E14(KOTO) **実験の**CsI **カロリメータ** PMT**のテストシステムの開発**

大阪大学大学院 理学研究科物理専攻 山中研究室 博士前期課程2年

Lee Jong-won

February 10, 2009

概 要

茨城県の東海村で行なわれる E14 実験では中性 K 中間子の希崩壊モード $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の検出と崩壊率の測定を目標としている。この崩壊モードの崩壊率はクォーク の CP 対称性の破れの大きさを表すパラメータ η の自乗に比例する。標準理論の予 想値ではで 2.8 × 10⁻¹¹ と極めて小さい。この崩壊モードの測定するために、2700 本 の CsI 結晶と光電子増倍管 (PMT) で構成された CsI カロリメータが使われる。元々 フェルミアメリカ国立加速器研究所で行なわれた KTeV 実験で使われたもので、実 験に使われる前にその性能を測定しておく必要がある。そのために PMT のテストシステムを開発する必要がある。基本構造として KTeV で使われた CsI カロリメータ のキャリブレーションシステムを用いる。その各パーツの性能を測定し PMT テスト システムを構築した。光の分配の線形性は ±1% が達成された。測定の精度は ±0.2% が達成した。

目 次

第1章	序論	6
1.1	E14 実験の物理	6
	1.1.1 CP 対称性の破れと CKM 行列	6
	1.1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} \boldsymbol{O}$ 崩壊の物理	7
1.2	E14 実験の概要	8
	1.2.1 CsI カロリメータ	10
	1.2.2 イベントの再構成	11
1.3	本研究の目的	11
第2章	PMT テストシステムの概要	13
2.1	PMT の特性	13
2.2	テストシステムの概要	15
第3章	PMT テストシステムの各部	17
3.1	PIN フォトダイオード	17
3.2	KTeV PIN photo diode digitizer DDC101	18
3.3	LASER	20
3.4	光減衰システム	21
3.5	液体シンチレーター	23
	3.5.1 ボーリングボール	24
第4章	光量測定システムの性能	26
4.1	PIN+KTeV PIN ダイオード Digitizer(DDC101)の線形性テスト	26
4.2	安定性テスト	30
	4.2.1 長時間測定に対する安定性	30
	4.2.2 温度による光量比の変化	32
4.3	結果	32
第5章	PMT のテストシステムのテストシステムの性能評価	33
5.1	PMT のテストシステムの	33
第6章	考察	37

第7章 結論

図目次

1.1	$K^0 o \pi^0 u ar{ u}$ の崩壊ダイアグラム	8
1.2	E14 Detector	9
1.3	$E14$ 実験の CsI カロリメータ。中心に K_L ビームを通すための穴が空	
	いている。そしてその周りを黒で表示されている CC03 が囲っている。	
	ビームに近い部分を位置分解能の高い2.5cm × 2.5cmのCsI結晶で囲	
1 4	み、その外郭を 5cm × 5cm の Csl 結晶で囲む。	10
1.4	朋 環 1 ヘントの 冉 博 成	11
2.1	一般的な PMT の回路図、Cathode から発生した電子はダイノード間	
	にかけられた電圧により増幅される。電圧の分配はダイノード間の電	
	圧により決定される。	13
2.2	PMT テストシステムの概観図。	16
3.1	PIN ダイオードの電圧に対する出力の大きさの変化、電圧に対する顕	
	著な依存性は見えない。 ± 2 %のずれは測定方法によるものだと考え	
	られる。電圧が安定な条件 $(\pm 0.1 \mathrm{mV})$ では大きく変わらないと考えら	
	れる。	17
3.2	PIN ダイオードの電圧に対する出力信号の形の変化、バイアス電圧が	
	2.5V から15V に増加するに連れてホールや電子の移動度が大きくな	
	るため、出力波形の高さが増加し、幅が狭くなることが見える。(ピー	
	ク電圧 3.4mV のグラフが 2.5V の時の出力信号)	19
3.3	$DDC101$ 簡単な回路図。センサから C_{INT} への電流は制限されている。	19
3.4	DDC101のゲートと信号入力のタイミングに対する出力データの変化。	20
3.5	Fixed Filter Wheel 1 の透過率	21
3.6	Fixed Filter Wheel 2の透過率	22
3.7	Variable Filter Wheel の回転角度に対する透過率	22
3.8	液体シンチの発光スペクタラム、355nmのビークは散乱によるもの .	23
3.9		24
3.10	ホーリンクホール	25
4.1	LED を用いたリニアリティのテストセットアップ	27
4.2	LED を用いたリニアリティテスト (PIN1/PIN2=0.35)	27

4.3	LED を用いたリニアリティテスト (PIN1/PIN2=0.78)	28
4.4	光量モニタ装置の出力とその分解能:縦軸が RMS/Mean、横軸が出力	
	である。フィットされた関数は 8/x である	28
4.5	PIN1:PIN2=1:2、 ノンリニアリティ < 0.4 %	29
4.6	PIN1:PIN2=2:1、比の平均からのずれ < 0.2 %、データの取り方が図	
	4.5 とは異なるためプロット形式が変わった。	30
4.7	PIN1:PIN2=1:1、比の平均からのずれ < 0.1 %	31
4.8	12 時間連則測定時のモニタ装置の出力間の比の変化	31
4.9	温度変化に対するモニタ装置の出力の比の変化	32
51	PMT の 格纳 生 罟	22
5.1 5.9		55
0.2	1 $M10779=7971.1M1#0000000000000000000000000000000000$	34
53	风伯(10) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	94
0.0		34
54	L_{ecrov} 2249W の 2 つのチャンネルを用いたリニアリティ測定 w軸は	94
0.1	The roy 2240 W 0 2 200 ア マン Prove The roy 2 2 4 5 W 0 2 2 5 5 7 7 2 4 7 7 2 4 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	
	ティは ADC 出力 150 カウントときは ADC 出力 300 カウントの時の出	
	カより 0.2 % ずれている。	35
5.5	条件を変えた測定の結果。里·1 回目の測定。赤·PMT の 90 回転。	00
5.5	緑:VFWの回転逆、青と黄色:ファイバの位置変更、ピンクと水色·ADC	
		36
		00

表目次

2.1	KTeVCsI カロリメータに使われた PMT の性能 2.5cm × 2.5cm × 50cm	
	の CsI 結晶に使われる PMT の性能。括弧の中は 5cm × 5cm × 50cm	
	の結晶に使われる PMT の性能。	14
3.1	S1722-02の性能	18

第1章 序論

1.1 E14実験の物理

1.1.1 CP 対称性の破れと CKM 行列

素粒子の相互作用には対称性やその相互作用に対する保存量が存在する。対称性 とは、何らかの変換、例えば位置をずらす $(ex:x \rightarrow x + a)$ などの変換をしたときに、 ある系を記述するラグランジアンが物理的な意味のある変化 (例えば、運動軌道の変 化など) がないことを意味する。そして、ある変換に対して系のラグランジアンが不 変である時、必ず保存量が存在する。古典力学での角運動量、運動量、エネルギー はそれぞれ、回転、座標、時間の対称性に対する保存量である。このような連続的 な対称性以外に、電荷の反転、座標の反転、時間の反転などのような離散的な対称 性も存在する。

- Charge Conjugation (C 変換):粒子と反粒子の交換
- Parity(P 変換):座標軸の反転: $x \rightarrow -x$
- Time reverse(T 変換):時間軸の反転: $t \rightarrow -t$

この3つの対称性は、電磁気力、強い力、重力の3つの相互作用に対しては対称 性を保っている。それに対して、弱い力では相互作用の特徴によりC、P、T対称性 は破れている。C、P対称性はニュートリノが左巻きしか存在しないことにより対称 性が破られる。CとP変換を組み合わした CP変換に対しては左巻きのニュートリノ は右巻きの反ニュートリノに変換され、CP は保存される。だが、Chistension らの 中性 K 中間子の崩壊 $K_L \rightarrow 2\pi$ 測定実験により [1]、CP 対称性の破れが発見された。 CP 対称性の破れは世界に物質の方が反物質より多く存在していることを説明できる ーつの鍵となるため物理的に重要である。

CP 対称性の破れに対する標準模型での理論的な説明として小林益川理論がある。 小林益川理論では 3 世代の u タイプと d タイプのクォークが電荷を変える弱い相互 作用をする時 (u タイプ \leftrightarrow d タイプ)、各々の組み合わせに対し係数がかけられる。 例えば、u クォークと d クォークの間の変換では V_{ud} がかけられる。その係数を全て の組み合わせを行列でまとめたのが CKM 行列である [2]。CKM 行列は Unitary 行列 $(V^{\dagger}V = \mathbf{1}) \ \mathfrak{C},$

$$V_{CKM} = \left\{ \begin{array}{ccc} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{td} \end{array} \right\}$$
(1.1)

式 1.1 のように書かれる。CKM 行列は変数の自由度により一つの複素位相をもつこ とが可能である。その複素位相の寄与を $V_{td} \ge V_{ub}$ にまとめて Wolfenstein パラメー タで表示すると [3]、

$$V_{CKM} = \left\{ \begin{array}{ccc} 1 - \lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{array} \right\}$$
(1.2)

のように書ける。ここで η 成分はこの行列で唯一の虚数成分である。この虚数成分 の存在により CP 対称性が破れる。

標準模型で、クォークの電荷が変わる弱い相互作用のラグランジアンは

$$L_{CC} = \frac{g}{\sqrt{2}} [\bar{u}_i V_{ij} d_j W^- + \bar{d}_j V_{ij}^* u_i W^+]$$
(1.3)

であるが、このラグランジアンを CP 変換すると、 $u \leftrightarrow \bar{u}, d \leftrightarrow \bar{d}, W^+ \leftrightarrow W^-$ の変換が行われ、

$$L_{CC}^{CP} = \frac{g}{\sqrt{2}} [\bar{d}_j V_{ij} u_i W^+ + \bar{u}_i V_{ij}^* d_j W^-]$$
(1.4)

のようになり、 $L_{CC}^{\dagger} \neq L_{CC}^{CP}$ と CP 変換の破れが起こる。よって、弱い相互作用により t クォークが d クォークに変換される時、その振幅に係数 V_{td} の虚数部 η が掛けられる。その η の大きさを測定すれば、クォーク系列での CP 対称性を破れの大きさを 測定できる。

1.1.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊の物理

中性 K 中間子は s クォークと d クォークで構成されるメソンである。 $d\bar{s}$ で構成された粒子が K^0 、 $s\bar{d}$ で構成された粒子が $\bar{K^0}$ である。 $K_0 \ge \bar{K}_0$ は電荷が中性であることと同じ崩壊モードを共有するため、お互いの間を振動する性質を持っている。よって、物理的にこの 2 つの成分の混合状態で存在する独特の性質を持っている。混合状態はその寿命から $K_S \ge K_L$ に分けられる。それらは式 1.5、1.6 のように CP 固有状態であり、その寿命の違いは CP 保存則による崩壊モードへの制限によるものである。

$$K_S \sim K_1(CP = 1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ K^0 + \bar{K}^0 \}$$
 (1.5)

$$K_L \sim K_2(CP = -1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ K^0 - \bar{K}^0 \}$$
 (1.6)

 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊はツリーダイアグラムでは起こらず、弱い相互作用のループを 持つ、ペンギンダイアグラムやボックスダイアグラムでの崩壊で起こる。 K_L の K^0



図 1.1: $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊ダイアグラム

成分が $\pi^0 \nu \bar{\nu}$ に崩壊する時、その崩壊振幅は図 1.1 で $t \rightarrow \bar{d}$ の変換で起こるので (u クォークと c クォークの寄与は場の量子論の計算から無視できる) $V_{td}(\sim 1 - \rho - i\eta)$ に 比例し、 $\bar{K^0}$ 成分は $V_{td}(\sim 1 - \rho + i\eta)$ に比例する。 K_L の崩壊振幅はその差に比例す るので、 $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$ となる。しかし、この崩壊は弱い相互作用のループ を介する崩壊であるため、極めて小さい崩壊比を持つ。標準模型では 2.8 × 10⁻¹¹[4] と予想される。測定による崩壊比の上限値は KEK で行われた E391a 実験の結果か ら 6.8 × 10⁻⁸(90 % *C.L.*)[5] が得られている。

このように崩壊率が小さいため、SUSY 粒子などの影響により新たなループが可能 となると、この崩壊の崩壊率が変わる。そのため、新しい物理への探知能力が高い 崩壊モードの一つである。B 中間子の $B^0 \rightarrow J/\Psi K_s$ 崩壊などの結果から得られる η の値は、ツリーダイアグラムの寄与が大きく、ループの影響は相対的に小さいので、 その結果との比較することによりループの寄与が計算でき、それを標準模型の理論 予測と比較することにより新たな物理の検証にも使うことができる。

1.2 E14 実験の概要

 $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊比は前述の通り極めて小さい。そのため、この崩壊モードによる崩壊事象と、他の崩壊比が大きい崩壊モードからの崩壊事象を区別することが重

要となる。そのため、この崩壊モードの独特の特徴を存分に活用できるセットアップが必要である。この崩壊モードの特徴は、検出可能な粒子が π^0 の崩壊からの2つの γ しかなく、親粒子である π^0 を再構成した時にニュートリノによるエネルギーと運動量の損失により、 π^0 はさらにその親粒子である K_L の運動量に対して垂直方向の運動量を持つことである。その上、 π^0 の寿命は非常に短い((8.4±0.6)×10⁻¹⁷sec)ため、 2γ の発生点は K_L が崩壊した場所と一致する。



2 1.2: E14 Detector

まず、崩壊の重要な特徴の一つである、"2つの γ しか検出されない。"ことを使う ためには、崩壊領域をほとんど覆う測定器が必要となる。その為に E14 実験の検出 器は図 1.2 のような検出器を使う。その上、崩壊領域を覆う検出器 (Front Barrel:FB、 Main Barrel:MB、CsI Calorimeter:CsI) は γ の検出能力が高い検出器が用いられてお り、14 X_0 以上の厚さを持っている。さらに K_L ビーム方向にそって逃げる崩壊産物 粒子を捕まえるために Collar Counter(CC01 06) が設置される。また、 K_L のメイン 崩壊モードの中で荷電粒子を含む崩壊モードが多いが、そのような崩壊モードからの バックグラウンドを除去するために荷電粒子を検出する Charged Veto(BCV、CV)を MB や CsI 検出器の内側に設置する。 K_L のビーム生成時に中性子ビームが一緒に生 成されるが、その中性子と空気中の原子核が反応したとき発生する π^0 がイベントに 数えられることを避けるために崩壊領域を高真空状態 (気圧 < 10⁻⁵Pa) にする。さら に、 K_L の崩壊位置を検出器の重心軸に限定するために K_L ビームの径を細く (8cm) する。

1.2.1 CsI カロリメータ

E14 実験の中心となる検出器である CsI カロリメータには、アメリカのフェルミ 国立加速器研究所で行われた KTeV 実験で使用された 2.5cm × 2.5cm × 50cm の CsI 結晶 2240 本と 5 × 5 × 50cm の CsI 結晶 336 本で構成されている。E14 実験のプロト タイプの実験で、KEK で行われた E391a 実験では 7cm × 7cm × 35cm の結晶を使っ て $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊の探索をした。その結果からの改良点として、位置分解能の向 上と、CsI カロリメータの γ に対する感度と入射光子により起こるシャワーのカロリ メータからの流出の抑制があげられた。その対策として、2.5cm × 2.5cm の結晶を使 うことになった。それにより CsI カロリメータの位置分解能が~1mm となる。50cm の長さを持つ CsI 結晶の長さは 27 X_0 に相当するので、CsI に入射した γ 線はほとん ど CsI 結晶と反応し、保有するほとんどのエネルギーを CsI カロリメータに落とす。 これにより、E391a 実験が持っていた CsI カロリメータの問題が解決される。

CsI 結晶に高エネルギーの光子や電子が入射すると、波長 310nm(fast component: 減衰時定数:6ns)と420nm(slow component:減衰時定数 35ns) のシンチレーション光 が発生する。本実験では統計のために高いレートでの測定が必要されるので、波長 400nm 以上の光を遮断する光学フィルタを PMT の前面に付け、fast component の 光だけを PMT に入射するようにしている。



図 1.3: E14 実験の CsI カロリメータ。中心に K_L ビームを通すための穴が空いている。そしてその周りを黒で表示されている CC03 が囲っている。ビームに近い部分を 位置分解能の高い 2.5 cm × 2.5 cm の CsI 結晶で囲み、その外郭を 5 cm × 5 cm の CsI 結晶で囲む。



図 1.4: 崩壊イベントの再構成

イベントの再構成に使われる情報は CsI カロリメータで測定した γ 線が CsI 内部を 通る時に落としたエネルギーの情報が使用される。イベントの再構成は、まず、CsI カロリメータ以外に何も検出されず、CsI カロリメータで2つの γ が検出されたイベ ントを探す。検出された2つの γ のエネルギーを E_1 、 E_2 とおく。その2つの γ が π^0 の崩壊からの γ だと仮定し、4元運動量の保存則を使い、2つの γ の当たった場所と 崩壊地点の間の角度 θ が式 1.7 によって決まる。

$$\cos\theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2} \tag{1.7}$$

得られた角度と2つの γ 線の入射位置の間の距離 r_{12} と、 K_L が検出器の中心軸上で 崩壊したという仮定を用いて、 K_L の崩壊位置 Z_{vtx} を計算する。これにより、2つの γ の入射方向が計算でき、それから元の π^0 の中心軸に垂直な運動量 P_T が計算でき る。シグナルイベントの判定にここで得られた Z_{vtx} と P_T が用いられる。

1.3本研究の目的

実験に使用される予定の2700個のCsIカロリメータ module は長年 KTeV 実験で 使われた。そのため、CsI 結晶は高エネルギー放射線によるダーメジによりその透明 度が落ちたものがあった。同じく、結晶に付けられている PMT の性能の劣化も考え られる。従って、KTeV で使われた CsI 結晶と PMT を E14 実験で使うためにはそ の性能を正確に測る必要がある。また、E14実験では γ のエネルギーの測定領域は 2MeV ~ 2GeV であり、KTeV での測定領域 (~ 70GeV) と異なる。そのため、PMT の増倍率を増やす必要があり、新たなベースを使う。PMT はそのベースの電圧の分 配比が変わるとそのリニアリティ特性も変化する。そのため、リニアリティ特性を 改めて測定しておく必要がある。

その測定システムに要求される測定精度は系統誤差を減らすため、CsIカロリメー タの 2GeV の光子に対するエネルギー分解能 2 %を基準としてその 1/10 である 0.2 %が要求される。

E14 実験の CsI カロリメータに使われる全ての PMT のリニアリティ測定のための テストシステムを構築した。その過程とシステムの性能について述べる。

第2章 PMTテストシステムの概要

2.1 PMTの特性

PMT は弱い光を電気信号に変換する光検出器の一種である。主に微弱な光を大き な信号に増幅し、光の量を測定するのに使われる。その作動原理を図 2.1 を用いて説 明する。光子が PMT の内部に入射すると、陰極のカソードにぶつかる。カソード には光電効果が起こりやすい物質 (CsI、バイアルカリ、GaAs など)が塗られており、 ぶつけられた光子により電子 (Photo Electron:p.e.)が光電面から飛び出す。その確率 を量子効率と呼ぶ。光電面から出た電子はカソードとダイノード又はダイノード間 にかけられている電圧により加速され、より下段のダイノードに衝突する。その時、 加速で得た分のエネリギーにより、衝突の時新たな電子をダイノードから叩きだす。 その数は一定ではないが加速電圧に関係する。何段階か同じ方法で増幅されると最 初の一個の光子に対する電子の数は数千~数百万まで増加する。 増幅された信号は 最後に陽極に当たり信号として出てくる。



図 2.1: 一般的な PMT の回路図、Cathode から発生した電子はダイノード間にかけ られた電圧により増幅される。電圧の分配はダイノード間の電圧により決定される。

ノンリニアリティ

理想的な PMT は各ダイノードで決まった倍率で電子の数を増幅する。だが、増幅が進み、電子の密度が高くなると、電子同士の反発力 (空間電荷効果) により、電

子の軌道が理想的な電子の軌道からずれていくことになる。電子の軌道がずれると、 元とは違う強さの電場により加速され場合もあり、さらには電場からはずれて加速 されなくなる場合もある。よって、一般的には入力光量に対してのアノード出力(ゲ インと呼ぶ)は比例するが、光度が増加するに連れて、比例しなくなる。この線形応 答からのずれをノンリニアリティと呼ぶ。ノンリニアリティは電子の瞬間的な密度 が高くなって起こるため、その効果は瞬間ピーク電流に依存する。この現象は主に パルス光を観測する時に起こる。もう一つノンリニアリティの原因として、PMT に 平均的に強い光が入射し、ベースのブリーダ回路の電圧分配率変化することにより 起きる現象がある。パルス光の場合でもそのレートが高くなると同じ現象が起こる。 電圧分配の変化が起こるのは強い光の入力があると、その数に比例した量の電子が 増幅されるため、ダイノードからの多量の電子が空間中に飛び出し、その分の電荷 を補充するため分配回路に電流が流れるからである。その電流により電圧分配に変 化が生じるのでその影響により増倍率も変化する。ピーク電流によるノンリニアリ ティは電圧を上げ、電子間の力より電場の強さを大きくすることでリニアリティの 向上が得られる。ブリーダ回路によるノンリニアリティはブリーダ回路の電圧分配 率を変えたり、コンデンサを入れることにより線形性を向上できる。

KTeV CsI カロリメータに使われた PMT は線形性がパルス出力 30mA まで ±0.5 %以下であることが要求された。それを達成するために、PMT の段数を 5 段 (5cm × 5cm の結晶の場合は 6 段) に PMT のダイノード間の電圧を上げている。

型番	浜松フォトニックス R5364 (R5330)
形状	ヘットオン型
径	19.5mm $(40$ mm $)$
全長	67mm (111mm)
材料	光電面:バイアルカリ
	窓材:UV ガラス
増倍率	5000(10000)
線形性	出力パルス高 30mA まで ±0.5 %以下

表 2.1: KTeVCsI カロリメータに使われた PMT の性能 2.5cm × 2.5cm × 50cm の CsI 結晶に使われる PMT の性能。括弧の中は 5cm × 5cm × 50cm の結晶に使われる PMT の性能。

PMT のノンリニアリティ測定方法

PMT の重要な性能であるリニアリティを検査する方法として一般的なものは直流 法とパルス法が2つある。直流法は安定した光源からの光の光量をシャッタを使い光 量の調節を行う方法である。浜松ホトニックス株式会社では4つのシャッタを使い、 その一つのシャッタだけを開けたときの光量と、PMTの信号の出力4つ全部を空け たときの光の出力を比較してその比を取り、ノンリニアリティを測定する。もう一 つの測定法としてパルス法がある。2つの異なるLEDドライバを用いて同じLED を時間的にずらして光らせる。LEDとPMTの間の距離を調整することで光量を調 節する。するとLEDがある程度以上近くなると2つの光量に対してのノンリニアリ ティが出てくるため、その比の変化をノンリニアリティとして測定する。

PMT テストシステムは将来的に CsI キャリブレーションシステムに使われること を目標をしており、実際実験が始まった時、2700本の CsI 結晶のキャリブレーション できるシステムである必要がある。だが、この2つの方法ではそのような用途には不 適合である。PMT のテストシステムにはこの方法とは少し違う方法を使って PMT のノンリニアリティ測定システムを構築する。

2.2 テストシステムの概要

PMT テストシステムは KTeV の CsI カロリメータに使われた全ての PMT のリニ アリティ特性を調べられることを目標とする。そのためにテストシステムに要求さ れる性能は

- CsI 電磁カロリメータに使われる光電子増倍管 (PMT)の測定領域 (2MeV~2GeV)
 での PMT のキャリブレーションが可能であること。
- CsI カロリメータの分解能 (2 % @ 2GeV) より十分小さい分解能を持つこと。
- 2700 本の PMT の測定、性能の見積もりの基本資料を提供できる、小さいシス テマチックエラーを持つこと。
- パソコンによる自動測定が可能であること。
- いくつもの PMT に均一な光の供給ができ、それらの測定が可能であること。
- E14 実験の CsI 電磁カロリーメータのキャリブレーションシステムに使える こと。

などが要求される。

このような要求を満たすために、アメリカ国立加速器研究所で行われた KTeV 実験で CsI 電磁カロリメータのキャリブレーションで使われたシステムを使うことにした。このシステムは 2.1 節で述べたように少し異なる方法でリニアリティ特性を測定する。一つの光を他の感光機器で光量をモニタし、その出力を基準として光量を決

める。また、その光量に対して、PMTの応答の変化を測定することによってPMT のリニアリティ特性を測る。よって、このシステムでは光量モニタの精度と、光を PMT に分ける仕組みが重要となる。PMT テストシステムは図 2.2 に示すように大 きく分けて次の4つのパーツと、制御と測定のためのPCと、PMT 測定部で構成さ れている。

- 光源:出力の安定性、出力波長特性を考慮し、355nmの波長の3倍波を出す Nd:YAG レーザを使用。
- 光学系:レーザの光度調節のためにモーターで駆動する ND フィルタを使い、光量を調節し、レンズを用いて光ファイバ (1 次ファイバと呼ぶ) への集光を行う。
- 光分散系:1次ファイバからのレーザ光で液体シンチを光らせ、その光を2 次ファイバへ分配する。
- 光度モニタ: PIN フォトダイオードとその出力を A/D 変換する専用の Digitizer を用いてモニタシステムを使用する。



図 2.2: PMT テストシステムの概観図。

この装置の性能はいかに光を線形性を保ったまま均等に分けるかと、いかに正確 に光の光度を測るかにより決まる。次章で、各パーツの性能や特性を述べる。

第3章 PMTテストシステムの各部

3.1 PIN フォトダイオード

PMT テストシステムの主な目標は非線形性を測定する事であり、その測定に当たって入力光に対する出力の線形性が高い測定機器が必要となる。そのため光に対する応答のノンリニアリティが小さい PIN ダイオードを使う。



図 3.1: PIN ダイオードの電圧に対する出力の大きさの変化、電圧に対する顕著な依存性は見えない。±2%のずれは測定方法によるものだと考えられる。電圧が安定な条件(±0.1mV)では大きく変わらないと考えられる。

PIN フォトダイオードの光子に対する量子効率は

$$\eta_e = \eta_{coll} \eta_t \eta_i = \eta_{coll} (1 - R) T_h (1 - e^{-\alpha W})$$
(3.1)

で書かれる。ここで、 η_e :量子効率、 η_{coll} :ダイオードの形状による電子収集率、 η_t :光の光電面への透過率、 α :光吸収効率、W:空乏層の厚さである。従って、量子効率はバイアス電圧に依存しない。PIN フォトダイオードの構造は一般の PN 接合のダイオードの P型とN型の半導体の間に真性半導体を入れたものである。そのため、一

般的な PN 接合のフォトダイオードの場合、空乏層の厚さは電圧に依存する。しかし、 PIN ダイオードの場合は真性半導体の厚さがバイアス電圧により発生する P、N型半導体内部での空乏層の厚さより十分厚いので、空乏層の厚さが真性半導体の厚さとほぼ同じ厚さになる。そのためバイアス電圧による感光部の領域の変化が PN 接合のダイオードより小さいので、 PIN フォトダイオードは光子に対する量子効率がバイアス電圧の影響を受けにくい。 PIN フォトダイオードの電圧に対する出力の変化を図 3.1 に載せた。測定誤差は大きいが、 PIN フォトダイオードの出力はバイアス電圧に大きく依存しないことが分かる。また真性半導体内部は抵抗が均一であるため、空乏層内部の電場は一様であり、光の吸収場所による量子効率の変化も小さい。よって、 PIN フォトダイオードの光子に対する量子効率は一様である。

光度をモニタする機器として浜松フォトニックス社のS1722-02を使った。このモデル は紫外線領域で一般的なPIN-Diodeより高い受光感度を持つ $(0.1 \sim 0.2[A/W] @ 300 \sim 400[nm])$ 。使用波長領域で温度による量子効率の変化が小さいためよい安定性を持っていると考えられる。

受光面面積	$13.2[mm^2]$	
感度波長範囲	190 ~ 1100[nm]	
端子間容量	30[pF@10V]	
暗電流	30[pA]	

表 3.1: S1722-02の性能

3.2 KTeV PIN photo diode digitizer DDC101

PIN ダイオードの出力の読み出しのために Burr Brown 社の DDC101 を用いた PIN photo digitizer を使った。DDC101 の特徴は 20bit の広いレンジをもち、Full Scale Range で 0.03 %以下の非線形性を持つ事である。同じく広いレンジで小さい非線形性を持つ PIN ダイオードとこの 20bit の ADC を組み合わせる事により、光量を小さな誤差でモニターできる。

DDC101 は数段階の過程を踏んで信号を A/D 変換をする。図 3.3 と図 3.4 を用いて 説明する。DDC101 はゲートの入力があるとゲートの入力から \sim 150 μ sec まで、内部 にあるコンデンサ (図 3.3 の中の C_{INT}) にある残留電荷を A/D 変換する。ここで得 られた値を A とする。その後、ゲートが閉じるまで (\sim 1msec) 外部センサーからの電 荷をある電流の範囲内で C_{INT} に取り込む。その後 C_{INT} に溜まった電荷を A/D 変 換する。ここで得られた値を B とする。DDC101 は最後に B - A の値を出力する。



図 3.2: PIN ダイオードの電圧に対する出力信号の形の変化、バイアス電圧が 2.5V から 15V に増加するに連れてホールや電子の移動度が大きくなるため、出力波形の高さが増加し、幅が狭くなることが見える。(ピーク電圧 3.4mV のグラフが 2.5V の時の出力信号)



図 3.3: DDC101 簡単な回路図。センサから C_{INT}への電流は制限されている。



図 3.4: DDC101 のゲートと信号入力のタイミングに対する出力データの変化。

その機構が図 3.4 のグラフから読み取れる。図 3.4 は PIN フォトダイオードを DDC101 につなぎ、幅 1 μ sec の LED の発光を測定した結果である。信号入力のタ イミングが DDC101 の出力にどのような影響を及ぼしているかを示す。ゲートを与 えてから 0~150 μ sec の間に DDC101 の出力が変化していることが見える。A の値を A/D 変換する間に光の入力による信号があると、信号による電荷が C_{INT} に入るこ となる。よって、DDC101 はペデスタルを元々のペデスタル A_0 より大きく見積もっ てしまい、DDC101 は元々の出力より小さい出力を出してしまう。このため、より 早く発光した場合ほど多くの電荷がペデスタルとして数えられてしまため出力が小 さくなる。 800μ sec 以降のスロープの原因は外部から C_{INT} に流れる電流量が制限さ れているからである。電流量の制限により、ゲートが閉じるまで信号からの電荷が 全部全 C_{INT} に移せなくなり、B が小さくなる。 $150 ~ 800\mu$ sec の間に入力された信 号に対して、ADC の出力変化は ± 2 % 以内である。よって、PIN フォトダイオード への光は PIN photo-diode digitizer へのゲート入力の 200μ sec の後に入射させること にした。

3.3 LASER

レーザは Continuum 社の ND:YAG レーザーの Surelite1 を使った。ND:YAG レー ザーは YAG の結晶にネオデュムを添加した結晶をキセノンレンプを発光させること により励起させ、波長 1064nm の赤外線レーザ光を放出させる。それを非線形光学結 晶に通すと、振動数が 3 倍の波長 355nm の紫外線が生成される。これを液体シンチ の発光のために使った。波長 355nm のビームの強度は 70mJ/Pulse に調整した。レー ザのパルスビームの幅は 8ns であった。レーザーの出力の時間変動はロット(結晶) の温度が上がるにつれて、励起された結晶の中の分子がランダムな光の放出を起こ しやすくなる。このランダムな光の放出により結晶にためたエネルギーの総量は時 間とともに減っていく。その結果レーザーの出力は結晶が熱平衡状態に達するまで減 少する。安定するまでにかかる時間は 3 時間程度であるが、冷却効率に影響を受け る。安定時の平均出力の平均値の変動は 1 時間 1 %以下であった。安定な出力を持つ キセノンランプを光源とするため出力の Pulse to Pulse の変動は 3 %以下であった。 レーザ本体はシリアル信号線を通してパソコンに接続し、パソコンから、レーザ の ON/OFF、フラッシュランプの電圧、発振タイミングなどを制御した。レーザ本 体はフラッシュランプに電圧を加えるときに幅 20μs の TTL 信号を出し、レーザの

発振を制御するポケットセルに電圧がかかる時にまた幅20μsのTTL信号を出す。2 番目のレーザからの信号の170ns後にレーザーが発振する。この2つのレーザからの信号を用いてNIMの回路を組み、測定回路を組んだ。

3.4 光減衰システム

光減衰システムは ND-Filter が 9 枚ずつ付いている Fixed Filter Wheel の 2 個と連 続的な減衰率を持つ Variable Filter Wheel1 枚で構成されている。一つの Fixed Filter Wheel は 10 %ずつ光量を調節でき、もう一つの Fixed Filter Wheel は 10 倍ずつ光量 を調節できる。Variable Filter Wheel は線形性測定のときの光量調節用として使わ れる。各 Filter Wheel の減衰率を図 3.5~ 図 3.7 にまとめた。



図 3.5: Fixed Filter Wheel 1の透過率



図 3.6: Fixed Filter Wheel 2の透過率



図 3.7: Variable Filter Wheelの回転角度に対する透過率

減衰率のデータの図 3.5、3.6 から分かるように、2 つの Fixed Filter Wheel(FFW) により光量を 0.15×10^{-3} まで減衰できる。さらに Variable Filter Wheel(VFW) によ りその 1/300 まで光を減衰できる。よって、光量減衰システムを使い光量を 6 桁の レンジで調節できる。このため、測定目標である PMT への光量 (40~40000 p.e.) の 3 桁のレンジをを十分カーバーできることがわかる。

この光量減衰システムの短所は反射型のNDフィルタを使うため、フィルタの組 み合わせによって減衰率が変化することである。FFW1を通った光がFFW2の表面 で反射されて、それがまたFFW1で反射される事により、FFW に付けられている NDフィルタの減衰率による期待値通り光量が調節できない。よって、この光量調節 システムでは一般的な線形性のテストの手段である1:Xの手法は使えない。そのか わり、Filter Wheelを通った光を2つの光量測定装置でモニタし、光の強さを測定す る。その値を光度と見なしてPMTの応答の線形性を調べる方法を用いる。

3.5 液体シンチレーター

液体シンチは 355nm の光を吸収し、360nm~400nm の光を出す 9-Methylcarbazole エチルアルコール溶液を使った。15mg の 9-Meathylcarbazole をアルコール 1L に溶 かし使用した。放出波長は CsI 結晶の fast component の波長より長いが、その放出 信号の幅が fast component の幅に近い。また、レーザの出力が 355nm の光の出力 (70mW) が 266nm の出力 (40mV) より高いので、光量を増やすために 355nm の光を 使っている。



図 3.8: 液体シンチの発光スペクタラム、355nmのピークは散乱によるもの

3.5.1 ボーリングボール

大量の PMT の線形性測定のためには、PMT へ光を分配する 2 次ファイバへ光が 均等に分配される必要がある。そのため、対称な構造を持つ光分配システムが必要 となる。また、1 次ファイバからの 355nm の光が液体シンチレーターで全部吸収さ れることが必要である。これは、もし1 次ファイバからの光が漏れて測定器に入る と、1 次ファイバ内部の光度分布の変化が、線形性の測定精度を悪くするためであ る。従って、波長 355nm の光が液体シンチから漏れないようにすることが重要とな る。このような要請を満たすものとして、ボーリングボールの中を削り出し、その 中心部に液体シンチが入っている直径 2.5cm の試験管が縦方向に入るものを用いた。 ボーリングボールの表面には 2 次ファイバが中心に向かって刺さるようにの穴があ けられており、ファイバーの刺さる深さが個々に調整できるようになっている。両側 には PIN フォトダイオードのための穴が空いている。



図 3.9: ボーリングボールの断面図



図 3.10: ボーリングボール

第4章 光量測定システムの性能

PMT テストシステムの概念で重要なのは光量の正確な測定とその光の線形的な分 散にある。この章では PIN フォトダイオードと PIN フォトダイオード Digitizer の性 能測定結果について述べる。

4.1 PIN+KTeV PINダイオードDigitizer(DDC101) の線形性テスト

線形性測定システムの測定精度は0.2%が求められている。そのためこの線形性測 定システムには0.2%より小さな精度とノンリニアリティが要求される。そのため、 PIN-ダイオードとそのDigitizerの精度およびノンリニアリティを測定した。これか ら PIN ダイオードとそのDigitizerの組み合わせを光量モニタ装置と呼ぶ。

LED を用いた光量モニタ装置の性能測定

まずは LED を用いて光モニタ装置の性能を測定した。図 4.1 のように LED からの 光を可変 ND フィルタを使ってその光量を調節し、ビームスピリッタを用いて光を 分岐させ 2 つの PIN フォトダイオードに入射させた。同じ装置 2 つで線形性測定を する場合、もし装置が指数関数的な応答をすると、線形応答をする場合と同じくそ の出力の比は光量に関係なく一定になる。従って、2 つ以上の光量比で線形性測定 を行う必要がある。そのため、片方の PIN ダイオードの前にフィルタを置き、光量 比 0.35:1 と 0.8:1 で光量モニタの線形性テストを行った。図 4.2 が光量比 0.35:1 のと きの測定結果で、図 4.3 が光量比 0.8:1 のときの結果である。 2 つの図ともに光量モ ニタ装置の出力比を片方の光量モニタ装置の出力でプロットしたものである。

テストの結果、片方の光量モニタ装置の出力が 500 ~ 3000 カウントの時、2つの 光量比はその出力比の平均の ±1 % 以内に収まった。また、光量モニタ装置の RMS が 1/*PIN_{Output}* に比例することが分かった。

光量モニタ装置の RMS/Mean の値は出力 400 カウントで2%だった。この結果と 光量モニタ装置のペデスタルノ分布の分散が安定時に5~6カウントの値を持つこと を合わせて考えると、光量モニタのペデスタルのばらつきが大きく影響を及ぼしてい ると考えられる。実際に PIN フォトダイオードの光子に対する実質的なゲインは量子



図 4.1: LED を用いたリニアリティのテストセットアップ



図 4.2: LED を用いたリニアリティテスト (PIN1/PIN2=0.35)



図 4.3: LED を用いたリニアリティテスト (PIN1/PIN2=0.78)



図 4.4: 光量モニタ装置の出力とその分解能:縦軸が RMS/Mean、横軸が出力である。 フィットされた関数は 8/x である

効率と等しいので、光量モニタ装置の出力の1カウントが電荷量 $0.5 \times 10^{-15}C \sim 3000$ 個の電子の電荷量であることを考えると、400カウントの出力は PIN フォトダイオー ドに $\sim 10^7 (PIN$ フォトダイオード q.e. = 0.1@360nm) 個の光子が入射していること に対応する。よって、光モニタ装置への光統計の影響は小さいことが分かる。この 結果を元に考えると、光量モニタ装置の出力が 3000 カウント以上であれば、装置の 光量分解能として < 0.2% が達成できる。

レーザ光を使った光量モニタ装置のリニアリティ測定

LED を用いた測定では LED の光出力が小さく、光モニタ装置の出力が 3000 カウ ントまでしか得られなかった。装置の最大出力は 100 万カウントであるため、その全 領域でのテストが必要である。そのため、レーザからの光を 1 次光ファイバーを通 して液体シンチレーターに入れて光らせ、その光を 2 つの光量モニタ装置でモニタ しながら測定を行った。まずは液体シンチレーターを 1cm 角のクォーツセルに入れ、 レーザで光らせた。しかし、1 次ファイバ内の光度の分布がファイバの内部で散乱し た後も、2 つの光量モニタ装置の出力比が平均から最大 3 % ずれた。従って、1 次ファ イバから直接光量モニタ装置に入る光を遮断することより光量比のずれを±0.4 % に 抑えた。



図 4.5: PIN1:PIN2=1:2、ノンリニアリティ < 0.4 %

2つの光量モニタ装置 (PIN1、2) に分配される光量比を 1:2 と 2:1 に変えて測定を 行なった結果、2つの光量モニタの出力の比のずれは 0.2 %以下であった。この 2 つ の光量比の結果により、この光量モニタのノンリニアリティの最大値は 0.4 % 以下で ある。



図 4.6: PIN1:PIN2=2:1、比の平均からのずれ < 0.2 %、データの取り方が図 4.5 と は異なるためプロット形式が変わった。

次に、第2章で述べたボーリングボールのシステムを用いてノンリニアリティを 調べた。ボーリングボールはその構造上光量比の変化が難しいので、1:1の光量に対 してリニアリティ特性の測定を行なった。

この測定の結果により、光量モニタ装置の出力の平均値からのずれが 0.2%より小 さいことが分かった。

4.2 安定性テスト

PMT 測定システムは長期間 PMT の性能をテストする間その性能が一定に保たれ ることが要求される。また、この PMT テストシステムは将来 E14 実験の CsI カロリ メータのキャリブレーションとモニタに使われるので、その安定性の確認は重要で ある。測定に影響を及ぼす因子として温度と時間経過をあげ、それらの因子に対す るシステムの安定性を調べた。光源はレーザと液体シンチを使い、光分散の方法は ボーリングボールを使った。

4.2.1 長時間測定に対する安定性

温度依存性に対する測定の結果から恒温槽の内部の温度を一定(<±1)にし、12時間にわたって2つの光量モニタ装置の出力の比の変化を測定した。この測定の結果、光量モニタ装置同士の出力の比のドリフトは12時間で0.02%以下であった。しかし、3日間の測定結果では0.1%の変化が測定された。



図 4.7: PIN1:PIN2=1:1、比の平均からのずれ < 0.1 %



図 4.8: 12 時間連則測定時のモニタ装置の出力間の比の変化

4.2.2 温度による光量比の変化

一つの光源からの光を2つの光量モニタ装置を使って測定する理由は、装置の測定 値の正しさを互いにチェックし合うためである。しかし、例えば、温度により2つの 光量モニタに分配される光の比が変化すると、光量モニタ装置での変化が真の光量 の変化であるものかそれとも光量の比の変化によるものか区別ができなくなる。そ こで、恒温槽の中にボーリングボールを入れ3時間に5 ずつ変化させ12時間にか けて15 から30 まで温度を変化させ、2つの光量モニタで測定される光量の比 の変化を測定した。



図 4.9: 温度変化に対するモニタ装置の出力の比の変化

その結果、20 の温度変化に対して 0.5%の 2つの光量モニタの光量比の変化が 観測された。変化を生む原因は液体シンチレーターの中での光の減衰率の変化によ るものと、装置自身の電源出力などの特性が温度により変化するものが考えられる。 しかし、温度変化を 5 以内に押さえることで、この効果を抑えることができる。

4.3 結果

LED とレーザを光源での光量モニタ装置のリニアリティテストによって、光量モニタ装置はその最大の出力まで 0.2%以下のノンリニアリティを持っているとことが分かった。そして、ボーリングボールを用いた安定性の測定の結果から温度の変化が制限された状態ではよい安定性を持っていることが分かった。

第5章 PMTのテストシステムのテス トシステムの性能評価

前章の結果として光量モニタ装置はその精度とノンリニアリティが0.2%以下であることが分かった。これを以て PMT テストシステムを構築し、PMT を用いてその性能を検証した。

5.1 PMTのテストシステムの

ボーリングボールに長さ 5m、径 1mm の 2次ファイバを固定し、そのファイバを 用いて液体シンチレーターからの光を PMT を入れる。



図 5.1: PMT の格納装置、

図 5.1 で示す格納容器に光ファイバと PMT を固定した。容器を 3本用意し、PMT テストシステムの性能評価を行った。今回、測定に使用した PMT は 2.5cm × 2.5cm × 50cm の CsI 結晶に使われる 3/4 インチの PMT を使った。使用したベースはまだ E14 用のベースが完成されていないため、KTeV で使われたベースをそのまま使っ た。4 回にわたって同じ測定を行った。その結果を図 5.2、5.3 に示す。 測定の結果、 PMT#0 のように多少偏差が大きい結果もあるが、PMT#6 の場合は測定値のばら つきがその平均値に対して ±0.2 % の以内で収まるデータが得られた。この結果はこ の装置の再現性が 0.2 % より小さいことを示している。しかし、ノンリニアリティの



図 5.2: PMT のノンリニアリティ:PMT#6 の線形性測定結果 (PIN=5000 で規格化)



図 5.3: PMT のノンリニアリティ:PMT#0 の線形性測定結果 (PIN=5000 で規格化)

グラフを見ると光量モニタの出力が4000カウントより小さい時に1%程度の変化を 見せるカーブが見えた。また、光量モニタ装置の出力が4000カウント以上の領域で 比が線形的に増加することが見えた。得られたグラフは一般的に知られたPMTの性 能とは異なるリニアリティを見せているため、いくつかの可能性ある原因を考えて 原因究明を行なった。原因として考えられるのは

- PMT の出力の A/D 変換に使った ADC の固有の誤差
- PMT の格納装置内部での PMT の位置
- 光量変化の方法、光量、順序。
- 2次ファイバのボーリングボールの表面での固定位置。
- PMT とベースの交換

などがあり、それらの寄与について調べた。まず、PMTの信号の A/D 変換に使った ADC のノンリニアリティについて調べた。使用したベースは Lecroy 社製の 2249W である。2 つの ADC のチャンネルを使い片方の ADC にはシグナルを分岐して入力 し、もう片方の ADC チャンネルにはアテーネータで半分に減衰させた信号を入力し た。理想的な ADC の場合、測定に使われた 2 つのチャンネル同士の間の出力の比は ADC の出力に関係なく、アテーネーターによる減衰率となる。測定の結果、2249W のノンリニアリティは 150 カウント以上のときに 0.2 %より小さいことが分かった。



図 5.4: Lecroy 2249W の 2 つのチャンネルを用いたリニアリティ測定、x 軸はアッ テーネータを通した信号の ADC の値。ADC によるノンリニアリティは ADC 出力 150 カウントときは ADC 出力 300 カウントの時の出力より 0.2 %ずれている。

その結果、ADC がノンリニアリティの測定結果に影響を及ぼすのは 300 カウント 以下の時であり、この値はペデスタルの測定間違いによる可能性もある。ペデスタ ルのずれは ADC の出力 1 カウントより小さいことが確認されており、図 5.2、5.3 で 見えるような、ADC のカウントが 300 以上の領域 (図 5.2、図 5.3 で、PIN=5000) で の変化を説明できない。



次に、ADC 以外の条件について調べた。変化させた条件として、ADC のチャン

図 5.5: 条件を変えた測定の結果。黒:1回目の測定、赤:PMT の 90 回転、緑:VFW の回転逆、青と黄色:ファイバの位置変更、ピンクと水色:ADC 交換。

ネル、光量の変化の仕方、ボーリングボルでのファイバーの固定位置、PMTの光電 面の回転などがある。測定の結果、上記のことの影響は小さく、条件を変えてもほ とんど同じ結果を得た。よって、これらの原因による影響は0.2%より小さいと考え られる。現在のところ直線性の改善は見られない。

第6章 考察

まだ試していない光の分配の非線形性の原因として液体シンチの濃度がある。理想的な場合、1次ファイバからの光は液体シンチの中でその透過距離に対し、指数 関数的な減衰をする。その減衰の分、液体シンチが発光する。その発光中心の位置 は光度によって変化しない。しかし、現実では光度が強すぎると、液体シンチの9-Meathylcarbazole分子の励起率が飽和状態になり、発光の分布が理想的な場合の分 布からずれる。これが光の分配の非線形性の原因となりうると考える。

第7章 結論

光量モニタ装置とボーリングボールを用いての測定で、光量モニタ装置の精度は Full Scale Range にかけて 0.2% 以下であることが分かった。PMT テストシステム を組み上げ、その性能テストを行なった。その結果、PMT テストシステムの PMT と光量モニタ装置の出力の比が ±1% 変化していた。その原因を探すため、ADC の チャンネル、光量変化の仕方、ファイバの固定位置などを変化させて測定を行ない、 これらが原因ではないことが分かった。光量分配の非線形性を原因を究明できれば、 装置の精度と再現性から PMT のリニアリティ特性の測定が要求された精度で、測定 できると考えられる。

謝辞

本論文を書くにあたって研究室の皆さんに本当にお世話になりました。山中卓教 授には研究の機会を与えていただいたことに深く感謝します。そして、修論提出間際 に慌てている僕を激励してくださったので、このくらいでもかけたと思います。花垣 和則準教授と原隆宣助教には詰まったときに助言をいただいたり、励ましの言葉を いただき、これまで頑張れたと思います。そして、PDの内田桐日さんも悩んでいる 時、相談してにいたたきありがとうございます。そして、秘書の川口真希さんにはい ろいろなものの注文や行政関係の書類を処理してください研究が円滑に行なわれる ようにしてください、ありがとうございます。そして、D3のHeffernan,David Noel さん、D2 岩井瑛人さん、D1の佐藤和史さんには分からないことをいろいろ教えて くださってありがとうございます。同期の石川迪雄、廣瀬穣、吉元寛貴にはお互いよ い刺激を与えてくれるよい相手だと思います。M1の高木君と柳田さん、B4の安達 君、内田君、杉山君にはだらしない先輩の姿しか見せてなく、申訳ないと思います。 いま Spring8 にいらっしゃる山鹿光裕さんには何も知らなかった M1の僕に多くの

ごとを教えていだだき、本当にありがとうございます。

そして、レーザの稼働方法について教えてくださった木下修一教授、金属工作を 教えてくださった金工室の坂本道夫さん、本当にありがとうございました。

皆さん、ありがとうございました。

参考文献

- J.H.Christemson, J.W.Cronin, V.L.Fitch and R.Turlay, Phys. Rev105,1413 (1964).
- [2] M.Kobayashi T.Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49,652 (1973).
- [3] L.Wolfenstein, Phys. Rev. Lett.**51**, 1945 (1983).
- [4] A.J.Buras. M.Gorbahn. U.Haisch and U.Nierste, *hep-ph/0603079*; Phys. Rev. Lett 95, 261805 (2005).
- [5] E391a Collaboration: J.K.Ahn, et al, arXiv:0712.4164v2[hep-ex].
- [6] Y.Grossman and Y.Nir, Phys. Rev. **B398**, 163 (1997).