

# XMASS実験における新ラドン検出器の動作確認

神戸大学理学部物理学科  
粒子物理学研究室 4年  
0753128s 村田 亜紀

2011年3月

## 概要

ダークマターの探索を目的とする XMASS 実験は、液体キセノン (Xe) を用いた低バックグラウンド実験である。液体 Xe 中に湧き出すラドン (Rn) は Xe の自己遮蔽能力で除去できず、できる限り除去しなければならない放射性不純物である。よって XMASS 検出器中の Rn 存在量を常時確かめる必要がある。この Rn 濃度を測定するのが Rn 検出器の役割である。

現在用いている Rn 検出器は真空引きの性能が悪く Xe には使用できない。今回この Rn 検出器が改良され、新しくなった。これを用いて、新しい ADC を用いた読み出しシステムを構築し、気密性を高めた新 Rn 検出器の試験を行う。また、XMASS 検出器に接続して常時モニター環境の構築を目指す。

# 目次

<b>第 1 章 Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 XMASS 実験	2
1.1.1 Dark Matter	2
1.1.2 XMASS 検出器	2
1.1.3 バックグラウンド	3
<b>第 2 章 Rn 検出器の仕組み</b>	<b>5</b>
2.1 現在のラドン検出器	5
2.2 新ラドン検出器	5
<b>第 3 章 測定・解析方法</b>	<b>6</b>
3.1 検出器の較正	6
3.2 神岡での Xe ラン	7
3.3 神岡でのバックグラウンド測定	7
3.4 神戸大での真空バックグラウンド測定	7
<b>第 4 章 結果</b>	<b>8</b>
4.1 較正定数	8
4.2 ADC スペクトル	9
4.2.1 真空バックグラウンド測定@神戸大	9
4.2.2 真空バックグラウンド測定@神岡	9
4.2.3 Xe ラン@神岡	10
4.3 Rn 濃度とバックグラウンド	11
<b>第 5 章 まとめと課題</b>	<b>13</b>
5.1 まとめ	13
5.2 課題	13

# 第1章 Introduction

## 1.1 XMASS 実験

神岡で行われている XMASS 実験は、液体 Xe シンチレーターを用いた多目的実験である。低エネルギー太陽ニュートリノ振動の研究、ニュートリノ質量の測定、そしてダークマターの直接探索を目指す。現在の研究目的はダークマターの直接探索なので、ここではダークマターの直接探索について説明する。

### 1.1.1 Dark Matter

宇宙のうち、我々が把握している物質は約4%のみであり、約23%がダークマター、残りはダークエネルギーであるとする観測結果が得られている\*1。ダークマターの特徴を以下に示す。

- Non Luminous  
電磁相互作用をしないため光らない。
- Non Baryonic  
Barionic なら銀河のダークハローを形成するには少なすぎるためである。
- 非相対論的  
もし相対論的であると考えたとニュートリノが候補に挙げられるが、観測された質量から考えるとこれもまた少なく、ダークマターになりえない。

これらの条件を満たす候補が Weakly Interacting Massive Particles(WIMPs) である。WIMPs の有力候補は標準理論を超えた超対称性理論で提案されている粒子であり、標準粒子と弾性散乱する。このとき落とすエネルギーの測定を目指すのが XMASS 検出器である。

### 1.1.2 XMASS 検出器

800kgXMASS 検出器を図 1.1 に示す。XMASS 実験では、液体 Xe シンチレーターを用いて直接蛍光を光電子増倍管 (PMT) により観測する。ターゲットに液体 Xe を用いる利点を以下に示す。

- 高発光量シンチレーター  
WIMP のような小さなエネルギーも数 keV で観測が可能になる。
- シンチレーション光が比較的長波長  
Xe シンチレーションの波長ピークは 178nm と長波長であるため PMT での直接検出が可能になる。
- 液体相が比較的高温  
2 気圧下で 170~180K と、他の気ガス (He,Ne) より高温で扱える。
- 高密度  
液体 Xe は密度が約  $2.96g/cm^3$  (161.5K) で高密度のため実験装置をコンパクトにできる。

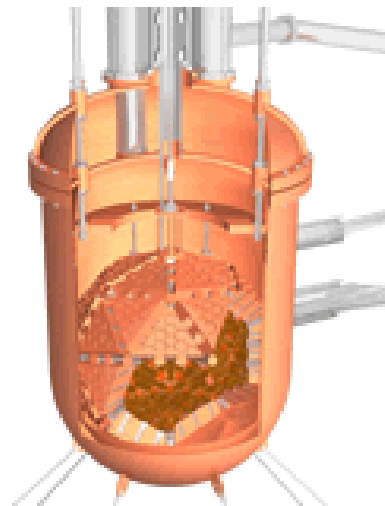


図 1.1: 800kgXMASS 検出器  
液体 Xe が 642 本の PMT に囲まれている。

\*1WMAP : <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

- 大きい原子番号  
Xeの原子番号が $Z=54$ と大きいため放射長が短く、Xe中に入った $\gamma$ 線は減衰する。この自己遮蔽能力によって低バックグラウンド環境を実現できる。
- 相変化が容易  
Xeは液体、気体相の状態で扱うことができるため循環が可能である。よって純化装置を組み込むことによってXeの純度を保ったまま実験ができる。
- 発光波形の多様性  
WIMPのシグナルと、 $\gamma$ 線などのシグナルを区別し、バックグラウンドを除去できる。

### 1.1.3 バックグラウンド

ダークマターのシグナルは数 keV から数十 keV といった低エネルギー側に立ち上がる特徴を持つので、低エネルギー閾値、低バックグラウンド環境が求められる。バックグラウンドの種類は、検出器外部とXe内部に大きく分けられる。

#### 検出器外部のバックグラウンド

XMASS 実験は WIMP 探索に求められる低バックグラウンド環境の構築のために、神岡鉱山の地下 1000m にある研究施設で進められている。地下施設で測定することによって、宇宙線や環境 $\gamma$ 線、環境中性子等の Rn 以外の環境バックグラウンドを大きく現象させることができる。Rn については、活性炭を用いて坑内の空気を純化し、地上程度の Rn 濃度の環境で測定を行える。

#### Xe 内部のバックグラウンド

Xe 中に含まれる放射性物質は自己遮蔽能力では防ぐことができない。したがって、この Xe 内部のバックグラウンドは WIMP 探索にとって大きな問題となる。Xe 内部の主なバックグラウンドは、U 系列と Th 系列、そして Kr が存在する。

- U 系列  
ウラン-238(238U) は、 $4.468 \times 10^9 y$  という長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 1.2 のように連続的に崩壊する。この崩壊系列を U 系列と呼ぶ。崩壊系列の中で  $^{222}\text{Rn}$  は希ガスなので Xe 中に湧き出す。 $^{210}\text{Pb}$  以降は寿命が長く、蓄積に時間がかかり、ビスマス-214( $^{214}\text{Bi}$ ) や (ポロニウム-214) $^{214}\text{Po}$  についてはタイミングを用いてバックグラウンド除去ができる。結局問題となるのは、鉛-214( $^{214}\text{Pb}$ ) である。
- Th 系列  
トリウム-232( $^{232}\text{Th}$ ) は  $1.405 \times 10^{10} y$  という長い半減期を持ち、安定な核種になるまで図 1.3 のように連続的に崩壊する。この崩壊系列を Th 系列と呼ぶ。
- Kr  
クリプトン-85( $^{85}\text{Kr}$ ) は 10.756y と比較的長い半減期を持つ。この同位体はもともと自然界には存在しないものであるが、近年の軽水炉でのウランの燃焼によって生成されるようになった。

Kr については事前に蒸留によって十分低減するため、800kg 検出器では特に U 系列・Th 系列の  $^{222}\text{Rn}$ ・ $^{220}\text{Rn}$  からの崩壊によるバックグラウンドが問題となる。例えば Xe ガス中の Rn 濃度として  $1.2\text{mBq}/\text{m}^3$  以下である必要がある。

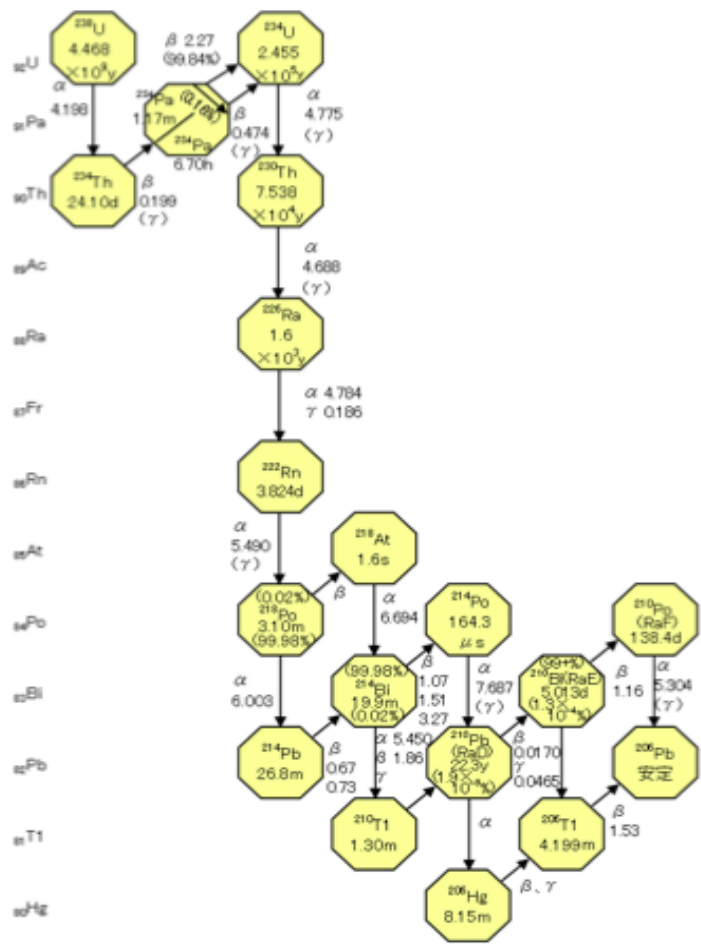


图 1.2: U 系列



图 1.3: Th 系列

## 第2章 Rn 検出器の仕組み

### 2.1 現在のラドン検出器

図 2.1 に現在の Rn 検出器を示す。70L の Rn 検出器は内部に電解研磨を施し、バックグラウンドをできるだけ低減している。検出部は PIN フォトダイオード (図 2.3)、セラミック製フィールドスルー、アンプモジュール、高電圧分割回路からなっている。Rn 濃度の検出は、帯電した  $^{222}\text{Rn}$  の娘核をフォトダイオード表面に静電場により捕集し、そこで  $\alpha$  線のエネルギーを測定することにより行う。Rn 自身の  $\alpha$  崩壊は、正に帯電しておらず捕集されない。

この Rn 検出器では真空引きの性能が悪く、XMASS 循環器中に不純物となる  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  などが混入してしまうので、気密性を高めた新 Rn 検出器を試作した。

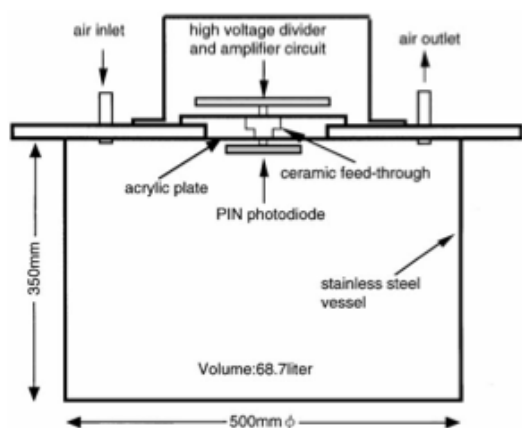


図 2.1: 現在の Rn 検出器

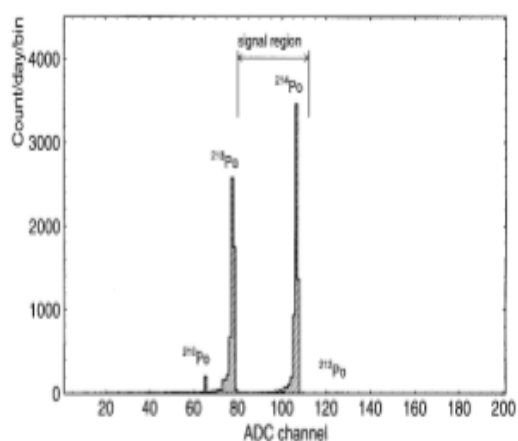


図 2.2: ADC スペクトル

Rn 崩壊イベントは図 2.2 のようなスペクトルになる。214Po が 218Po より多いのは Rn の崩壊系列で、より下流にあるためイオンになりやすく捉えられやすいためである。

### 2.2 新ラドン検出器

新しくなった検出器では高真空用のフランジを使用し、全てステンレス製になった (図 2.4)。これにより、真空度は  $10^{-5}\text{Pa}$  台まで下げることができた。静電捕集の原理は同じである。

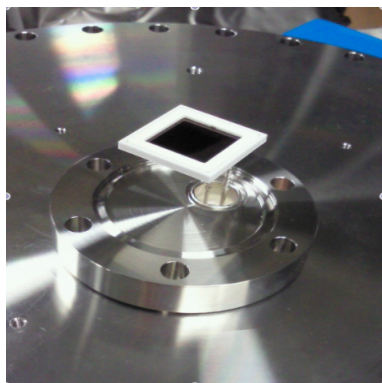


図 2.3: PIN フォトダイオード

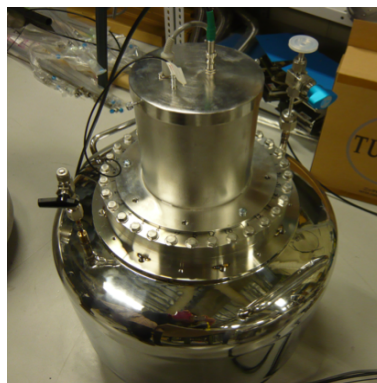


図 2.4: 新 Rn 検出器

## 第3章 測定・解析方法

### 3.1 検出器の較正

78.3Bq の Rn ソースを用いて、検出器の較正定数を求める。

2010年12月21日から真空引きを行い、27日には $4.0 \times 10^{-4} Pa$ を達成した。それから純アルゴン (Ar) と Rn ソースを 1.1 気圧程度封入し、28日から測定を開始した。このとき電圧を-2kV にしていたが作業中に放電したことがあったため、12月30日に-1kV に変更した。-1kV の測定は30日のうちに終わった。図3.1は Rn ソースを経由した較正ランのときの配管図である。そして、図3.2が実際に新 Rn 検出器を配管した様子である。

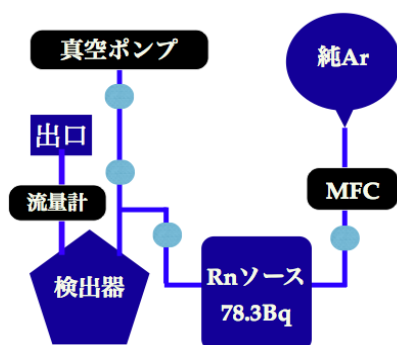


図 3.1: 較正ラン配管図  
純 Ar と Rn ソースを新 Rn 検出器に充填し、  
封じ込めて較正ランを行った配管図。  
MFC はマスフローコントローラである。

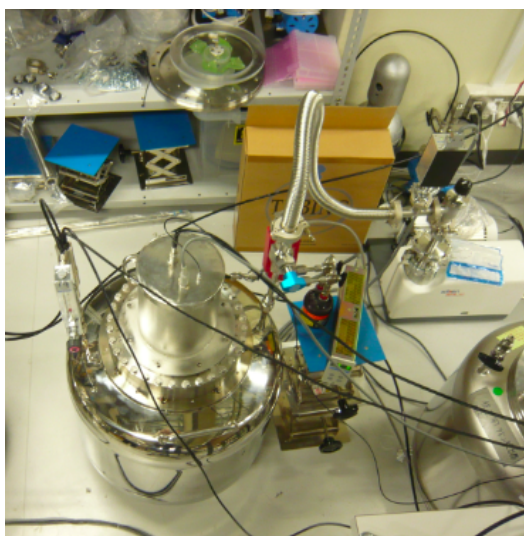


図 3.2: 較正ランの配管の様子@神戸  
右奥が真空ポンプ、中央あたりに Rn ソースと MFC があ  
り、左の新 Rn 検出器には流量計が取り付けられている。

較正定数は以下のようにより求めた。

$$\text{較正定数 [cpd/(mBq/m}^3\text{)]} = \frac{214Po \text{ の } \alpha \text{ 線の検出数 [count/day]}{Rn \text{ 濃度 [mBq/m}^3\text{]}}$$

較正実験は、既知濃度の Rn を Rn 検出器内に供給し、その Rn 検出器のカウント数を計数し、両者を比較することにより行う。



## 3.2 神岡での Xe ラン

2011年01月06日、実際に神岡に検出器を運んでセットアップした。このときの配管の様子が図3.3である。その日から真空引きを行い、翌日07日には $8.5 \times 10^{-5} Pa$ を達成した。その後Xeを0.02MPaGまで注入し、電圧は-1kVで測定を開始した。このランはそれから約1ヶ月間行った。

## 3.3 神岡でのバックグラウンド測定

Xeランを終了し、再び真空引きをした。そして真空バックグラウンドランに切り替えた。再び真空でバックグラウンドの測定を行うのは、神岡で使っているPIN-フォトダイオードに問題がないか、検出器本体に問題が無いか等の確認のためである。6日間真空ポンプをつなぎ、 $1.8 \times 10^{-5} Pa$ になったときバルブを閉じて真空ポンプを切り離した。その後、測定を続けている。

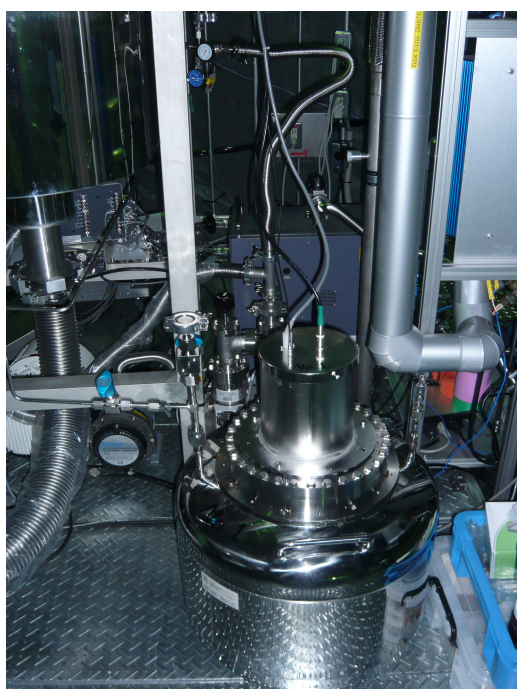


図 3.3: 神岡の配管の様子  
左上が冷凍機で、手前が新 Rn 検出器。

## 3.4 神戸大での真空バックグラウンド測定

2011年02月04日、神岡にあるものとは別の新 Rn 検出器で真空バックグラウンドランを開始した。この真空ランはPIN-フォトダイオードと検出器本体のバックグラウンドを測定する目的で行った。このときのADCスペクトルの解析は、それぞれの崩壊スペクトルがどの娘核の崩壊スペクトルに対応するか調べることによって、スペクトルの見えるADCのチャンネル比を既知の崩壊エネルギーの比と比較することにより判断することができる。

# 第4章 結果

## 4.1 較正定数

神戸大学で行った較正ランの測定結果は図 4.1 のようになった。

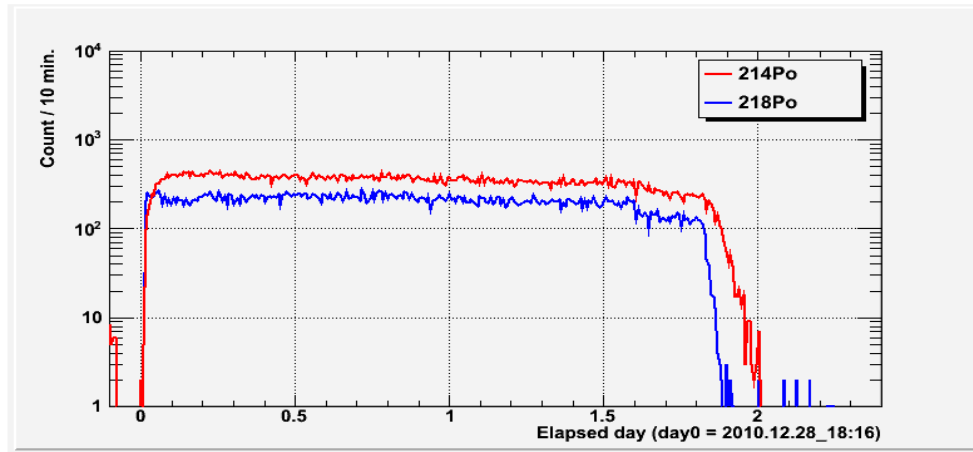


図 4.1: 較正ラン

赤が 214Po、青が 218Po の、Rn ソースと Ar を封じ込めて行った較正ランの結果である。横軸が経過時間 [day] で、縦軸は 10 分あたりのカウント数 [count/10min] となっている。

218Po は崩壊系列のより上流にあるので反応が早い。

図 4.1 から求めた較正定数を表 4.1 にまとめる。214Po と 218Po に対してそれぞれ-1kV,-2kV の 2通りで求めた。

Rn 娘核	電圧	較正定数 [ $cpd/(mBq/m^3)$ ]
214Po	-2kV	$1.89 \pm 0.01$
	-1kV	$1.22 \pm 0.01$
218Po	-2kV	$0.94 \pm 0.01$
	-1kV	$0.66 \pm 0.01$

表 4.1: 較正定数

較正定数は現在使用している検出器と似た値となっており、-1kV に比べて検出効率が良い。

## 4.2 ADC スペクトル

### 4.2.1 真空バックグラウンド測定@神戸大

神戸大学で行った真空バックグラウンドランのプロットを図 4.2 の青で示す。赤のスペクトルは空気中の Rn を測定したもので、それぞれ 214Po と 218Po のものである。しかし赤のスペクトルの ADC チャンネルに重なる青のスペクトルは見当たらない。検出器からのバックグラウンドはほとんど無いと考えられる。

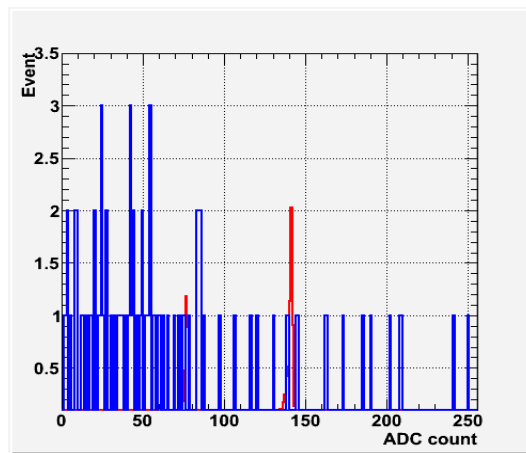


図 4.2: 真空 BG ラン@神戸

赤のスペクトルは空気中の Rn を測定したもので 1 日弱のものを補正してある。140ADC カウント付近が 214Po のピークで、75ADC カウント付近が 218Po のピークである。青は神戸大での真空中のラドンを測定したもので 18 日分のデータとなっている。

### 4.2.2 真空バックグラウンド測定@神岡

一方、神岡で真空バックグラウンドランを行ったところ、図 4.3 のようになりこれも有意な Rn シグナルは見られなかった。ほとんどが電気ノイズと考えられる。

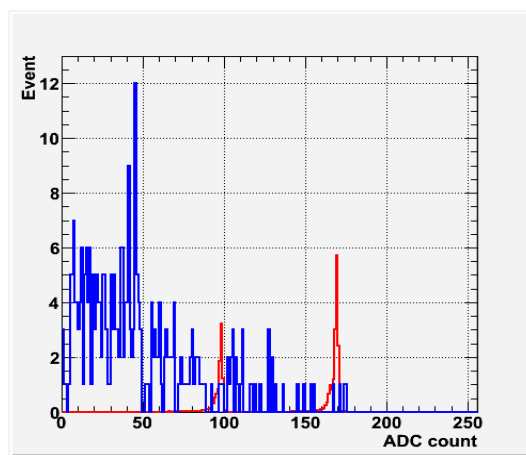


図 4.3: 真空ポンプ無し真空 BG ラン

8 日分の神岡での真空 BG ラン (青) と 1 日分の真空中の Rn を測定したもの (赤は図 4.4 と同一)。

### 4.2.3 Xe ラン@神岡

しかし、神岡にて行った Xe ランのイベントをプロットし、 $^{214}\text{Po}$  と  $^{218}\text{Po}$  のスペクトルを重ねたところ図 4.4 が得られた。U 系列は少ない様子であるが、Th 系列の Rn が多いように見える。例えば、ADC カウント 100 付近のスペクトルは  $^{218}\text{Po}$  のものだけでなく、Th 系列の  $^{212}\text{Bi}$  が重なっているために特出している。崩壊エネルギーが  $6.00\text{MeV}$  と  $6.05\text{MeV}$  と非常に近いためである。ch215 付近のスペクトルも Th 系列の  $^{212}\text{Po}$  によると考えられる。

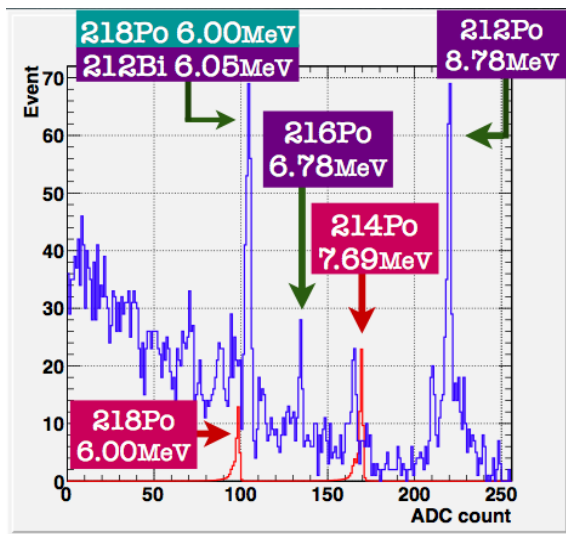


図 4.4: Xe ラン@神岡

データは 01 月 07 日～02 月 16 日までの 41 日分のものである。

青は神岡の Xe ランで、赤は神戸大での 3 日分の較正ランを補正したものである。

したがって PIN-フォトダイオードや検出器内部に原因があるのではなく、Xe サンプルガス中に Th 系列の Rn が存在している可能性がある。これについては今後、原因を追求する予定である。ノイズを考慮して、 $^{214}\text{Po}$  のシグナルとみなす ADC カウントを 160~175 に設定し、Rn 濃度の時間変化の解析を行う。

### 4.3 Rn 濃度とバックグラウンド

較正ランにおいて、Rn 濃度の立ち上がりを、 $p_0, p_1, p_2$  を変数として式 (4.1) でフィットする。

$$p_0(1 - e^{-p_1x})(1 - e^{-p_2x})2^{-\frac{x}{3.824}} \quad (4.1)$$

ここで、 $x$  は経過時間 [day] である。これは、 $^{222}\text{Rn}$  後の速い崩壊成分と遅い崩壊成分、そして Rn の崩壊をそれぞれ仮定した関数である。例えば  $^{218}\text{Po}$  は寿命約 3 分、 $^{214}\text{Pb}$  は寿命約 27 分と差が大きい。

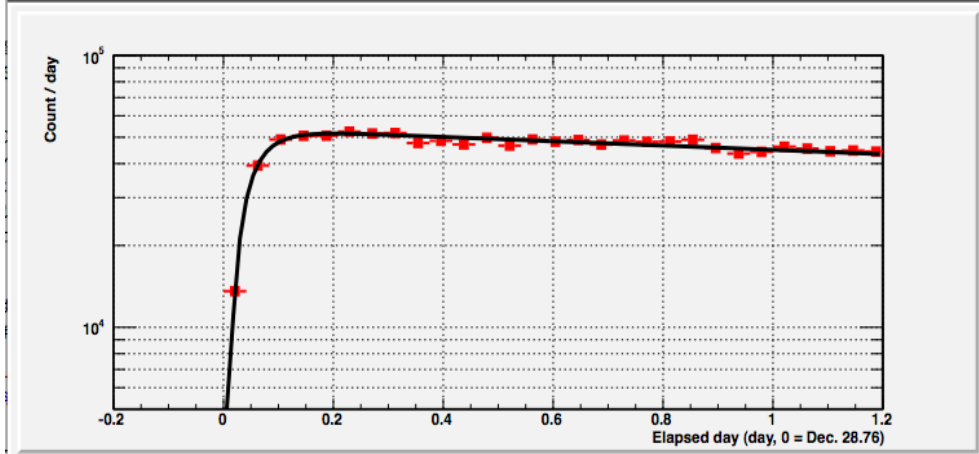


図 4.5: 較正実験のフィット

較正ランにおいて、Rn が崩壊する際の  $^{214}\text{Po}$  のシグナルをフィットした結果である。

図 4.1 の縦軸を [count/day] に補正し、シグナルの最初の立ち上がりに注目した。

このとき、 $p_0=54077$ ,  $p_1=51.0$ ,  $p_2=23.8$  となった。この較正実験は、Rn 濃度  $38.9\text{mBq}/\text{m}^3$ 、電圧-2kV で行ったので、較正定数を用いて、関数を  $1\text{mBq}/\text{m}^3$ 、-1kV あたりに補正すると以下ようになる。 $x$  は式 (4.1) と同様に経過時間 [day] である。

$$F_{Rn}(x) = 0.90(1 - e^{-51.0x})(1 - e^{-23.8x})2^{-\frac{x}{3.824}} \quad (4.2)$$

また、Rn 放出を仮定した関数は以下のとおり。ここで、 $\lambda=0.18$ [/day] は Rn の寿命である。

$$F_{BG} = 1 - e^{-0.18x} \quad (4.3)$$

この、Xe 中に Rn が含まれていると仮定した関数と、検出器内部からの Rn 放出を仮定した関数をあわせて以下の関数を使う。式 (4.4) を用いて Xe ランをフィットしたのが図 4.6 である。

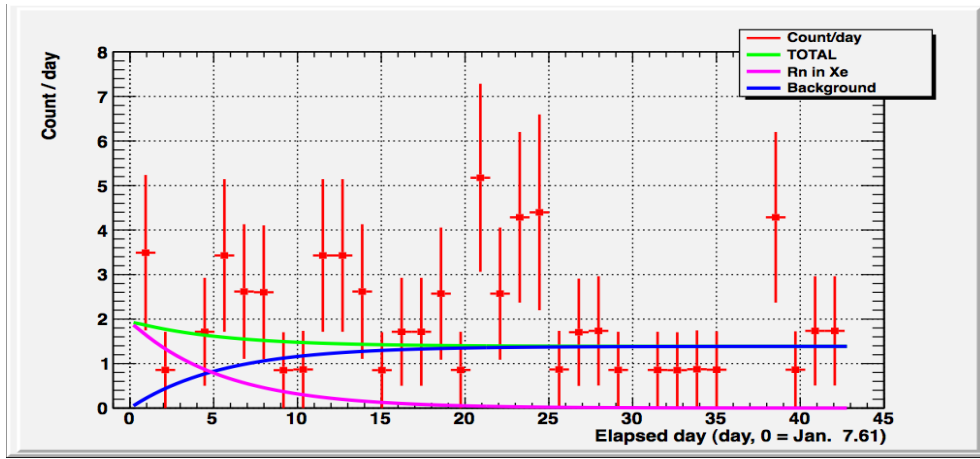


図 4.6: Xe ラン@神岡

横軸は経過時間 (day) で、縦軸は Count/day、41 日間の Xe ランの結果である。

青線は式 (4.4) の 1 項目、ピンク線は、式 (4.4) の 2 項目、緑線は青とピンクの関数をあわせてデータをフィットした関数となっている。

$$F(x) = N_{Rn} \cdot F_{Rn}(x) + N_{BG} \cdot F_{BG}(x) \quad (4.4)$$

この結果、Rn 濃度は  $N_{Rn} = 2.1 \pm 1.1 mBq/m^3$ 、バックグラウンドは  $N_{BG} = 1.4 \pm 0.2 count/day$  と求めた。ノイズが含まれている可能性があるので 90%(C.L.) で Rn 濃度の上限を求めると、 $3.5 mBq/m^3$  となる。

## 第5章 まとめと課題

### 5.1 まとめ

新 Rn 検出器を用いた Xe 中 Rn 測定システムの構築を行った。真空度は  $10^{-5} Pa$  台まで達し、現在の Rn 検出器より気密性を高めることができた。

また、XMASS 循環器中の Rn 濃度の上限として、 $3.5 mBq/m^3$  (90% C.L.) が得られた。目標感度の  $1.2 mBq/m^3$  には到達していないが、近い精度で上限が求められた。しかし、ADC スペクトルを見ることによってノイズがかなり多いことがわかった。Th 系列のシグナルが見られたが、今後原因を追求する必要がある。

### 5.2 課題

ADC スペクトルでノイズが多いことがわかったので、波形の違いでノイズを除去できればより精度良く Rn 濃度が測定できる。そして、最終的には連続測定システムを構築することが目標である。

## 関連図書

- [1] Y. Takeuchi, K.Okumura, T.Kajita, S.Tasaka, H. Hori, M.Nemoto, H. Ogawa : Phys. Riv. A421(1999)334
- [2] Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) : <http://wmap.gsfc.nasa.gov>
- [3] 穂坂 純也 : 東京大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文 (2005)
- [4] 中島 勇波 : 東京大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文 (2009)
- [5] 根本 真知子 : 東海大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文 (1998)
- [6] 満田 史織 : 新潟大学理学部物理学科卒業論文 (1999)



# 謝辞

本研究を行うにあたって、大変多くの方々からご指導、ご協力をいただき感謝の意を表します。

指導教官である竹内さんには、本研究に携わる機会を与えていただきました。何もわからない状態からのスタートでしたが、基本的な知識から高度な技術に到るまで優しくご指導いただき、大変お世話になりました。4年生の私たちに神岡への出張を許していただけたことは、かなり貴重な経験となり学習意欲を刺激されました。本当にありがとうございました。

神岡宇宙線研究所では山下さんにご支援いただきました。実際に私が出張に行く代わりに神岡で作業していただいたり、様々な情報をいただきました。大変お世話になりました。

その他、神岡施設ではたくさんの方々の実験や生活面においてもお世話になりました。ありがとうございました。

最後に、陰ながら研究生生活を支えてくれた家族に感謝いたします。

平成 23 年 3 月