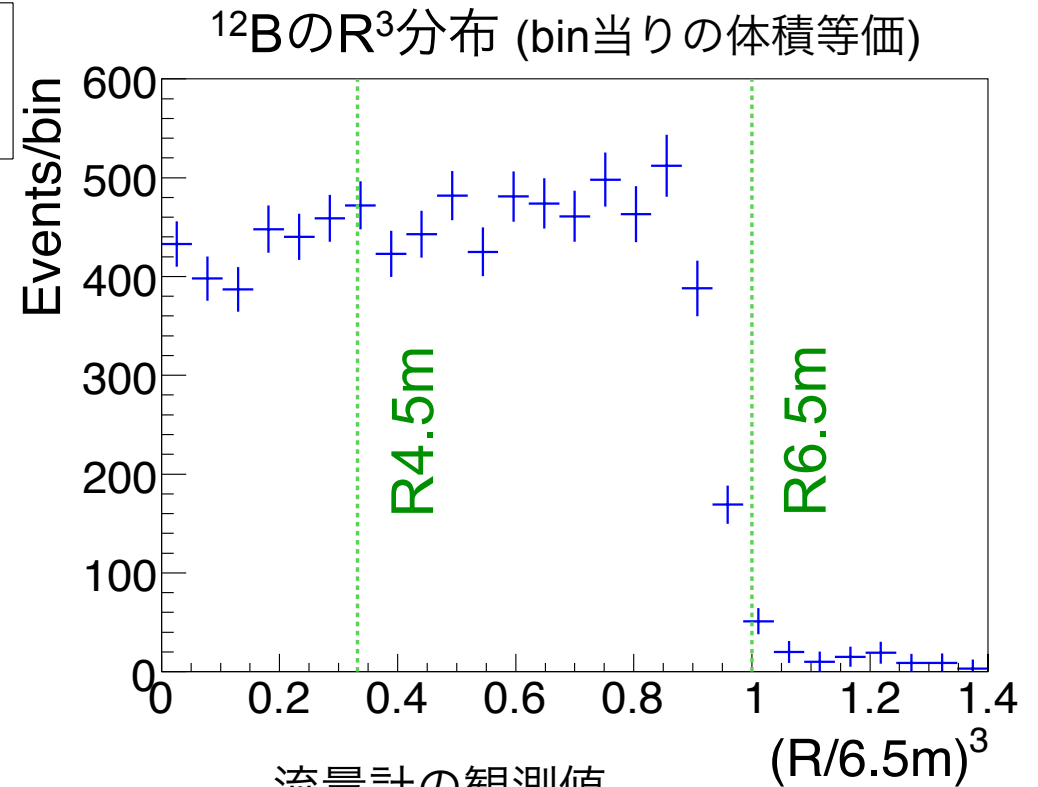
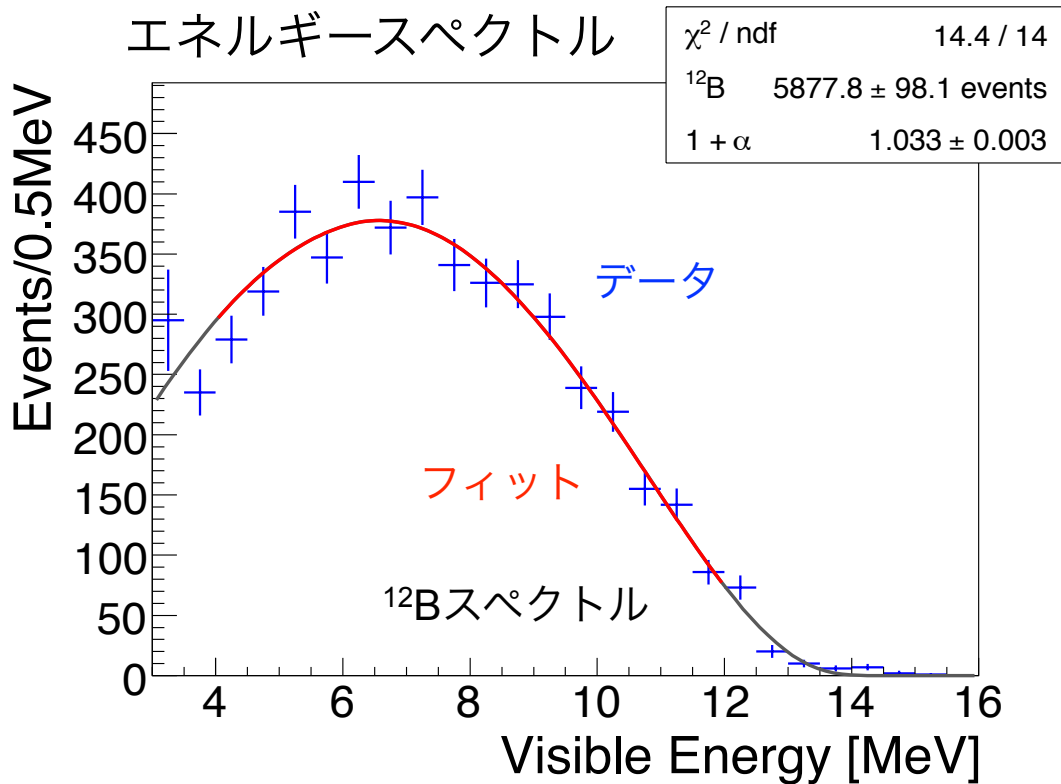
- 液の密度が高さによってわずかに違う。
- 液の温度分布(下部 $\sim 10^\circ\text{C}$ 、上部 $\sim 14^\circ\text{C}$ )
- 外水槽( $10\sim 24^\circ\text{C}$ )との温度差

**Exposure : 17.78 kton\*day**  
(平均110.3 ton)

cf. Borexino  
15.1 kton\*day

# 有効体積の不定性

宇宙線ミュオン起源で、検出器内に一様に生成される  
 $^{12}\text{B}$  ( $Q_\beta = 13.4 \text{ MeV}$ ,  $T_{1/2} = 20.2 \text{ ms}$ ,  $\sim 60 \text{ evt/d/kt}$ )を利用する。



体積比 :  $V_{\text{fiducial}} / V_{\text{total}} = 141.4 \text{ m}^3 / (1171 \pm 25 \text{ m}^3) = 0.1207 \pm 2.1\%(\text{syst.})$

$^{12}\text{B}$ 比 :  $N_{\text{fiducial}} / N_{\text{total}} = 0.1195 \pm 4.3\%(\text{stat.}) \pm 2.7\%(\text{syst.})$

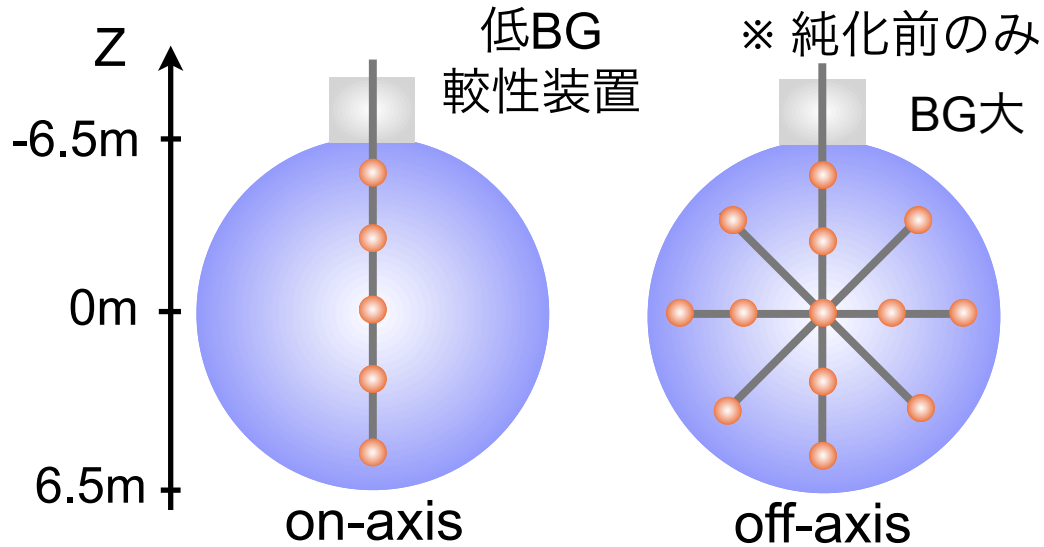
→ 差 :  $(1.0\% + 4.3\%) \pm 2.1\% \pm 2.7\% = 6.3\%$

↑  
vertexのエネルギーバイアス、thresholdの効果

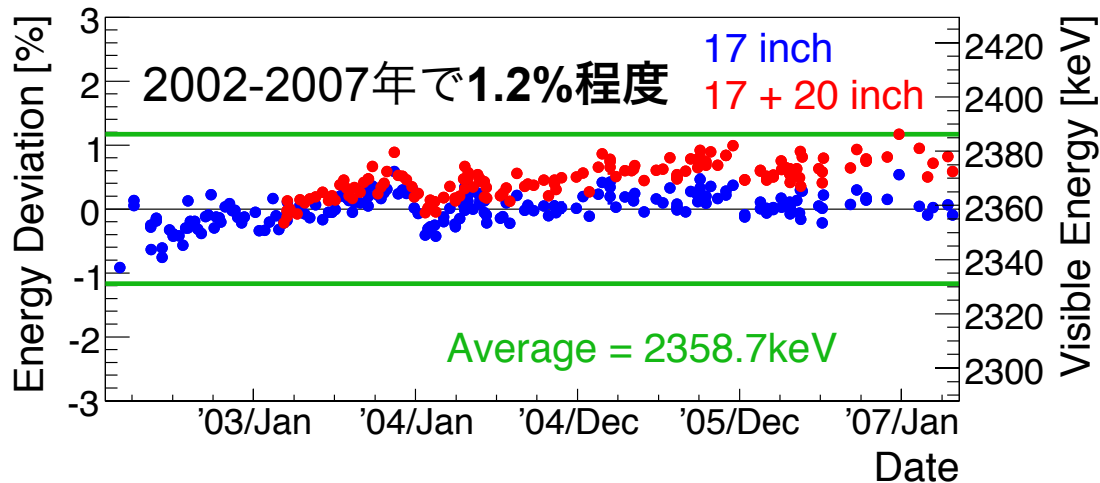
# エネルギー較正

## 1. 線源 ( $^{60}\text{Co}$ , $^{68}\text{Ge}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{203}\text{Hg}$ )

- Z方向の補正 : -6m~+6mまで、0.5m刻み
- 時間変化 :  $^{60}\text{Co}/^{68}\text{Ge}$ で確認



$^{60}\text{Co}$ による純化前の長期安定性 (2002 - 2007)

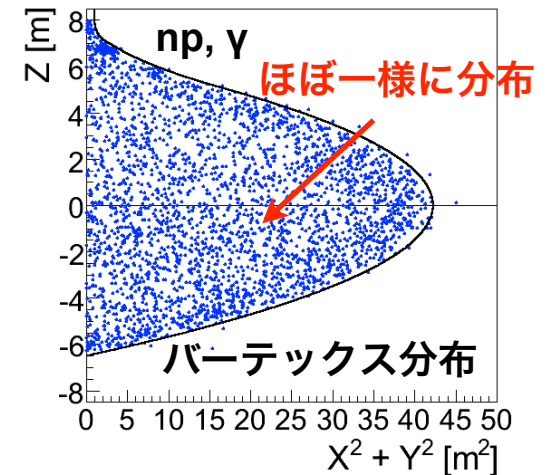


## 2. $n(p,d)\gamma$ (宇宙線 $\mu$ 起因)

- ~3000 evt/day/kton程度。
- $X^2+Y^2$  方向の補正
- 時間変化の補正

線源E (keV)

type	RealE	VisE
$^{203}\text{Hg}$	279	214
$^{137}\text{Cs}$	662	57
$^{68}\text{Ge}$	1022	860
$^{60}\text{Co}$	2506	2347
$np, \gamma$	2225	2211



長期にわたってエネルギーは安定

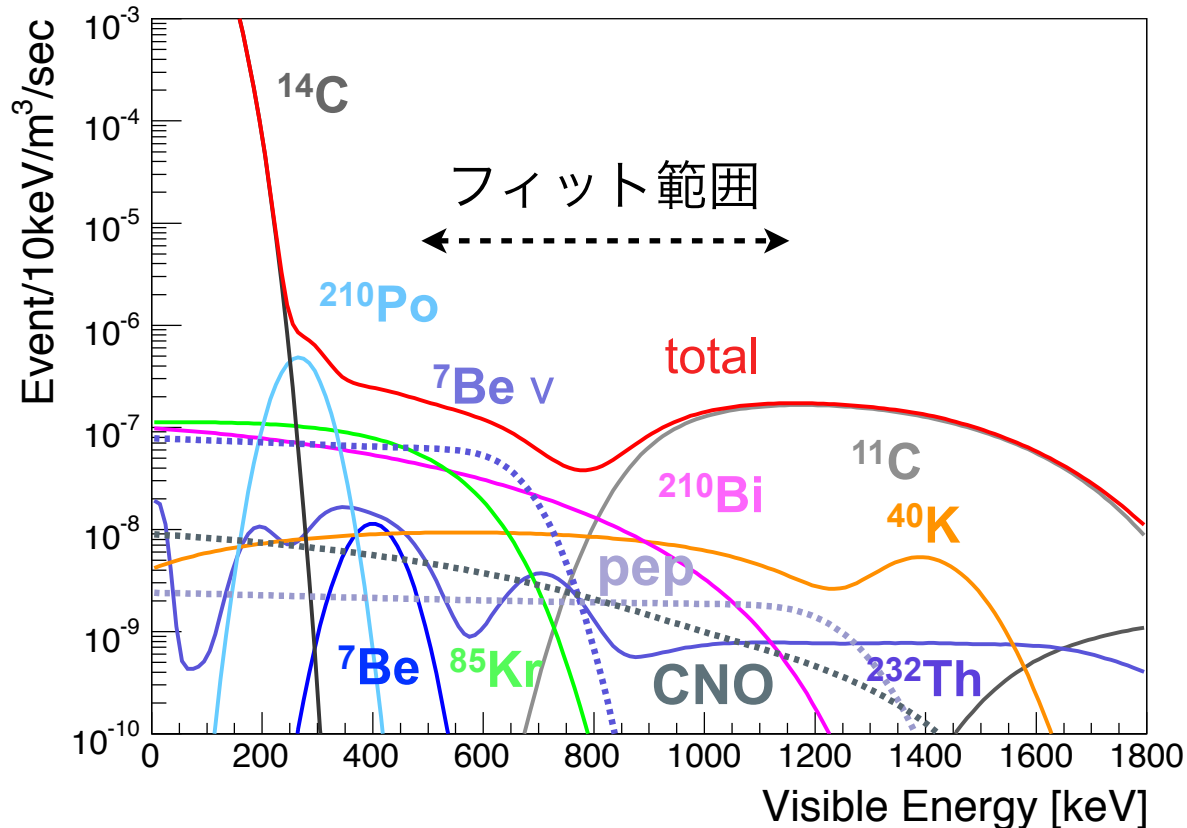
### 純化後の解析結果

- 位置依存性 < 1.2%
- 時間変化 < 0.8%
- エネルギー分解能 :  $6.9\%/\sqrt{E}$

# ${}^7\text{Be}$ ニュートリノ解析の方針

- フィットのフリーパラメータ： ${}^7\text{Be}$   $\nu$ ,  ${}^{210}\text{Bi}$ ,  ${}^{85}\text{Kr}$ ,  ${}^{11}\text{C}$
- 他のバックグラウンド  
 ${}^{238}\text{U}$ 系列,  ${}^{232}\text{Th}$ 系列,  ${}^{40}\text{K}$ , 原子核破砕反応( ${}^7\text{Be}$ )は別個に求める。

MCスペクトル( ${}^{210}\text{Pb}$ 4桁減、 ${}^{85}\text{Kr}$ 5桁減、 ${}^{40}\text{K}$ 2桁減の場合)



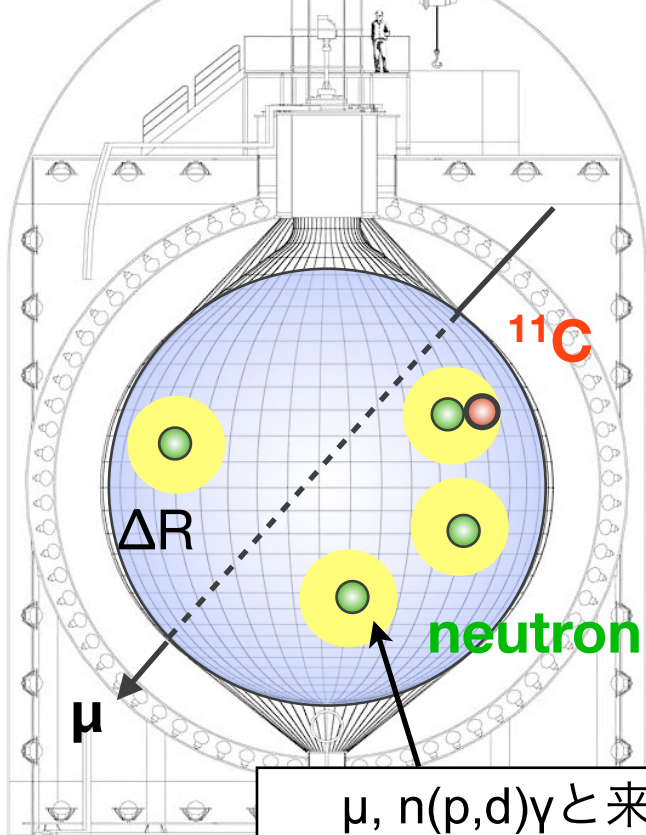
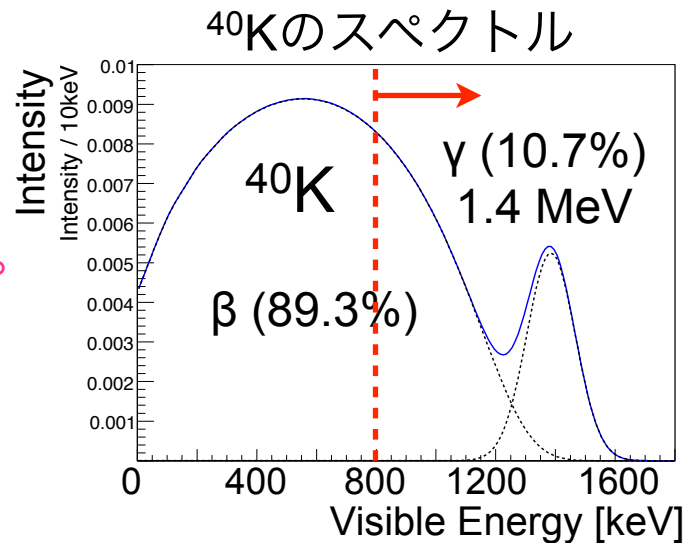
- ${}^{238}\text{U}$ ： ${}^{214}\text{Bi}$  -  ${}^{214}\text{Po}$   
( $T_{1/2}$ ：164 $\mu\text{sec}$ )の遅延同時観測
- ${}^{232}\text{Th}$ ： ${}^{212}\text{Bi}$  -  ${}^{212}\text{Bi}$   
( $T_{1/2}$ ：299nsec)の遅延同時観測
- ${}^{40}\text{K}$ ：1.4MeVのピークから

# 主な系統誤差

- エネルギー : 10.6%
- $^{40}\text{K}$  : 7.5%
- 有効体積 : 6.3%
- **total : 15.2%**

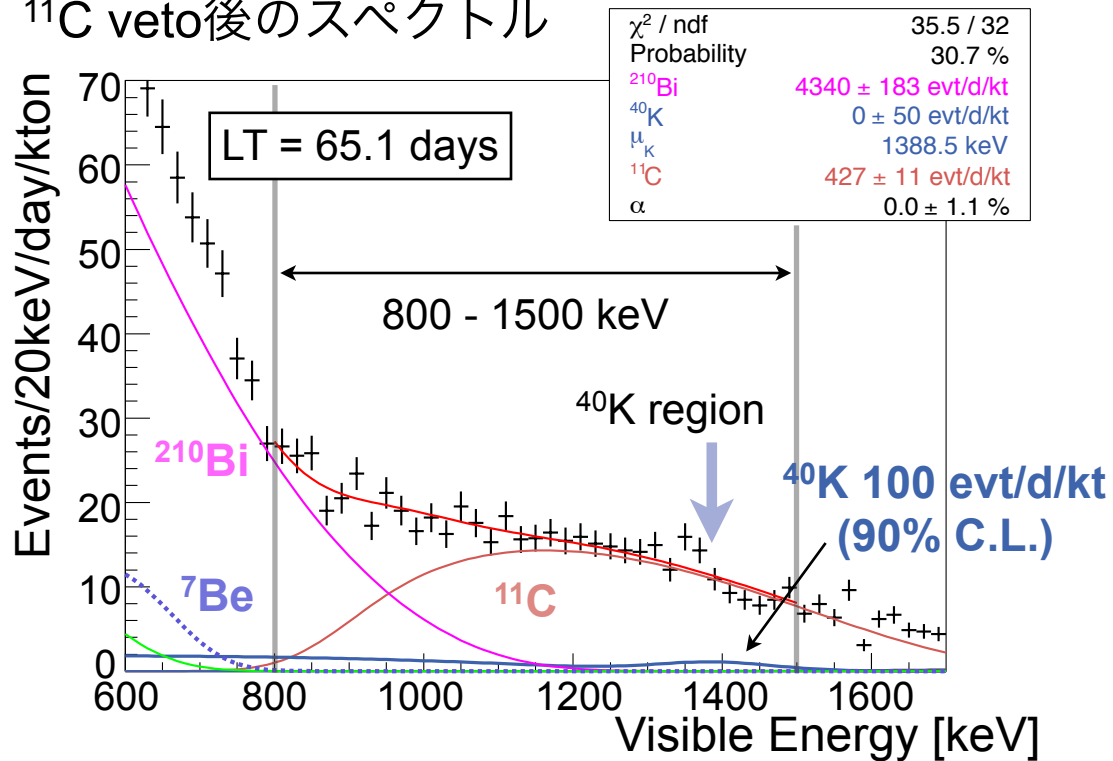
## $^{40}\text{K}$ 解析

800keV以上で  
 $^{40}\text{K}$ 濃度をチェック。  
 $^{11}\text{C}$ がBGになる。



$\mu$ ,  $n(p,d)\gamma$ と来たら、  
周りを90分程度vetoする。

## $^{11}\text{C}$ veto後のスペクトル

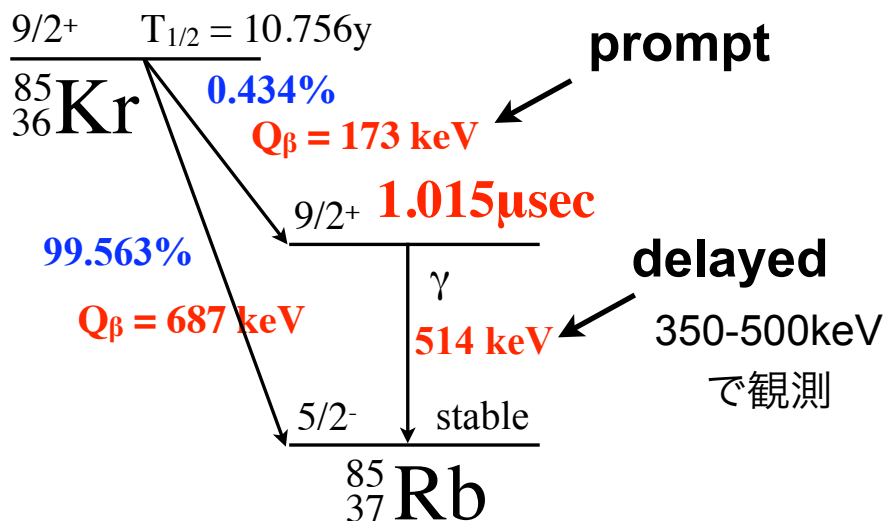
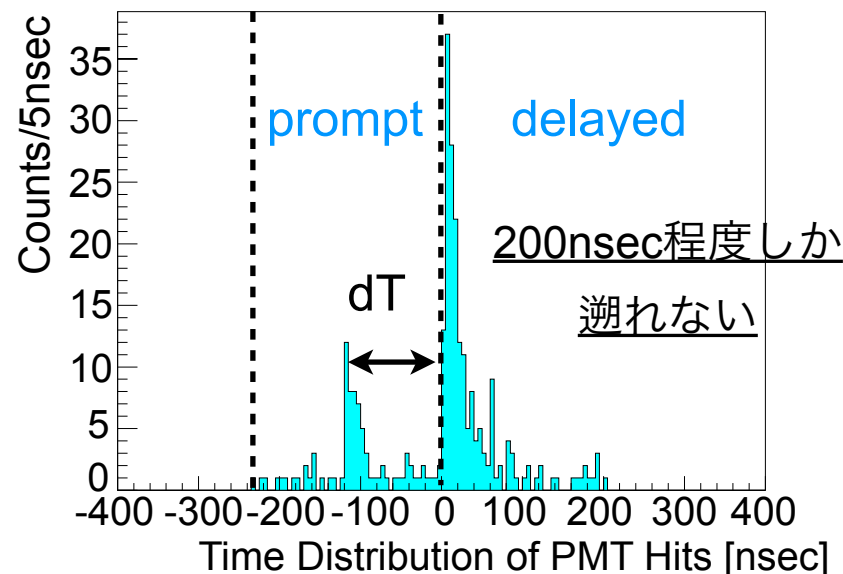


vetoによって、 $^{11}\text{C}$ は60%減

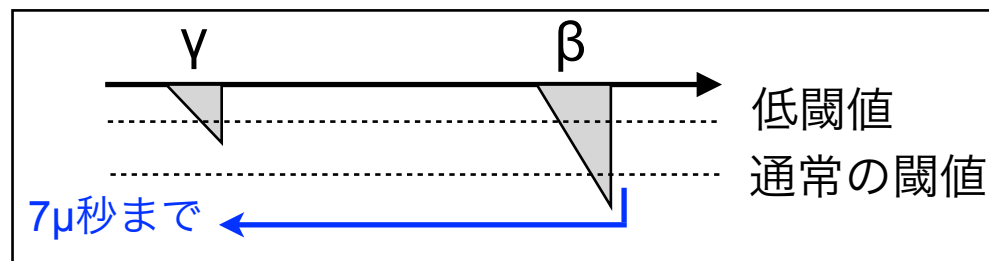
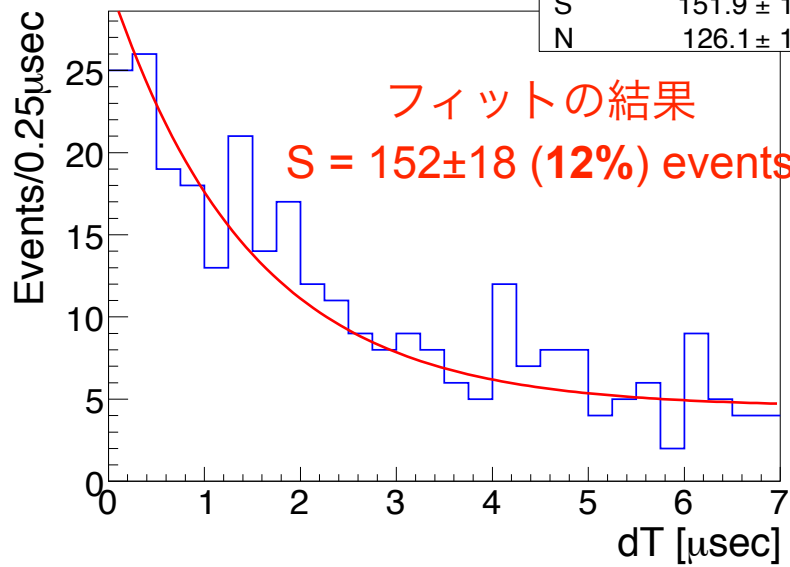
# 将来の展望 - $^{85}\text{Kr}$ の遅延同時観測

フラッシュADCを用いた新エレクトロニクスによって、  
時間間隔の短い連続したイベントを取る事が可能。

現在のPMTのヒット時間分布例



dT分布 (MCシミュレーション)



1年間観測した場合 (2010/4 - 2011/3)、  
信号 =  $\sim 153$  events ( $^{85}\text{Kr}$ )  
BG =  $\sim 142$  events ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{210}\text{Bi}/^{85}\text{Kr}$ )  
が予想される。

→ スペクトル解析の  
確認, 制限に使える。

# まとめ

- 2009年2月に純化作業が終了した。その後、 $^{210}\text{Bi}$ の崩壊を確認。
- 2009年4月7日から10月15日の17.8kton·daysのデータで、 $^7\text{Be}$ ニュートリノ解析を行っている。(Borexinoの20%増し)
- 主な系統誤差を評価  
エネルギー10.6%、 $^{40}\text{K}$ の寄与7.5%、有効体積6.3%
- 新エレクトロニクスを導入で、 $^{85}\text{Kr}$ を独立に測定することが出来る。  
1年間で12%程度の精度で測定可能