

修 士 学 位 論 文

XMASS 実験における
PMT 由来のガンマ線バックグラウンドの研究

平成 25 年 2 月 8 日

専 攻 名 物理学専攻
学籍番号 112S120S
氏 名 細川佳志

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

素粒子・宇宙物理学において、現在最も解明が求められるものの一つとして暗黒物質がある。XMASS 実験は現在暗黒物質の直接探索を目的としており、岐阜県飛騨市神岡町の地下 1000m に設置された XMASS 検出器を用いている。

XMASS 検出器において、光電子増倍管に含まれる放射性不純物から発生するガンマ線が主要なバックグラウンドとなる。本論では、XMASS 検出器における光電子増倍管由来のガンマ線のシミュレーションを行い、観測データとの比較など解析を行った結果について述べる。

観測データとシミュレーションの比較の結果、観測データのバックグラウンドの高エネルギー領域の大部分は光電子増倍管由来のガンマ線バックグラウンドで説明出来る事を示した。しかし、低エネルギー領域ではシミュレーションから予測される、光電子増倍管由来のガンマ線バックグラウンドレベルを大きく超えるバックグラウンドが存在する事が明らかになった。

本研究や他研究の結果によって、予想外であったバックグラウンド源の正体も明らかになり、2012 年 6 月よりバックグラウンド事象除去などを目的とする検出器の改修が行われている。2013 年春から改修後の検出器を用いた観測を再開する。

また、XMASS 実験における検出器シミュレーションはプロセスに非常に長い時間が必要とする。高統計のシミュレーションデータを高速に得るためには、シミュレーションプロセスの高速化が不可欠である。シミュレーションツールキット Geant4 の新機能を用いたシミュレーションの高速化の研究を行った。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	暗黒物質	1
1.2	宇宙マイクロ波背景放射	3
1.3	宇宙論的背景	3
1.4	Local dark matter density	4
1.5	暗黒物質候補	4
1.5.1	MACHO	4
1.5.2	ニュートリノ	4
1.5.3	Axion	4
1.5.4	WIMP	5
第 2 章	キセノンの特性	6
2.1	物理的特性	6
2.2	同位体	9
2.3	光学的性質	10
2.3.1	発光過程	10
2.4	暗黒物質探索実験での利用	12
2.4.1	液体シンチレーターとしての利用	12
2.4.2	暗黒物質に対する散乱断面積	12
第 3 章	XMASS 実験	15
3.1	検出方法	15
3.2	実験装置	15
3.2.1	800kg 検出器	15
3.2.2	水タンク及び 20 インチ光電子増倍管	17
3.2.3	キャリブレーション	18
3.2.4	エレクトロニクスハット	21
3.2.5	キセノン純化装置	21
3.3	バックグラウンド	21
3.3.1	キセノン外部バックグラウンド	21
3.3.2	キセノン内部バックグラウンド	23
3.4	期待される感度	24
第 4 章	PMT ガンマ線の研究	26
4.1	光電子増倍管に含まれる放射性不純物	26
4.2	エネルギースケールと分解能の較正	28

4.2.1	エネルギースケールの較正	28
4.2.2	分解能の較正	29
4.2.3	結果	30
4.3	光電子増倍管由来のバックグラウンドシミュレーション	31
4.3.1	崩壊発生位置	31
4.3.2	シミュレーション事象発生数	31
4.4	結果	33
4.4.1	^{40}K	33
4.4.2	^{60}Co	34
4.4.3	^{232}Th	35
4.4.4	^{238}U	35
4.5	高エネルギー領域	36
4.6	低エネルギー領域	36
4.7	他バックグラウンドとの足し合わせ	38
4.8	XMASS 検出器の改造計画	38
第 5 章	シミュレーションプロセスの高速化	40
5.1	Geant4	40
5.1.1	geometry の作りかた	40
5.2	時間浪費の原因	41
5.2.1	optical photon process in XMASS simulation	41
5.2.2	プロセス時間とステップ数	41
5.2.3	Process times of optical photons	44
5.3	Boolean Operation	48
5.3.1	Boolean operation in XMASS simulation	48
5.3.2	Track の衝突判定	49
5.4	Parallel World Geometry	51
5.4.1	小規模シミュレーションでのプロセス高速化の実証	51
第 6 章	まとめ	53
付録 A	崩壊系列等	54
A.1	ウラン系列	54
A.2	トリウム系列	54
A.3	崩壊図	54
A.3.1	^{40}K	54
A.3.2	^{60}Co	54
A.3.3	^{85}Kr	54

第1章 序論

我々の宇宙には大質量を持つが光学的に観測できない物質が存在する、という事が様々な観測によって間接的に確認されている。その物質は光を発さない性質から暗黒物質 (Dark matter) と呼ばれ、宇宙全体の物質密度の約 8 割を占めると考えられている。しかし、暗黒物質の直接的な観測は実現されておらず、詳細な性質も理解されていない。ここでは、暗黒物質について簡単に述べる。

1.1 暗黒物質

1930 年代に F.Zwicky によって行われた乙女座銀河団の銀河の平均二乗速度の測定値が、光量から予想できる銀河の質量からは説明出来ないほど大きな値を示した事から、光学的に観測出来ない質量を持った「暗黒物質」が存在するのではないかという疑問が生まれた。

渦巻き銀河の回転速度は、銀河中心からの距離 r 、速度 $v(r)$ 、 r 内に含まれる質量 $M(r)$ としてケプラーの法則から

$$v^2(r) = G \frac{M(r)}{r} \quad (1.1)$$

と求める事が出来る。ここで、 G は重力定数である。 r 、 v を観測から求める事で式 1.1 から半径 r 内の質量 $M(r)$ を推定する事ができる。

1960 年代には、渦巻き銀河の回転曲線の観測が行われた。図 1.1 に NGC6503 渦巻き銀河の回転曲線を示す。エラーバーの付いた点は観測によって得られた銀河の回転速度である。破線と点線はそれぞれ銀河円盤とガスによる寄与であり、点破線は観測された銀河の回転速度を得るのに必要とされる暗黒物質の寄与である。観測によって円盤とガスの質量が得られ、その不足分が暗黒物質の寄与だと考えられる。光っている物質は銀河中心から約 5kpc 以内に集中しており、仮に銀河が光る物質だけで構成されていると考えると、その外側での回転速度は $v^2 \propto 1/r$ に従って小さくなっていくはずである。しかし、観測では r が増加しても回転速度は平坦なままであり、このような回転曲線を描くためには銀河には光学的に観測出来ない質量を持った「暗黒物質」が存在しなければならない。

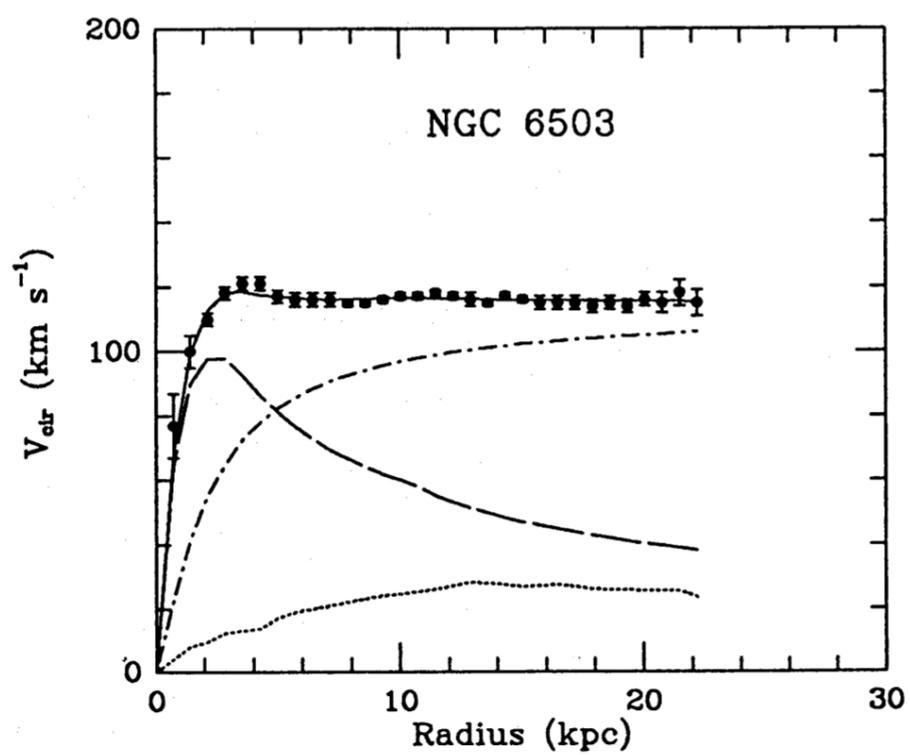


図 1.1: 渦巻き銀河の回転曲線 [1]

1.2 宇宙マイクロ波背景放射

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background (CMB) radiation) とは、全地球上で等方的に観測される電磁波であり、ビッグバン理論の証拠とされる観測事実である。その温度は約 3K で、ビッグバン後の宇宙の膨張によって冷やされた放射光の名残であると考えられている。1992 年に COBE 衛星が全天の CMB マップを観測し、CMB のスペクトルが黒体放射のスペクトルと一致する事が分かった [2]。その後、CMB は WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) によって精密に観測され、わずかな揺らぎがある事が明らかになった [3]。CMB は宇宙初期の密度を反映しているため、このわずかな異方性から宇宙初期の構造を読み取る事ができる。図 1.2 は WMAP によって観測された CMB の分布である。

また、CMB の観測により様々な宇宙定数が求められている。最近の結果によると、宇宙の全物質密度は $\Omega_M h^2 = 0.1349 \pm 0.0036$ である [4]¹。ここで、 h は $100\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ で規格化されたハッブル定数 ($h = 0.704 \pm 0.013$) である。また、WMAP のデータと重水素の観測データはよく一致しており、Big Bang Nucleosynthesis (BBN) に基づくと宇宙のバリオン (通常の物質) 密度は $\Omega_b h^2 = 0.02260 \pm 0.00053$ となる [5]。この二つの密度の差は非バリオンの暗黒物質の存在を示唆している。

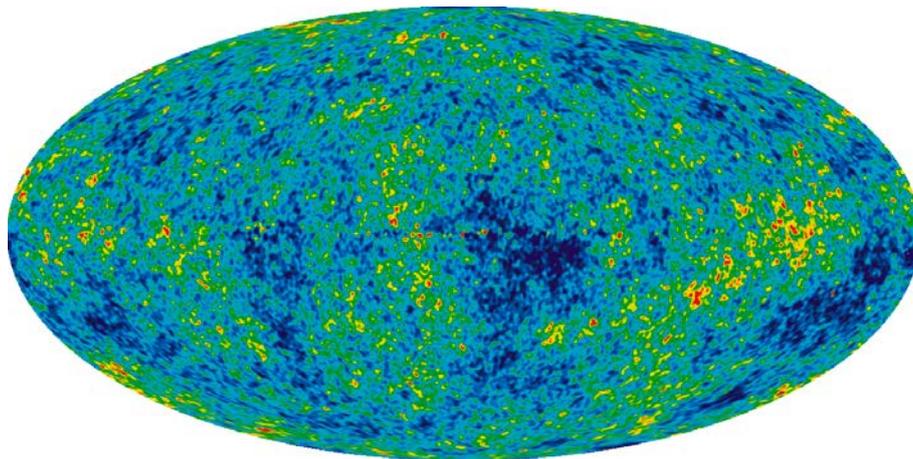


図 1.2: WMAP によって観測された CMB の揺らぎ

1.3 宇宙論的背景

タイプ Ia 超新星の観測によって、宇宙が加速膨張している事が明らかになった。タイプ Ia 型は白色矮星と巨星の連星系による爆発で、観測的及び経験的に絶対等級がほぼ一定であるので、みかけの等級から距離を求められる。この観測事実は、暗黒エネルギーという新しいタイプのエネルギーの導入を求めている。タイプ Ia 超新星の観測結果は、フラットな宇宙に対して宇宙のエネルギー密度が $\Omega_\Lambda h^2 \simeq 0.7$ 、全物質密度が $\Omega_M h^2 \simeq 0.3$ であると示している [6, 7]。

¹宇宙にあるエネルギー密度としては、バリオン、暗黒物質、放射、真空のエネルギーと、4 種類に分類される。そしてそれぞれに対するエネルギーの密度パラメータを Ω_b 、 Ω_{DM} 、 Ω_r 、 Ω_Λ と書く。4 番目の真空のエネルギー密度とは、アインシュタインが導入した宇宙定数ことである。また、宇宙の全物質の密度パラメータを $\Omega_M = \Omega_b + \Omega_{DM}$ と表す。

さらに、銀河の大規模構造からも、宇宙の物質密度を見積もる事が可能である。これは SDSS(Sloan Digital Sky Survey) によって観測され、WMAP の結果と同様に密度の低い宇宙を肯定する結果となっている。($\Omega_M \simeq 0.30 \pm 0.04$ [8])

1.4 Local dark matter density

暗黒物質の存在は様々な宇宙の観測によってその証拠が挙げられているが、太陽系の位置する銀河にも同様に暗黒物質が存在しているのかを知る事は、暗黒物質を観測するためには重要な要素である。特に、暗黒物質直接検出実験においては観測可能な事象数を見積もるために地球における暗黒物質密度が重要な情報となる。

太陽系が存在する銀河系の回転曲線の観測結果のフィットによって、太陽系付近の暗黒物質密度は

$$\rho_0 \sim 0.3 \text{GeV}/c^2/\text{cm}^3 \quad (1.2)$$

となる [9]。

1.5 暗黒物質候補

以上で述べたように、我々の宇宙には非バリオンな暗黒物質が $\Omega_{DM} \sim 20\%$ ほど存在することが、近年の観測によって分かっている。ここでは、暗黒物質の候補を簡単に紹介する。

1.5.1 MACHO

MACHO(MAssive Compact Halo Objects) は、白色矮星、中性子星、ブラックホールなどの暗い天体である。MACHO が惑星の光線上を通過する際に重力レンズ効果で増加する光を観測する実験が、MACHO、EROS、OGLE である。MACHO グループは Large Magellanic Cloud の数億個の星を観測し、8 個の候補を見つけた [13]。この 8 個は予想されるバックグラウンド以上ではあるが、暗黒物質の主要な成分になるとは考えられない。これらの星は $0.5M_\odot$ 程度の質量を持つと推測されるが、これでは halo 質量の 20% 程度にしかならない。

1.5.2 ニュートリノ

ニュートリノは暗黒物質の特徴をいくつか持っており、暗黒物質の候補である。ニュートリノは Super-Kamiokande による大気ニュートリノ振動 [14]、太陽ニュートリノ振動の観測 [15] などから質量を持つ事が証明されている。しかし、ニュートリノの質量は極めて小さく、相対論的な運動エネルギーを持っているため、宇宙の大規模構造を作る事が出来ず、暗黒物質の主要な成分にはなり得ない。

1.5.3 Axion

アクシオンは素粒子物理学における CP 対称性の破れを解決する為に導入された粒子である。アクシオンもまた暗黒物質の候補として議論されてきた。アクシオンは質量が $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{eV}$ の範囲であれば暗黒物質の候補となりうる [16]。

1.5.4 WIMP

Weakly Interacting Massive Particles(WIMP) は現在最も有力な暗黒物質の候補である。WIMP は素粒子の標準模型の拡張である、超対称性理論 (SUSY)[17] から導かれる超対称性粒子であり、その中でも最も軽い Lightest Susy Particle(LSP) ニュートラリーノが最有力候補である。

ニュートラリーノは photon、 Z^0 ボソン、ヒッグスボソンの超対称性粒子の線形結合として表され、R-parity 保存のため安定である。これら超対称性粒子は、標準模型の粒子と重力または弱い相互作用を通してのみ相互作用を行う。

XMASS 実験では、WIMP 型暗黒物質を直接捕らえる事を目標としている。

第2章 キセノンの特性

本論文の主題である XMASS 実験は液体キセノンを検出媒体として用いている。本章では、キセノンの特性について述べる。

2.1 物理的特性

キセノンは、

- 高い質量数
- 高い密度
- 比較的扱いやすい液体層での温度
- 光電子増倍管などで直接観測可能なシンチレーション光波長

を持つ希ガスで、暗黒物質探索実験に非常に有利であり、暗黒物質探索実験などの低バックグラウンド、低エネルギー閾値実験でシンチレーターとして用いられる。表 2.1 にキセノンの性質をまとめる。

キセノンは大気圧、常温下では気体であり、165.1K 以下で液体となる。図 2.1 にキセノンの相図を示す。また、キセノンは液体の状態で 2.96g/cm^3 と高い密度を持つ。そのため、外部から入射する放射線に対して高い遮蔽効果を持つ。図 2.2 にキセノンのガンマ線に対する減衰係数を示す。

Property	Value	Condition
原子番号	54	
質量数	131.29[18]	
沸点	165.1 K[18]	1 atm
融点	161.4 K[18]	1 atm
密度	2.96 g/cm^3 [19]	161.5 K in liquid
吸収長	28.7 mm[20]	in liquid

表 2.1: キセノンの性質

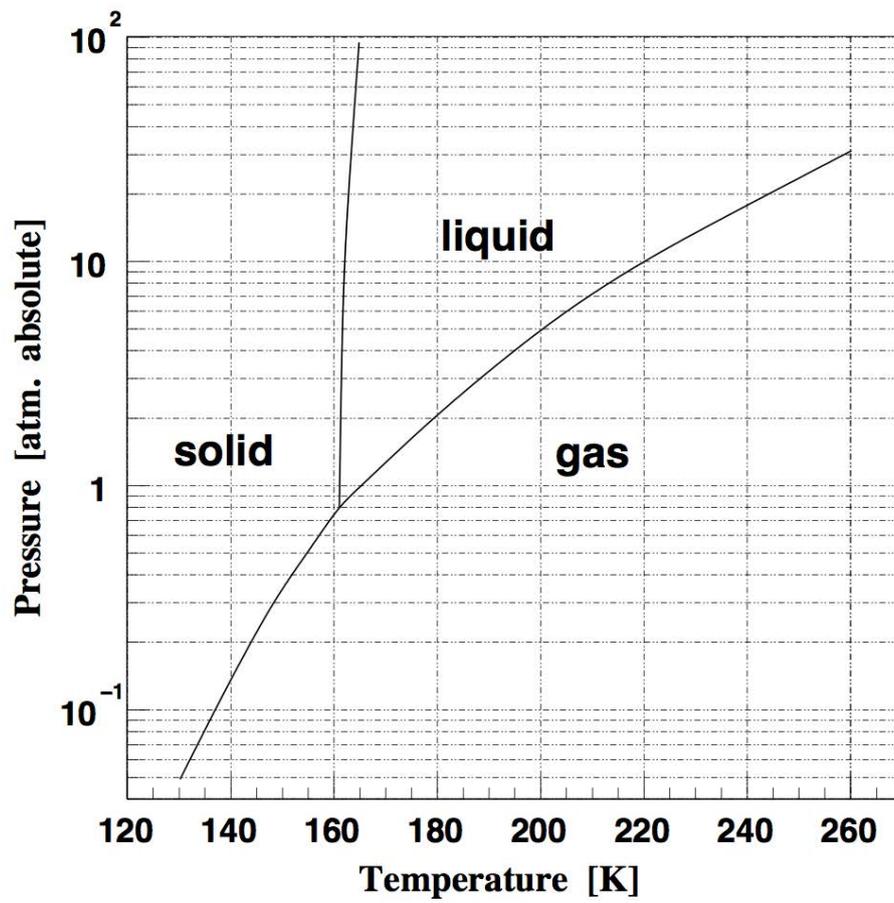


図 2.1: キセノン相図

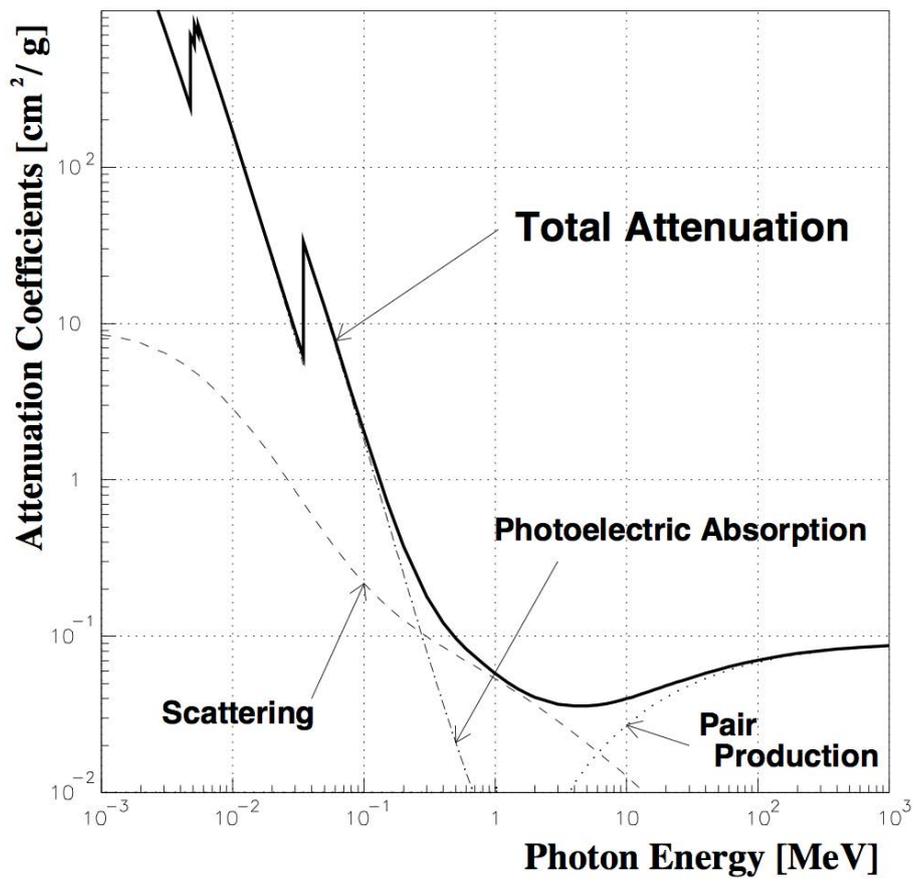


図 2.2: キセノンのガンマ線に対する減衰係数

2.2 同位体

キセノンはいくつかの同位体を持つ。表 2.2 にキセノンの安定同位体とそれらの存在比、スピンをまとめる。安定同位体でスピンの異なるものが存在するので、スピン依存と非依存双方の暗黒物質探索が可能である。

また中性子の照射によって、キセノンの放射性同位体が生成される。しかし、これらは半減期が短いため、低バックグラウンド環境下にしばらく保管する事で自然に崩壊し、除去が可能である。

Xe Isotopes	Abundance(%)	Spin
^{124}Xe	0.096	0
^{126}Xe	0.090	0
^{128}Xe	1.92	0
^{129}Xe	26.44	1/2
^{130}Xe	4.08	0
^{131}Xe	21.18	1/2
^{132}Xe	26.89	0
^{134}Xe	10.44	0
^{136}Xe	8.87	0

表 2.2: キセノンの安定同位体 [21]

2.3 光学的性質

表 2.3 にキセノンの光学的性質をまとめる。光学的性質はキセノンを検出媒体として利用する上で非常に重要な情報である。しかし、確かな測定が行われていないものもあり、キセノンの純度も大きく影響するため、これらの特性は実際の検出器の観測結果から最適化する必要がある。

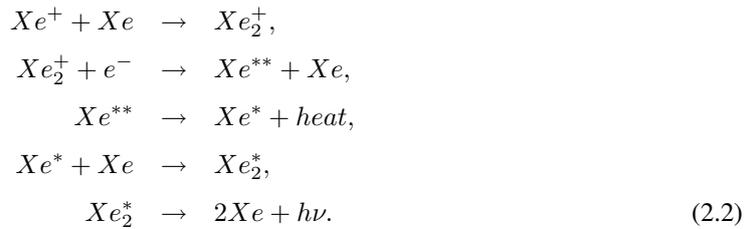
2.3.1 発光過程

キセノンは放射線粒子などと相互作用を行い、得られたエネルギーによって励起状態となり、基底状態に戻る際に真空紫外線を放射する。キセノンが励起状態に至るまでには、粒子の衝突によってキセノンが直接励起状態となる場合と、イオン化したキセノンが再結合して励起状態になる場合との2通りがある。これらの過程では、最終的な発光過程は同一なので、発光波長は変わらない。しかし、発光までにかかる時間は異なる値を持つ。図 2.3 はキセノンの発光過程を図式化したものである。

再結合のない発光過程



再結合のある発光過程



Property	Value	Condition
Peak emission wavelength	175 nm, 178 nm	
Spectral width	9.5 nm, ~14nm	
Scinti. Absorption length	≥ 100 cm	
Rayleigh scattering length	30 - 60 cm	$n_{Xe}=1.61$
Refractive index	$1.61 \pm 0,1$	(177 ± 5) nm
Energy per scinti. photon	(23.7 ± 2.4) eV	electrons
	14.2 eV	electrons
	12.5 eV, 12.7 eV	electrons
	(19.6 ± 2.0) eV	α particles
	(16.3 ± 0.3) eV	α particles
Lifetime singlet	22 ns	
Lifetime triplet	4.2 ns	
Recombination time	45 ns	Dominant for e, γ

表 2.3: キセノンの光学的性質

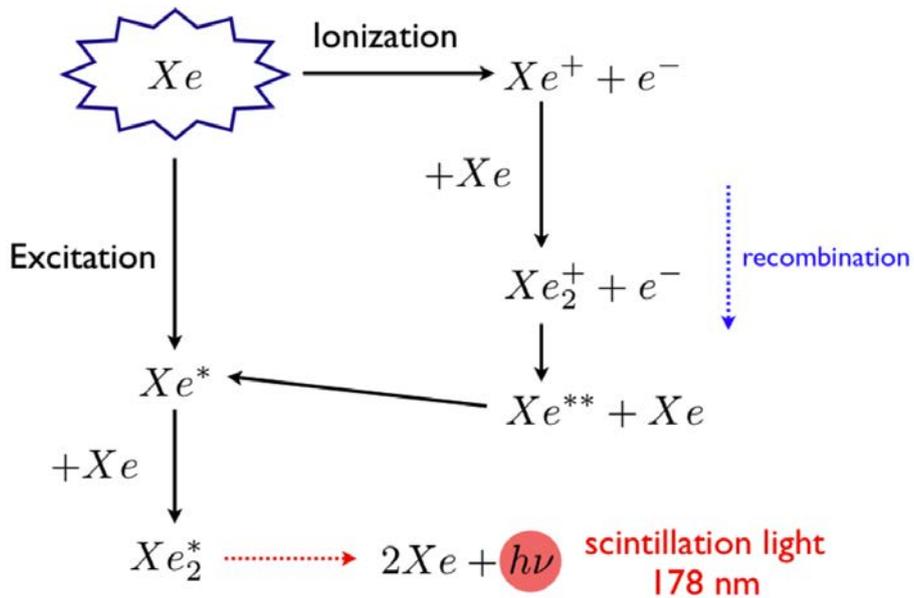


図 2.3: キセノン発光過程

2.4 暗黒物質探索実験での利用

2.4.1 液体シンチレーターとしての利用

キセノンは暗黒物質の直接探索において、多くの利点を持っている。

1. 高い原子番号 ($Z=54$) と密度 ($\sim 3\text{g/cm}^3$)
キセノンの原子番号は 54 とシンチレーターとして使える元素の中ではもっとも高く、ガンマ線の減衰が大きく強い遮蔽効果が期待出来る。また、液体で約 3g/cm^3 と高い密度を持つため、暗黒物質に対する高い感度を維持したまま検出器をコンパクトに出来る。
2. 高発光量 ($\sim 42,000$ photons/MeV) キセノンのシンチレーションによる発光量は、1MeV のエネルギーに対して約 42,000 個の光子を放出する。これは有機シンチレーターである NaI と同等の数で、他の液体シンチレーターよりも多い。高発光量によって、検出器の閾値を下げることができ、分解能も上がる。暗黒物質による事象は低エネルギーであるため、これらの要素は非常に重要である。
3. 直接観測可能な発光波長 (約 175nm) キセノンの発光波長は真空紫外領域にあり、波長変換材等を用いなくても光電増倍管で直接観測する事が可能である。そのため、無駄な損失なく光子を捕らえることができ、低エネルギー閾値を実現し、かつ分解能を向上させる事が出来る。
4. 同元素に長寿命の放射性同位体がなく、液相気相両方の状態での純化が可能。暗黒物質探索を行う上でもっとも重要な事のひとつは低バックグラウンド化である。キセノンにはいくつかの放射性同位体が存在するが、どれも短寿命であるため中性子バックグラウンドの少ない環境にしばらく保管しておくことで除去できる。また、それ以外の不純物 (放射性を持たないものも含む) の純化も、液相、気相のどちらでも行う事が可能なため、様々な技術を応用、開発できる。

2.4.2 暗黒物質に対する散乱断面積

R を事象数、 E_R を弾性散乱による原子核の反跳エネルギーとすると、地球の公転を考慮した暗黒物質による原子核 (質量数 A) 弾性散乱エネルギースペクトルは、

$$\frac{dR(v_E, \infty)}{dE_R} = c_1 \frac{R_0}{E_0 r} e^{-c_2 E_R/E_0 r} \quad (2.3)$$

で与えられる [22]。

ここで、 c_1, c_2 は式簡略化のためのフィッティングパラメータである。これらは地球の公転による季節変動のため月によって異なる数値を取るが、多くの用途において、平均値 ($c_1 = 0.751, c_2 = 0.561$) を用いれば十分である。また $r = 4M_{DM}M_T/(M_{DM} + M_T)^2$ であり、 E_0 は暗黒物質の最も典型的な入射運動エネルギーである (M_{DM} は暗黒物質質量、 M_T はターゲット原子核質量)。 R_0 は地球の公転を無視し (地球の公転速度 $v_E = 0$)、銀河脱出速度 $v_{esc} = \infty$ と仮定した事象数で、

$$R_0 = \frac{N_0}{A} \sigma_0 \int v dn \equiv \frac{N_0}{A} \sigma_0 n_0 \langle v \rangle \quad (2.4)$$

で与えられる。 N_0 はアボガドロ数、 σ_0 は暗黒物質と物質の核子との散乱断面積、 n_0 は暗黒物質の地球付近での粒子数密度、 $\langle v \rangle$ は平均速度である。

図 2.4 は、式 2.3 を用いて算出したキセノン原子核と暗黒物質との弾性散乱事象のエネルギースペクトルである。縦軸は事象頻度、横軸はエネルギー keVee¹である。上図は暗黒物質質量 $M_{DM} = 50\text{GeV}$ 、散乱断面積 $\sigma_0 = 10^{-42}\text{cm}^{-2}$ を仮定しており、これは DAMA/LIBRA 実験が暗黒物質発見を主張している領域である [23]。また、下図は XMASS 実験の目標とする検出感度の一部分である $M_{DM} = 100\text{GeV}$ 、 $\sigma_0 = 10^{-44}\text{cm}^{-2}$ を仮定している。

このように暗黒物質事象のエネルギースペクトルは事象頻度が非常に低いため低バックグラウンド化とターゲットの大質量化、指数関数的に減少するため低エネルギー閾値の実現が重要となる。また、4.8 章では、光電子増倍管由来のバックグラウンドのエネルギースペクトルと比較した考察を述べる。

¹キセノンと物質との弾性散乱は原子核散乱と電子散乱の 2 種類がある。暗黒物質や中性子等は原子核と弾性散乱を行い、ガンマ線は電子と弾性散乱を行い、反跳された原子核や電子によって周囲のキセノンが励起、電離され発光する。⁵⁷Co 等のガンマ線による電子散乱事象を用いたキャリブレーションによって、構成された検出器で観測可能なエネルギーを keVee(electron equivalent) を呼ぶ。また、暗黒物質や中性子等が弾性散乱によって原子核に伝搬される正味のエネルギーを keVnr(nuclear recoil) と呼ぶ。ここで、暗黒物質等と原子核との弾性散乱によって伝播されたエネルギーの内、観測可能なエネルギー keVee は数割程度である。この割合は検出媒体によって異なり、液体キセノンでは 2 割程度である。

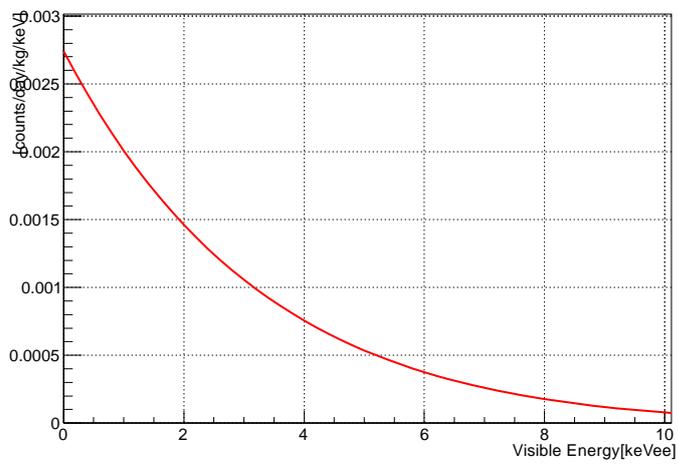
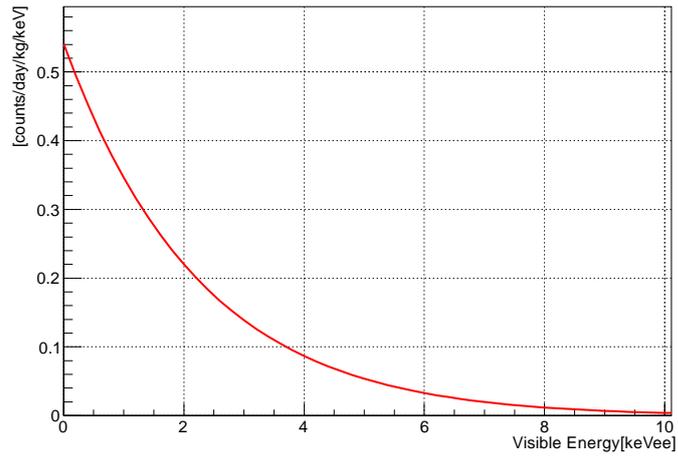


図 2.4: 式 2.3 を用いて算出したキセノン原子核と暗黒物質との弾性散乱事象のエネルギースペクトル。図は暗黒物質質量 $M_{DM} = 50\text{GeV}$ 、散乱断面積 $\sigma_0 = 10^{-42}\text{cm}^{-2}$ 、下図は XMASS 実験の目標とする検出感度の一部分である $M_{DM} = 100\text{GeV}$ 、 $\sigma_0 = 10^{-44}\text{cm}^{-2}$ を仮定している。

第3章 XMASS実験

XMASS 実験は岐阜県飛騨市神岡町地下 1000m で行われている、液体キセノン検出器を用いた多目的実験である。XMASS 実験の名称は、

- Xenon detector for weakly interactive MASSive particles
- Xenon MASsive detector for Solar neutrinos
- Xenon neutrino MASS detector

の3つの目的の略称として命名された。暗黒物質の直接探索、低エネルギー太陽ニュートリノの観測、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測等を目的として、低エネルギー閾値、低バックグラウンドの稀事象探索検出器を用いる。

現在、XMASS 実験は暗黒物質の探索を第一の目的としている。

3.1 検出方法

暗黒物質は物質の核子と弾性散乱を行うと考えられている。XMASS 実験では、キセノンの核子との弾性散乱によって発生するシンチレーション光を液体キセノンを囲むように配置された 642 本の光電子増倍管で観測する。

3.2 実験装置

XMASS 実験装置の全体図を図 3.1 に示す。装置は大きく分けて、検出器、水タンク、内部キャリアレーション装置、エレクトロニクスハット、キセノン純化装置に分けられる。ここでは、各部について概要を述べる [32]。

3.2.1 800kg 検出器

図 3.2 は 800kg 検出器の概要である。800kg 検出器は直径約 80cm 中空の近似的な球形をしており、その近似的な球殻上に中心を向いた 642 個の光電子増倍管が取り付けられている。この検出器本体は Inner Vacuum Chamber(IVC) の中に入っており、この IVC は約 1ton の液体キセノンで満たされる。なので、光電子増倍管を含めた検出器本体は約 165K の液体キセノンに浸かった状態になっている。IVC は更に Outer Vacuum Chamber(OVC) の中にあり、OVC と IVC の間を真空にする事で液体キセノンの低温によって周りの水が凍らないようにしている。バックグラウンド低減のため、IVC と OVC、光電子増倍管を固定するホルダーは放射性不純物の含有量の少ない無酸素銅で作られている。光電子増倍管ホルダーの構造は pentakis dodecahedron と呼ばれる、正十二面体

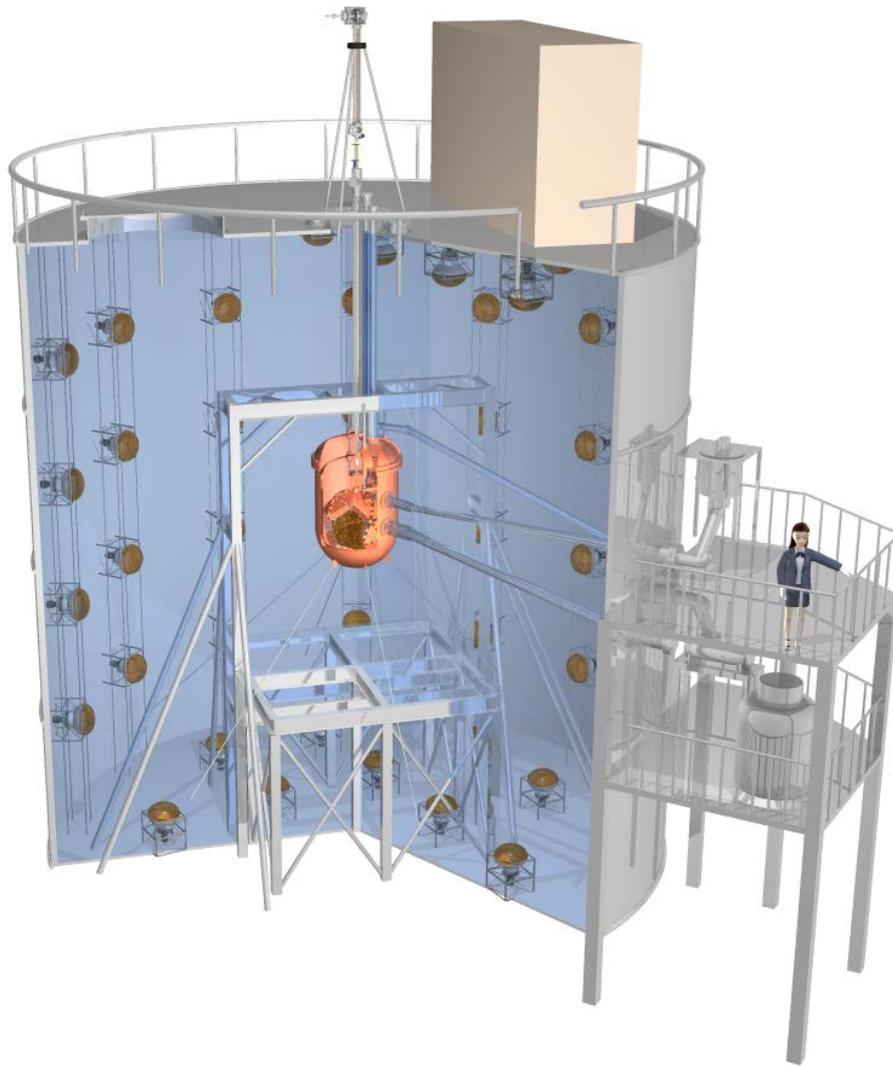


図 3.1: XMASS 実験装置全体図

にを構成する正五角形を5個の三角形に分割した合計60個の三角形からなる多面体である。これは正十二面体より球体に近い構造を作る為の工夫である。

また、800kg 検出器に用いられている光電子増倍管は XMASS 実験のために浜松ホトニクスと共同開発した独自の低バックグラウンド光電子増倍管 R10789-11 が用いられている。光電子増倍管 R10789-11 の写真を図 3.3 に示す。これは放射性不純物が少ない部材で構成されている事に加えて、 -100°C の液体キセノン中でも動作し、キセノンの発光波長 ($\sim 175\text{nm}$) を観測可能であるという特性を持つ。

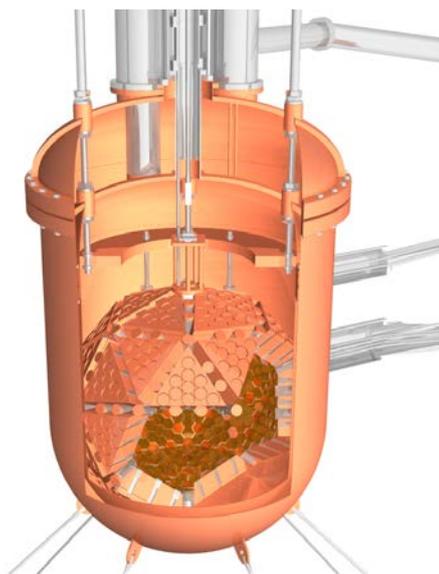


図 3.2: 800kg 検出器



図 3.3: 光電子増倍管 R10789-11

3.2.2 水タンク及び 20 インチ光電子増倍管

検出器は約 800ton の純水で満たされた水タンクの中央に設置されている。この水タンクは直径 10m× 高さ 10m の円柱形で、内側の壁にはスーパーカミオカンデで用いられているものと同じ 20 インチ PMT R3600 が 72 個設置されている。

検出器を水タンクに設置する一番の理由は、宇宙線や岩盤等からの粒子線を検出器まで到達させない事である。800ton の水タンクは 800kg 検出器に対して十分に大きく、特に岩盤内から放出される中性子線のほとんどすべてを止める事が可能だと見積もられている。

20 インチ PMT は水タンク内 (検出器外側) の光を捕らえる。タンク内では主に宇宙線ミューオンが水中の光速を超えて移動する事で発生するチェレンコフ光を検出する。この検出器外の情報と検出器内の情報を比較する事で、検出器で得られたイベントから宇宙線ミューオンなどのバックグラウンドイベントを除いたイベントを選び出す事が出来る。

また、642 個の PMT R10789-11 で構成される検出器本体を内部検出器、72 個の 20 インチ PMT で構成される検出器を外部検出器と呼ぶ。

3.2.3 キャリブレーション

検出器キャリブレーションは主に、検出器内に直接キャリブレーション用の放射線源(以下、ソース)を入れて行うものと、真空容器外に取り付けられたキャリブレーションホース内にソースを入れて検出器外部からガンマ線を照射するもの、PMTホルダーに埋め込まれているLEDを用いるものの3種類がある。

内部キャリブレーション方法

検出器内部の再構成キャリブレーションを行うには、実際に検出器にソースを入れる方法を用いる。図3.4が検出器内部にキャリブレーションソースを導入する装置の概略図(右)と、シミュレーション中のキャリブレーションソース図(左)である。キャリブレーションソースは純銅製のロッドの先端に取り付けられ(図3.5)、タンク上部でキャリブレーション用縦配管部分に常設されている。ソース挿入時には検出器最上部のPMTを取り外し、そこへ上からワイヤーで吊るされたソースロッドが検出器内部に挿入される。ソースはmmの精度でz方向(鉛直方向)の位置を決定して配置する事が出来る。これにより、検出器z軸方向の位置再構成キャリブレーションを行う。シミュレーション中に真空容器外の構造物は存在しないが、検出器内部に挿入されるソース自体とソースロッドは詳細に再現されている。

ソース部分は取り外し可能で、種類の違う放射線源を取り付ける事が出来る。図3.5が挿入される線源である。今回は ^{57}Co を使用したキャリブレーションについて述べる。

位置・エネルギー再構成

図3.6は ^{57}Co を用いて行った検出器内部キャリブレーションの再構成結果である。上図はエネルギー再構成の結果である。 ^{57}Co 線源によって得られたエネルギー分布は、シミュレーションと比較的良くあっている。

また、キャリブレーションソースを $z=-40\text{cm}$ から $z=40\text{cm}$ まで10cmずつ移動させて、それぞれの位置でデータ取得を行った。下図は、取得した9カ所でのデータの位置再構成の結果である。横軸は鉛直方向の位置を表している。 ^{57}Co キャリブレーションデータにおける位置の再構成及び分解能は、シミュレーションによる評価とほぼ同等であった。

これらは、検出器の事象再構成が正しく行われており、検出器応答はシミュレーションによってある程度正しく再現されている事を示している。

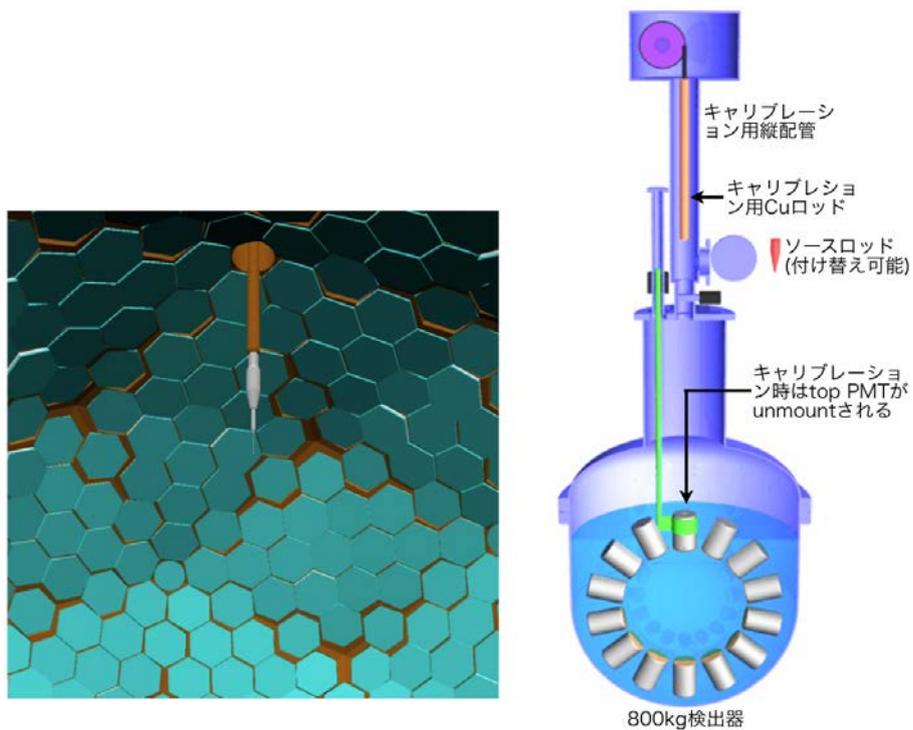


図 3.4: 内部キャリブレーションシステム概要 (右) とシミュレーション中のキャリブレーションソース図 (左)。キャリブレーション時は検出器最上部の PMT を取り外し、キャリブレーションロッドが検出器内に挿入される。ソースロッドは検出器上部の縦配管横から取り外し、他の放射線源への付け替えが可能である。



図 3.5: 内部キャリブレーションロッド

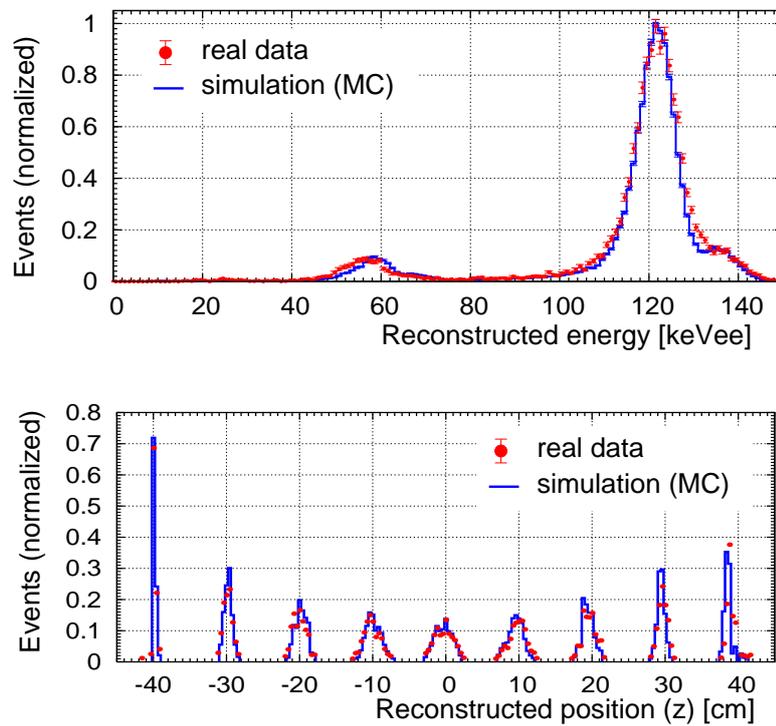


図 3.6: ^{57}Co 内部キャリブレーション再構成エネルギー (上) と位置 (下)。下図では、キャリブレーションソースを $z=-40\text{cm}$ から $z=40\text{cm}$ まで 10cm ずつ移動させて、それぞれの位置で取得したデータの再構成結果である。

3.2.4 エレクトロニクスハット

エレクトロニクスハット内には PMT で得られる情報を記録し、デジタルデータとして残すための電子回路が設置されている。

PMT の光電面に光が到達し、光電効果によって光電子が生成されると、それは PMT の中で約 10^7 倍に増幅される。増幅された電流は、その電圧が -0.5mV ($0.25\text{photo electron(P.E.)}$ 相当) 以下であれば ADC (Analog Digital Converter) によってデジタル情報に変換される。更に、642 本の各 PMT から送られるデジタル情報の電圧の総和が求められ、これがトリガー閾値以上の場合のみイベントとして記録される。トリガー閾値には、2011 年 9 月 28 日までは 9hit が、それ以降は 3hit が用いられている。

3.2.5 キセノン純化装置

キセノンの純度を保つ事は XMASS 実験における最重要事項のひとつである。キセノンの中には ^{238}U 系列の ^{222}Rn や、 ^{232}Th 系列の ^{220}Rn などの長い半減期を持つ放射性物質が微量に含まれており、これらが崩壊する事でバックグラウンドとなる放射線が発生してしまう。また、大気中からキセノンを精製する際に混入してしまう ^{85}Kr も主要なバックグラウンドとなりうる。

XMASS 実験では、キセノンを約 -100°C で運用し、液相・気相を利用する事でキセノンの循環システムを構築している。循環過程の中で、ゲッターを通して水などの不純物が除去される。また、キセノンとクリプトンの沸点の違いを利用した ^{85}Kr 除去のための蒸留装置も用意されており、実験開始時に蒸留を実施する事でクリプトン濃度を 2.7ppt 以下までに低減出来た事が確認されている。[35]

3.3 バックグラウンド

XMASS 実験に限らず、暗黒物質探索実験ではバックグラウンドが観測データに及ぼす影響の理解は暗黒物質信号の同定のために必要不可欠である。ここでは、XMASS 実験で想定されるバックグラウンドを液体キセノン外部から発生するものと液体キセノン内部から発生するものの二種類に分けて簡単に説明する。

3.3.1 キセノン外部バックグラウンド

暗黒物質探索のための極低バックグラウンド環境の構築のため、XMASS 検出器はスーパーカミオカンデと同じ神岡鉱山地下 1000m に建設された。神岡鉱山内でのバックグラウンド環境を表 3.1 に示す。

ミューオン

宇宙線から生成されるミューオンは XMASS 実験の行われる神岡鉱山内地下 1000m では地表に比べて約 10^{-5} 倍に低減する事が出来る。

	地上	神岡鉱山内
ミューオン/cm ² /sec[24]	1.1×10 ⁻²	10 ⁻⁷
環境中性子 [25][26]		
熱中性子/cm ² /sec	1.4×10 ⁻³	8.3×10 ⁻⁵
高速中性子/cm ² /sec	1.2×10 ⁻²	1.2×10 ⁻⁵
RnBq/m ³ (summer)[24]	0~10	~2000
RnBq/m ³ (winter)[24]	0~10	40
環境ガンマ線 (>500keV)[28]	-	0.71/cm ² /sec

表 3.1: 神岡鉱山内バックグラウンド環境

環境中性子

環境中性子は検出器外部から発生し、以下の発生源を持つ。

- 岩盤に含まれる ²³²Th 系列と ²³⁸U 系列の放射性核子が核分裂する時に放出される高速中性子
- 岩盤に含まれる ²³²Th 系列と ²³⁸U 系列の放射性核子が核分裂する時に放出される α 粒子を岩盤物質が捕らえて発生する高速中性子
- 高エネルギーミューオンによる岩盤物質の原子核破砕反応によって発生する高速中性子

これらの中性子は、検出器を水タンクの内部に設置することで遮蔽する。

ラドン

神岡鉱山内は地上と比べてラドン濃度が高い。表 3.1 のように鉱山内のラドン濃度には季節的な変動があるが、夏には地表に比べて約 30 倍となる。ラドンはキセノンや純水に溶解しやすく、暗黒物質探索のバックグラウンドとなりうる。そのため、検出器が設置される実験室内の空洞にラドンを除去した空気(ラドン濃度: 数 mBq/m³)を常時供給する事で地上よりもラドン濃度が少ない状態で実験を行う。

外部ガンマ線

液体キセノン外部から照射するガンマ線は、主に神岡鉱山内の岩盤や検出器の部材に含まれる放射性物質から発生する。そのため、検出器外部からのガンマ線については遮蔽材を用いる事と、また検出器に用いる部材からのガンマ線については放射性不純物含有量の少ない部材を選別する事、液体キセノンの自己遮蔽能力を用いる事で遮蔽する。

自己遮蔽能力

液体キセノンは高い原子番号、密度を持つため、吸収長は約 2.87cm[20] と短くなる。そのため、液体キセノンは外部からの放射線粒子に対して強い遮蔽効果を持つ。液体キセノンのこの特性を自己遮蔽能力と呼ぶ。大きな体積の液体キセノンを用意すれば、外部からのガンマ線はキセノン外周部で止まり、検出器中心ではガンマ線バックグラウンドの少ない環境が実現できる。図 3.7 が

XMASS 検出器に外部から入射させたガンマ線の飛跡シミュレーションのイメージ図である。青い線が外来ガンマ線の飛跡、濃いピンクの部分の有効体積をそれぞれ表す。

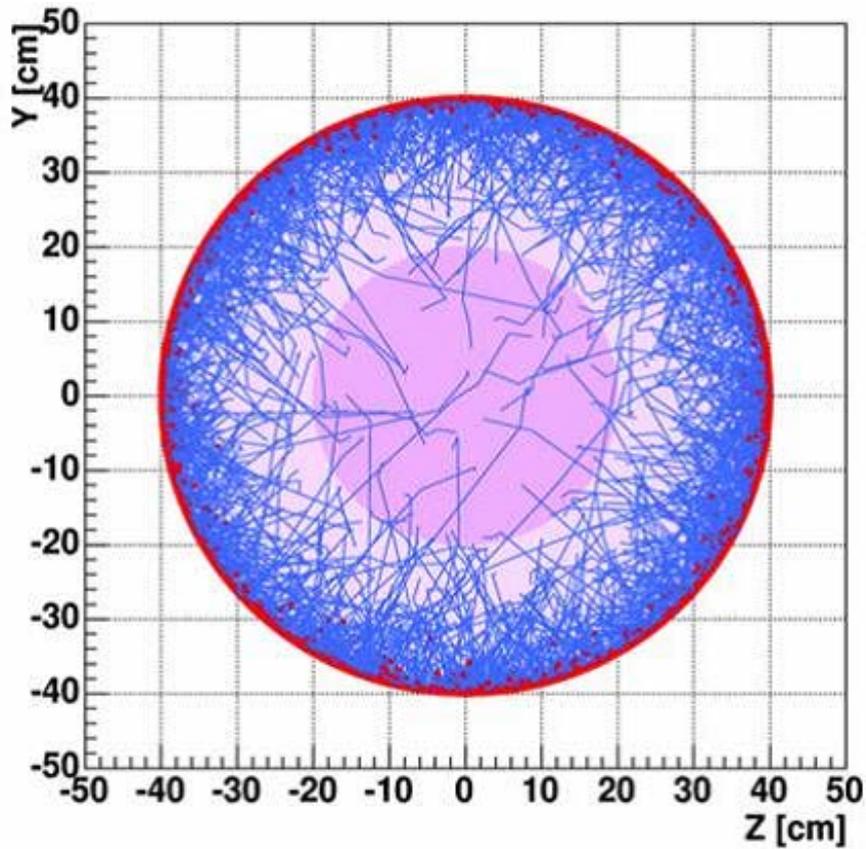


図 3.7: 液体キセノン外部から入射させたガンマ線の飛跡シミュレーション

3.3.2 キセノン内部バックグラウンド

検出器内部のキセノンに含まれる放射性物質は外部の遮蔽体や自己遮蔽能力を用いても防ぐ事は出来ない、そのため、暗黒物質探索を行う上でこれらキセノン内部のバックグラウンド源は除去する必要がある。キセノン中に含まれる主なバックグラウンドは以下の2種である。

^{238}U 系列

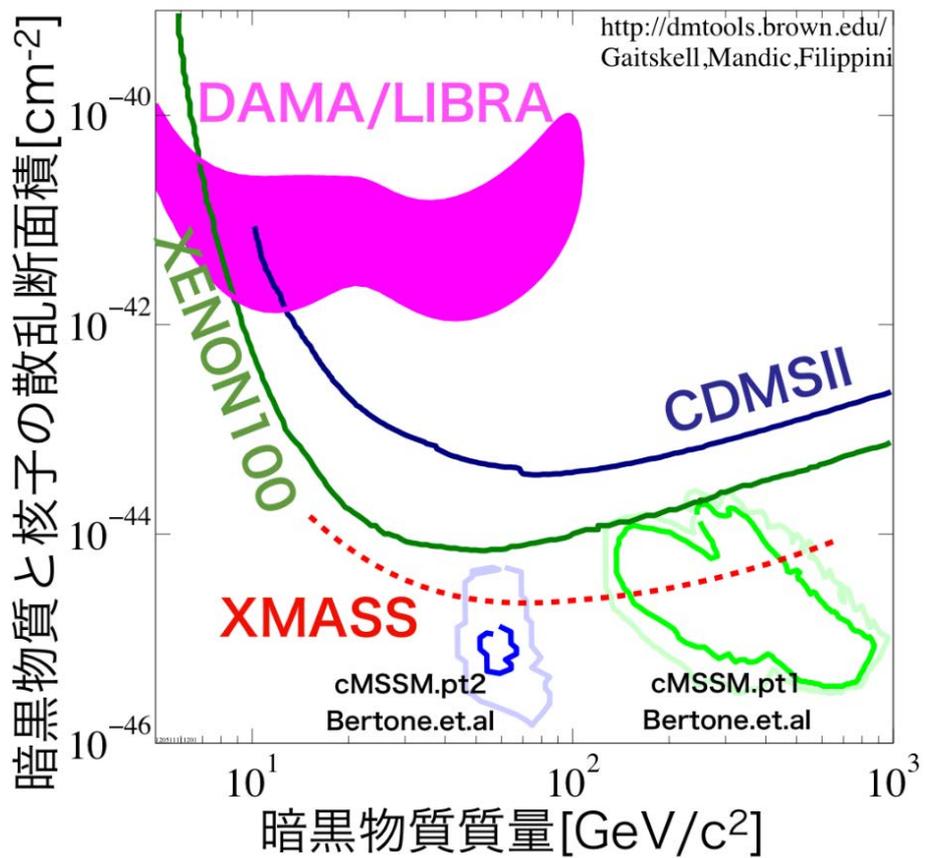
^{238}U は $4.468 \times 10^9 \text{y}$ という長い半減期を持ち、図 A.1 に示すような崩壊系列で連鎖的に崩壊する。この崩壊系列をウラン系列と呼ぶ。この崩壊系列の中で、とくにラドンは希ガスであるため、キセノン中に湧き出してしまう。この ^{222}Rn 以降にバックグラウンド事象となりうる崩壊が存在する。

^{85}Kr

^{85}Kr の半減期は 10.756y と比較的長い。 ^{85}Kr の崩壊図を図 A.5 に示す。 β 崩壊であるため検出器で得られる信号は連続スペクトルとなり、低エネルギー領域で暗黒物質信号と重なる重要なバックグラウンドとなる。

3.4 期待される感度

これまでに述べたように、XMASS 実験では低バックグラウンド環境実現のために様々な工夫がなされている。それらによって実現が期待される、暗黒物質に対するスピン非依存の検出感度を図 3.8 に示す [31]。濃緑と濃青の線から上はそれぞれ、XENON100[29] と CDMSII 実験 [30] に排除された領域である。ピンクの領域は DAMA/LIBRA 実験 [23] が暗黒物質を発見したと主張している領域である。赤い点線は XMASS の目標感度であり、達成できれば、理論的に暗黒物質の存在が予測されている青、緑で囲まれた領域に踏み込む事が可能であり、暗黒物質の直接検出が期待出来る。



- DATA listed top to bottom on plot
- DAMA/LIBRA, 2008, with ion channeling, 5sigma, SI
 - CDMS II (Soudan), 2010, combined 2004 to 2009, all Soudan data, SI
 - XENON100, 2011, 100.9 live days of data, SI
 - - - XMASS, projection 2004/2007, 800kg, FV 0.5 ton-year, SI
 - Bertone et. al., 2011, global fits of cMSSM inc. first LHC and XENON100 data, SI
 - Bertone et. al., 2011, global fits of cMSSM inc. first LHC and XENON100 data, SI
 - Bertone et. al., 2011, global fits of cMSSM inc. first LHC and XENON100 data, SI
 - Bertone et. al., 2011, global fits of cMSSM inc. first LHC and XENON100 data, SI
- 120511111201

図 3.8: XMASS 実験 800kg 検出器で期待される検出感度。目標感度を達成できれば、理論的に暗黒物質の存在が予測されている領域に踏み込む事が可能であり、暗黒物質の直接検出が期待出来る。

第4章 PMT ガンマ線の研究

暗黒物質を直接観測するためには数 keV 程度以下の低エネルギー閾値を実現する必要がある。しかし、このような低エネルギー領域では素材に含まれる微量のウラン系列放射性同位体、トリウム系列放射性同位体、コバルト 60、カリウム 40 等の崩壊によるガンマ線、ベータ線がバックグラウンドとなる。暗黒物質の信号がこれらのバックグラウンド信号に埋もれて見えなくなってしまうように、検出器素材中の放射性不純物を低減する事が重要である。特に光電子増倍管は検出媒体となる液体キセノンにもっとも接近して配置される装置で、642 個と数も多いため検出器の主なバックグラウンド源となると考えられる。

本研究では、XMASS 検出器における光電子増倍管由来のバックグラウンドのシミュレーションを行い、データとの比較を行った。このシミュレーションを行うに当たって、シミュレーションのエネルギースケールと分解能の較正を行った。また、以前の PMT バックグラウンドのシミュレーションでは全ての崩壊は PMT 全体から発生させられたが、本研究ではそれぞれの放射性不純物を主に含む部分から集中的に発生させた。

結果、観測データの高エネルギー領域のバックグラウンドの大部分が PMT に含まれる放射性不純物から発生するガンマ線で説明可能である事を確認した。しかし低エネルギー領域では、建設当初に想定されていたバックグラウンド事象では説明出来ないバックグラウンドの存在が明らかになった。

4.1 光電子増倍管に含まれる放射性不純物

XMASS 実験では光電子増倍管に必要な材料、部品の全てを高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器を用いてその放射性不純物含有量を調べ、含有量の低いものが選別されている。表 4.1 に採用した主要な各部品の放射強度をまとめる。光電子を増幅する光電子増倍管本体部分と、後部に取り付ける電圧分割回路基板部 (Base) に分けて列挙してある。サンプル一つの放射線量は極めて少なく光電子増倍管の個体差もあるため、複数の PMT を HPGe 検出器で測定し光電子増倍管一つの放射線量が計算された。この数値は人体に含まれる ^{40}K が約 4000Bq、30g の土壤中に含まれるウラン、トリウムが約 1Bq である事を考えると極めて低い値である。

ただし、光電面に含まれる放射線強度の測定はこの際には行われていない。 ^{40}K は光電面に含まれるものの寄与が支配的だと考えられている。改めて HPGe 検出器を用いて光電面の存在する完成した PMT を測定して、光電面に含まれる ^{40}K の放射線強度は $9.1 \pm 2.15 \text{ mBq/PMT}$ の結果を得た。本研究のシミュレーションではこの値を用いる。

part	stuff	^{40}K	^{60}Co	^{232}Th -series	^{238}U series	
		mBq/PMT	mBq/PMT	mBq/PMT	mBq/PMT	
PMT	dynode	-1.020±0.755	0.133±0.037	0.162±0.086	-0.033±0.080	
	electrode	-0.796±0.493	0.053±0.028	0.075±0.078	0.100±0.077	
	side tube	upper	-1.379±1.250	0.979±0.093	0.171±0.134	0.010±0.110
		lower	-1.911±1.180	1.111±0.082	0.164±0.126	0.034±0.110
	stem	0.252±0.481	0.813±0.050	0.084±0.073	0.016±0.066	
	glass in stem	1.352±0.118	0.008±0.004	0.194±0.010	0.195±0.010	
	lead wire	-1.040±0.467	-0.023±0.023	0.091±0.058	-0.072±0.054	
	window	0.509±0.629	-0.004±0.027	-0.013±0.069	-0.075±0.065	
	sealing parts	-0.753±0.434	-0.043±0.019	0.024±0.044	-0.028±0.035	
	insulator1	0.401±0.496	-0.004±0.021	-0.010±0.055	-0.059±0.051	
	insulator2	0.036±0.0045	0.000±0.002	-0.001±0.005	-0.005±0.005	
	others	-1.770±2.935	-0.012±0.012	0.073±0.027	0.015±0.022	
sum of PMT		-6.118±3.698	2.990±0.149	1.013±0.258	0.098±0.229	
Base	register	0.335±0.047	0.000±0.001	0.035±0.004	0.033±0.004	
	capacitor	dynode	0.172±0.186	0.004±0.007	0.009±0.017	0.004±0.016
		coupling	-0.845±0.108	-0.082±0.005	0.088±0.018	0.220±0.033
	circuit board	-0.003±0.096	0.000±0.004	0.013±0.009	0.070±0.011	
	solder	0.024±0.018	-0.004±0.007	0.037±0.024	0.007±0.020	
	connection pin	-0.194±0.453	0.016±0.017	0.029±0.046	0.007±0.033	
	M2 screw	-0.039±0.144	-0.001±0.006	0.049±0.014	0.014±0.013	
	connector	H.V.	-0.036±0.039	-0.002±0.001	0.008±0.004	0.007±0.004
		signal	-0.079±0.142	0.003±0.007	0.084±0.021	0.006±0.018
	teflon holder	0.861±1.260	-0.007±0.051	0.150±0.159	0.238±0.143	
sum of Base		0.196±1.492	-0.072±0.060	0.501±0.179	0.606±0.165	
whole of PMT		<5.10	2.92±0.16	1.51±0.31	0.704±0.28	

表 4.1: PMT R10789-11 素材に含まれる放射性同位体。HPGe 検出器を用いて測定された [33]。

4.2 エネルギースケールと分解能の較正

XMASS 検出器シミュレーションにおいて、液体キセノンの発光量や検出器のエネルギー分解能は ^{57}Co キャリブレーションの 122keV ガンマ線ピークを用いて較正されている。

しかし、122keV 以上のガンマ線を放射する ^{137}Cs などの線源を用いたキャリブレーションを行うと、シミュレーション結果のピークがデータと比較して高い位置に表れるという現象が確認されている。この原因の候補として、フロントエンド電子回路 ATM (ADC TDC Module)[24] の gate の効果が考えられる。trigger が発行された際に、ATM は入力された各 PMT 信号の 400[ns] 分の積分値を保存して光電子数に変換する。高エネルギー事象では、信号波形のテール部分が積分範囲からはみ出してしまう場合があり、それだけ光電子数が低く記録される。この現象は現在の XMASS シミュレーションでは考慮されていないため、高エネルギー事象に関しては観測データよりもシミュレーションのキャリブレーションピークが高く表示されている可能性がある。

また、 ^{57}Co の 122keV ピークではエネルギー分解能の再現性が良かったが¹、例えば図 4.2 のように ^{137}Cs のエネルギー分解能の再現性が悪いという問題が残っている。この観測データとシミュレーションとのエネルギー分解能の違いも改善すべきである。

光電子増倍管に含まれる放射性不純物のシミュレーションを行う前に、これらに関する補正を現象論的に行った。

また本章では、 ^{57}Co を用いたキャリブレーションの 122keV ガンマ線事象による光電子数ピーク位置から XMASS 検出器での単位エネルギー当たりの光電子数 [photo electrons/keV] を算出して、検出器の受け取った光電子数からエネルギーへの変換を行う。算出した単位エネルギー当たりの光電子数は約 13.85[photo electron/keV] であった。

4.2.1 エネルギースケールの較正

まず、キャリブレーションデータとシミュレーションの光電子数ピークが一致するように、エネルギースケールの較正を行った。

較正には、観測データとシミュレーションそれぞれピークをガウシアンフィットした際のピーク中心位置の比を用いる。この data/MC の比の値を scaling factor と名付ける。シミュレーションプログラムが出力するデータファイルを XMASS の解析ソフトで解析可能なデータファイルに変換する際に、scaling factor を MC の光電子数にかける事でより正確なシミュレーション結果が得られる。

例えば、 ^{137}Cs 線源を用いたキャリブレーションデータから得られるピーク中心位置の値は 8745p.e.、シミュレーションでは 9156p.e. であり、

$$\text{scalingfactor} = 8745/9156 \simeq 0.955 \quad (4.1)$$

となる。この手法を複数のキャリブレーションデータを用いて行い、それぞれのエネルギーにおける scaling factor を算出した。scaling factor の決定には、 ^{137}Cs と ^{40}K 、 ^{232}Th のキャリブレーションデータを用いた。

図 4.1 に光電子数補正前後の、キャリブレーションデータとシミュレーションでのピーク中心位置の比を示す。青が補正前で赤が補正後である。補正によって、ピーク中心値の比が 1 に近づいている事が確認出来る。

¹図 3.6 参照

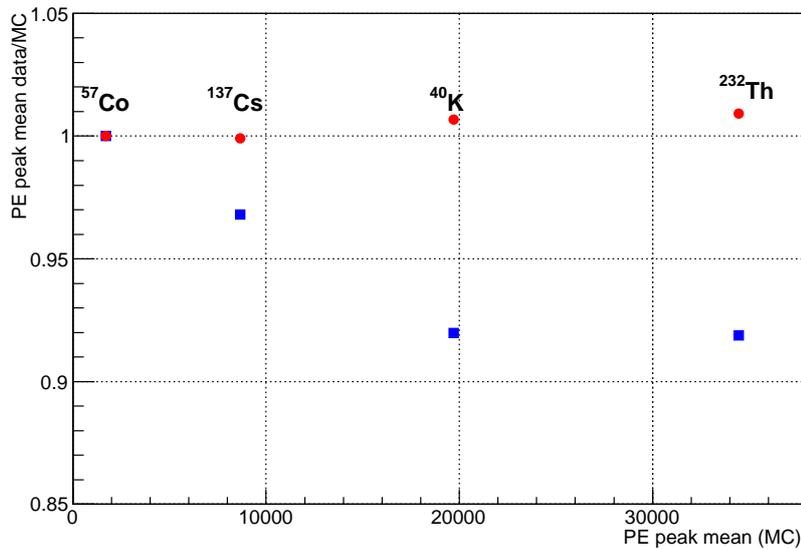


図 4.1: エネルギー補正前後の、キャリブレーションデータとシミュレーションの光電子数ピーク中心値の比。

4.2.2 分解能の較正

次に、検出器のエネルギー分解能の補正を行った。補正前のシミュレーションの分解能はデータと異なるので、シミュレーションの分解能をデータに近づける必要がある。

しかし単純に PMT の分解能を悪化させるだけでは、イベント内で 642 個の PMT の光子数の増減が相殺してしまい、結果として総光電子数の分解能は変化しないと考えられる。そこで、一つの事象内で発生した光子の全てが、二つに増加する、あるいは消える、共通した確率を持つという手法を用いた。この手法を用いれば総光電子数の分解能の較正が可能である。

図 4.2 は光電子数と分解能較正前後のシミュレーションとキャリブレーションデータの比較である。左図はある PMT が受け取った光電子数の分布、右図は事象内で検出された総光電子数の分布である。光電子数と分解能較正によって、右図のシミュレーション総光電子数の分布に大きな変化が見られるが、左図の PMT 自体の分解能には大きな変化は見られない。この手法とキャリブレーションデータを用いて分解能の較正を行った。

分解能の較正には、 ^{109}Cd と ^{241}Am 、 ^{57}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{40}K 、 ^{232}Th のキャリブレーションデータを用いた。また、 ^{109}Cd のガンマ線によって、キャリブレーションロッドに使用されている銅から発生される約 8keV の特性 X 線も用いた。

図 4.3 は分解能補正前後の、キャリブレーションデータとシミュレーションの光電子数ピーク中心値と σ の比である。黒点がキャリブレーションデータ、青点が分解能補正前のシミュレーション、赤点が補正後のシミュレーションである。分解能の補正によって、シミュレーションの分解能がキャリブレーションデータに近づいた事が確認できる。

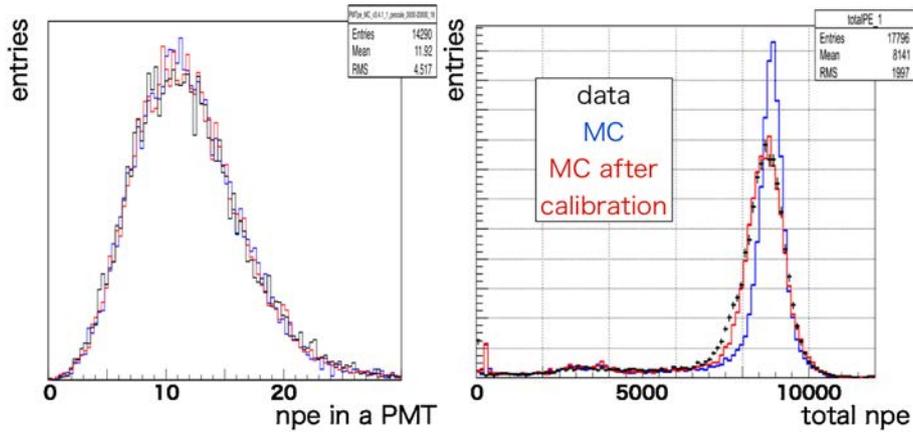


図 4.2: 光電子数と分解能較正前後のシミュレーションとキャリブレーションデータの比較。 ^{137}Cs キャリブレーションソースを検出器中心に配置して取得したデータとそのシミュレーションである。左図はある PMT が受け取った光電子数の分布、右図は事象内で検出された総光電子数の分布である。

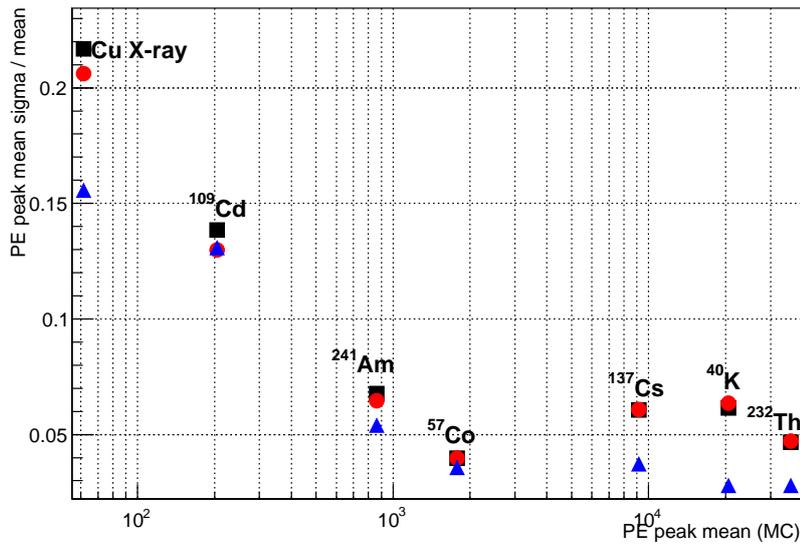


図 4.3: キャリブレーションデータ (黒) と分解能補正前後のシミュレーション (補正前:青, 後:赤) の光電子数ピーク中心値と σ の比。

4.2.3 結果

光電子数とエネルギー分解能の較正の結果、シミュレーションにおいてキャリブレーションデータのエネルギー分布をより良く再現させる事に成功した。PMT 由来のバックグラウンドシミュレーションの解析には補正後のものを用いる。

4.3 光電子増倍管由来のバックグラウンドシミュレーション

4.3.1 崩壊発生位置

XMASS 検出器での光電子増倍管由来のバックグラウンドシミュレーションを行う際に、放射性物質の崩壊は表 4.1 の全ての部位から発生させるのではなく、簡単のために寄与の大きい一部のパーツのみから発生させた。過去に行われた光電子増倍管由来のバックグラウンドシミュレーションでは、全ての崩壊が光電子増倍管全体から一様に発生させられていた事と比較すると、大きく実際のデータに近づけたことになる。

表 4.2 にそれぞれの寄与が大きかった部分とシミュレーションで発生させた強度を示す。 ^{40}K については光電面の寄与が大きかったが、シミュレーション内の光電面の geometry が薄すぎて Geant4 の制限によって崩壊が発生させられなかったため、 ^{40}K の崩壊は PMT の真空部分で発生させた。図 4.4 は光電子増倍管の断面の模式図である。ここにシミュレーションで発生させた部位を示す。

放射性同位体	含有部	強度 mBq/PMT
^{40}K	PMT 光電面	9.10
^{60}Co	PMT 側管	2.92
^{232}Th	ダイノード部分	1.51
^{238}U	PMT ベース	0.704

表 4.2: シミュレーションに用いた PMT 中の放射性不純物の強度

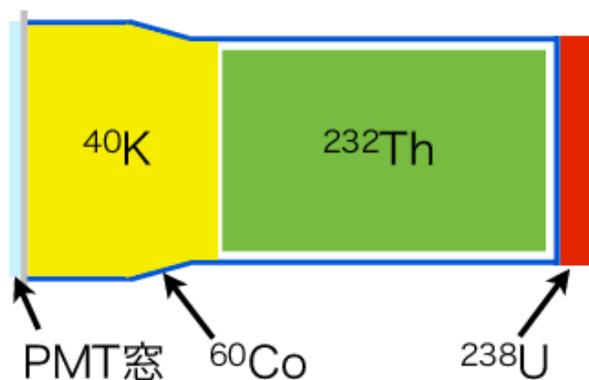


図 4.4: 崩壊発生場所

4.3.2 シミュレーション事象発生数

得られたシミュレーション結果を観測データと比較する際に、事象頻度を differential rate unit $\text{day}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{keV}^{-1}$ に変換する。その時、事象数を観測相当日数で規格化する必要がある。まず、それぞれについて観測データ約 10 日分相当数の崩壊を発生させた。 ^{238}U の崩壊発生点は光電子増倍管の Base 部分で、液体キセノンから比較的遠い。よって、他の RI と比べて崩壊数当たりのイベン

ト数が少なく、高統計を得るために約 40 日相当分の崩壊を発生させた。表 4.3 にそれぞれの崩壊数と観測相当日数、検出器内で起こったイベント数をまとめる。

	^{40}K	^{60}Co	^{232}Th	^{238}U
生成事象数	5997500	1998040	998300	1498900
観測相当日数	11.88	12.34	11.92	38.38
検出器内部事象数	258500	784466	396022	65295

表 4.3: シミュレーションで発生させた崩壊数と観測相当日数

4.4 結果

シミュレーションで得られたそれぞれ放射性同位体の結果について述べる。エネルギーは検出器の受け取った光電子数の合計から計算されている。 ^{57}Co を用いたキャリブレーションの122keVガンマ線事象による光電子数ピーク位置から、XMASS検出器での単位エネルギー当たりの光電子数は約13.85photo electron/keVであった。シミュレーション内で検出された光電子数のエネルギーへの変換にはこの値を用いた。

4.4.1 ^{40}K

観測データ11.88日相当の ^{40}K の崩壊をPMT真空部分で発生させた。図4.5は ^{40}K のシミュレーションデータから得られたエネルギースペクトルである。縦軸は事象頻度、横軸はエネルギーkeVee²である。

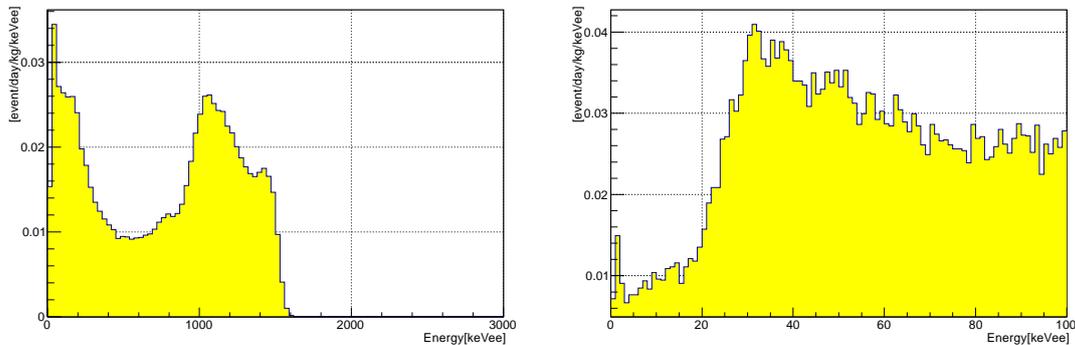


図 4.5: ^{40}K シミュレーションのエネルギースペクトル

^{40}K の崩壊で発生するガンマ線は1.461MeVのみの単一エネルギーである。しかし、図4.5左では1.1MeVと1.5MeV付近に二つのピークが確認出来る。これは検出器の受け取る光電子数の事象発生位置依存性によるものである。PMTの量子効率には光子の入射角への依存性が存在し、線源が検出器表面に近くなるほど、近くのPMTへの入射角が大きくなるため光電子数は多くなる[34]。図4.6は ^{40}K シミュレーションのエネルギーとシンチレーション光が実際に発生した位置(再構成位置でない)の中心からの距離との二次元分布である。これより、1.1MeV付近のピークは約 $30 \leq R \leq 40\text{cm}$ の事象、1.5MeV付近のピークは約30cm以内の事象によるものである事が分かる。

また、このシミュレーションにおいて、 ^{40}K の崩壊は光電子増倍管真空部分で発生させている。 ^{40}K の崩壊ではガンマ線だけでなくベータ線も発生する。低エネルギー領域のピークは他の放射性同位体で見られるコンプトン散乱によるものだけではなく、ベータ崩壊で発生する電子の制動放射によって発生する光子の影響を受けて他の放射性同位体と比べて低エネルギーまでのびている。

図4.5右では1keV付近にピークがあるが、これはシミュレーション中のPMTとホルダーとの間に隙間が生じている事に起因しており、他の放射性同位体についても同様のピークが確認出来る。PMTとホルダーの隙間で液体キセノンが発光した際の光がその隙間から漏れだしてPMTによって検出され、低エネルギーのイベントとして見えている。シミュレーションだけでなくXMASS検出

²2.4.2 章参照

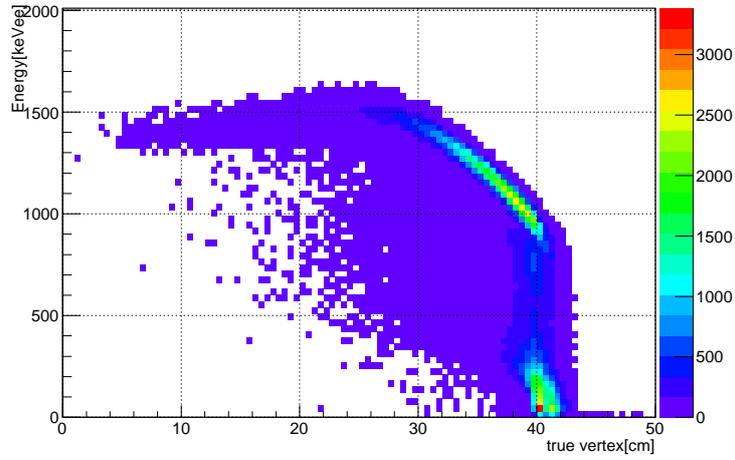


図 4.6: ^{40}K シミュレーションのエネルギーと正しい (再構成ではない) 反応点の二次元分布。縦軸はエネルギー keVee、横軸は反応点の検出器中心からの距離 cm である。

器でも同じ現象が起きている可能性があり、1keV 付近は暗黒物質探索において非常に重要なエネルギー領域なので検証が要請されるが、現状では観測データを用いた検証はまだ行われていない。

4.4.2 ^{60}Co

観測データ 12.34 日相当の ^{60}Co の崩壊を PMT 側管部分で発生させた。図 4.7 は ^{60}Co のシミュレーションデータから得られたエネルギースペクトルである。 ^{60}Co の崩壊では、1.173MeV と 1.332MeV の 2 種類のガンマ線が発生する。図 4.7 では、 ^{40}K と同様に検出器の受け取る光電子数の事象発生位置依存性によって 3 つのピークが確認できる。また 1keV 付近のピークも ^{40}K と同様で、PMT ホルダーと PMT の間の隙間によるものである。

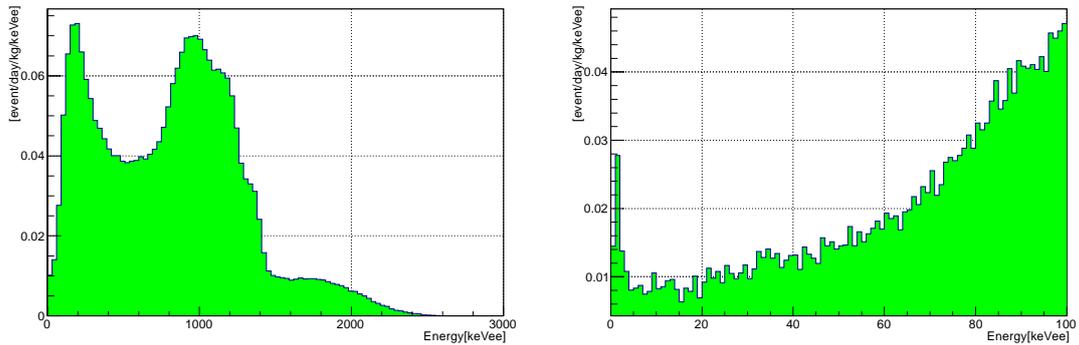


図 4.7: ^{60}Co シミュレーションのエネルギースペクトル

4.4.3 ^{232}Th

観測データ 11.92 日相当の ^{232}Th の崩壊を PMT ダイノード部分で発生させた。図 4.8 は ^{232}Th のシミュレーションデータから得られたエネルギースペクトルである。 ^{232}Th のシミュレーションでは、図 A.2 の崩壊系列に従って様々なガンマ線が発生する。図 4.8 の 50~80keV 付近のピークは ^{228}Th の崩壊によって発生する 84.4keV のガンマ線によるものである。図 4.8 右でこのピークが 84.4keV より低く分布しているのは、4.4.1 章で述べた光量の位置依存性によるものである。また 1keV 付近のピークも ^{40}K と同様で、PMT ホルダーと PMT の間の隙間によるものである。

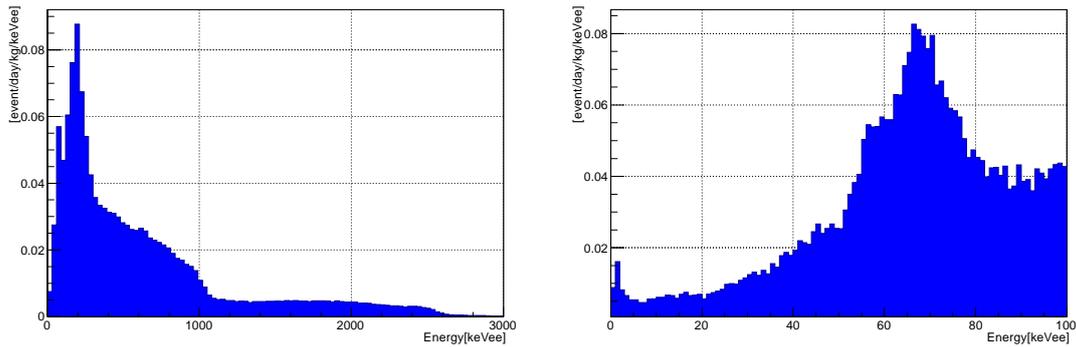


図 4.8: ^{232}Th シミュレーションのエネルギースペクトル

4.4.4 ^{238}U

観測データ 38.38 日相当の ^{238}U の崩壊を PMT ベース部分で発生させた。図 4.9 は ^{238}U のシミュレーションデータから得られたエネルギースペクトルである。 ^{238}U のシミュレーションでは、図 A.1 の崩壊系列に従って様々なガンマ線が発生する。また 1keV 付近のピークも ^{40}K と同様で、PMT ホルダーと PMT の間の隙間によるものである。

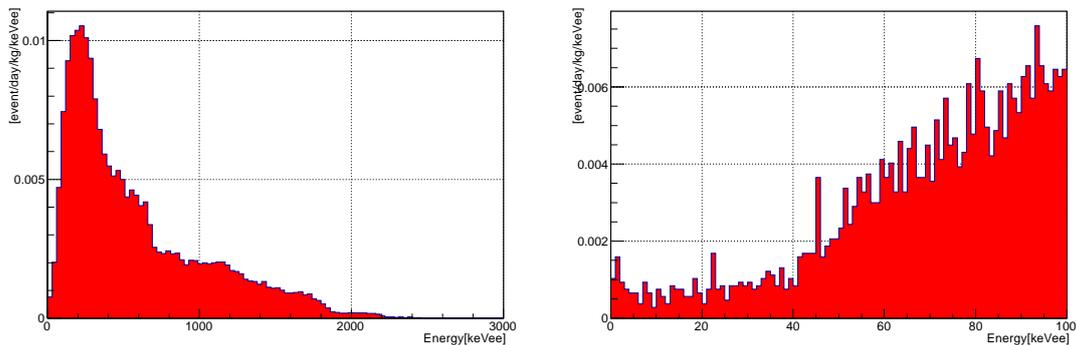


図 4.9: ^{238}U シミュレーションのエネルギースペクトル

4.5 高エネルギー領域

以上で示した、4種類のPMT由来のバックグラウンドのエネルギースペクトルを足し合わせて、観測データとの比較を行った。約1日分の観測データを比較に用いた。比較に用いた観測データに関する情報を表4.4に示す。また、観測データ、シミュレーションともに、

- 内部検出器のみがtriggerされている。(宇宙線ミューオンによるバックグラウンド事象の除去)
- 1event内で各PMTが光子を受け取った際の時間分布のRMS(root mean square)が280ns未満(PMT暗電流やアフターパルスの除去)
- eventの最初のhitから20ns以内のhit数が全体のhit数の6割未満(チェレンコフ事象の除去)

の事象のみを用い、他はカットしている。

run number	4476
観測開始時刻	2011/8/14 16:40:25
観測終了時刻	2011/8/15 16:40:30
hits threshold	9 hits

表 4.4: 観測データ情報

図4.10がPMT由来のバックグラウンド事象のエネルギースペクトルと観測データとの比較である。黒の実線が観測データ、黄色、緑、青、赤で塗りつぶされた部分がそれぞれ ^{40}K 、 ^{60}Co 、 ^{232}Th 、 ^{238}U である。これより、観測されたデータの高エネルギー領域(1MeV以上)のバックグラウンドの大部分が、PMTに含まれる放射性不純物から発生するガンマ線で説明可能である事が明らかになった。足し合わせたPMTバックグラウンドシミュレーションの1MeV付近のピークが観測データのものとはずれているように見えるが、これは建設当初に想定していなかったバックグラウンド事象による効果だと考えられる。

4.6 低エネルギー領域

図4.10の1MeV以下の領域では、観測データとPMTバックグラウンドシミュレーションとの間に明らかな相違が見られる。高エネルギー領域とは異なり、建設当初に想定していたバックグラウンド事象では説明できない予想外のバックグラウンドの存在が明らかになった。図4.11の100keV以下の低エネルギー領域に注目する。本実験のような暗黒物質直接探索において、10keV以下は特に重要な領域である。しかし、その領域では支配的なバックグラウンドであると想定されていた光電子増倍管バックグラウンドの100倍近いバックグラウンドが存在する。この想定外のバックグラウンドに関しては、4.7章で詳しく説明する。

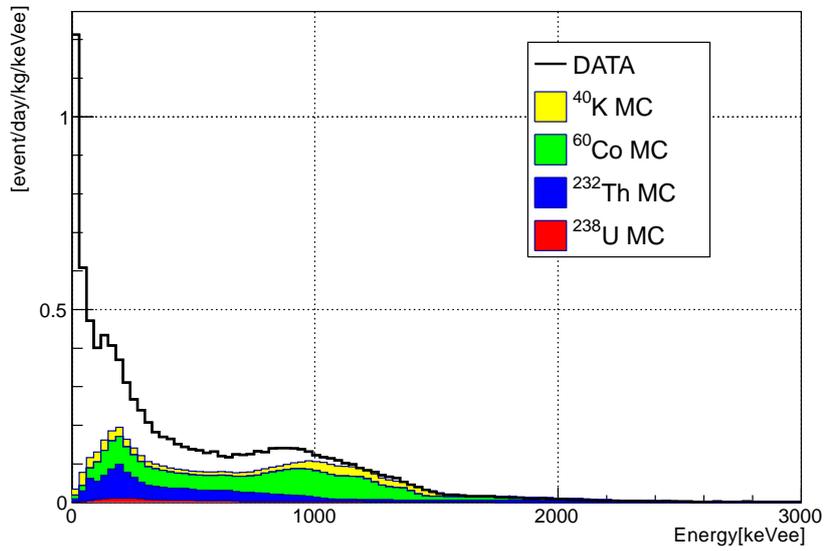


図 4.10: 足し合わせた PMT ガンマ線の MC データと観測データとの比較

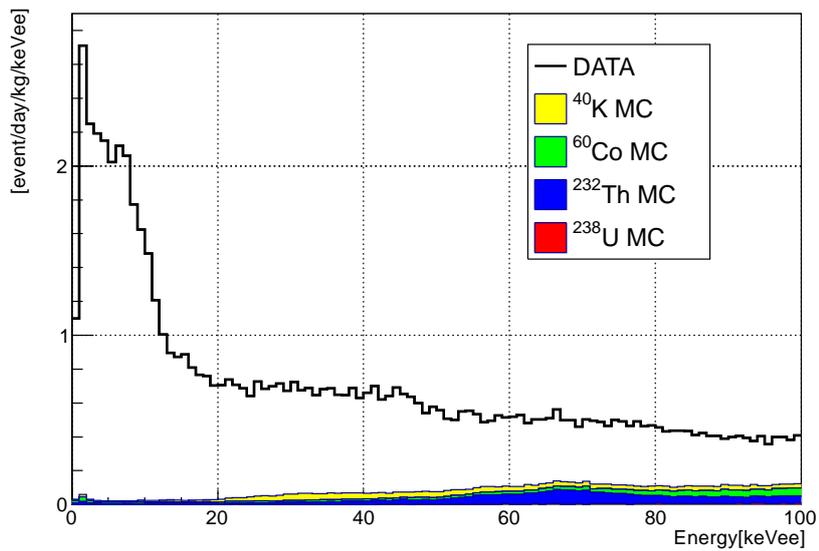


図 4.11: 足し合わせた PMT ガンマ線の MC データと観測データとの低エネルギーでの比較

4.7 他バックグラウンドとの足し合わせ

今回の PMT 由来のガンマ線の研究などを通して、全エネルギー領域で主要だと考えられていた PMT からのガンマ線による当初に見積もられていたバックグラウンドを超過する想定外のバックグラウンドが存在する事が明らかになった。様々な研究を通して、想定外のバックグラウンド事象の原因となっているバックグラウンド源の大部分の正体も突き止める事ができた。

想定外のバックグラウンド源は PMT のクォーツ窓とコパール側管とを圧着させるために約 200g 使用されているアルミニウムと、液体キセノンに直接触れる検出器表面に付着した ^{222}Rn の娘核が有力である。アルミニウムに含まれる放射性不純物と検出器表面の ^{222}Rn 娘核のベータ崩壊による事象が大きなバックグラウンドとなっていたと考えられる。

アルミニウムに含まれる放射性不純物からは低エネルギーのガンマ線のみしか発生せず、HPGe 検出器でのサンプル測定之感度が悪かったため、アルミニウム内の放射性不純物が残存したと考えられる。このアルミニウムはキセノンに直接接している。

また、FlashADC を用いた解析による粒子識別の結果アルファ粒子事象が検出器表面付近で集中的に発生していることが明らかになった。この検出器表面のバックグラウンドは検出器建設時に付着した空気中の ^{222}Rn の娘核が残存している可能性が考えられる。このバックグラウンドは、 ^{210}Pb 換算でおよそ 40mBq 相当であると見積もられている。

これらの新たに明らかになったバックグラウンドに関するシミュレーションが行われた。図 4.12 は新たにを行ったバックグラウンドのシミュレーション結果を当初に見積もっていた PMT ガンマ線のシミュレーションと足し合わせたものである。黒い実線が観測データ、黄色が建設当初見積もられた PMT 由来のガンマ線によるバックグラウンド事象、それ以外は今回新たに見積もったバックグラウンドのシミュレーションである。

また、図 4.12 の 5keV 以下の極低エネルギー領域では観測データと重ねたバックグラウンドとの間にまだ大きな違いが見られる。この差を説明するバックグラウンドの候補として PMT とホルダーの間に光漏れを防ぐために使用されている GORE-TEX[®] にごく微量に含まれる可能性がある炭素の放射性同位体の崩壊によるバックグラウンド事象が考えられる。4.8 章で述べる検出器の改造では、GORE-TEX[®] は使用せずに検出器の再構成を行う。

4.8 XMASS 検出器の改造計画

2012 年 6 月に内部キャリブレーションロッドが検出器内に落下するという事故が起こった。この落下事故を機に、XMASS 検出器の低バックグラウンド化計画が実行に移された。この改造計画は、落下事故による検出器損傷の修復と、4.7 章で言及したアルミと銅表面のバックグラウンド源による事象の除去、それによる検出感度の向上などの目的を持つ。2013 年度春に検出器の改造が完了し、観測を開始する予定である。

改造を経て、建設当初に見積もられていた光電子増倍管由来のガンマ線バックグラウンドが支配的であるという状態を実現すれば、数 keV 程度の領域では $0.1[\text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}\text{keV}^{-1}]$ 程度の低バックグラウンド環境が自己遮蔽能力を活用した有効体積カットなしで実現可能であると考えられる。図 2.4 で示した、暗黒物質質量 $M_{DM} = 50\text{GeV}$ 、散乱断面積 $\sigma = 10^{-42}\text{cm}^{-2}$ の DAMA/LIBRA 領域の暗黒物質のエネルギースペクトルと図 4.11 を比較すると、暗黒物質スペクトルが PMT バックグラウンドスペクトルを大きく超過する。

また、有効体積カットを用いる事で、XMASS 実験の目標とする検出感度である $M_{DM} = 100\text{GeV}$ 、 $\sigma = 10^{-44}\text{cm}^{-2}$ も実現可能であると期待される。

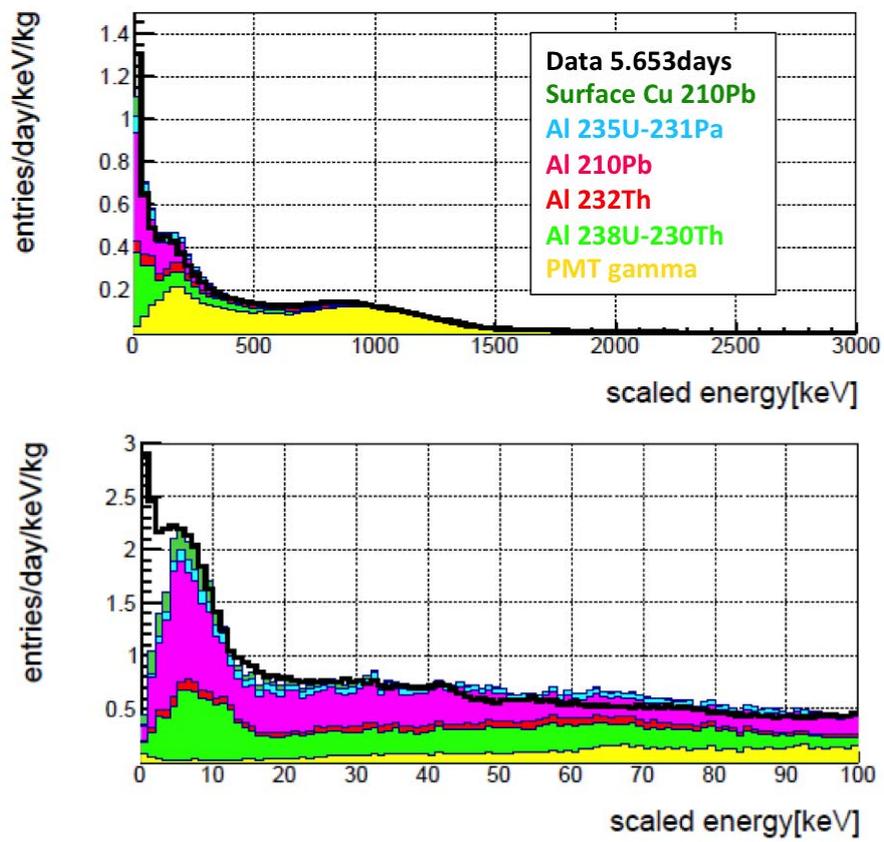


図 4.12: 新たに見積もったバックグラウンドを含めたシミュレーション結果の足し合わせ

第5章 シミュレーションプロセスの高速化

前章の PMT 由来のバックグラウンドシミュレーションのプロセスを行った際、約 1 日観測相当分のシミュレーションデータを得るのに 100CPU を用いて、約 1 日のプロセスが必要だった。このように、XMASS の検出器シミュレーションプロセスは非常に遅く、高統計のシミュレーションデータを得るにはシミュレーションプロセスの高速化が不可欠である。本章では、シミュレーションツールキット Geant4 の新機能“Parallel World Geometry”¹を用いたシミュレーションプロセスの高速化について述べる。

5.1 Geant4

XMASS 実験の検出器シミュレーションには Geant4(for GEometry And Tracking) が用いられている。Geant4 は素粒子物理学実験などのためのシミュレーションツールキットである。ユーザーは Geant4 を構成するツールを組み合わせることで、検出器や医療機器などで起こる素粒子反応のシミュレーションを行う事が可能である [36]。

5.1.1 geometry の作りかた

Geant4 における物質の構造“geometry”の作り方を簡単に述べる。Geant4 で geometry の定義は、概念的に 2 層に分けられ、それぞれ Solid と Volume と名付けられている。Solid で geometry の形状と大きさを設定し、Volume に定義した Solid を渡す。Volume で構成する材質や磁場、位置、回転などの情報を決定する。

また geometry を作成する際には、図 5.1 のように、特別な Volume “world volume”を作成しなければならない。この world volume は実験室を表し、他の全ての Volume がこの中に収まっている必要がある。図 5.1 にような geometry が存在する時、Volume A は Volume B の “mother” と呼ばれ、mother volume はその daughter volume を完全に取り囲んでいなければならない。

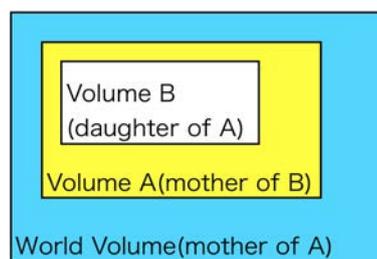


図 5.1: World, mother and daughter volume.

¹Geant4.9.5 から導入された。

5.2 時間浪費の原因

5.2.1 optical photon process in XMASS simulation

XMASS 検出器では液体キセノンのシンチレーションによって発生した光子が 642 本の光電子増倍管によって観測される。暗黒物質検出には数 keV という低エネルギーの事象の観測を必要であるので、光子ひとつひとつの動きを正確にシミュレートする必要がある。XMASS 検出器で発生する単位エネルギー当りの光子数は約 100 photons/keV である。XMASS 検出器シミュレーションでは検出器の複雑な構造を再現している。光電子増倍管の窓に光子が入射する際に、光子の検出効率が入射角依存性を持つため、発生した全ての光子の軌跡を track する必要がある [34]。そのため、シミュレーションプロセスに膨大な時間が必要とされる。

表 5.1 に 662keV のガンマ線事象を検出器中心で発生させた際に必要であった時間を示す。イベントが始まってから終わるまでの全てのプロセスの時間と発生した optical photon の tracking のみのプロセスの時間である。時間は発生した optical photon の数で規格化した。この結果、プロセス時間において optical photon の track に使用する時間が支配的である事が分かる。

	optical photon process	whole process
662 keV gamma event	2.6	3.3

表 5.1: 検出器中心から 662keV ガンマ線を発生させた際のプロセスに必要な時間 [sec/10000photons]

5.2.2 プロセス時間とステップ数

optical photon の tracking プロセス時間がプロセス時間の大部分を占有している事が分かったので、その原因を追求する。原因の候補として、検出器表面の複雑な geometry を持つ部分で optical photon が反射を繰り返している可能性が考えられる。検証を行うため、optical photon を検出器中心から検出器表面に向けて、方向を変えながら発生させた。一方向につき 10000 個の optical photon を一斉に発生させた。図 5.2 はその際に optical photon のプロセスに費やした時間の分布と Geant4 内での optical photon track の step 数の平均値分布である。図 5.2 の点 AB については 5.2.3 章で述べる。図 5.3 に正面から撮影した六角型 PMT を示す。図 5.3 と比較すると、図 5.2 は左右ともに検出器表面の geometry に影響を受けている事が分かる。双方で高い数値を持っている部分は光電子増倍管の窓と側管の圧着と光電面の帯電を防ぐために使用されているアルミニウムである。アルミニウム表面で optical photon が反射されるためにプロセス時間と step 数が増加していると考えられる。また、図 5.4 はプロセス時間と step 数の二次元分布であり、二つの値に線形性が存在する事が分かる。

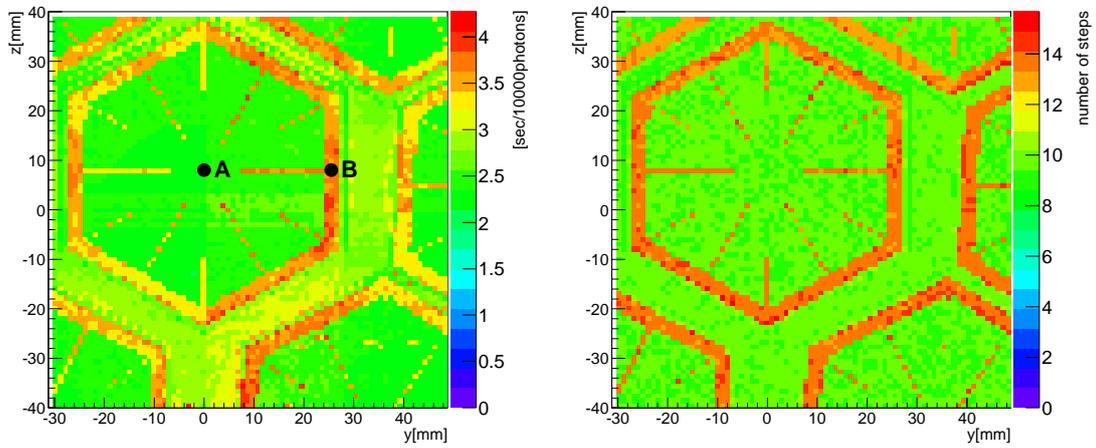


図 5.2: 検出器中心から方向を変えながら optical photon を発生させた時の時間分布 (左) と step 数分布 (右)

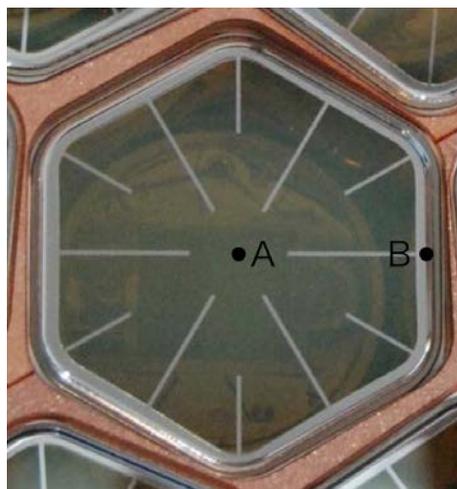


図 5.3: 正面から撮影した六角型 PMT。点 A,B はそれぞれ図 5.2 の A,B 点に相当する。

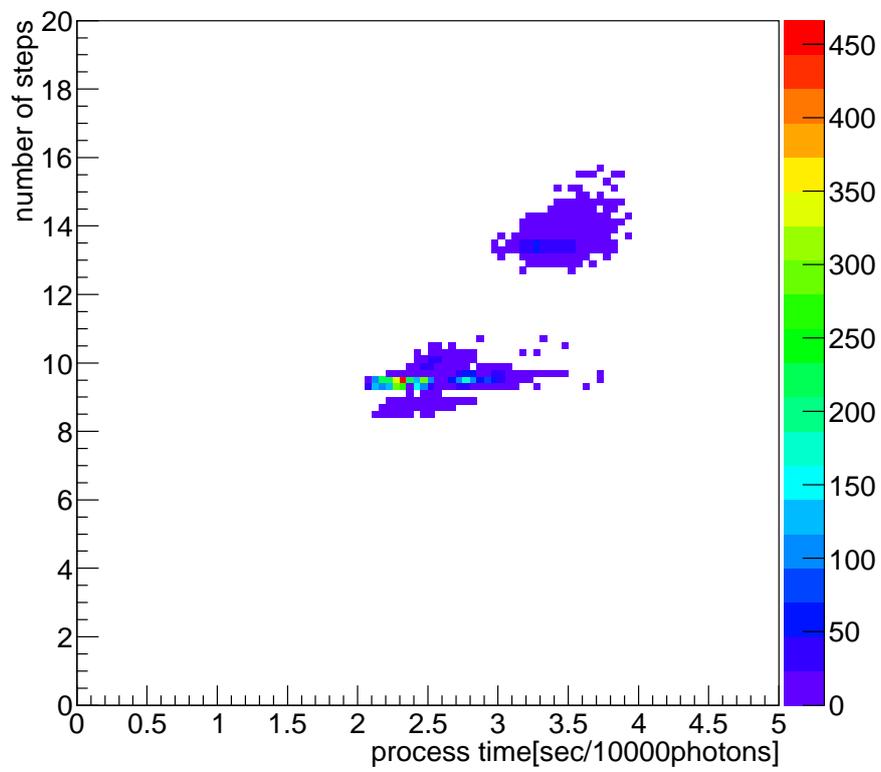


図 5.4: optical photon を検出器中心から表面に向かって発生させた際の時間と step 数の二次元分布

5.2.3 Process times of optical photons

具体的にどのプロセスで膨大な時間を要しているのかを確かめるために、検出器内の様々な場所から optical photon を発生させて、プロセスによる所要時間の測定を行った。

process time in liquid xenon

まず、液体キセノン中を optical photon が移動するのに必要とされるプロセス時間を測定した。この際、図 5.5 のように光電子増倍管表面に向けて optical photon を発生させて、距離のみを変化させて、プロセス時間の変化を計算した。発生させた場所は検出器中心と光電子増倍管の直前であり、optical photon の飛距離の差は 36.5cm である。この時、光電子増倍管窓中心のアルミニウムのない光電面 (PhotoCathode、図 5.2 左点 A) とアルミニウム (Al ring、図 5.2 左点 B) の二点に向けて、optical photon を発生させた。

その結果、それぞれ表 5.2 のプロセス時間を得た。光電面の方向に発生させた場合とアルミニウムリングとで発生点による時間差が大きく異なる。これは、光電子増倍管直前で発生させた optical photon の方が検出器中心よりも吸収や散乱を受けにくく、アルミニウムリングで反射される割合が高いためだと考えられる。反射された optical photon はさらにプロセスを行うので、光電子増倍管直前で発生させた場合の方が時間を多く消費している。

光電面に向けて発生させた場合の時間差をもとに液体キセノン中の移動に費やすプロセス時間を計算すると、約 0.1[sec/10000photons/10cm] となった。

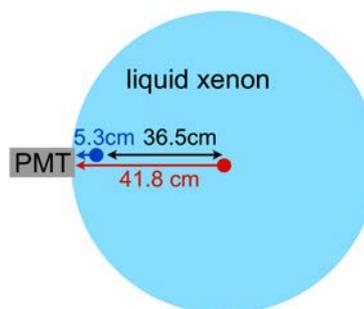


図 5.5: optical photon の液体キセノン中の移動のプロセス時間測定

	Photo Cathode	Al ring
from PMT front	~1.7	~5.3
from detector center	~2.1	~4.0

表 5.2: プロセスに必要なとされる時間 [sec/10000photons]

process time for Al reflection

次に、アルミニウムによる optical photon の反射のプロセスに必要なプロセス時間の測定を行った。反射の影響を見るために、図 5.6 のように光電子増倍管窓中からアルミニウムリングに向けて optical photon を発生させた。アルミニウムでの反射以外の影響を出来る限り排除するために、液体キセノンの吸収長とアルミニウムの反射率を変化させて測定している。

表 5.3 に測定したプロセス時間と平均 step 数を示す。①ではアルミニウム表面での反射率と液体キセノン内の吸収長を 0 にし、図 5.6 の赤矢印のように発生した optical photon の大部分がアルミニウム表面で吸収されるようにした。②では、反射率が 1、吸収長が 0 なので、青矢印のように大部分がアルミニウム表面で反射して窓と液体キセノンの境界面で吸収される。また③では、液体キセノンの吸収長を default 値の 300cm にしてあるので、紫矢印のように光電子増倍管窓外に optical photon が到達する。

①と②の値を比較すると、アルミニウムで反射し液体キセノンに到達して吸収されるまでに約 1.5[sec/10000photons] のプロセス時間を要する事が分かる。また①は、optical photon が発生して窓を 2.2mm 移動してアルミニウム表面で消える、非常に単純なプロセスである。なので、①のプロセス時間の約 0.2[sec/10000photons] は一つのイベントを開始して終了するだけのオフセットの時間とほぼ同値であると考えられる。また、②と③の差をとった ~2.9[sec/10000photons] は反射後のプロセスに費やされる時間であると考えられる。

以上より、アルミニウムでの反射から液体キセノンに到達するまでのプロセスに約 1.5[sec/10000photons] のプロセス時間を要する事が確認出来た。これは反射後に、次に述べる液体キセノンと光電子増倍管窓の間の境界面を optical photon が移動するプロセスを行うためだと考えられる。

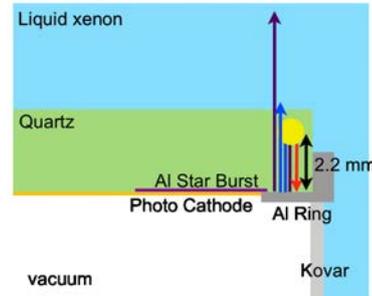


図 5.6: optical photon の液体キセノン中の移動のプロセス時間測定

		Process time [sec/10000photons]	mean step number
①	Al reflectance = 0.0 Absorption length=0cm	~0.2	~1.0
②	Al reflectance = 1.0 Absorption length=0cm	~1.7	~3.9
③	Al reflectance = 1.0 Absorption length=300cm	~4.6	~14.5

表 5.3: プロセスに必要なとされる時間

process time for boundary between liquid xenon and PMT window

最後に、液体キセノンと光電子増倍管窓との間の境界面でのプロセス時間の測定を行った。図 5.7 のように光電子増倍管の光電面とアルミニウムリングに向けて、光電子増倍管窓の直前と水晶窓中から optical photon を発生させてプロセス時間を比較した。この測定では、吸収長 300cm、散乱長 60cm、アルミニウム表面の反射率 0.8 と全て default 値のパラメータを使用した。

表 5.4 はそれぞれのプロセスに要した時間である。光電面とアルミニウム方向それぞれ光電子増倍管直前と窓中から発生させた場合の時間差を計算すると、それぞれ約 1.3、約 1.7[sec/10000photons] である。平均をとると、液体キセノンと光電子増倍管窓の間の境界面を optical photon が移動するプロセスに要する時間は約 1.5 [sec/10000photons] であると考えられる。

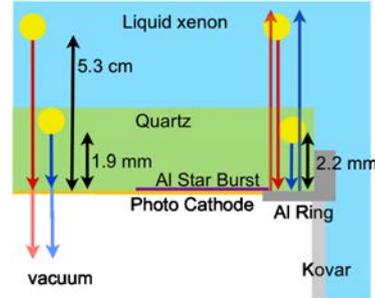


図 5.7: 液体キセノンと光電子増倍管窓との間の境界面でのプロセス時間測定

	to photo cathode [sec/10000photons]	to Al ring [sec/10000photons]
from PMT front	~1.8	~5.3
from PMT quartz	~0.5	~3.6

表 5.4: 境界面でのプロセス時間

process time summary

XMASS 検出器シミュレーションにおいて、optical photon のプロセスに要する時間の測定結果を表 5.5 にまとめた。XMASS 検出器表面の光電面被覆率は約 70% と非常に高いため、②の液体キセノン-光電子増倍管窓間の境界面でのプロセス時間が支配的であると考えられる。これは、5.3.2 章で説明する、step 長を決定する際のプロセスによるものだと考えられる。

また、③のアルミニウムの反射による約 1.5[sec/10000photons] は反射のプロセスが直接影響している訳ではなく、反射後に②のプロセスを行うためだと考えられる。5.2.2 章の結果で、プロセス時間と平均 step 数がアルミニウムで大きくなっていったのは、④で示した反射後のプロセスによるものだと考えられる。

	process	time [<i>sec/10000photons</i>]
①	Transportation in liquid xenon (/10cm)	~0.1
②	Liquid xenon - PMT boundary	~1.5
③	Reflection at PMT Al ring	~1.5
④	Process after reflection	~2.9
⑤	Offset	~0.2

表 5.5: プロセス時間まとめ

5.3 Boolean Operation

5.2.3 章のプロセス時間の研究によって、optical photon が光電子増倍管水晶窓と液体キセノンとの境界を移動する際にプロセス時間の大部分を使用している事が明らかになった。この原因の候補として、Geant4 の機能”Boolean operation”が挙げられる。

Geant4 では、geometry 同士の Overlap(部分的な重なり) は禁止されている。図 5.8 左のように、ある volume がその mother volume² に全て含まれる形は許されている。しかし、図 5.8 右のような、その mother volume からはみ出してしまう Overlap は禁止されており、volume 同士が overlap している部分の計算結果は保証されない。しかし、図 5.8 右のような重ね方だけでは検出器の複雑な構造をシミュレーションに反映させる事は出来ない。

そこで提供されているのが、Geant4 の機能のひとつ”Boolean operation”である。Boolean operation を用いる事で、図 5.9 のように二つ以上の Solid を用いてより複雑な形状の solid を作成する事が可能になる。例えば、G4UnionSolid を用いれば 2 つの solid を結合した形状、G4SubtractionSolid では 1 つの solid からもう 1 つの solid と重なる部分を除去した形状、G4IntersectionSolid では 2 つの solid が重なり合う部分の形状の solid を作成する事ができる。



図 5.8: 正しい geometry の重ね方(左) と禁止されている overlap した geometry(右)

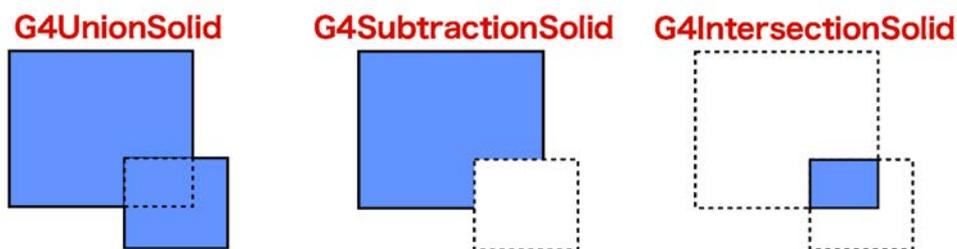


図 5.9: G4UnionSolid(左) と G4SubtractionSolid(中) と G4IntersectionSolid(右)

5.3.1 Boolean operation in XMASS simulation

XMASS 検出器シミュレーションでは PMT などの詳細な構造を再現している。そのために、大量の boolean operation と solid を用いている。

XMASS 検出器では無酸素銅 PMT ホルダーから、PMT がはみ出す構造になっており、検出器 geometry を作成するには図 5.10 左の部品を用意する。PMT ホルダーにはあらかじめ boolean operation を用いて PMT を入れるための穴を空けておき、PMT を成型する。また、PMT を形成する

²5.1.1 章参照

solid をひとつにまとめるための液体キセノンを作成する。これらをひとつにまとめる事で、図 5.10 右のように XMASS 検出器を作成する。

この手法では PMT の成型以外にもホルダーの穴にも大量の boolean operation と solid を必要とする。PMT ホルダー一枚に約 50 回、六角 PMT では一つにつき約 20 回の Boolean operation を用いており、XMASS 検出器は 60 枚の PMT ホルダーと 642 個の PMT で構成されているので、検出器全体では約 15000 回となる。

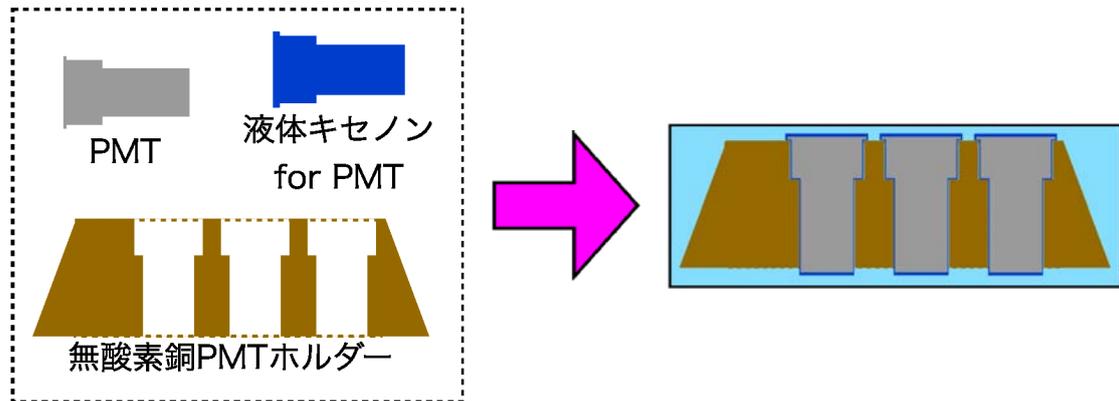


図 5.10: Boolean operation を用いた XMASS 検出器の作り方

5.3.2 Track の衝突判定

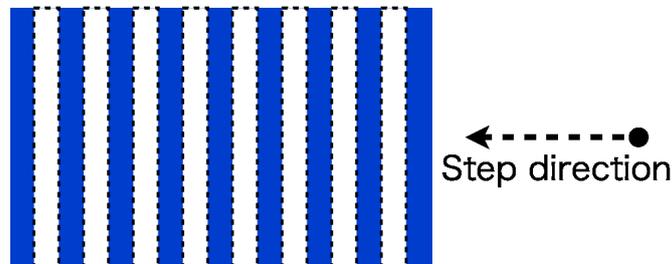


図 5.11: step 長決定時の solid 衝突判定

Geant4 では粒子の移動する軌跡を track と呼ぶ。また、track を相互作用や崩壊のようにプロセスを境に細分化したものが step である。

Geant4 を用いて作成したシミュレーションプログラムが粒子の step 長を決定する際に、step の方向付近の solid に対して衝突判定を行う。衝突する最短の距離を step 長として提案し、崩壊や他粒子との相互作用などから提案された step 長と比較される。

この際、boolean operation で作成された boolean solid が step の方向に存在すると、Geant4 はその boolean solid に含まれる全ての solid に対して衝突判定を行う。そのため、boolean operation を大量に用いている geometry では判定回数が増加する。例えば、図 5.11 には、5.4.1 章で定義する、boolean operation を用いて構成された boolean solid がある。ここでは、一つの青い直方体から G4SubtractionSolid を用いて点線で囲まれた形状を 8 回除去している。また、step の direction を矢

印で表している。この solid は boolean solid なので、boolean solid に含まれる solid では矢印から十分に遠い (本来なら衝突判定が必要ない) 位置にある solid まで衝突判定がなされて、本来なら青い solid ひとつの衝突判定でいいところが、結果的に 9 つの solid に対して衝突判定が行われる。

XMASS 検出器シミュレーションの PMT ホルダーには一枚当たり約 50 回、六角 PMT1 つに約 20 回の boolean operation が使われている。それと重ねて大量の光子が発生するため衝突判定回数が非常に多くなり、プロセスに消費する時間が増加している可能性が考えられる。XMASS 検出器のシミュレーションプロセスを高速化するには、

- boolean operation の回数を削減し、それぞれの solid を独立させる。
- 単純に solid の数を削減する。

のどちらかが必要であると考えられる。

5.4 Parallel World Geometry

boolean operation の回数と solid の数を削減するために有用な方法がある。Geant4.9.5 から導入された新機能“Parallel World Geometry”である。

この機能を用いると、シミュレーション中での real world の他に parallel world を作る事が可能になる。Parallel world を作ると、図 5.12 のように別の world³ の volume 同士の overlap が許可される。従ってこの機能を用いる事で、boolean operation を使う事なく、図 5.8 右のような geometry を作成が可能になる。図 5.12 右では Real World, Parallel World の順番に重ねており、tracking の際には後から重ねた world の volume が優先される。

この機能を使用すれば、ユーザーの使い方によっては boolean operation の回数、solid の数を削減する事が可能になる。

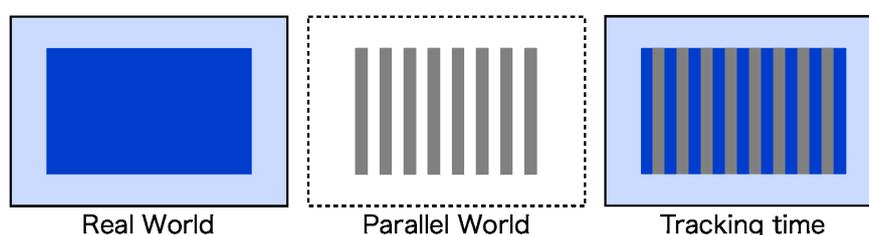


図 5.12: Parallel World 模式図。また、Parallel world を用いた図 5.13 の geometry の作成方法。1 層目の world に大きな長方形のシンチレーターを置き、2 層目に 8 枚の鉛を置いて重ねている。

5.4.1 小規模シミュレーションでのプロセス高速化の実証

新機能“Parallel World Geometry”を使用することでプロセス時間の短縮が可能かどうかの検証のために、boolean operation と parallel world のふたつの手法を用いて同じジオメトリを持った小規模なシミュレーションプログラムを作成して、プロセス時間の比較を行った。作成したのはシンチレーターと鉛が層になった非常に簡単なカロリメーターである。図 5.13 に視覚化された geometry を示す。まず従来の手法では図 5.14 のように、8.5×5×5cm の長方形のシンチレーター (図 5.13 青) を用意して、boolean operation の G4SubtractionSolid を用いて鉛を入れるための 0.5×5×5cm の空間を 8 か所作り、その大きさに合わせた鉛 (グレー) を 8 枚設置した。また一方では、Geant4.9.5 を使用して、図 5.12 のように parallel world を用いて二つの world を作成した。1 層目の world に大きな長方形のシンチレーターを置き、2 層目に 8 枚の鉛を置いて重ねている。これにより、前者の際に必要な boolean solid はなくなり全ての solid は独立し、シンチレーターに穴を空けるための solid も必要なくなった。

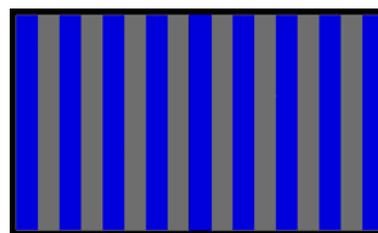


図 5.13: Boolean operation と Parallel world のプロセス時間比較のために作成した geometry。8.5×5×5cm で鉛 (グレー) とシンチレーター (青) を重ねた単純な構造。図 5.11 のように右方向から photon を入射した。

³5.1.1 章参照

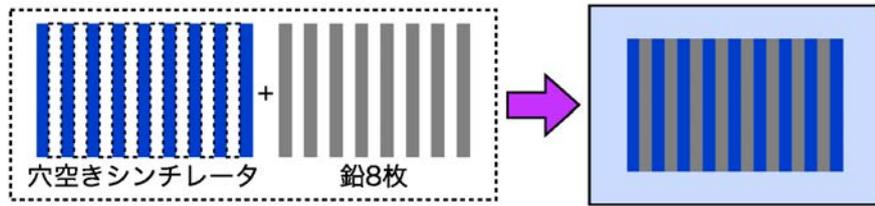


図 5.14: 従来の手法での図 5.13 の geometry 作成方法。長方形のシンチレータ (青) を用意して、boolean operation の G4SubtractionSolid を用いて鉛を入れるための空間を 8 カ所作り、その大きさに合わせた鉛 (グレー) を 8 枚設置した。

図 5.15 は boolean と parallel の geometry に向かってキセノンの発光波長 $\sim 7\text{eV}$ の photon を図右側から発生させた際のプロセス時間の分布である。青は boolean operation を用いた場合で、赤は parallel world を用いた際の分布である。平均値はそれぞれ約 6.8、4.6[sec/10000photons] である。Parallel world を用いる事でシミュレーションプロセスを約 1.5 倍に高速化する事が可能である事を示した。この geometry は非常に単純である。さらに複雑で多くの boolean operation を使用している XMASS 検出器のシミュレーションでは更なる高速化が期待される。

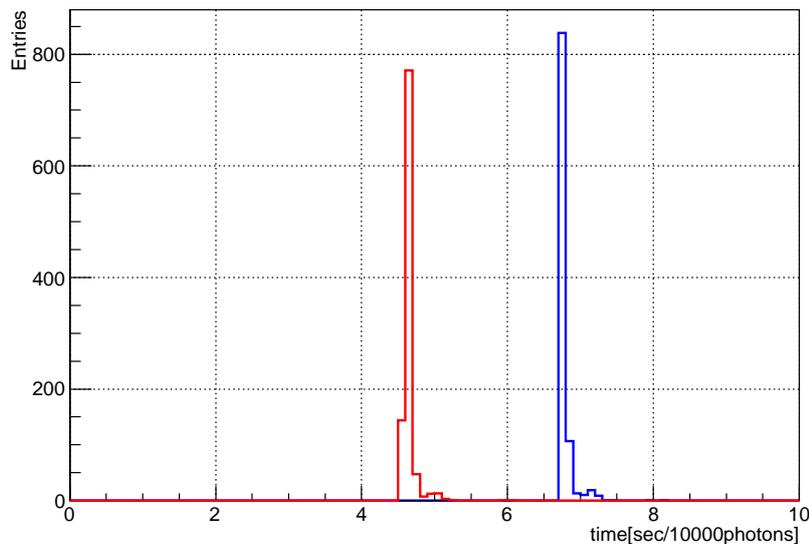


図 5.15: Boolean operation(青) と Parallel world(赤) を用いた geometry のプロセス時間比較

第6章 まとめ

XMASS 実験は岐阜県飛騨市神岡町地下 1000m で行われる、暗黒物質の直接検出を目的とする極低バックグラウンド実験である。暗黒物質を直接観測するには数 keV 程度以下の低エネルギー閾値の実現が必要である。しかし、このような低エネルギー領域では検出器の素材に含まれるごく微量の放射性不純物の崩壊によるガンマ線やベータ線がバックグラウンドとなる。XMASS 検出器において、特に光電子増倍管は検出媒体となる液体キセノンに最も接近して配置される装置であり、642 個と数も多いため、検出器の主要なバックグラウンド源となると考えられる。

4 章では、XMASS 検出器における光電子増倍管由来のバックグラウンドのシミュレーションを行い、観測データとの比較を行った。過去に行われた光電子増倍管由来のバックグラウンドのシミュレーションでは全ての崩壊は光電子増倍管全体から発生させられたが、今回のシミュレーションではそれぞれの放射性不純物を主に含む部分から集中的に発生させた。また本シミュレーションを行うにあたって、シミュレーションのエネルギースケールとエネルギー分解能の較正を行い、補正後のシミュレーションを用いた。

シミュレーションと観測データとの比較の結果、約 1MeV 以上の高エネルギー領域では両者はよく一致する事を初めて示す事に成功した。また、約 1MeV 以下の低エネルギー領域に観測データと光電子増倍管バックグラウンドシミュレーションとの間に明らかな相違を確認した。

新たに明らかになったバックグラウンドの源も現在では大部分が明らかになり、それらの除去を目指した XMASS 検出器の改造計画が進行中である。2013 年度春に検出器の改造が完了し、観測を開始する。

また、XMASS の検出器シミュレーションは光電子増倍管由来のバックグラウンドシミュレーションのプロセスを行った際、約 1 日観測相当分のシミュレーションデータを得るのに 100CPU を用いて約 1 日のプロセスが必要であった。将来、高統計のシミュレーションデータを得るにはプロセスの高速化は不可欠である。5.2 章では、長いプロセス時間を必要とする原因を特定することに成功した。

Geant4 の新機能“Parallel World Geometry”を用いる事で高速化が可能だと考えられる。5.4 章では、単純な構造の検出器シミュレーションを作成、新機能使用前後でのプロセス時間の比較を行い、単純な例で約 1.5 倍の高速化が可能である事を示した。検出器の複雑な構造を再現している XMASS シミュレーションでは、更なる高速化が期待される。

付録A 崩壊系列等

A.1 ウラン系列

A.2 トリウム系列

A.3 崩壊図

A.3.1 ^{40}K

A.3.2 ^{60}Co

A.3.3 ^{85}Kr

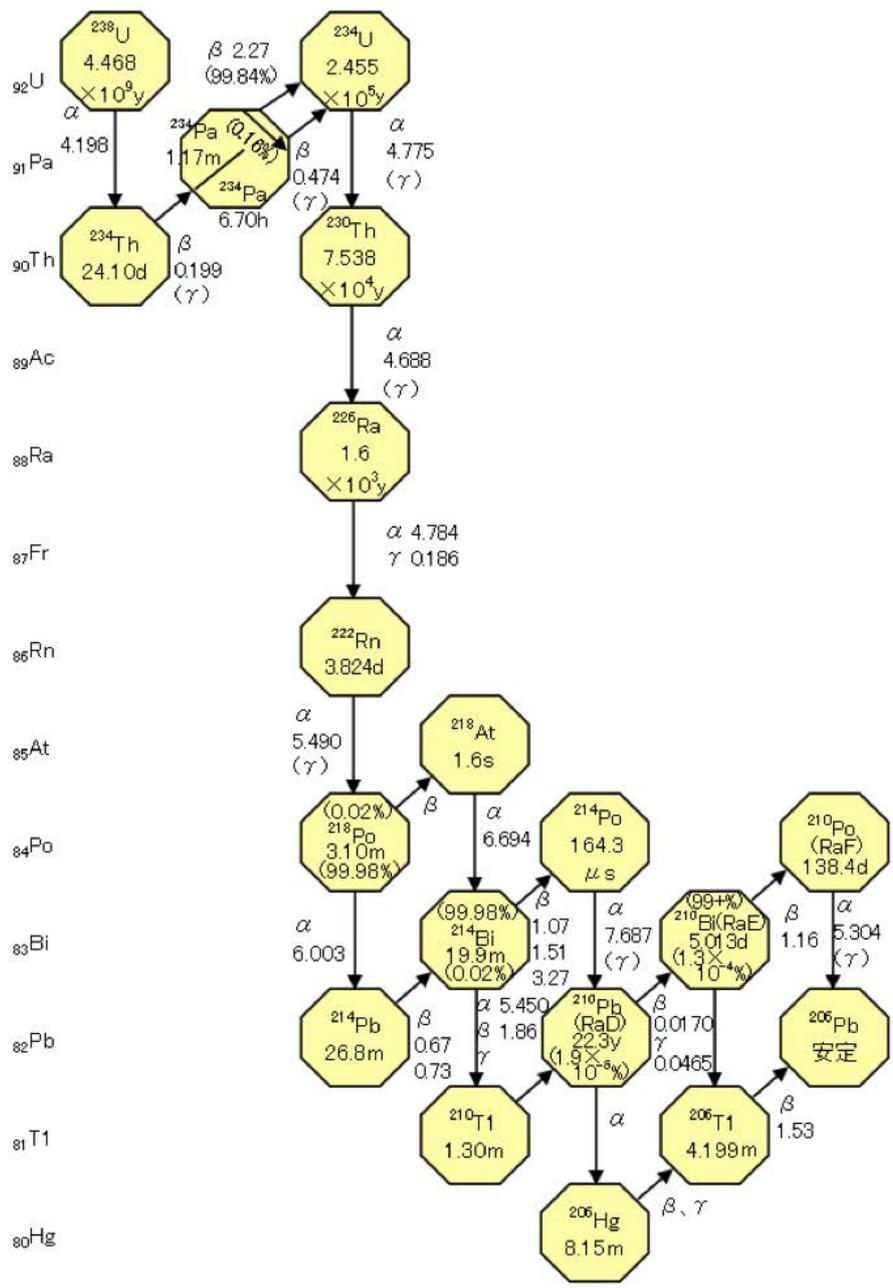


図 A.1: ウラン崩壊系列 [37][38]

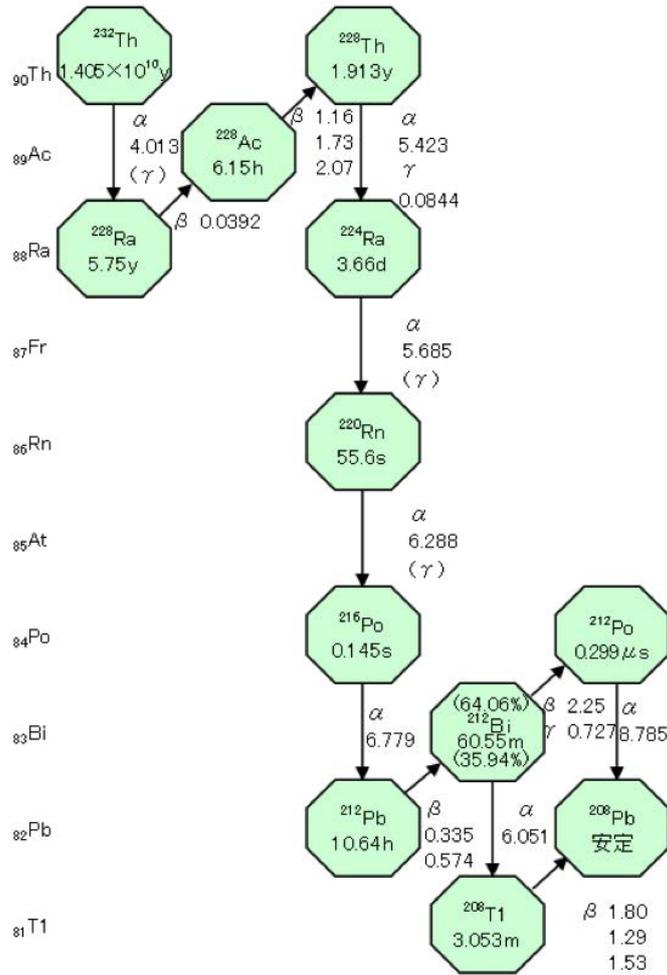


図 A.2: トリウム崩壊系列 [37][38]

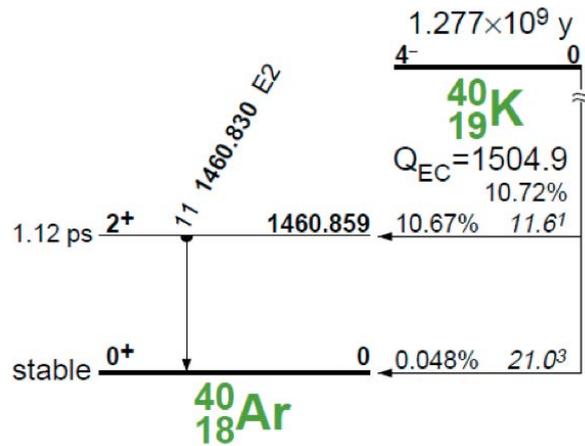


図 A.3: ^{40}K 崩壊図 [39]

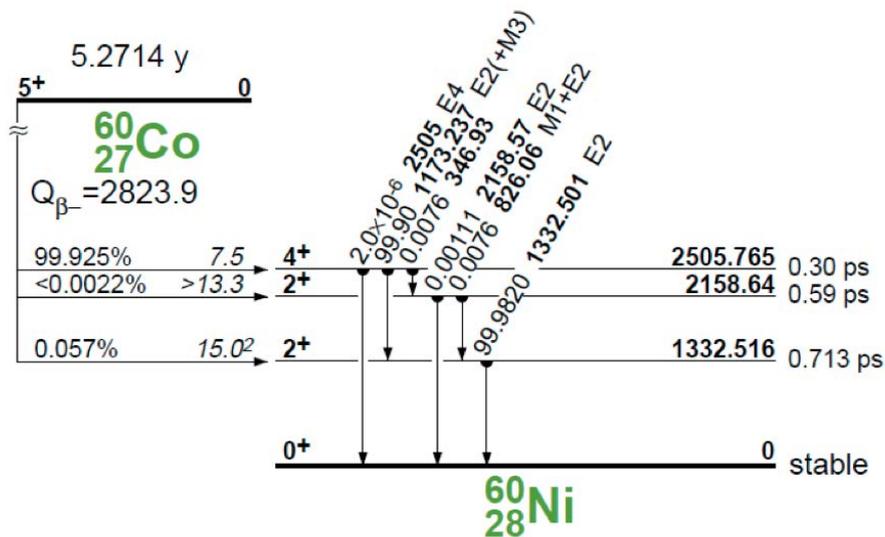


图 A.4: ^{60}Co 崩壊図 [39]

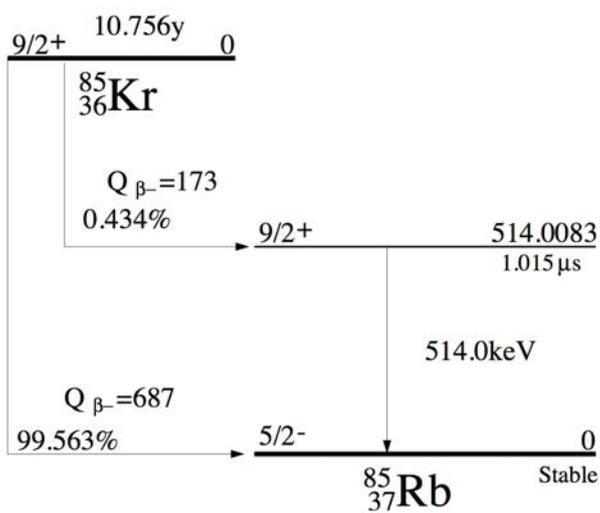


图 A.5: ^{85}Kr 崩壊図 [39]

参考文献

- [1] K.G.Begeman ,et al. Extended rotation curves of spiral galaxies Mon, Not, R. astr. Soc. (1991) 249, 523
- [2] SMOOT, GF ,et al., Astrophys.J.396(1992)
- [3] G. Hinshaw, et al., Astrophys. J. Supp, 180 (2009) 225.
- [4] E. Komatsu, et al., Astrophys. J. Supp, 192 (2011) 18.
- [5] N. Jarosik, et al., Astrophys. J. Supp, 192 (2011)14.
- [6] B. P. Schmidt, et al., Astrophys. J. 507 (1998) 46.
- [7] S. Perlmutter, et al., Astrophys. J. 517 (1999) 565.
- [8] M. Tegmark, et al., Phys. Rev. D 69 (2004) 103501.
- [9] J. Caldwell and J.P.Ostriker, Astrophys.J. 251(1981) 61.
- [10] Barcall ,et al., Astrophys.J.265(1983)730
- [11] R.R.Caldwell and J.P.Ostriker , Astrophys.J.251(1981)61
- [12] M.S.Turner , Phys.ReV.D 33,889(1986)
- [13] K.Griest, Nucl.Phys.Proc.Sup.B 91(2001)393
- [14] Y. Fukuda, et al.,Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- [15] S. Fukuda, et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5651.
- [16] M. S. Turner, Phys. Rep. 197 (1990) 67.
- [17] G. Jungman, et al., Phys. Rep. 267 (1996) 195.
- [18] Robert C. Weast, Editor, Handbook of Chemistry & Physics, The Chemical Rubber Company.
- [19] A. C. Sinnock and B. L. Smith, Phys. Rev., 181 (1969) 1297.
- [20] Particle Data Group: S. Eidelman, et al., Phys. Lett. B 592 (2004) 1.
- [21] A. Baldini, et al., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 13 (2006) 547.
- [22] J. D. Lewin and P. F. Smith, Astropart. Phys. 6 (1996) 87-112
- [23] DAMA/LIBRA Collaborations, Eur. Phys. J. C (2010) 67: 39-49

- [24] The Super-Kamiokande Collaboration, Phys.Lett.452(1999)418
- [25] W.Ootani, master thesis, University of Tokyo (1994)
- [26] A.Minamino, master thesis, University of Tokyo (2004)
- [27] K.Miuchi, master thesis, University of Tokyo (1999)
- [28] M.Ishitsuka, master thesis, University of Tokyo (2001)
- [29] E. Aprile, et al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 131302.
- [30] D. S. Akerlib, et al., Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 011302.
- [31] DMtools
<http://dmttools.brown.edu>
- [32] the XMASS collaboration, XMASS detector paper, submitted to NIMA, arXiv:1301.2815
- [33] 本木大資、東海大学大学院総合理工学研究科博士論文 (2011)
- [34] 平野重利、東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2012)
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/publist/documents/hirano.masterthesis.pdf>
- [35] Jing Liu, " The XMASS 800kg experiment" Presentation slide at TAUP2011
<http://taup2011.mpp.mpg.de/php/downloadPresentationFile.php?type=presentation&sessionId=31&presentationid=206>
- [36] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. and Meth. A 506 (2003) 250-303
- [37] NUBASE2003(G. Audi, et al., Nuclear Physics, A 729 3-128)
- [38] ICRP Publication 107(2008)
- [39] Table of Isotopes, Richard B. Firestone, published by John Wiley & Sons, Inc.

謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方々にご指導を頂きました。

指導教官である竹内康雄先生には、研究の進め方や本論文の構成、文章の細かい校正まで丁寧に指導していただきました。NEUTRINO2012 など様々な発表の場を与えて下さり、多くの経験を積む事が出来ました。また、XMASS 実験に携わる機会を与えてくださった事を深く感謝します。藏重久弥先生には、Geant4 や物理全般について多くを指導していただきました。Geant4 Collaboration meeting に参加させていただいた経験はとても貴重なものでした。身内賢太郎先生には、研究に関して多くの相談にのって頂きました。特に、将来の研究計画を立てる際には全面的にサポートしていただきました。原俊雄先生、鈴木州先生、また発達科学部の青木茂樹先生、高橋覚先生、六條宏紀さん、尾崎圭太さんには、ニュートリノミーティングで、研究や発表内容に関する助言を頂きました。山崎祐司先生や越智敦彦先生には、研究室ミーティングでの研究経過報告や論文講究で助言や指摘を頂きました。深く感謝します。

研究室秘書の横山有美さんには出張などの事務手続きだけでなく、研究の合間の雑談等をさせていただきリラックスする事が出来ました。ありがとうございました。

研究室の先輩である、岡田勝吾さん、矢野孝臣さん、早川俊さん、Matthew King さん、西山知徳さん、岸本巴さん、小西拓也さん、鈴木雄太さん、木村暁彦さん、谷和俊さん、駒井英俊さんには、プログラム言語や物理、研究に関する基本的な事から深く掘り下げた内容まで多くを教えていただきました。研究室同期である江戸勇樹くん、北村拓己くん、山口貴弘くん、渡邊一平くんや、研究室の後輩である稲丸由夫輝くん、大西洋輔くん、来見田吏恵さん、鈴木淳くん、他後輩達とは、よく飲みに行ったりととても楽しく、おかげで充実した学生生活を送る事ができました。

XMASS 実験代表者である鈴木洋一郎先生には、ミーティングで研究内容に関して的確な指示を頂きました。中畑雅行先生には、物理実験に関する貴重なお話を聞かせていただきました。森山茂栄先生には、学部生のころから実験方法や解析、それらに付随する物理など多くを指導していただきました。岸本康宏先生には、シミュレーションを行う上での心構えを教えていただきました。安部航先生には、XMASS 検出器シミュレーションに関して指導していただきました。山下雅樹先生はとても親しみやすい姿勢で接して下さり、物理以外にも多くを教わりました。竹田敦先生には、キャリブレーション方法や解析に関する指導をしていただきました。小林兼好先生には、計算機の取り扱いに関して指導していただきました。梁炳守先生には、シミュレーションに関して指導していただきました。また、小川洋先生には研究手法や解析などを指導していただきました。本論文を執筆するに当たって小川先生の指導は不可欠でした。田坂茂樹先生、関谷洋之先生には、XMASS 実験に加えて、ラドン検出器の研究に関する指導をしていただきました。ありがとうございました。I would also like to thank Dr.Kai Martens and Dr.Jing Liu who gave me accurate comments in the meetings. Thank you very much.

XMASS 実験の先輩である上島考太さん、本木大資さん、横沢孝章さん、五代儀一樹さん、内田

裕義さん、大塚康平さん、平野重利さん、西谷雄輝さんは実験に関する細かい質問や解析ソフトの初歩的な使い方まで丁寧に教えて下さいました。大沢野での食事や買い出しなどでもお世話になりました。また、充実した神岡生活の送りかたを教えて下さったのも先輩方でした。また、岡山大学の森俊彰さんにはとくに仲良くしていただきました。神岡同期である榎本大悟くん、草場文雄くん、高知尾理くん、瀧谷寛樹くん、中野佑樹くん、稗田啓介くん、そして研究室の同期でもある村田亜紀さんとは研究に関して議論したり、たまに飲み会をしたりと充実した神岡生活を送る事が出来ました。ありがとうございました。

また、神岡事務室や警備員、宿舎や研究棟の清掃員、宿舎の食事担当の皆さんのおかげで神岡で生活をしていく事が出来ました。ありがとうございました。

最後に、大学院での研究生活を支えてくれた家族に深く感謝します。

2013年2月 細川佳志