KOTO 実験で用いる CsI 結晶の uniformity 測定

大阪大学院 理学研究科物理学専攻 山中卓研究室 博士前期課程2年

吉元寬貴

February 5, 2009

概 要

2011 年 J-PARC で開始予定の KOTO 実験では KTeV 実験で用いられた CsI の結 晶を使用する。CsI 結晶の評価すべき性能として、光量とその一様性(uniformity) がある。uniformity とは PMT まで届く光量が発光位置によらない事である。KTeV CsI はこの非一様性が 5%以内に調整されていた。KOTO 実験で用いる KTeV CsI は 約 2700 本あり、大量の結晶の uniformity を測定するシステムを構築した。

目 次

第1章	序論	5
1.1	$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$	5
1.2	KOTO 実験	6
	1.2.1 検出器	6
	1.2.2 KTeV CsI	9
1.3	研究の目的	11
第2章	uniformity 測定	12
2.1	セットアップ	12
	2.1.1 測定原理	12
	2.1.2 ロジック回路	14
2.2	KTeV PMT とベース	14
2.3	プリアンプ	15
第3章	結果	18
3.1	解析	18
	3.1.1 ペデスタルの補正	18
	3.1.2 イベントのカット	20
	3.1.3 解析結果	21
3.2	再現性	21
第4章	考察	24
4.1	測定方法の妥当性..............................	24
	4.1.1 測定精度	25
	4.1.2 約 2700 本の結晶の測定時間の見積もり	25
第5章	結論	26

図目次

1.1	標準理論での $K_L \rightarrow \pi^0 u \bar{ u}$ のファインマンダイアグラム	5
1.2	KOTO 実験検出器	6
1.3	KOTO 実験の CsI カロリメータ l	7
1.4	入射 y に対する CsI 結晶の不感率、赤:KTeV CsI、黒:E391a CsI .	8
1.5	左:入射エネルギーと落としたエネルギーの比(実線:KTeV CsI、点	
	線:E391a CsI) 、右:再構成された π ⁰ の崩壊点(陰の部分:KTeV	
	CsI、太線:E391a CsI)	9
1.6	1996~1997 年の KTeV Run の間の radiation dose のマップ	10
1.7	radiation dose vs 相対ゲイン	10
1.8	Run 前後で uniformity の変化があった結晶 黒点 : Run 前、白点 : Run	
	後	11
2.1		12
2.2	セットアップ図、2.5cm角:80本、5cm角:20本	13
2.3	図 2.2 のセットアップ図を 90°回転させたもの	13
2.4	セットアップの写真	13
2.5	ロジック回路	14
2.6	2.5cm 角と 5cm 角 CsI 用の PMT	15
2.7	プリアンプの回路図	15
2.8	プリアンプカードの写真、各カード5チャンネル	16
2.9	プリアンプの入力と出力	16
2.10	2.5cm 角の結晶での宇宙線の波形	17
91	補正前のクロックトリガーイベントの ADC 分左(左) トイベントに	
J.1	補正的のクロックトリルーイマントのADC 力相 (圧) とイベントに 対すてADC カウント (た)	10
2.0		18
3.2	補止後のクロックトリガーイベントの ADU 分布 (圧) とイベントに 対する ADC たり	10
0.0	対する ADC カワント (石)	19
3.3	補止的のADU 万布(左)と補止後のADU 万布(右)	19
3.4	左:結晶の 配直、 甲央:結晶 Bの 発光 位置を 決める カットで 許される	
	宇宙緑のイベント、石:宇宙線が結晶 B をかするイベント	20

3.5	2.5cm 角の結晶でカットをかける前後での ADC 分布、それぞれ黒が	
	カット無し、赤が発光位置のカット、青が結晶をかするイベントのカット	21
3.6	2.5cm 角の結晶をガウシアンでフィットしたときのグラフ	22
3.7	uniformity	22
3.8	uniformityの再現性、黒が1回目、赤が2回目の測定点、左:2.5cm角	
	の結晶、右:5cm 角の結晶	23
4.1	シグナルがペデスタルに埋もれている ADC 分布.........	24
4.2	左:ゲインの低い PMT の ADC 分布、右:ゲインの高い PMT の ADC	
	分布	25

表目次

1.1	CsI 結晶						•								•		•		•		•	•		•			•			•							7
-----	--------	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	---	--	---	--	---	--	---	---	--	---	--	--	---	--	--	---	--	--	--	--	--	--	---

第1章 序論

1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

標準理論において理解すべき大きな課題の1つとしてCP対称性の破れがある。このCP対称性の破れは小林益川理論により説明される。この理論によると3世代間の クォークの混合によりCP対称性の破れが説明される。

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$
(1.1)

式(1.1) はクォークの混合を表す行列で小林益川行列という。この行列の非対角成 分に複素成分があり、その η が CP 対称性の破れの大きさを表している。この η を精 密に測定する事で標準理論の検証が出来る。標準理論における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のファイ ンマンダイアグラムを図 1.1 に示す。



図 1.1: 標準理論での $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のファインマンダイアグラム

$$K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu} \, \mathcal{O} \, \mathcal{G} \, \mathrm{ktdt}(1.2) \, \mathcal{C} \, \mathcal{F} \, \tilde{\lambda} \, \tilde{\varsigma} \, \hbar \, \mathcal{S} \, [1]_\circ$$
$$B(K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-10} \left(\frac{\lambda}{0.2248}\right)^8 \left(\frac{Im \left(V_{ts}^* V_{td}\right)}{\lambda^5} X\left(x_t\right)\right)^2 \quad (1.2)$$

 $X(x_t)$ は理論計算より出てくる値で1.464±0.041、 $\lambda \equiv |V_{us}|$ 、 $Im(V_{ts}^*V_{td}) = -A^2\lambda^5\eta$ である。よって $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比の測定から η が求まる。また $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ は

理論的不定性が数%と少なく、直接的 CP 対称性の破れが支配的であるためこの η の 測定に適しており、ゴールデンモードと呼ばれる。ただし、分岐比の理論計算値は 2.8 × 10⁻¹¹ と非常に小さく、これを検証するためには感度の高い実験を行う必要が ある。KOTO 実験では Step1 で 8.0 × 10⁻¹² の感度を目指している [4]。

1.2 KOTO 実験

KOTO 実験は 2011 年に J-PARC で開始予定の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比測定実験であ る。この崩壊モードでは π^0 からの 2 γ 以外検出可能な粒子は無い。KOTO 実験は π^0 からの 2 γ を CsI 電磁カロリメータで検出し、さらにその周りを veto 検出器で覆う ことにより、検出可能な粒子が π^0 以外無いことを確認し $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と同定する。

1.2.1 検出器

KOTO 実験の検出器は CsI 電磁カロリメータと各 veto 検出器からなる。概観図を 図 1.2 に示す。



図 1.2: KOTO 実験検出器

CsI 電磁カロリメータ

KOTO 実験は KEK で行われた E391a 実験の検出器を改良して行われるが、その 改良の一つとして CsI の結晶を KTeV 実験で用いられた結晶に置き換える。それぞ れの結晶の大きさを表 1.1 に示す。

表 1.1 を見てわかる通り、E391aの CsI に比べて奥行きが増し、ブロックが細かくなる。KTeV CsI を用い大きなメリット 3 つはある。





E391a CsI	KTev CsI
$7 \times 7 \times 30 [cm^3]$	$2.5 \times 2.5 \times 50 [cm^3]$
	$5 \times 5 \times 50[cm^3]$

表 1.1: CsI 結晶

• fusion 事象

2つの γ が近接して CsI カロリメータに入射した時、それぞれの作るシャワーが 重なり 1 つ γ と認識される事象がある。これをフュージョン事象と呼ぶ。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊でこのフュージョン事象が起こると $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のバックグラウン ドとなり得る。E391a CsI は 2 つの γ が~13cm 以下まで近傍すると見分ける 事が出来なかったが、KTeV CsI は 2.5cm 角の結晶で~5cm まで近傍した γ を 見分ける事が出来る。

• punch-through

CsI に入射した y が相互作用を起こさずにそのまま通り抜ける場合がある。こ れを punch-through という。この場合 y はカロリメータにエネルギーを落とさ ないので、 y を見失ってしまい $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のバックグラウンドになり得る。 E391a CsI は長さ 30cm(16 X_0)に対して KTeV CsI は 50cm(27 X_0)であるた めこの punch-through の確率は減少する。図 1.4 は E391a CsI と KTeV CsI の 入射 y のエネルギーに対する不感率のグラフである [4]。KOTO 実験では不感 率が 10⁻⁴ である事が要求されており KTeV CsI はこの要求を満たしている。



図 1.4: 入射 y に対する CsI 結晶の不感率、赤: KTeV CsI、黒: E391a CsI

シャワーの漏れ

γがCsIに入射し、シャワーの発生位置によっては下流でシャワーが漏れるこ とがある。これによりエネルギーが低く見積もられ、π⁰の崩壊点を再構成し た時に実際よりも下流側に計算される。これにより CC02 で発生した π⁰の崩 壊点がシグナル領域に入ってくる。図 1.5 に CsI に入射した γのエネルギーと 落としたエネルギーの比、再構成した π⁰の崩壊点の分布を示す [4]。図 1.5 よ り KTeV CsI では下流側に再構成されるイベント数が減っている。さらに結晶 のブロックが細かくなったことにより γの入射位置の位置分解能が向上するた め、崩壊点の位置分解能も向上する。



図 1.5: 左:入射エネルギーと落としたエネルギーの比(実線:KTeV CsI、点線: E391a CsI)、右:再構成された π⁰の崩壊点(陰の部分:KTeV CsI、太線:E391a CsI)

1.2.2 KTeV CsI

Uniformity

CsI 結晶中で発光した光子は PMT に届くまでにある一定の割合で減少する。結晶 固有の減衰長と結晶表面での反射率がこれに影響している。光が減衰するということ は発光位置により PMT に届く光量が変わると言う事である。これはエネルギー分解 能に影響し、CsI の長さ方向での発光位置の情報は知り得ないので、出来るだけこの 影響は抑えるべきである。KTeV 実験では結晶の周りの反射材で反射率を調整し、光 量が発光位置に依らないようにしていた。光量が発光位置に依らない事を uniformity という。また KTeV 実験では non-uniformity が5%以内に保たれていた。

Radiation dose

KTeV CsI を使用する上で考慮しなければならないのは、放射線による影響であ る。図 1.6 は 1996 年と 1997 年の Run の間の radiation dose のマップである。角ブ ロックが 1 つ 1 つの結晶である。最大で 10krad であり、全体としては平均で 2krad の radiation を受けた [3]。また 1999 年と 2000 年にも Run があったのでこれの約 2 倍の量の radiation dose があったと考えられる。



図 1.6: 1996~1997 年の KTeV Run の間の radiation dose のマップ

図 1.7 は Run 開始前のゲインを基準とした相対ゲインを radiation dose に対してプ ロットしたグラフである [3]。8krad の radiation を受けた結晶でゲインは約 75%まで 落ちている。



図 1.7: radiation dose vs 相対ゲイン

図 1.7 は 5.2krad の radiation を受けて uniformity が変化した結晶の uniformity を示 す [3]。1996~1997 年の Run では uniformity が 5%以上変化した結晶が 50 本あった。 radiation dose の影響で結晶の性能が変化しているので、すべての結晶について光 量、uniformity を測定する事が必要である。



図 1.8: Run 前後で uniformity の変化があった結晶 黒点: Run 前、白点: Run 後

1.3 研究の目的

KOTO 実験で KTeV CsI を使用する上で、上述した radiation dose の影響により結晶の性能が落ちてないかを知る必要がある。評価すべき性能として光量と uniformity がある。本研究の目的は約 2700 本の結晶の uniformity を効率よく正確に測るシステムを作る事である。

第2章 uniformity測定

この章では宇宙線を用いた uniformity 測定システムについて述べる。

2.1 セットアップ

2.1.1 測定原理

図 2.1 のように結晶を並べて交差状に積み上げることでそれぞれの結晶の長さ方向 の発光位置がわかる。



図 2.1: 測定原理

このシステムでは結晶を3層積み上げ一度に2.5cm 角が80本、5cm 角が20本の計 50本の結晶の uniformity を測定できる。結晶の上下に4枚のプラスチックシンチレー ターを設置し宇宙線のトリガーカウンターを作った。1mの長いチンチレーターを用 いたので PMT は両読みにした。セットアップを図2.2、図2.3に示す。セットアップ では2.5cm 角 80本、5cm 角 20本だが、今回の測定は半分の50本を用いて行った。



図 2.2: セットアップ図、2.5cm 角:80本、5cm 角:20本



図 2.3: 図 2.2 のセットアップ図を 90°回転させたもの



図 2.4: セットアップの写真

2.1.2 ロジック回路

トリガーは上下各2枚のシンチレーターのコインシデンスを用いて作った。さら にペデスタルの変動を追うために10Hzのクロックをトリガーに加え、そのロジック パルスを ADC に入れ宇宙線のトリガーと区別できるようにした。



図 2.5: ロジック回路

2.2 KTeV PMT とベース

PMT、ベース共に KTeV に用いられたものを使用した。結晶と PMT の間にはシ リコンのオプティカルクッキー、UV フィルターがある。シリコンのクッキーは結晶、 UV フィルターとの境界面での光の損失を抑える役割をしている。CsI のシンチレー ション光は崩壊時間の短い光 (10ns、35ns) と長い光 (~1µs) がある。アクシデン タルなパイルアップを起こす確率を減らすために、UV フィルタで長波長の成分を減 らしている。UV フィルタによりそれぞれ約 15%、50%の光が減少するが、短波長成 分の割合は 80%から 90%に向上する [2]。



図 2.6: 2.5cm 角と 5cm 角 CsI 用の PMT

2.3 プリアンプ

KTeV PMT はゲインが 5000 で宇宙線の落とすエネルギー(14MeV) では信号が 小さいので、アンプを制作して信号を増幅した。ノイズが乗るのを考慮してアンプ は PMT の直後に置けるようにカード状のものにした。回路図と写真ををそれぞれ図 2.7、図 2.8 に示す。



図 2.7: プリアンプの回路図

回路は一般的な非反転増幅回路であり、出力のオフセット調整用の回路をつけている。図 2.9 に 2mV の入力を入れたときの入力と出力の波形を示す。増幅率は約 38 倍であった。



図 2.8: プリアンプカードの写真、各カード5チャンネル



図 2.9: プリアンプの入力と出力

図 2.10 は 2.5cm 角の結晶でアンプを通して宇宙線を見たときの波形である。宇宙 線は 2.5cm 角の結晶で約 14MeV のエネルギーを落とす。このときの PMT の出力は ~1mV である。アンプの増幅率が約 38 倍なのでアンプを通ると~40mV の出力が得 られる。



図 2.10: 2.5cm 角の結晶での宇宙線の波形

第3章 結果

3.1 解析

3.1.1 ペデスタルの補正

クロックトリガーの時のイベントを用いてペデスタルを測定した。ペデスタルの 変動を追うために前後のクロックトリガー 250 事象の平均値をペデスタルの値とし た。イベント毎にそのペデスタルの値を引き補正値とした。図3.1 は補正前のクロッ クトリガーイベントの ADC 分布(左)、イベント番号に対する ADC カウントの分 布(右)である。補正後のものを図3.2 に示す。図3.1、図3.2を見ると補正前はペデ スタルの値が変動しているのに対し、補正後は変動が見えなくなり、ペデスタルの 分布も細くなった。図3.3 は補正前と補正後の ADC 分布である。補正をかけること によりペデスタルとシグナルのピークがはっきりと見えるようになった。



図 3.1: 補正前のクロックトリガーイベントの ADC 分布(左) とイベントに対する ADC カウント(右)



図 3.2: 補正後のクロックトリガーイベントの ADC 分布(左) とイベントに対する ADC カウント(右)



図 3.3: 補正前の ADC 分布(左)と補正後の ADC 分布(右)

3.1.2 イベントのカット

次に発光位置を定めるため、イベントのカットを行った。

宇宙線イベントの threshold

宇宙線のイベントを選定するためにそれぞれの結晶で ADC カウントの threshold を決定する必要がある。各結晶毎にクロックトリガーイベントのペデスタルをガウ シアンでフィットし、その mean から 2σ 上を threshold の値とした。

カットの方法



図 3.4: 左:結晶の配置、中央:結晶Bの発光位置を決めるカットで許される宇宙線のイベント、右:宇宙線が結晶Bをかするイベント

- 発光位置を定めるためのカット
 図 3.4 中の結晶 B の長さ方向の発光位置を定める時、その下の層の D,F が threshold 以下かつ E が threshold 以上である時に E と B が交差している点で発光したとする。ただし、入射角度は最大で 45°まで許されるので発光位置は±3.75[cm]の精度である。
- 結晶をかするイベントのカット 上記のカットにかからなかったイベントの中には結晶BをかすめてAを通り、 Eに入射するという様なイベントが存在する。このようなイベントがあるとエ ネルギーの低い方に ADC 分布が広がる。結晶A,Eが共に threshold 以下、つま り両隣の結晶が threshold 以下であるという条件でこのようなイベントをカッ ト出来る。

3.1.3 解析結果

上記の2つのカットをかけたときの ADC 分布を図 3.5 に示す。2番目のカットで エネルギーの低い領域のイベントが減少し、分布が細くなっているのがわかる。



図 3.5: 2.5cm 角の結晶でカットをかける前後での ADC 分布、それぞれ黒がカット 無し、赤が発光位置のカット、青が結晶をかするイベントのカット

Uniformity

この ADC 分布にはペデスタルのピークとシグナルのピークがあるので、この分布 を2つのガウシアンを足したものでフィットした。フィットの範囲は一律で – 25 から 95 ADC カウントとした。5cm 各の結晶に関してはペデスタルとシグナルのピーク が十分に離れているのでそれぞれのピークを別々にガウシアンでフィットした。シグ ナルの mean の値からペデスタルの mean の値を引いたものをその点での光量として 表す。

2.5cm 角の結晶は一層に 20 本並べているので、各結晶の各点で上記のフィットを 行い、1本の結晶で 20 点分の光量を得る。発光位置とその時の光量をプロットした ものを図 3.7 に示す。ただし平均の光量で全体を正規化している。

3.2 再現性

次にこの測定の再現性を調べた。すべての結晶を測定する際には測定毎に PMT は 取り替えずに結晶のみを取り替える。毎回、結晶とクッキー、PMT の接触具合が変



図 3.6: 2.5cm 角の結晶をガウシアンでフィットしたときのグラフ



 \boxtimes 3.7: uniformity

わり得るので、その際のデータの再現性を確かめた。数本のPMTを抜き差しし、同 じ解析を行った。結果を図3.8に示す。図3.8を見ると、外れている点はあるものの概 ね誤差の範囲内で一致している。よってPMTの抜き差しによる効果は無視できる。



図 3.8: uniformityの再現性、黒が1回目、赤が2回目の測定点、左:2.5cm 角の結晶、右:5cm 角の結晶

第4章 考察

4.1 測定方法の妥当性



図 4.1: シグナルがペデスタルに埋もれている ADC 分布

図 4.1 の ADC 分布のようにシグナルのピークがペデスタルに埋もれている結晶が 何本かあった。原因として考えられるのは、

- PMTの gain が小さい
- 結晶の光量が低い

の2つがある。これらを確かめるために、シグナルがはっきりと見えている結晶の PMT とシグナルが埋もれている結晶のPMT を交換して同じ測定を行った。この際 クッキーも PMT と一緒に取り替えた。結果を図 4.2 に示す。

同じ結晶でシグナルが見えるようになったため、gain の低い PMT が原因である事 がわかった。このような PMT は 2.5cm 角の結晶 40 本中約半分の 18 本あった。



図 4.2: 左: ゲインの低い PMT の ADC 分布、右: ゲインの高い PMT の ADC 分布

4.1.1 測定精度

測定精度は24時間の測定でゲインの低い結晶では5%以上のものもあったが、ゲインの高い結晶については~1%であった。KTeV実験のときは non-uniformity が5%以内に調整されていたので、少なくとも1%~2%程度の測定精度は必要である。図4.2の結晶では mean の測定精度が約9%から1.3%まで向上した。よってゲインの高いPMTを集めて測定する必要がある事がわかった。

4.1.2 約2700本の結晶の測定時間の見積もり

最終的な目的は約2700本の結晶すべての uniformity を測定することである。今回 は50本の測定であったが、このシステムで測定できることを確認したので100本で測 定を行う。測定精度1~2%なので今回の測定と同じく約24時間の測定が必要である。 セットアップに約一日を要するので、2日に100本のペースで測定が行える。2700 本測定するのに約3ヶ月かかる。

第5章 結論

約2700本のKTeV CsIのuniformityを効率よく測定するために、宇宙線を用いて 50本の結晶の測定を行えるシステムを構築した。宇宙線のシグナルがペデスタルに 埋もれてしまうチャンネルが数本あったが、PMTのゲインが低い事が原因である事 がわかった。PMTをゲインの高いものに取り替える事でシグナルがペデスタルと分 離され、1~2%の測定精度で光量を測定できた。

謝辞

はじめにこの論文を作成するにあたって、山中卓教授には大変お世話になりまし た。いろいろとご心配かけましたが、最後まで面倒を見てくださりありがとうござ いました。また普段の研究生活でも、行き詰まった時に問題に対するアプローチの 仕方等多くのアドバイスをいただき、これから社会に出る上で大変有意義な事を学 べました。山中卓教授の元で研究生活をおくれて本当によかったと思います。花垣 先生、原先生にはゼミ、授業を通して物理の基礎を教えていただいたり、コンピュー タの基礎を教えていただきました。ありがとうございました。特に花垣先生には最 後の最後まで面倒を見てもらい、非常に感謝しています。

岩井さんには特に夜遅くまで実験につき合っていただいたり、解析の基礎を教えて いただいたり、本当によく面倒を見てもらいました。心から感謝を申し上げます。 内田さん、David さん、佐藤さん、李君、 石川君、廣瀬君、柳田さん、中谷君、内 田君、安達君、杉山君には普段の生活で、共に楽しく過ごさせていただきました。世 間話から物理の話まで色々な議論ができてとても楽しかったです。ありがとうござ いました。

E14 実験グループの皆様にも多くのアドバイスを頂き、大変お世話になりました。あ りがとうございました。また秘書の川口さんには実験器具の購入などで大変お世話 になりました。ありがとうございました。事務手続きの書類などは締め切りがすぎ てたりと大変ご迷惑をおかけしました。すみませんでした。最後に山中研究室の皆 様、本当に有意義な大学院生活を送る事ができました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] G.Isidori, G.Martinelli, and P.Turchetti, Phys. Lett. B633, 75 (2006).
- [2] Elizabeth Turner Worcester, "Measurements of Direct CP Violation, CPT Symmetry, and Other Parameters in the Neutral Kaon System" PhD thesis University of Chicago (2007).
- [3] Valmiki Prasad, "Measurements of Direct CP-Violation and CPT-Invariance in the Neutral Kaon System" PhD thesis University of Chicago (2002).
- [4] E14 Collaboration, "Proposal for $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at JPARC" (2006).