

XMASS実験における
外部ガンマ線源の製作と動作試験

神戸大学理学部物理学科
0543129s 細川佳志

平成23年3月3日

概要

XMASS 実験は、液体キセノンを用いた WIMP 型の暗黒物質の直接探索を目的としている。WIMP は暗黒物質の候補として最も有力視されており、標準物質と弾性散乱をする。XMASS では、暗黒物質がキセノンと反応して生じるシンチレーション光を液体キセノンの周りに配置された光電子増倍管で捕らえて、光量分布から衝突点の場所・衝突のエネルギーを求める。

しかし、数 keV ~ 数十 keV での event rate は約 10^{-2} [event/kg/day/keV] 以下であると予測されており、直接検出するためには低バックグラウンド環境の実現が必要である。残っている最大のバックグラウンドは光電子増倍管からのガンマ線と見積もられている。これらは液体キセノンの外周部で遮蔽される事がプロトタイプ検出器で確認されているが、実機では未確認である。

本研究の目的は、外部から照射したガンマ線に対する XMASS 検出器の動作を評価する事である。

まず、XMASS 検出器外部の純水シールド中にガンマ線源を設置するために、超純水用フランジと透明パイプを用いてガンマ線源の容器を製作した。完成したガンマ線源容器を純水タンク内部に配置し、検出器に外部からガンマ線を照射して、データを収集した。ここで、ガンマ線源として ^{137}Cs を用いた。XMASS 検出器に 100[Hz] 以上の事象が発生すると、データ収集プログラムにデッドタイムを生じる事に注意して線源強度を選択した。解析方法には光量の重心からシンチレーション光の発生点を決定する方法を採用した。得られたデータと GEANT4 を用いたシミュレーションの結果と用いて、キセノンの特性である自己遮蔽能力の確認を行った。

目次

第1章	Introduction	3
1.1	暗黒物質	3
1.2	Weak Interacting Massive Particles(WIMP)	3
第2章	XMASS 実験	4
2.1	液体 Xe	4
2.1.1	自己遮蔽能力	5
2.2	ガンマ線バックグラウンド	6
2.3	プロトタイプ検出器における自己遮蔽能力の確認	7
第3章	外部ガンマ線源容器	8
3.1	ガンマ線照射方法	8
3.2	外部ガンマ線源容器製作	9
3.3	ガンマ線源の選択	10
3.4	神岡でのデータ収集	11
第4章	解析	12
4.1	光量重心法による再構成	12
4.2	光量重心法の有効性の確認	13
4.3	モンテカルロ法による光量重心法を用いたシミュレーション	14
4.4	結果	14
第5章	まとめ	15

第1章 Introduction

XMASS 実験は冷たい暗黒物質の最有力候補である WIMP 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。この章では、探索の対象である暗黒物質の簡単な紹介を行う。

1.1 暗黒物質

まず、暗黒物質について説明する。暗黒物質は宇宙のエネルギー組成の約 23 % を占めると考えられており、暗黒物質の存在は、銀河の回転速度問題や重力レンズ効果などから証明されている。暗黒物質の候補を下に示す。

- バリオン候補
 - MACHO(MAssive Compact Halo Objects)
- 非バリオン候補
 - Hot Dark Matter
候補としてニュートリノが挙げられる。
 - Cold Dark Matter
現在、暗黒物質の大部分は Cold Dark Matter だと考えられている。WIMP とアクシオンなどが候補に挙げられるが、WIMP が最有力視されている。

1.2 Weak Interacting Massive Particles(WIMP)

WIMP は電磁相互作用と強い相互作用をしない、重い素粒子であり、冷たい暗黒物質の候補として最も有力視されている。WIMP は標準物質と弾性散乱をする。しかし、数 keV では、 10^{-2} [event/kg/day/keV] 以下の event rate であると予測される。したがって、低エネルギー閾値、低バックグラウンド環境、大質量検出器が必要とされる。

第2章 XMASS実験

XMASS 実験とは、液体キセノンシンチレーターを用いた宇宙線素粒子研究、ニュートリノ研究のための多目的実験である。XMASS は以下の実験目的から名づけられた。

- Xenon detector for weakly interaction MASSsive particle
暗黒物質の探索
- Xenon MASSive detector for Solar neutrinos
太陽ニュートリノの精密測定
- Xenon neutrino MASS detector
ニュートリノ質量の測定 (double β decay)

WIMP 等が液体キセノンと反応して起こすシンチレーション光の光パターンを液体キセノンの周りを囲んで配置された光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube) を用いて捕らえ、衝突点の場所・衝突のエネルギーを求める。これらの情報からそれぞれの事象を選び出す。

当面の目標として、我々は上に挙げた中で暗黒物質探索を中心に行っていくことにした。キセノン 100kg を用いたプロトタイプ検出器での R & D が終了し、2010 年 9 月に 800kg 液体キセノン検出器が完成し、現在調整中である。図 2.1 に、XMASS 実験計画の流れを検出器の規模と共に示す。以降は WIMP 探索を中心に話を進めていく。

2.1 液体 Xe

XMASS 実験では、シンチレーターとして、液体キセノンを用いている。ここでは、目的の事象を観測するために利点となる液体キセノンの特性、特に自己遮蔽能力を紹介する。

以下が WIMP 直接探索における液体キセノンの有効性である。

- 光発光量シンチレーター ($\sim 42,000$ [photons/MeV])
- シンチレーション光が比較的長波長 (~ 178 [nm])

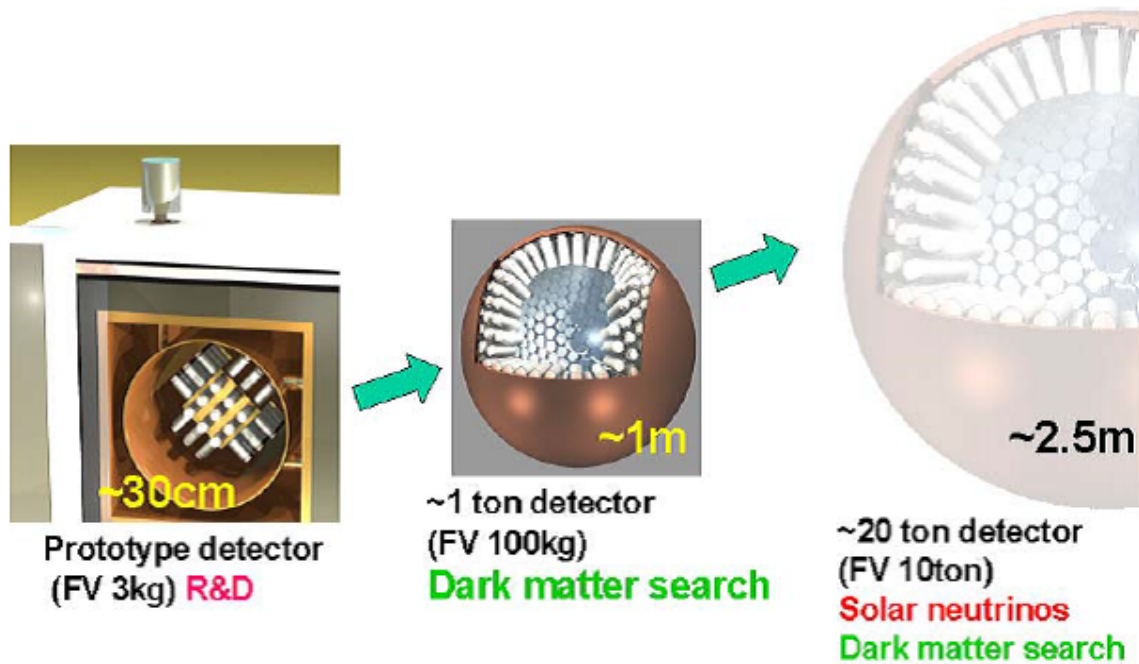


図 2.1: XMASS 実験計画

- 高温度な液体相
- 高密度 (約 $2.96[g/cm^2]$)
- 大きい原子番号
- 相変位が容易
- 発光波形の多様性
- 同位体分離が可能

2.1.1 自己遮蔽能力

液体キセノンの特性である

- 高密度
- 大きい原子番号

によって、吸収長は約 2.77cm と短くなる。そのため、液体キセノン外部からのガンマ線は液体キセノンの外周部で遮蔽される。

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、外来ガンマ線は液体キセノンの外周部で止まり、中心付近ではガン

マ線バックグラウンドフリーな環境が実現できる。

図 2.2 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である。赤い部分が PMT の表面部、青い線が外来ガンマ線の飛跡、濃いピンクの部分が有効体積をそれぞれ示す。

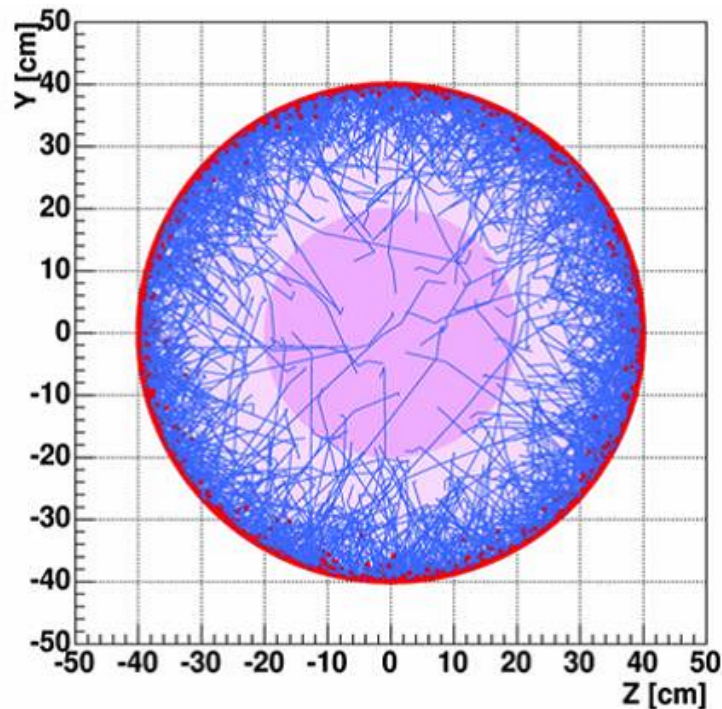


図 2.2: ガンマ線の飛跡シミュレーション

2.2 ガンマ線バックグラウンド

XMASS 実験での WIMP 探索において、低バックグラウンド環境の実現は必要不可欠である。液体キセノンの内部・外部からのバックグラウンドの大部分は、過去の研究によって除去されている。しかし、いくらかのバックグラウンドが未だ残存している。

残存する主要なバックグラウンドの中の一つが PMT 中の自然放射能から発生するガンマ線である。このガンマ線バックグラウンドは上記の自己遮蔽能力によって止められると考えられている。

2.3 プロトタイプ検出器における自己遮蔽能力の確認

プロトタイプ検出器では、自己遮蔽能力の検証を行うため、コリメータからのガンマ線データを用いて、ガンマ線入射方向に対する事象再構成後の位置をデータとシミュレーションとで比較した。用いたデータは ^{60}Co 、 ^{137}Cs を検出器の横方向から照射したものである。

図 2.3 がその結果である。横軸は線の入射方向に対する事象再構成後の位置で、縦軸は各 bin を全事象数で規格化したものである。左図が ^{137}Cs 、右図が ^{60}Co の比較で、青線がデータ、赤がシミュレーションによるもので、影がかかっている部分は、p.e. 飽和領域である。

図 2.3 から、シミュレーションとデータの z 方向の傾きがよく一致し、 ^{137}Cs のエネルギーのガンマ線が液体キセノン内を 20cm 進むと約 1/200 に、 ^{60}Co では約 1/10 になる事が示され、自己遮蔽能力が確認された。

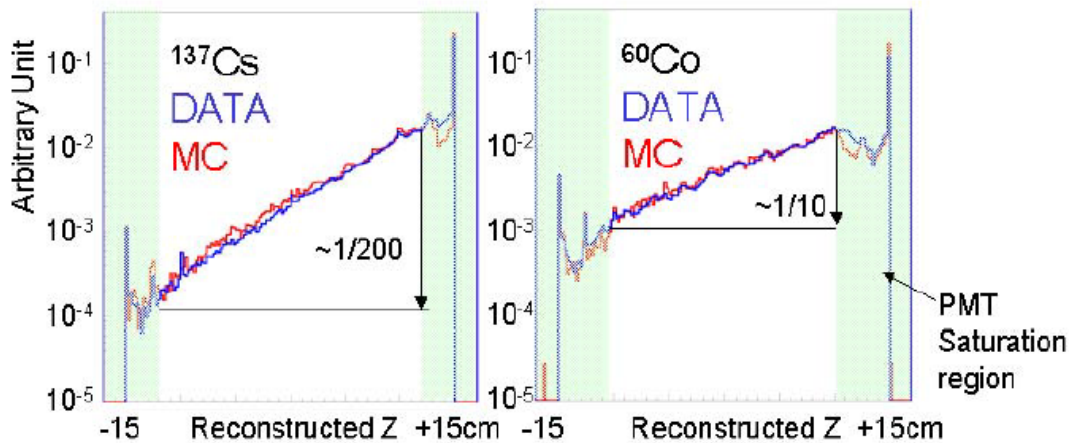


図 2.3: データとシミュレーションのプロトタイプ検出器での自己遮蔽効果の比較

現在、XMASS 実験ではプロトタイプ検出器を用いた R&D は終了し、2010 年 9 月に完成した 800kg 検出器を用いて、データ収集が行われている。この 800kg 検出器では自己遮蔽能力の確認がまだ行われていない。

本研究は、未確認である 800kg 検出器の自己遮蔽能力の検証を目的とする。

第3章 外部ガンマ線源容器

液体キセノンの自己遮蔽能力を確認するため、ガンマ線源を収容する容器を製作し、それを用いて XMASS 検出器にガンマ線を照射、データを収集した。

3.1 ガンマ線照射方法

図 3.1 のように純水タンク内に外部ガンマ線源容器を吊るし、XMASS 検出器にガンマ線を照射した。設置したガンマ線源の位置は $(77, -20, -34)$ [cm] である。座標系は XMASS 検出器中心を原点とした、直交座標を用いた。

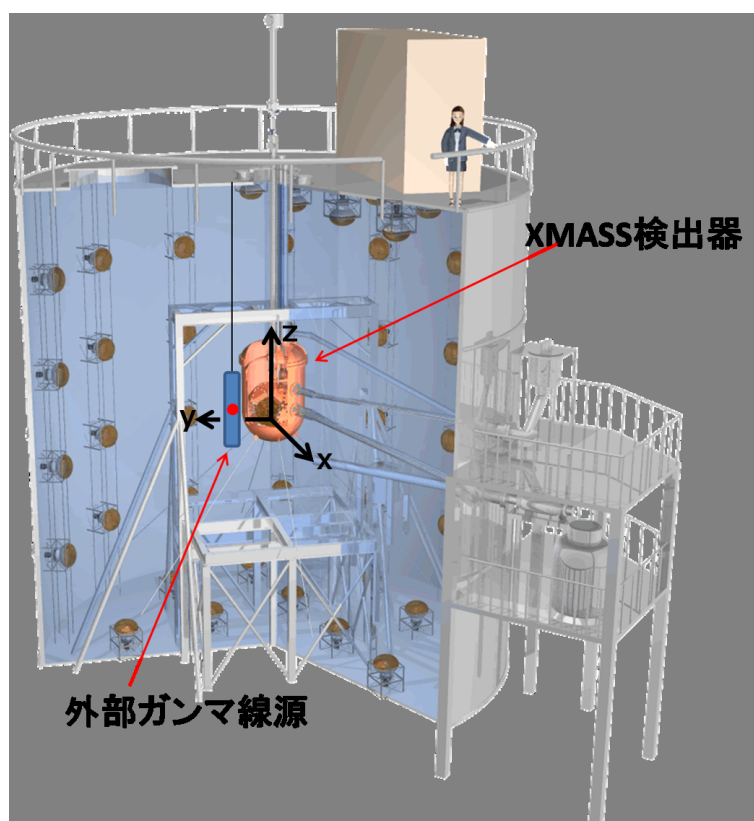


図 3.1: ガンマ線照射方法

3.2 外部ガンマ線源容器製作

図 3.2 が外部ガンマ線源容器のデザインである。PVC 素材の透明パイプと超純水用パイプを用いて、ガンマ線源を固定した。赤い部分がガンマ線源である。そして、両端を超純水用フランジで固定し、純水タンク内に吊るするためのステンレスワイヤーを取り付けた。

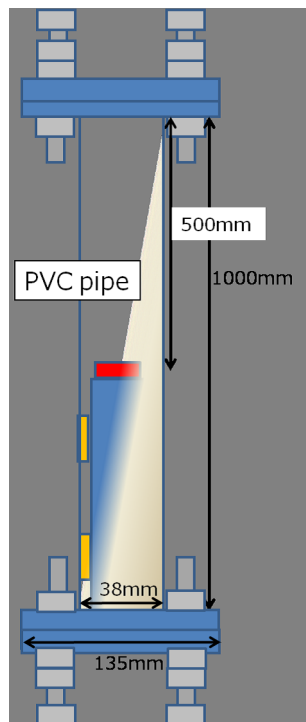


図 3.2: ガンマ線源容器デザイン



図 3.3: 製作したガンマ線源容器

図 3.3 が今回製作したガンマ線源容器である。図 3.4 のようにワイヤーを取り付け、図 3.5 のように disk 状の線源を固定した。



図 3.4: ワイヤー取り付け



図 3.5: ガンマ線源の固定

3.3 ガンマ線源の選択

液体キセノン内部で約 100[event/s] 以上の事象が発生すると、DAQ(データ収集プログラム)にデッドタイムが生じてしまう。それを避けるため、キセノン内部に届くガンマ線が 100[Hz] 以内になるようガンマ線源を選択した。以下に計算方法を示す。

$$x = \frac{n \cdot e^{\{a/Z_{H_2O} + b/Z_{Cu}\}}}{0.04}$$

n [Hz] : 液体キセノンに届くガンマ線の量

x [Bq] : ガンマ線源の強度

a [cm] : H_2O length

b [cm] : Cu length

Z_{H_2O} [cm] : H_2O absorption length

Z_{Cu} [cm] : Cu absorption length

今回、 $a = 20 \sim 30$ [cm], $b = 10 \sim 20$ [cm] である。またガンマ線源として Cs137 を用いるので、 $Z_{H_2O} \sim 30$ [cm], $Z_{Cu} \sim 4$ [cm] である。 $n \leq 100$ [Hz] としたいので、計算結果は約 60[kBq] ~ 1[MBq] となったので、強度 876[kBq] の ^{137}Cs を選択した。

3.4 神岡でのデータ収集

神岡坑内に製作した外部ガンマ線源容器を持ち込み、上記の方法でデータを収集した。図 3.6 がデータ収集の際のガンマ線源容器の様子である。下の表に測定した run2324 の情報を記す。

run number	2324
pre-scale	2
DAQ rate	66.78[Hz]
測定開始時刻	12/09 12:39:57
測定終了時刻	12/09 13:25:05



図 3.6: キャリブレーションホールから吊るしたガンマ線源容器

第4章 解析

神岡で収集したデータの解析と GEANT4 を用いたモンテカルロ法 (以下 MC) によるシミュレーションを行った。実データと MC の解析結果の比較を載せたいが、XMASS 検出器は現在調整中であり、データを公開できる段階でない。なので、今回は MC によるシミュレーションの結果のみを報告する事になる。また、シミュレーションプログラムも現在開発中の仮プログラムである。

4.1 光量重心法による再構成

解析方法には、光量の重心からシンチレーション光の発生点を再構成する方法を採用した。

$$N = \sum_{i=0}^n nPEs_i^2$$
$$x = \frac{\sum_{i=1}^{642} x_{PMT_i} \cdot nPEs_{PMT_i}^2}{N}$$
$$y = \frac{\sum_{i=1}^{642} y_{PMT_i} \cdot nPEs_{PMT_i}^2}{N}$$
$$z = \frac{\sum_{i=1}^{642} z_{PMT_i} \cdot nPEs_{PMT_i}^2}{N}$$
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

ここで、 $nPEs_i$ は i 番目の PMT に届いた photo electron 数、 $(x_{PMT_i}, y_{PMT_i}, z_{PMT_i})$ は各 PMT の位置座標、そして (x, y, z) は再構成された事象発生点の位置座標である。

4.2 光量重心法の有効性の確認

この方法が有用であることを確認するために、モンテカルロ法を用いて、検出器内部(0,0,-30)にガンマ線源 ^{57}Co をおいたシミュレーションを行った。図4.1,4.2,4.3がシミュレーション内で、シンチレーション光が発生した座標の分布である。線源をおいた座標に近い位置にピークが立っている。実際に検出器内部(0,0,-30)にガンマ線源 ^{57}Co を設置して収集したデータを解析した結果、線源をおいた座標にはっきりとピークが立った。この方法による再構成が有効である事が分かる。シミュレーションではZ方向に数cmのずれがあるが、これは液体キセノン中でのシンチレーション光の吸収長などの未決定のパラメータによるものだと考えている。それらを明確にし、シミュレーションに反映させる必要がある。

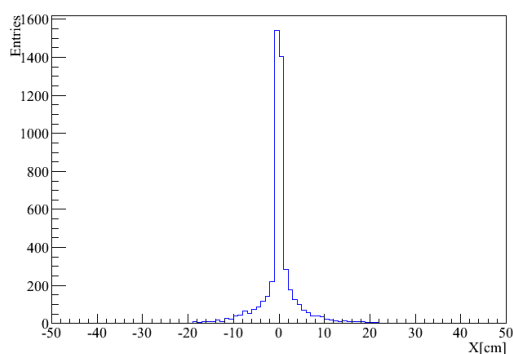


図 4.1: 事象発生点 X 方向座標

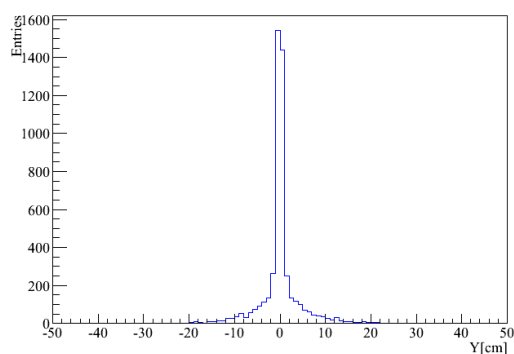


図 4.2: Y 方向

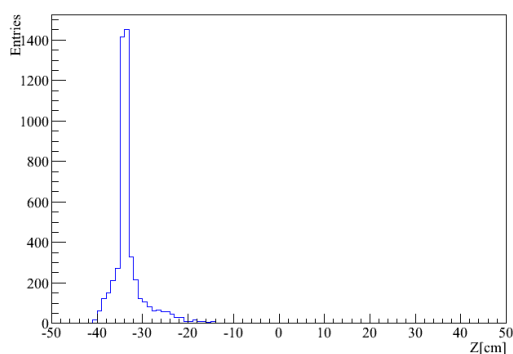


図 4.3: Z 方向

4.3 モンテカルロ法による光量重心法を用いたシミュレーション

図 4.4, 図 4.5 がモンテカルロを用いたシミュレーションの、光量重心法による解析結果である。

PMT は、強い光を受けると飽和事象となってしまう、正確な photon 数を測定できない。現在のシミュレーションでは PMT の飽和事象がまだ考慮されていないので、入射する photon の数が一定を超えると、飽和事象とみなすよう、設定してみた。図 4.4, 図 4.5 で pink は飽和事象に関する考慮はしておらず、gray では入射する photon 数 150[個/PMT] 以上、green は 120[個/PMT] 以上、blue は 100[個/PMT] 以上を飽和事象とみなした。

入射したガンマ線の大部分が液体キセノンの外周部で止まっており、中心から 20cm で設定されている Fiducial Volume にはほとんど入射していない。実データを用いた解析でも同様の結果を得る事が出来た。これらより、自己遮蔽能力が期待通りに働いていると考えられる。

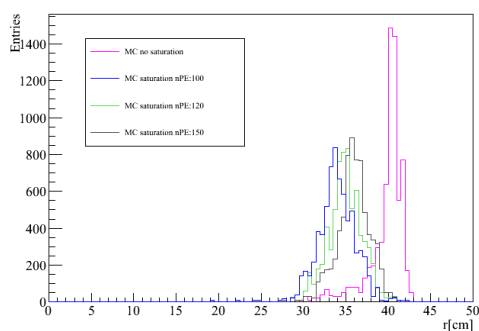


図 4.4: MC 再構成後の vertex 分布

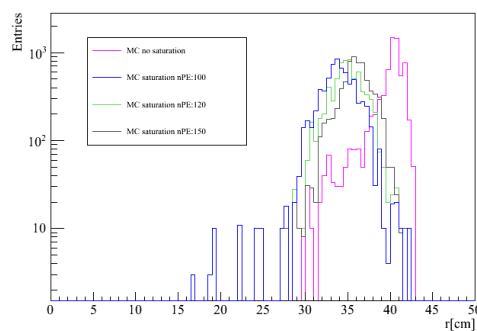


図 4.5: log-scale

4.4 結果

光量重心法を用いる事でデータの解析と GEANT4 を用いた MC シミュレーションを行った。液体キセノン中でのシンチレーション光の吸収長など、まだ決定していないパラメータがあるので、これが最終結果とはいえませんが、MC では自己遮蔽能力が確認できた。

第5章 まとめ

XMASS 800kg 検出器における液体キセノンの自己遮蔽能力を確認するため、外部ガンマ線源容器を製作し、それを用いてXMASS 検出器にガンマ線を照射、データを収集した。光量重心法を用いて、収集したデータの解析・GEANT4を用いたシミュレーションを行った結果、800kg 検出器でも液体キセノンの自己遮蔽能力を確認する事ができた。

しかし、シミュレーションに関しては未決定のパラメータも多く、今後その確認が必要とされる。また、今回のシミュレーションでは統計量が少ないので、その補完も必要である。

参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会, アイソトープ便覧 (1984)
- [2] 足永洋平, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2004)
- [3] 南野彰宏, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2004)
- [4] 穂坂純也, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2005)
- [5] 中島勇波, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2009)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方のお世話になりました。
指導教官である竹内康雄先生には、本研究の全ての分野においての丁寧な指導、XMASS 実験に関わる機会を与えてくれた事を深く感謝いたします。
東京大学宇宙線研究所神岡施設の森山茂栄先生には、神岡現地での実験方法や解析に関する指導や物理実験に対する姿勢を教わりました。安部航先生には、データ解析やシミュレーションについて、指導していただきました。厚くお礼申し上げます。
粒子物理学研究室の川越清以先生、藏重久弥先生、原俊雄先生、山崎祐司先生、鈴木州先生、越智敦彦先生には適切な指導、助言を与えていただきました。また、研究室の先輩である岡田勝吾氏、矢野孝臣氏、早川俊氏、西山知徳氏、大塚康平氏には多くの助言、適切な指導をして頂きました。本当にありがとうございました。最後に、6年間の長い大学生活を支えてくれた家族に深く感謝します。