



XMASS実験における実データを用いた クリプトン事象の同定

神戸大学大学院理学研究科
物理学専攻 M2 大塚 康平

XMASS collaboration:

Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo:

Y. Suzuki, M. Nakahata, S. Moriyama, M. Yamashita, Y. Kishimoto,
Y. Koshio, A. Takeda, K. Abe, H. Sekiya, H. Ogawa, K. Kobayashi,
K. Hiraide, A. Shinozaki, S. Hirano, D. Umemoto, O. Takachio, K. Hieda

IPMU, University of Tokyo: K. Martens, J. Liu

Kobe University: Y. Takeuchi, K. Miuchi, K. Otsuka, K. Hosokawa, A. Murata

Tokai University: K. Nishijima, D. Motoki, F. Kusaba

Gifu University: S. Tasaka

Yokohama National University: S. Nakamura, I. Murayama, K. Fujii

Miyagi University of Education: Y. Fukuda

STEL, Nagoya University: Y. Itow, K. Masuda, H. Uchida,
Y. Nishitani, H. Takiya

Sejong University: Y.D. Kim

KRISS: Y.H. Kim, M.K. Lee, K. B. Lee, J.S. Lee

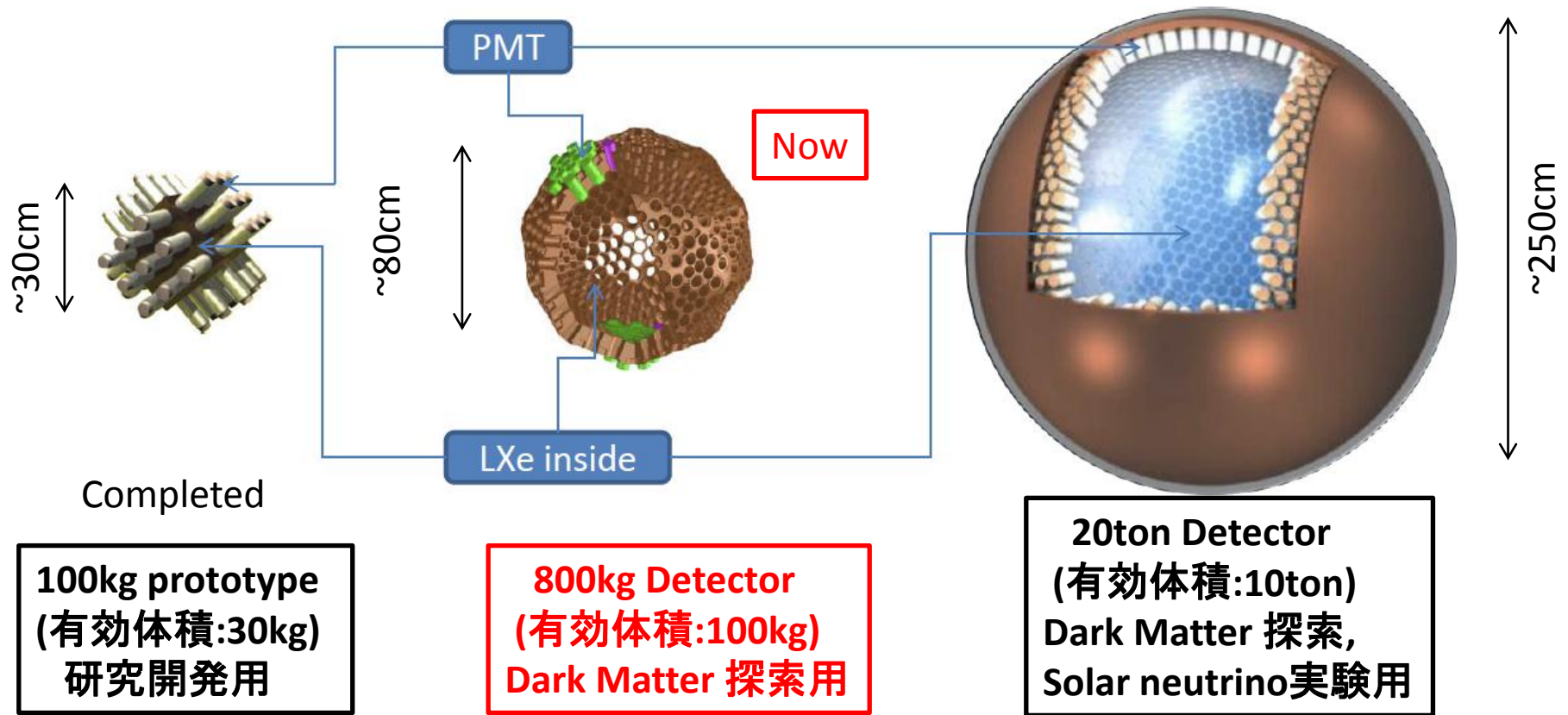
Outline

- XMASS実験
- Krバックグラウンド
- ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定
- FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定
- 結論

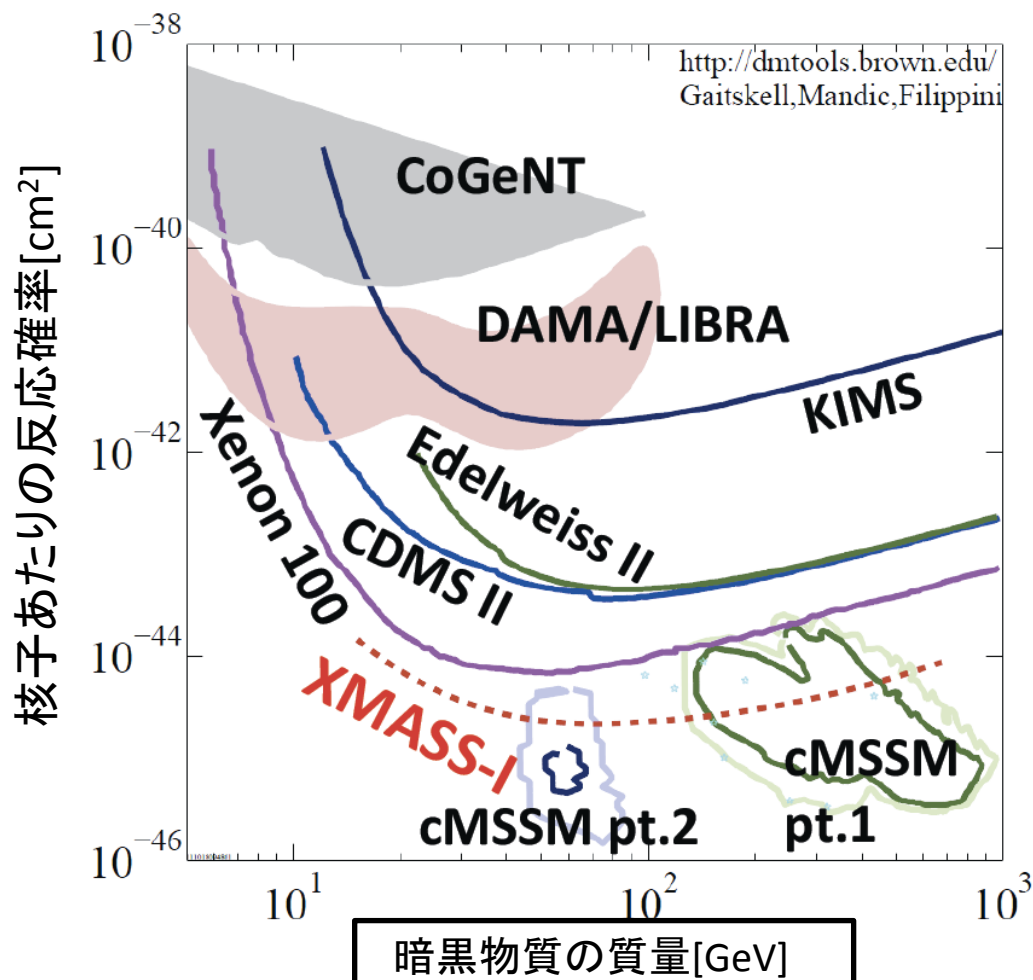
XMASS実験

XMASS実験モチベーションと名前の由来

- ◎ Xenon **MASS**ive detector for Solar neutrino ($pp/{}^7\text{Be}$)
- ◎ Xenon neutrino **MASS** detector (double beta decay)
- ◎ Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (DM search)



極低バックグラウンド環境の実現による高いDark Matter検出感度



暗黒物質探索実験の検出感度

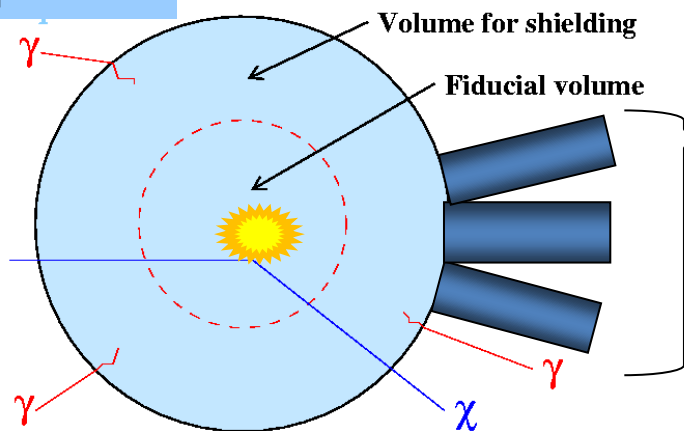
特徴

- 神岡鉱山内地下1000mで実験。
- 液体キセノン(Xe)を検出器のターゲットに採用。
- Xeを蒸留、循環する事により放射性不純物を低減。
- 放射性物質を極力減らしたPMTを開発。



全て極低バックグラウンド環境を実現する事に繋がる
原理

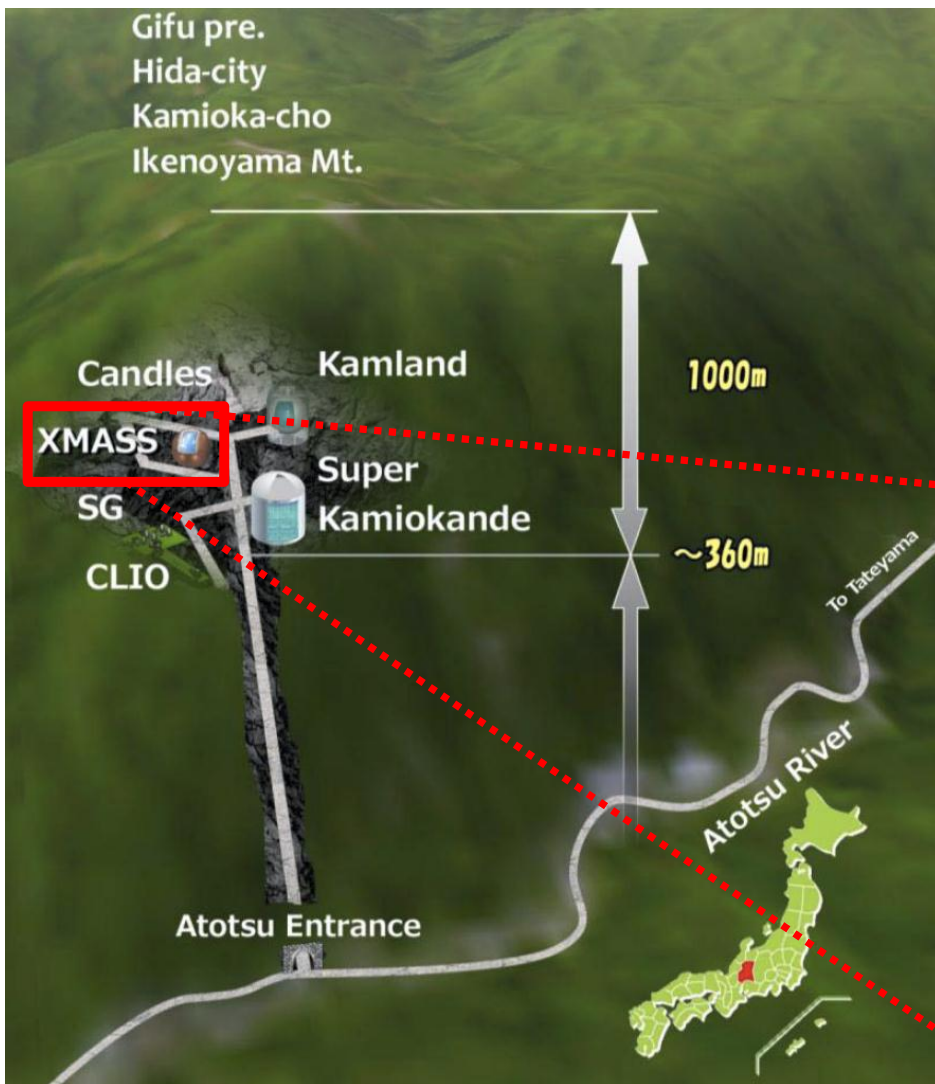
Liquid Xe



642本の光電子増倍管(PMT)でシンチレーション光を観測

事象再構成(位置、エネルギー)はPMTからの光量を用いて行う

神岡鉱山内地下1000mで実験



	地上	神岡鉱山内
宇宙線 μ 粒子[cm^2/s]	1.1×10^{-2}	10^{-7}
熱中性子[cm^2/s]	1.4×10^{-3}	8.3×10^{-5}
熱以外の中性子[cm^2/s]	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-5}
Rn[Bq/m^3](Summer)	40	1200
Rn[Bq/m^3](Winter)	40	40
$\gamma(>500\text{keV})$	---	$0.71/\text{cm}^2/\text{s}$



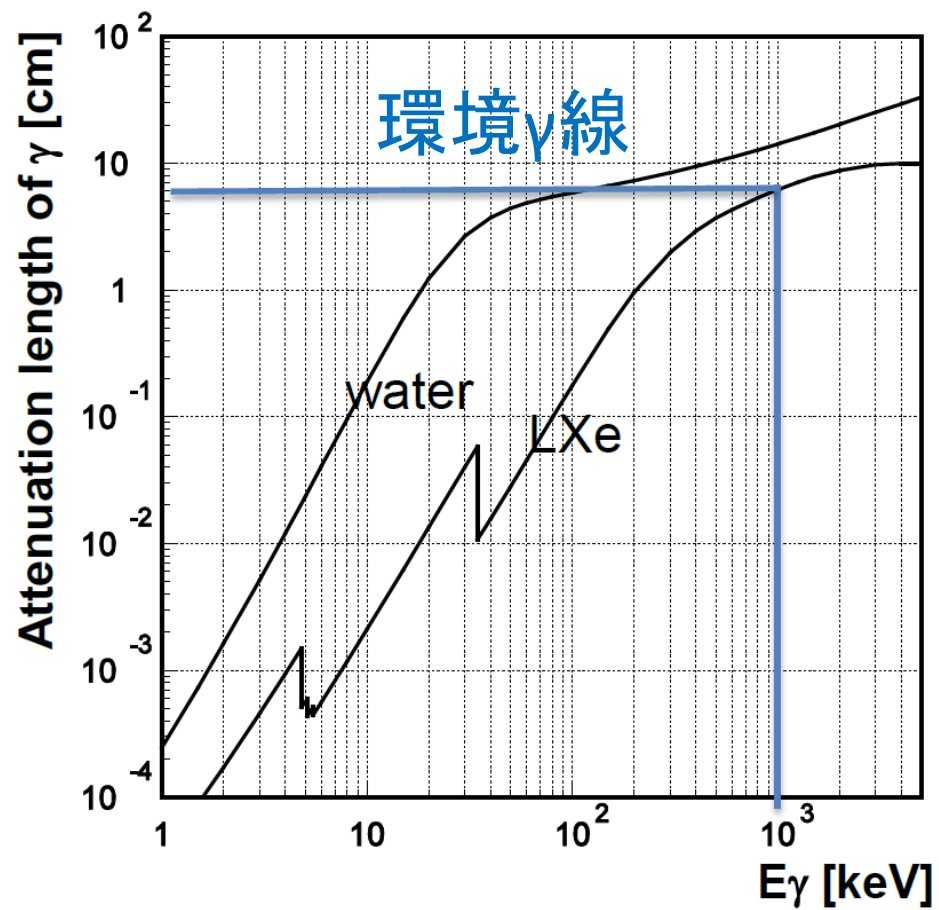
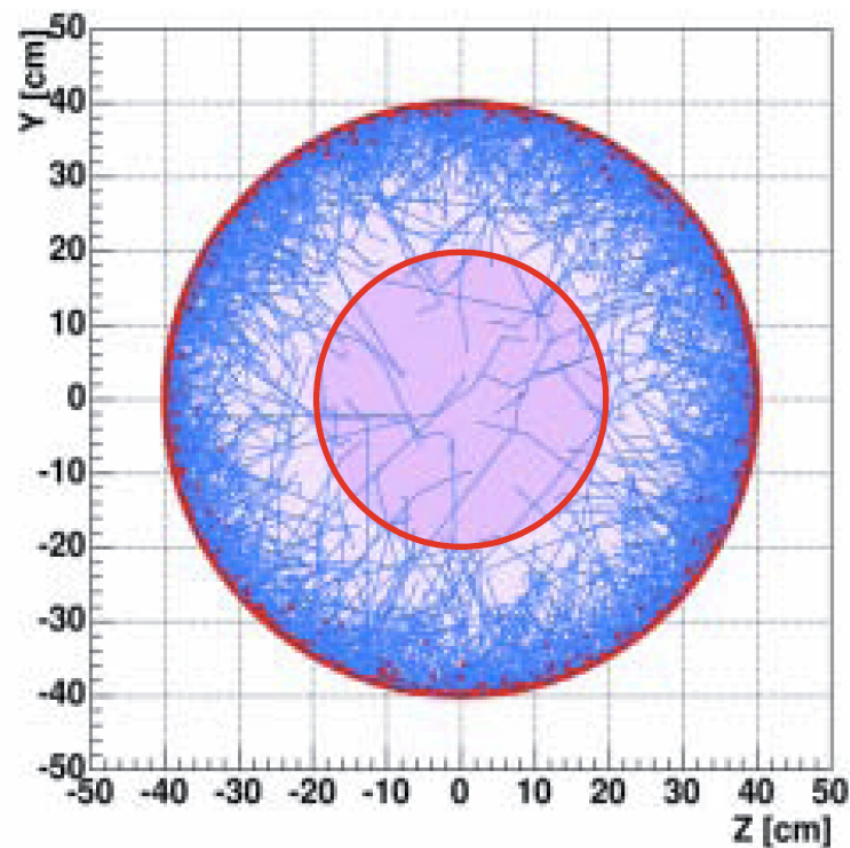
液体キセノン(Xe)を検出器のターゲットに採用

Xeの特徴

- ✓ 他の希ガスと比べて発光量が大きい。
(低エネルギー事象の観測が可能)
- ✓ 放射線遮蔽に適している。(原子番号: 54)
- ✓ 蛍光波長(175nm, PMTによる直接読み出し可能)。
- ✓ コンパクトな実験装置(~3g/cm³という大密度)。
- ✓ 希ガスなので純化しやすい(蒸留, 循環)。
- ✓ 低温だが扱い易い温度(沸点は、-100°C (170K))
- ✓ 暗黒物質観測に感度が大きい(質量数大)。

放射線遮蔽に適している。(原子番号: 54)

Simulation: γ into LXe



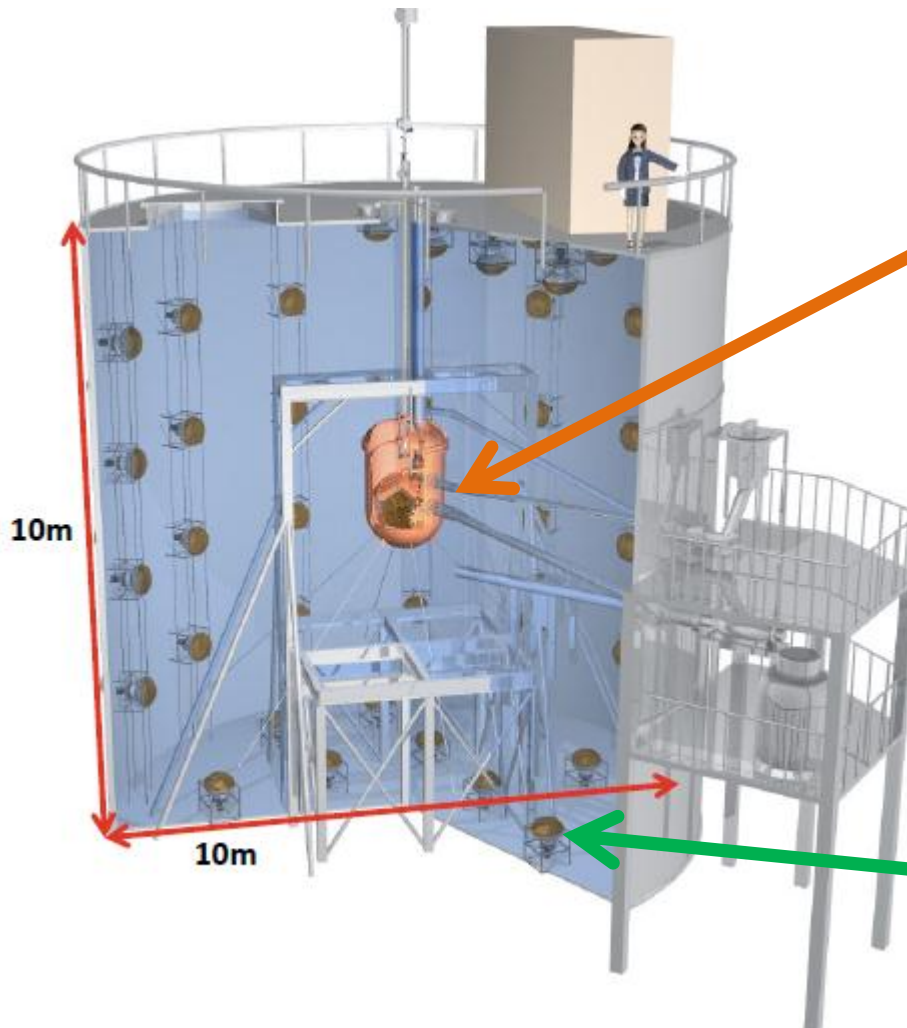
Xeを蒸留、循環する事により放射性不純物を低減

暗黒物質探索のXe中不純物と低減方法

不純物	影響	要求	低減方法
⁸⁵ Ir	放射線BG	<1ppt	蒸留
ラドン(Rn)	放射線BG	<1mBq	材料選別+循環 (filter+charcoal)
H ₂ O, O ₂	シンチレーション光を弱くする	<~10ppb (for $\lambda_{abs} > 1m$)	循環 (getter)

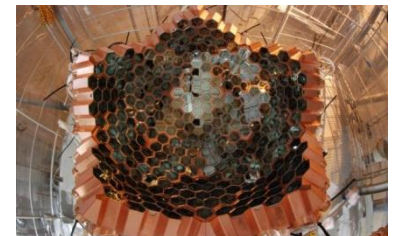
後で説明

XMASS実験エレクトロニクス/DAQ



XMASS検出器本体

- 642 PMTs
(Hamamatsu R10789)
- 62.4% photo coverage



Outer detector (OD)

- 72 PMTs (20-inch)
- μ 粒子 veto

XMASS実験エレクトロニクス/DAQ

ATM (642ch)

PMT (x642)

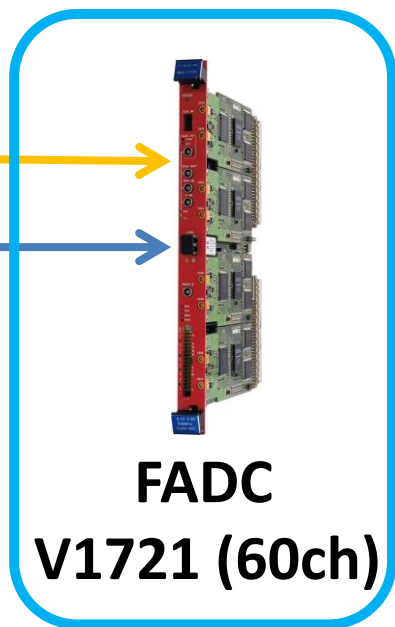


PMT signal

Preamp



HITSUM
PMTSUM



FADC

V1721 (60ch)

Trigger logic

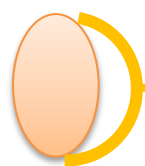
TRG

Trigger/event count

Trigger is generated from ATM HITSUM

ATM (72ch)

72 PMTs (20-inch)

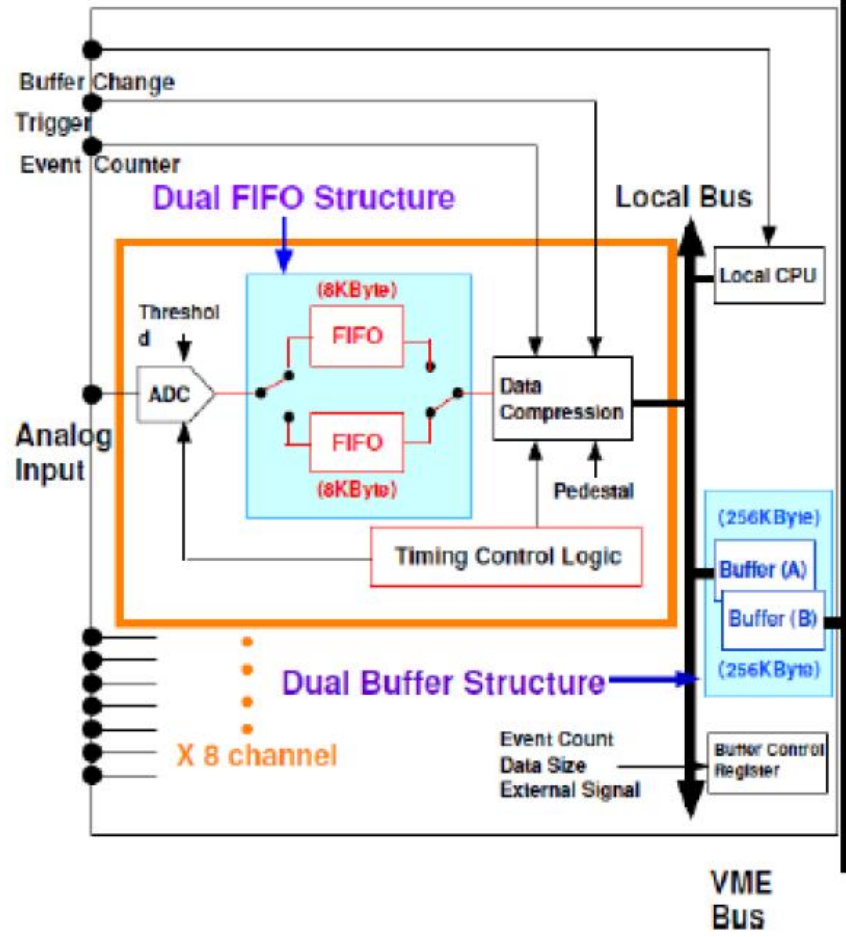
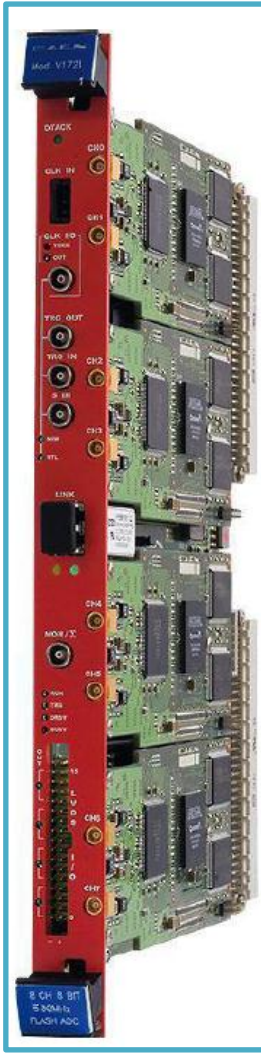


PMT signal



2011年12月からは642チャンネルのFADCが導入された。

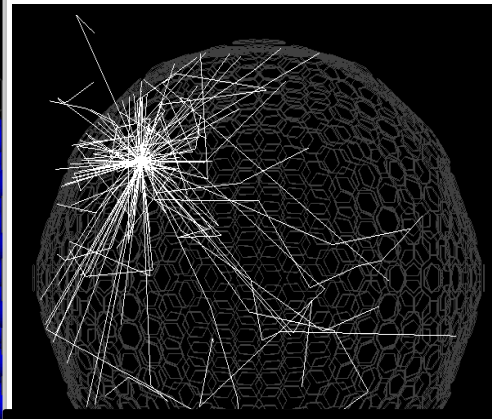
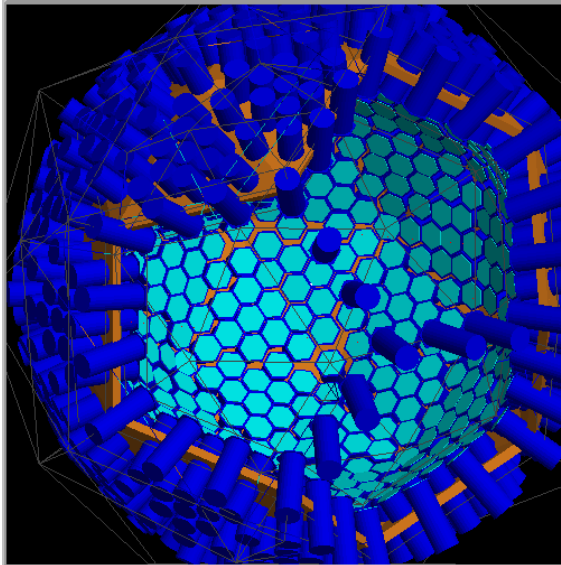
Flash ADC



チャンネル数	8 ch
サンプリングレート	500 MHz
ダイナミックレンジ	±0.5V
Resolution	8 bits
データ取得幅	4μs
合計チャンネル	60ch

GEANT4シミュレーション

検出器
Geometry



10keVの γ 線をR=35cm
で発生させた時。

GEANT4でシミュレートされた
キャリブレーション時検出器



検出器外側
と外側からのキャリブ
レーション用ホース

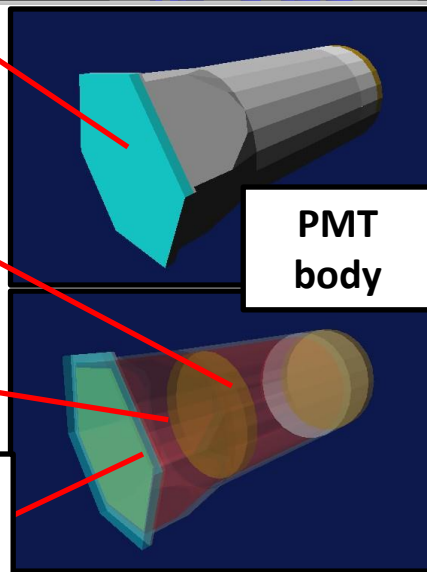
GEANT4でシミュレートされた
キャリブレーションロッド先端

Window
(light
blue)

Circuit
board
(orange)

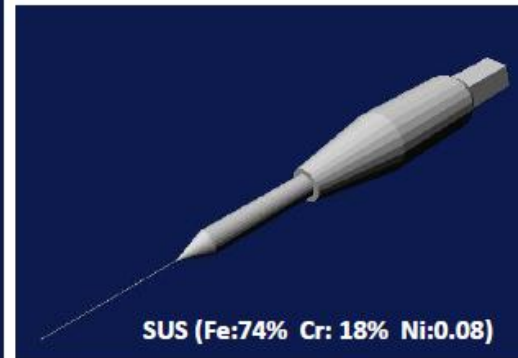
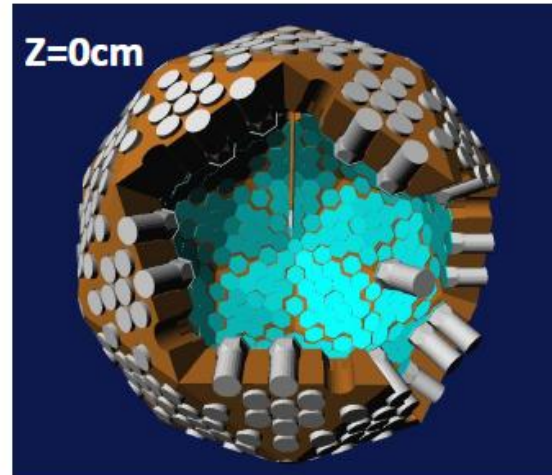
Vacuum
(red)

Photo cathode
(light green)



PMT
body

Z=0cm



SUS (Fe:74% Cr: 18% Ni:0.08)

検出器キャリブレーション(1)

回転導入機
+
ステッピングモーター

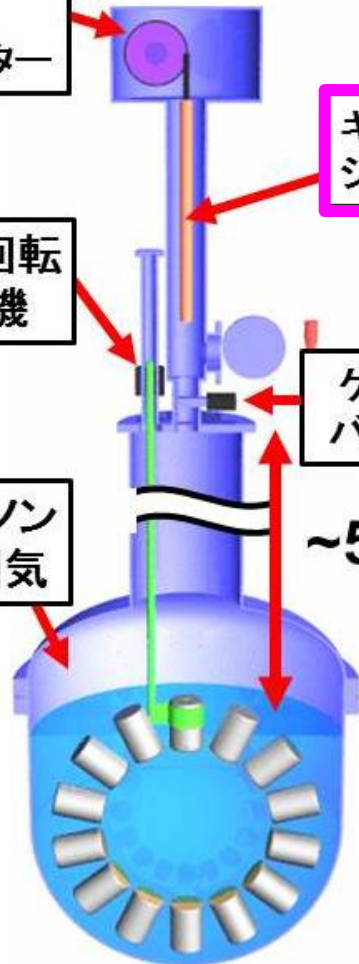
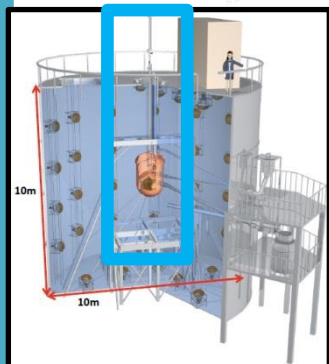
キャリブレーション
シヨンロッド

直線回転
導入機

ゲート
バルブ

キセノン
雰囲気

~5m

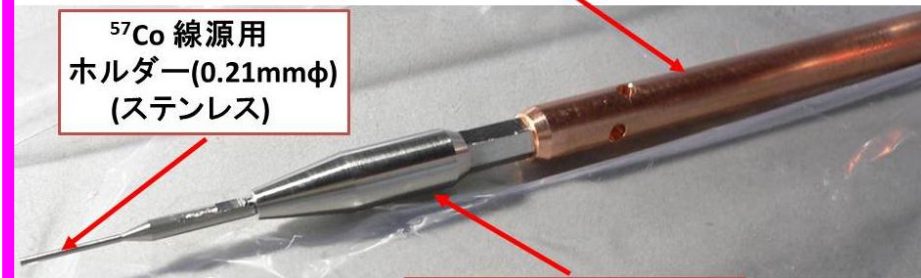


- "検出器内部"にソースを出し入れする
- z 軸に沿って、±1mm の位置精度
- でソースを駆動可能
- ^{57}Co , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{55}Fe , ^{137}Cs ...
- ソース自身の影効果を減らすため、約0.2mm 直径のチューブにソースを封止(^{57}Co , ^{241}Am)

キャリブレーションロッド
(無酸素銅)

^{57}Co 線源用
ホルダー(0.21mmφ)
(ステンレス)

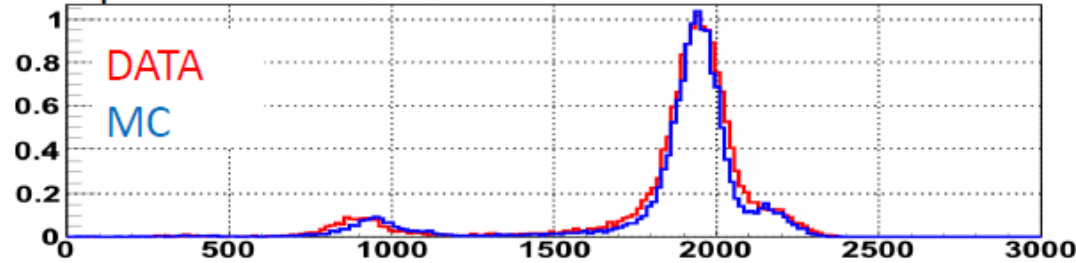
線源取り付けアダプター
(ステンレス)



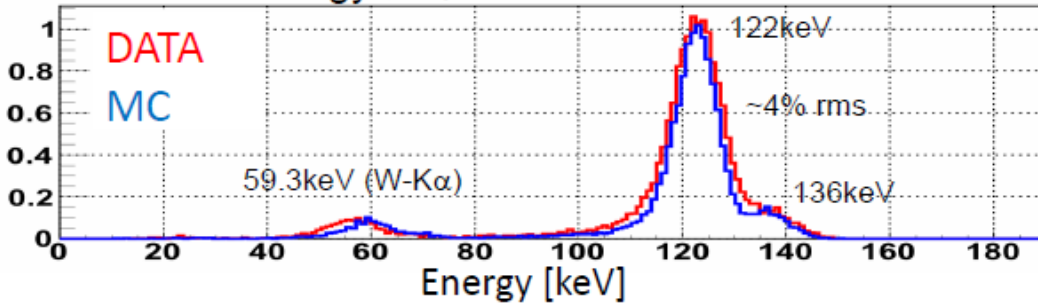
検出器キャリブレーション(2)

57Coを検出器中心に配置

Total photo electron 分布



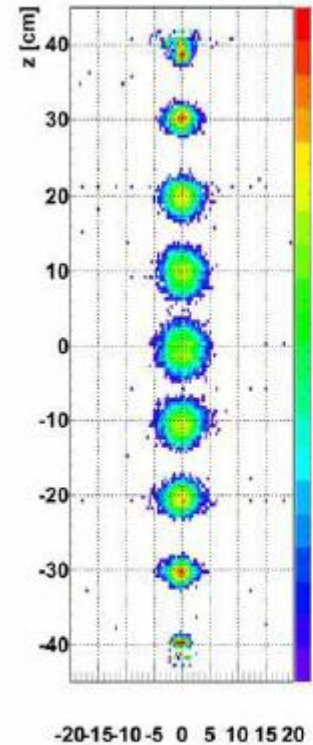
Reconstructed energy 分布



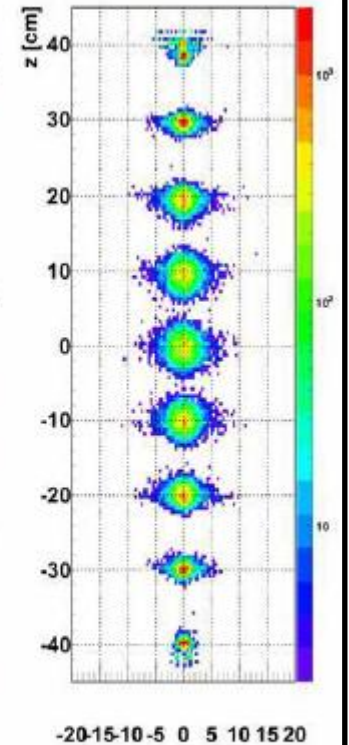
発光量: 16.0 ± 1.0 pe/keV

エネルギー分解能: $\sim 4\%$ (rms)@122keV

データ



シミュレーション



$z=0$ cm: 1.4cm RMS
 $z=\pm 20$ cm: 1cm RMS

Outline

- XMASS実験
- Krバックグラウンド
- ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定
- FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定
- 結論

Xeを蒸留、循環する事により放射性不純物を低減

暗黒物質探索のXe中不純物と低減方法

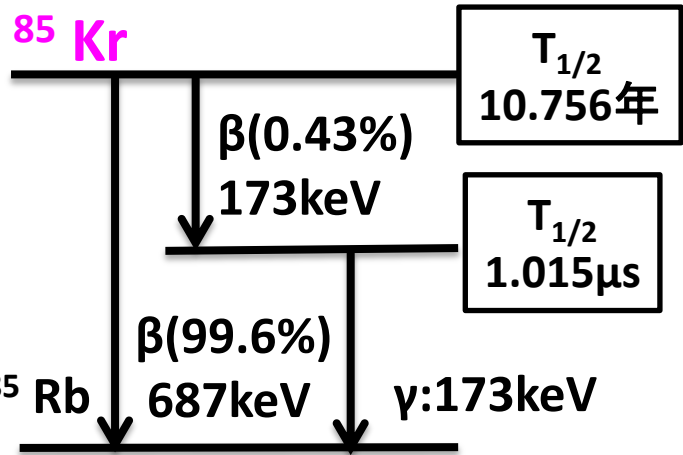
不純物	影響	要求	低減方法
³⁵ K	放射線BG	<1ppt	蒸留
ラドン(Rn)	放射線BG	<1mBq	材料選別+循環 (filter+charcoal)
H ₂ O, O ₂	シンチレーション光を弱くする	<~10ppb (for $\lambda_{abs} > 1\text{m}$)	循環 (getter)

後で説明

Krバックグラウンド

目標値Kr<1ppt

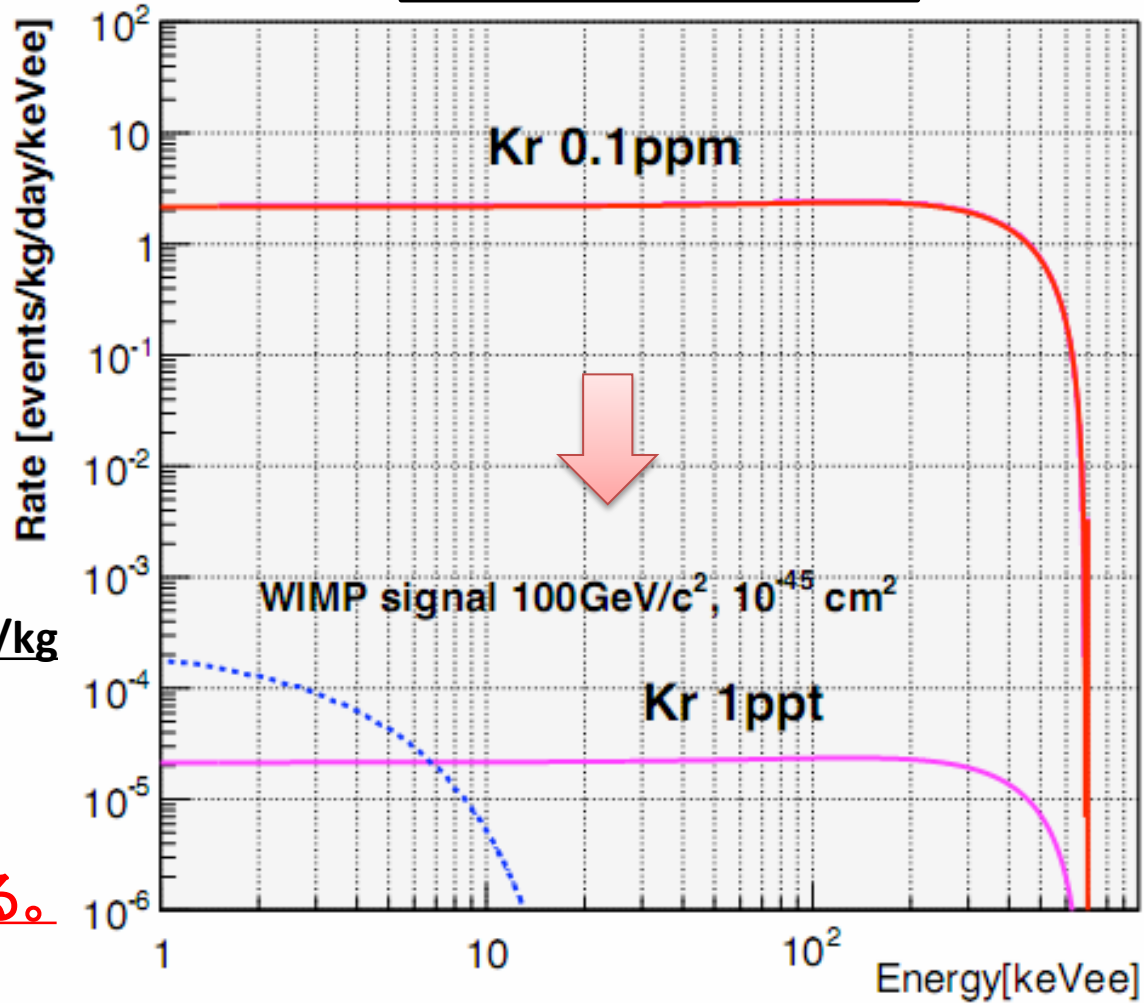
Xe中に含まれる⁸⁵KrがBGとなる。



⁸⁵KrBG目標値=10⁻⁵ Events/keV/day/kg

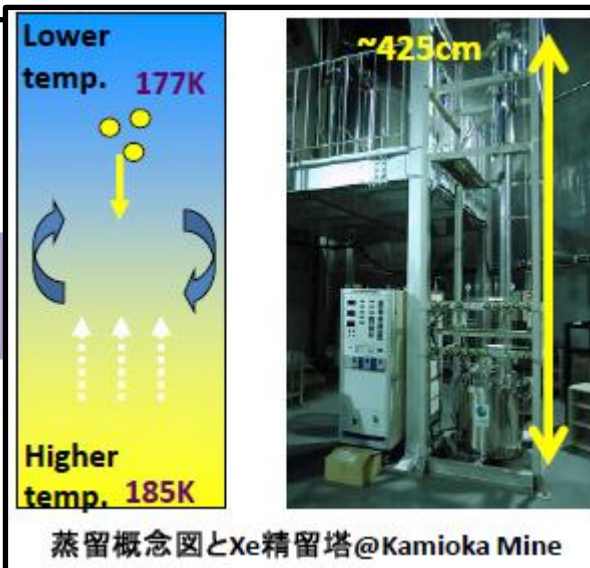
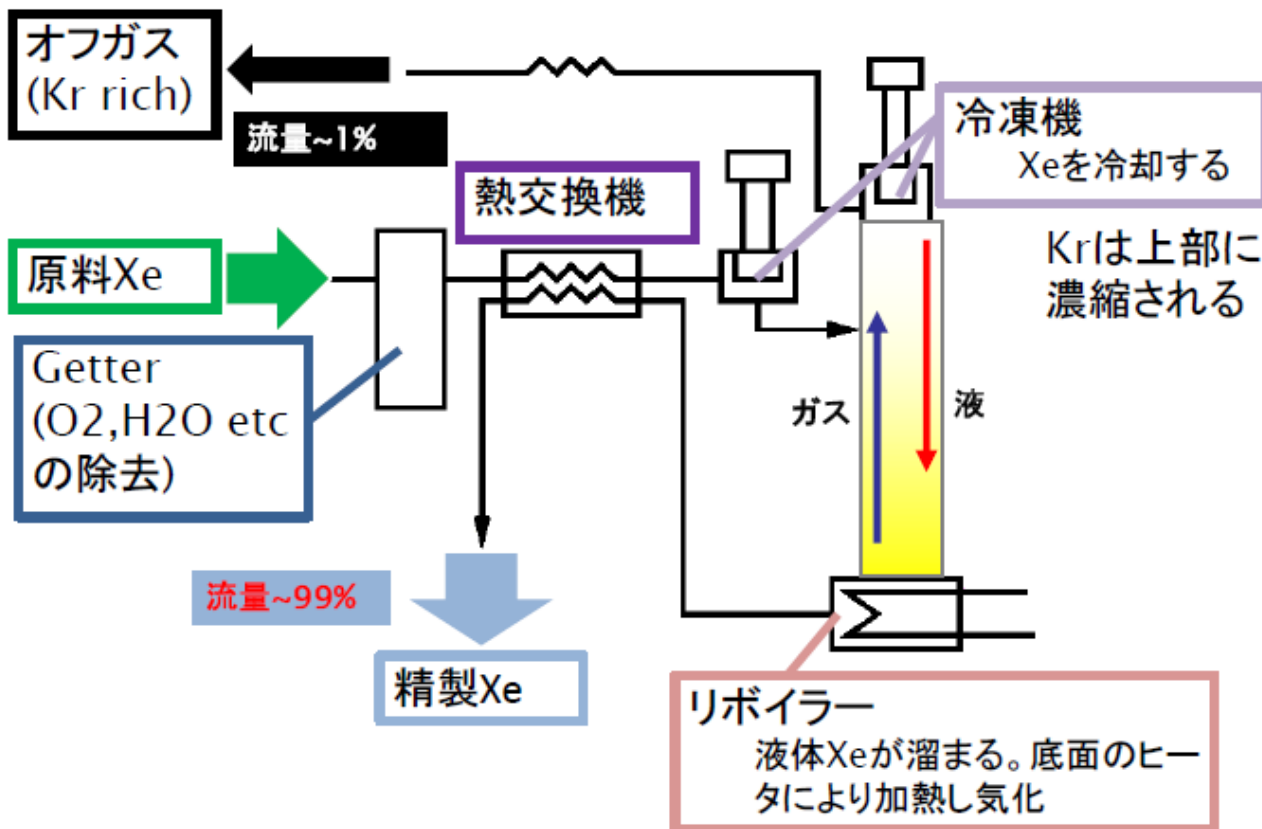
⁸⁵Kr/Kr= $\sim 1.6 \times 10^{-11}$

を仮定すると、
Xe中Kr濃度<1pptが要求される。



Kr蒸留

蒸留装置全体図



	Boiling point (@0.2MPa)
Xe	178K
Kr	140K~150K

**0.1ppmのKr濃度を
5桁以上低減する能力**

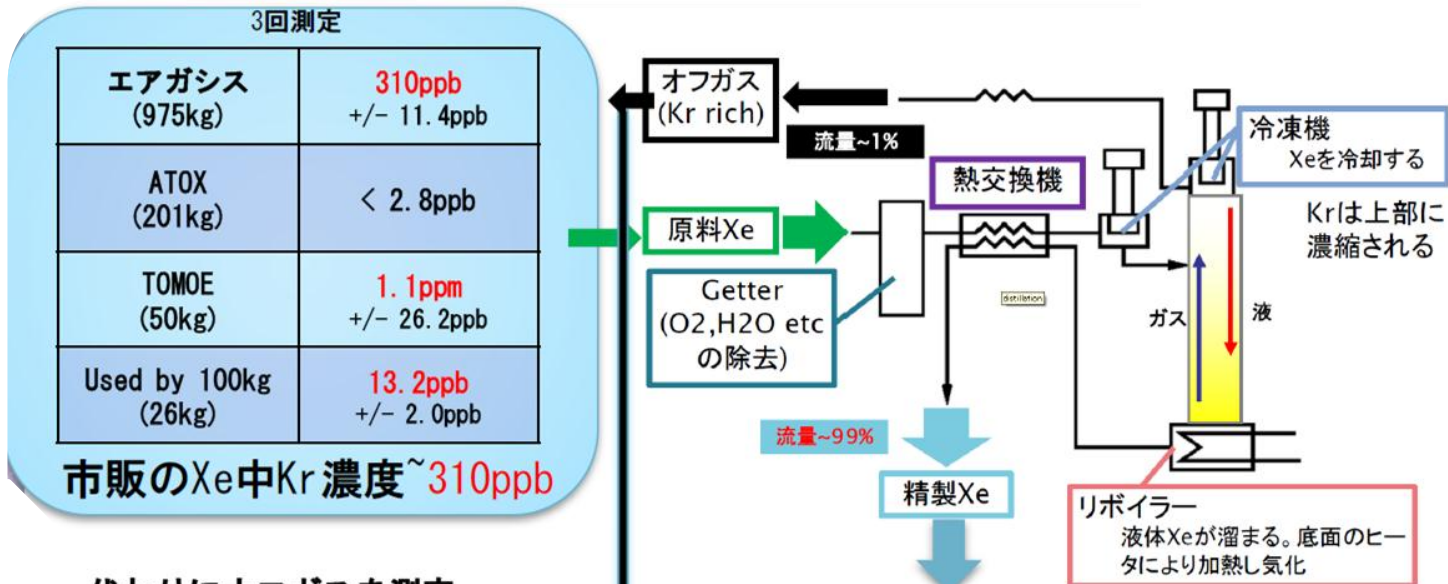
K. Abe *et al.* for XMASS collab,
Astropart. Phys. 31 (2009) 290

2010年9月にXMASS実験に用いる約1.2tonのXeを蒸留。

Outline

- XMASS実験
- Krバックグラウンド
- ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定
- FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定
- 結論

ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定



代わりにオフガスを測定



GC
検出感度
~ppb

結果

Kr/Xe
28.7ppm

精製Xe回収率99%
なのでオフガスの
濃度から見積もると
(23±32)ppb

期待値<1ppt



API-MS
検出感度
~1ppt?

測定手法開発中
現在Kr concentration:
< 2.7 ppt(90% C.L.)

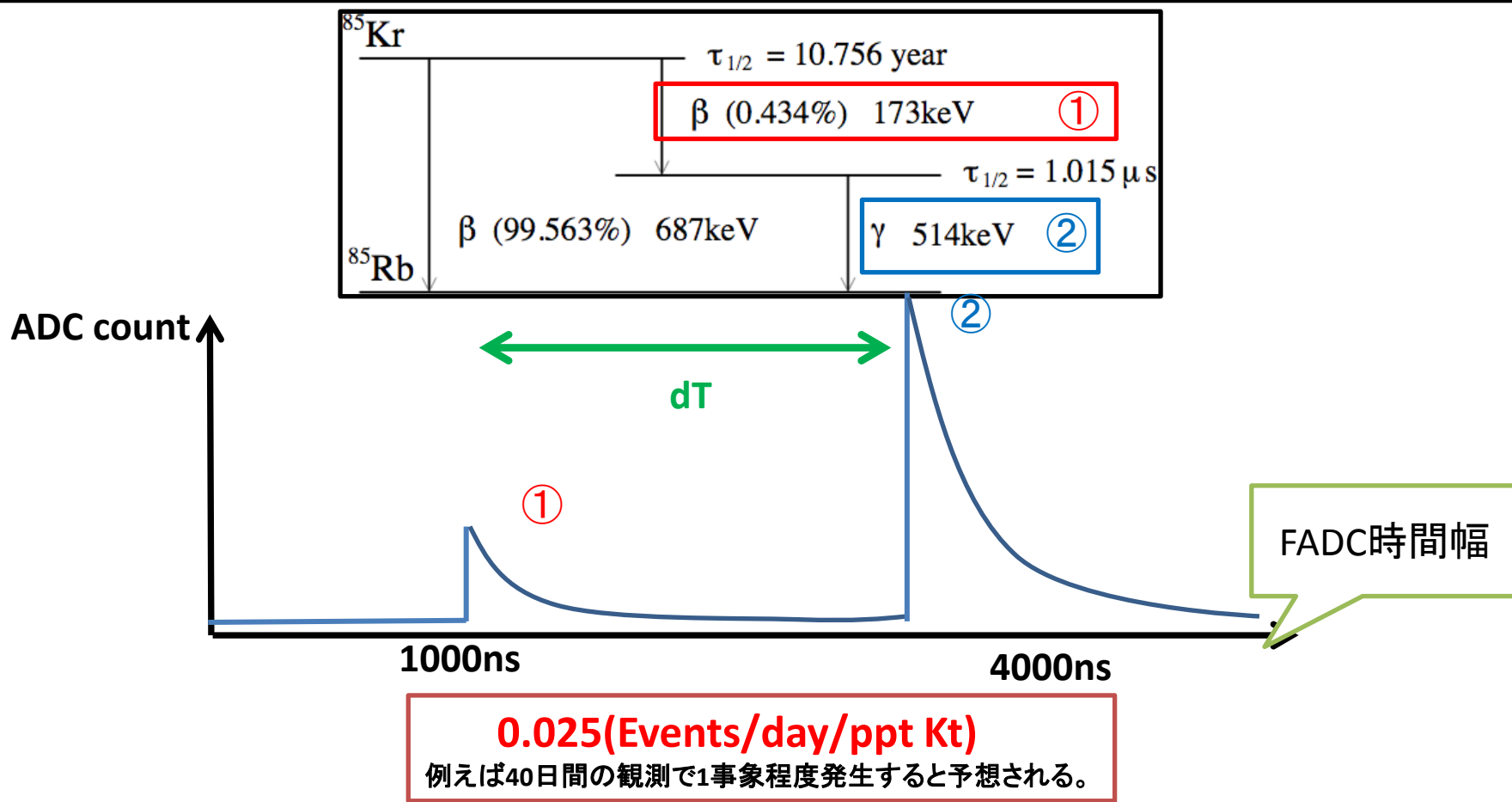


Outline

- XMASS実験
- Krバックグラウンド
- ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定
- FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定
- 結論

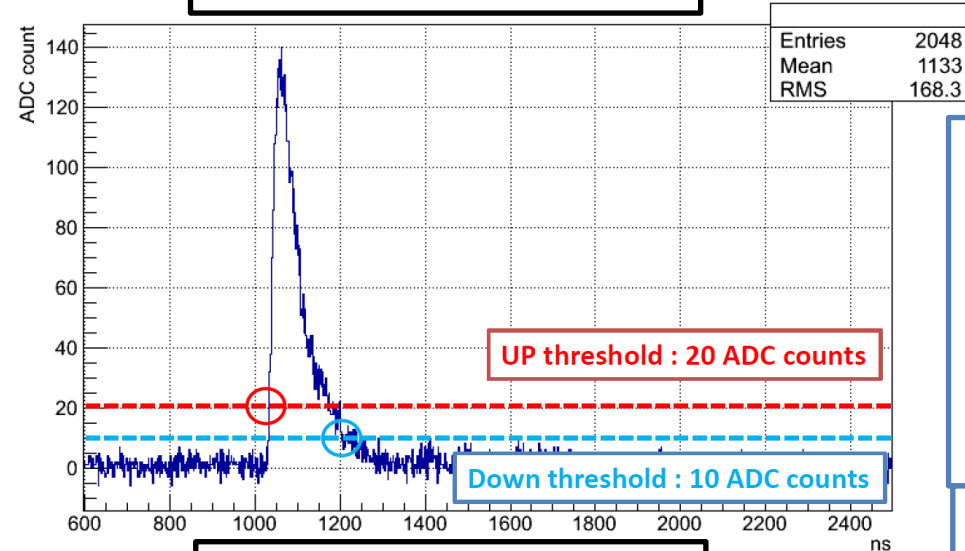
FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定

これから、FADCによるデータから ^{85}Kr 崩壊事象の頻度を解析により見積もっていく。
その前の**試算**として、XMASS実験のKr濃度目標である**1pptのKrを含む場合の事象頻度**を見積もった。



ピークサーチアルゴリズム

Pulse height < 800 [ADC counts]



1. FADCデータの初めの200サンプルの平均を計算しそれをBaselineとする。

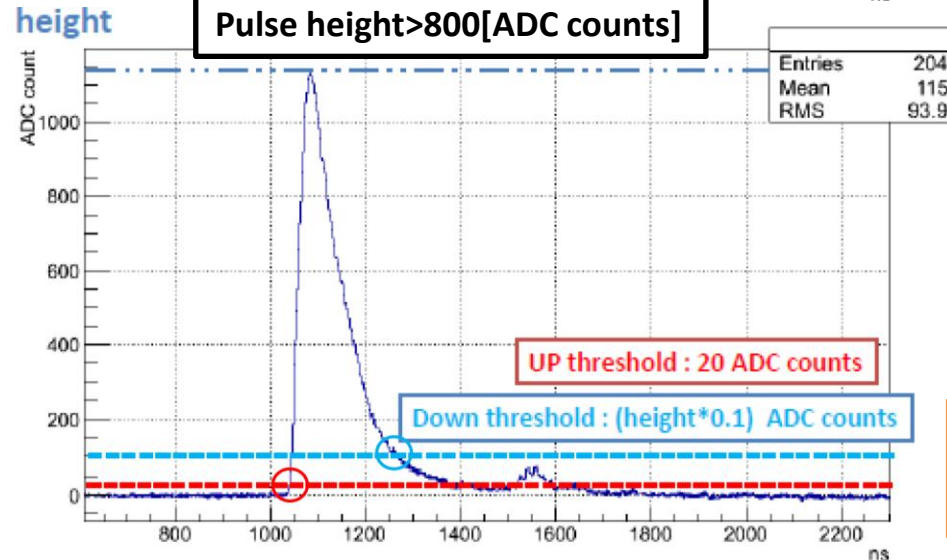
2. ADC countが20を超えたらそこをピーク波形の起点とする。その点を時間の原点として、[-50ns, 300ns]の区間を積分する。トリガタイミング以外は高いエネルギー事象のテールまで取得するため[-50ns, 350ns]を積分する。その後積分した電荷量をnPEに換算して記録。

3. ピーク波形の終点を判断する。

(i) Pulse height < 800 ADC countの場合:
その後10 ADC countまで下がったらそこをピーク波形の終点とする。

(ii) Pulse height > 800 ADC countの場合:
その後Pulse heightの10%まで下がったらそこをピーク波形の終点とする。

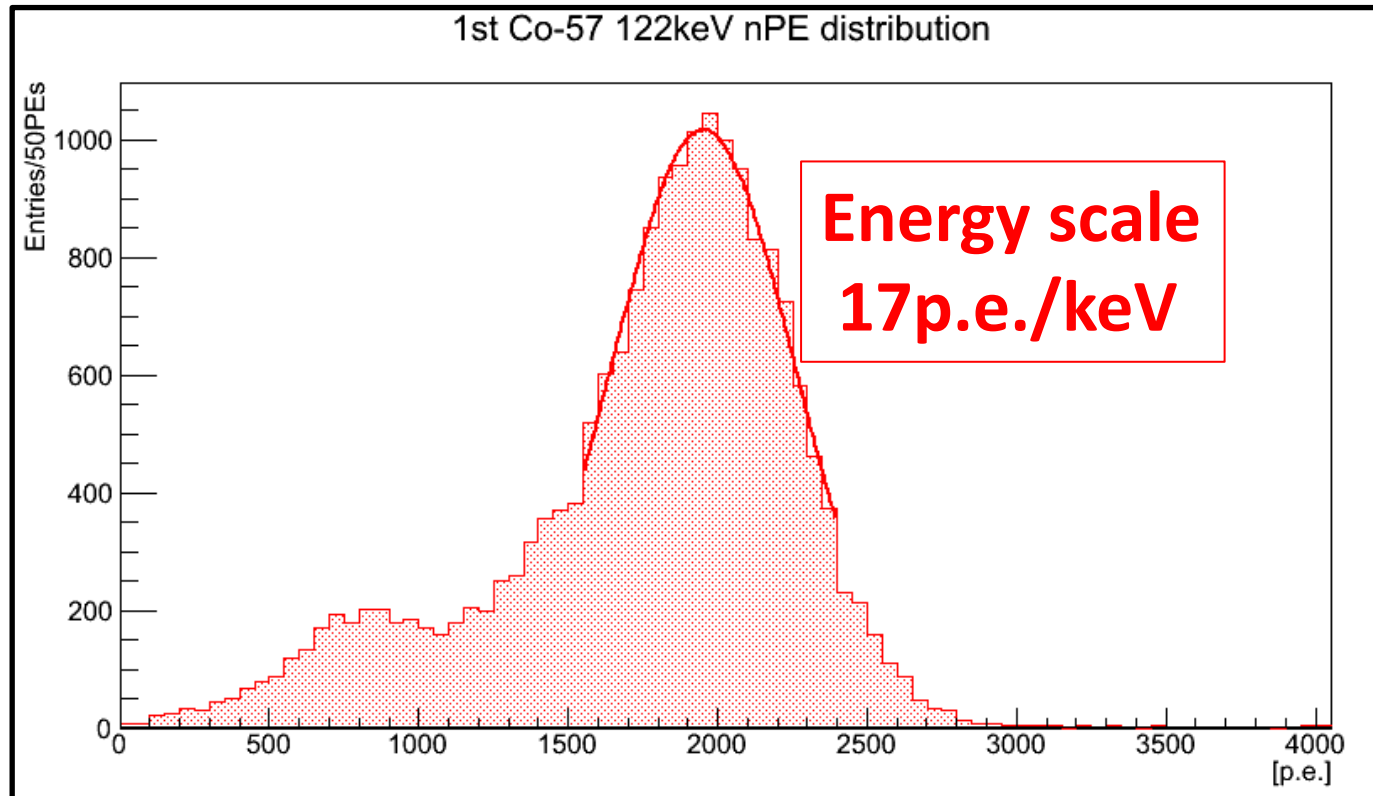
Pulse height > 800 [ADC counts]



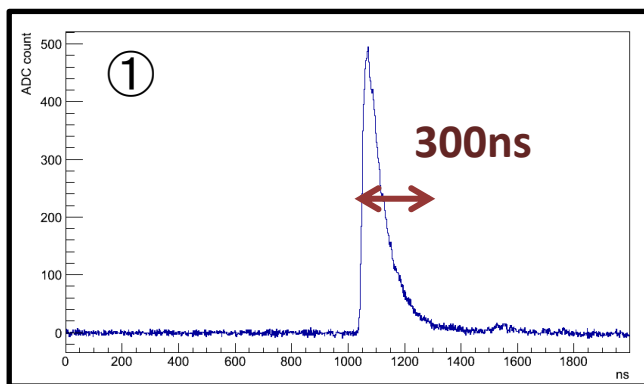
• ピーク波形の起点を原点とした時の [-50ns, 300ns 又は 350ns] 間の面積とそこから見積もられるnPE
• ピーク波形スロープの時定数 ⇒ 本解析では電子反跳のみを選ぶ。

^{57}Co を用いたFADCのキャリブレーション

FADCにより得られた ^{57}Co の
光量(p.e.)分布



dTレンジ



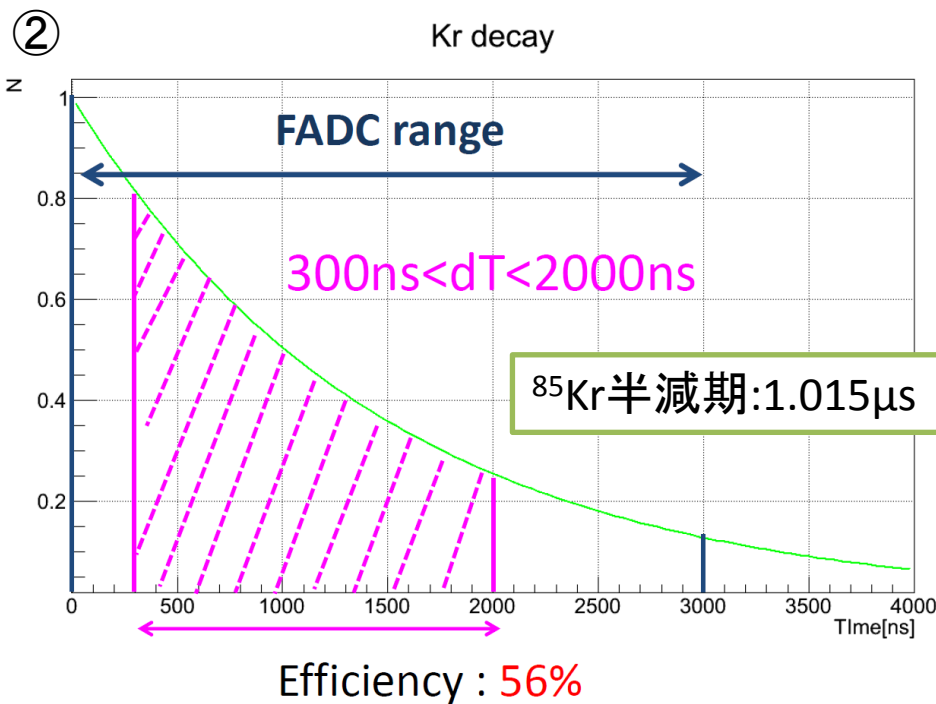
①より1st peakと2nd peakの時間差(dT)を300ns以上に限定した時に1st peakと2nd peakの重なりはない。

また、FADCの時間幅(②青線)を考慮すると、本解析で使用する範囲は $300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$ となる。

ここで、 ^{85}Kr 崩壊事象探索のためには、dTについてどのくらいのレンジ幅(dT Cut範囲)をとれば一番都合がいいか(アクシデンタルと ^{85}Kr 崩壊によるEfficiencyの兼ね合い)を調べるために"Significance"を定義し比較した。

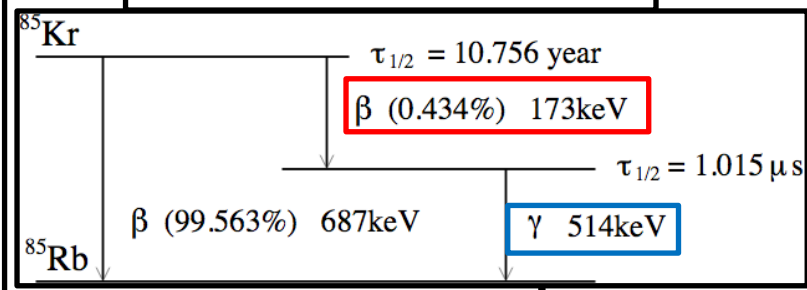
$$\text{Significance} = \frac{\text{Efficiency}^2}{\text{Range}}$$

dT Cut 範囲	Range	Efficiency	Significance
$300 < dT < 1500\text{ns}$	1200ns	0.46	0.0176
$300 < dT < 2000\text{ns}$	1700ns	0.58	0.0184
$300 < dT < 2500\text{ns}$	2200ns	0.63	0.0180
$300 < dT < 3000\text{ns}$	2700ns	0.69	0.0170

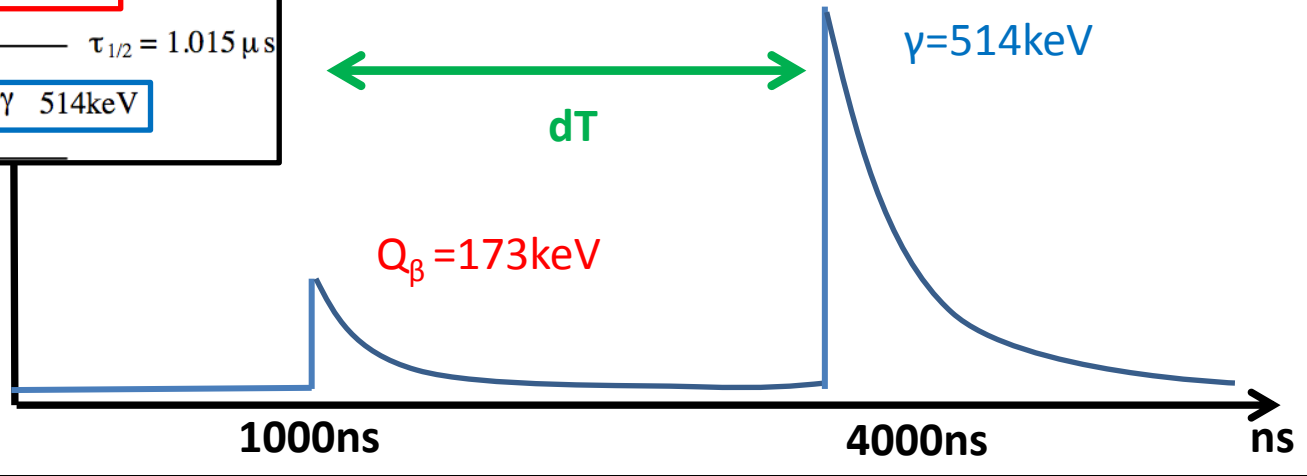


Event Reduction

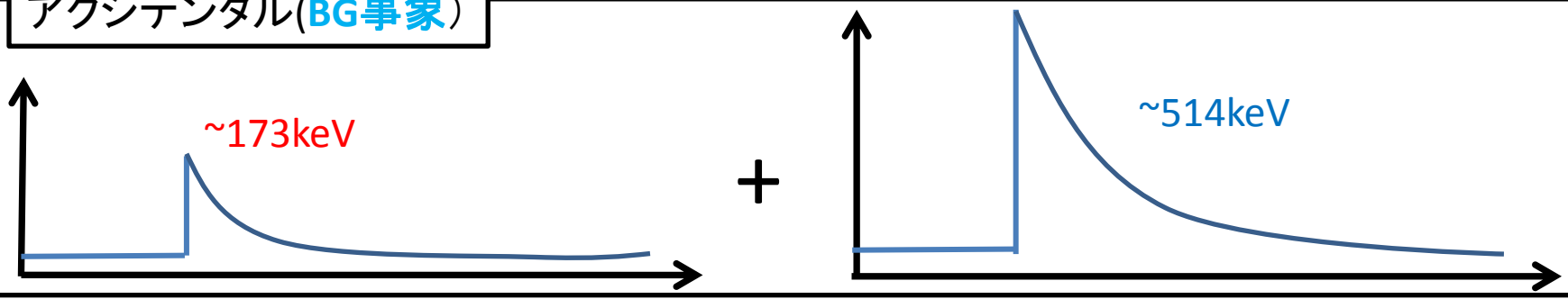
^{85}Kr 崩壊事象(同定対象)



ADC count



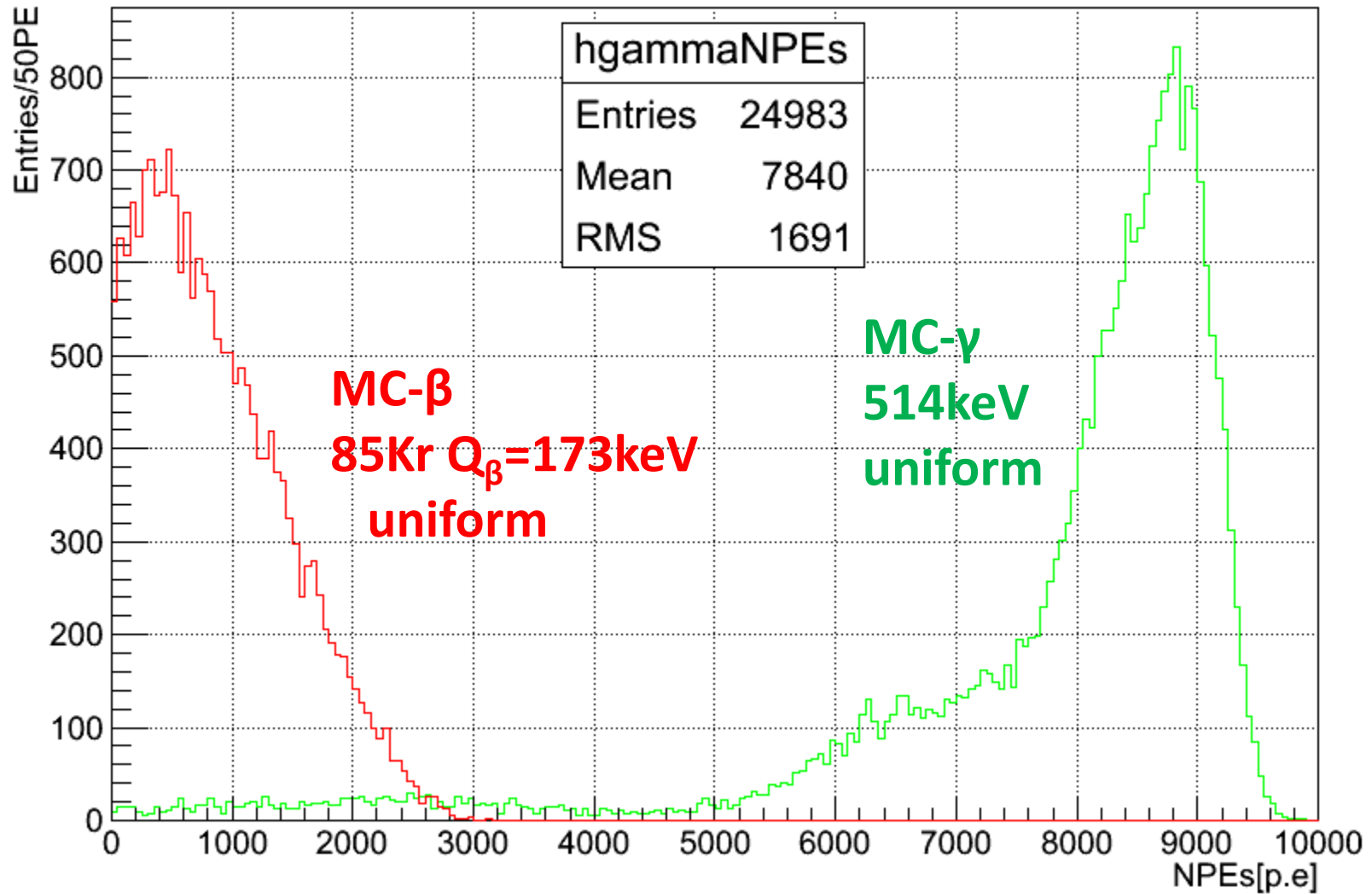
アクシデンタル(BG事象)



アクシデンタルを減らす事ができれば ^{85}Kr 崩壊事象同定の検出感度をあげる事ができる。

そのアプローチとして、 ^{85}Kr 崩壊事象同定の際に用いる事象選別のためのカットを、実際の ^{85}Kr 崩壊事象における1st 事象と2nd 事象にできるだけフィットするように決める

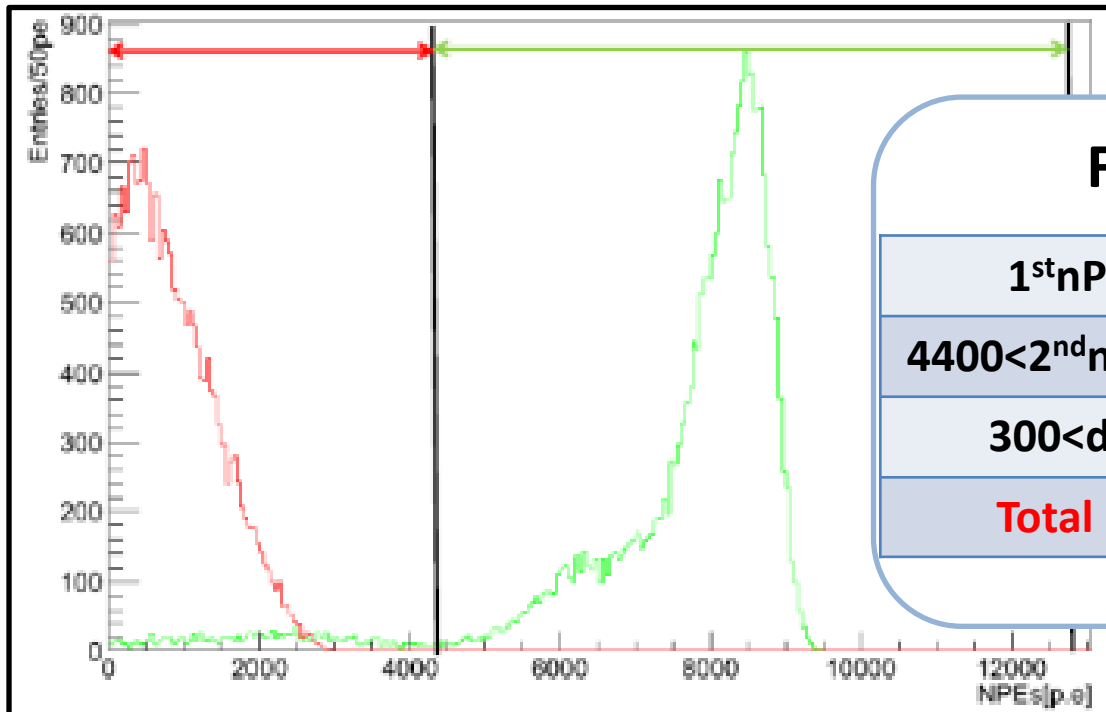
シミュレーションによるnPE分布 NPEs distribution



First Cut

1st peakに関しては Q_{β} :173keVの1.5倍に相当する、4400p.e.の上限を設定する。2nd peakに関しては、514keVの0.5~1.5倍に相当する、4400~13200p.e.を設定した。また、 $300 < dT < 3000$ nsとした。

1stnPE<4400p.e.&4400<2ndnPE<13200p.e.&300<dT<3000ns



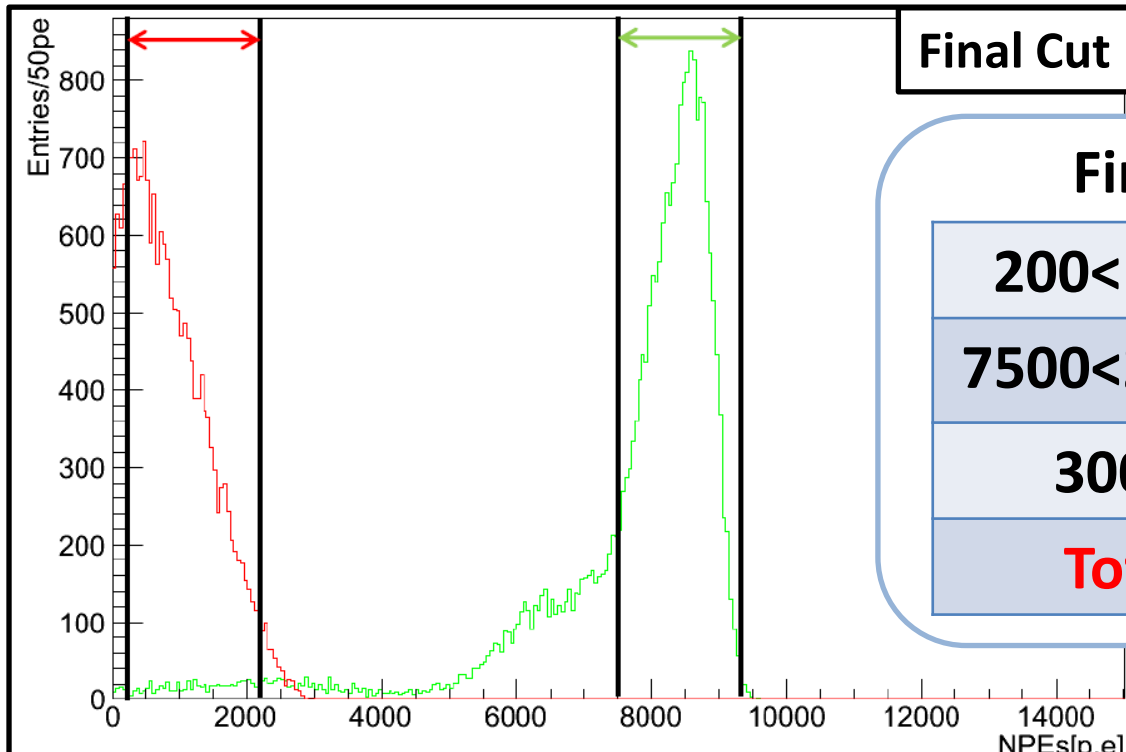
First Cut でのEfficiency

1 st nPE<4400p.e	99%
4400<2 nd nPE<13200p.e.	94%
300<dT<3000ns	69%
Total Efficiency	65%

Final Cut

シミュレーションにより得たnPE分布より、200~2200p.e.を設定し、2nd peakに関しては7500~9300p.e.を設定した。また、 $300 < dT < 2000$ nsとした。

$200 < 1^{\text{st}} \text{nPE} < 2200 \text{p.e.} \& 7500 < 2^{\text{nd}} \text{nPE} < 9300 \text{p.e.} \& 300 < dT < 2000 \text{ns}$



Final Cut でのEfficiency

$200 < 1^{\text{st}} \text{nPE} < 2200 \text{p.e.}$	76%
$7500 < 2^{\text{nd}} \text{nPE} < 9300 \text{p.e.}$	64%
$300 < dT < 2000 \text{ns}$	56%
Total Efficiency	27%

データセットと検出感度

本研究ではXMASS検出器の試験観測期間2011/02～03と2011/08～09のうち総計のlive time 61日に対して前述した2つのCutを適用し、 ^{85}Kr 崩壊事象の探索を行った。

まずこの期間での、それぞれのカットでのアクシデンタルレートを見積もると、

- First Cut : accidental rate = $0.61\text{Hz} \times 0.86\text{Hz} \times 2700\text{ns} \times 86400\text{s/day} = 0.12\text{event/day}$
- Final Cut : accidental rate = $0.20\text{Hz} \times 0.16\text{Hz} \times 1700\text{ns} \times 86400\text{s/day} = 0.010\text{event/day}$

となる。よって検出感度は、それぞれのカットでのEfficiencyを考慮して

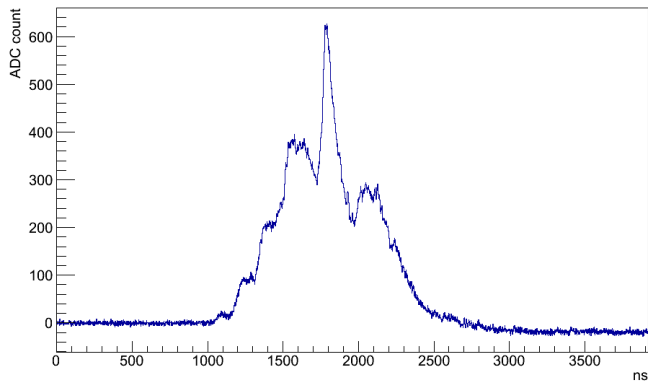
- **First Cut : $\sim 7.4\text{ppt Kr}$**
- **Final Cut : $\sim 1.50\text{ppt Kr}$**

と見積もられる。

^{85}Kr 崩壊事象探索結果

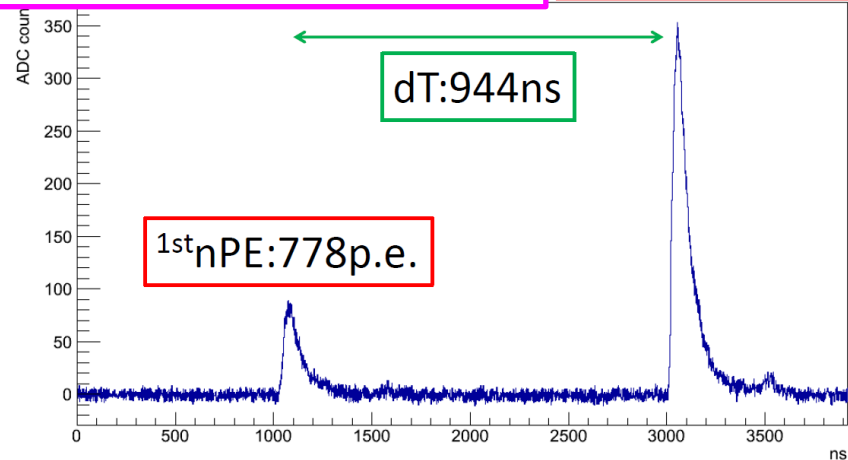
期間	2011/02~2011/03	2011/08~2011/09	総計	Accidental
Live time	13日	48日	61日	61日
First Cut	5 event	26 event	31 event	-
*Eye Scan	5 event	21 event	26 event	7.32 event
Final Cut	0 event	1 event	1 event	0.61 event

*First Cut後にEye Scanを行い明らかに違うものは除いた。(下図は例)



Final Cut後に残ったEvent

2ndnPE:9145p.e.



^{85}Kr 濃度上限値見積もり

- Final + Eye scanとFirstで残ったeventの差が大きい。
→26eventすべてがKr崩壊事象かどうかは今後より詳細に調べる必要がある。
(位置相関、Bi-Poペアの混入の可能性、Final Cutの系統誤差の評価)

今回は残ったeventがすべてKrだと仮定して ^{85}Kr 崩壊事象探索の結果と各カットでのアクシデンタル数からそれぞれの場合でのKr/Xe濃度の上限を見積もる。

- **First Cut**の場合: $N_{\text{BG}}=7.32$ event , $N_{\text{Kr}_{\text{obs}}}=26$ event

よって、Feldman&Cousinsの方式(G.J. Feldman and R.D. Cousins, Phys. Rev. D 57

(1998) 3873.)により、90%の信頼区間でevent数の上限値を見積もると、Efficiencyを考慮して

$\text{Kr/Xe} < 28\text{ppt Kr}$ となる。

同様に**Final Cut**では $\text{Kr/Xe} < 9.3\text{ ppt Kr}$ となる。(統計誤差のみ)

Outline

- XMASS実験
- Krバックグラウンド
- ガスクロマトグラフ装置によるKr濃度測定
- FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定
- 結論

結論

✓ XMASS実験は極低バックグラウンド環境での暗黒物質直接探索実験である

✓ XMASS実験で用いる液体Xe中に含まれるKrは暗黒物質直接探索の致命的なバックグラウンドとなる。

✓ そこで我々は2009年にXe中Krを5桁以上低減させる能力を持つXe蒸留装置を開発した。その後この蒸留装置を用いて本実験用に約1.2tonのXeを蒸留した。

✓ 蒸留後の精製Xe中のKr濃度を評価したところ、ガスクロマトグラフ装置では (23 ± 32) ppbという結果が得られた。APIMS < 2.7 ppt(90% C.L.)

✓ XMASS実験において初めて実データを用いてXe中Kr濃度を見積もった。

-データセット: 2011年2月～3月、2011年8月～9月計live time 61日

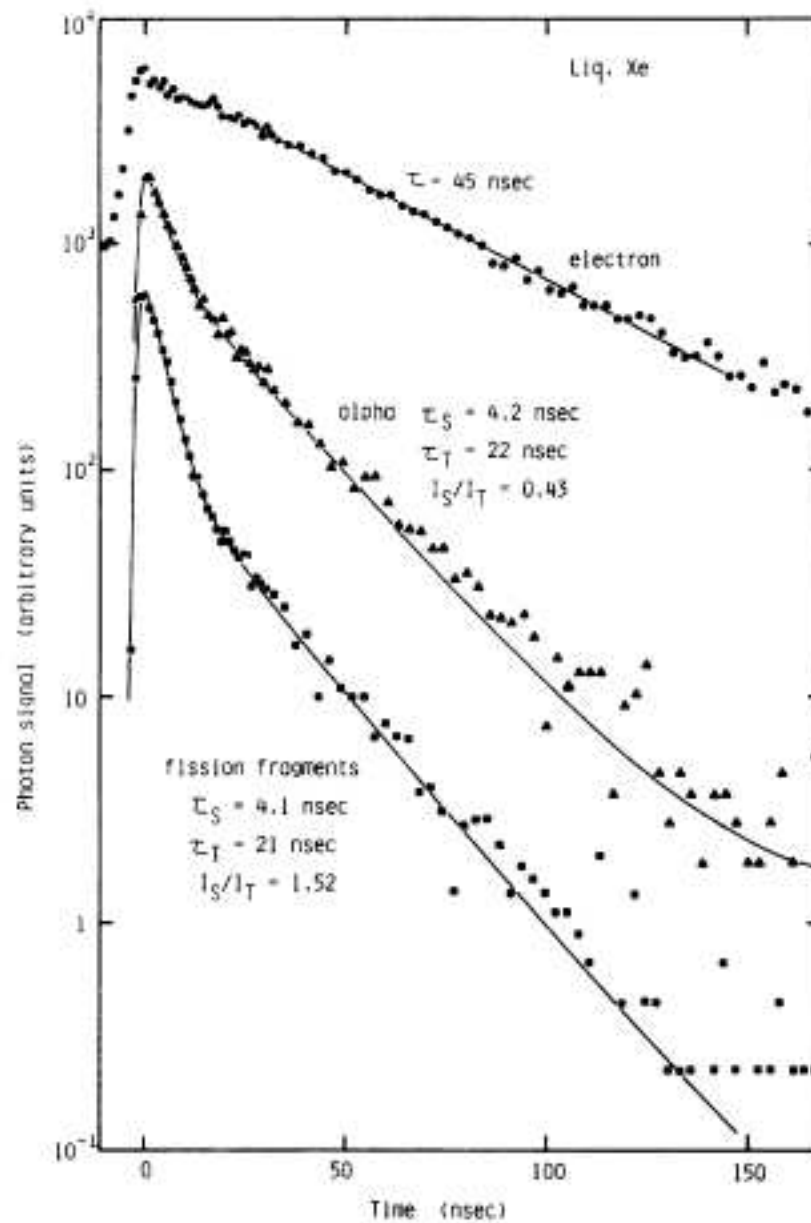
-FADC[CAEN-v1721]

-60ch

First Cutの場合は < 28 ppt Kr/Xe、Final Cut の場合は < 9.3 ppt Kr/Xeとなった。

✓ 今後は学会に向けて解析の見直し、new FADCを使った解析を行う。

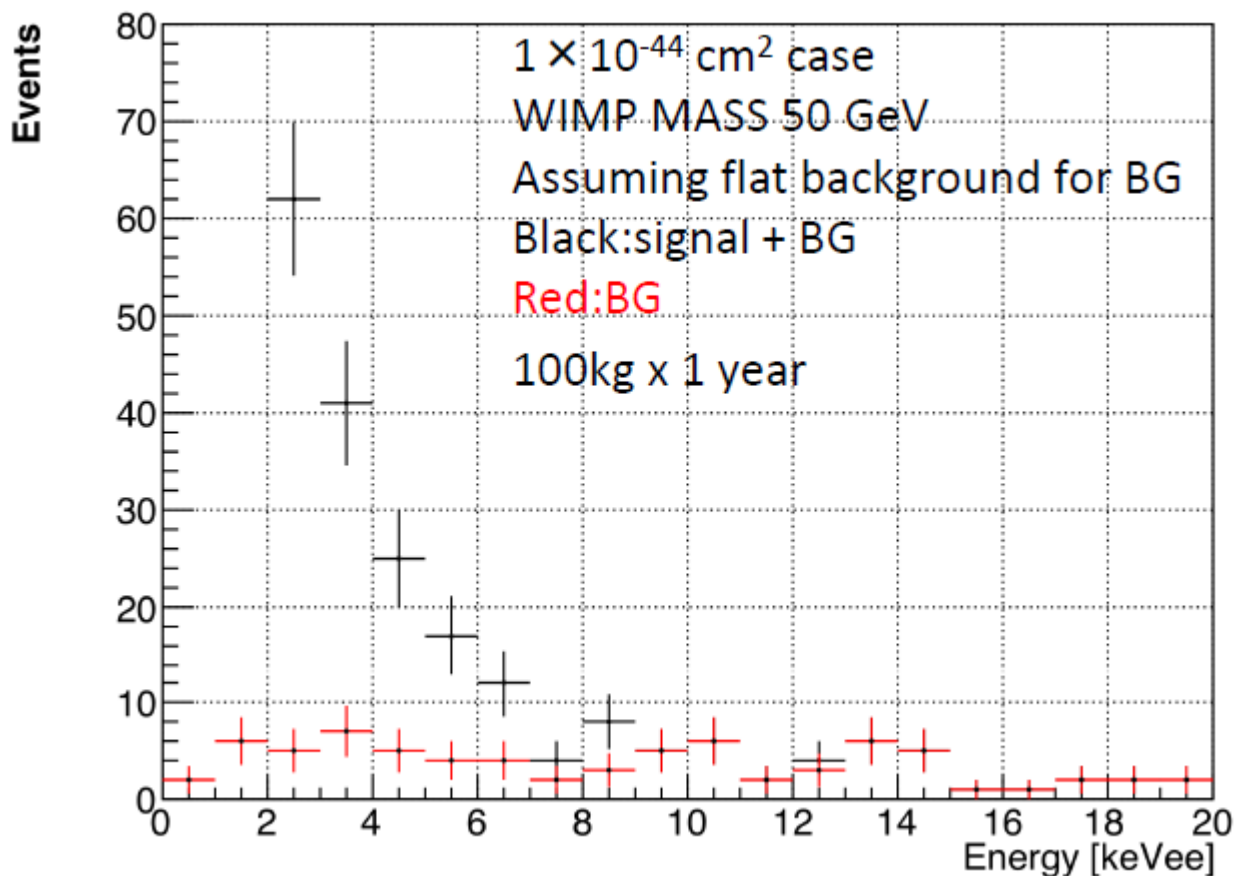
Back Up



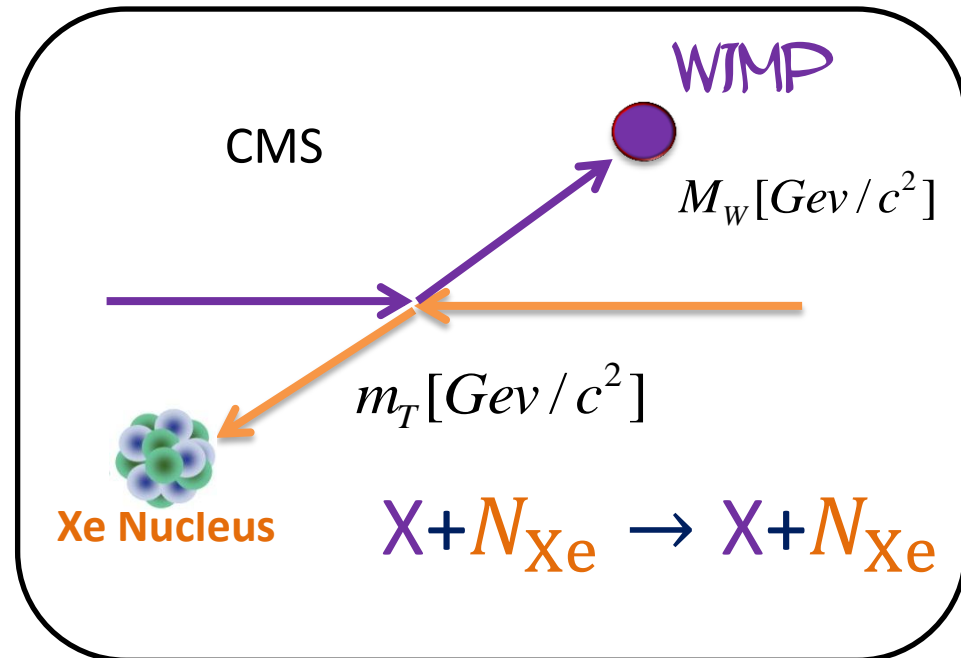
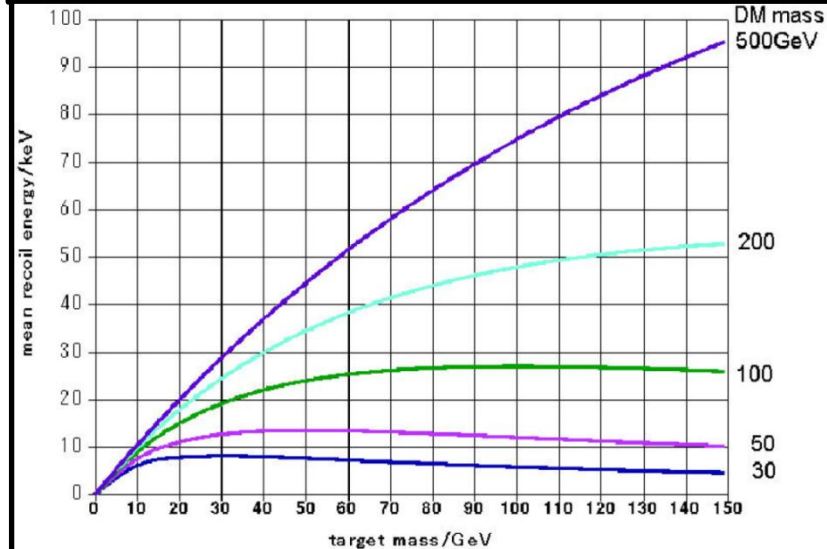
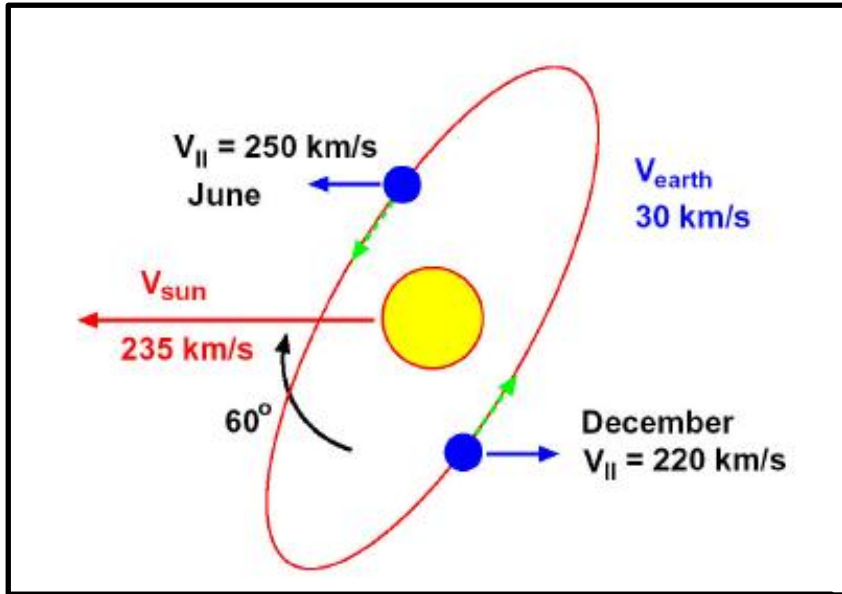
戦略

極低バックグラウンド環境の実現($\sim 10^{-4}$ Events/keV/kg/day)

XMASS検出器により期待されるEnergy spectrum



感度曲線(1)



$$E_R = \frac{2m_T M_W}{(m_T + M_W)^2} (1 - \cos \theta) E_{W_{KE}}$$

$$E_{W_{KE}} = \frac{1}{2} M_W [Gev/c^2] \left(\frac{2.35 \times 10^5 [m/s]}{3.0 \times 10^8 [m/s]} c \right)^2$$

感度曲線(2)

Expected spectrum : differential Rate

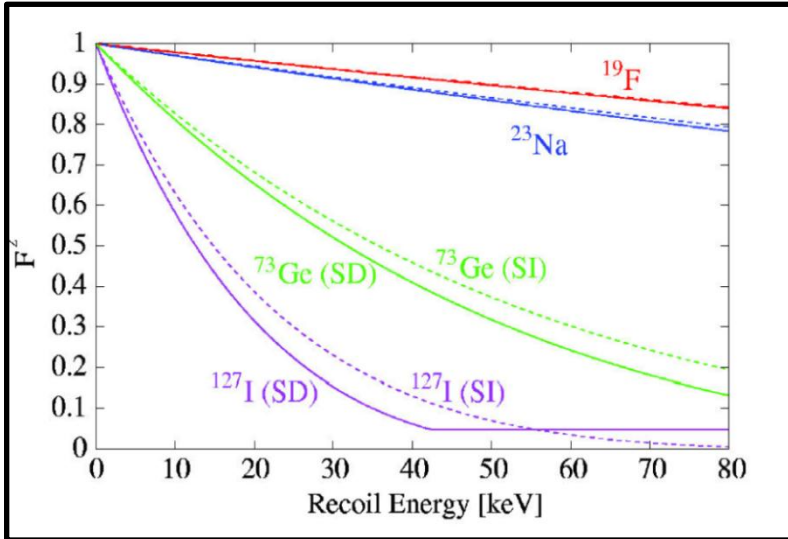
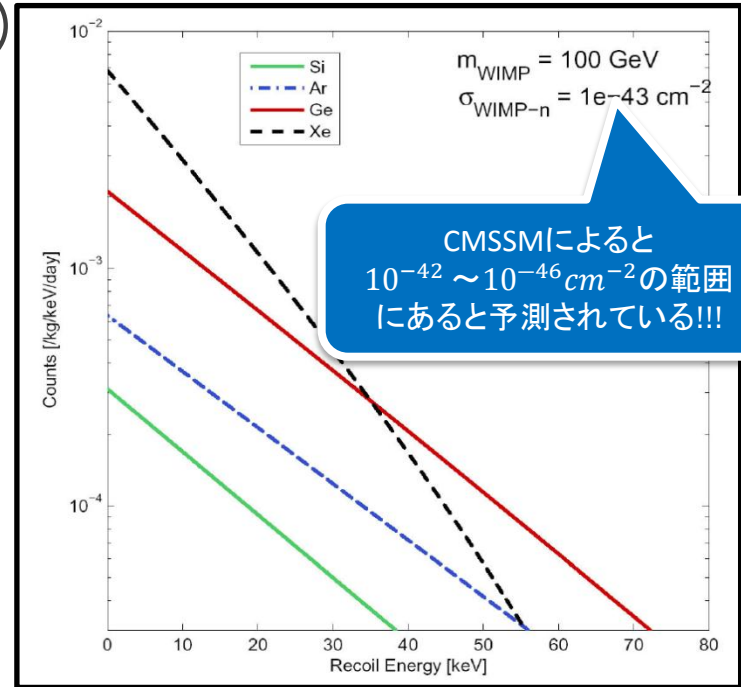
$$\frac{dR}{dE_R} = c_1 \frac{R_0}{E_{WKE} r} F^2(E_R) e^{-c_2 E_R / E_{WKE} r} [\text{counts / keV / kg / day}]$$

$$R_0 = \frac{433}{M_W m_T} \left(\frac{\sigma}{1 \text{ pb}} \right) \left(\frac{\rho_{DM}}{0.3 \text{ GeV / cm}^3} \right) \left(\frac{v_0}{235 \text{ km / s}} \right) [\text{counts / kg / day}]$$

$$r = \frac{4 M_W m_T}{(M_W + m_T)^2}$$

$$c_1 = 0.751, c_2 = 0.561, v_0 = 220 \text{ km / s}, \rho_{DM} = \text{DM密度}$$

$F(E_R)$: 原子核の形状因子



WIMPと原子核の反応断面積はスピンに依存する項と依存しない項に分けられる。

$$\sigma_T = \sigma_T^{SI} + \sigma_T^{SD}$$

$$\sigma_T^{SI} \cong A^2 \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2} \sigma_n^{SI}, \sigma_T^{SD} \cong \frac{3}{4} \lambda^2 J(J+1) \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2} \sigma_n^{SD}$$

$$\mu_T = \frac{M_W m_T}{M_W + m_T}, \mu_n = \frac{M_W m_n}{M_W + m_n}$$

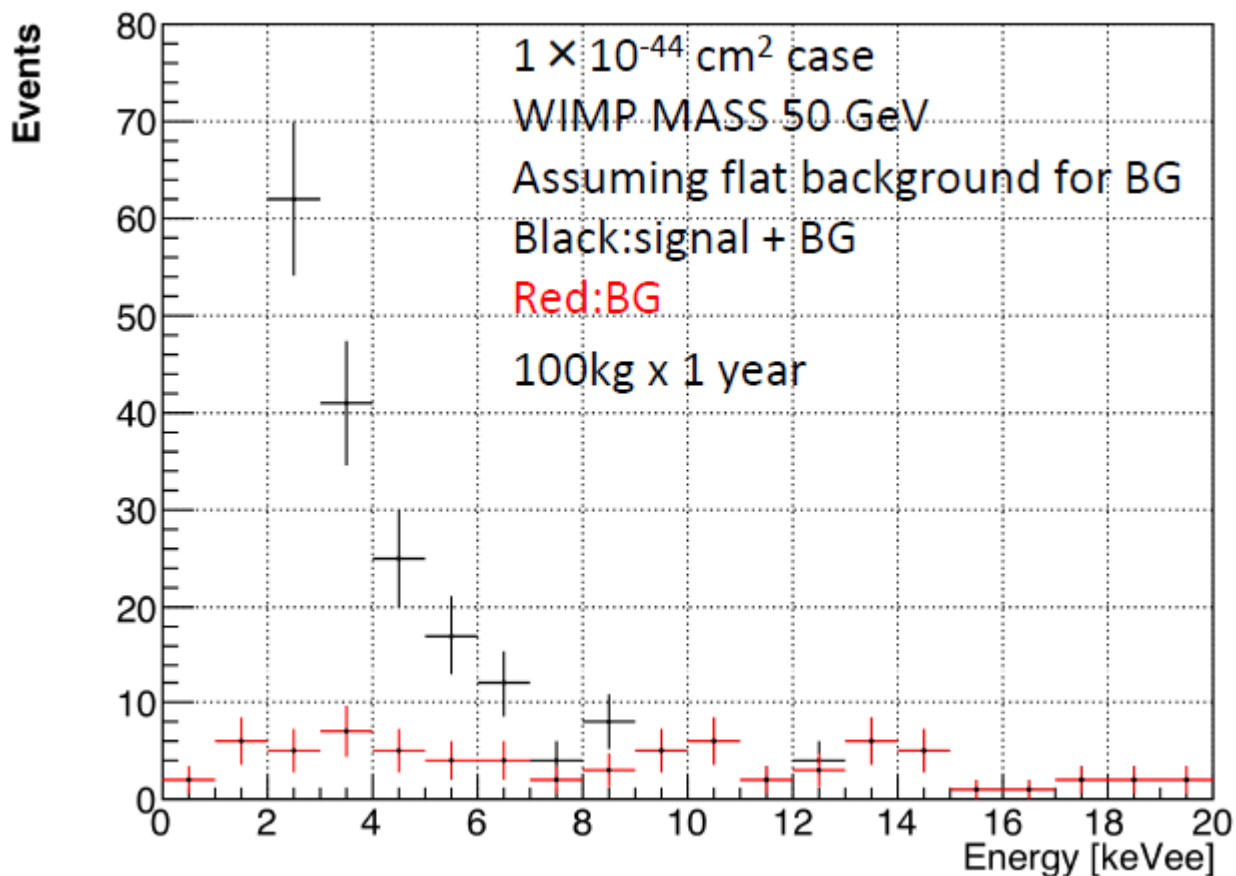
λ : λ 因子 n : 核子 A : 質量数 J : 標的原子核の全角運動量

比較の便利のため通常核子との反応断面積に変換される。

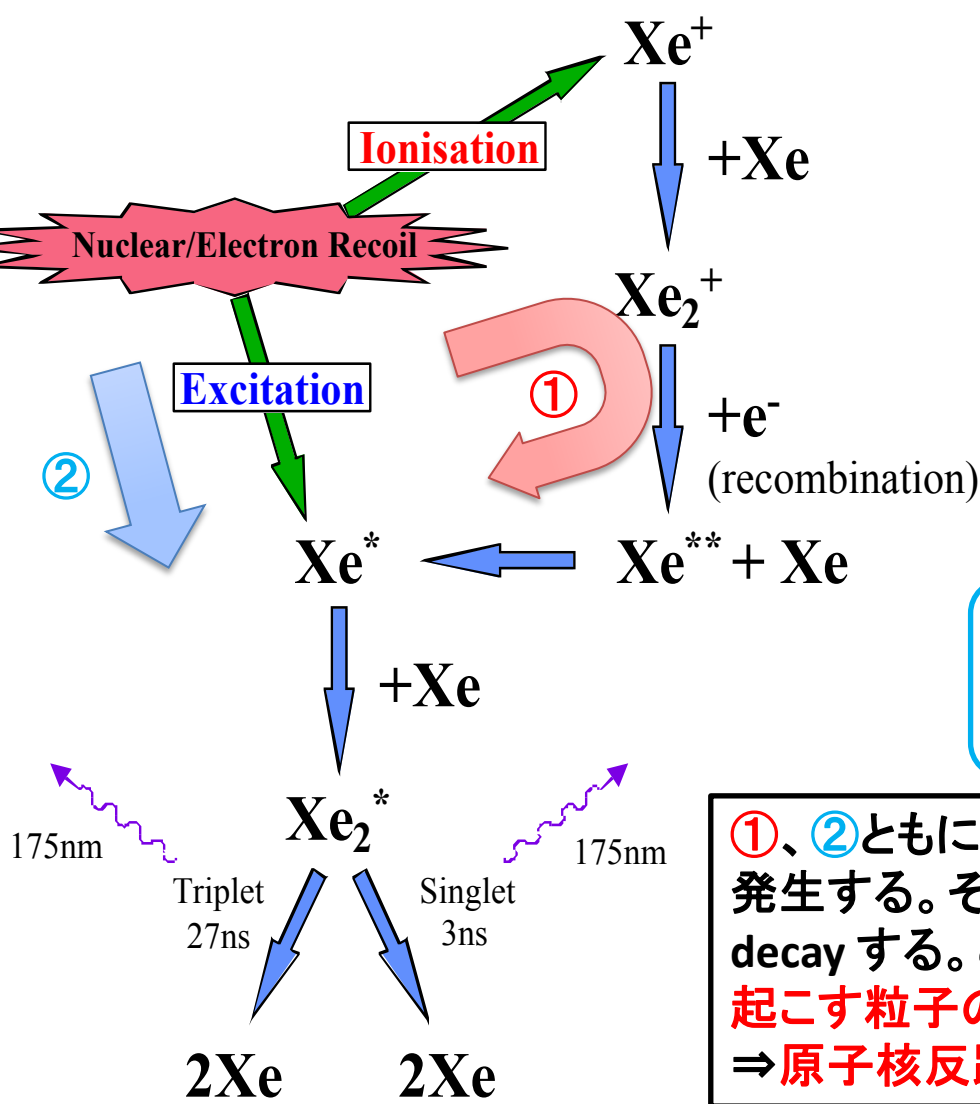
戦略

極低バックグラウンド環境の実現($\sim 10^{-4}$ Events/keV/kg/day)

XMASS検出器により期待されるEnergy spectrum



Xe の発光過程



①再結合(recombination)有り

- 1.原子核反跳(α, DM)or電子反跳(e, γ)によりXe原子がイオン化される。
- 2.イオン化されたXe(Xe^+)が周囲のXe原子に作用し局所的に Xe_2^+ を形成する。
- 3.最終的にその Xe_2^+ と自由電子の再結合が起き、Xeの励起子(Xe^{**})が作られる。

②再結合(recombination)無し

- 1.原子核反跳(α, DM)or電子反跳(e, γ)によりXe原子が励起される。

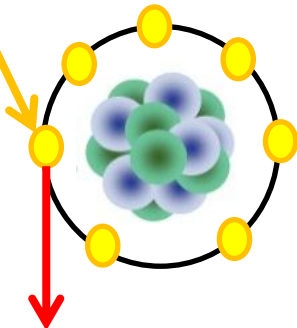
①、②ともに Xe_2^* が作られ、それが decay する時に光が発生する。そのとき、Triplet, Singlet で異なる時定数で decay する。このSingletとTripletの割合は最初反跳を起こす粒子の dE/dx によって変わる。
 ⇒原子核反跳(α, DM)と電子反跳(e, γ)の区別が可能。

電子、 γ

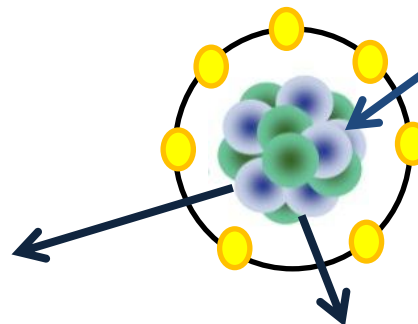
Xe原子

Xe 発光効率

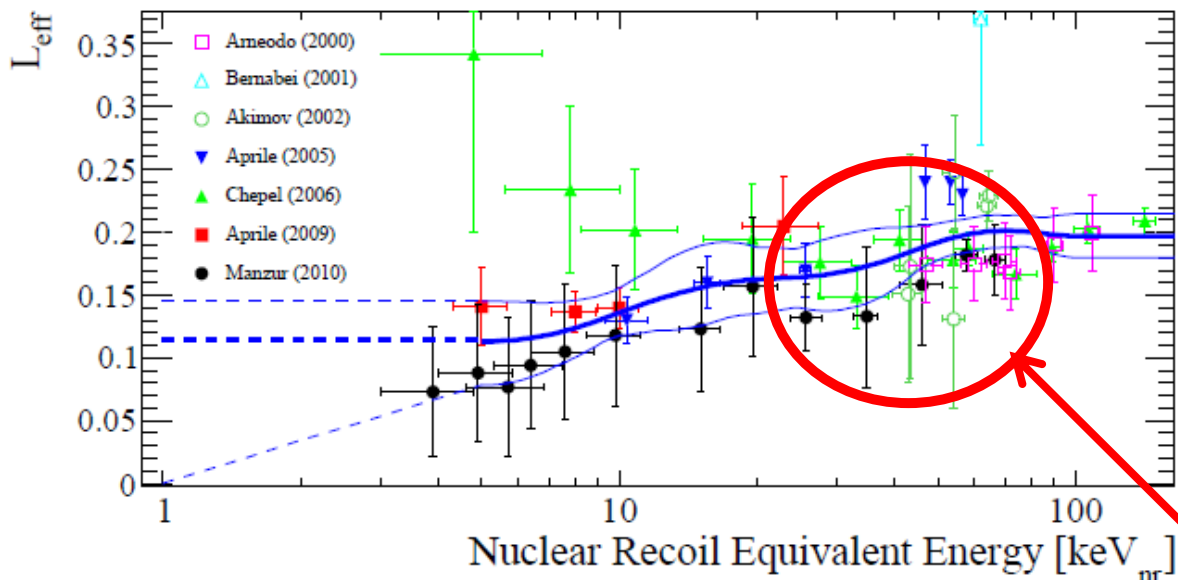
α 、WIMP



電子反跳



原子核反跳



エネルギーキャリブレーション
やバックグラウンド起源をStudy
する時は γ 線源を用いる。

電子反跳と原子核反跳
では dE/dx の他に、シンチレー
ション光の発光効率が異なる。

しかし、XMASSが狙う閾値
~30keV程度では不定性はそれ
ほど大きくない。

縦軸は122keVガンマ線との発光量(p.e.).keVの比。

PMTが最大のバックグラウンド源

放射性物質を極力減らしたPMTを開発

専用の低バックグラウンドPMTを浜松フォトニクス(<http://jp.hamamatsu.com/>)と共同開発

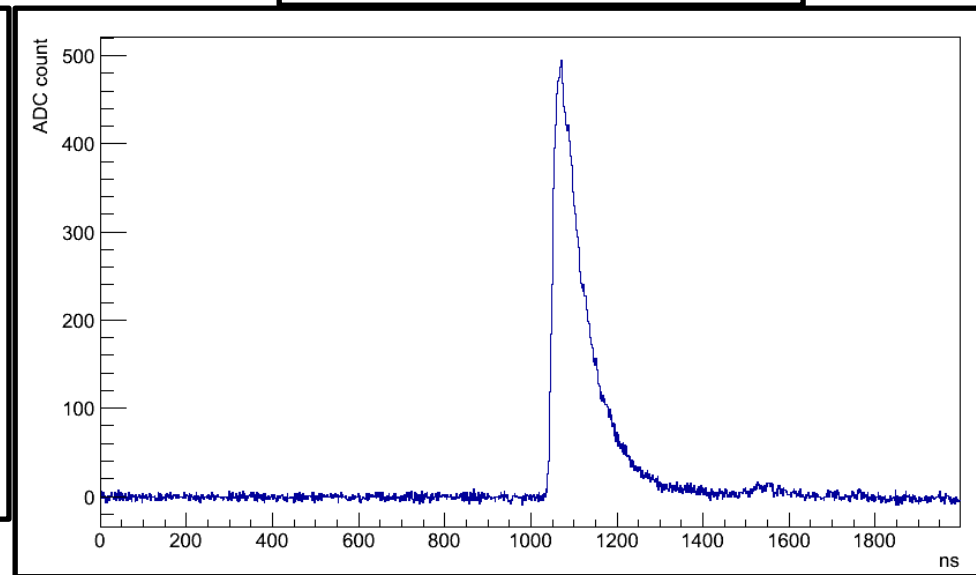
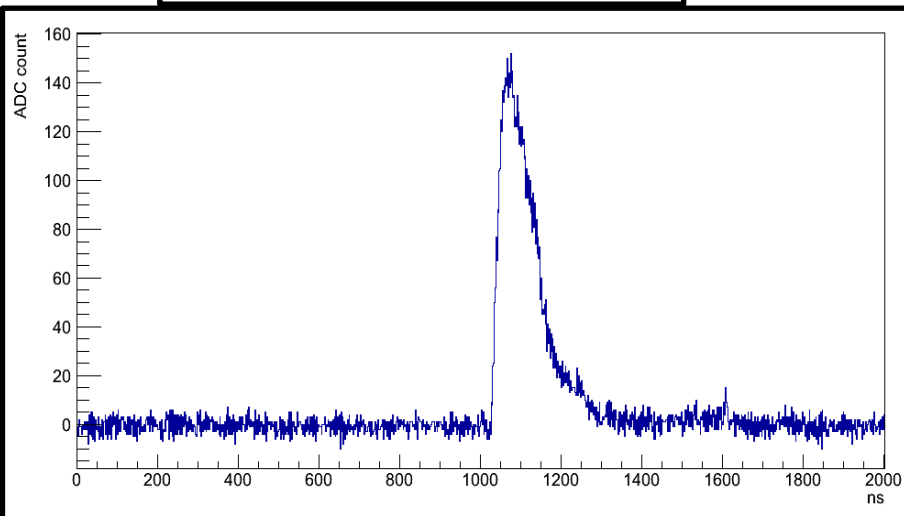


YEAR	2000	2002	2008
Model	Prototype	R8778	R10789
Material:Body	Glass	Kovar	Kovar
QE	25%	25%	27-39%
RI (except bleeder):			
U [mBq/PMT]	50	18±2	0.37±0.23
Th [mBq/PMT]	13	6.9±1.3	1.0±0.26
⁴⁰ K [mBq/PMT]	610	140±20	<5.9
⁶⁰ Co [mBq/PMT]	<1.8	5.5±0.9	3.1±0.15

FADCでの波形情報

173keV相当の事象の例

514keV相当の事象の例

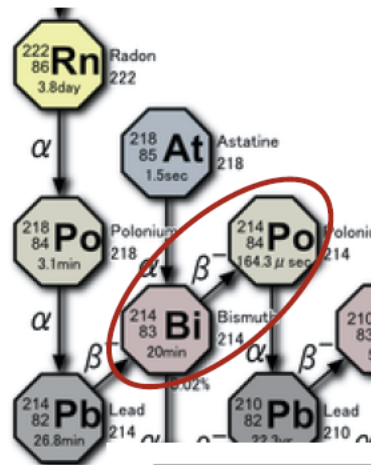


FADCで取得したデータの中には
左図のようなノイズが大量に混ざっている
なので、 ^{85}Kr 崩壊事象を探索する前に
まず全データ中から物理事象(ピーク波形)のみを抽出する必要がある。
⇒**ピークサーチ**

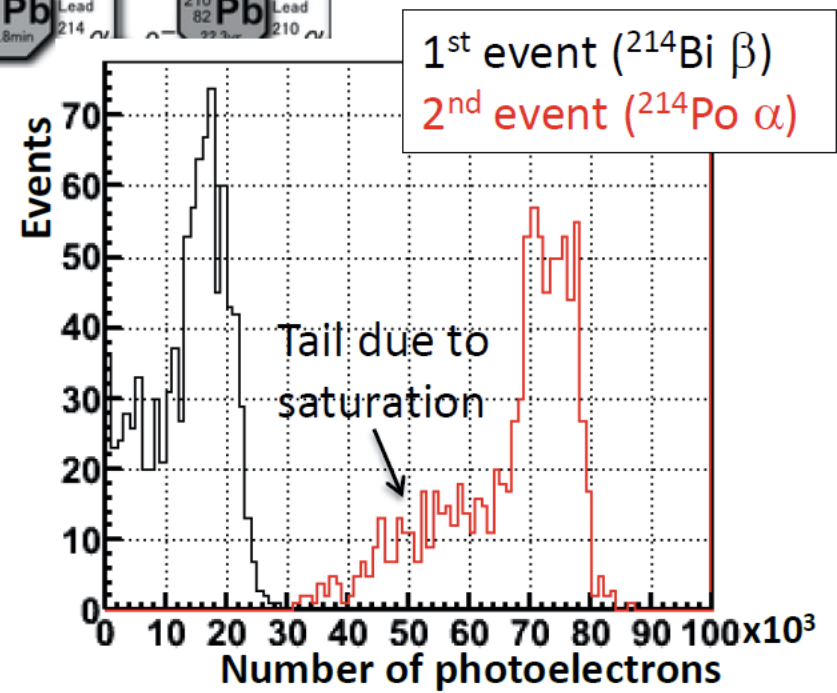
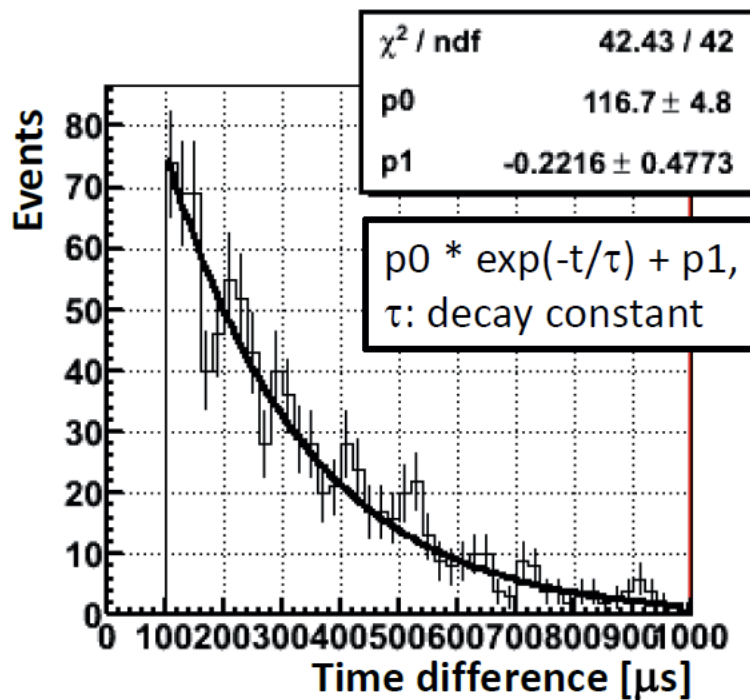
^{214}Po decays with $164\ \mu\text{s}$ half life.

It can be identified by time coincidence between two consecutive events:

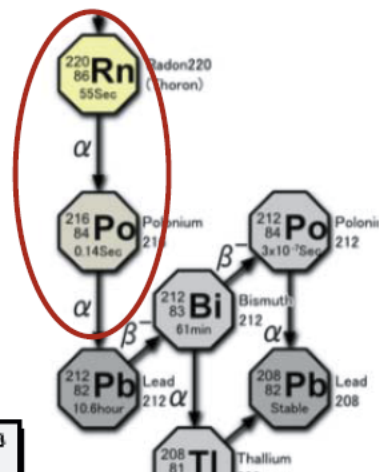
1. ^{214}Bi β decays into ^{214}Po
2. ^{214}Po α decays into ^{210}Pb



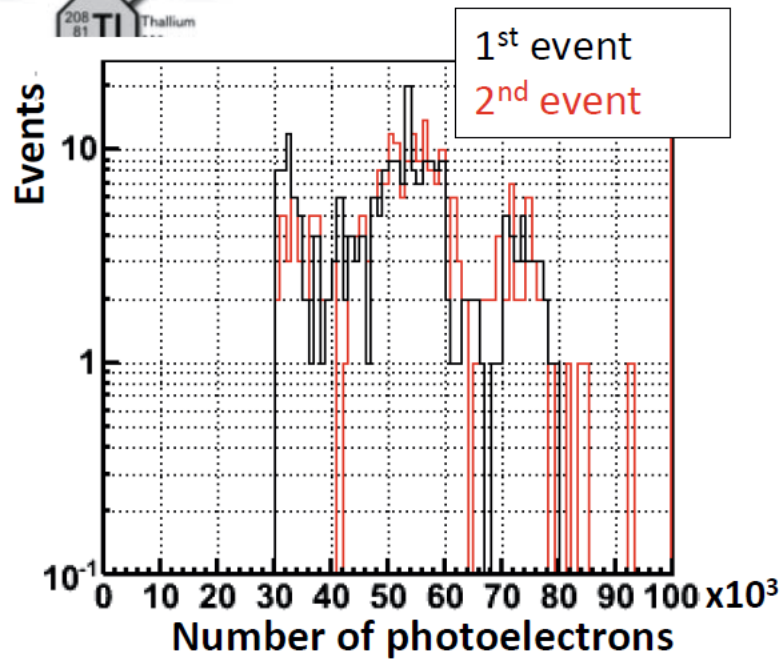
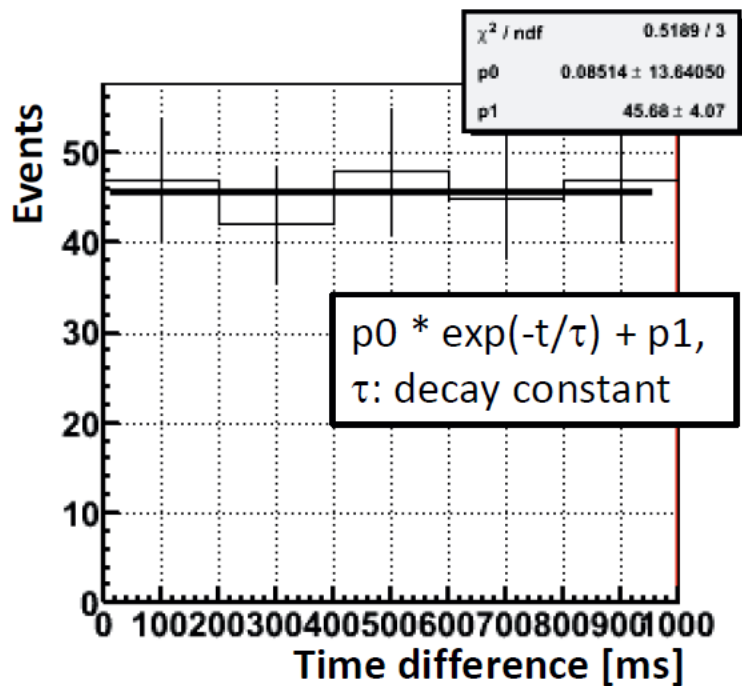
$8.2 \pm 0.5\ \text{mBq}$

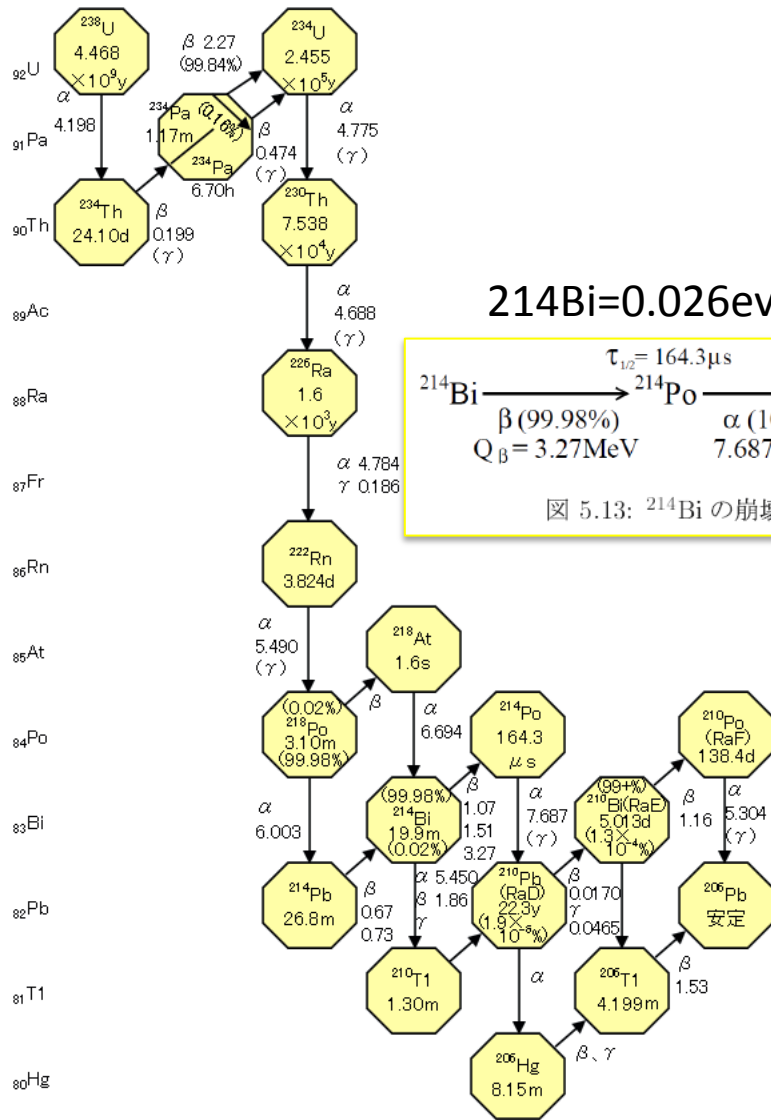


^{216}Po decays with
140 ms half life

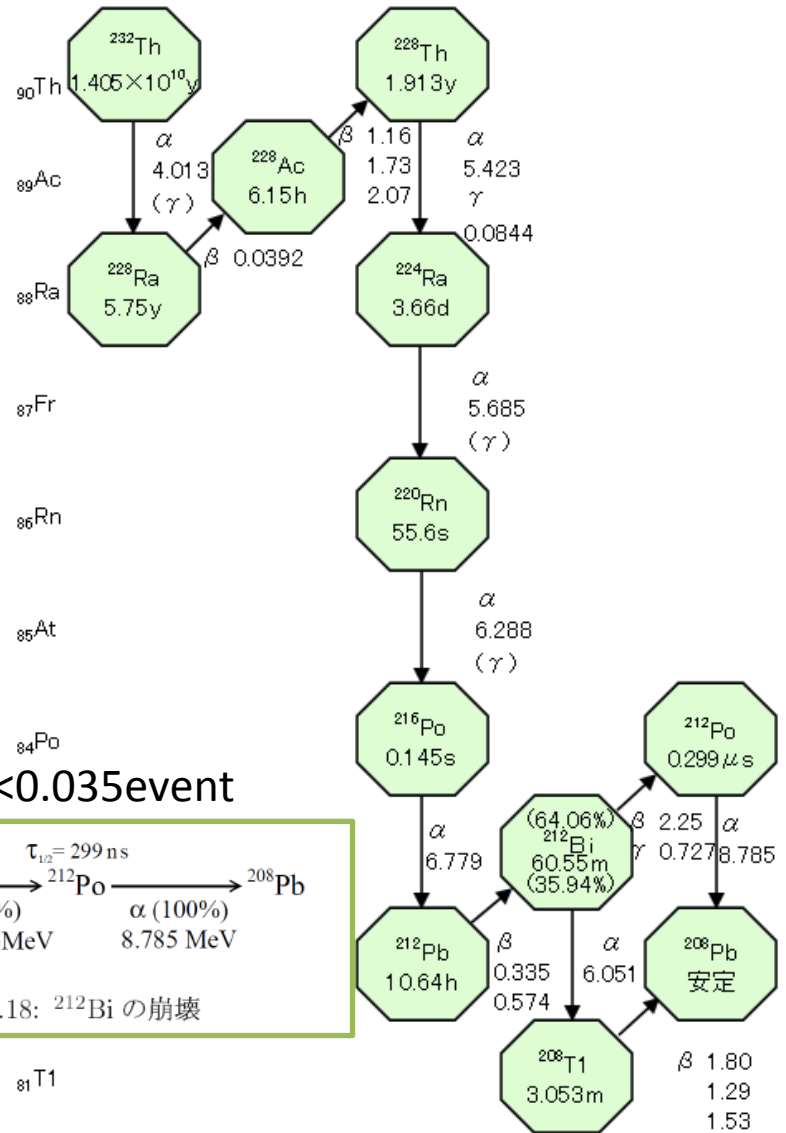
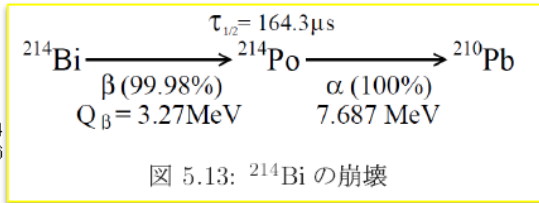


<0.28 mBq (90%C.L.)

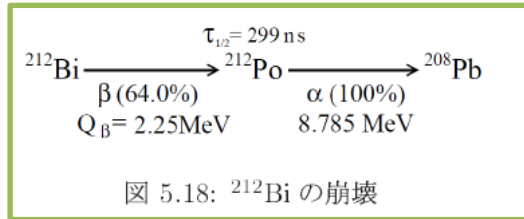


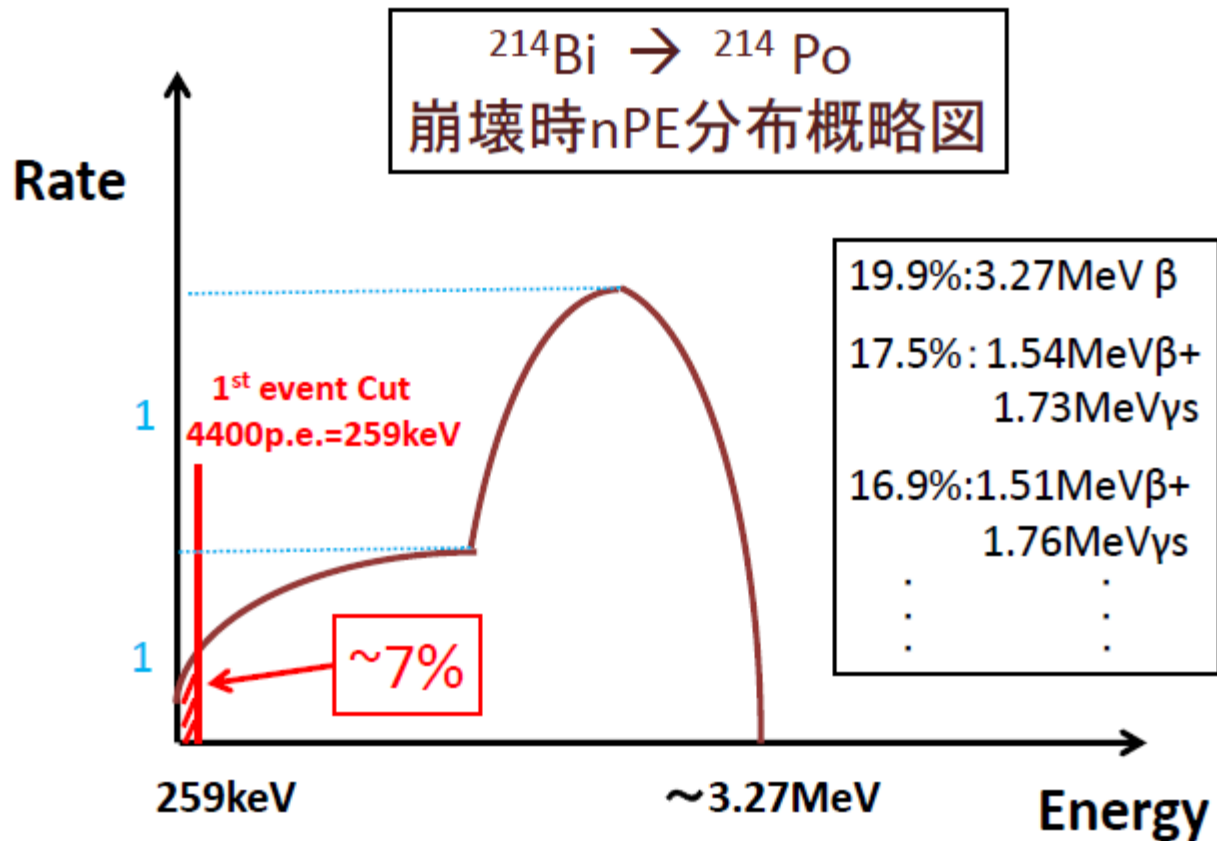


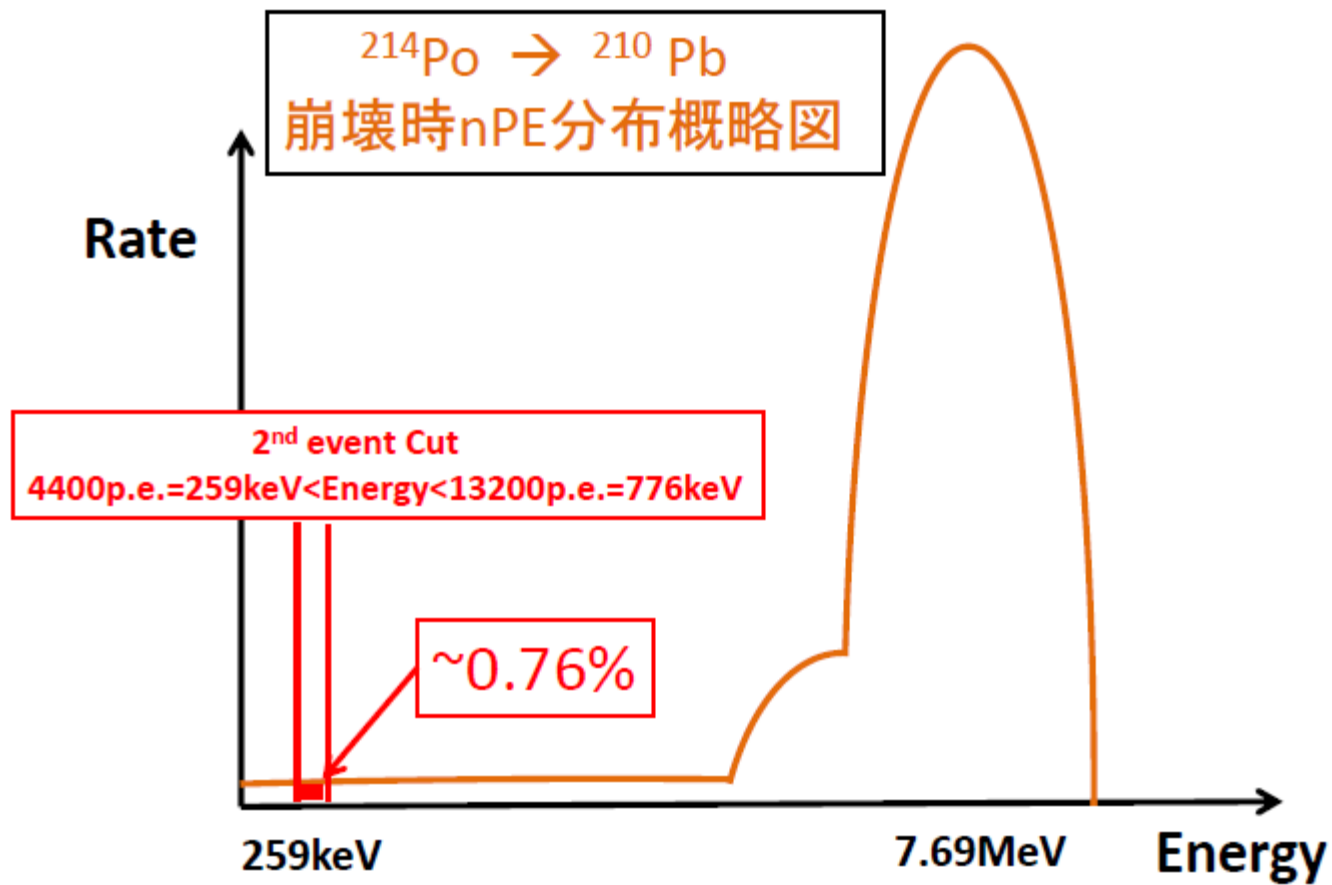
214Bi=0.026event



212Bi<0.035event

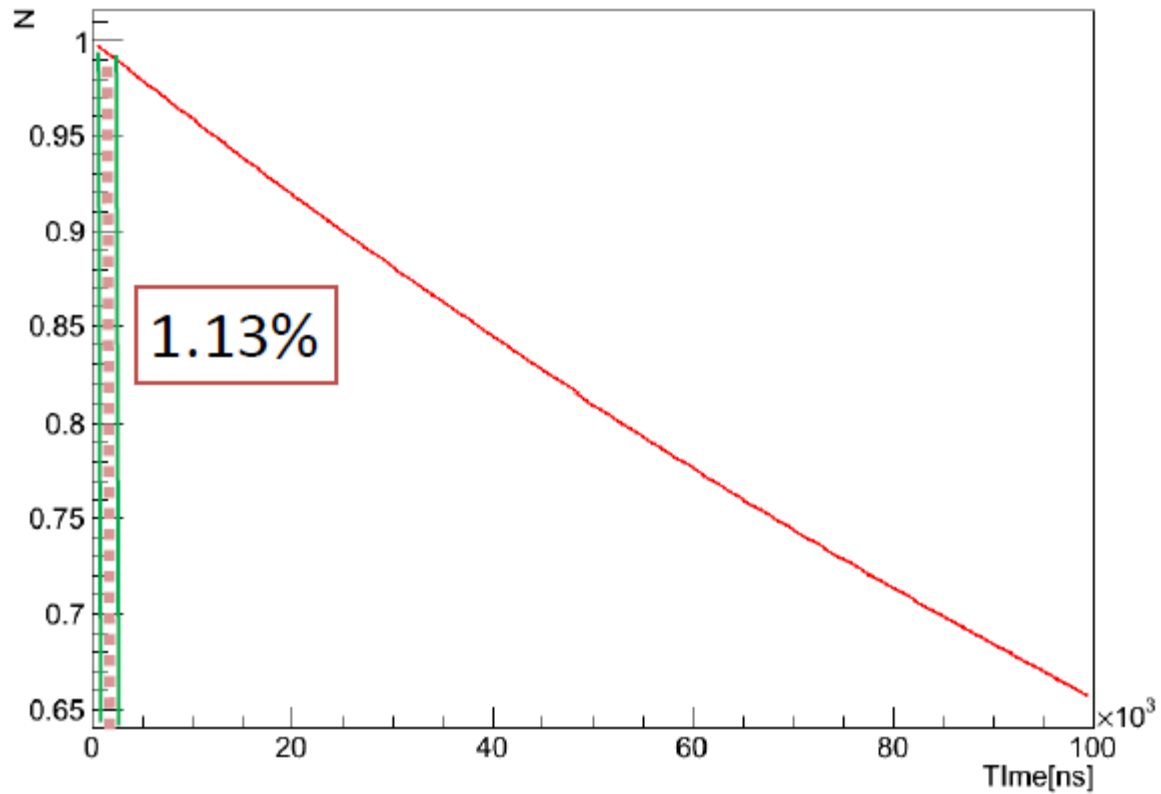




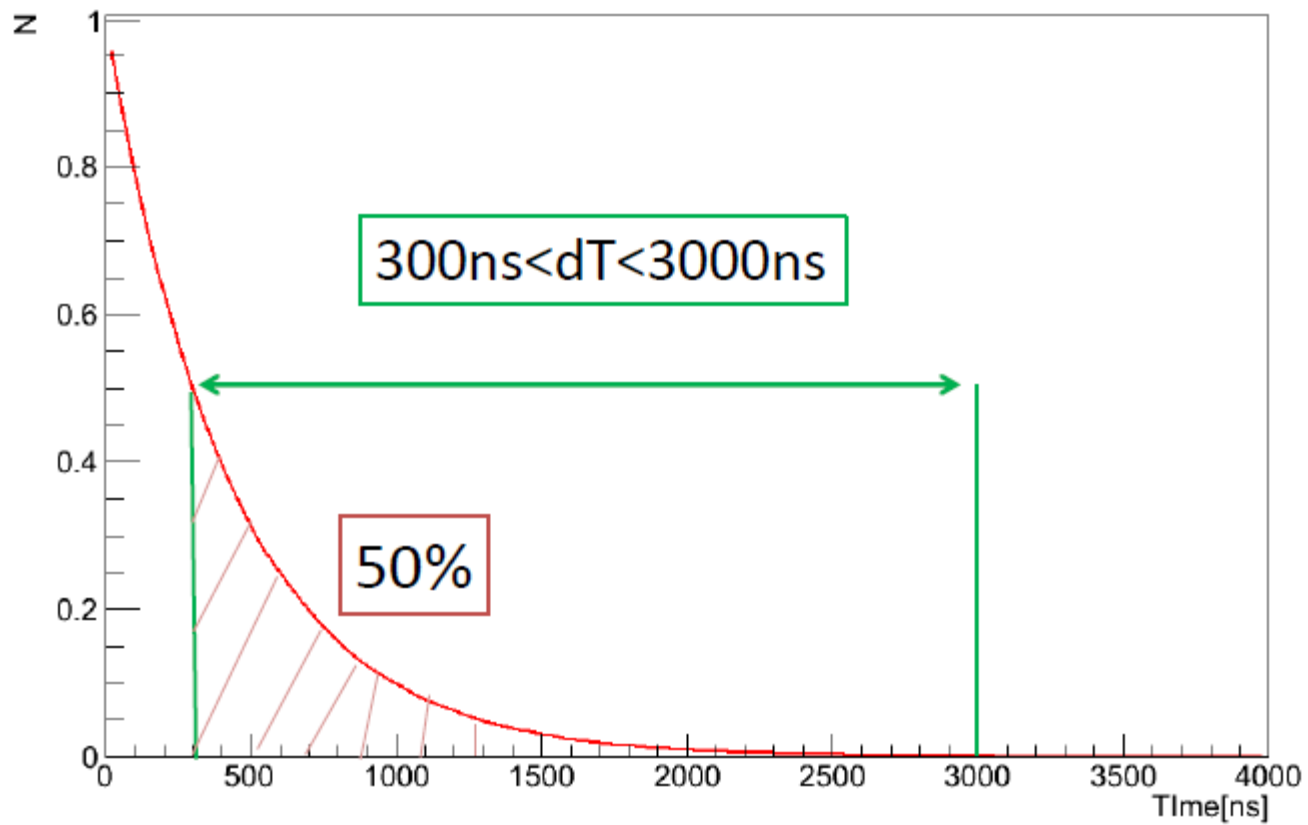


$^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ decay ($\tau_{1/2} = 164.3\mu\text{s}$)

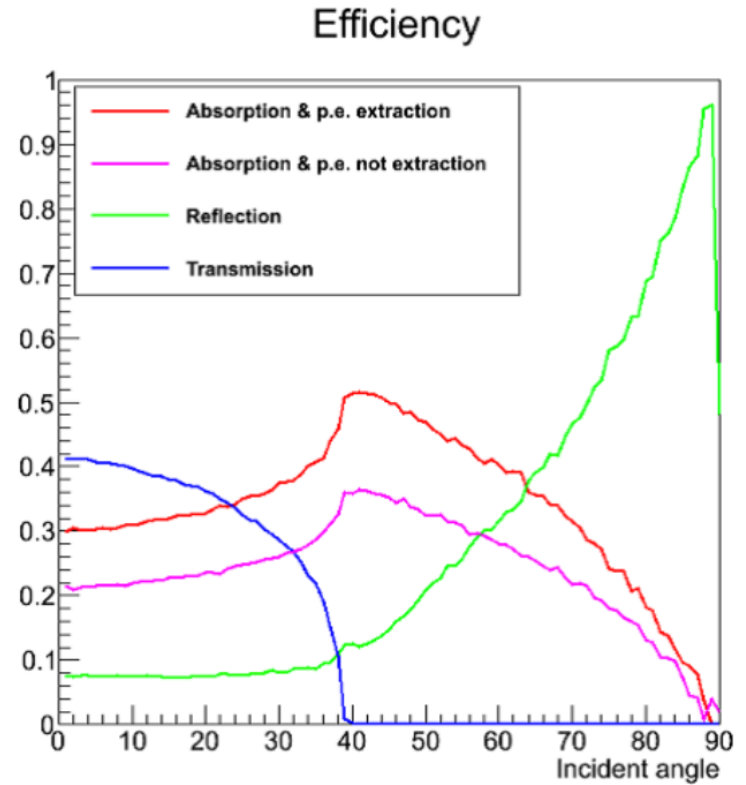
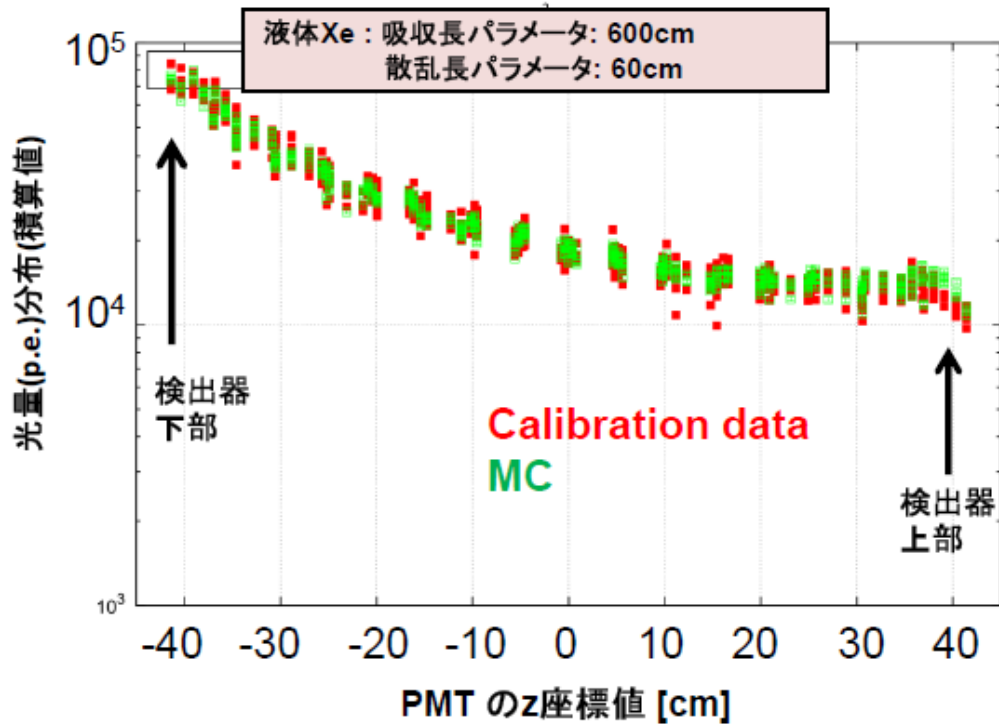
$300\text{ns} < dT < 3000\text{ns}$



$^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ decay ($\tau_{1/2} = 299\text{ns}$)

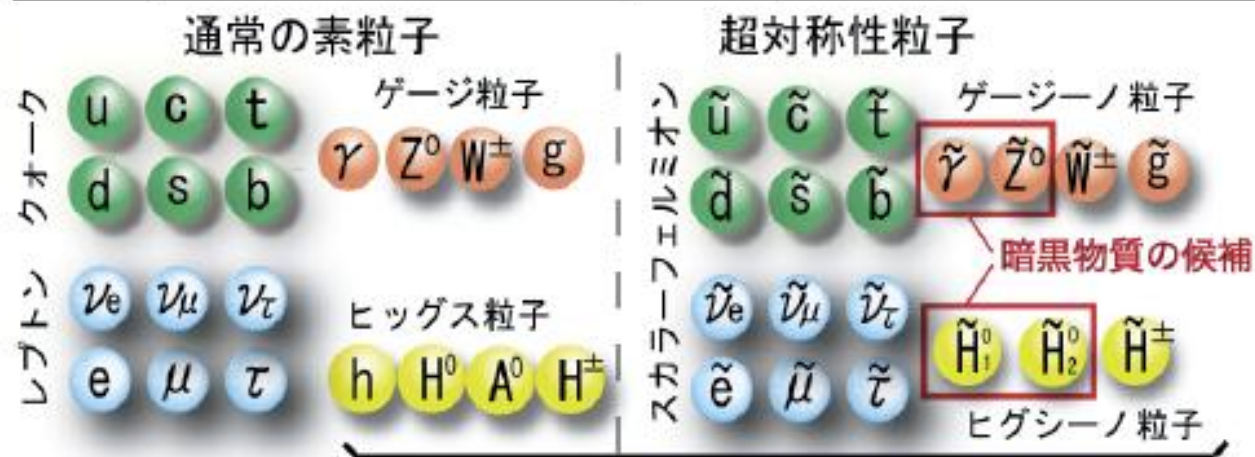


GEANT4シミュレーション(2)



フェルミオンとボソンを交換する変換(超対称性変換)

通常の粒子		超対称性粒子	
S=1/2	charged lepton: e, μ , τ neutrino: ν_e, ν_μ, ν_τ quark: u, c, t d, s, b	S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}$ $\tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}$
S=1	photon: γ (B^0 and W^0) Weak Boson: W^\pm, Z gluon: g	S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: $\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$ gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^\pm	S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}^0_1, \tilde{H}^0_2, \tilde{H}^\pm$
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}



ヒッグス、超対称性粒子は未発見

序章

History

1933年

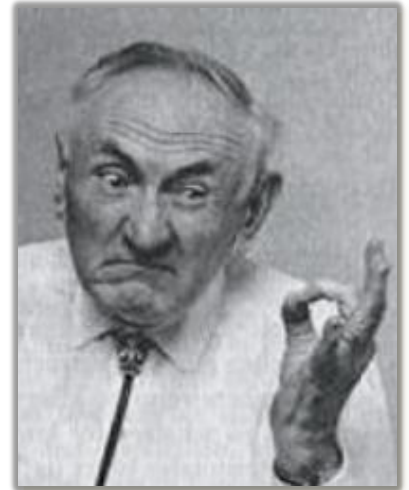
F.Zwickyが髪座の質量を計算し観測と大きな食い違いを指摘
--->目に見えない物質"Dark Matter"の存在を予想。

1970年代後半

渦巻き銀河の回転速度の観測により、光により観測可能な物質
以外の物質の存在が示唆された。

1990年～

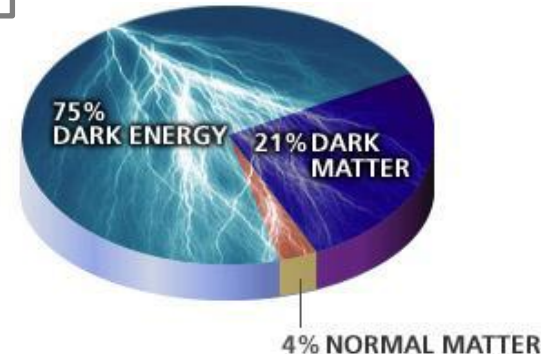
WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)衛星による
CMB(宇宙背景放射)の観測、重力レンズの観測によりさらにその
存在が裏付けられた。



F. Zwicky

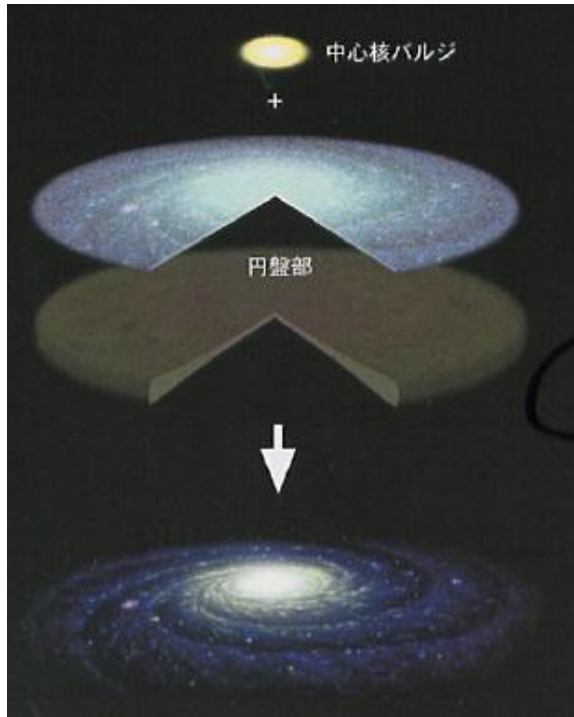
Evidence

- ・渦巻き銀河の回転速度
- ・重力レンズの観測
- ・WMAPによる宇宙背景放射の観測



渦巻き銀河の回転速度

銀河の3重構造

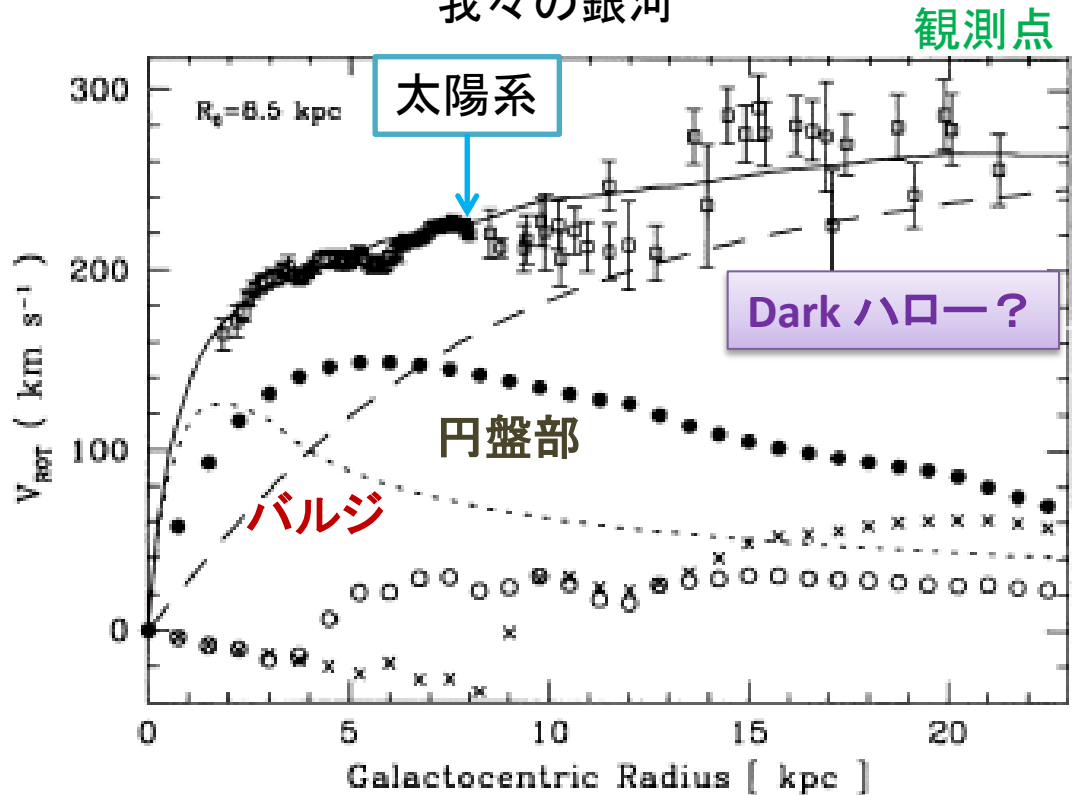


参考文献「宇宙」沼澤茂美、
脇屋奈々代 成美堂出版

ケプラーの法則から軌道の速度計算

$$v(r)^2 = \frac{M(r)G}{r} \quad G: \text{重力定数、} M(r): \text{半径} r \text{内の全質量}$$

我々の銀河



“見える物質”のみ: $M(r) = \text{一定}$ (銀河の端)

観測: $M(r) \propto r$

重カレンズの観測

The Bullet cluster: NASA

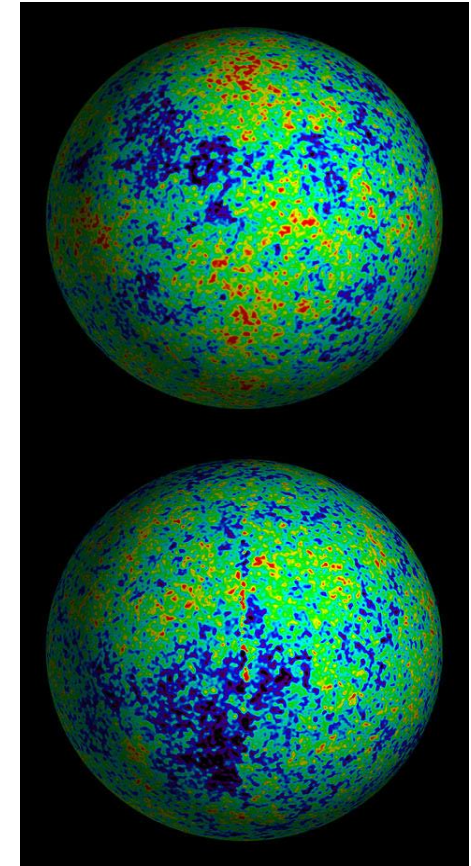
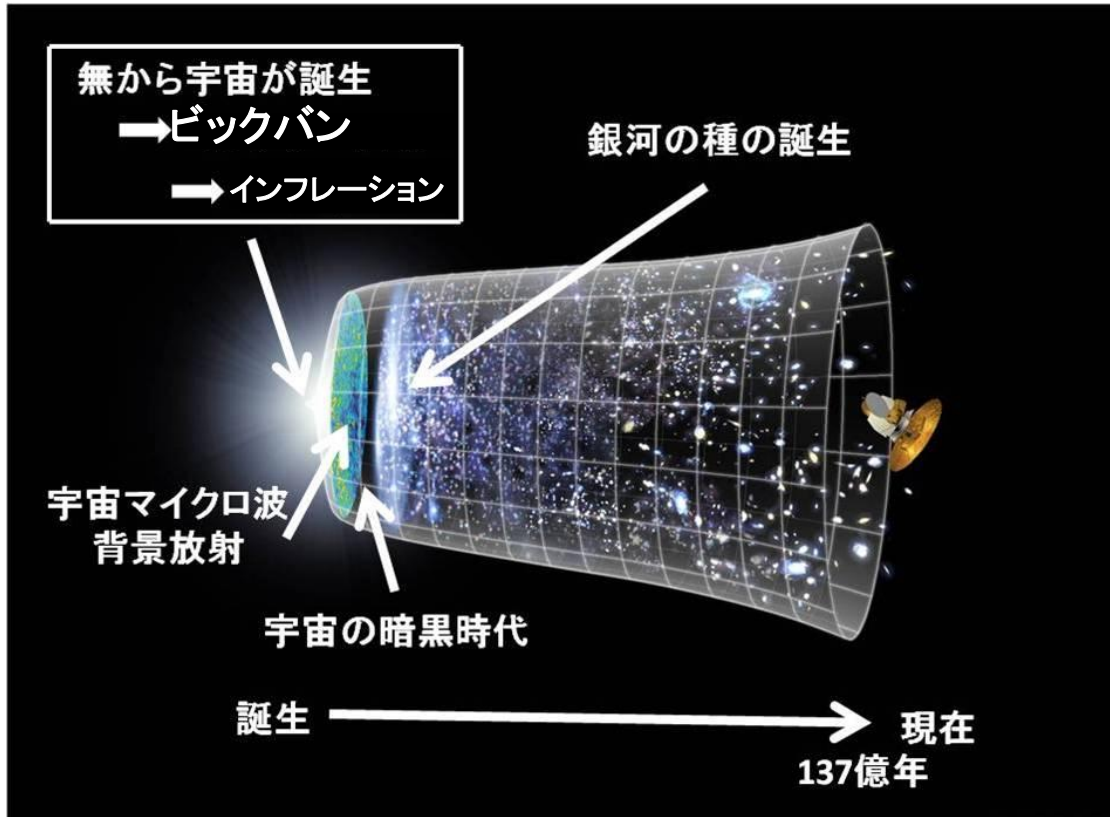


NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.

The Bullet Cluster: X-Ray Gas
The Bullet Cluster: Dark Matter(Lensing)

WMAPによる宇宙背景放射(CMB)の観測

WMAP観測結果



-0.0002K 2.725 K +0.0002K

<http://apod.nasa.gov/apod>

観測されたCMBの揺らぎのみでは銀河形成が進まない、より大きな揺らぎを持つ物質が大量に存在し、銀河形成を加速する必要→Dark Matter

暗黒物質候補

- ・電氣的に中性
- ・遅い粒子(非相対論的)
- ・重い粒子

MSSMで導入される“ニュートラリーノ”が現在暗黒物質の候補として有力視されている。

MSSMでは、超対称性粒子と標準理論の相互作用において、“R-parity”は保存する。

$$R = (-1)^{3B+L+2S}$$

B はbaryon number、L はlepton number、S はspin

超対称性粒子は奇数(-1)、標準粒子は(+1)のR-parityを持つことになる

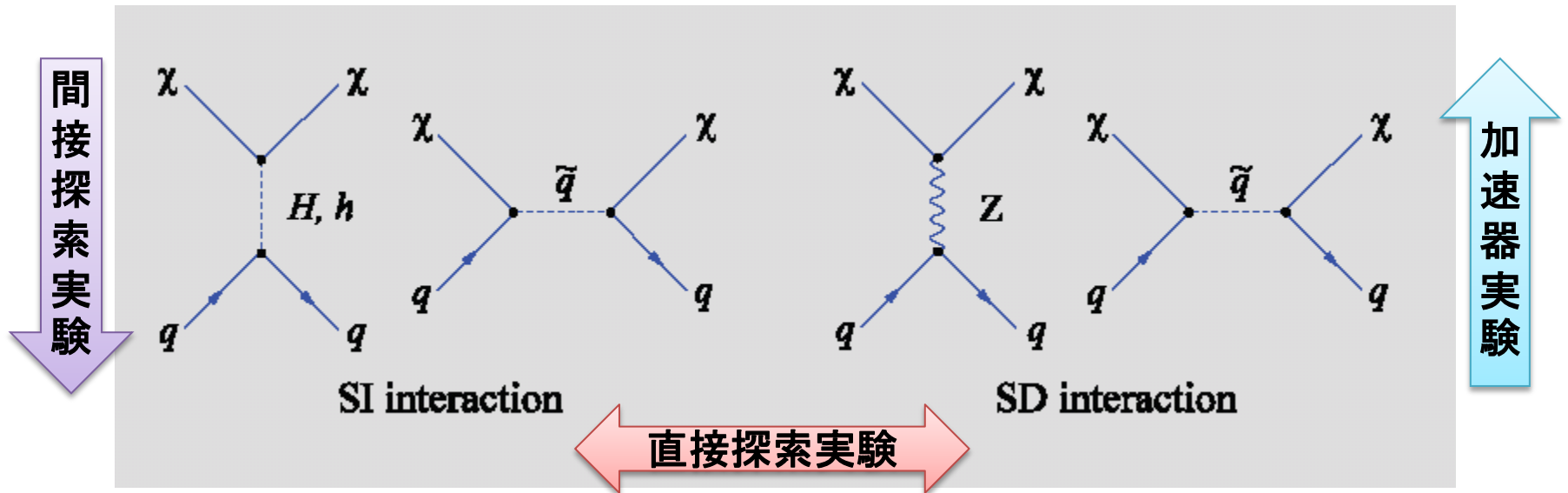
重い超対称性粒子はより軽い超対称性粒子に崩壊していくが**最も軽い超対称性粒子は安定**⇒**暗黒物質の候補となる**。最も軽い超対称性粒子はphotino, Zino, higgsinoの線形結合で表され、その粒子をニュートラリーノ(χ)という。

物質との相互作用

現在の暗黒物質最有力候補ニュートラリーノ (χ) と物質の相互作用

-Spin-independent (SI): H, h, squark 交換

-Spin-dependent (SD): Z, squark 交換



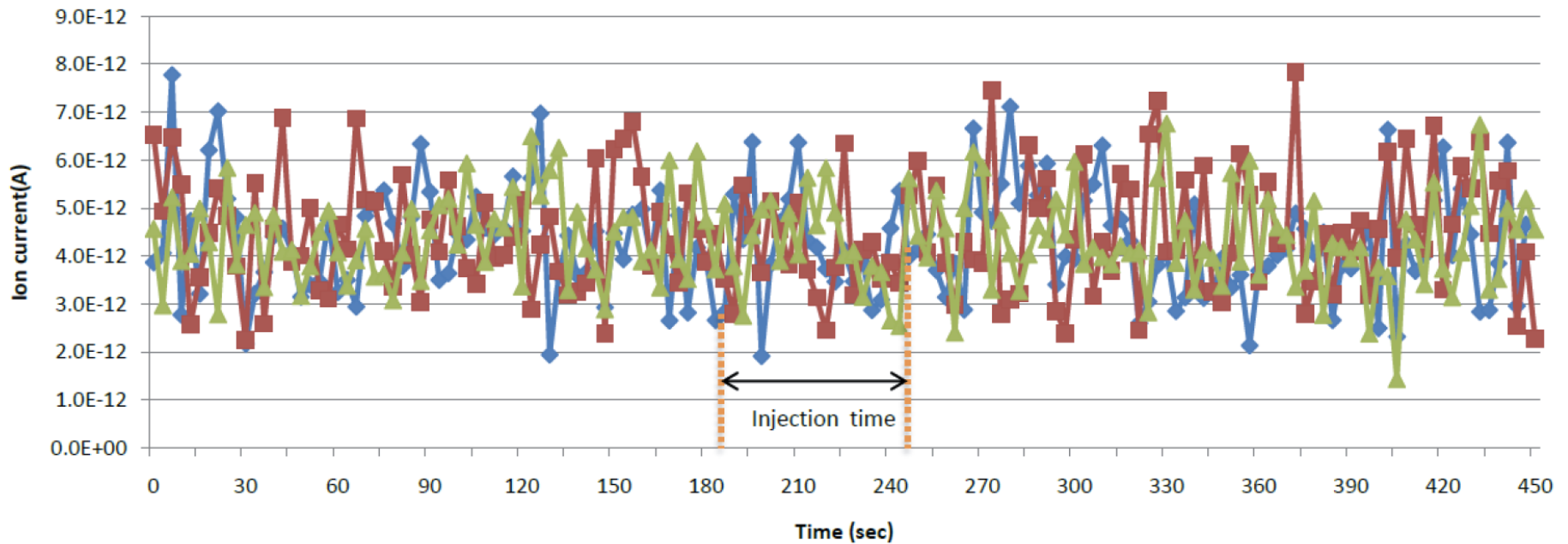
対消滅生成物 \Rightarrow 間接探索実験 (IceCube, PAMELA...)

通常物質からの生成 \Rightarrow 加速器実験 (LHC, ILC)

実験室の物質を散乱する \Rightarrow 直接探索実験 (XMASS実験, XENON100, CDMS...)

Kr concentration: < 2.7 ppt (90% C.L.)

- Xenon sample
- bg sample 1
- bg sample 2

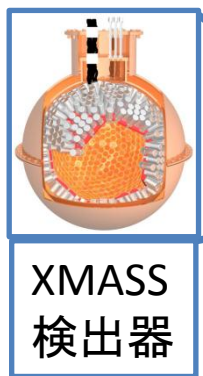
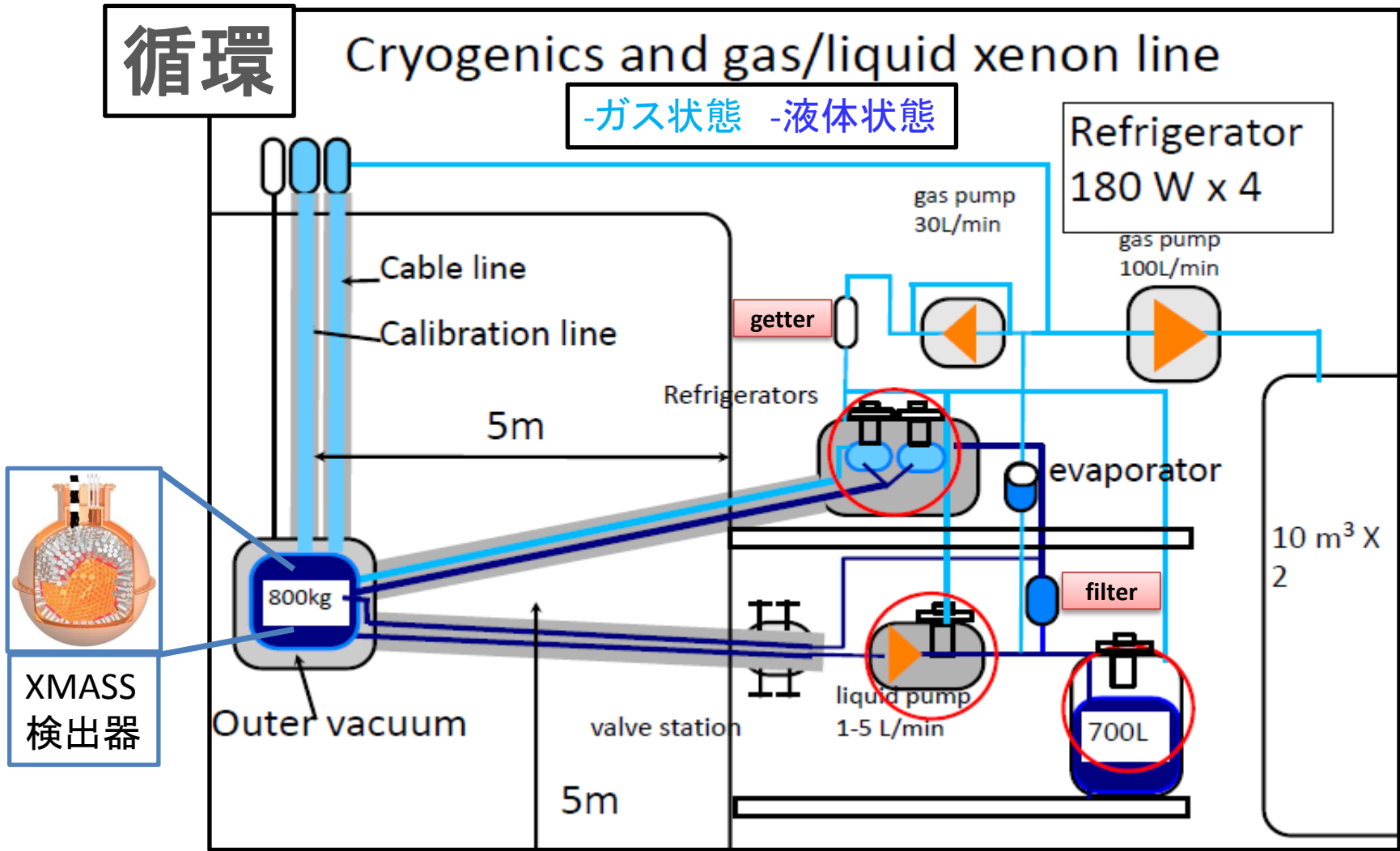


Xeを蒸留、循環する事により放射性不純物を低減

循環

Cryogenics and gas/liquid xenon line

-ガス状態 -液体状態



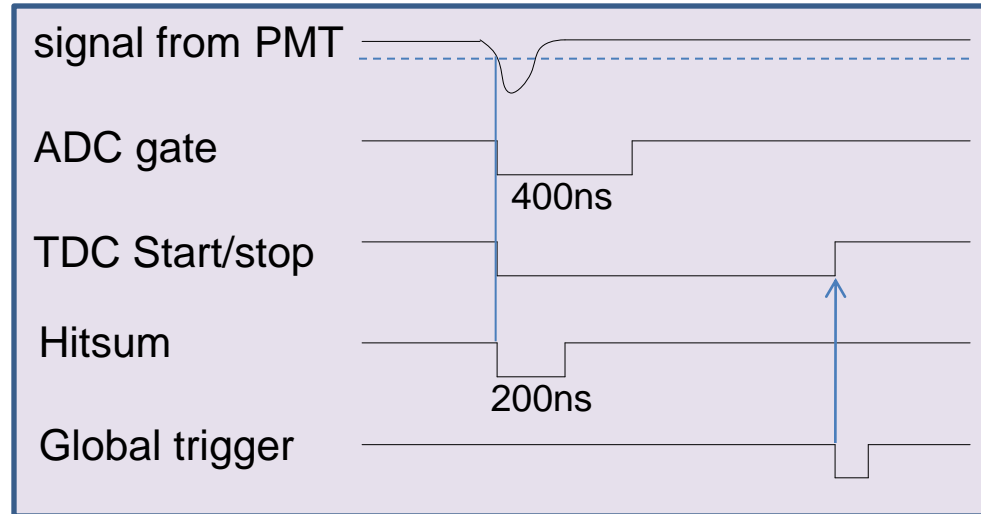
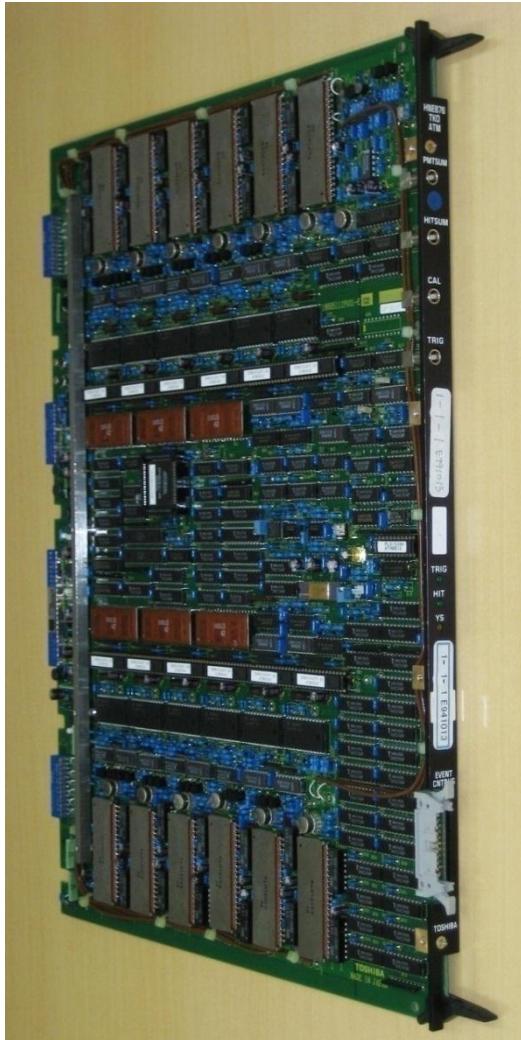
Xeを蒸留、循環する事により放射性不純物を低減

暗黒物質探索のXe中不純物と低減方法

不純物	影響	要求	低減方法
³⁵ K	放射線BG	<1ppt	蒸留
ラドン(Rn)	放射線BG	<1mBq	材料選別+循環 (filter+charcoal)
H ₂ O, O ₂	シンチレーション光を弱くする	<~10ppb (for $\lambda_{abs} > 1m$)	循環 (getter)

後で説明

ADC/TDC module (ATM)



- ディスクリミネータを実装し、セルフゲートでQAC/TACを作動させる。
約1.3us後までにグローバルトリガーの入力がない場合はリセットされる。
- 閾値を超えたチャンネル数に比例した(-11mV/hit) 200ns時間幅のアナログ信号(Hitsum)を出力する
→グローバルトリガー生成に用いる
- 各チャンネルにはQAC/TACが2つずつあり(a-ch/b-ch) 交互に切り替えることにより、デッドタイムを減らす

FADCによる ^{85}Kr 崩壊事象の同定

これから、FADCによるデータから ^{85}Kr 崩壊事象の頻度を解析により見積もっていく。その前の**試算**として、XMASS実験のKr濃度目標である**1pptのKrを含む場合の事象頻度**を見積もった。

XMASS検出器検出体積部分Xe829.2kgのXe原子(質量数131.293g)の数が、

$$N_{\text{Xe}} = (829.2\text{kg}/131.293\text{g}) \times 6.02 \times 10^{23} = 3.8 \times 10^{27} (\text{個})$$

である。 $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ の割合は測定により 0.6×10^{-11} とわかっている。Xe中Kr濃度を1ppt(= 10^{-12})と仮定した場合の検出器検出体積部分内の ^{85}Kr 数は

$$N_{\text{Kr}} = 3.8 \times 10^{27} \times 10^{-12} = 3.8 \times 10^{15} (\text{個/ppt Kr})$$

$$N^{85}\text{Kr} = 3.8 \times 10^{15} \times 0.6 \times 10^{-11} = 2.3 \times 10^4 (\text{個/ppt Kr})$$

となる。また、 ^{85}Kr は寿命が10.756年、0.434%でここで使おうと思っている β 、 γ のブランチの崩壊を起こすので、そこから期待されるイベントレートを計算すると、

$$10.756\text{年} = 3929\text{年} (=10.756 \times 365.25)$$

$$\text{Ratio}(\text{decay/day}) = 1 - \exp(-1/3929) = 0.000254 (\text{decay/day})$$

$2.3 \times 10^4 = 0.000254 \times 0.00434 = \mathbf{0.025} (\text{Events/day/ppt Kr})$ となる。例えば40日間の観測で1事象程度発生すると予想される。