

# 修 士 学 位 論 文

## XMASS 実験における 液体キセノン中ラドンバックグラウンドの研究

2016 年 2 月 19 日

専攻名 物理学専攻  
学籍番号 144s121s  
氏名 藤田 黎

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

# 概要

観測技術の向上が進み、宇宙のエネルギー組成比がわかってきた。その結果、我々の知っている物質は全宇宙の 4% しかないことがわかっている。理解出来きていないもののうち約 23% は暗黒物質と呼ばれる未知の素粒子である。暗黒物質は 1930 年代に提唱された物質で現在に至るまで未だに直接観測されていない。そのため現在では世界中で暗黒物質探索のための実験が行われている。

XMASS 実験は岐阜県神岡鉱山の地下約 1000 m で行われている暗黒物質直接探索実験である。高純度の液体キセノン約 1 トンをシンチレータとして用いて暗黒物質とキセノン原子核の弾性散乱を観測することにより暗黒物質を直接検出しようと試みている。暗黒物質と原子核の散乱で検出器に落とされるエネルギーは極めて小さく、そしてその事象頻度は少ない。そのため暗黒物質直接探索実験ではバックグラウンドを極力少なくし、エネルギー閾値を小さくして実験することが重要になる。このことから XMASS では地下約 1000 m に検出器を設置し、そのまわりに水タンクを設置しキセノンの自己遮蔽能力によってバックグラウンドを少なくしている。

現在神岡地下では宇宙線が少ないという環境をいかして、様々な稀事象探索が行われている。これらの実験グループが連携し、極低バックグラウンド技術を共有していくことで効率的に発展していくことができると考えられる。そこで検出器の素材の放射能の情報をデータベース化することで、情報を共有し発信していくことが求められる。このことから、本研究では神岡地下実験用の放射能データベースを作成した。

また XMASS 実験のバックグラウンドについて研究を行った。本論文では XMASS のバックグラウンドのうち液体キセノン中に存在するラドンに注目する。ラドンは希ガスで液体キセノン中に一様に溶け込んでいるため有効体積内にも存在し非常に重要である。また内部較正と相補的に較正するためのサンプルとしても利用できる。私はラドンの娘核の連続崩壊を選別することで液体キセノン中ラドン濃度を見積もり、暗黒物質探索に与える影響を評価した。またラドンレートの時間的な安定性について、暗黒物質の季節変動解析に与える影響についても評価した。

# 目次

第1章 序章	1
1.1 暗黒物質の観測的証拠	1
1.2 暗黒物質の候補	6
1.2.1 MACHO	6
1.2.2 ニュートリノ	6
1.2.3 WIMP	7
1.2.4 その他の候補	9
1.3 暗黒物質探索実験	9
1.3.1 暗黒物質と原子核との相互作用	10
1.3.2 直接探索実験	12
1.3.3 間接探索実験	13
1.3.4 加速器探索実験	15
1.3.5 暗黒物質探索実験の現状	15
第2章 XMASS 実験	17
2.1 液体キセノン	17
2.2 検出器	19
2.3 検出器校正装置	22
2.4 シミュレーション	23
第3章 XMASS 実験におけるバックグラウンド	24
3.1 外部バックグラウンド	24
3.2 検出器外からのバックグラウンド	24
3.3 検出器由来のバックグラウンド	25
3.4 内部バックグラウンド	25
第4章 放射能データベース	30
4.1 データベースシステム	30
4.2 フォーマット	32
4.2.1 sample	33
4.2.2 Measurement	33
4.2.3 Data source	35
4.2.4 データベースツールの改善	36
4.2.5 本学のテストサーバー (lowbgdb) での試験	36
第5章 液体キセノン中のラドン濃度の測定	41
5.1 目的	41
5.2 ラドン娘核種の弁別	41
5.2.1 アクシデンタル事象の評価	47
5.3 ラドン濃度の見積もり	50
5.3.1 暗黒物質探索におけるラドンバックグラウンドの影響の評価	53

5.3.2 時間的安全性の評価 . . . . .	54
第 6 章 まとめ	58

## 第 1 章 序章

暗黒物質は様々な宇宙の観測により存在が予言されている。1933 年 Fritz Zwicky は見えない質量 (暗黒物質) の存在を予測した。それから約 80 年後の現在に至るまで暗黒物質は直接観測されていない。

XMASS 実験は岐阜県神岡で行われている暗黒物質直接探索実験である。XMASS は高純度の液体キセノンを約 1 トン用いて、世界最高感度での暗黒物質の発見を目指している。暗黒物質と物質の相互作用は弱いと考えられているので、事象頻度はとても少なく検出器に落とされるエネルギーは極めて小さいと考えられている。そのため低バックグラウンド (BG)、低閾値の実験を行うことが求められる。

### 1.1 暗黒物質の観測的証拠

暗黒物質の証拠としてあげられるものを以下に紹介する。

#### ビッグバン元素合成 (Big Bang Nucleosynthesis:BBN)

ビッグバン元素合成とは高温の宇宙が冷えていく過程で現在の元素が合成されたというモデルである。宇宙の温度が高温のときは弱い相互作用の平衡状態にあり、中性子と陽子の数が 1:1 になっている。その後、温度が下がり 1MeV 程度になると、熱平衡が崩れ始める。熱平衡から切り離されると陽子と中性子が入れ替わることはなくなり、この時点での中性子、陽子比は 1:6 となる。さらに宇宙の温度が下がり 100keV 程度になると陽子と中性子が融合し重陽子が生成される。



温度が高い時も式 (1.1) のような反応は起こるが、生成された重陽子は光子によって分解されてしまうため、温度が重陽子の結合エネルギーである 2.23MeV より下がらないと核融合反応が進まない。重陽子が生成されるとさらに重い原子核が生成され始めるが、質量数が  $A=5, A=8$  である安定な同位体は存在しないため、生成されるのは主に  ${}^4\text{He}$  である。さらに宇宙が膨張し温度が下がると核融合反応が起こらなくなり、その時点での元素比は固定される。ビッグバン元素合成の結果  ${}^4\text{He}$  は質量比にして約 25%、陽子 : 約 75%、その他の元素 : 微量となる。この元素比は光子バリオン比に依存する。各元素比を光子バリオン比を変化させてプロットしたものが図 1.1 である。BBN から得られた光子バリオン比は宇宙背景マイクロ波放射 (後述) から得られた値と一致し、バリオン密度  $\Omega_b h^2$  は  $0.019 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024$  (95% C.L.) となった [1]。このバリオン密度は全ての物質密度  $\Omega_m \sim 0.25$  [1] に対して少ないことから、非バリオンの存在が示唆される。

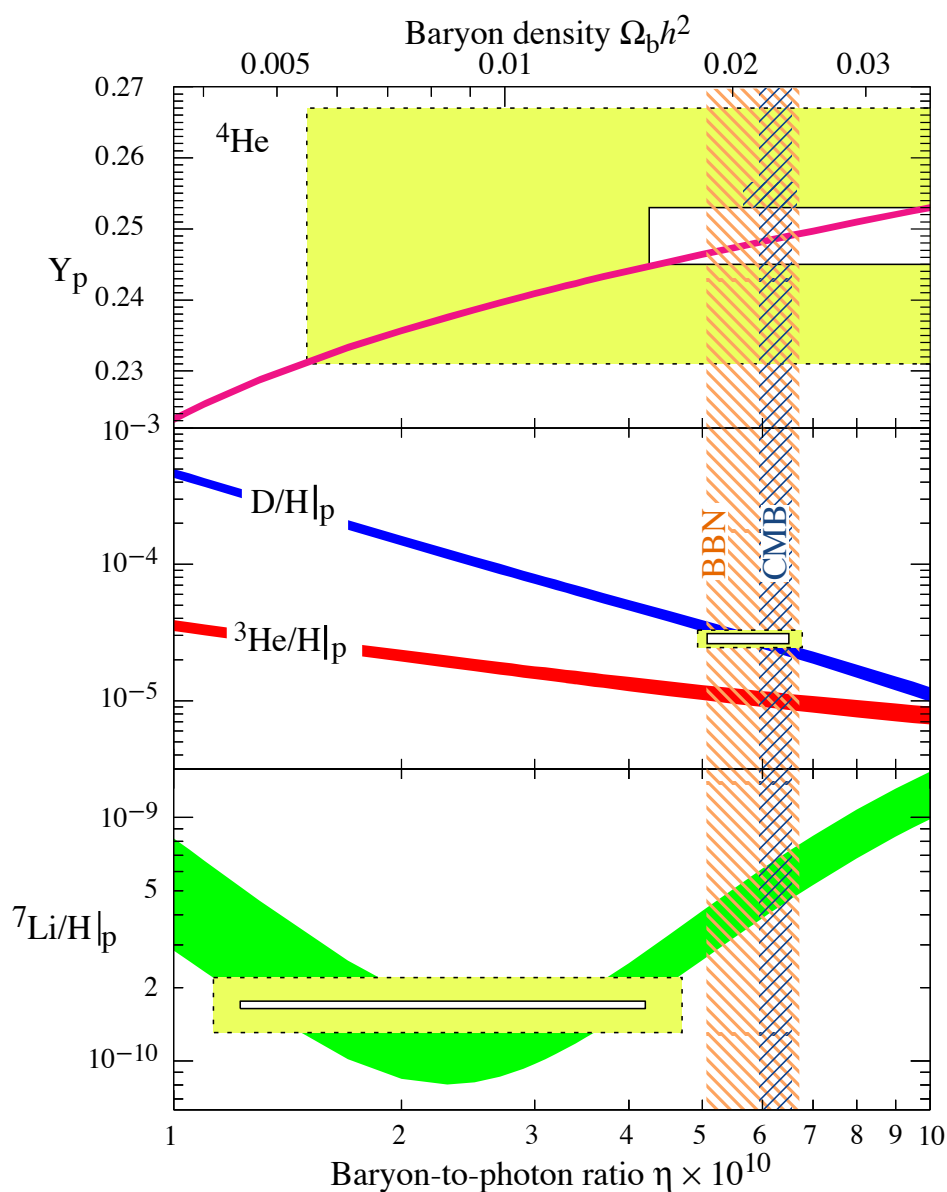


図 1.1 光子バリオン比を変化させたときの  ${}^4\text{He}$ ,  $\text{D}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$  の組成比 [1]。四角い枠で囲まれた領域が観測で得られた軽元素比を示す (小さい四角枠:  $1\sigma$ , 大きい四角枠:  $2\sigma$ )。狭いバンドは CMB の測定から得られた光子バリオン比、広いバンドは BBN から決定した領域 (95% C.L.)。

### 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とは全天球上でほぼ等方的に観測される電磁波である。CMB はビッグバンの 38 万年後宇宙が冷えて電氣的に中性になり光が直進できるようになったとき (宇宙の晴れ上がり) の電磁波の波長が引き伸ばされ現在約 3K のマイクロ波として存在しているものである。CMB にはわずかながら非一様性があることを 1992 年 NASA の COBE 衛星が発見した [2]。図 1.2 は Planck 宇宙探査機によって測定された温度揺らぎの全天マップである。この非一様性は宇宙の晴れ上がり時の密度揺らぎによるもので天球上のどの角度スケールでどれくらい大きい揺らぎがあるかを研究することでハッブル定数、密度パラメータ、宇宙定数がわかる。COBE 衛星の後 2003 年に Wilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) がより精密に CMB の温度揺らぎを測定した [3]。現在もっとも新しい観測結果は Planck 宇宙探査機によるものである。図 1.3 は Planck のデータから得られた密度揺らぎのパワースペクトルである。この結果から暗黒物質を含む全ての物質密度が  $\Omega_m h^2 = 0.1415 \pm 0.0019$ , バリオンの物質密度が  $\Omega_b h^2 = 0.02226 \pm 0.00023$  とわかっている [5]。この値はビッグバン元素合成から得られた値と一致し、この 2 つの密度パラメータの差から非バリオンの物質の存在が示唆される。

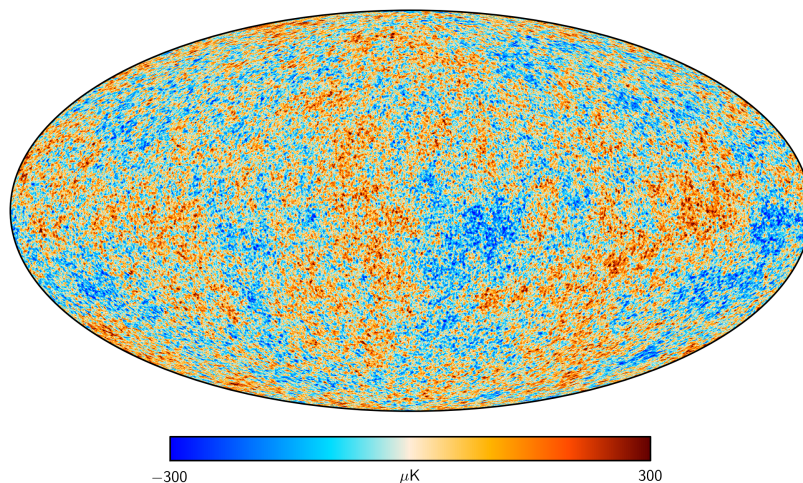


図 1.2 Planck 宇宙探査機によって観測された CMB の温度揺らぎの全天マップ [4]

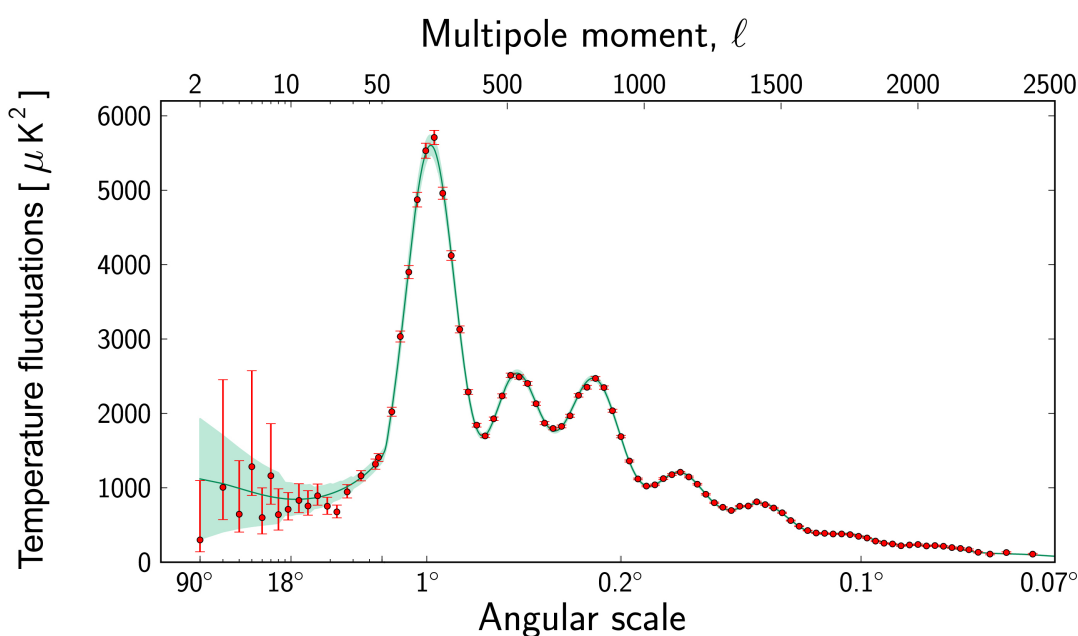


図 1.3 Planck 宇宙探査機によって観測された密度揺らぎ [4]

### 宇宙の大規模構造の形成

バリオンと輻射だけで成り立っている宇宙では、宇宙の晴れ上がりまでは光子とバリオンが相互作用するため、密度揺らぎは成長できない。ここでは密度揺らぎを  $\delta \equiv (\bar{\rho} - \rho) / \bar{\rho}$  ( $\bar{\rho}$ : 平均の密度) のように定義する。宇宙の晴れ上がり後、密度揺らぎは宇宙のスケールに比例して発達していく。つまり晴れ上がり時の密度揺らぎ  $\delta(t_{dec})$  は現在の密度揺らぎ  $\delta(t_0)$  と晴れ上がり時のスケール因子  $a(t_{dec}) \sim 10^{-3}$  を用いて、

$$\delta(t_{dec}) \sim a(t_{dec})\delta(t_0) \sim 10^{-3}\delta(t_0) \quad (1.2)$$

となる。現在の銀河分布など小さいスケールでの密度揺らぎ  $\delta(t_0)$  は 1 以上であることが判明しているため、式 1.2 から晴れ上がり時の密度揺らぎは  $10^{-3}$  以上でなければならないが、CMB の観測から得られた晴れ上がり時の密度揺らぎは  $10^{-4}$  以下であった。光子やバリオンと結合しない暗黒物質を仮定することでこの問題は解決できるため非バリオンである暗黒物質の存在が示唆される。

### 銀河の回転曲線

ケプラーの法則から、銀河の中心から距離  $r$  離れた場所で回転する物体は回転速度  $v_{cir}(r)$  と  $r$  より内側の銀河の質量  $M(r)$ 、万有引力定数  $G$  を用いて表すと、

$$\frac{v_{cir}(r)^2}{r} = G \frac{M(r)}{r^2} \quad (1.3)$$

となる。図 1.4 に示すように渦巻銀河は中心部 (バルジ) に質量が集中しており、銀河の中心から離れたディスクでは質量  $M(r)$  が一定とみなせるので回転速度  $v_{cir}(r)$  は  $r^{1/2}$  に比例するはずである。しかし観測では半径  $r$  が大きいところでも速度は減衰せず一定であった。これは  $r$  の大きいところで  $M(r)$  が  $r$  に比例していることを示している。

図 1.5 は渦巻銀河 NGC6503 の回転速度の計算値と観測値である。黒点は観測から得られた値、実線はその値をフィットしたものである。大点線、小点線はそれぞれディスク、ガスの寄与で一点鎖線はハロー暗黒物質の寄与である。輝く物質の多くはバルジに集中しているため、半径が大きくなるにつれ減衰していくはずであるが、観測値は一定の値を示している。これは銀河の回転曲線問題と呼ばれており、光学的に観測できないハロー暗黒物質の存在を示唆している。

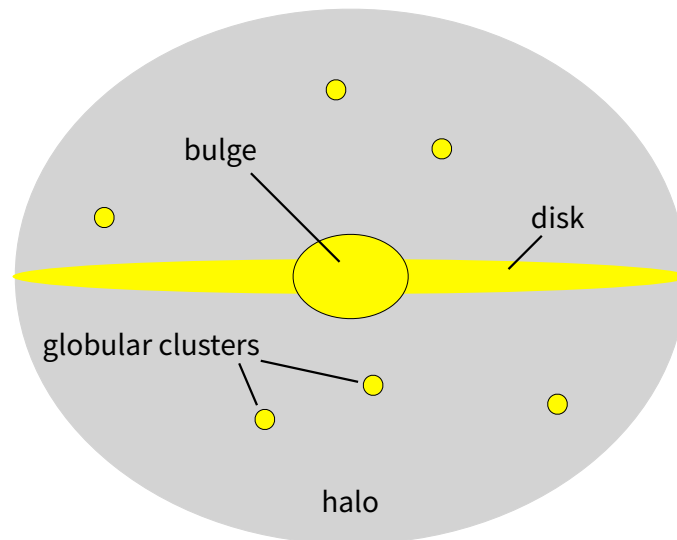


図 1.4 渦巻銀河の断面の概念図

### 重力レンズ

重力レンズ効果とは、一般相対性理論で予言される大質量物質の近傍を光が通過するとき光の経路が曲げられる現象のことをいう。図 1.6 は重力レンズ効果を受けて重力源の背後にある銀河が変形している様子である。このように弓状に変形したものや複数の像、リング状に見えるものは強い重力レンズの効果によるものである。重力レンズ効果では、光らない物質の質量分布を求めることができるため非常に重要な観測である。

### 弾丸銀河

2006 年アリゾナ大学の Doug Clowe が率いる研究チームは、X 線天文衛星チャンドラの観測によって銀河団同士が衝突するところを捉えた。図 1.7 は観測された銀河団 1E 0657-56 でピンクで示されているのはチャンドラで測定された高温のガスの分布で高温ガスが弾丸のように大きい銀河団の中を通り抜けている様子がわかる。一方、青い部分は重力レンズ効果によって観測された 1E 0657-56 の質量分布でガスの分布と異なる場所に分布している。ダークマターを仮定しない場合、銀河団の質量の多くが高温ガスだと考えないといけなくなるため、この結果と矛盾する。つまり青い領域に存在するのは暗黒物質だということになる。さらにこの結



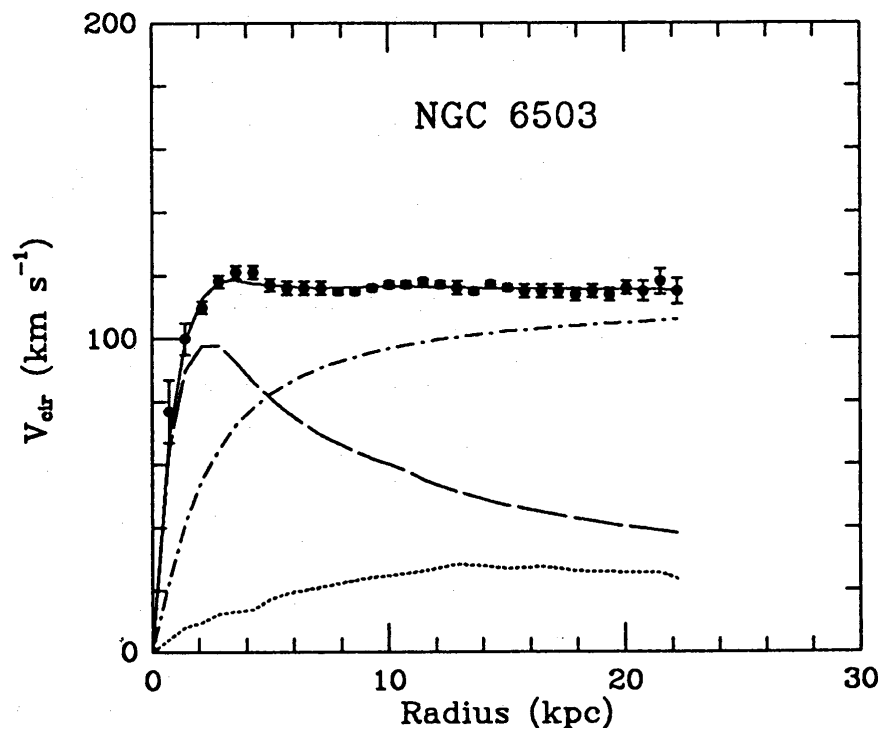


図 1.5 渦巻銀河 NGC6503 の回転曲線。黒点は観測から得られた値、実線はその値をフィットしたものである。大点線、小点線はそれぞれディスク、ガスの寄与で一点鎖線はハロー暗黒物質の寄与である。フィッティングのフリーパラメータは質量光度比、ハローのコア半径、ハローの回転速度である。[6]

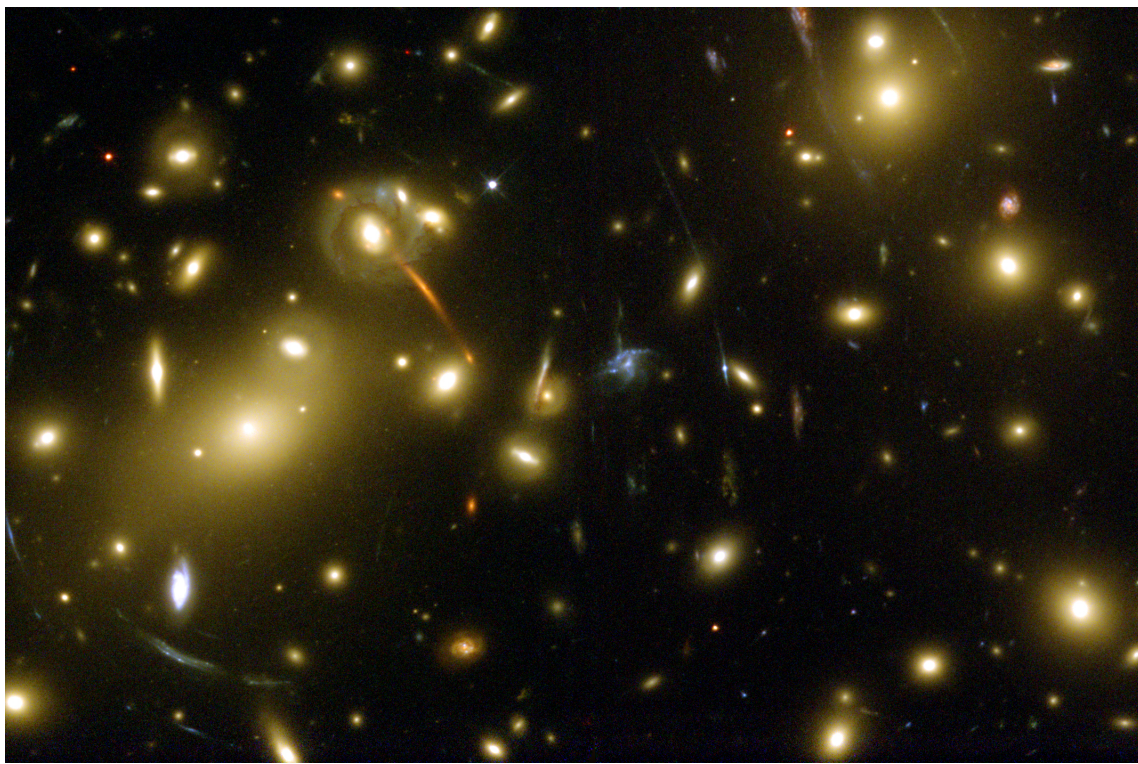


図 1.6 銀河団 Abell2218[8]

果では、暗黒物質と暗黒物質や暗黒物質と他の物質の相互作用せずすり抜けて見えるため、バリオンではない未知の素粒子としての暗黒物質の有力な証拠となる。

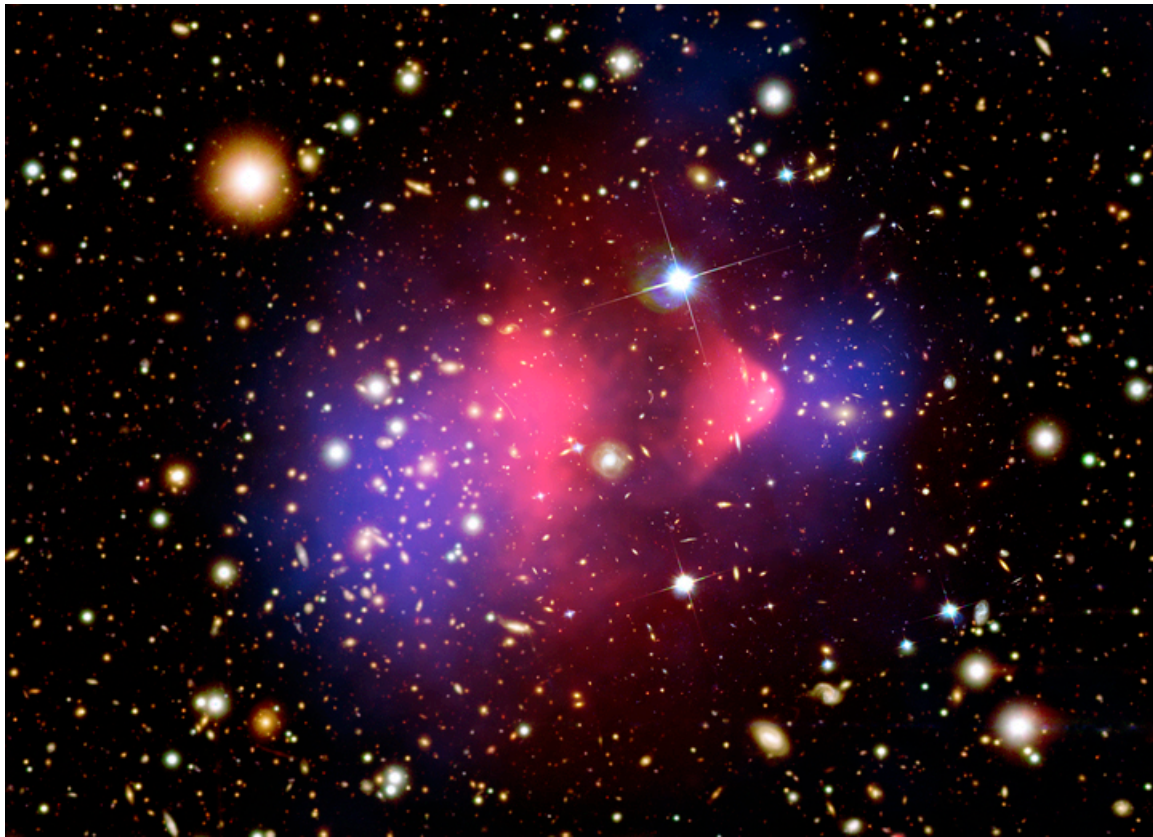


図 1.7 銀河団 1E 0657-56[7]

## 1.2 暗黒物質の候補

暗黒物質の候補はバリオンと非バリオンに大別される。バリオンとは我々の身の回りの通常物質のことで、非バリオンとはニュートリノなどのバリオン以外の物質のことをいう。さらに暗黒物質はその運動によって分類され、cold dark matter(CDM) , hot dark matter(HDM) に分けられる。CDM は非相対論的な運動をする粒子で、HDM は相対論的に振る舞う粒子である。現在もっとも有力な暗黒物質の候補とされているのは Weakly Interacting Massive Particle(WIMP) と呼ばれる種類の未知の素粒子であるが、以下に現在否定された候補も含めて暗黒物質の候補について解説する。

### 1.2.1 MACHO

MACHO(Massive Compact Halo Objects) は矮星、中性子星、ブラックホールなどの重い小さくて暗いために光学的に観測することが難しい天体のことである。これらはバリオンであるが CDM の有力な候補として考えられていた。光源が MACHO と地球を結ぶ一直線上に存在する場合、重力レンズ効果により明るくなることを利用し MACHO の存在を示す事ができる。MACHO グループ [9]、EROS グループ [10] などが観測した結果、銀河の暗黒物質の量を説明出来るだけの MACHO は発見できず、MACHO が暗黒物質の主成分にはなり得ないということがわかった。

### 1.2.2 ニュートリノ

ニュートリノは HDM の候補である。ニュートリノは Super-Kamiokande などによるニュートリノ振動の発見から微小であるが質量を持つことがわかっている [11]。しかし相対論的な運動をしていることや質量が非常に小さいことから宇宙の大規模構造を説明できないため現在主要な暗黒物質の候補ではない。

### 1.2.3 WIMP

WIMP とは Weakly Interacting Massive Particle の略で、弱く相互作用し大きな質量を持つ素粒子のことを指す。観測的事実から暗黒物質になり得る条件を満たすために考えられたもので、現在標準理論の枠組みの中でこれを満たすような粒子を存在しないため標準理論を超えた枠組みの素粒子が WIMP として考えられている。その中で最も有力な候補としてあげられるものが超対称性理論によって予言される粒子である。以下に超対称性理論について説明していく。

#### 超対称性理論 (SUper SYmmetry:SUSY)

超対称性理論は主に標準理論における階層性問題を解決するために導入された理論である [12]。標準理論では重力以外の 3 つの力の結合定数がエネルギーがスケールが大きい領域でも一致しない (図 1.8 上図)。SUSY が 100GeV ~ 10TeV のスケールで破れが生じる場合 3 つの力の結合定数は  $\sim 10^{16}$ TeV のエネルギーにおいて一点で交わる (図 1.8 下図)。SUSY は標準理論の粒子のスピンを 1/2 だけ変化させた超対称性パートナーが存在すると仮定し、ボソンとフェルミオンの入れ替えに対する対称性を導入した理論である。SUSY は標準理論に R パリティという新しい対称性を導入する。R パリティは

$$R = (-1)^{3B+L+2S} \quad (1.4)$$

のように定義される (ここで B はバリオン数、L はレプトン数、S はスピンである)。SUSY 粒子の R パリティは奇で標準理論の R パリティは偶である。R パリティ保存のために重い SUSY はより軽い粒子には崩壊するが標準理論の粒子には崩壊できない。そのため最も軽い SUSY 粒子 (Lightest SUSY particle:LSP) が暗黒物質の候補となり得る。超対称性理論は多数存在するが、標準理論の最小限の拡張である Minimal Supersymmetry extension of standard model(MSSM) で説明する。MSSM における標準理論の素粒子とその素粒子の超対称性パートナーを表 1.1 に示す。MSSM においてニュートラリーノは光子、Z ボソン、中性ヒッグスボソンの超対称性パートナーの混合状態である。このニュートラリーノの中で最も軽いものが暗黒物質候補になり得る。

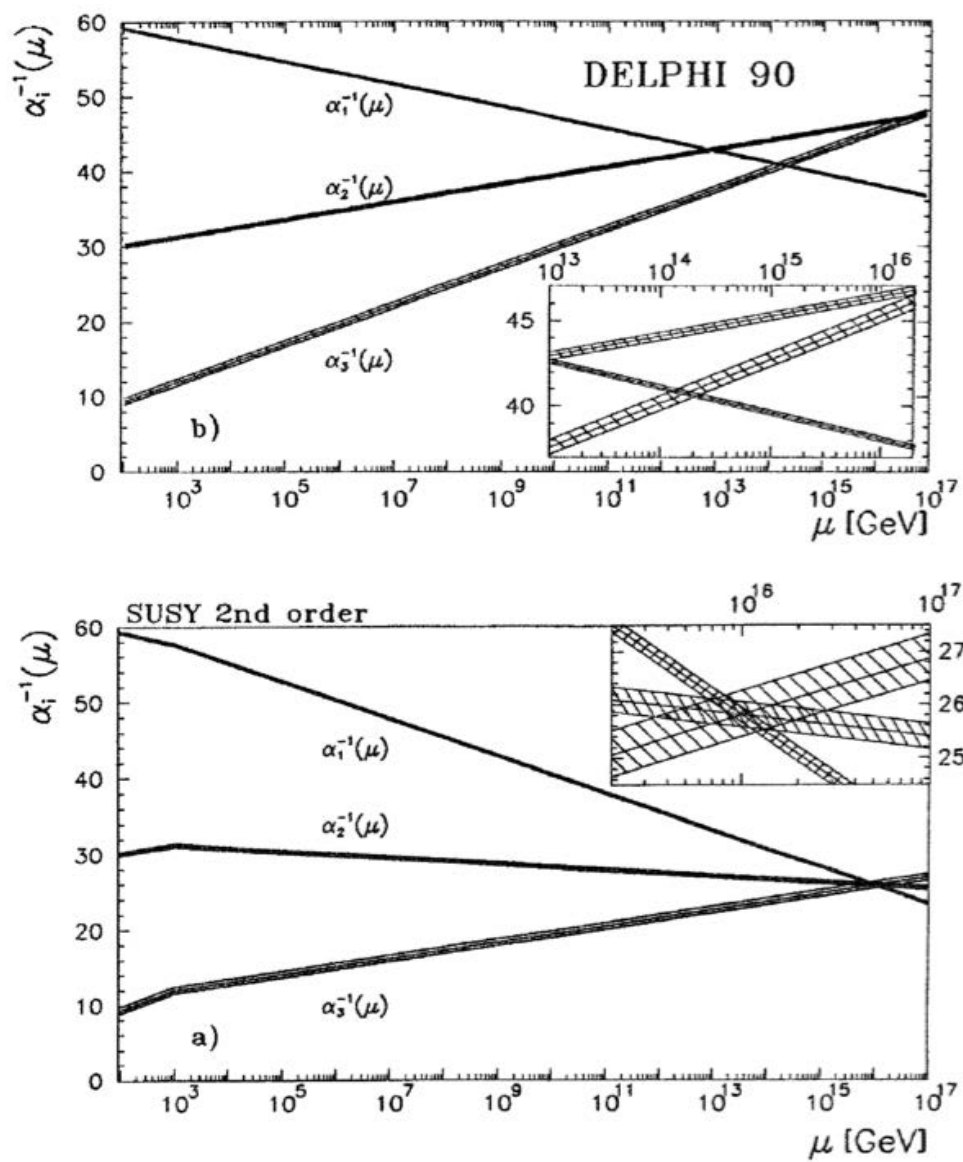


図 1.8 標準理論と MSSM における 3 つの力の結合定数の関係 [13]。横軸：エネルギースケール、縦軸：結合の強さ。 $\alpha_1^{-1}(\mu)$  は電磁気力、 $\alpha_2^{-1}(\mu)$  は弱い力、 $\alpha_3^{-1}(\mu)$  は強い力

表 1.1 MSSM における素粒子

通常の粒子			超対称性パートナー		
記号	名前	スピン	記号	名前	スピン
$q = u, c, t$	up quarks	1/2	$\tilde{q}_u^1 \cdots \tilde{q}_u^6$	up squarks	0
$q = d, s, b$	down quarks	1/2	$\tilde{q}_d^1 \cdots \tilde{q}_d^6$	down squarks	0
$l = e, \mu, \tau$	leptons	1/2	$\tilde{l}_1 \cdots \tilde{l}_6$	sleptons	0
$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	neutrinos	1/2	$\tilde{\nu}_1 \cdots \tilde{\nu}_3$	sneutrino	0
$g$	gluons	1	$\tilde{g}$	gluinos	1/2
$W^\pm$	W bosons	1	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$	charginos	1/2
$H^\pm$	charged Higgs	0			
$\gamma$	photon	1			
$Z^0$	Z boson	1			
$h^0(H_2^0)$	light scalar Higgs	0			
$H^0(H_1^0)$	heavy scalar Higgs	0	$\tilde{\chi}_1^0 \cdots \tilde{\chi}_4^0$	neutralinos	1/2
$A^0(H_3^0, P_0)$	pseudoscalar Higgs	0			

## 1.2.4 その他の候補

### アクシオン

強い相互作用を記述する量子色力学では、強い相互作用のもとで CP 対称性は破れる。しかし実際の実験で極めて高い精度で CP 対称性は破れていないことがわかった。この問題は強い CP 問題と呼ばれ、アクシオンはこの問題を解決するために導入された。アクシオンの質量は、超新星爆発、球状星団の観測などから制限され、CDM としては  $1\mu\text{eV} \sim 1\text{meV}$  に質量領域が制限されている (図 1.9)。アクシオン探索は強磁場中でアクシオンが光子に変換するプリマコフ効果を用いて行われる。アクシオンは現在未発見で、CDM 領域のアクシオンの質量ごとのアクシオン-光子のカップリングに対する制限がつけられている (図 1.10)

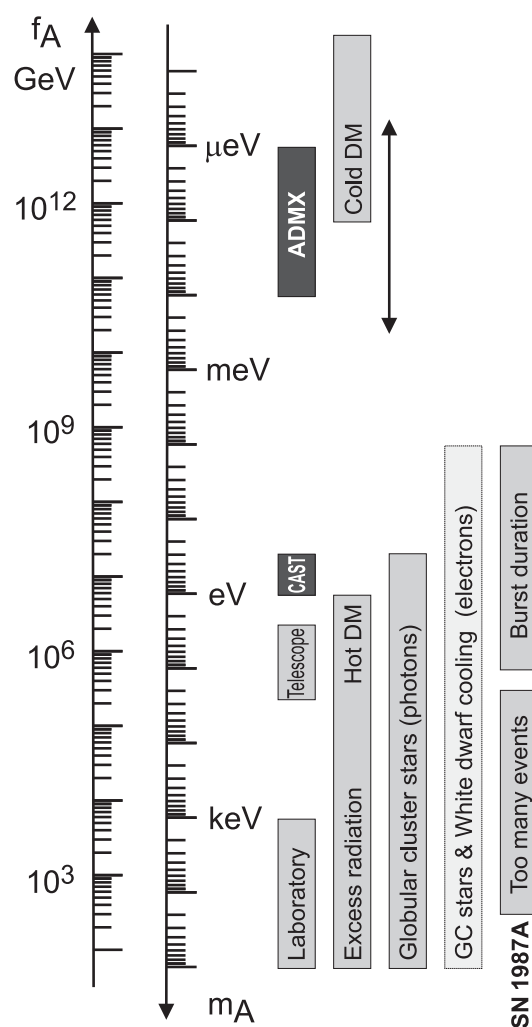


図 1.9 アクシオンの質量に対する制限と各実験の質量領域 [1]

## 1.3 暗黒物質探索実験

今日、暗黒物質探索実験は世界中でおこなわれており、次の 3 種類に大別される。

- 直接探索実験：ターゲット原子核と暗黒物質の弾性散乱事象を観測する。
- 間接探索実験：暗黒物質が対消滅した際に生じる粒子を観測する。

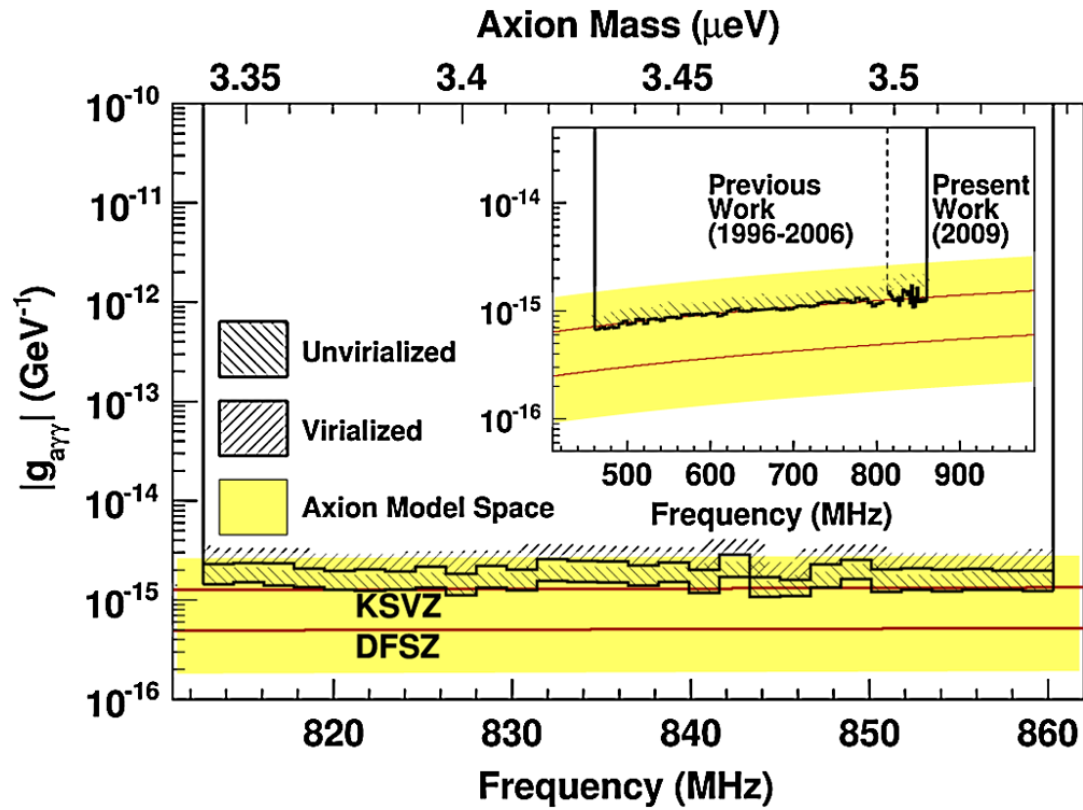


図 1.10 アクシオンの質量ごとのアクシオン-光子カップリングに対する制限 [14]

- 加速器実験：加速器を用いて暗黒物質である条件を満たすような新粒子を探索する。

### 1.3.1 暗黒物質と原子核との相互作用

ニュートラリーノと原子核との相互作用は原子核中の核子との相互作用によって決定される。WIMP と核子との相互作用はスピンの依存する場合 (Spin Dependent ,SD) と依存しない場合 (Spin Independent ,SI) にわけられ、原子核とニュートラリーノの散乱断面積  $\sigma_{\chi-N}$  は SD の散乱断面積  $\sigma_{\chi-N}^{SD}$  と SI の散乱断面積  $\sigma_{\chi-N}^{SI}$  を用いると

$$\sigma_{\chi-N} = \sigma_{\chi-N}^{SD} + \sigma_{\chi-N}^{SI} \quad (1.5)$$

で表される [15]。SD と SI のどちらが散乱断面積が大きいかは SUSY のパラメータに依存しているので、直接探索実験において両方の散乱断面積を測定することが重要となる。

#### Spin Dependent (SD)

SD は原子核のスピンのカップリングすることで起こる軸ベクトル相互作用である。SD の場合の Feynman diagram を図 1.11 に示す。SD 散乱では散乱断面積  $\sigma_{\chi-N}^{SD}$  は

$$\sigma_{\chi-N}^{SD} \propto J(J+1) \quad (1.6)$$

となり原子核のスピンの比例する。

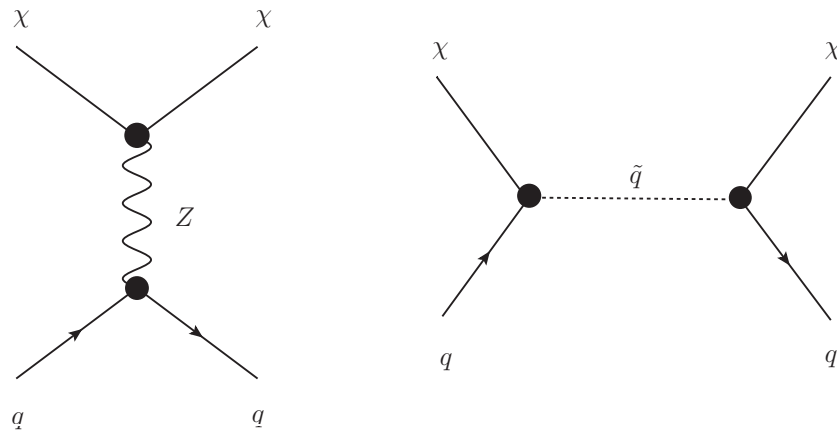


図 1.11 ニュートラリーノ  $\chi$  とクォーク  $q$  のスピンの依存する散乱の Feynman diagram ( $\tilde{q}$ :スクォーク)

### Spin Dependent (SI)

SI 散乱は原子核とコヒーレントに散乱するスカラー相互作用である。SD の場合の Feynman diagram を図 1.12 に示す。SI 散乱では散乱断面積  $\sigma_{\chi-N}^{SI}$  は

$$\sigma_{\chi-N}^{SI} \propto A^2 \quad (1.7)$$

となり原子核の質量数の 2 乗  $A^2$  に比例する。

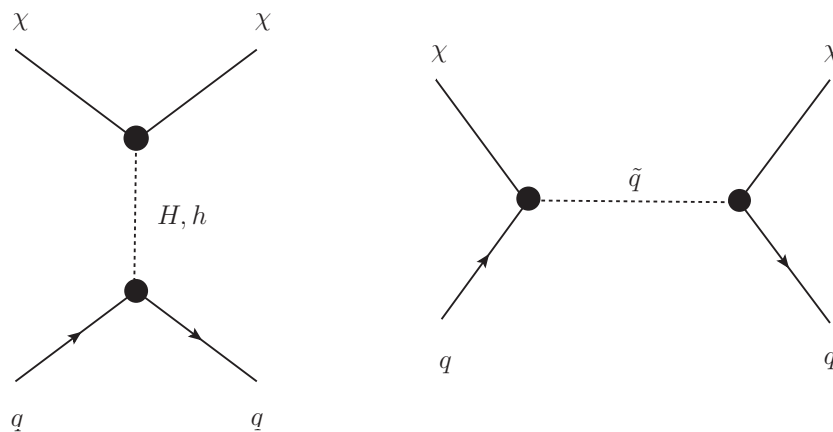


図 1.12 ニュートラリーノ  $\chi$  とクォーク  $q$  のスピンの依存しない散乱の Feynman diagram

### 期待される事象頻度

図 1.13 に WIMP の質量を 100GeV、WIMP と核子の散乱断面積を  $1 \times 10^{-6}$  pb とした時の反跳エネルギーのスペクトルを示す。図 1.13 からわかるように、反跳エネルギーはとても小さく 100keV 以下程度で、事象頻度も 10keV で  $\sim 10^{-2}$  count/keV/kg/day (differential rate unit, dru) と非常に少ない。このために暗黒物質直接探索実験では BG を極力減らし、閾値を下げなければならない。

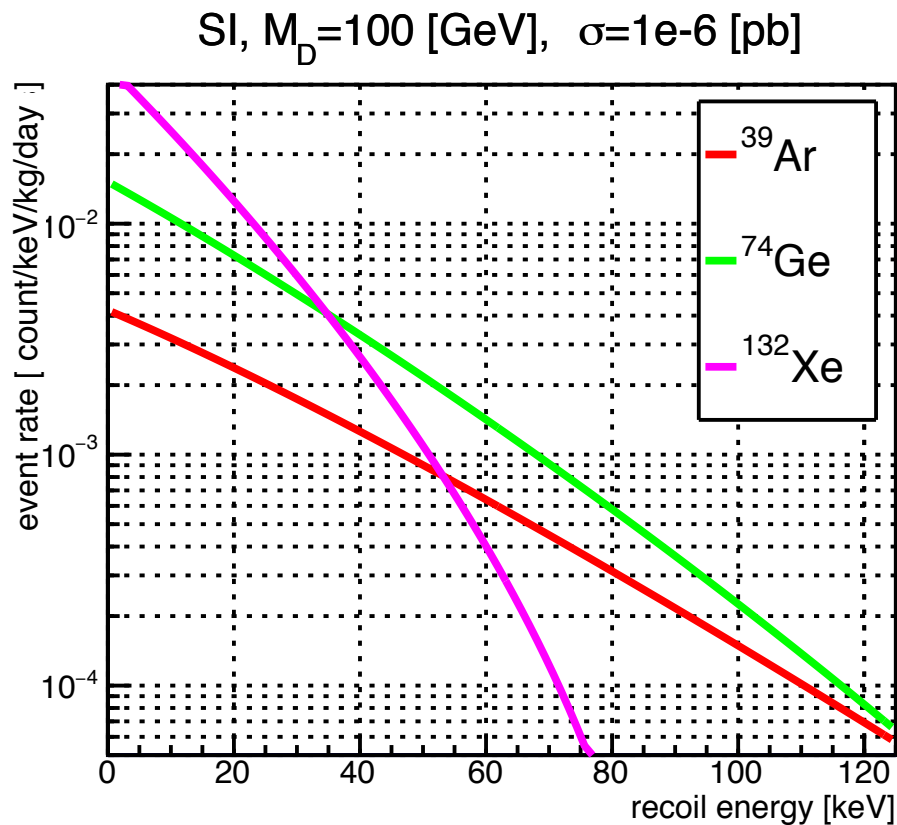


図 1.13 WIMP 質量 100GeV, 散乱断面積を  $1 \times 10^{-6}$  pb とした時のエネルギースペクトル。赤：標的原子核  $^{39}\text{Ar}$ 、緑：標的原子核  $^{74}\text{Ge}$ 、マゼンタ：標的原子核  $^{132}\text{Xe}$

### 1.3.2 直接探索実験

直接探索実験とは暗黒物質とターゲット原子核との弾性散乱事象を観測することによって暗黒物質の発見を目指す実験である。

#### 半導体検出器

半導体検出器として主にターゲットとしては Ge, Si などが主に用いられている。半導体検出器を用いた実験で代表的なものに CDMS[16]、CoGeNT[17] などがある。原子核散乱によって生じるフォノンの信号とイオン化による信号を検出する。フォノンの信号とイオン化による信号を同時に測定することで事象の粒子識別を行い、 $\beta$  線、 $\gamma$  線の BG を排除し感度を高める事ができる。

#### シンチレーション検出器

固体シンチレータを用いた実験で有力な実験は DAMA/NaI 及び DAMA/LIBRA[18] であり、暗黒物質を観測したという主張を初めて行った実験である。DAMA/NaI で暗黒物質の季節変動を観測し、その後検出器を改良し DAMA/LIBRA 実験として季節変動を再現した (図 1.14)。液体シンチレータとして用いられるものは液体アルゴン、液体キセノンなどがあげられる。液体アルゴンを用いた実験としては DEAP 実験が挙げられる [19]。XMASS 実験は液体キセノンを用いている実験である。詳しい液体キセノンの性質は第 2 章で述べる。液体キセノンと比べて、液体アルゴンは波形を用いた粒子識別が容易であることや廉価であるという利点があるが、一方でアルゴンは 128nm の波長のシンチレーション光を発するために波長変換材が必要なことや BG 源となる  $^{39}\text{Ar}$  が含まれているという欠点がある。



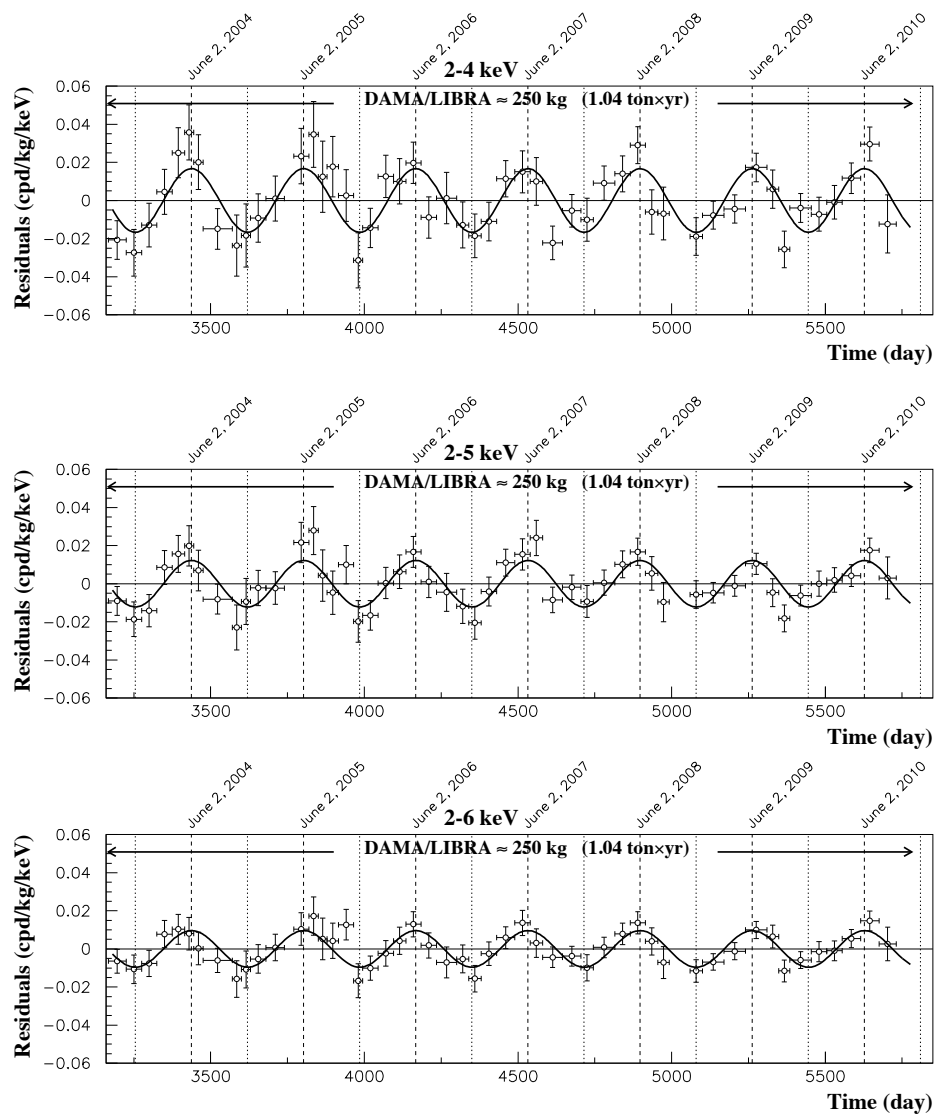


図 1.14 DAMA/LIBRA 実験で観測された季節変動 [18]。上から 2-4keV、2-5keV、2-6keV のエネルギー領域における季節変動を示している。白丸：データ、実線：正弦曲線によるフィット

## 2 相式検出器

2 相式検出器とはガス相と液相の 2 つを用いて、イオン化とシンチレーション光の 2 つ信号を捉えるものである。液相で暗黒物質が弾性散乱するとシンチレーション光が発生する (S1)、このとき発生した電離電子は電場によって気相へドリフトし増幅され比例蛍光を発する (S2)。原子核散乱が起こった場合イオン化の密度が高く、再結合が起こりやすいためドリフトする電子の数が少なくなり S2 が小さくなる。このことを利用し S1、S2 の比を取ることで粒子識別を可能としている。2 相式検出器を用いた実験で代表的なものに XENON[20], LUX[21] などがある。

### 1.3.3 間接探索実験

間接探索実験とは銀河などにトラップされている暗黒物質の対消滅によって生じる粒子を捉えることで暗黒物質の発見を目指す実験である。観測する崩壊生成物によって分類されそれぞれ  $\gamma$  線を観測するもの、反粒子を探索するもの、ニュートリノを探索するものにわけられる。

Fermi は 2009 年に打ち上げられた  $\gamma$  線観測用の天文衛星である [22]。 $\gamma$  線検出器 Fermi-LAT (Large Area Telescope) の観測では銀河中心で 130GeV 程度の質量の暗黒物質によるものと考えられる可能性のある超過が観測されたが、その後の解析で統計の少なさか、もしくは検出器の分解能による可能性があることがわかった [23]。

PAMELA[24] や AMS[25] では電子 / 陽電子数比が宇宙線モデルでは説明できない値を観測しているため、

暗黒物質の対消滅の可能性が指摘されている (図 1.15)。しかしこの電子/陽電子数比の異常はパルサーなどの他の天体でも説明できるため暗黒物質発見の確たる証拠とはなっていない。

また地上では IceCube[27] や Super-Kamiokande(SK) が暗黒物質の対消滅由来のニュートリノを観測することで暗黒物質を探索している。しかし、BG で説明できる量しか観測出来ておらず、暗黒物質の散乱断面積に制限をつけている (図 1.16)。

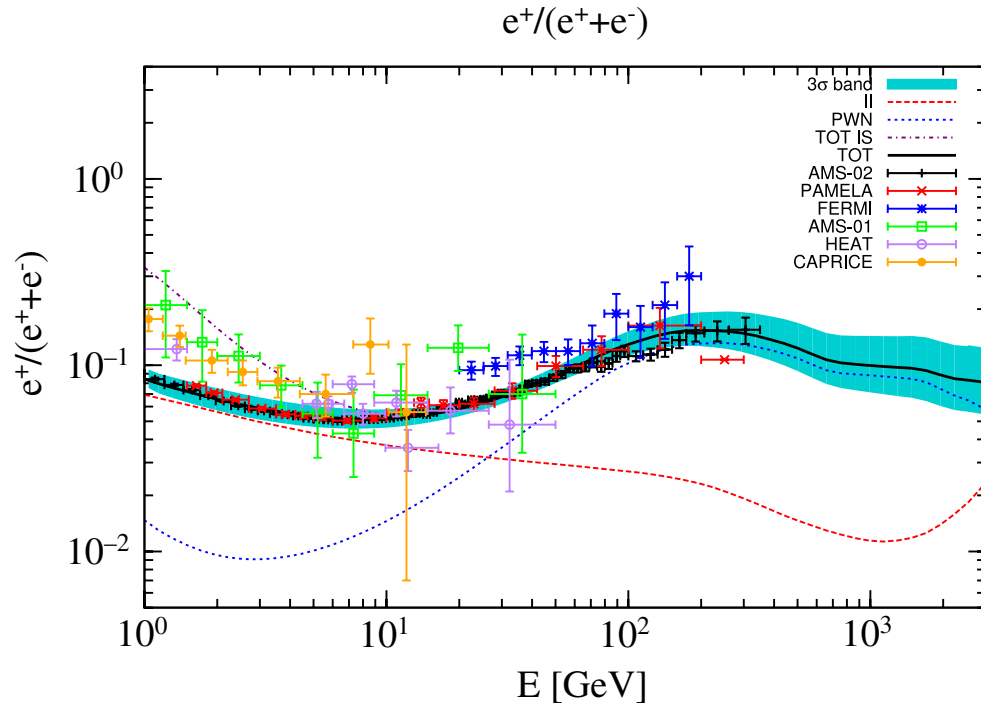


図 1.15 エネルギーごとの電子/陽電子比 [26]。誤差棒付きの点が各実験の測定値。黒の実線が観測データの best fit、シアンバンドがその  $3\sigma$  を表す。点線、破線は理論モデル。

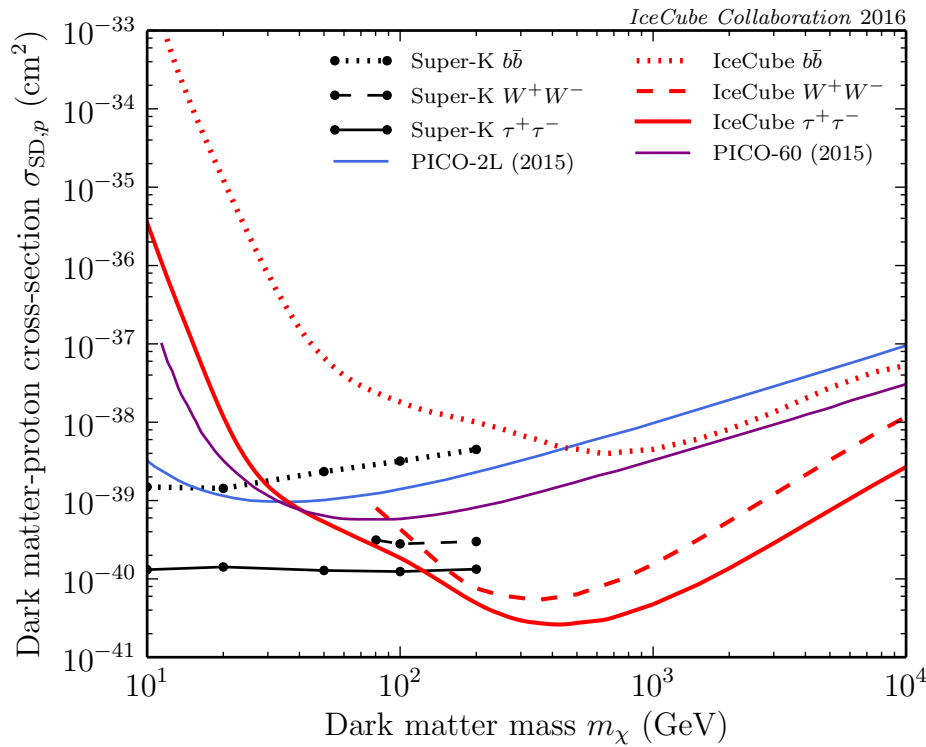


図 1.16 間接探索による 90% 信頼度の制限曲線 [27]。横軸は WIMP の質量 [GeV], 縦軸は WIMP と陽子の散乱断面積  $[\text{cm}^2]$

#### 1.3.4 加速器探索実験

加速器によって暗黒物質の性質の条件を満たすような新粒子を探索する。加速器探索では新粒子が宇宙暗黒物質であるかどうかは示すことが出来ないが、その性質を詳しく調べることができるので他の暗黒物質探索実験にとっても非常に重要であると言える。

#### 1.3.5 暗黒物質探索実験の現状

DAMA[18],CoGeNT[17],CRESST[28],CDMS II[16]などが軽い暗黒物質(質量 50GeV 以下)の存在を示唆している。しかしより感度の高い他の実験の結果とは矛盾する結果となっている。以下、暗黒物質探索実験の現状について説明していく。

DAMA/NaI は暗黒物質探索実験において、初めて暗黒物質の季節変動を観測したと主張した。その後検出器を改良しターゲット質量を増やした DAMA/LIBRA で季節変動を再び観測した。DAMA/LIBRA は 14 年分のデータを用いて暗黒物質によるものと考えられる季節変動を  $9.3\sigma$  の信頼度で観測したと報告している [18]。また Ge をターゲットに用いた CoGeNT 実験も DAMA と同じ程度の質量領域での季節変動を  $2\sigma$  の信頼度で観測した。

図 1.17 は現在までの観測によって与えられた WIMP の質量と WIMP-核子のスピンに依存しない断面積にたいする制限曲線である。現在も暗黒物質は様々な検出器、方法によって探索されており測定感度が向上し続けている。最近ではイオン化とシンチレーション光の 2 つの信号を捉える 2 相式の希ガス検出器による探索が台頭し、強い制限を与えている。現在最も厳しい制限を与えているのは Xe の 2 相式検出器を用いた LUX[21] である。

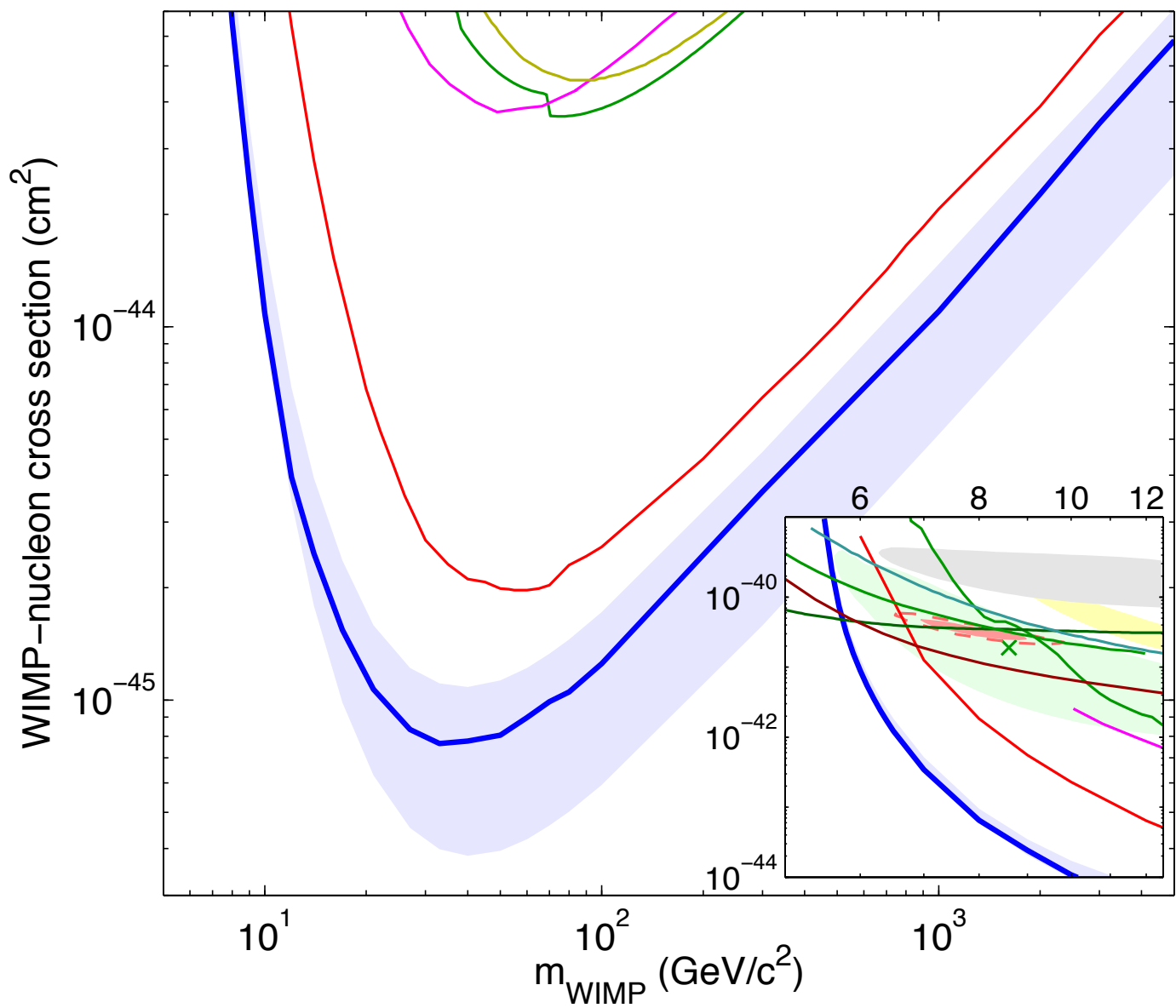


図 1.17 スピンに依存しない WIMP-核子散乱断面積への制限。青：LUX による 90% 信頼度の制限、黄色：Edelweiss II[30]、緑：CDMS II、マゼンタ：ZEPLIN-III[31]、オレンジ：XENON100(live time 100 日)[29]、赤：XENON100(live time 225 日)、右下の図は低質量領域を拡大した図。茶：XENON10-S2only[20]、影付きの赤の領域：CoGeNT によって季節変動が観測された領域、緑：CDMS II の低閾値での再解析による制限、緑の影付きの領域：CDMS II(Si) による許される領域、黄色の影付きの領域：CRESST-II で許される領域、灰色の影付きの領域：DAMA によって許される領域

## 第 2 章 XMASS 実験

世界では様々な暗黒物質探索実験があることを前章で述べた。XMASS 実験とは

Xenon neutrino MASS detector  
Xenon Massive detector for solar neutrino  
Xenon detector for Weakly Interacting MASSive Particle

の略で暗黒物質探索、ニュートリノ質量、2重 $\beta$ 崩壊の研究を目的とした実験である。現在は 1t クラスの検出器を用いた XMASS-I で主に暗黒物質探索を目的として実験している。その後、5t クラスの XMASS-1.5 をへて、最終的に 20t クラスの検出器を用い様々な物理を探索することを目的としている。XMASS-I 実験は 2010 年に開始し、検出器を理解するためのコミッションングランを 2012 年まで行った。このコミッションングランの際に予期せぬバックグラウンド (BG) が見つかったため、BG 削減のための検出器の改修 (RFB) を行った。本研究では RFB 後に取得された実験データを用いて解析を行う。XMASS は現在まで安定して稼働しているが、2013 年 8 月に神岡鉱山内で停電があった際に光量に変化した ( $\sim 5\%$ )[39]。この光量変化の原因は調査中であるが、不純物混入 (水、酸素、窒素など) による液体キセノン (LXe) の吸収長の変化などが考えられる。そのため 2015 年 3 月よりキセノンガス相の不純物の純化を目的としたガス循環を行っている。

### 2.1 液体キセノン

XMASS 実験は LXe をターゲットとして約 1t 用いている。LXe を用いる利点は以下で説明する。

- 大きい原子番号と高密度：原子番号が大きく ( $Z=54$ )、密度も約  $3\text{ g/cm}^3$  と大きいために  $\gamma$  線と反応しやすく、外部から検出器に  $\gamma$  線が侵入しにくいという自己遮蔽能力が高い。そのため検出器の中心を低 BG にすることができる。
- 長寿命の同位体が存在しない：表 2.1 に Xe の同位体自然比を示す。Xe の同位体はどれも短寿命であるため (2重 $\beta$ 崩壊をする  $^{136}\text{Xe}$  を除き最も半減期の長い  $^{127}\text{Xe}$  でも 36.3 日である)、中性子の当たらない環境に保管しておくことで BG を低減することができる。

表 2.1 Xe の同位体自然存在比 [32]

isotope	Abundance(%)
$^{124}\text{Xe}$	0.096
$^{126}\text{Xe}$	0.090
$^{128}\text{Xe}$	1.92
$^{129}\text{Xe}$	26.44
$^{130}\text{Xe}$	4.08
$^{131}\text{Xe}$	21.18
$^{132}\text{Xe}$	26.89
$^{134}\text{Xe}$	10.44
$^{136}\text{Xe}$	8.87

- 純化が容易：蒸留することによって BG 源である  $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{85}\text{Kr}$  を取り除く事ができる。

- 高発光量：LXe のシンチレーション光では、1MeV あたり 46000 個の光子が放出される。これは他の液体シンチレータと比べて多く (液体アルゴン：約 38000 個, 液体クリプトン：約 41000 個)、エネルギー閾値を下げるができる。暗黒物質による事象はエネルギーが小さい (10keV 以下) と考えられるので、低閾値であることは重要である。
- 沸点が比較的高い：図 2.1 に Xe の相図を示す。Xe の沸点は 1 気圧で 165.1K と他の希ガスに比べて高く、扱いやすい。XMASS では約-100 でオペレーションしており気化、液化を容易に行う事ができる。

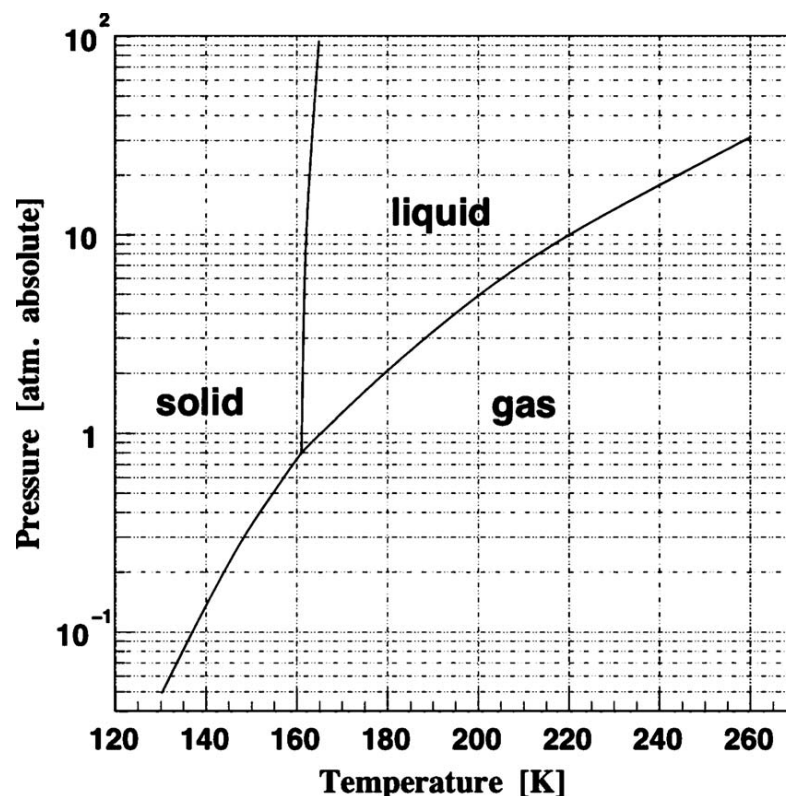
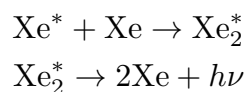


図 2.1 Xe の相図 [33]

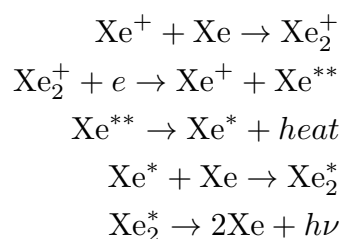
### Xe の発光過程

Xe の発光過程にはイオンの再結合を伴うものと伴わないものの 2 通りあり、次の様な過程を経る。

再結合を伴わない過程



再結合を伴う過程



再結合を伴わない過程の場合、 $\text{Xe}^*$  の二量体  $\text{Xe}_2^*$  が脱励起し波長 175nm の紫外光を発する。一方再結合を伴う過程の場合、Xe はイオン化し  $\text{Xe}^+$  となるが、再結合し最終的にイオン再結合を伴わない場合と同様に  $\text{Xe}_2^*$

となり波長 175nm の紫外光を発する [32]。Xe\*\* の脱励起にはスピン 1 重項とスピン 3 重項があり、粒子の種類とエネルギーによってこれらの比が異なる。図 2.2 は入射粒子ごとのシンチレーション光の時間減衰である。図 2.2 から分かるように  $\alpha$  線と原子核分裂片で早い成分 (スピン 1 重項) と遅い成分 (スピン 3 重項) の比が違う。この性質を用いてシンチレーション光の波形から粒子識別ができる。

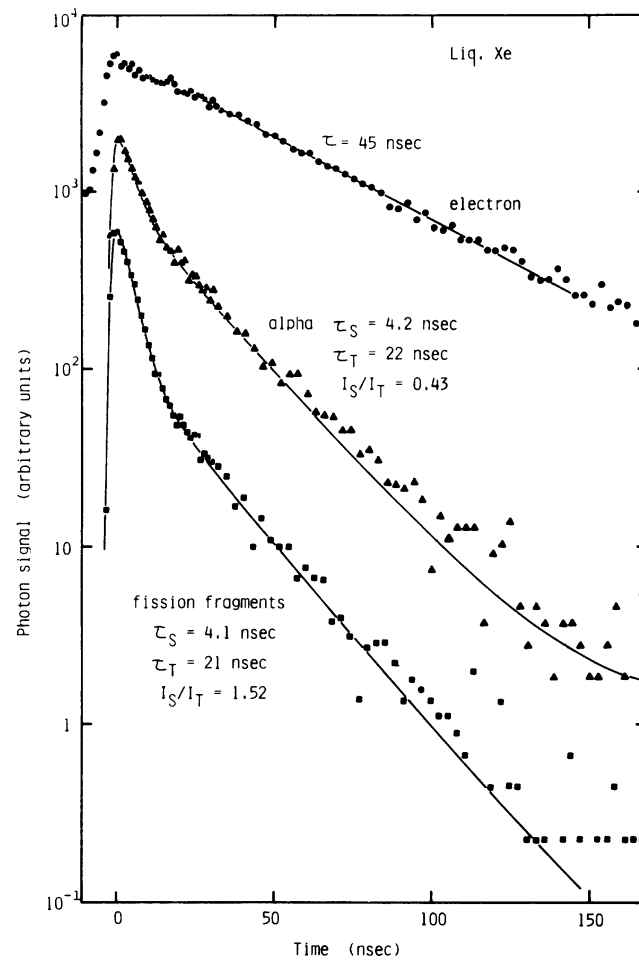


図 2.2 LXe の発光の時間減衰 [34]

## 2.2 検出器

検出器は岐阜県飛騨市、神岡鉱山内の地下約 1000 m (水換算 2700 m) に設置されている。これは宇宙線による BG を低減するためである。検出器は大きく 2 つの構造にわけられており、1 つは内部検出器 (inner detector:ID) もう 1 つは外部検出器 (outer detector:OD) である。図 2.3 に XMASS 検出器外観を示す。水タンクである OD の中心部に LXe 検出器である ID が配置されている。



図 2.3 XMASS 検出器外観

#### Outer Detector(OD)

OD は高さ 10.5m、幅 10m の円筒形の水タンクで岩盤からの熱中性子やガンマ線を遮蔽している。中心部の ID は 4m の厚みの水で囲まれている。タンク内部壁面には 72 本の 20 インチ光電子増倍管 (PMT, HAMAMATSU R3600) が配置されており、宇宙線が水タンク内に入射したときに発生するチェレンコフ光を観測することにより、宇宙線 BG に対するベトーをとっている。

#### Inner Detector(ID)

ID の概要を図 2.4 に示す。ID は Outer Vacuum Chamber(OVC) と Inner Vacuum Chamber(IVC) から構成されている。IVC の内部には 630 本の六角形の PMT(HAMAMATSU R10789-11) と 12 本の円形 PMT(HAMAMATSU R10789-11MOD) が無酸素銅製ホルダーに取り付けられている。ホルダーは図 2.4 のようになりほぼ球形であるが、五方十二面体 (pentakis dodecahedron) と呼ばれる、60 個の二等辺三角形でできた多面体になっている。IVC の内部には LXe が満たされており、IVC と OVC の間は真空になっていて断熱真空が保たれている。



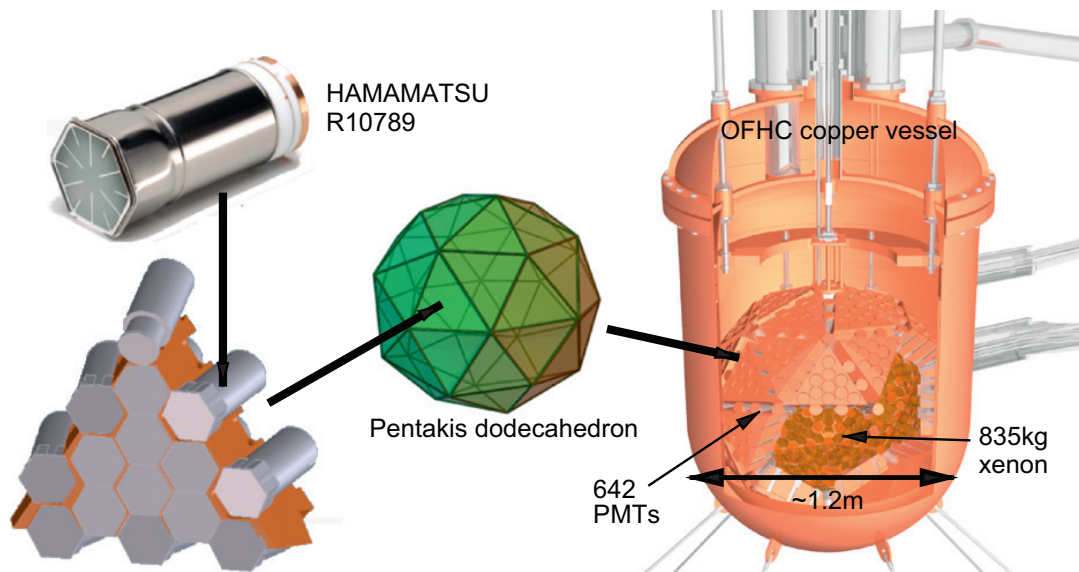


図 2.4 ID の概要

### 極低バックグラウンド PMT

XMASS 実験で用いられている PMT は窓が六角形のもの (HAMAMATSU R10789-11) と円形のもの (HAMAMATSU R10789-11MOD の 2 種類あり、XMASS 実験のために浜松ホトニクス社と開発したものである。特徴としては LXe 中で-100 で動作すること、LXe のシンチレーション光に対して感度があり、波長変換材なしで使用できること、放射性不純物が少ないこと (詳細は 3 章で述べる) が挙げられる [36]。

### Data Acquisition(DAQ)

DAQ システムの概略を図 2.5 に示す。データは FADC(Flash ADC, CAEN 社 V1751) を用いて記録している。RFB 前は ATM(Analogue Timing Module)[37] を用いて電荷と時間の情報を取得していたが、現在は主にトリガー生成のために利用されており解析では FADC を用いている。各 PMT からの情報はプリアンプで増幅され、ATM と FADC に入る。1 つの PMT の閾値は、-5mV(0.2 p.e. 相当) でこの値を超えると ATM は 200ns の矩形波をだす。この矩形波をすべての PMT で足し上げて (HITSUM 信号)、4 ヒット相当の波高になるとグローバルトリガーが生成され、FADC と ATM でその事象の情報が記録される。FADC はトリガーの前 1  $\mu$ sec、後 9  $\mu$ sec を記録している。

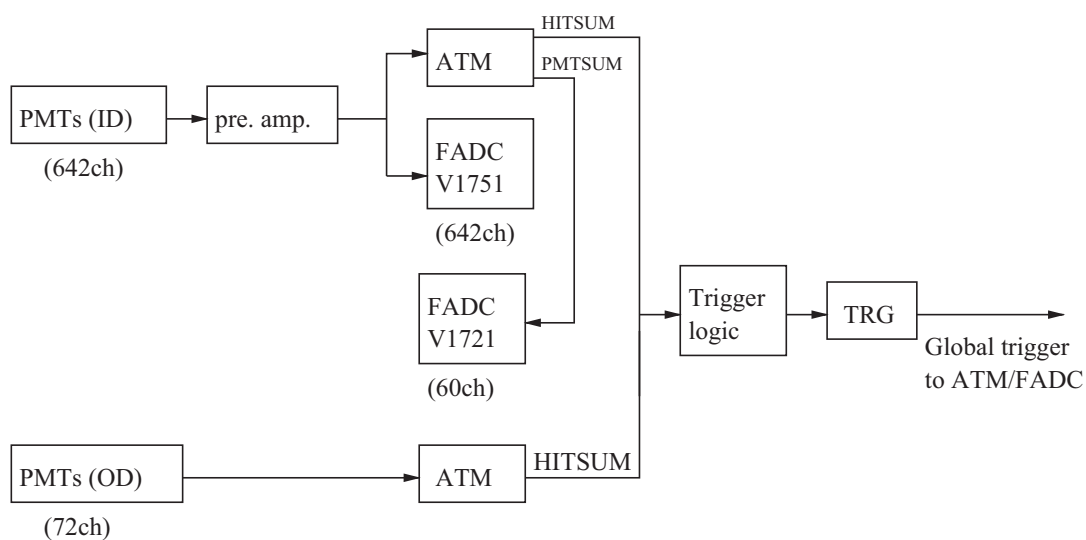


図 2.5 DAQ システムの概略

## 2.3 検出器校正装置

XMASS-I では 2 種類の校正装置を用いている。1 つは検出器の内部に線源を配置する内部校正装置、もう一つは OD の外側に線源を配置する外部校正装置である。

### 内部校正装置

内部校正装置の外観を図 2.6 に示す。線源を取り付けたロッドを上から LXe 中に入れて測定を行う。タンク上部にはステッピングモーターが配置されており、これにより線源の位置を 1mm 刻みで上下に動かす事ができる。内部校正のデータは LXe の発光量のモニタや光学パラメータの決定などに用いられる。

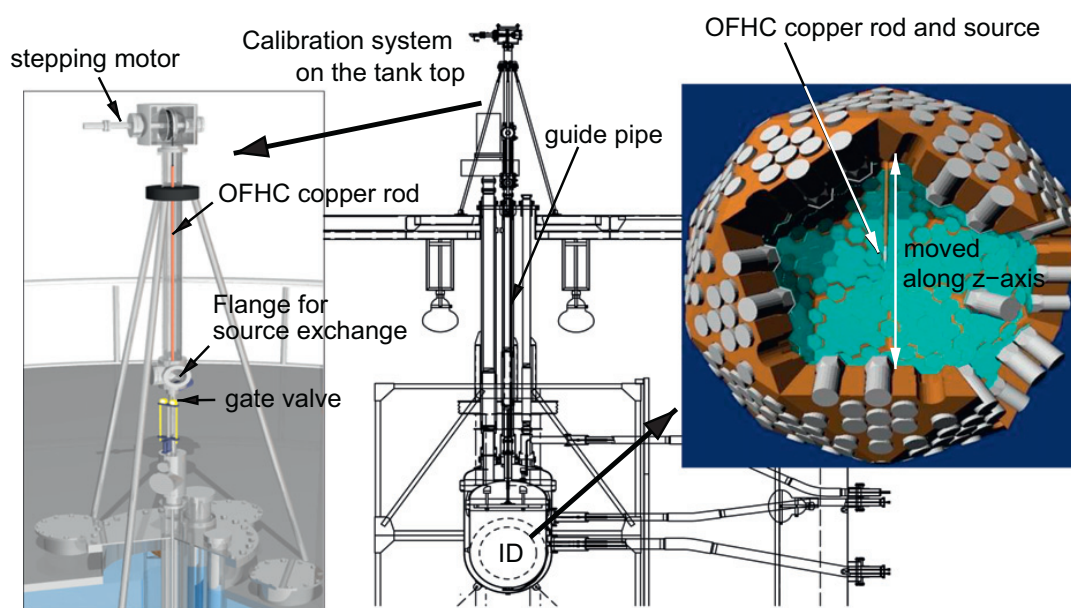


図 2.6 内部校正装置の外観 [35]

### 外部校正装置

外部校正は OVC の外側に線源を配置しデータを取得する。線源を LXe 中に入れずに外に設置して測定を行うことで検出器の安定性を損なうことなく測定を行える。外部校正装置の外観を図 2.7 に示す。 $\gamma$  線源用のものが 2 種類あり、検出器に取り付けられたチューブの中で線源を移動させることで測定する。 $\gamma$  線源用のチューブのうち、図 2.7 で 1 と示されているものは XMASS-I の建設時に作られたものでホースの中で線源の位置を動かして測定できる。一方図 2.7 で 2 と示されているものは、RFB 時に作られたものでチューブの端が検出器に固定されている。線源をチューブの端まで押し込んで測定を行うことで位置再現性の高いデータを取得することができる。もうひとつは中性子線源 ( $^{252}\text{Cf}$ ) を用いて行う装置である。

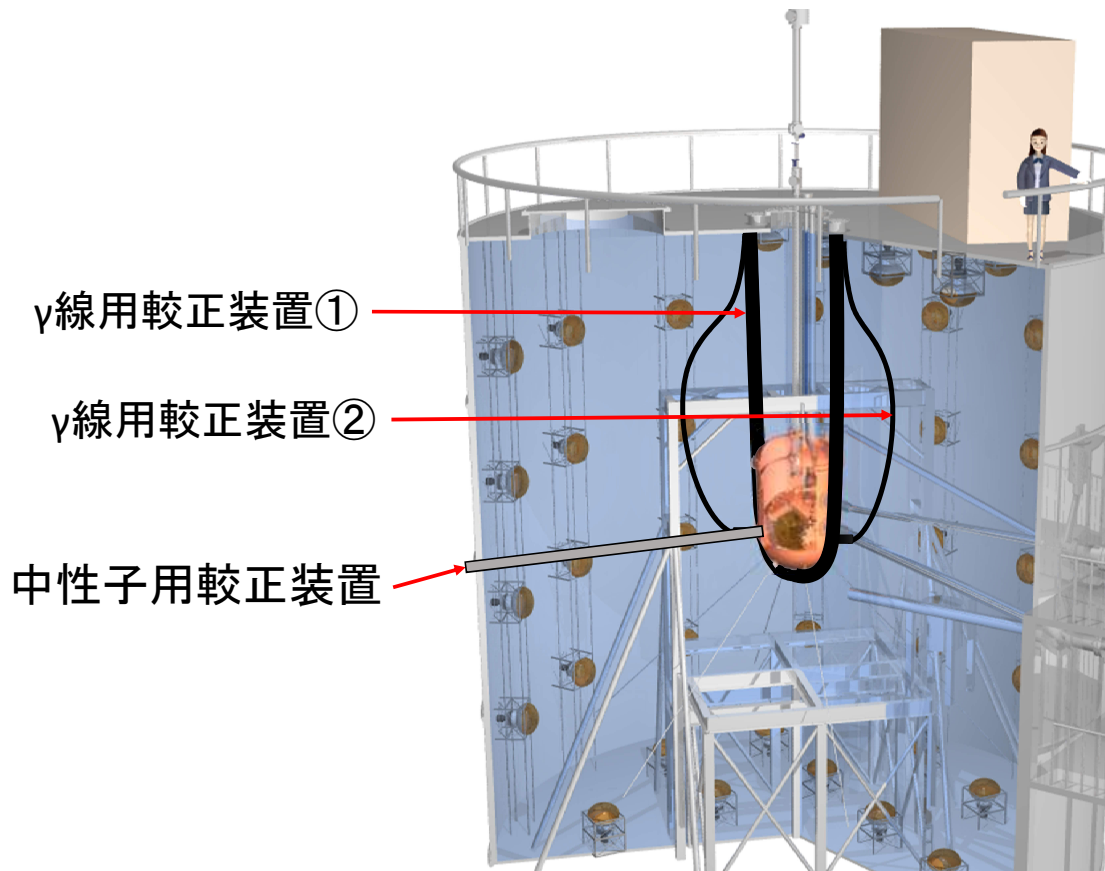


図 2.7 外部校正装置の外観 [35]

## 2.4 シミュレーション

XMASS 検出器のモンテカルロ・シミュレーション (MC) は Geant4[38] を用いて作成されている。図 2.8 で示されるように、PMT や検出器部材が細部まで再現されており、発生したシンチレーション光をすべてトラッキングする。LXe の光学パラメータや検出器部材の反射率などは内部校正のデータを再現するようにチューニングされている。

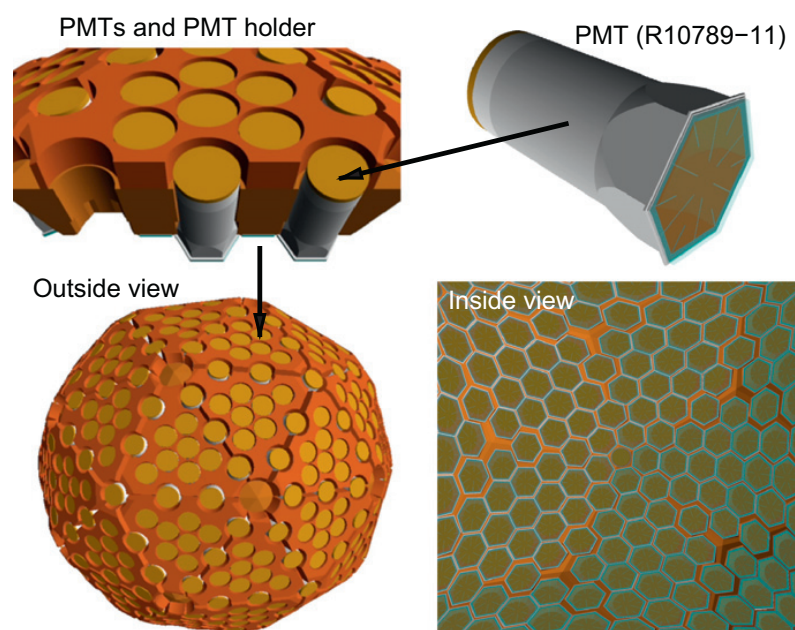


図 2.8 XMASS MC のジオメトリ

## 第3章 XMASS 実験におけるバックグラウンド

暗黒物質探索実験において、暗黒物質事象はその反応頻度が稀で、期待されるエネルギーが小さいため、暗黒物質の発見に至るためにはバックグラウンドの理解と低減が重要となる。この章では XMASS 実験におけるバックグラウンドを外部バックグラウンドと内部バックグラウンドに分類し概要を説明する。

### 3.1 外部バックグラウンド

外部バックグラウンドとは、LXe の外部から放射線のことである。検出器由来のバックグラウンドと検出器外からのバックグラウンドに分けることができる。

### 3.2 検出器外からのバックグラウンド

#### 宇宙線 $\mu$ 粒子

高エネルギー宇宙線は大気中でシャワーを起こし、多くの2次粒子が発生する。この2次宇宙線の  $\mu$  粒子が検出器の付近の物質と反応して生成される放射性同位体はバックグラウンドとなりうる。XMASS 実験は神岡地下約 1000m に検出器を設置しているため、宇宙線が山によって遮蔽され宇宙線  $\mu$  粒子のフラックスを約 10 万分の 1 の  $10^{-7} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  [40] にまで低減することができる。OD を通過した宇宙線  $\mu$  は OD でチェレンコフ光を放するので、これを検出することにより VETO している。

#### 環境中性子

中性子はクーロン相互作用せず、原子核反跳を起こすので、暗黒物質による事象と区別することのできないバックグラウンドとなる。神岡鉱山内における環境中性子フラックスは以下のように測定されている [41]。

- 熱中性子:  $(8.3 \pm 0.6) \times 10^{-6} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 高速中性子:  $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

中性子は電磁相互作用をしないが、中性子と同程度の質量を持つ粒子と弾性散乱すると大きくエネルギーを失う。このため遮蔽には水素を含む材料が有効である。XMASS 実験では直径 10m、高さ 10m の円筒形水タンクを検出器の外部に設置することによって環境中性子を遮蔽している。図 3.1 は水タンクの外から 10MeV の高速中性子を  $10^7$  個打ち込み、どこで熱中性子に変わるかを MC でシミュレーションしたものである。環境中性子のフラックスは  $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  なので、このシミュレーションは2日分に相当する。この結果から検出器部分に環境中性子は到達することが出来ないことが分かる。

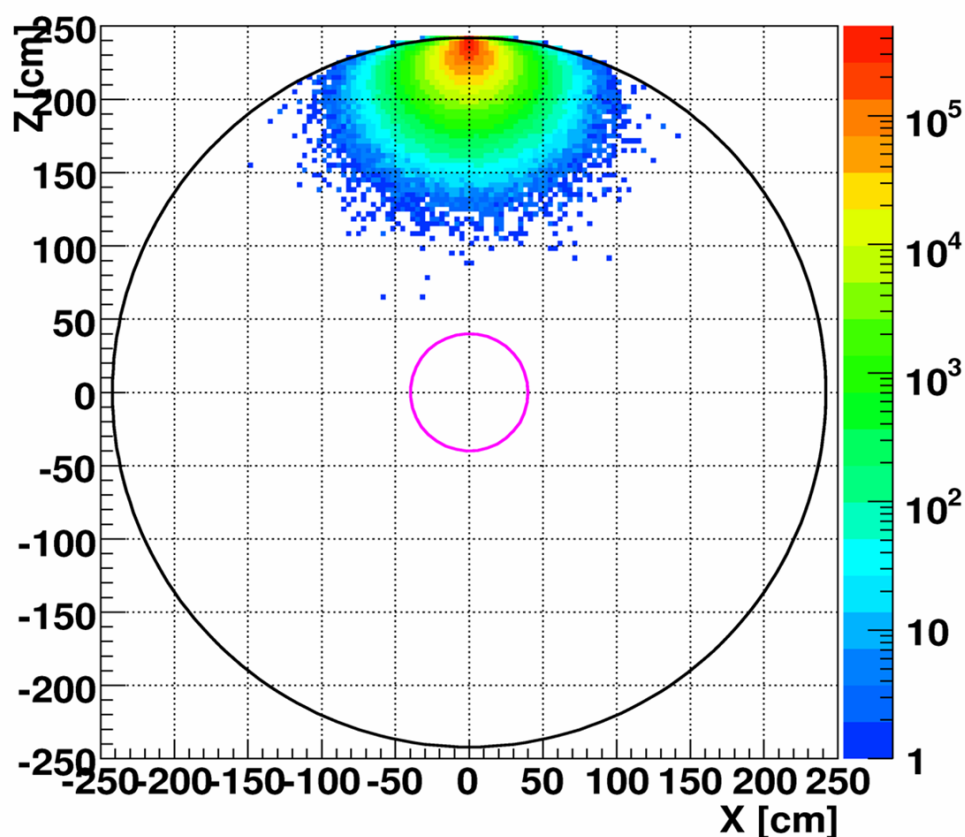


図 3.1 水タンクによる中性子の遮蔽 [36]. 10MeV の高速中性子が熱中性子に変わった場所を示している。黒線は水タンク、マゼンタは検出器の領域を示す。

#### 環境 $\gamma$ 線

環境  $\gamma$  線は岩盤などに含まれる U、Th の崩壊によって発生する。神岡坑内の 500keV 以上の  $\gamma$  線はすでに測定されており  $0.71/\text{cm}^2/\text{sec}$  である [43]。しかしすでに述べたとおり水タンクを設置しているためほとんどの  $\gamma$  線は遮蔽され、遮蔽出来なかった残りの  $\gamma$  線も LXe の自己遮蔽効果によって有効体積内には侵入できない。

### 3.3 検出器由来のバックグラウンド

検出器由来のバックグラウンドは大きく PMT 由来のものとそれ以外のものに分けられる。XMASS-I のデータから BG は PMT からの寄与が大きいことがわかっている。図 3.2 で実線で示されているのは、XMASS 実験で得られたエネルギースペクトルである。その他の色付きのヒストグラムは、高純度ゲルマニウム検出器で測定された放射性不純物量 (後述の表 3.1 等) を MC で再現したものでよく再現していることがわかる。

#### PMT からのガンマ線

PMT から発生する放射線バックグラウンドは PMT が液体キセノンと接しているために放射線が液体キセノンに入射しバックグラウンドとなりえる。XMASS 実験で使用している PMT は放射性物質を極力減らしている極低バックグラウンド PMT であるが、使用数が多いため XMASS-I では PMT からの  $\gamma$  線が主要な BG になっている。PMT に使用されている材料の放射能は高純度ゲルマニウム検出器を用いて表 3.1 のように測定され、それらの放射能は通常の市販 PMT の 100 分の 1 程度に以下となっている [35]。

### 3.4 内部バックグラウンド

内部バックグラウンドとはキセノン中のバックグラウンドである。このバックグラウンドは有効体積内にも存在するため、自己遮蔽によって低減することができないために問題となる。

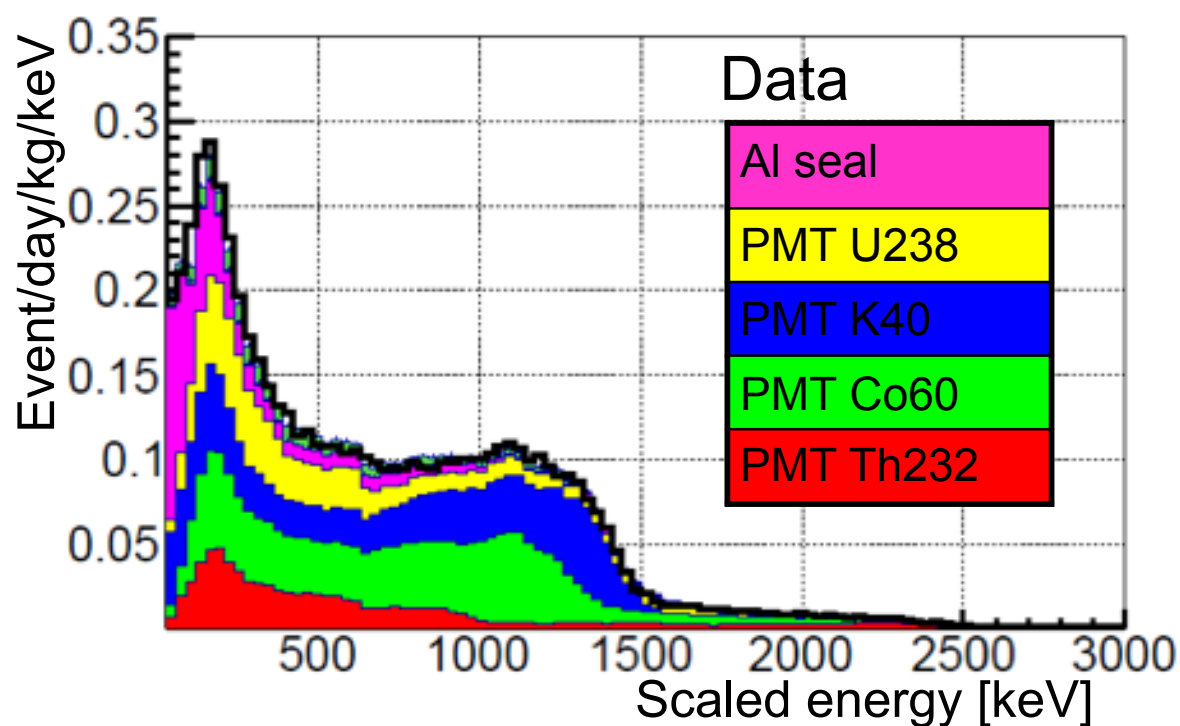


図 3.2 LXe 全体積でのエネルギースペクトル [42].

表 3.1 PMT に含まれる放射性不純物の量 [35]

放射性同位体	放射性不純物量 (mBq/PMT)
$^{214}\text{Pb}$ , $^{214}\text{Bi}$ (ウラン系列)	$0.70 \pm 0.28$
$^{228}\text{Ac}$ , $^{212}\text{Pb}$ , $^{212}\text{Bi}$ , $^{208}\text{Tl}$ (トリウム系列)	$1.5 \pm 0.31$
$^{40}\text{K}$	$< 5.1$
$^{60}\text{Co}$	$2.9 \pm 0.16$

### $^{85}\text{Kr}$

Kr は大気中におよそ 1ppm ほど含まれており、放射性同位体の  $^{85}\text{Kr}$  は核実験や原子炉の中で作られ環境に放出される。 $^{85}\text{Kr}$  は図 3.3 のような崩壊をする。 $^{85}\text{Kr}$  は半減期が 10.8 年と比較的長く、 $\beta$  崩壊をするため暗黒物質探索において重要な低エネルギー領域にエネルギーを落としバックグラウンドとなる。市販のクリプトン低減キセノンガス中には約 0.01ppm の  $^{85}\text{Kr}$  が含まれているが、XMASS ではクリプトンを蒸留によって取り除き  $3.3 \pm 1.1\text{ppt}$  まで低減した [44]。

### ラドン

$^{222}\text{Rn}$  はウラン系列の希ガスである。図 3.4、図 3.5 にそれぞれウラン系列とトリウム系列の崩壊系列を示す。 $^{222}\text{Rn}$  は半減期 3.82 日で崩壊していき安定な  $^{206}\text{Pb}$  となる。半減期が比較的長いため、検出器部材から発生し液体キセノン中に溶け込む。 $^{222}\text{Rn}$  については次章でより詳細を述べる。トリウム系列の  $^{220}\text{Rn}$  についてはすでに測定されており、0.28mBq であることが判明している [35]。

表 3.2 は XMASS 検出器部材から発生する  $^{222}\text{Rn}$  の量を見積もったものである。主要な  $^{222}\text{Rn}$  源は PMT ケーブルであることがわかっている [36]。2 章で述べたが XMASS は現在不純物除去のためのガス循環を行っているがガス循環の際に気相を通るためラドン濃度の上昇が見られた (詳細は 4 章で述べる)。

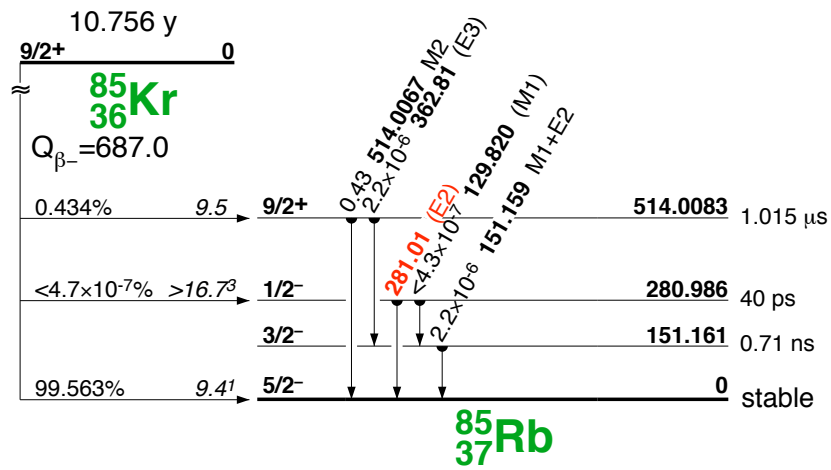


図 3.3  $^{85}\text{Kr}$  の崩壊様式 [45]

表 3.2 XMASS 検出器部材から発生するラドン量 [36]

相	材料	$^{222}\text{Rn}$ 濃度 [mBq/使用量]	total[mBq/使用量]
気体	H.V./signal connector	< 1.18	< 1.61
	H.V./feed through	< 0.09	
	monitor feed through 1	$0.06 \pm 0.01$	
	monitor feed through 2	< 0.11	
	monitor pin	$0.05 \pm 0.02$	
	source introducer	< 0.76	
気体と液体	H.V cable	< 9.1	< 10.67
	signal cable	< 3.4	
	monitor cable1	$0.57 \pm 0.3$	
	monitor cable2	< 0.25	
	SUS welding	$0.58 \pm 0.23$	
	fiber scope	< 1.02	
液体	thermometer	< 0.12	< 16.75
	PMT base	< 10.9	
	PMT	< 12.7	
	GORE – TEX <sup>®</sup>	< 1.9	
	connector pin	< 0.31	
	LED holder(PTFE)	< 1.25	
	total	< 19.09	

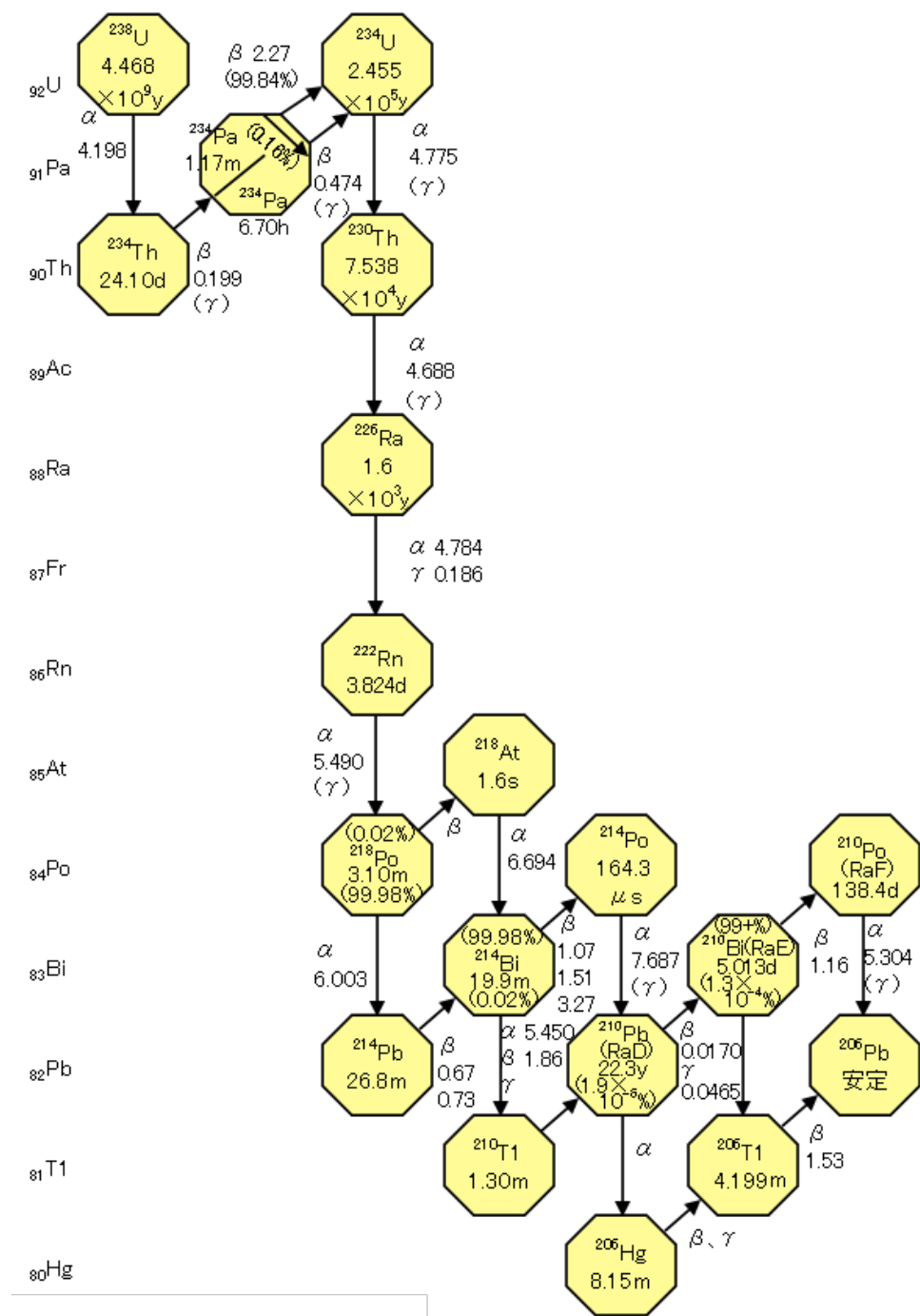


図 3.4 ウラン系列 [46]



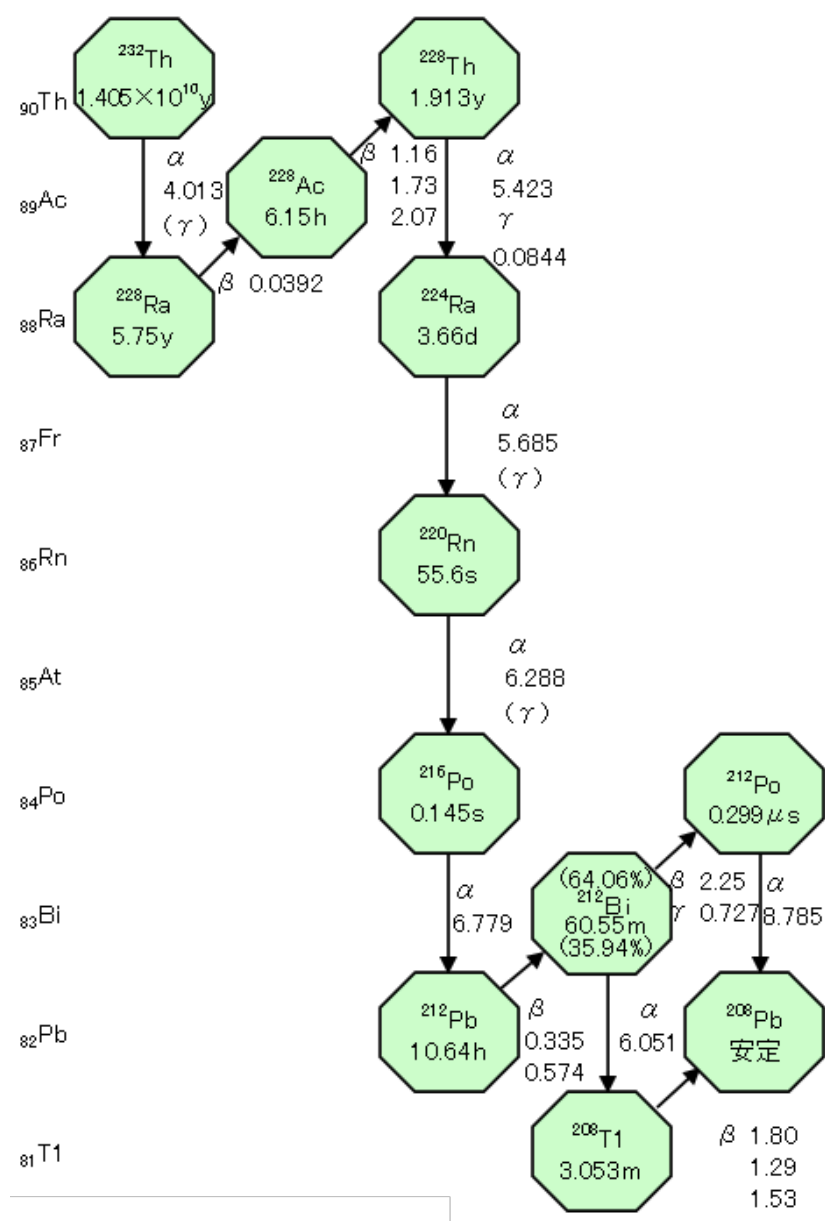


図 3.5 トリウム系列 [46]

## 第 4 章 放射能データベース

現在神岡の地下では宇宙線が少ないという環境を生かして、様々な稀事象の探索が行われている。各実験グループが連携し、極低バックグラウンド技術(共通の課題)を共有していくことで効率的に発展していくことが可能になる。そこで検出器などの素材の放射能の情報をデータベース化することで、情報を共有し発信していくことが求められる。本研究では現在利用されている放射能データベースである、radiopurity.org のシステムを移植し神岡地下実験用のデータベースを作成した。

### 4.1 データベースシステム

ここでは radiopurity.org で使われているシステムについて解説していく。図 4.1 にデータベースのアーキテクチャを示す。データベースエンジンには Apache CouchDB[48] を用いている。CouchDB はオープンソースのドキュメント志向の NoSQL データベースでその API として HTTP を用いている。特徴としては API を用いることによって Web 上で簡単にデータにアクセスできること、ドキュメント志向型のデータベースで拡張が容易、大量のデータを扱うのに向いていることなどがあげられる。これらのアーキテクチャを用いてオープンソースの Persephone[47] というパッケージが構築された。このパッケージは Github で公開されている。Persephone は後述の Material Assay Data Format(MADF) のためにデザインされており、データベースの検索とその結果の表示やデータを格納するためのフォームなどを提供している。様々な使用目的に対応しており、個人使用、実験グループでの使用、一般公開に対応できる。radiopurity.org のインターフェースとフォームのスクリーンショットを図 4.2、図 4.3 に示す。また Persephone にはデータベースにデータをアップロードするためのツールやデータをダウンロードをするためのツールが含まれている。アップロードするためには JSON 形式のファイルであることが必要だが、私はより一般的な形式である CSV から JSON 形式に変換するツールの開発を行った。

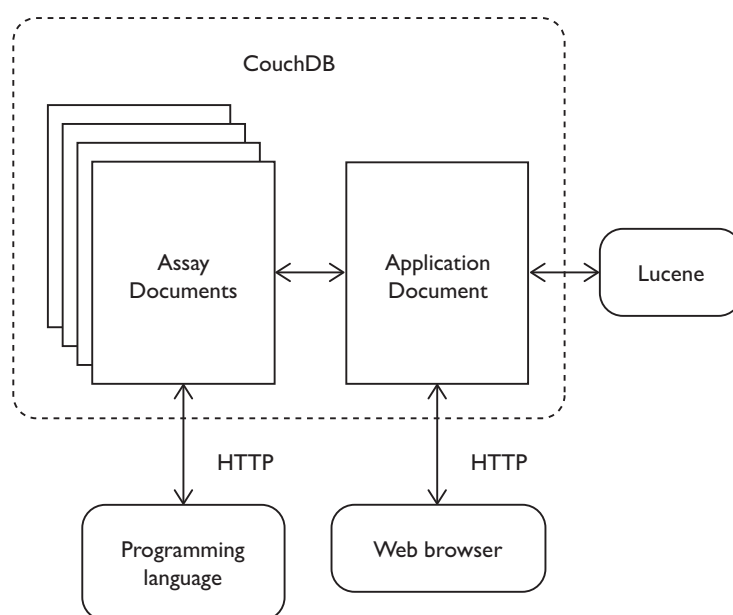


図 4.1 データベースのアーキテクチャ。Lucene はデータベースのプラグインでドキュメント検索エンジンである。

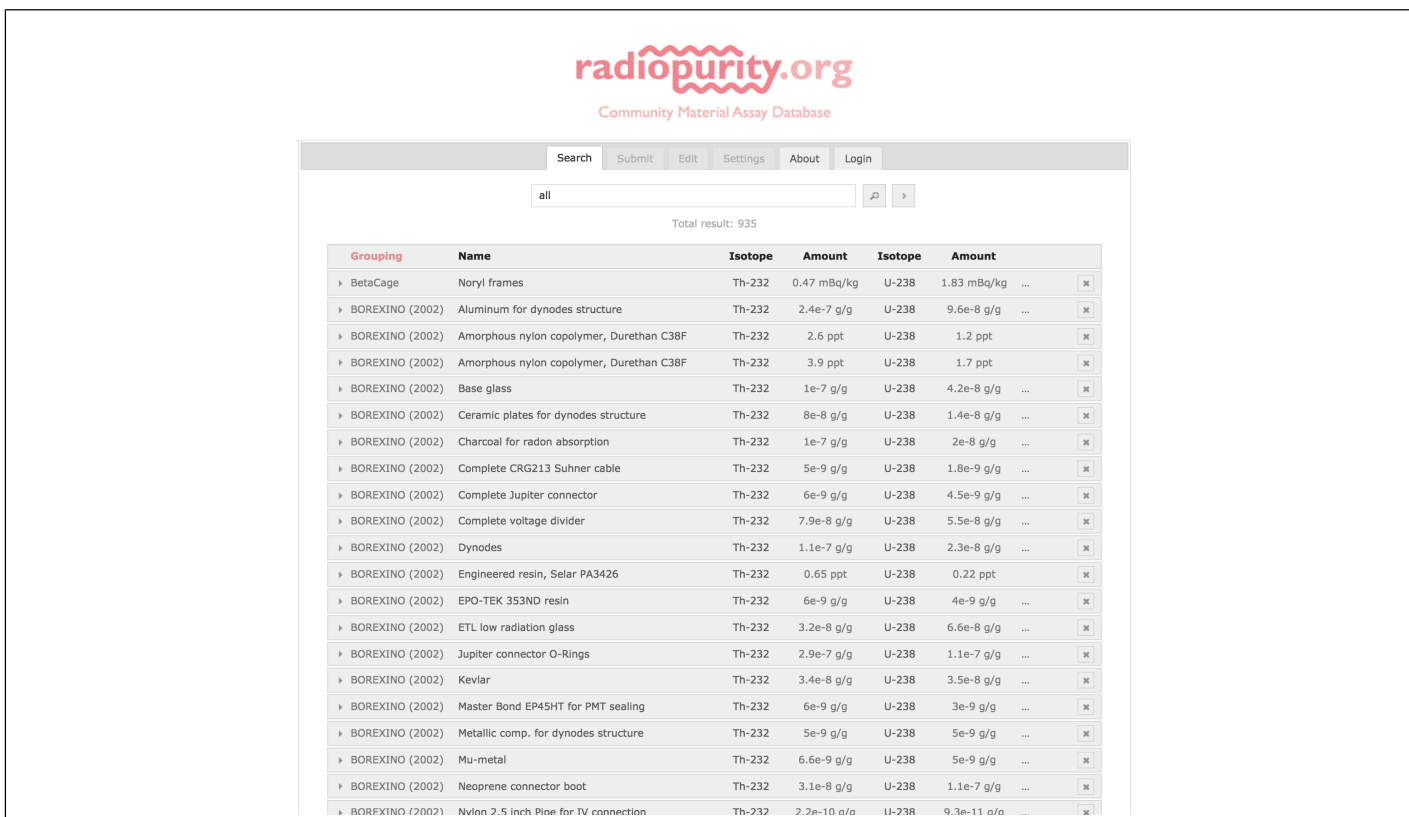


図 4.2 radiopurity.org のインターフェース

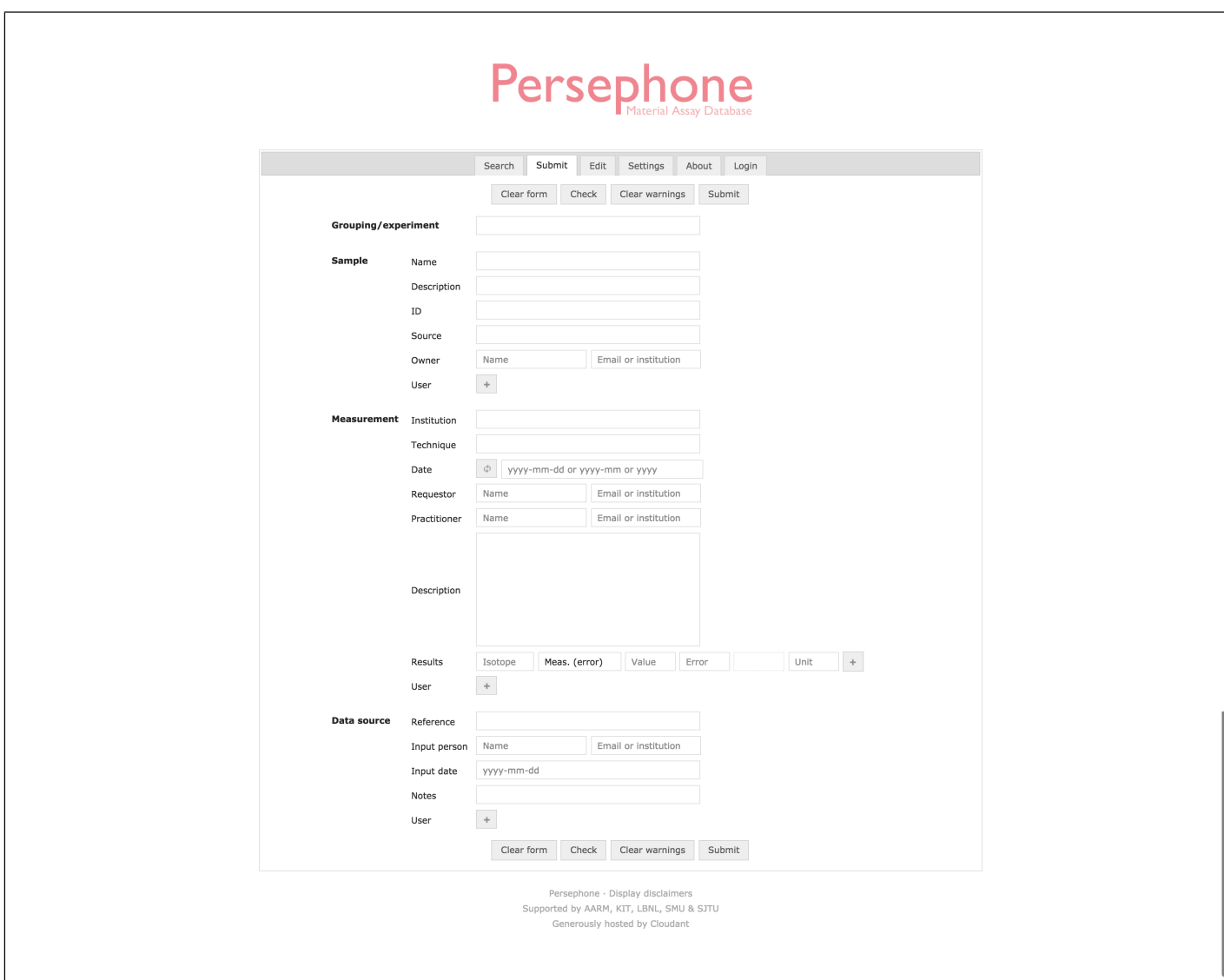


図 4.3 データをアップロードするためのフォームのスクリーンショット

## 4.2 フォーマット

radiopurity.org では Material Assay Data Format(MADF)[49] というデータフォーマットを用いている。MADF は JavaScript Object Notation(JSON) で書かれている。MADF は図 4.4 に示すように大きく分けて 3つの構造をもっており、それぞれが JSON のオブジェクトである (他にグループ名と MADF の version についての情報を追加できる)。実際の MADF のフォーマットを以下 (Listing1) に示す。

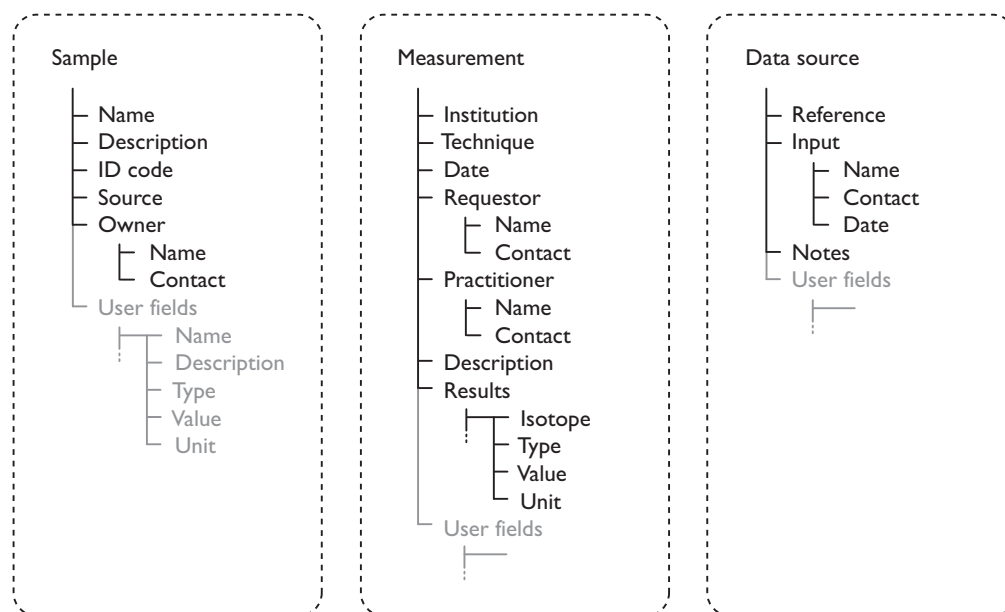


図 4.4 MADF の大きな 3つの構造

Listing 1 MADF のフォーマット

```
{
  "type": "measurement",
  "grouping": "Experiment name or similar",

  "sample": {...},
  "measurement": {...},
  "data_source": {...},

  "specification": "X.XX"
}
```

以下でそれぞれのオブジェクトについて説明していく。

**grouping** ドキュメントの責任者。測定を行った実験名を記す。

Conventions: 100 文字以下でピリオドを含まないようにする。

**specification** MADF の version。

Conventions: [Major version].[Minor version]

#### 4.2.1 sample

sample オブジェクトは測定したサンプルについての名前、提供元などの情報を格納するためのオブジェクトである。sample のオブジェクトの sub-structure を下記 (Listing2) に示す。

Listing 2 sample の sub-structure

```
"sample" : {  
  
  "name":    "short description",  
  "description": "Detailed description",  
  "id":      "Identification number",  
  "source":  "Where it came from",  
  
  "owner":  
  {  
    "name": "Who owns it",  
    "contact": "Institution or email/postal address"  
  }  
}
```

以下それぞれのオブジェクトについて説明していく。

**name** サンプルの名前。素材の種類を示す。

Conventions: 100 文字以下、一行でピリオドを含まないようにする。

**description** サンプルの詳細。

Conventions: コンマ区切り、一行で長さに制限はない。

**id** サンプルの id。

Conventions: 半角英数、空白可

**source** サンプルの提供元。会社名など

Conventions: 空白可

**owner** サンプルを持っている人。

Conventions: 空白可

#### 4.2.2 Measurement

measurement オブジェクトは測定結果を記すためのオブジェクトである。measurement のオブジェクトの sub-structure を下記 (Listing3) に示す。

Listing 3 measurement の sub-structure

```

"measurement" : {

  "institution": "Where the count was date",
  "technique": "The technique that was used",

  "date": [],

  "requestor":
  {
    "name": "who did the measurement",
    "contact": "Institution or email/postal address"
  },

  "practitioner":
  {
    "name": "Who owns it",
    "contact": "Institution or email/postal address"

  },

  "description": "Detailed multi-line description of
    the procedure and results",

  "results":
  [
    {
      "isotope": "II-AAA or II or description",
      "type": "measurement or limit or range",
      "value": [],
      "unit": "Unit"
    },
    ...
  ]
}

```

以下それぞれのオブジェクトについて説明していく。

Institution 測定を行った機関。

Conventions: 空白可

technique 測定を行った方法 (Ge,ICP-MS など)。

Conventions: 空白可

date 測定を行った期間。この配列は値が一つの場合は測定を始めた期間を表し、2つの場合は開始時期と終

了時期を表す。

Conventions: フォーマットは YYYY-MM-DD or YYYY-MM or YYYY のどれか。空白可。

requestor 測定を依頼した、または管理している者。

Conventions: 空白可

practitioner 測定を行った者、または測定の責任者。

Conventions: 空白可

description 測定の詳細 (サンプルの個数、重さ、測定状況など)。

Conventions: 複数行、空白可

results 測定結果、1つの放射性同位体の測定結果が配列の1つの要素に対応する。測定タイプには measurement, range, limit の3つの測定タイプがある。表 4.1 のように、value の意味は測定タイプと value の配列のサイズによって変わる。

表 4.1 value の意味

type	value	Description
measurement	[0]	誤差なし有限値
	[0,0]	対称な誤差付きの有限値
	[0,0,0]	非対称な誤差付きの有限値
range	[0,0]	範囲 [下限, 上限]
	[0,0,0]	範囲 [下限, 上限, 信頼度]
limit	[0]	上限値
	[0,0]	信頼度付き上限値

Conventions: 使うことのできる単位 : pct(パーセント), ppm, ppb, ppq, mBq/kg, μBq/kg, nBq/kg, n/a

信頼度は百分率で表す。

#### 4.2.3 Data source

Data source はデータ元についての情報を記すオブジェクトである。Data source は sub-structure を以下 (Listing4) に示す。

Listing 4 measurement の sub-structure

```

"data_source" : {
  "reference": "where the data came from",
  "input": {
    "name": "Who created this document",
    "contact": "Institution or email/postal address",
    "date": []
  },
  "notes": "Comments on/issues with data entry"
}

```

reference ドキュメントの参照先

Conventions: 空白不可

input データ入力者、または責任者。

Conventions: 空白不可

note データ入力の際に起きた問題についてのコメントまたはデータの解釈について。

Conventions: 複数行。空白可

#### 4.2.4 データベースツールの改善

本研究では Persephone に含まれているデータベース管理ツールの改善も行った。改善を行ったツールはファイル形式を CSV から JSON にするツール (importCSV.py) である。importCSV.py では CSV を JSON 形式に変換する際、map ファイルという CSV のカラムと JSON のオブジェクトの対応関係を示すファイルを作成して、その map ファイルを用いて JSON 形式に変換している。この方法は変換する CSV のフォーマットに自由に対応できるが、ユーザは最低 2 回プログラムを実行する必要があった。また radiopurity.org ではデータを CSV 形式でダウンロードできるが、その CSV を importCSV.py を用いて JSON 形式に直接変換できない (ダウンロードできる CSV は複数行にわたるファイルだが、importCSV.py では複数行の CSV ファイルの入力に対応していない)。そのためユーザが自ら CSV を整形する必要があった。これらの問題を解決するため、本研究では radiopurity.org でダウンロードした CSV ファイルを 1 度の操作で JSON 形式に変換できるように importCSV.py の改良をおこなった (この変更は既存の importCSV.py のオプションとして実装した)。

#### 4.2.5 本学のテストサーバー (lowbgdb) での試験

本研究では神岡地下実験用のデータベース作成を目的としているが、その前段階として本学の仮想テストサーバー (lowbgdb) でデータベースの試験を行なった。試験環境については表 4.2 にまとめる。CouchApp は CouchDB のアプリケーション作成のためのツールである [50]。

表 4.2 試験環境

仮想化ソフト	Oracle VM VirtualBox[51]
OS	Scientific Linux release 7.1 (Nitrogen)
CouchDB version	1.6.1
CouchApp version	1.0.1



試験は以下の過程で行なった。

1. CSV 形式から JSON 形式の変換
2. データベースへのアップロードと、ブラウザ上で正しく表示されているかの確認

それぞれ以下で説明する。

1. CSV 形式から JSON 形式の変換

テストに用いたデータは発表済みの XMASS 実験の修士論文 [52] から引用した。実際に用いた CSV (radiopurity.org からダウンロードできる CSV フォーマットと同じフォーマット) を次頁 (表 4.3, 表 4.4, 表 4.5) に示す。この CSV を本研究で改良した importCSV.py を用いて JSON 形式にしたものが Listing5 である。radiopurity.org からダウンロードできる CSV フォーマットのファイルを直接 JSON 形式に変換できることを確認した。

2. データベースへのアップロードと、ブラウザ上で正しく表示されているかの確認

この CSV をデータベースにアップロードし、ブラウザ上で正しく表示されているかを確認した。データベースへのアップロードは Persephone に含まれているツール (databaseTools.py) を用いて行った。次にアップロードされたデータをブラウザ上で確認した。アップロードしたデータのブラウザ上の表示が図 4.5 と図 4.6 である。表示に問題はなく正常にアップロードできた。

表 4.3 テストに用いた CSV(参考文献 [52] より)

type	grouping	sample-name	sample-description	sample-id	sample-source	sample-owner-name	sample-owner-contact	measurement-institution	measurement-technique
measurement	XMASS	PMT band bolt	PMT band bolt #1 M3x10	#1				XMASS	HPGe
measurement	XMASS	PMT band bolt	PMT band bolt #1 M3x10	#1				XMASS	HPGe
measurement	XMASS	PMT band bolt	PMT band bolt #1 M3x10	#1				XMASS	HPGe
measurement	XMASS	PMT band bolt	PMT band bolt #1 M3x10	#1				XMASS	HPGe

表 4.4 テストに用いた CSV(参考文献 [52] より) 表 4.3 続き

measurement-date	measurement-requestor-name	measurement-requestor-contact	measurement-practitioner-name	measurement-practitioner-contact	measurement-description	isotope	type	value1	value2	value3	unit
			A. Shinozaki			U-238	measurement	6.5	4.4		mBq/kg
			A. Shinozaki			Th-232	measurement	-1.8	3.8		mBq/kg
			A. Shinozaki			Co-60	measurement	21.4	3.5		mBq/kg
			A. Shinozaki			K-40	measurement	-5	47		mBq/kg

表 4.5 テストに用いた CSV(参考文献 [52] より) 表 4.4 続き

reference	input-name	input-contact	input-date	notes
A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis (2011)				
A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis (2011)				
A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis (2011)				
A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis (2011)				

Listing 5 表 1.3、表 1.4、表 1.5 を JSON 形式に変換したもの

```

"type" : "measurement",
"grouping" : "XMASS",
"sample" :{
  "name": "PMT band bolt",
  "description": "PMT band bolt #1 M3x10",
  "id" : "#1",
  "source" : "",
  "owner" :{"name" : "", "contact" : ""}
},
"measurement":{
  "institution" : "XMASS",
  "technique" : "HPGe",
  "date" : ["",""],
  "requestor":{"name" : "", "contact": ""},
  "practitioner":{"name" : "A. Shinozaki", "contact": ""},
  "description": "",
  "results" :
    [{"isotope" : "U-238", "type" : "measurement", "value" : [6.5,4.4], "
      unit":"mBq/kg"},
     {"isotope" : "Th-232", "type" : "measurement", "value" : [-1.8,3.8], "
      unit":"mBq/kg"},
     {"isotope" : "Co-60", "type" : "measurement", "value" : [21.4,3.5], "
      unit":"mBq/kg"},
     {"isotope" : "K-40", "type" : "measurement", "value" : [-5,47], "unit
      ":"mBq/kg"}]
},
"data_source":{
  "reference" : "A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis (2011)",
  "input":{
    "name":"test",
    "contact":"test",
    "date" : "2016-01-27"
  },
  "notes" : "Automatic Entry via importCSV.py python script. (Written by
    Benjamin Wise of SMU.) For more information go to radiopurity.org
    ."
},
"specification" : "2.01"

```

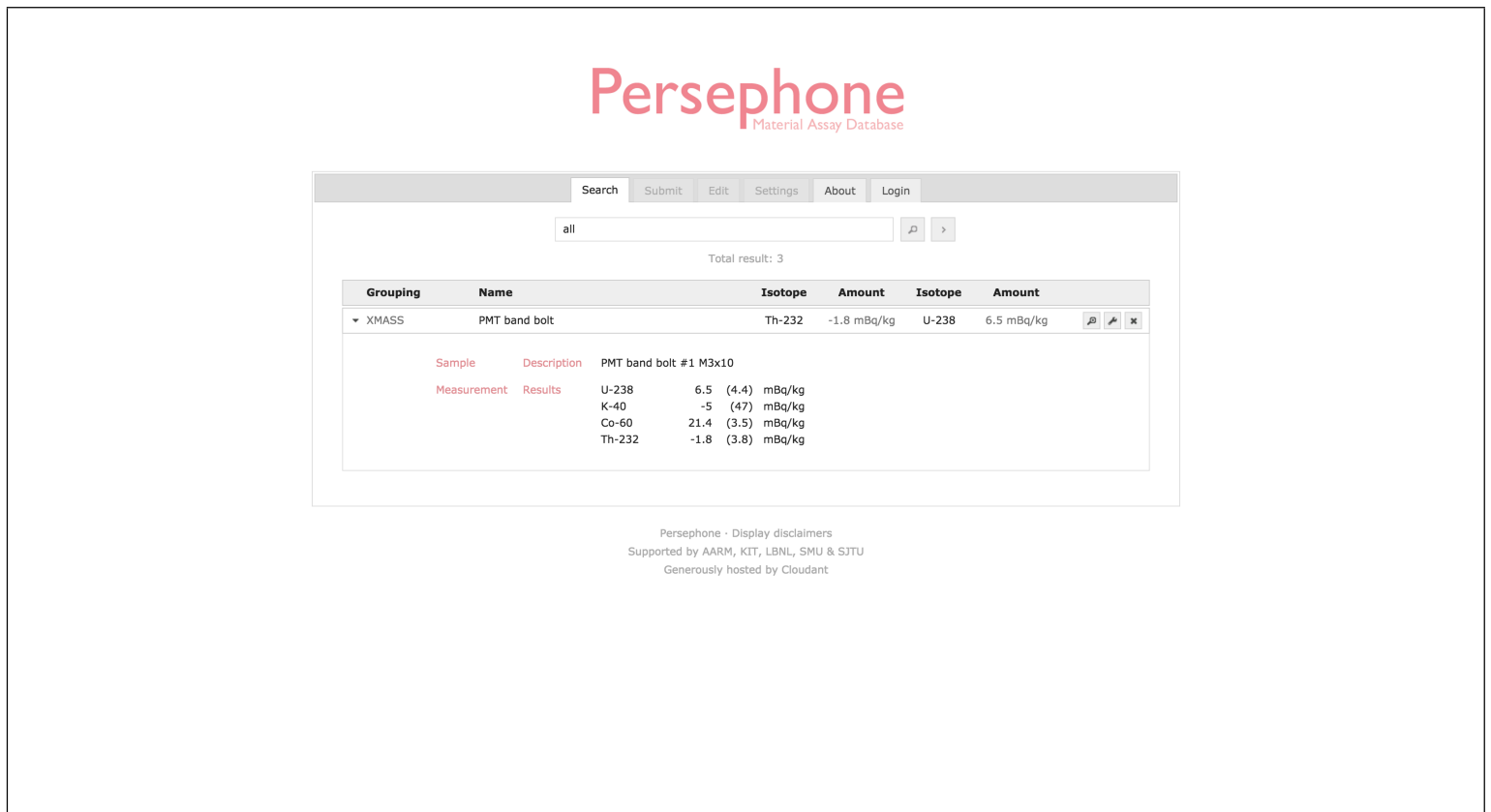


図 4.5 アップロードしたデータのブラウザ上での表示。

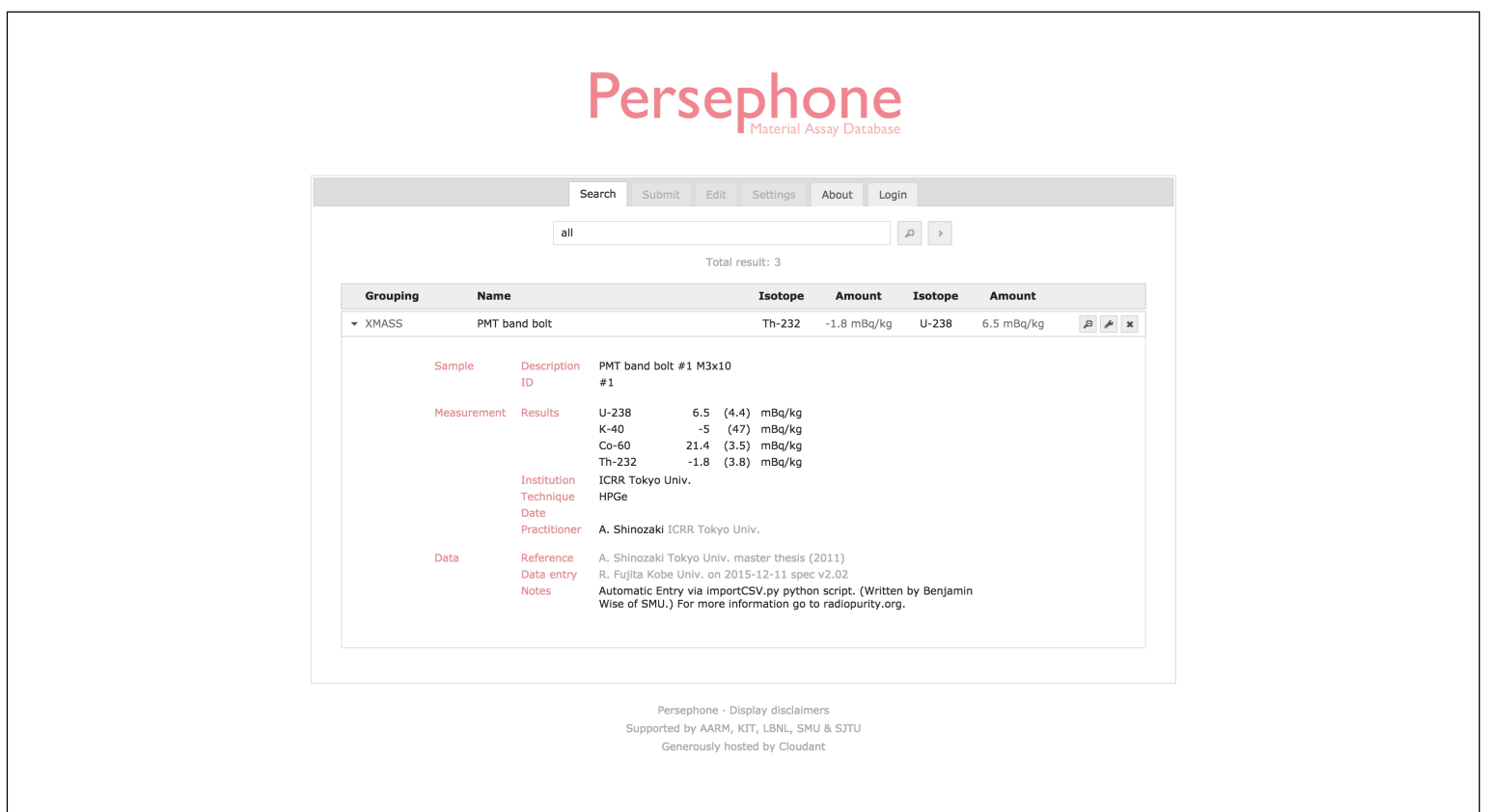


図 4.6 アップロードしたデータのブラウザ上での表示。詳細情報画面

## 第5章 液体キセノン中のラドン濃度の測定

### 5.1 目的

ウラン系列の希ガスである  $^{222}\text{Rn}$  は検出器部材から湧き出し、液体キセノン中に溶け込んでいることがわかっている。ラドンは希ガスでキセノンの自己遮蔽が効かないので、 $^{222}\text{Rn}$  の娘核種からの崩壊信号 ( $^{214}\text{Pb}$ ) は暗黒物質探索のバックグラウンドとなりうる。そのためラドン濃度が暗黒物質探索について与える影響を評価しなければならない。またラドンは液体キセノン中に一様に存在すると考えられるため、中心軸方向にしか動かせない内部較正と違い中心軸以外の座標の位置再構成の性能評価ができる。

$^{214}\text{Po}$  の半減期は  $164\ \mu\text{s}$  ととても短いので Bi の  $\beta + \gamma$  崩壊と Po の  $\alpha$  崩壊は連続して起こる。このことから Bi-Po 事象を容易にタグする事ができる。

暗黒物質探索において重要なのは  $10\ \text{keV}$  以下の低エネルギー側の領域である。 $^{222}\text{Rn}$  の娘核種である  $^{214}\text{Bi}$  は  $\beta$  崩壊し、低エネルギー側でもエネルギー落とす。また暗黒物質事象と同様に検出器に一様に存在するため、非常に重要なコントロールサンプルとなる。

XMASS-I 検出器の液体キセノン中ラドン濃度はコミッションングランの時に測定されており、 $8.2 \pm 0.5\ \text{mBq}$  と報告されている [35]。しかし検出器改修後にラドン濃度の測定は行われておらず、FADC の情報を用いた解析は今回が初めてである。本研究では XMASS 検出器改修後の 2013 年 11 月からの現在までの暗黒物質探索ランを用いて、ラドン濃度を測定し暗黒物質探索に与える影響を評価する。

### 5.2 ラドン娘核種の弁別

ここで図 3.4 のラドンの娘核である  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  に注目する。 $^{214}\text{Po}$  の半減期は  $164\ \mu\text{s}$  ととても短いので Bi の  $\beta + \gamma$  崩壊と Po の  $\alpha$  崩壊は連続して起こる。この特徴を活かして Bi と Po のペアを選び出すことによりラドン濃度を見積もる。

#### 事象弁別の条件

XMASS-I の実験データから Bi-Po 事象を弁別する方法について述べていく。カットにはノイズやチェレンコフ事象をカットするための preselection と preselection で残ったイベントから Bi-Po ペアを選ぶためのカットがある。以下にカットの内容を示す。

#### preselection

1. トリガーによるカット
2. PMT ヒット数によるカット
3. ヒットタイミングによるノイズカット
4. Chrenkov 事象カット

#### Bi-Po pair cut

1. Bi 候補の一つ前との時間差によるカット
2. Bi 候補と Po 候補の時間差によるカットによるカット
3. Po 候補の光量によるカットによるカット
4. Po 候補の波形の時定数カット

以下それぞれのカットについて解説していく。

#### トリガーによるカット

内部検出器のみでトリガーがかかったイベントのみを用いる。このカットによって外部検出器でトリガーがかかった宇宙線由来のバックグラウンドによる事象を取り除くことができる。

#### PMT ヒット数によるカット

ヒットした PMT が 4 本以上の事象を選択する。これによってノイズ事象を取り除く。

#### ヒットタイミングによるノイズカット

PMT ヒットの時間分布を作りその RMS が 100ns 以下の事象を選択する。本物の事象は図 5.1 のようにヒットタイミングがポアソン分布をするが、PMT のアフターパルスやノイズ事象は RMS が大きくなるためノイズ事象をカットできる。

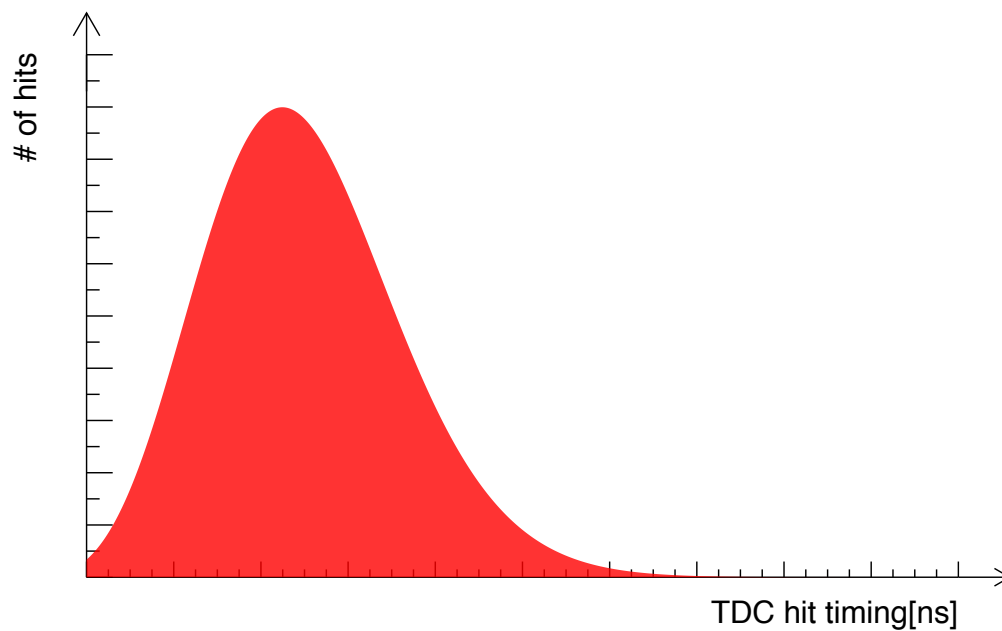


図 5.1 ヒットタイミングの分布図の例。この分布の RMS が 100ns 以上であった場合カットする。

#### チェレンコフ事象カット

XMASS ではシンチレーション光の他にチェレンコフ光も観測される。例えば PMT のクオーツ窓にフォトカソードから 線が入った際にチェレンコフ光が発生する (図 5.2)。シンチレーション光の時定数は数十 ns であるが、チェレンコフ光の時定数はそれより短いため多くの PMT に同時に光が到達する。このことから、最初の 20ns 間の PMT ヒットが全体のヒットのうちの 60% 以上の事象をチェレンコフ事象としカットする。

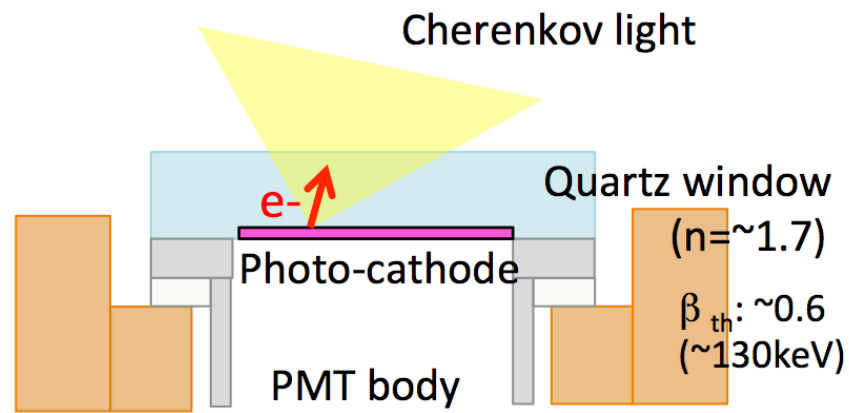


図 5.2 チェレンコフ事象の一例 [53]

### Bi 候補の一つ前の事象との時間差によるカット

図 5.3 に各時間差の定義を示す。アフターパルスが Bi 候補として選ばれることを防ぐために Bi 候補とその前の事象の時間差  $dt_{pre}$  が  $100 \mu\text{s}$  以上であるイベントを選択する。

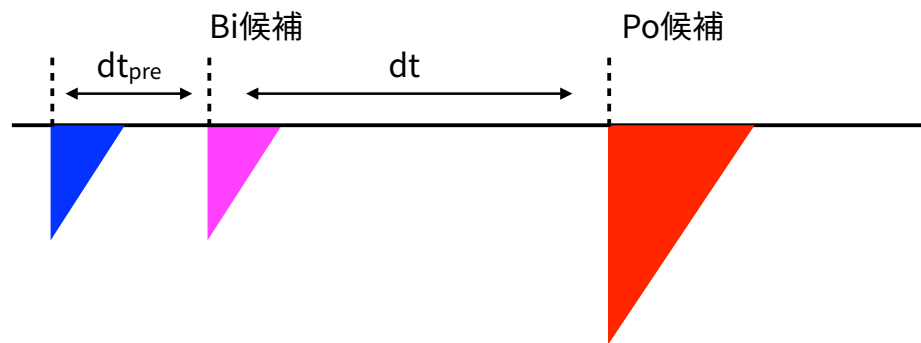


図 5.3  $dt_{pre}$  と  $dt$  の定義

### Bi 候補と Po 候補の時間差 ( $dt$ ) によるカット

$^{214}\text{Po}$  の半減期は  $164 \mu\text{s}$  であるため、Bi 候補と Po 候補の時間差  $dt$  が  $100 \mu\text{s} < dt < 1000 \mu\text{s}$  の事象を選択する。 $dt < 1000 \mu\text{s}$  を選ぶ理由はほとんどの Bi-Po ペアを捉えることができるからである。図 5.4 は preselection 後の  $dt$  分布である。後で説明するが  $dt$  分布は指数関数のようになるはずであるが  $dt < 100 \mu\text{s}$  の領域で事象が指数関数的な分布を外れている (減少している)。これは  $dt < 100 \mu\text{s}$  以下の Po 事象ではアフターパルスによってトリガーされてしまい、ヒットタイミングカットによってカットされてしまう事象が増えてくるのが原因であると考えられる。図 5.5、図 5.6 はアフターパルスによってトリガーされた  $\alpha$  事象の波形であるがこのヒットタイミングの RMS は  $327 \text{ns}$  であるためカットされてしまう。このため  $dt > 100 \mu\text{s}$  を選択する。ここまでのカットをかけてえられた Bi と Po 候補のスペクトルがそれぞれ図 5.7, 図 5.8 である。Po は  $\alpha$  崩壊をするので光量が多いはずであるが、図 5.8 では  $40000 \text{p.e.}$  程度以下の低エネルギー領域にも事象が存在する。一方図 5.7 では  $45000 \text{p.e.}$  程度以上の領域に  $\alpha$  事象が残っている。これらはアクシデンタル事象 (後述) であると考えられる。

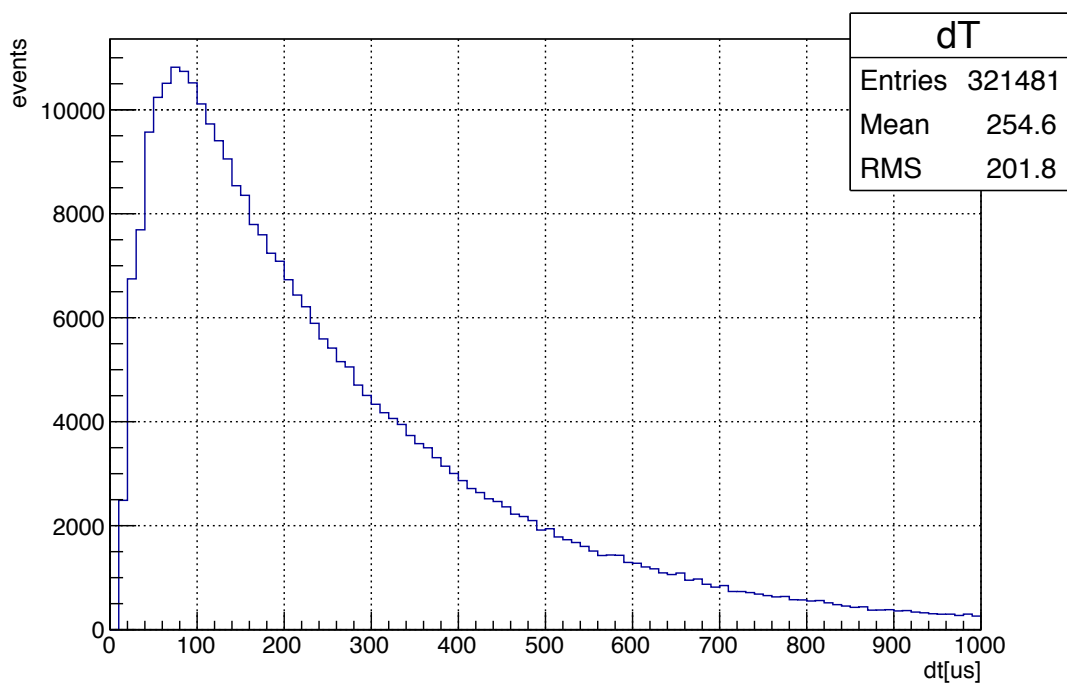


図 5.4 preselection 後の  $dt$  分布

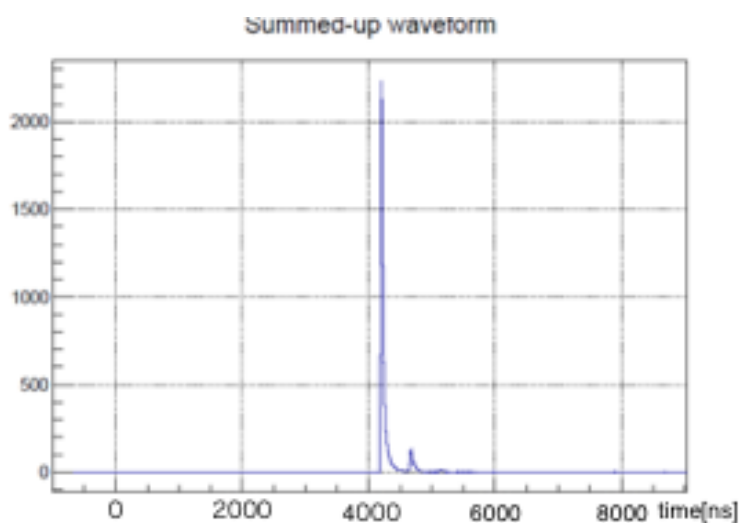


図 5.5 アフターパルスによってトリガーされた  $\alpha$  事象の波形。トリガータイミングは  $\text{time}=0[\text{ns}]$  なので本来は  $0 \text{ ns}$  付近にピークが見られるはずであるが、 $4000 \text{ ns}$  の付近にピーク ( $\alpha$  事象) が見られる。

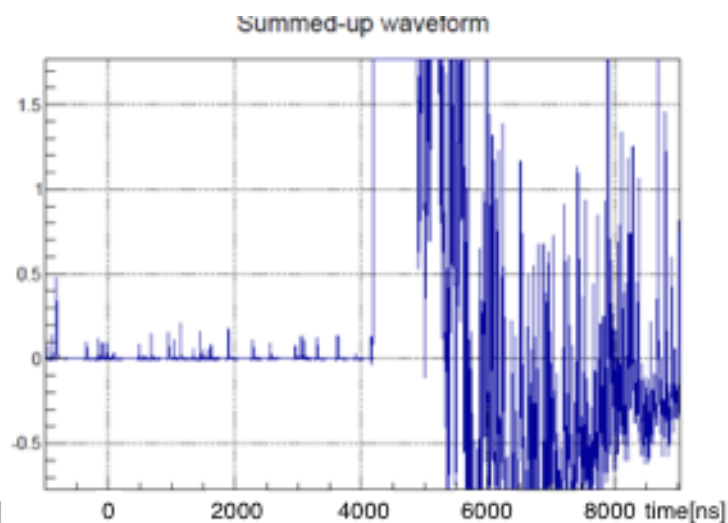


図 5.6 アフターパルスによってトリガーされた  $\alpha$  事象の波形 (拡大したもの)。 $0 \sim 4000 \text{ ns}$  付近に多数見えているのがアフターパルス (この事象の一つ前の Bi 候補事象由来) である。



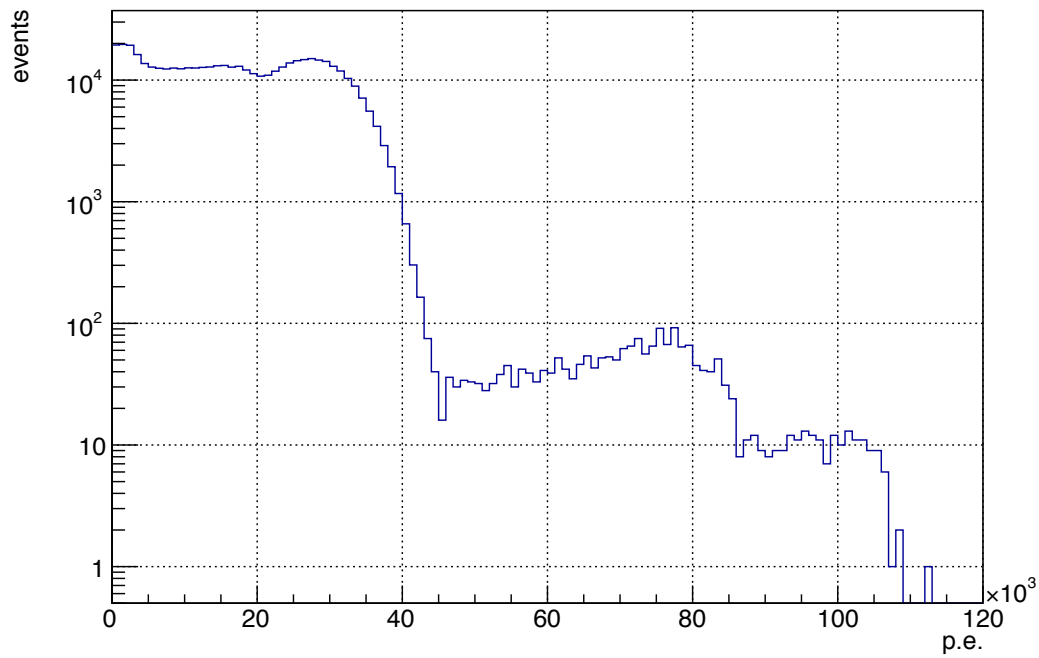


図 5.7 preselection+dt カットをかけた後の Bi 候補のスペクトル

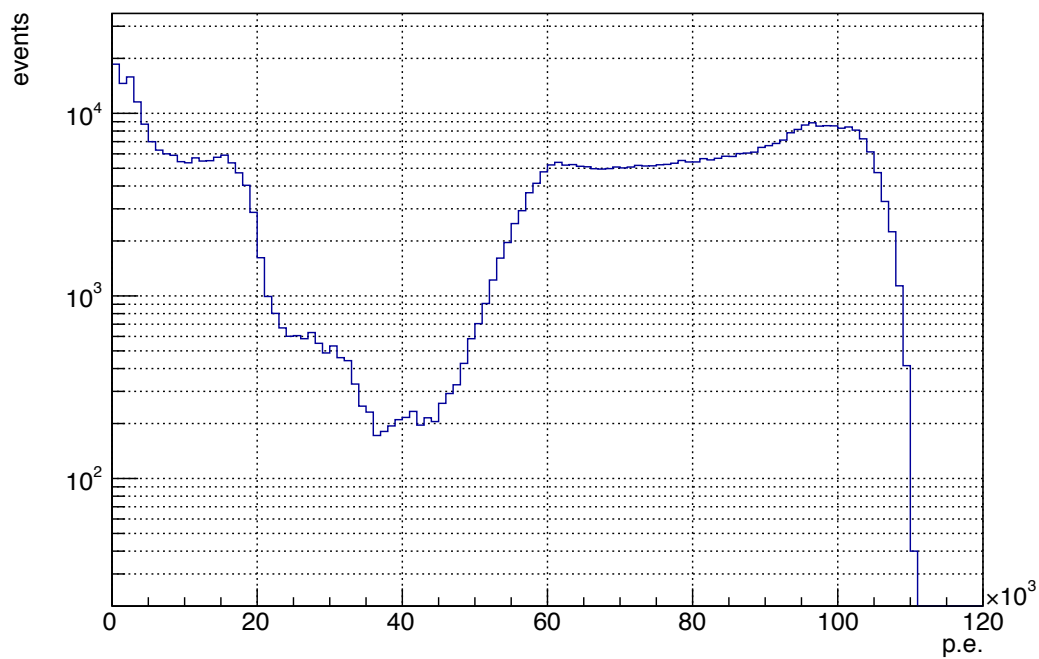


図 5.8 preselection+dt カットをかけた後の Po 候補のスペクトル

#### Po 候補の光量によるカット

すでに述べた通り  $^{214}\text{Po}$  は  $\alpha$  崩壊しそのエネルギーは 7.8MeV である。低エネルギー領域に存在するアクシデンタル事象を取り除くため、25000p.e. 以下の Po 候補事象をカットする。

#### Po 候補の波形の時定数カット

$^{214}\text{Po}$  は  $\alpha$  崩壊することからその時定数は短い。図 5.9 はこれまでのカットをかけた後の Po 候補の時定数 (decay slope) と光量の関係である。decay slope が 60ns 程度の時定数の長い事象は電子または  $\gamma$  線の事象で、decay slope が 30ns 付近の短い事象が  $\alpha$  事象である。また decay slope が  $\sim 5$ ns 付近に

も事象が存在するがこれは decay slope を計算するプログラムのバグによるもので、実際の波形は  $\alpha$  事象の時定数の  $\sim 30\text{ns}$  にフィッティングされるべき事象であったことがわかっている。電子、 $\gamma$  線事象を取り除くため、Po 候補の時定数が  $35\text{ns}$  以下のイベントを選択する。

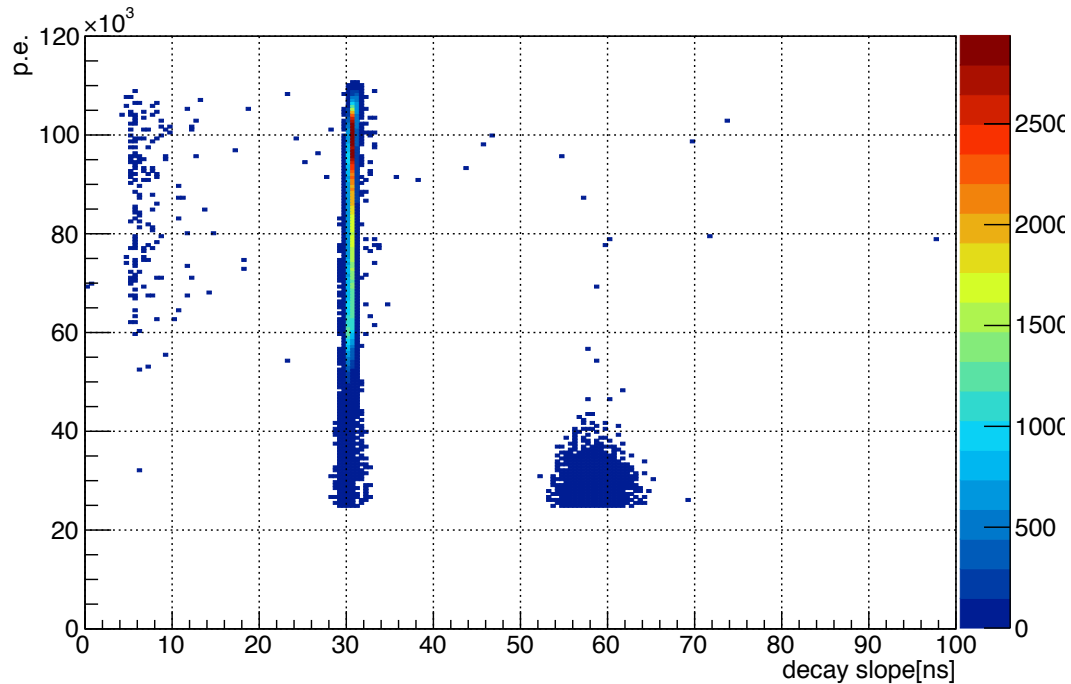


図 5.9 Po 候補の光量と時定数の関係

2 章で述べたとおり、XMASS は現在ガス相の不純物の純化のための循環を行っている。そのため解析は大きくラドンレートが変化したガス循環の前後にわけて行う。図 5.10, 図 5.11 はガス循環前の Bi 候補と Po 候補の各カットでのスペクトルである。またガス循環後の Bi 候補と Po 候補の各カットでのスペクトルを図 5.12, 図 5.13 に示す。Po 候補のスペクトルが低エネルギー側にテールを引いているが、これは PMT 窓や銅の前で起こったために PMT にすべての光が入らなかった事象であると考えられる。

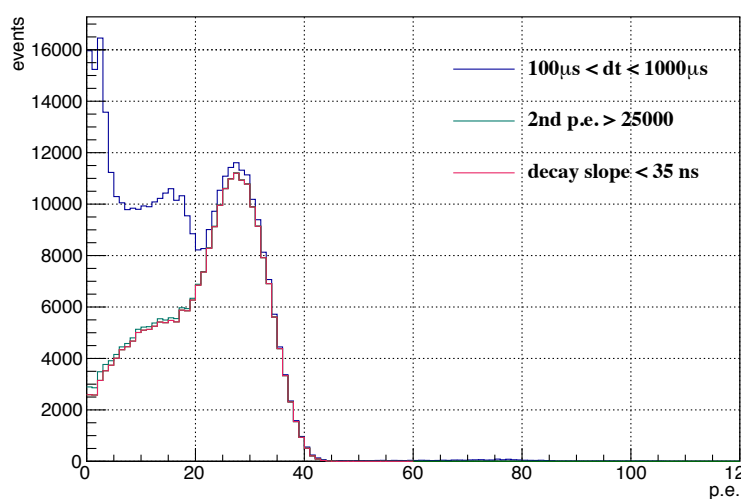


図 5.10 ガス循環前の Bi 候補のスペクトル。青：dt カット, 緑：光量カット, マゼンタ：時定数カット

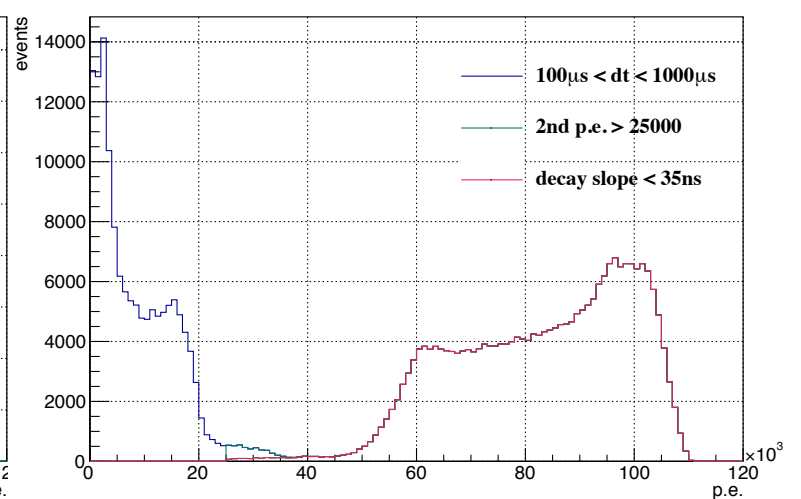


図 5.11 ガス循環前の Po 候補のスペクトル。青：dt カット, 緑：光量カット, マゼンタ：時定数カット

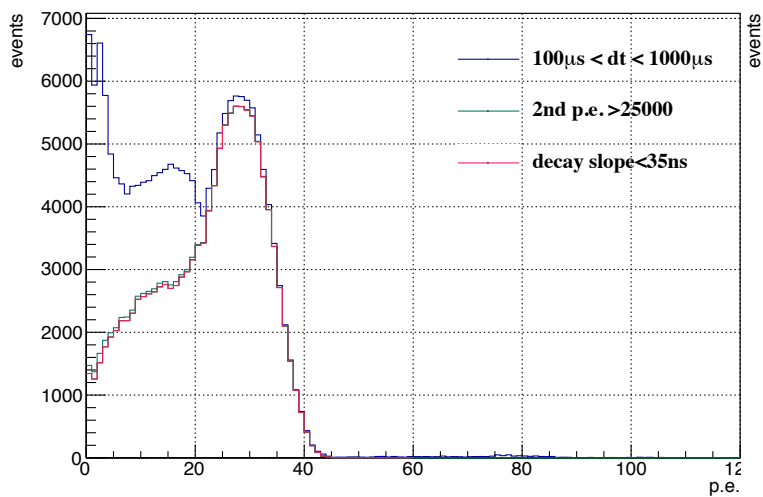


図 5.12 ガス循環後の Bi 候補のスペクトル。青：dt カット, 緑：光量カット, マゼンタ：時定数カット

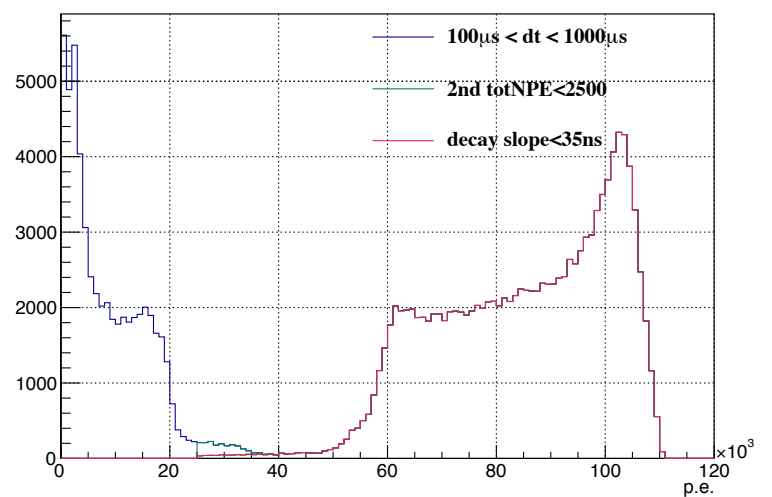


図 5.13 ガス循環後の Po 候補のスペクトル。青：dt カット, 緑：光量カット, マゼンタ：時定数カット

### 5.2.1 アクシデンタル事象の評価

#### dt 分布を用いた見積もり

図 5.14 は全てのカットをかけた後の  $dt$  分布である。横軸が  $dt[\mu\text{s}]$  で縦軸が事象数である。この分布を式 (5.1) でフィットした。

$$f(t) = p_0 + p_1 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{dt/\tau_{1/2}} \quad (5.1)$$

式 (5.1) は  $dt$  の関数で、正しく Bi-Po のペアが選ばれていた場合、 $\tau_{1/2}$  は Po の半減期である  $164 \mu\text{s}$  に一致するはずである。図 5.14 から  $\tau_{1/2} = 164 \pm 0.8 \mu\text{s}$  となっており誤差の範囲で  $164 \mu\text{s}$  と一致している。このことから正しく Bi-Po ペアが選ばれていることが分かる。

この分布を用いてアクシデンタル事象の数を見積もっていく。アクシデンタル事象は完全にランダムに起こると考えれば  $dt$  分布をとったときにはフラットな分布を描くはずである。よって  $p_0 = 18.4 \pm 8.0(\text{events}/\text{bin})$  を用いて、アクシデンタル事象数は

$$(18.4 \pm 8.0) \times 90\text{bin} = 1656 \pm 720\text{events} \quad (5.2)$$

となる。これは全ての Bi-Po 候補数 (149602 events) に対して  $1.1 \pm 0.5\%$  となり、純度の高い Bi-Po 候補を選び出す事ができたと言える。

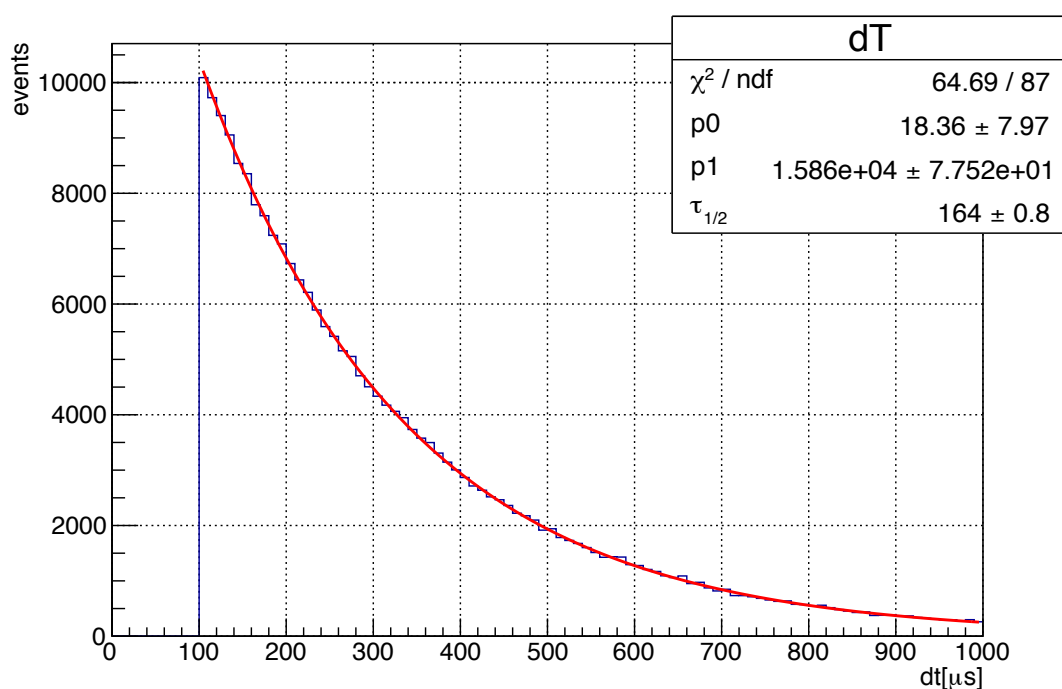


図 5.14 カット後の dt 分布

#### スペクトルを用いた見積もり

ここでは、スペクトルを用いたアクシデンタル事象の見積もりをガス循環前のデータを使って説明していく。アクシデンタル事象を Bi-Po ペアを選び出す時間範囲の 900 $\mu\text{s}$  以内に偶然連続して起こる事象として見積もる。図 5.15 は preselection+dt カットをかけた後の Po 候補のスペクトルとそのアクシデンタル事象のスペクトルである。図 5.15 のアクシデンタル事象は preselection + 1000  $\mu\text{s}$  < dt < 1900  $\mu\text{s}$  カットで残った事象である。図 5.15 から分かるように 25000p.e. 以下の領域ではアクシデンタル事象と Po 候補のスペクトルが重なっている。光量カットの基準を 25000p.e. としたのはこれが主な理由である。アクシデンタル事象のレートは

$$\begin{aligned}
 & (\text{Bi 候補のアクシデンタル事象のレート}) \times (\text{Po 候補のアクシデンタル事象のレート}) \times (dt \text{ の時間窓}) \\
 &= (1.98 \pm 2.4 \times 10^{-4}) \text{ count/s} \times (2.34 \times 10^{-2} \pm 2.8 \times 10^{-5}) \text{ count/s} \times 900 \mu\text{s} \\
 &= (3.98 \pm 0.01) \times 10^{-5} \text{ count/s}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

でとなるので、アクシデンタル事象数は

$$\begin{aligned}
 & (\text{アクシデンタル事象レート}) \times \text{livetime} \\
 &= (3.98 \pm 0.01) \times 10^{-5} \text{ count/s} \times 30248906\text{s} \\
 &= 1204 \pm 2\text{count}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

となる。

この事象数はすでに述べた dt 分布から見積もられたアクシデンタル事象数 1656 ± 720events と誤差の範囲で一致しており、この Bi-Po ペアの純度は  $\text{アクシデンタル事象数} / (\text{Bi-Po ペア事象数} - \text{アクシデンタル事象数}) = (0.8 \pm 0.001)\%$  となり純度が高い Bi-Po ペアが選り出せた。また循環後のデータについても同様の解析を行なった結果、アクシデンタル事象数は 927 ± 1count となり、純度は (0.7 ± 0.001)% となった。全てのカットをかけた後の Bi 候補とそのアクシデンタル事象のスペクトルを図 5.16 に全てのカットをかけた後の Po 候補とそのアクシデンタル事象のスペクトルを図 5.17 に示す。Bi 候補のアクシデンタル事象は カット 1 + 1000  $\mu\text{s}$  < dt < 1900  $\mu\text{s}$  で残った事象、Po 候補のアクシデンタル事象は カット 1 + 2 + 4 + 1000  $\mu\text{s}$  < dt < 1900  $\mu\text{s}$  で残った事象である (それぞれ式 (5.4) で求めた事象数になるように規

格化している)。図 5.16 から分かるように Bi 候補の純度は 20000p.e. 以下の領域で悪くなっている。この領域は暗黒物質事象が期待される領域なので、さらにスタディを進めていくことが必要である。

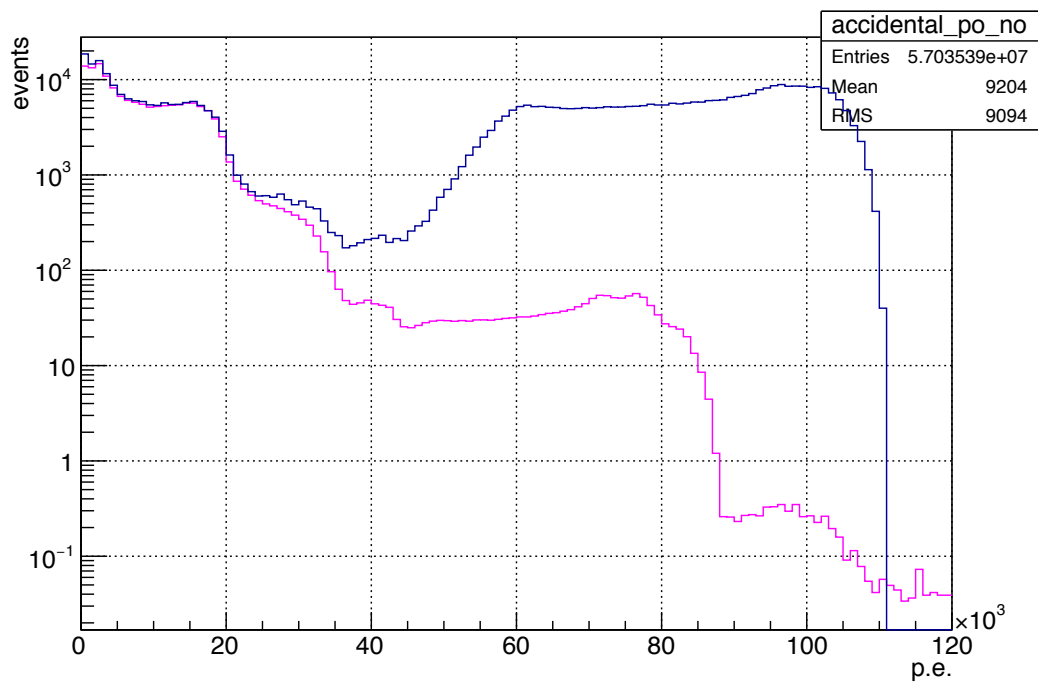


図 5.15 preselection+dt カットをかけた後の Po 候補とそのアクシデンタル事象のスペクトル。青：Po 候補，ピンク：アクシデンタル事象

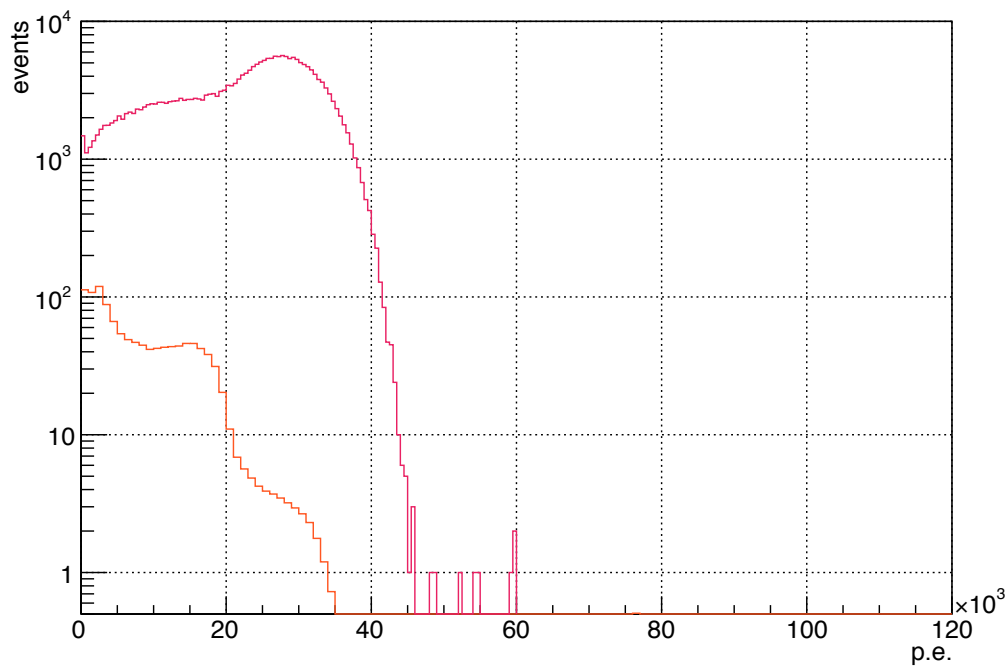


図 5.16 すべてのカットをかけた後の Bi 候補とそのアクシデンタル事象のスペクトル。マゼンタ：Bi 候補，オレンジ：アクシデンタル事象

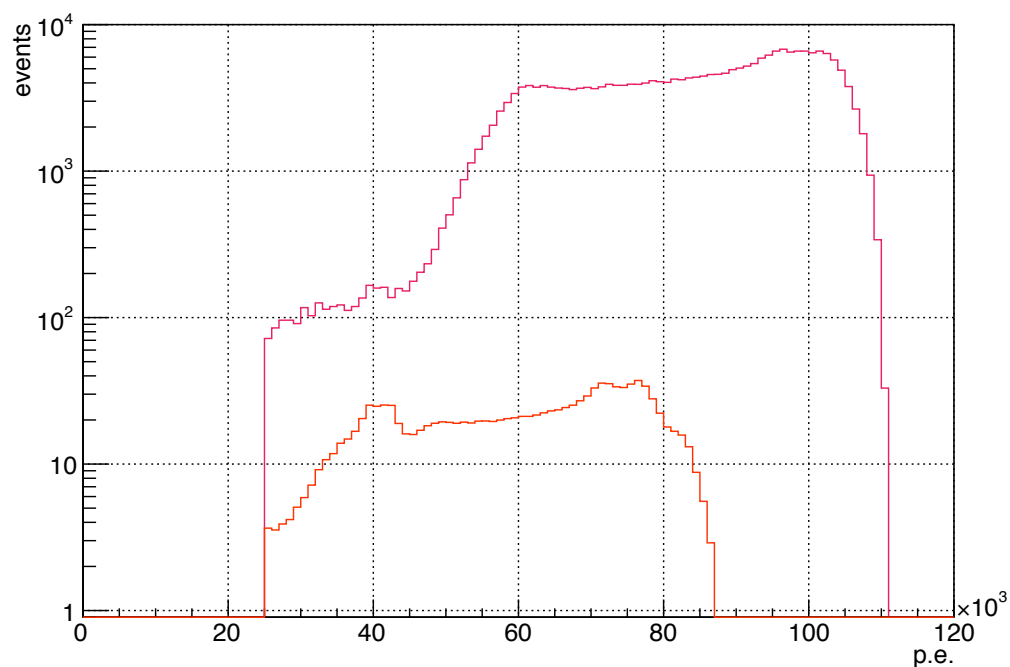


図 5.17 すべてのカットをかけた後の Po 候補とそのアクシデンタル事象のスペクトル。マゼンタ：Po 候補，オレンジ：アクシデンタル事象

### 5.3 ラドン濃度の見積もり

以上からラドン濃度を見積もっていく。解析の結果を以下にまとめた。

	ガス循環前	ガス循環後
Bi-Po ペア数	149602 events	125505 events
アクシデンタル事象数	1204 ± 2 events	927 ± 1 events
livetime	30248906 sec	17781855 sec
efficiency	0.65	0.65

efficiency は事象選別後に本物の事象が残る割合である。preselection、Po 候補の光量カットについては MC を用いて求め、 $dt$  カットについては半減期  $164 \mu\text{s}$  の崩壊曲線から計算で求めた。各カットでの efficiency を表 5.1 に示す。MC の  $\alpha$  事象の時定数は  $^{214}\text{Po}$  などを用いてチューニングされているため、Po 候補の時定数カットの efficiency については MC で見積もることができないが、このカットで Po 候補は除去されないと仮定した。表 5.1 から分かるように、全ての efficiency に対して  $dt$  カットの efficiency の寄与が支配的であることがわかった。

表 5.1 各事象選別での efficiency

事象選別	efficiency
preselection	> 99%
$dt$ カット	65%
Po 候補の光量カット	> 99 %
Po 候補の波形の時定数カット	~ 100%
total	65%

ラドン濃度は

$$(\text{BiPo ペア数} - \text{アクシデンタル事象数}) \times (\text{lifetime}) / \text{efficiency} \quad (5.5)$$

である。よって LXe 中のラドン濃度は XMASS 検出器全体 [/detector] で

ガス循環前 :  $7.54 \pm 0.02(\text{stat.})$  mBq/detector

ガス循環後 :  $10.51 \pm 0.03(\text{stat.})$  mBq/detector

となった。

系統誤差の評価 各カットについて系統誤差を評価する。評価した項目とその系統誤差を表 5.2 に示す。

表 5.2 系統誤差

	考慮した系統誤差の原因	sys
PMT のヒット数 > 4	使用したデータの期間の光量の変化による efficiency の差	< 0.1%
Cherenkov 事象カット	使用したデータの期間の光量の変化による efficiency の差	< 0.1%
ヒットタイミングによるノイズカット	使用したデータの期間の光量の変化による efficiency の差	< 0.1%
2 事象目の光量カット	light yield が $\pm 5\%$ 変化したときのカットのスレッシュホールドの変化	< 0.1%
$100 \mu\text{s} < dt < 1000 \mu\text{s}$	$dt$ の範囲が $\pm 40\text{ns}$ (トリガーの分解能) ずれたときの efficiency の差	< 0.1%
single alpha との inconsistency	single alpha で求めたレートと Bi-Po coincidence で求めたレートの差	+16%

使用したデータの期間の光量の変化による efficiency の差

停電によって起きた光量の変化を考慮する。MC で LXe の吸収長を変化させることにより光量の変化 (5%) が efficiency に与える影響を見積もった。

light yield が  $\pm 5\%$  変化したときのカットのスレッシュホールドの変化

Po 候補の光量カットを 25000p.e. でかけているが、その光量 (25000p.e.) を  $\pm 5\%$  変化させたときの残ったペア数の差を系統誤差とした。

single alpha との inconsistency

トリウム系列の  $^{220}\text{Rn}$  は  $\sim 39\mu\text{Bq}$  と測定されておりこの値は  $^{222}\text{Rn}$  のレートに比べて十分小さく無視できる。そのため選ばれた Bi-Po ペア数から見積もった  $\alpha$  事象 ( $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ ) のレートは全ての  $\alpha$  事象のレートと一致するはずである。図 5.18 は下記のカットによって選んだ single alpha と得られたラドンレートをを用いて MC で再現した  $\alpha$  事象のエネルギースペクトルである。3000keV 以上の領域が液中の  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  による  $\alpha$  事象である (3000keV 以下の領域は現在調査中であるが検出器表面に付着した  $^{210}\text{Pb}$  などによる事象であると考えられる)。

single alpha cut

1. トリガーによるカット
2. PMT ヒット数によるカット
3. ヒットタイミングによるノイズカット
4. Chrenkov 事象カット
5. 前の事象との時間差 > 10ms
6. FADC 波形の時定数 < 35ns

図 5.18 からわかるように single alpha のほうがレートが高いことがわかる。2つのスペクトルの比をとってフィッティングした結果 single alpha のほうが 16% 高いとわかった。これはガス循環前と循環後のレートの差をとることで確認できる。ガス循環前後で single alpha と Bi-Po のレートの差が同じであればこの差はラドンによるものではないと確認できる。ガス循環前と循環後のレートの差をとり同様の解析を行うとやはり single alpha のほうがレートが高いことがわかった (図 5.20, 図 5.21)。原因は調査中である。系統誤差としては 2 種類の解析結果のより大きいガス循環前の差 (16%) を見積もった。

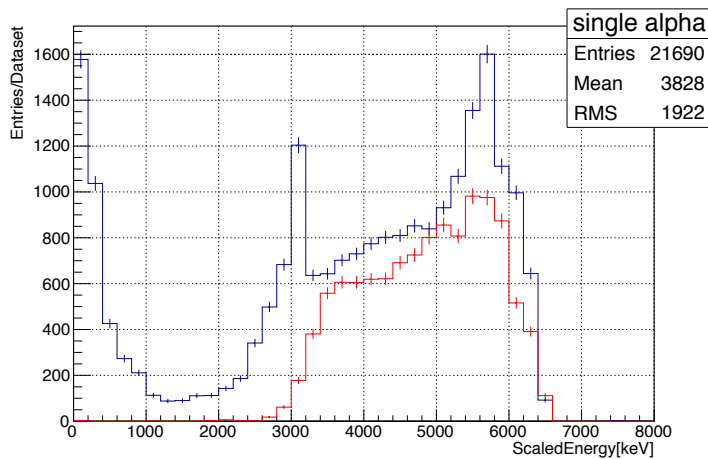


図 5.18 青 : single alpha(data),  
赤 :  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ (MC) のエネルギースペクトル

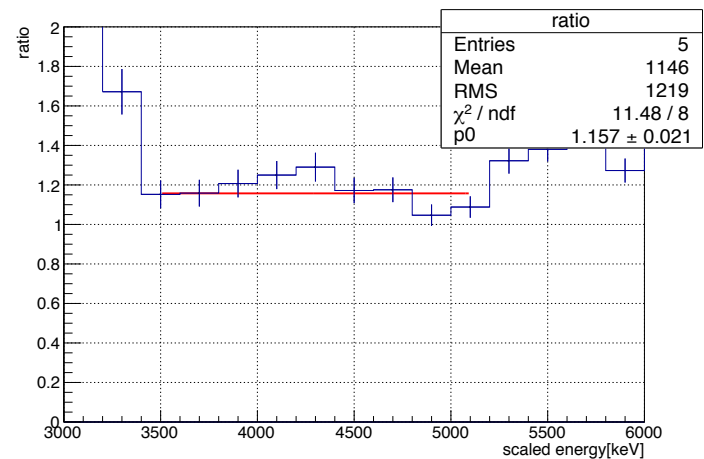


図 5.19 single alpha と  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ (MC) の比を p0 フィッティングしたもの

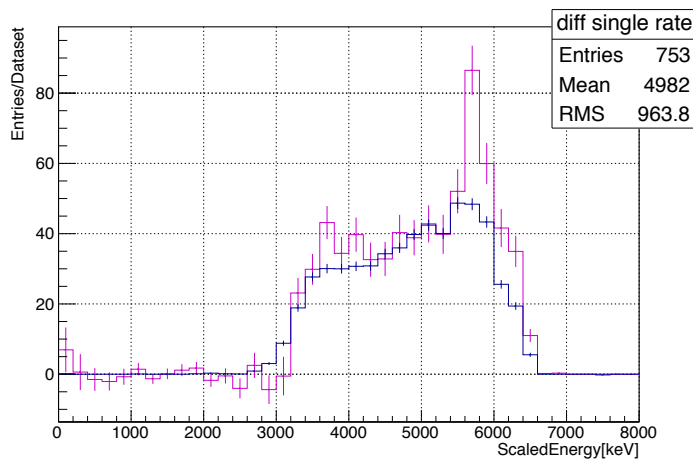


図 5.20 マゼンタ : single alpha のガス循環の前後の差 (data), 青 :  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ (MC) のエネルギースペクトル

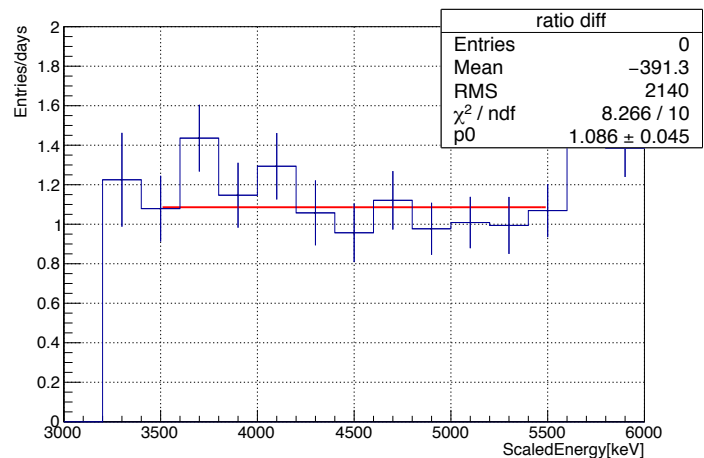


図 5.21 左図の single alpha と  $^{222}\text{Rn} + ^{218}\text{Po}$ (MC) の比を p0 フィッティングしたもの

以上から検出器全体 [/detector] のラドン濃度は、

ガス循環前 :  $7.54 \pm 0.02(stat.) + 1.21(sys.)$  mBq/detector  
 ガス循環後 :  $10.51 \pm 0.03(stat.) + 1.68(sys.)$  mBq/detector

と見積もられた。



### 5.3.1 暗黒物質探索におけるラドンバックグラウンドの影響の評価

求めたラドンレートからラドンバックグラウンドが暗黒物質探索に与える影響を評価する。 $^{222}\text{Rn}$  の崩壊系列で  $^{214}\text{Bi}$  と  $^{214}\text{Po}$  の崩壊は連続崩壊なのでコインシデンスを取ること除去できるため、暗黒物質探索のバックグラウンドとなるのは  $\beta$  崩壊し低エネルギー側にエネルギーを落とす  $^{214}\text{Pb}$  のみである。図 5.22 と図 5.23 は  $^{214}\text{Pb}$  を液体キセノン中で一様に崩壊させたときのスペクトルである (縦軸は求めたラドンレートで規格化した)。暗黒物質事象が期待される 10keV 以下で  $^{214}\text{Pb}$  の寄与は  $1.2 \times 10^{-4}$ [dru] である。図 5.24 は LXe 全体積のスペクトルである。図 5.24 から全てのカットをかけた後のレートは 5keV で  $2 \times 10^{-2}$ [dru] であるので、 $^{214}\text{Pb}$  の寄与は無視できるレベルであることがわかった。

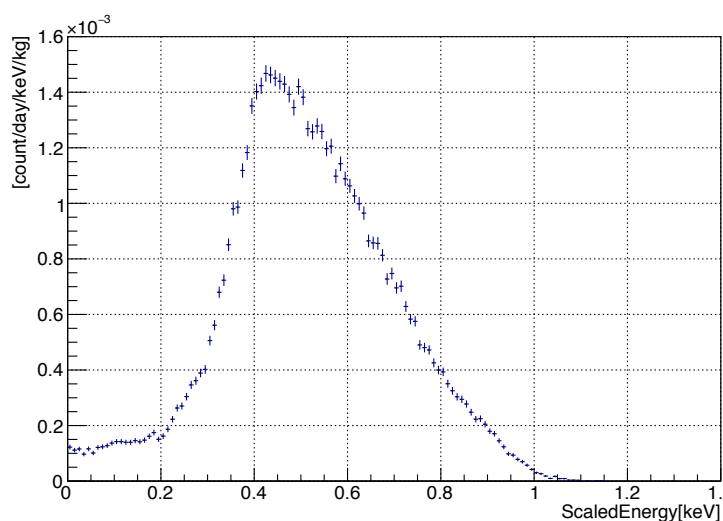


図 5.22  $^{214}\text{Pb}$  のスペクトル (MC)

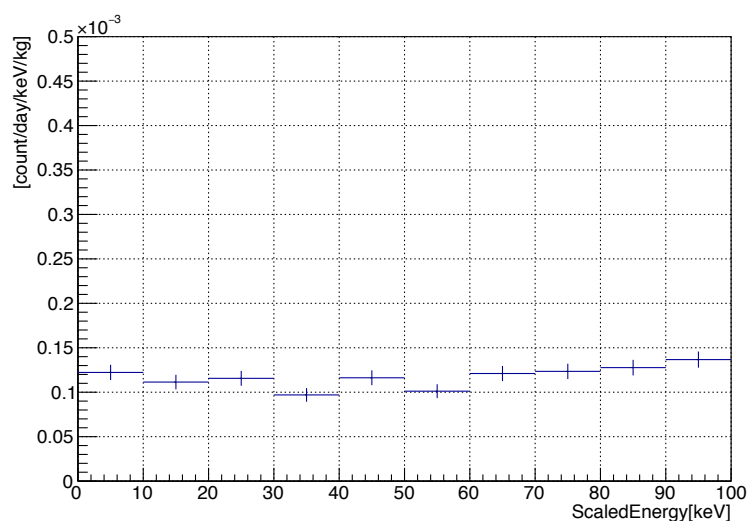


図 5.23  $^{214}\text{Pb}$  のスペクトル (MC), 100keV 以下を拡大

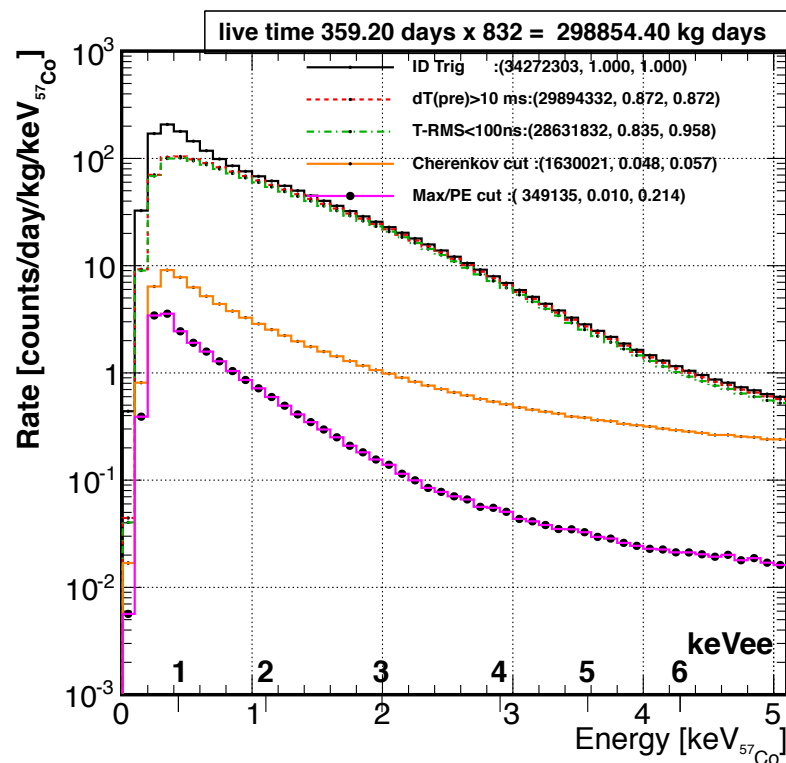


図 5.24 LXe 全体積のスペクトル [54]。黒：トリガーによるカット，赤：前の事象との時間差 >10ms，緑：ヒットタイミングによるノイズカット，オレンジ：チェレンコフ事象カット，マゼンタ：ヒットパターンによる壁際事象カット。keV<sub>ee</sub> は電子散乱事象エネルギー、keV<sub>57Co</sub> は <sup>57</sup>Co によって較正したエネルギー

### 5.3.2 時間的安定性の評価

ここではラドンレートの時間的な安定性について評価する。XMASS 検出器改修後の 2013 年 11 月から現在までのすべての観測データについて Bi-Po ペアを選び出し、およそ 1 日に 1 点ずつプロットしたものを図 5.25 に示す。2013 年 11 月と 2014 年 3 月は中性子による較正を行った期間のため暗黒物質観測データは存在しない。2015 年 3 月から急にレートが上がっているが、これは検出器のガス相の循環を開始したためである。それ以外の期間では大きな変動は見られずラドンレートは安定している。私はこのラドンレートの計算が自動的に行われるようにし、実験グループ内で公開できるようなサイトを開発した (図 5.26 はそのページのスクリーンショット)。このページでは 2 週間、1 ヶ月、全ての期間のラドンレートが見られ、またフォームに期間を入力することによってその期間のラドンレートを確認することもできるようになっている。

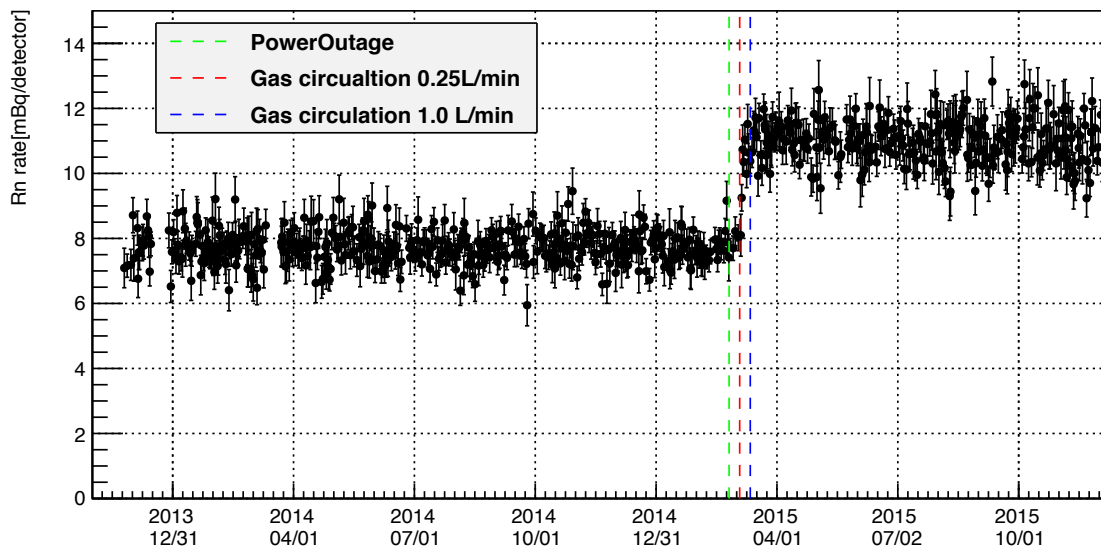


図 5.25 ラドンレートの変動 (6 時間以上連続取得された観測データのみ)

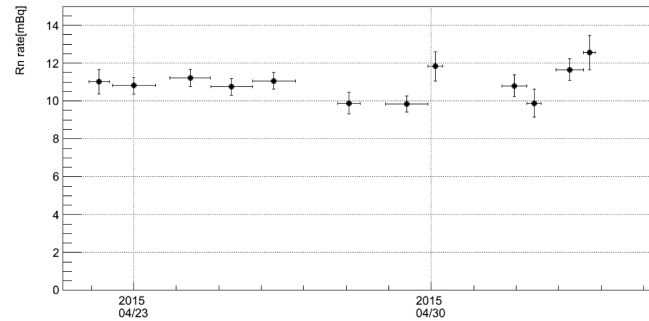
## Time variation of Rn rate

222Rn rate of good runs(over 6 hours run) in LXe

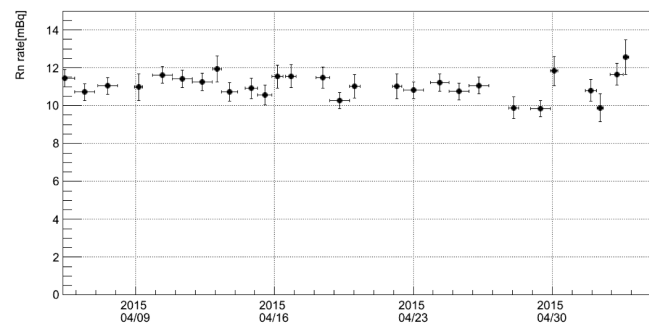
input a term like example

from  to

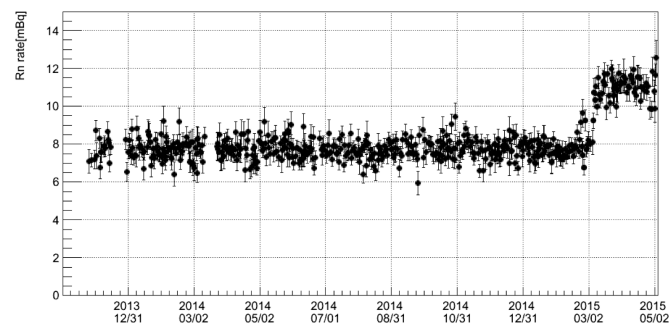
### Rn rate for 2 weeks



### Rn rate for 1 month



### Rn rate of all runs



### Data list of Rn rate for all runs

[show here](#)

created & maintained by Rei FUJITA [rei.f@stu.kobe-u.ac.jp](mailto:rei.f@stu.kobe-u.ac.jp)

図 5.26 グループ内部で公開されているラドンレートを確認できるページ。

2015年3月までのラドンレートは中央値で検出器全体で7.7mBqでその変動(RMS)は0.5mBqである(図5.27)。この寄与は中央値： $1.2 \times 10^{-4}$ [dru]、変動： $8.0 \times 10^{-6}$ [dru]に相当する。またガス循環後のラドンレートは中央値で検出器全体で11mBqでその変動(RMS)は0.7mBqである(図5.28)。この寄与は中央値： $1.7 \times 10^{-4}$ [dru]、変動： $11 \times 10^{-6}$ [dru]に相当する。図5.29はXMASSの観測データを用いて行なった季節変動解析で得られた振幅である[55]。ここからわかるように観測された季節変動振幅は $5 \times 10^{-2}$ [dru]程度であるため、ラドンの変動が季節変動解析に与える影響は無視できる。またガス循環後の変動( $\sim 7\text{mBq} \rightarrow \sim 11\text{mBq}$ )

もまた無視できる程度であることがわかる。

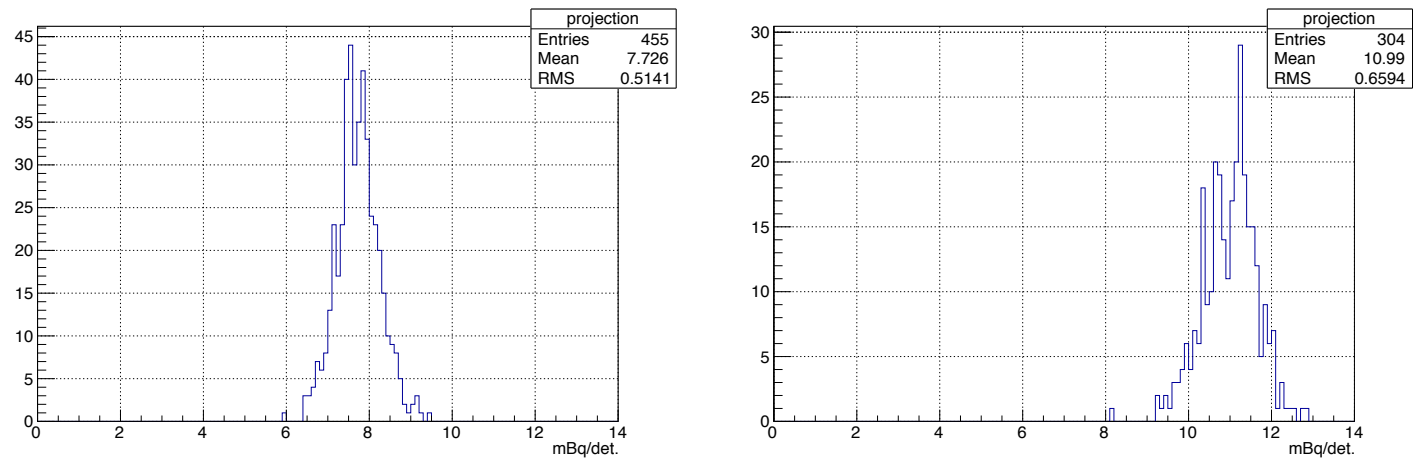


図 5.27 図 5.25 の 2015 年 3 月までを Y 軸に射影したもの 図 5.28 図 5.25 の 2015 年 3 月からを Y 軸に射影したもの

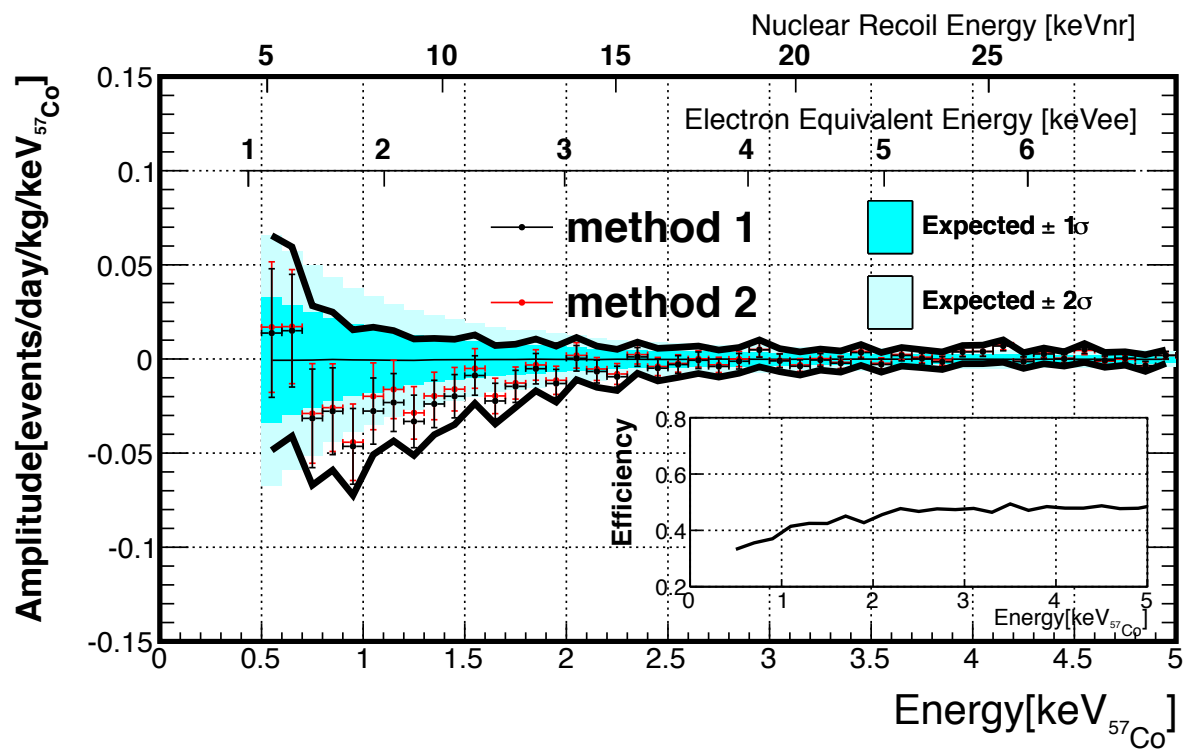


図 5.29 季節変動の振幅 [55]。実線：振幅に対する 90% C.L. の上限、黒点、赤点：2つの方法を用いてデータをフィッティングして得られた振幅、青、水色バンド：季節変動がない場合に期待される振幅（それぞれ  $1\sigma$ ,  $2\sigma$ ）

## 第6章 まとめ

暗黒物質は様々な宇宙の観測により間接的に存在が確認されている正体不明の物質である。暗黒物質は未知の素粒子であると考えられ、直接観測するための実験が世界中で行われている。XMASS 実験は大質量、高純度の液体キセノンを用いて暗黒物質の発見を目指す直接探索実験である。暗黒物質由来の信号は頻度が極めて少なく、検出器に落とすエネルギーが微小であるため、暗黒物質探索実験にとってバックグラウンドの低減は重要である。

XMASS 実験が行われている神岡地下では宇宙線が少ない環境を活かして、様々な稀事象探索が行われている。これらに共通の極低バックグラウンド技術を共有していくことで効率的に発展していくことが可能になる。そこで本研究では検出器素材の放射能の情報を共有するためのデータベースを作成した。既存のデータベースである radiopurity.org のシステムを移植することで神岡実験用のデータベースを作成した。試験段階として本学でテストサーバーを立ち上げて、CSV ファイルを正しくデータベースにアップロードできることを確認した。一般的な CSV 形式から JSON 形式に変換するためのツール (importCSV.py) の改良を行なった。改良前は形式を変換するためにプログラムを2回実行しなければならなかったが、改良後は一回で変換することが可能になった。また改良前は radiopurity.org からダウンロードできる CSV 形式をツールを用いてそのまま JSON 形式に変換することが出来なかったが、本研究ではこの部分を改良し CSV をユーザが自ら整形することなくそのまま変換できるようにした。

また本研究ではバックグラウンドとなる  $^{222}\text{Rn}$  の濃度を Bi-Po ペアを選別することにより高精度で測定した。その結果  $^{222}\text{Rn}$  濃度は、XMASS 検出器全体 [ /detector ] で

$$\begin{aligned} \text{ガス循環前} & : 7.54 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 1.21(\text{sys.}) \text{ mBq/detector} \\ \text{ガス循環後} & : 10.51 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 1.68(\text{sys.}) \text{ mBq/detector} \end{aligned}$$

となった。またこの Bi-Po サンプルに含まれるアクシデンタル事象の割合は

$$\begin{aligned} \text{ガス循環前} & : \text{アクシデンタル事象数} / (\text{Bi-Po ペア事象数} - \text{アクシデンタル事象数}) = 0.8\% \\ \text{ガス循環後} & : \text{アクシデンタル事象数} / (\text{Bi-Po ペア事象数} - \text{アクシデンタル事象数}) = 0.7\% \end{aligned}$$

であった。純度の高いサンプルを選び出すことができたため、低エネルギー領域のコントロールサンプルとして利用できると思われる。

このラドンバックグラウンドの寄与は LXe 全体積の事象頻度に比べて十分小さく無視できることがわかった。またラドンレートを自動的に解析・表示するシステムを構築し、季節変動解析におけるラドンレートの安定性について評価した。2015年3月から行っているガス循環の前後で大きくラドンレートが変化したが、その他の期間については安定していた。ラドンレートの変動は季節変動の振幅に比べて十分小さく影響を与えないことがわかった。

## 参考文献

- [1] J. Beringer, et al. (Particle Data Group) , Phys. Rev. D 86 ,010001
- [2] K. G. Begeman, A. H. Broeils and R. H. Sanders, MNRAS 249(1991)523
- [3] D. N. Spergel et al., Astrophys. J. Supp. 148(2003)175
- [4] <http://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery>
- [5] R. Adam et al.(Planck Collaboration) arXiv:1502.01582v2 [astro-ph.CO] (2015)
- [6] Begeman, K.G., Broeils, A. H. and Sanders, R.H., Mon. Not. Roy. astr. Soc. 249 (1991) 523-537.
- [7] <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/>
- [8] <http://hubblesite.org/gallery/album/pr2001032b/>
- [9] C. Alcock et al. (MACHO Collaboration),Astrophys.J. 542 (2000) 281-307
- [10] P.Tisserand et al. , Astron.Astrophys.469:387-404,2007
- [11] Fukuda, Y. et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562-1567.
- [12] Jungman, G., Kamionkowski, M., Griest, K., Phys. Rep. 267 (1996) pp.196-373
- [13] A. Sopczak, Phys. Rep. 359 (2002) 169.
- [14] S. J. Asztalos, et al. , Phys. Rev. Lett. 104 , 041301(2010)
- [15] J. Ellis et al. , Phys. Lett. B 481 (2000) 304
- [16] R.Agnese et al. , Phys. Rev. Lett. 112, 241302 (2014)
- [17] C.E.Aalsethi , Phys. Rev. D 88, 012002 (2013)
- [18] R. Bernabei et al. , Eur. Phys. J. C 73 , 2648 (2013)
- [19] M.G. Boulay et al.(DEAP Collaboration) , 2012 J. Phys.: Conf. Ser. 375 012027
- [20] J. Angle et al., Phys. Rev. Lett. 107, 051301 (2011)
- [21] D. S. Akerib et al. , Nucl. Instrum. Meth. A 704 111-126 (2013)
- [22] W. B. Atwood et al. , Astrophys. J. 697,1071-1102 (2009)
- [23] M. Ackermann et al. , Phys. Rev. Lett. D 88 , 082002 (2013)
- [24] O. Adriani et al. , Astrophys. J. 811, 21 (2015)
- [25] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration) , Phys. Rev. Lett. 113, 121102 (2014)
- [26] M. Di Mauro, F. Donato, N. Fornengo, R. Lineros, A. Vittino , JCAP04(2014)006
- [27] M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration) , arXiv:1601.00653v1
- [28] G. Angloher et al. (CRESSST Collaboration) , arXiv:1509.01515
- [29] E. Aprile et al. , Phys. Rev. Lett. 107, 131302 (2011)
- [30] E. Armengaud et al., Phys. Lett. B 702 (2011) 329-335.
- [31] D. Akimov, et al. , Phys. Lett. B 709, 14 (2012).
- [32] Baldini, A. et al., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 13 (2006) pp.547-555.
- [33] Aprile, E., Doke, T., Rev. Mod. Phys. 82 (2010) 2053-2097.
- [34] Hitachi, A., Takahashi, T., Phys. Rev. B 27 (1983) pp.5279-5285.
- [35] K. Abe et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 716 (2013) 78-85
- [36] 本木大資, 東海大学大学院理学研究科博士論文 (2012)
- [37] The Super-Kamiokande Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A501(2003)418-46
- [38] <https://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [39] 小林雅俊、他 XMASS collaboration, 日本物理学会 2014 年秋季大会. Link:Indico in Kamioka Observa-

tory

- [40] The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Lett. 452 (1999) 418
- [41] 南野彰宏, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2004)
- [42] 小川洋、他 XMASS Collaboration, 日本物理学会 2014 年春季大会. Link:Indico in Kamioka Observatory
- [43] M.Ishitsuka, master thesis, University of Tokyo (2001)
- [44] Abe, K. et al. (XMASS Collaboration), Atropart. Phys. 31 (2009) pp.290-296.
- [45] Richard B. Firestone et al. Table of Isotopes Version 1.0 nima.2014.11.012i
- [46] アイソトープ協会、アイソトープ手帳、第 11 版、(2011).
- [47] <https://github.com/nepahwin/persephone>
- [48] <http://couchdb.apache.org/>
- [49] J. C. Loach et al. , AIP Conf. Proc. 1549, 8 (2013)
- [50] <https://github.com/couchapp/couchapp>
- [51] <https://www.virtualbox.org/>
- [52] 篠崎 晃宏 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2011)
- [53] 竹田敦、他 XMASS Collaboration, 日本物理学会 2012 年春季大会. Link:Indico in Kamioka Observatory
- [54] 山下雅樹、他 XMASS Collaboration, 日本物理学会 2015 年春季大会. Link:Indico in Kamioka Observatory
- [55] K. Abe et al. XMASS Collaboration, arXiv:1511.04807



# 謝辞

修士課程の2年間、研究を行うにあたりお世話になった皆さんに対し感謝の意を表します。

特に指導教員の竹内康雄先生には、修士の2年間 XMASS 実験で大変お世話になりました。本論文の執筆の際は些細な点まで丁寧に指導していただきありがとうございました。私のどんな些細な疑問に対しても親切にかつ丁寧な解説をしてくださいました。心から感謝を申し上げます。

XMASS 実験の共同研究者の皆さんにも大変お世話になりました。実験代表者である鈴木洋一郎先生はミーティングの際にたくさんのコメントを頂きました。森山繁栄先生は、解析ミーティングで大変熱心に指導してくださいました。研究に対しての真っ直ぐな姿勢に身が引き締まる思いでした。解析で最もお世話になったのは小川洋先生です。解析ツールの使い方や XMASS 実験について、丁寧に教えていただきました。大変忙しいにもかかわらず、個人ミーティングをする時間を作ってまで指導していただきました。またその明るいキャラクターで癒やされました。平出克樹先生には、DAQ のことについて教えていただきました。山下雅樹先生はミーティングの際にコメントを頂いた他、神岡に行った当初とても気さくに話しかけてくださいました。梁炳守先生には、MC のことについて教えていただきました。また学生である自分に対して普段から気軽に接してくださいました。その他多くのコラボレーターの皆さんに対して感謝を申し上げます。

神戸大学粒子物理学研究室の皆さんには感謝してもきれないぐらいです。身内賢太郎先生はいつも学生目線で接してくださり、また私のくだらない話にも付き合ってくださいました。飲み会が大変楽しかったです。研究に関しても学部のおきから丁寧な指導をしていただきました。藏重久弥先生には、素粒子物理学やその他の趣味のことまでその知識の豊富さに大変勉強になりました。山崎裕司先生のお話は興味深い話が大変多く、いつも楽しみに聞いていました。越智敦彦先生は質問したときにとっても詳しく答えてくださり、また話の引き出しの多さに驚きました。原俊雄先生にはゼミの際やコロキウムの際にご指導頂きました。丁寧な解説のおかげで理解が進みました。鈴木州先生はゼミでお世話になりました。また私たち学生にも気軽に接していただきました。矢野孝臣先生はとても親しみやすい先生でした。食事に連れて行ってくださることも多く大変お世話になりました。幸せになってください。前田順平先生は指導の際、的確なコメントとフォローをされていたことが記憶に残っています。また豊富な経験談も大変おもしろかったです。清水志真先生は出張の都合上あまり話す機会はなかったですが、やさしく接していただきました。秘書の横山有美さんには、出張の際や普段の生活、配達物の検品などでお世話になりました。

それから研究室の先輩である細川佳志さん。XMASS 実験でも先輩としてたくさんのことを教えていただきました。普段の生活でも生意気な私を大きな心で受け入れて頂きました。研究に関してだけでなく、人間としてとても尊敬できる先輩でした。ありがとうございました。岸本巴さんはいつも研究室の雰囲気盛り上げていました。ハイキング企画や飲み会などみんなをひっぱっていく頼りがいのある先輩でした。岡直哉さんには神岡にいった際にいろいろお世話になりました。研究に関してもたくさん相談に乗っていただき感謝しています。矢ヶ部遼太さん、あなたはそのキャラクターでいつも研究室の中心で輝いていました。失礼な態度もあったかもしれませんが、親しくしてくれて感謝します。長谷川誠さん、山根史也さん、陳叶さんのおかげで楽しい研究生生活がおくれました。ありがとうございました。

XMASS の先輩である小林雅俊さんにはたくさんお世話になりました。研究からご飯のことまで気を使っていたいてありがとうございました。神岡の同期である毛笠莉沙子さん、阿久津良介君、乗田貴之君にいてくれたおかげで神岡で一人で過ごさずにすみました。

同期の橋本隆君、学部の時から長い付き合いになりましたが今までありがとう。研究室に夜遅くまで残って、くだらない話をしながら二人で研究をしたことが思い出に残っています。あなたのおかげで研究で辛いときも頑張れた気がします。山内悟君はその性格でいつも場を和ませてくれました。気の強い人が多いなかあなた

がいたおかげでいい雰囲気の中で過ごせました。ありがとう。木戸将吾君は外部からこの研究室に来て馴染みにくかったかもしれないけど、最後は仲良くなれたと思います。博士課程に進学しても研究頑張ってください。

後輩の皆さんには先輩らしいことをあまりしてあげられなかったかもしれません。帝釋稜介君、池田智法君にはいつも刺激を受けていました。阿部圭悟君は食事に行くことも多くて B5 の中では一番仲良かったと思います。また中澤美季さんには癒やされました。小川圭将君は B4 ながら積極的に話してくれました。その他の後輩の皆さんも頼りない先輩だったかもしれませんが仲良くしてくれてありがとう。

最後に、私をここまで育ててくれて大学院まで進学させてくれた家族に感謝します。