

KTeV 実験 pure-CsI 電磁力口リメーターの ための光電子増倍管の線形性試験装置の開発

大阪大学理学研究科物理学専攻
長島研究室 辻敏弘

平成 7 年 2 月 6 日

目 次

1 序論	1
1.1 KTeV 実験と CsI 電磁力口リメータ	1
1.2 KTeV 実験の光電子増倍管への要請	3
2 線形性測定について	7
2.1 線形性測定装置にもとめられること	7
2.2 線形性測定の原理	8
3 測定装置の開発	9
3.1 線形性測定装置の概要	9
3.2 光源	10
3.3 光量調整系	11
3.3.1 4:1 の光量をつくるフィルター	11
3.3.2 光量変化のためのフィルター	11
3.3.3 光ファイバー	12
3.3.4 PiN フォトダイオード	13
3.4 計測回路	14
3.5 測定回路間の相互作用	16
3.6 測定回路の非線形性	17
3.7 ファインメッシュ型光電子増倍管による線形性曲線の補正	18
3.8 測定における光電子増倍管の安定性	18
3.9 測定データの取り方とデータ数の決定	19
4 線形性測定装置の評価	25
4.1 再現性	25
4.2 4:1 の光量比への依存性	25
4.3 チャンネルの個体差	26
4.4 規格化の点の正当性	29
4.5 浜松フォトニクスによる線形性測定結果との比較	29
4.6 線形性曲線の增幅率への依存性	30
5 結論と課題	33

A	光電子増倍管の基礎知識	34
A.1	光電子増倍管の原理	34
A.2	光電子増倍管の線形性	35
B	CP 非保存について	36
B.1	CP 変換	36
B.2	中性 K 中間子における CP 非保存	36
C	KTeV 実験	38
C.1	KTeV 実験の目指すこと	38
C.2	KTeV 実験の検出器	38

図 目 次

1.1	pure-CsI 電磁カロリメータ	4
3.1	線形性測定装置の概要図	10
3.2	フィルターの回転による 4 : 1 の光量比の変化	12
3.3	拡散板の距離と光電子増倍管に照射する光の一様性の関係	13
3.4	光源をみたときの光電子増倍管と PiN フォトダイオードの出力 の相関	14
3.5	光電子増倍管の出力の ADC 値の分布	15
3.6	ADC のチャンネル間クロストーク	20
3.7	增幅器のチャンネル間クロストーク	20
3.8	ファインメッシュ型光電子増倍管による測定回路の非線形性の測 定(測定回路：減衰器、增幅器、ADC)	21
3.9	ファインメッシュ型光電子増倍管の線形性(測定回路：減衰器、 ADC)	21
3.10	ファインメッシュ型光電子増倍管による補正前の線形性曲線	22
3.11	ファインメッシュ型光電子増倍管による補正後の線形性曲線	22
3.12	光電子増倍管の高電圧に対する安定動作	23
3.13	データの取り方とそのとき求まる 4 : 1 の比の精度	24
4.1	線形性測定の再現性	26
4.2	4 : 1 の比をはさむ 2 種類の異なる光量比で得られる光電子增 倍管の線形性曲線	27
4.3	同一の光電子増倍管の異なるチャンネルでの線形性測定	28
4.4	われわれの線形性測定と浜松フォトニクスの測定との相関	30
4.5	われわれの線形性測定結果の浜松フォトニクスの結果からのずれ	31
4.6	増幅率を変えた場合の線形性曲線の変化	32
A.1	光電子増倍管の構造図	34
A.2	光電子増倍管の線形性	35
C.1	KTeV 実験の検出器	40

表 目 次

1.1	pure-CsI 電磁カロリメータ	4
1.2	KTeV 実験用光電子増倍管に要求される仕様	6
3.1	窒素レーザーの仕様	11
3.2	各チャンネルに配分される光量比	13
3.3	減衰器の仕様	16
3.4	ADC の仕様	16
3.5	増幅器の仕様	16
4.1	光電子増倍管の線形性測定におけるチャンネル間のばらつき	28
4.2	3/4" 光電子増倍管の各測定ピーク電流値での偏差の平均とその標準偏差	29

概要

K 中間子による CP 非保存の起源の探索を目的とした KTeV 実験が 1996 年春に米国フェルミ加速器研究所ではじまる。精度向上のため電磁力口リメータに pure-CsI 結晶が使われる。その読み出しに使用される光電子増倍管は 3000 本を超え、その性能には非線形性が 0.5% 以下という厳しい要請が課せられている。

われわれは、一度に複数の光電子増倍管の非線形テストができる測定システムを開発してきた。そして、光源に窒素レーザーを使用、光量調整にフィルターを使用して、一度に 10 本の光電子増倍管のテストができ、その測定精度が 0.2% 程度であるテストシステムを開発した。

第1章

序論

弱い相互作用においては、空間反転変換（P）と電荷反転変換（C）で対称性が破れている。そのうえ2つの合成変換のCP変換でさえ、その対称性が破れていることが、1964年にV.L.Fitch、J.W.Croninらによって中性K中間子の $\pi^+\pi^-$ 崩壊で発見された¹。

このCP非保存の起源を解明すべく、様々な実験が試みられ、 $\pi^0\pi^0$ への崩壊、準レプトン崩壊、干渉効果などでCP非保存の効果が観測された。しかし現在までのところ、中性K中間子以外ではCP非保存の現象は観測されていない。

また、理論的見地からも小林益川理論や超弱理論などが現象を説明するために提案されている。しかし実験的にどちらが正しいか見分ける精度が達成されておらず、いまだCP非保存の起源は定かになっていない。

この章では、このCP非保存の起源解明を目指すKTeV実験について述べ、本論文の主題である線形性測定装置のきっかけとなったCsI電磁力口リメータ用光電子増倍管についてまで説明する。

1.1 KTeV実験とCsI電磁力口リメータ

米国フェルミ加速器研究所では現在、CP非保存の解明を試みるべくKTeV実験の準備が進められている。

KTeV実験は、二方向からCP非保存の起源の解明を目指す。その2つの方向に対応して、KTeV実験は趣の違った2つの実験から構成されている。

一つは、E832実験である。

この実験では、直接的CP非保存の大きさ(ϵ')と間接的CP非保存の大きさ(ϵ)の比を測定する。この比は、 K_L と K_S の $\pi\pi$ 系への崩壊過程の振幅から

$$R = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)/\Gamma(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)/\Gamma(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} = 1 + 6Re(\epsilon'/\epsilon)$$

¹CP非保存については付録を参照のこと

より求められる。このとき K_L と K_S の $\pi\pi$ 系への崩壊を同時に観測することにより、系統誤差が抑えられる。 ϵ'/ϵ の大きさは標準理論では、 10^{-4} から 3×10^{-3} と予想されている。E832 実験では、その ϵ'/ϵ を 1×10^{-4} の精度で決定する。

もう一つの実験は E799 実験で、直接的 CP 非保存が存在すれば、その効果が間接的 CP 非保存の効果と同程度の寄与をすると考えられている K_L の稀崩壊事象を探査する実験である。実験は、崩壊の分岐比において 10^{-10} 以下の感度でおこなう。

KTeV 実験では、陽子反陽子衝突型加速器テバロンからの 800GeV という現在世界最高のエネルギーの陽子ビームを一次ビームに使う。そのため、いくつかの利点がある。それは、反応で生ずる光子も高いエネルギーを持ち、その検出においてエネルギー分解能が高いということ、また、崩壊粒子がほとんど前方に出てくるため粒子の捕獲効率がよく、多体崩壊に対してもアクセプタンスが大きいということなどである。

KTeV 実験の検出器の各部の説明は付録にゆずり、以下では光電子増倍管が読み出しに使われる pure-CsI 電磁カロリメータについて述べていく。われわれが検査する光電子増倍管に対する要請は、多分にこの pure-CsI 電磁カロリメータへの要請と関係がある。

KTeV 実験では、一般的な高エネルギー実験でおこなわれるように問題とする中性 K 中間子を大量に生成し、その崩壊様式を観測する。pure-CsI 電磁カロリメータは、K 中間子を生成させる標的から 186m 下流で K_L 、 K_S からの崩壊粒子を待ち構えている。実質的な中性粒子の検出は電磁カロリメータでしかおこなわれない²。そのため、電磁カロリメータにはさまざまな要求がなされている。

前述したように、E832 実験では、 $\pi^0\pi^0$ への崩壊を観測する。この崩壊では、4 つの光子という終状態が電磁カロリメータでのみ観測される。そして、電磁カロリメータ上のエネルギー分布の情報から 4 つの光子の崩壊点とそのエネルギーが再構築され、 K_L か K_S のどちらが起源かを知る。また、この $\pi^0\pi^0$ モードには、 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ (終状態の 6 つの光子のうち、2 つが観測されない場合) が、バックグラウンドとなる。この区別の正確さも 4 光子の再構築にかかっている。

E799-II では、 $K_L \rightarrow \pi^0l^+l^-$ が初めて探索される。このとき $K_L \rightarrow \gamma\gamma l^+l^-$ が最大のバックグラウンドとなる。これも観測された 2 光子が正しく π^0 の質量を組むかどうかで、このバックグラウンドがどれだけ正確に落せるかが決まる。それゆえ、電磁カロリメータにエネルギー分解能の高さが必要となる。

また、エネルギーの測定での線形性という点にも要請がある。エネルギーの測定においては、実際に粒子が検出器に落したエネルギー (E_{true}) と観測されるエネルギー (E_{mes}) の間には、

$$E_{true} = E_{mes}^{1-\alpha}$$

²ベトーとしては 線ベトーがある。

という関係がある。 α は、線形性からのずれを表すパラメーターで、電磁カロリメータでの放出光に対する吸収率に関係している。KTeV 実験では、電磁カロリメータの非線形性からくる $Re(\epsilon'/\epsilon)$ の系統誤差を 0.3×10^{-4} 以下に抑えた。これはここでの α を 0.001 以下の精度で決定することに対応する。この α の誤差は、 α 自身の $1/5$ になることが、過去の実験³で分かっている。つまり、非線形のパラメーター α 自身は、0.5% 以下でなければならない。

以上のように、KTeV 実験の電磁カロリメータは実験の要であり、高いエネルギー分解能と位置分解能、さらに線形性が要求されている。そこで KTeV 実験では、これらの要求に応えるために、電磁カロリメータの感受体に pure-CsI 結晶をもちいる。

pure-CsI 結晶が感受体に採用された理由は、次の通りである。

まず、この結晶は、エネルギー損失当りの放出光子数が多く、応答が早い。また、その放出光に対する透明度が高いため、入射エネルギーに対する出力の線形性が良い。その他に、放射損傷に強いという特徴があり、これも KTeV 実験の 10Krad^s という苛酷な環境に適応する。

pure-CsI 結晶の電磁カロリメータ内での配置は、シュミレーションにより決定され、図 1.1 に示されるように 2232 本の $2.5 \times 2.5 \times 50\text{cm}^3$ の結晶とそれを取り巻くように配置された 868 本の $5.0 \times 5.0 \times 50\text{cm}^3$ の結晶から構成されている。CsI 結晶の奥行きは、要求されるエネルギー分解能を達成するために 50cm(27 放射長) と決められた。また、結晶からの出力が、入射粒子のエネルギーを落す場所に依存しないように各結晶には、反射材が巻かれる。

以上のようなことから、pure-CsI 電磁カロリメータは、 $0.3 + 0.5\sqrt{E}\%$ (E ; GeV) のエネルギー分解能と 1.0mm 以下の位置分解能が得られると予想されている。表 1.1 にこの pure-CsI 電磁カロリメータについてまとめておく。

1.2 KTeV 実験の光電子増倍管への要請

前節で述べた pure-CsI 電磁カロリメータからの放出光の読み出しは、光電子増倍管でおこなう。pure-CsI 結晶のブロックの大きさにあわせ、2 種類の光電子増倍管があり、内訳は要請とともに表 1.2 に挙げておく。以下では、2 種類の光電子増倍管のうち、われわれが検査をおこなう、径が $3/4$ インチの光電子増倍管への要請をのべる⁴。

KTeV 実験の光電子増倍管には、電磁カロリメータに pure-CsI 結晶を使うことから、様々な要請が課せられている。

電磁カロリメータの発光量が多いため、KTeV 実験の光電子増倍管は、低い增幅率で、かつ線形性が優れていなければならぬ。ここで線形性とは光電子増倍管がみた光子の数と出力が比例しているということである⁵。 K_L の

³E731 実験。米国フェルミ加速器研究所でおこなわれた $Re(\epsilon'/\epsilon)$ を決定することを目的とした実験

⁴径 1.5 インチの光電子増倍管は、米国 UCLA によって検査される。

⁵光電子増倍管とその線形性については付録を参照のこと。

光電子数	15 光電子/MeV 損失
パルス幅	25ns
大きさ	$190\text{cm} \times 190\text{cm} \times 50\text{cm}$
pure-CsI 結晶数	2232 本 ($2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 50\text{cm}$) 868 本 ($5.0\text{cm} \times 5.0\text{cm} \times 50\text{cm}$)

表 1.1: pure-CsI 電磁カロリメータ

図 1.1: pure-CsI 電磁カロリメータ

崩壊で生成される電子や光子は、最大 80GeV のエネルギーを持つ。pure-CsI 電磁カロリメータが、この電子や光子のエネルギーを測定するが、このとき、pure-CsI 結晶は、1MeV 損失当り約 15 個の光電子分を光電子増倍管に与えるため、80GeV の電子や光子が、すべてのエネルギーを CsI 結晶中で落したとき、光電子増倍管では $80GeV \times 15 \text{ 個}/MeV = 1.2 \times 10^6$ 個の光電子を得る。この膨大な光電子数により、それを検出する光電子増倍管の增幅率(ゲイン)は、小さなものでよい。

80GeV のエネルギー損失により、-1000pC の電荷量のパルスが得られればよいとするとき、

$$\frac{-1000(pC)}{80(GeV) \times 15(\text{光電子}/MeV \text{ 損失}) \times (-1.6 \times 10^{-19})} = 5000$$

の増幅率でよい。ふつうの光電子増倍管の増幅率が、 10^6 から 10^7 であるから、非常に小さい。この低い増幅率を実現するには、光電子増倍管の增幅のための印加電圧を小さくするという方法も考えられるが、それでは光電子増倍管内の最終ダイノード付近で増幅されている電子が空間電荷に勝てず、軌道をはずれ、結果として、光電子増倍管の線形性を悪くする。そのため、KTeV 実験用の光電子増倍管では、ダイノードの数を 5 段に減らし、ダイノード間の抵抗比を調整することで 5000 という低い増幅率を実現した。

KTeV 実験の光電子増倍管は、この低い増幅率において線形性を保たなければならぬ。pure-CsI 結晶の線形性の良さを十分に発揮するには、80GeV の光子が入射したときに得られる出力ピーク電流値 30mA まで、光電子増倍管の非線形性が $\pm 0.5\%$ 以下である必要がある。この値は、現在の製造技術の限界でもある。この論文で述べる測定装置は、光電子増倍管の線形性がこの要請を満たしているか検査するのである。

その他にも要請はある。

pure-CsI 結晶には、約 1%/1 度の温度特性がある。光電子増倍管のベース部分は各ダイノードへの電圧配分のための回路があるため発熱し、接続する pure-CsI 結晶に温度勾配を引き起こすおそれがある。そのため、KTeV 実験の光電子増倍管には、発熱量 1 W 以下が要求される。

最後に、平均陽極電流が $50\mu A$ のときに増幅率の変動が $\pm 0.5\%$ 以下という要請である。これは、レート依存性とよばれるものであり、われわれは線形性の試験と同時にこの試験もおこなわなければならない。

以上の要請をみたすように、光電子増倍管が製造された。出来上がった光電子増倍管の仕様を表 1.2 にまとめておく。

名称	浜松フォトニクス社 R5364 (3/4") R5330 (1.5")
形状	ヘッドオン型
ダイノード段数	5
大きさ	径 : 19.5 mm (3/4") 111 mm (1.5") 全長 : 67 mm (3/4") 40 mm (1.5")
材料	光電面 : バイアルカリ 窓材 : UV ガラス
個数	2232 本 (3/4") 868 本 (1.5")
増幅率	5000
発熱量	1W 以下
線形性	出力パルス高 30mA まで ± 0.5%以下
頻度依存性	平均陽極電流 50 μ A まで 増幅率の依存性が ± 0.5%以下

表 1.2: KTeV 実験用光電子増倍管に要求される仕様

第2章

線形性測定について

この章では、厳しい仕様を課せられ、製造されてきた光電子増倍管の線形性の試験のために、われわれの試験装置がどのような要請を満たすべきかについて述べる。また線形性装置がいかなる方法で線形性の評価をおこなうかについても述べる。

2.1 線形性測定装置にもとめられること

われわれは、前章の仕様を満たすように製作されてきた光電子増倍管をすべて検査しなければならない。その数は、2000本を超えるため、第一に同時に複数本の光電子増倍管の線形性の試験が行なえる装置である必要がある。

そのうえ、光電子増倍管には、前述したとおり、その非線形性が出力ピーク電流値 1mA から 30mA まで $\pm 0.5\%$ という要請が課せられている。試験装置は、さらに広い出力領域で、光電子増倍管の非線形性が十分見分けられる性能が要求される。

以上の点などから、われわれは測定装置の作製にあたって、測定装置に

- 増幅率 5000 の光電子増倍管にその出力のピーク電流値で 5mA から 50mA まで線形性の試験がおこなえる。
- 測定精度が $\pm 0.2\%$ 程度である。
- 同時に 10 本以上の光電子増倍管に対して、線形性の試験がおこなえる。
- 光電子増倍管に照射する光源は、pure-CsI 結晶の放出光の波長に近い。
- 光電子増倍管の設置以外は、コンピューターによる自動測定である。

という要請を課した。

これらは実際、非常に厳しい要請で、特に複数本の測定という要請は、試験装置の開発に大きな制限を与えるものである。

2.2 線形性測定の原理

われわれが、光電子増倍管の線形性測定において採用した方法は、一般的な次のものである。

パルス状の光を 4:1 の光量比で光電子増倍管に点灯する。そのとき 4 の光量に対する光電子増倍管の出力電荷量を 1 の光量に対する出力電荷量で割った比を $R(I)$ とする。ここで I は 4 の光量のときの光電子増倍管の出力パルスのピークの電流値である。4:1 の光量比を保ったまま、光量を変化させ、 I が 5mA から 50mA までの範囲で、 $R(I)$ を測定する。このとき求まる値

$$\frac{R(I)}{R(5mA)} - 1$$

を非線形成分とする。KTeV 実験の光電子増倍管には、この値が出力ピーク電流値 30mA まで、±0.5%以下が要求されている。

この測定方法では、低出力のとき光電子増倍管はその非線形性がきわめて小さい、また、出力の電荷量はそのピークの電流値に比例する、という仮定がなされている。しかし、光電子増倍管の構造から、これらの仮定は、妥当なものであるといえる。

第3章

測定装置の開発

この章では、前章で述べた線形性測定の原理と要請にもとづき、光電子増倍管の線形性測定のために今回開発された測定装置について説明する。

3.1 線形性測定装置の概要

KTeV 実験用光電子増倍管のために開発された線形性測定装置の全体図を図 3.1 にあげる。

装置は大きく分けて、光源、光量調整系、計測回路からなる。

今回の測定装置に対していくつかの要請があるが、そのうちの一つに、一度に大量の測定をおこなうというものがある。光源と光量調整系は主に、この要請を満たすように構成されている。

まず光源は、検査される複数の光電子増倍管に十分な光量が配分されるよう大量の窒素レーザーの放出光を液体染料に照射し、さらにそこから出てくる光を用いることにした。4:1 の比をもつ 2 つの光量をつくるためのフィルターが、レーザー光が液体染料に照射する前にある。液体染料から放出される光は、光ファイバーをとおって、暗箱でもある恒温槽内の各光電子増倍管に配分される。このとき液体染料と光ファイバーの間のフィルターが、測定領域の光量の調整を行なう。2 枚のフィルターのお互いの位置は、フィルター間の光の反射が、4:1 の光量比を崩さないように決めた。また、われわれが使う窒素レーザーは、線形性の測定にとって十分安定であるとはいえず、そのため光量の変動を監視するために、液体染料の前に PiN フォトダイオードを設置した。

計測回路は、測定精度を達成することを念頭において選定した。

以下の節で、装置を構成するために使用した個々の機器について簡単に説明していく。

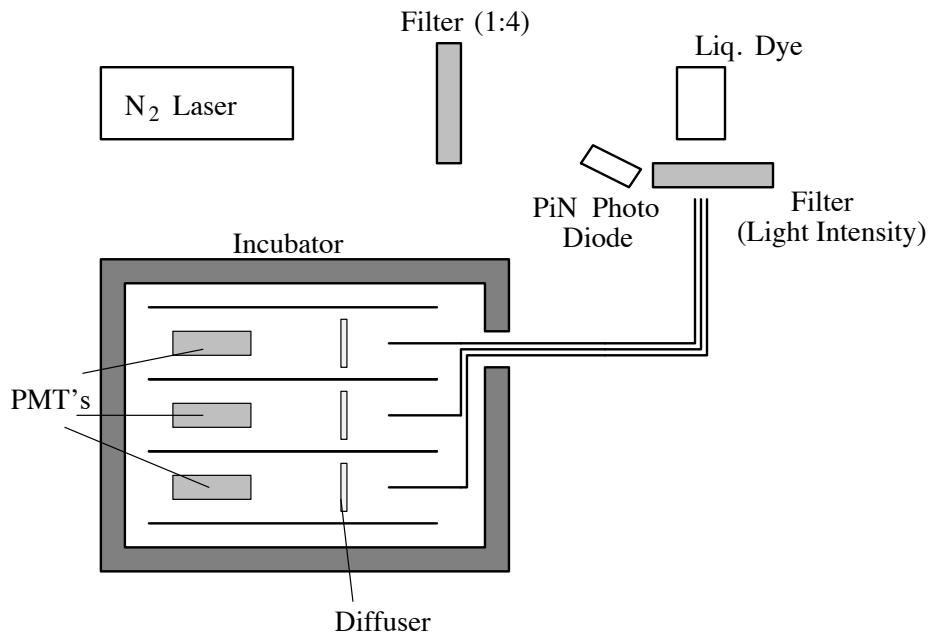


図 3.1: 線形性測定装置の概要図

3.2 光源

今回、一度に複数の光電子増倍管の線形性の試験をおこなうことができる装置の開発を目的としてきた。

複数の光電子増倍管の測定において、各光電子増倍管にそれぞれ独立した光源を使用するのは、その制御が困難であると予想されたので、われわれは、1つの光源からの光を各光電子増倍管に分配することにした。そのためには大光量を出力できる光源が必要である。また検査された光電子増倍管は、KTeV 実験において pure -CsI 結晶からの放出光を見るので、われわれの装置の光源の波長も CsI 結晶のもの (310nm) に近いものを選択することにした。また窒素レーザーの放出光ではパルス幅が約 5nsec とせまく、pure-CsI 結晶からの放出光のパルス幅 (25nsec) に近付けるために光源として、窒素レーザーの光を液体染料 (cyclohexane (溶媒) 1l 当りに N-Methylcarbazole(溶質) を約 0.5g 溶かして得られる。放出光の波長は 430 ~ 340nm 。) に照射したときの放出光を使用した。また、パルス幅を広げることで、計測回路系の非線形性を避けることもできる。

レーザー発振の頻度は、10Hz にした。

今回使用した窒素レーザーは、外部入力により出力の制御ができ、またレーザーの放出に同期したタイミングも出力され、回路系のトリガーに利用できる。これらは、コンピューター制御をめざしたわれわれの装置には重要な性能である。

名称	レーザー ホトニクス社 LN300C
波長	337.1 nm
パルス幅	5 nsec
強度	250 μ J
エネルギー安定度	3 %
放出レート	~ 40 Hz

表 3.1: 室素レーザーの仕様

3.3 光量調整系

線形性測定では、光電子増倍管に入射する光量全体の変化と、4 : 1 の比を持つ 2 つの光量をつくることが必要である。それを実現するために 2 種類のフィルターをもちいた。これらには、駆動器が付属され CAMAC を通してコンピューター制御が可能である 光機社の ND フィルターを使用した。

3.3.1 4:1 の光量をつくるフィルター

異なる透過率をもった 10 個の窓をもち、駆動用モータで回転させて、使用する透過率を選ぶことができる。われわれは、このフィルターの 2 枚の窓をもちいて、4 と 1 の光量に対応する光を得ることにした。このときの光量比はおよそ 3.78:1 であった。正確に 4:1 の光量比ではないが、この程度の差では線形性の曲線に大きな影響が現れないことは、後述する。

3.3.2 光量変化のためのフィルター

円形の石英ガラスにクロム膜を蒸着したものである。駆動用モータで回転することで、光の透過率を 0 ~ 90% の範囲で連続的に変えることができる。

われわれは、その透過率をもちいて、レーザー光の光量調整をおこなう。これにより、光電子増倍管の出力波高で 3.5V(50Ω でピーク電流値 70mA に相当)までの光量調整が可能となった。

図 3.2 は、測定回路の非線形性が小さいと思われる領域で、ファインメッシュ型光電子増倍管¹の線形性を測定したものである。横軸は、このフィルターの回転角である。このフィルターの使用する位置によって、光量の 4:1 の比がかわらないことがわかる。

¹ メッシュ状のダイノードが平行に並べられている光電子増倍管。その構造上、增幅過程で逃げ出す電子が少ないので、線形性に優れている。

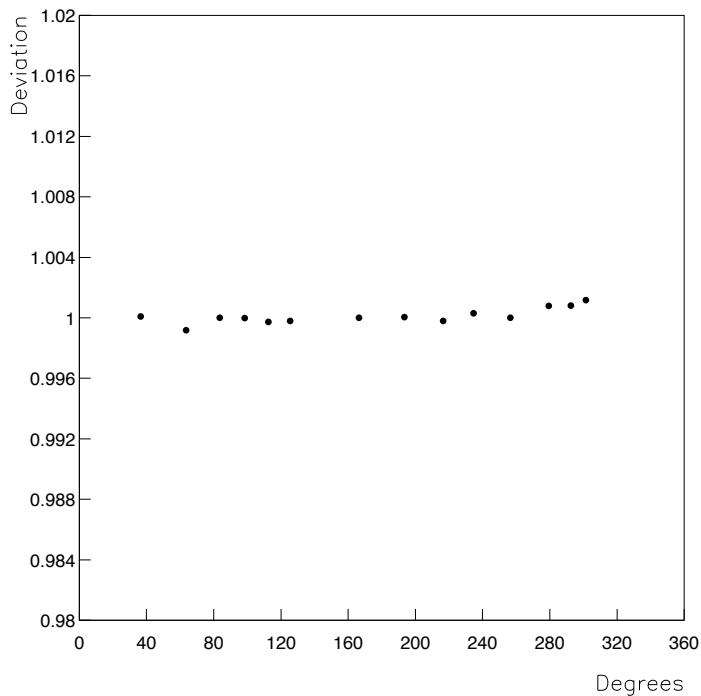


図 3.2: フィルターの回転による 4 : 1 の光量比の変化

3.3.3 光ファイバー

光源からの光を複数の光電子増倍管に分配するために光ファイバーを使用した。

また、ファイバーからの光が光電子増倍管の光電面に一樣に入射するように光電子増倍管の手前 8 cm のところに拡散板をいた。 (図 3.3 は、ファイバーの先端と光電子増倍管の光電面との距離を 14 cm に固定し、拡散板と光電子増倍管の距離を変えながら、水平方向に光量の測定をおこなったものである。このときにもちいた光電子増倍管は光電面の中心 2mm × 2mm のみに光が入るようにマスクされたものである。図の縦軸は各位置での出力波高である。この結果、拡散板と光電子増倍管の距離が 8 cm あれば、検査する光電子増倍管の光電面に一樣に光が照射することがわかる。)

後述する測定回路中の減衰器の制御からの要請で、検査される光電子増倍管に分配される光は同じくらいの光量である必要があった。それは恒温槽内のファイバー、拡散板、光電子増倍管の位置を一つ一つ微妙にかえることで、調整をおこなった。これにより、各チャンネルごとの光電子増倍管がみる光量を ± 0.5% 以内に調整することができた (表 3.3.3)。

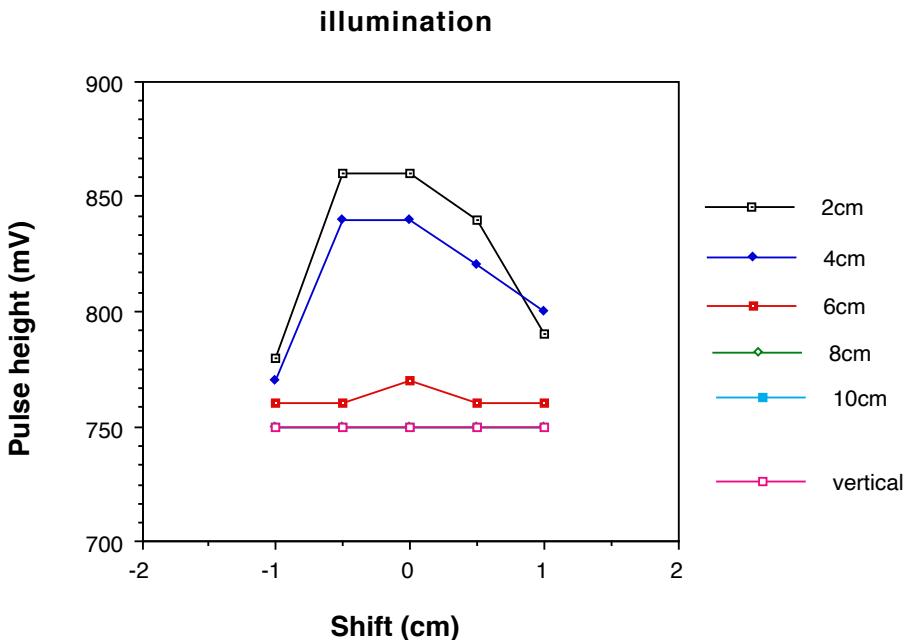


図 3.3: 拡散板の距離と光電子増倍管に照射する光の一様性の関係

channel	1	2	3	4	5	6	7
相対比	1.02	1.04	1.00	1.03	1.03	1.00	0.95

channel	8	9	10	11	12	13	14
相対比	0.97	0.97	1.03	0.99	1.00	0.96	1.00

表 3.2: 各チャンネルに配分される光量比

1 本の光電子増倍管をもちいて調整された後の各チャンネルの光量比。表では相対比の平均が 1.0 になるようにしてある。

3.3.4 PiN フォトダイオード

レーザーによる光源は、われわれの線形性測定において、安定しているとはいえない。このことは測定において、統計量を要求する。線形性の測定において、その測定のふらつきを減らすには、データの量を上げるという解決法が考えられるが、われわれの使用する窒素レーザーの出力頻度は最大 40Hz であり、上げられるデータ量には、限界がある。また、光量の偏った変動や周期的な変動があると、それは測定において、系統的な誤差となりうる。

そのため、レーザーの光量の変動のモニターとして、增幅率 1 の PiN フォトダイオードを導入し、光量の変動を補正することにした。図 3.4 は、同時に光源をみたときの光電子増倍管と PiN フォトダイオードの出力の相関である。相関が見られるのは、光源の光量の変動による効果があらわれているからであ

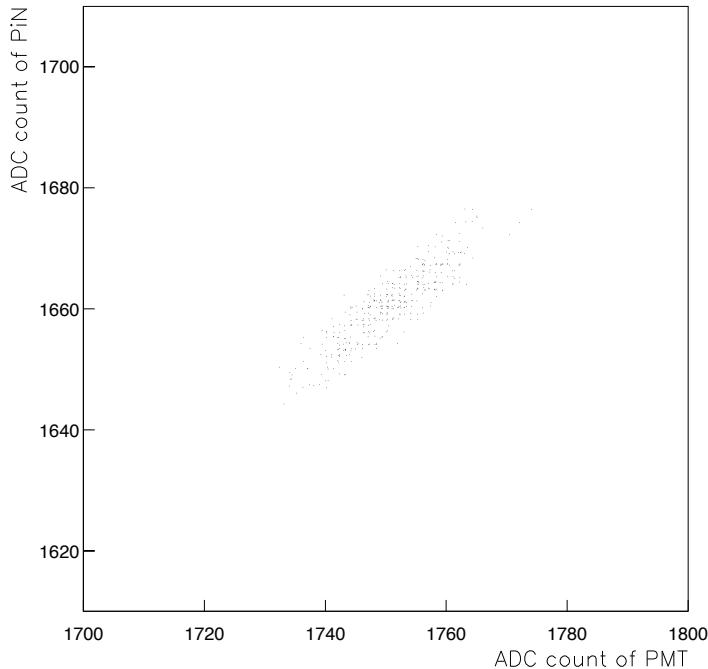


図 3.4: 光源をみたときの光電子増倍管と PiN フォトダイオードの出力の相関。横軸が光電子増倍管の出力の ADC 値。縦軸が PiN フォトダイオードの出力の ADC 値。

る。われわれは、この相関をもちいて、光量変動の補正をおこなった。図 3.5 の点線は図 3.4 を光電子増倍管の方 (図中の横軸) に、射影したもので、補正前の ADC 分布である。実線が、その PiN フォトダイオードによる補正後の ADC 分布である。標準偏差を平均値で割って得られる、相対的な標準偏差は、それぞれ 0.0056、0.0019 であり、補正により、2.9 倍精度良く、分布の平均値が求まることがわかる。いいかえると、同じ精度を $1/2.9$ のデータ量で求めることができ、必要なデータ数の削減、そして測定時間の短縮ができる。

3.4 計測回路

光電子増倍管の線形性試験のための測定範囲は、その出力のピーク電流値で 5mA から 50mA と 10 倍にわたる。また使用した ADC は、ADC 値 500 以下では、われわれの要求する線形性を持っていない。

また、回路の非線形は補正できるとしても、50mA が ADC 値 2000 だとしたとき、5mA で 1 の光量に対応する ADC 値は 50 と非常に小さく、 $\pm 0.2\%$ の精度で線形性の測定をおこなうという点からも ADC のみでの測定は不可能である。

そのため、光電子増倍管からの出力は、減衰器と増幅器に通し、ADC でそ

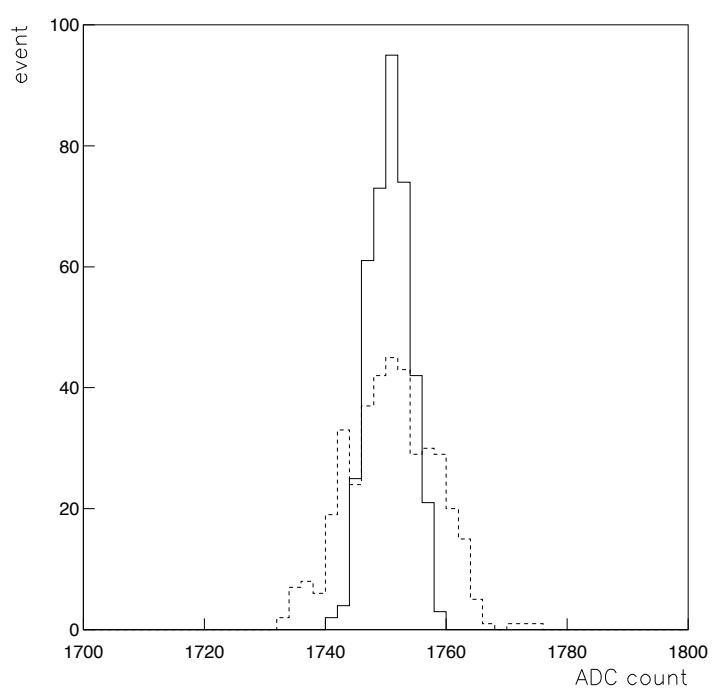


図 3.5: 光電子増倍管の出力の ADC 値の分布
点線は PiN フォトダイオードによる補正前の分布。実線は補正後の分布。

の電荷量を計測することにした。増幅器の出力が 2V 以下という仕様に制限があるため、増幅器は減衰器のあとにおいた。測定中、ADC 値が 600 以下の場合は、減衰器の減衰率を 10dB 落して、観測する ADC 値を 1800 付近にもっていくように制御した。これにより、ADC を ADC 値 600 以上の範囲で使用した。これらの計測回路の選定には、(1) ノイズが少ない、(2) 非線形性が小さい、(3) コンピューター制御が可能、の三つの条件によった。

使用した減衰器、増幅器、ADC の性能は以下の表にまとめておく。

型名	Programable Attenuator (SANYU SWITCH 社)
減衰率	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB
特徴	TTL で制御可能

表 3.3: 減衰器の仕様

型名	2249W (LeCroy 社)
入力	AC coupled
計測範囲	-512 pC (0.25 pC/count)

表 3.4: ADC の仕様

型名	MODEL 775 Octal Fast Bipolar Amplifier (Phillips 社)
入力	AC coupled
増幅率	10

表 3.5: 増幅器の仕様

しかし、これらの組み合わせで構成された測定回路には、非線形性が残ってしまった。これらは、補正によって取り除くことにした。

3.5 測定回路間の相互作用

測定回路は、減衰器を除いて、NIM あるいは CAMAC 規格の多チャンネルのものを使用している。そのため、測定回路間で相互作用がおこる恐れがあ

る。そこで、使用する測定回路のチャンネル間の相互作用（クロストーク）を調べておく。

測定は光電子増倍管の線形性の曲線を利用して行なった。方法は以下のようである。まず、ADC のチャンネル間の相互作用をもとめる場合、ADC 以外の使用する測定回路部分は固定する。そして、チャンネル間の相互作用を調べる ADC チャンネルは固定し、そのチャンネルに影響を与える役割をするシグナルを入力するチャンネルを順次、変えていく。そのときの ADC チャンネルを固定したものから得られる線形性の曲線を調べる。

図 3.6 は、ADC のチャンネル 5 を固定して、別にチャンネル 2、4、6 を使用したときのチャンネル 5 の線形性曲線の一部である。これをみると固定チャンネルの他にチャンネル 4 を使用したときの線形性の曲線（図中の白印）が ADC 値の低いところで他の曲線と 0.2% 程度の開きを持っている。これは、チャンネル間の相互作用と思われる。同様の効果が、チャンネル 6 と 7 などの間にも見られた。使用した ADC の回路図によると、この原因は隣合うチャンネルが同じ集積回路を共有していたことによることがわかった。

使用する増幅器についても同様のことをおこなった。この場合も、線形性曲線を調べるチャンネルは固定し、影響を与えるシグナルを入力する増幅器のチャンネルを順次かえてみた。結果は、図 3.7 でチャンネル間の相互作用は $\pm 0.1\%$ の精度では見られない。

結局、ADC にのみ 0.2% 程度のクロストークが観測された。そのため、この ADC では、使用するチャンネルはとびとびのチャンネル（例えば、偶数番目）を使用することにする。そして、それ以外の回路はすべてのチャンネルを使用する。

3.6 測定回路の非線形性

減衰器、増幅器、ADC で作製された測定回路の非線形性を調べる。

4 : 1 の比を保つために、一定の光量を光電子増倍管がみたときの出力を新たな減衰器で減衰させ、測定回路に入るシグナルのピーク値を変化させようと試みたが、安定した線形性の曲線が得られなかった。

そのため、線形性に優れるといわれるファインメッシュ型光電子増倍管をもちいて、間接的に測定回路の非線形性を調べてみた。図 3.8 がその結果である。あきらかな測定回路による非線形性があらわれている。この非線形性の効果は、測定回路のチャンネルごとに異なっている。そのためチャンネルごとの補正が必要である。

増幅器を取り除いた回路は、経験的に線形性が少ないとわかっていたので²、そこで測定したファインメッシュ型光電子増倍管の線形性曲線（図 3.9）も同時に示しておく。

² 減衰器と ADC のみからなる測定回路で、光電子増倍管の線形性測定の結果が、製造元の浜松フォトニクスによる測定結果とよく一致するチャンネルがあった。しかし、この回路では低い出力ピーク電流値での線形性を測定できないので、この測定回路の採用は却下した。

3.7 ファインメッシュ型光電子増倍管による線形性曲線の補正

前述したように、われわれが作製した線形性測定装置には、計測回路からのものと考えられる非線形成分がある。これは、われわれが行なう光電子増倍管の線形性測定に大きな影響をおよぼす。

そこで、われわれが使用しているファインメッシュ型光電子増倍管が、十分な線形性を有していると仮定し、そのファインメッシュ型光電子増倍管の線形性曲線を各チャンネルで測定したときの非線形成分を測定装置の非線形性であるとする。

計測回路の非線形性は、一般に図3.8のような形をしている。これは、一次関数

$$(Deviation) = A \times (PulseHeight) + B$$

で、フィットできる。ここで、ファインメッシュ型光電子増倍管が線形である、つまり本来は $(Deviation) = 1.0$ であるという仮定のもとで、そのぞれのを、検査する $3/4"$ の光電子増倍管にも補正として適用した。われわれは、すべてのチャンネルについて、その非線形性を求め、補正因子を得た。

図3.10、3.11は、それぞれ補正前、補正後の線形性曲線である。図3.10中の、黒丸はチャンネル3で測定した $3/4"$ の光電子増倍管の補正前の線形性曲線で、黒の四角はチャンネル4で測定した同じ光電子増倍管の線形性曲線である。また、同じ図中の白抜きの印はそれぞれのチャンネルの非線形性の曲線である。そして図3.11は、補正曲線によって、補正された後の光電子増倍管の線形性曲線である。異なるチャンネルで測定された線形性曲線は、同じ光電子増倍管を測定しても、チャンネルごとの非線形成分が異なるため違った曲線を描いている。しかし、補正すると、同一の曲線を描くことがわかる。これは、間接的にこの補正方法が正しいことも示唆している。

3.8 測定における光電子増倍管の安定性

一般に光電子増倍管は、高電圧がかけられてから安定な動作が得られるまで、すくなくとも 10 時間はかかるといわれている。この不安定性が、線形性測定に影響をおよぼすと、検査予定の光電子増倍管は測定前に長時間、高電圧をかけて安置しておく必要が生じる。図3.12は、高電圧をかけてから直後(黒丸)、2時間後(黒四角)、7時間後(黒三角)の光電子増倍管の線形性曲線である。もちろん、使用した光電子増倍管は、高電圧をかける前には、数日間使用していないものである。これら3曲線に違いは見られない。また、それぞれのデータをみても高電圧をかけてからすぐのものの方が、データの分布の幅が広いという傾向も見られなかった

つまり、われわれの測定においては、高電圧の印加による光電子増倍管の不安定性の影響はないと考えてよい。

3.9 測定データの取り方とデータ数の決定

線形性の測定では、各ピーク電流値に対して、1の光、4の光それにペデスターの3種類のADC値のピーク値を求めて、4と1の比を計算する。それらのデータをどの程度の量またはどのようにとれば、4と1の比が十分な精度で求まるかを知る必要がある。

そこで、次のようなことを行なってみた。光量を一定(光電子増倍管の出力ピーク電流値でおよそ20mA)にし、長時間データを取り続ける。そして、そのデータを実際の線形性の測定のように、1と4とペデスターにわけて、4と1の比を計算する。このとき光量調整のフィルターの移動時間も考慮する。いくつもその比を求め、得られた多数の比の分布の標準偏差を求める。このとき、この標準偏差は比の決定精度を意味する。4や1のデータ量を50個から800個までの場合を計算し、また同じデータ数でも一度に取らずに、分散して取った場合³も考えてみた。図3.9はその結果である。横軸は合計のデータ量で、縦軸は比の分布の標準偏差である。プロットの印によって、データを一度に取る(黒丸)、二度にわける(白丸)、四度にわける(黒四角)場合などとなっている。

この図からわかることは、まず同じデータ量でも、分けてとった方が、しかもなるべく多くに分散して取った方が、良い精度で4:1の比が求まるということである。また、分散してとると、4:1の比の精度はあまりデータ量によらなくなるということである。これらの結果は、光源の変動が、PiNフォトダイオードによる補正でも十分に落しきれていないことを示している。実際、PiNフォトダイオードによる光量の補正後の光電子増倍管の出力の時間変動は、時間とともに減少傾向を示している。減少の割合は、およそ1時間で3.0%であった。この減少の原因としては、液体染料の劣化によりその放射光に対する透過率が悪くなり、見る方向によって、受ける光量の変化が異なるからであると考えられる。このためにデータは、分けて取った方が、4:1の比が精度良く求まるのである。また、図3.9で一度にデータを取ったとき、データ量が増大しても比の測定精度が良くならず、かえって悪くなるのはこの原因のために4や1のデータの分布が広がり、精度良くそのピーク値が求められないためである。

とにかく、線形性の測定では、データは分散させて、とることにする。しかし、分散させ過ぎると、4と1の光を作るフィルターの移動時間(一回の移動時間約2秒)ばかりかかるので、データ数は、50個ずつに分散させて取ることにする。

³たとえば、400個のデータで4や1のときのピーク値を求める場合を考える。一度に1を400個測定し、次に4を400個測定する方法の他に、1を200個、次に4を200個、また1を200個、最後に4を200個測定し、合計で1を400個、4を400個取る方法がある。

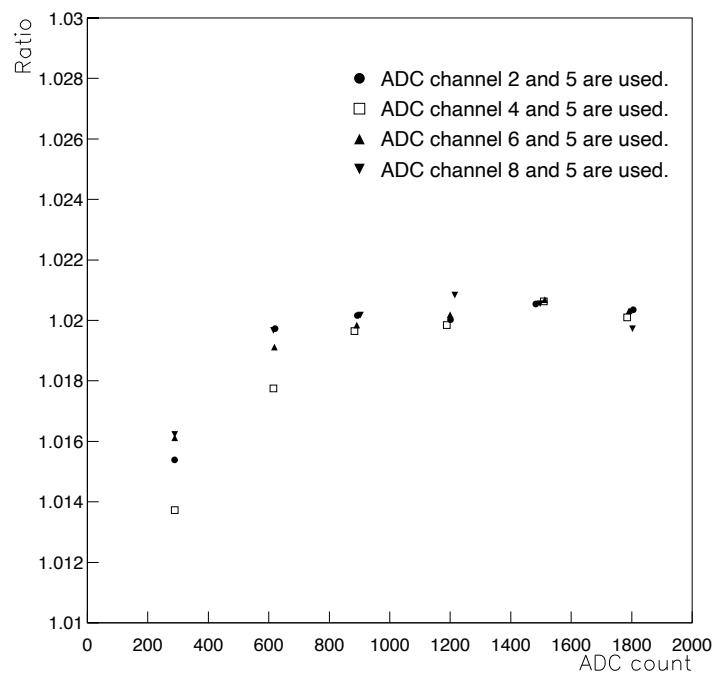


図 3.6: ADC のチャンネル間クロストーク
比の値が、1 から大きく離れているのは、規格化がなされていないため。

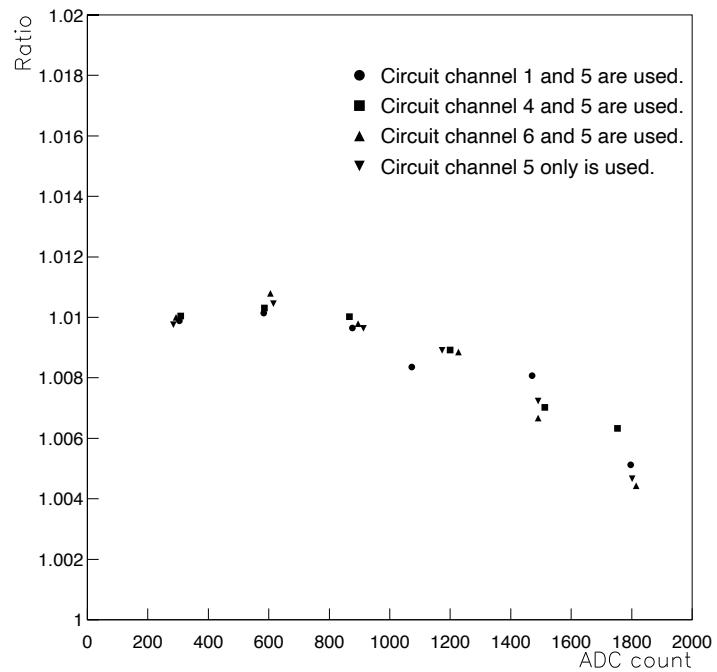


図 3.7: 増幅器のチャンネル間クロストーク

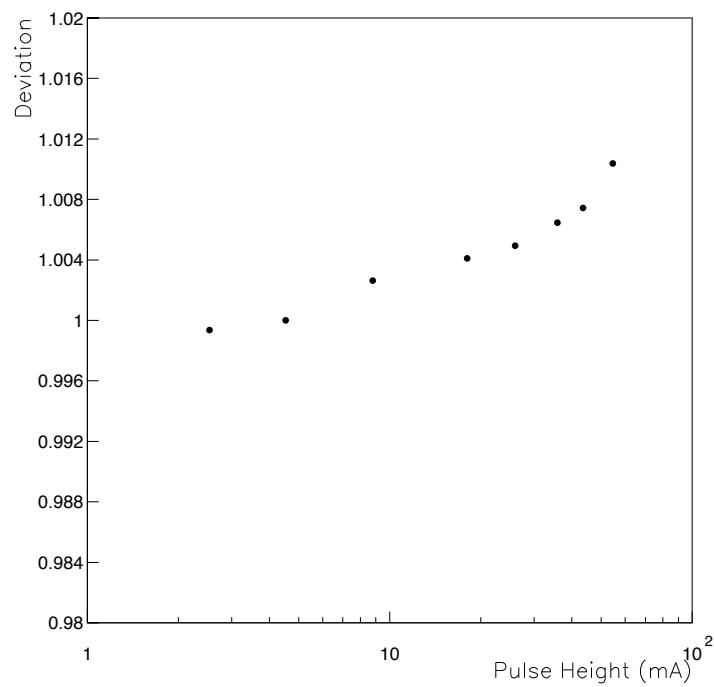


図 3.8: ファインメッシュ型光電子増倍管による測定回路の非線形性の測定（測定回路：減衰器、増幅器、ADC）

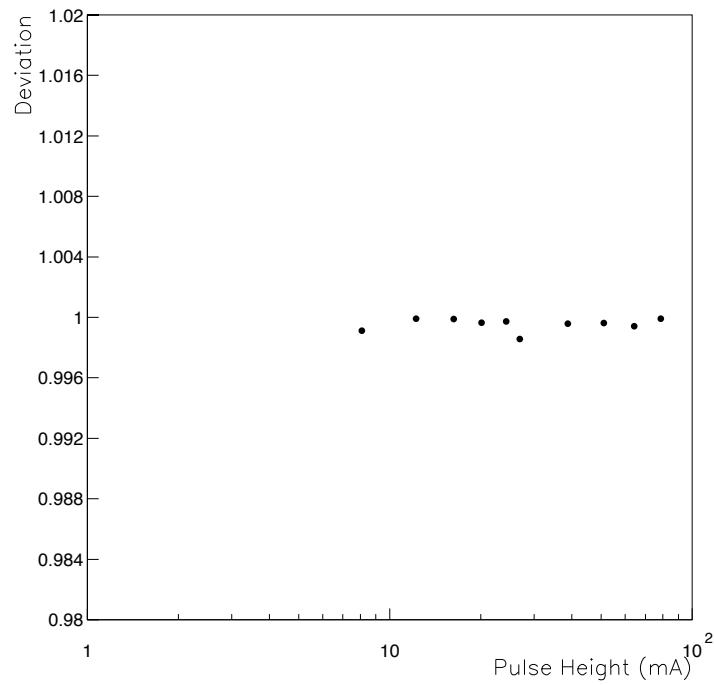


図 3.9: ファインメッシュ型光電子増倍管の線形性（測定回路：減衰器、ADC）

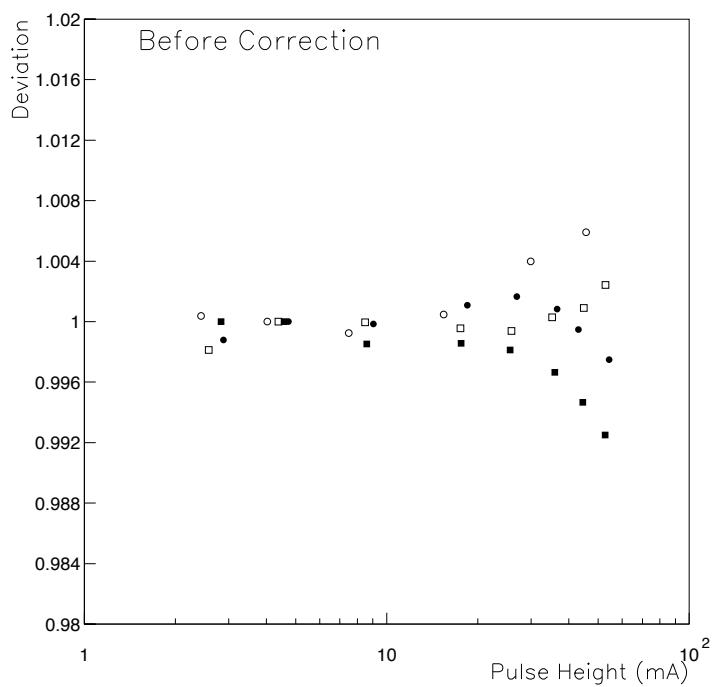


図 3.10: ファインメッシュ型光電子増倍管による補正前の線形性曲線

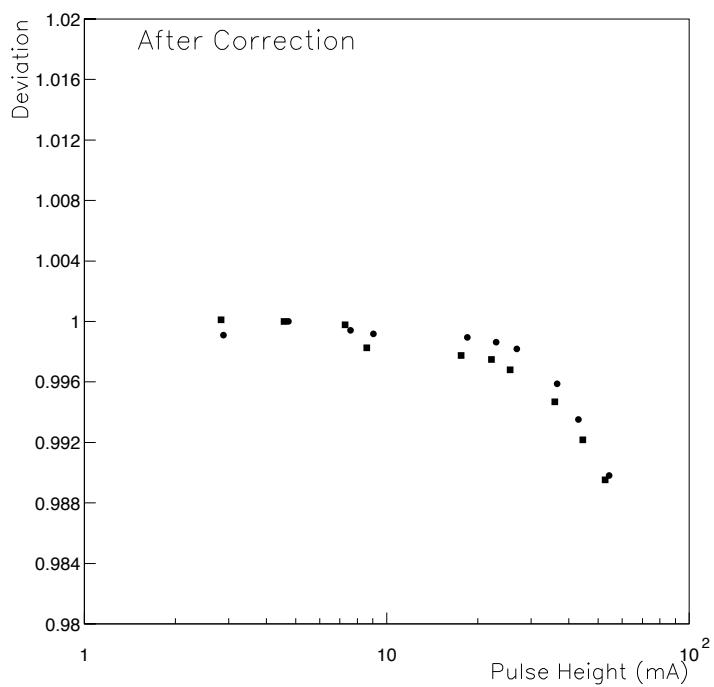
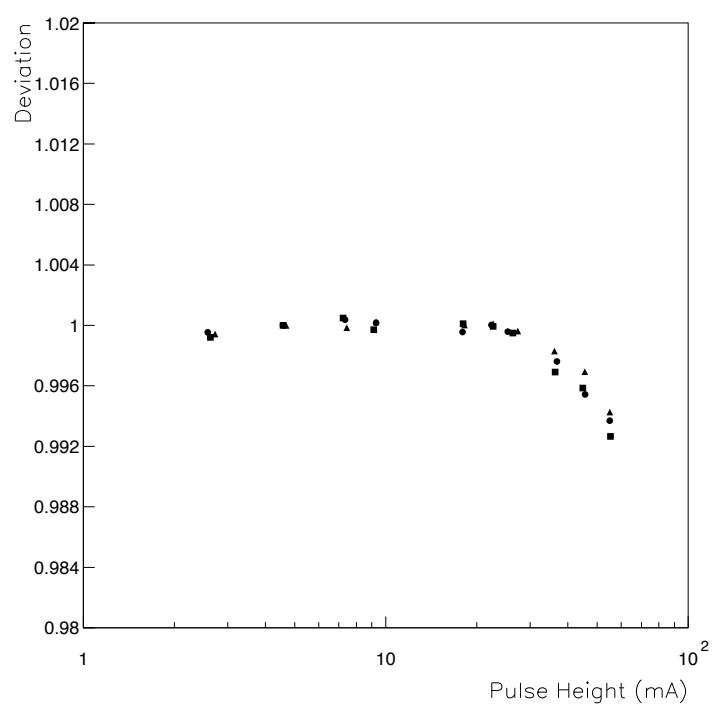


図 3.11: ファインメッシュ型光電子増倍管による補正後の線形性曲線



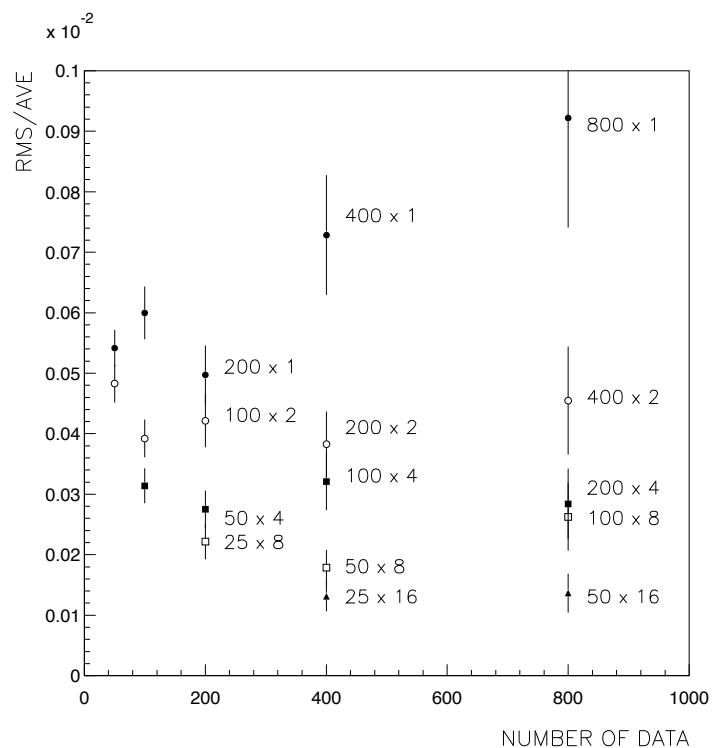


図 3.13: データの取り方とそのとき求まる 4 : 1 の比の精度

データの取り方。黒丸:一度に取る、白丸:二度に分けてとる、黒四角:四度に分けてとる、白四角:八度に分けてとる、黒三角:十六度に分けてとる。また、プロットの横の数字は、データの取り方をあらわしていて、例えば、 400×2 は 400 個ずつのデータを 2 回にわけて取ることを意味する。

第4章

線形性測定装置の評価

第3章で作製した測定装置をもちいて、光電子増倍管の測定をおこなう。この章では作製された装置の評価をおこなう。

4.1 再現性

線形性の測定をおこなう場合、その再現性は重要である。十分なデータ量で測定しているにもかかわらず、再現性がわるいと、系統的な要因が考えられ、何を測定しているか分からぬ。図4.1は、同じ光電子増倍管を同じ条件で、10日間にわたって、測定したものである。この間には、光電子増倍管のそのベース¹からの取り外しもおこなってある。結果はおよそ±0.2%の中におさまっている。

4.2 4:1の光量比への依存性

線形性測定のためには、線形性測定の原理の項でも述べたように、4:1の光量の比を保った2種類の光量が必要である。われわれの装置では、異なる透過率をもったフィルターをもちいて、4:1に対応する光量を得ている。

われわれの装置でのこの4:1に対応する光量の比は、3.78:1であり、4:1とは正確には異なる。そこで4:1の比の光量から得られる線形性曲線と3.78:1の比の光量から得られるそれとの間にどれだけの差が、生じるかを調べておく必要がある。

われわれのフィルターをもちいた方法では、あくまでも4:1の比の光量を作ることはできない。そこでフィルターで作れる4:1に近い別の値4.26:1を使い、その光量比から得られる線形性曲線と3.78:1の光量比から得られる線形性曲線を比較することにする。

図4.2の白印が3.78:1の光量比で得られた線形性の曲線で、黒印が4.26:1の光量比で得られた線形性の曲線である。これをみると3.26:1と4.26:1の光

¹光電子増倍管の各ダイノードへの電圧配分をおこなう回路。

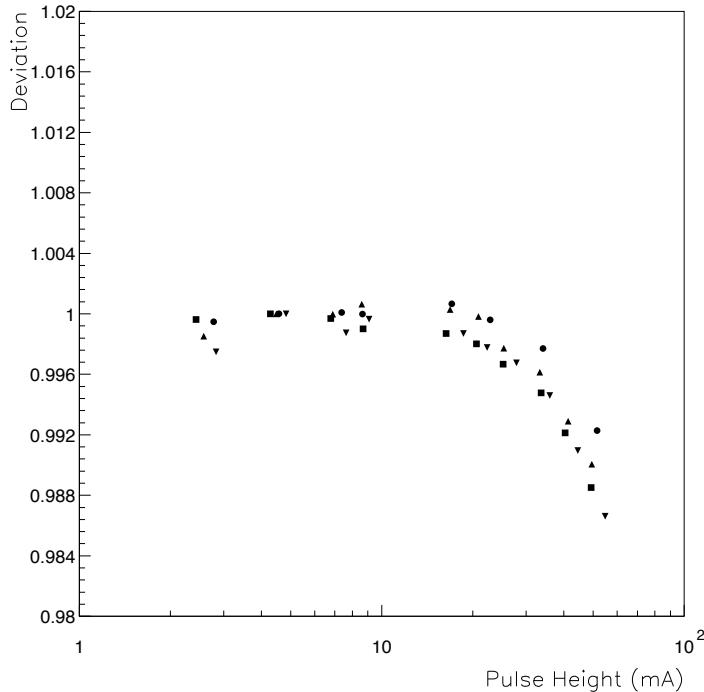


図 4.1: 線形性測定の再現性

量比の違いは、線形性の曲線に 0.1% 以上の差を与えないことが分かる。4:1 の光量比はこれらの間にあるから、われわれが使う光量比で得られる線形性の曲線は 4:1 の光量比で得られる線形性曲線と 0.1% 以内で一致していると思われる。結局、われわれが使用している光量比での線形性の測定は、今回検査をおこなう光電子増倍管に対しては、4:1 の光量比での測定と差はないといえる。

4.3 チャンネルの個体差

2000 本を超える光電子増倍管を測定することができるよう、今回の測定装置は、開発してきた。そのため、測定回路に非線形性が残り、その非線形性は、ファインメッシュ型光電子増倍管によって補正された。しかし各チャンネル間の非線形性が異なるため、補正後の線形性の曲線にチャンネルの個体差が生じるおそれがある。

図 4.3 は、異なる 8 チャンネルで同一の光電子増倍管の線形性を測定したものである。ピーク電流値が大きくなるとともに、各測定間のばらつきが大きくなっている。

チャンネル間のばらつきの標準偏差をもとめたのが、表 4.3 である。表では、各ピーク電流値ごとに、その値を求めてある。チャンネル間のばらつきの測定は全部で、7 本の光電子増倍管に対しておこなったので、表には、その平均が書かれてある。これにより、チャンネル間に、標準偏差で $\pm 0.2\%$ 以下の

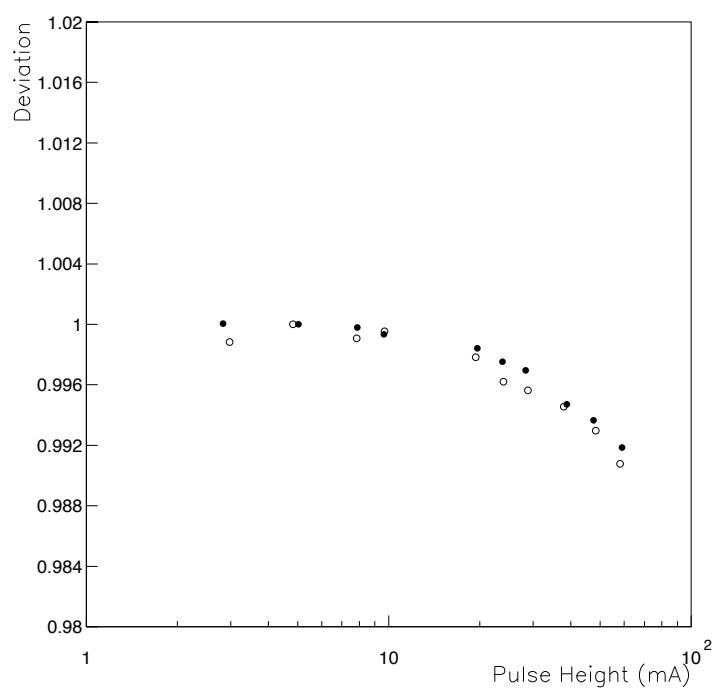


図 4.2: 4 : 1 の比をはさむ 2 種類の異なる光量比で得られる光電子増倍管の線形性曲線。

白印が 3.78:1 の、黒印が 4.26:1 の光量比の光量で線形性の測定をおこなったときに得られた線形性曲線。

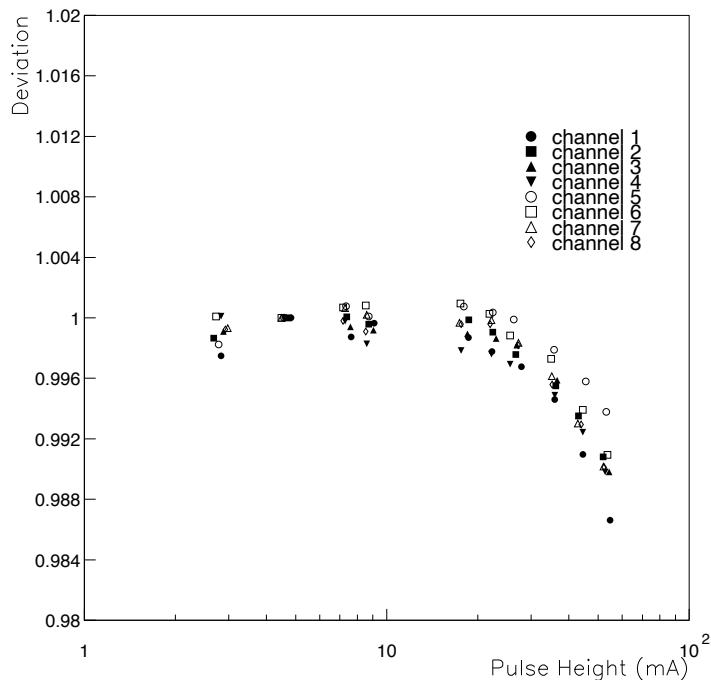


図 4.3: 同一の光電子増倍管の異なるチャンネルでの線形性測定

ばらつきがあることがわかる。また、光電子増倍管ごとのチャンネル間の個体差を比較するとチャンネルごとの傾向が見られた。これは、ファインメッシュ型光電子増倍管による補正が十分になされていないことを示すと思われる。

出力のピーク電流値	ばらつきの標準偏差
10 mA	8.02×10^{-4}
20 mA	1.16×10^{-3}
30 mA	1.23×10^{-3}
40 mA	1.39×10^{-3}
50 mA	1.73×10^{-3}

表 4.1: 光電子増倍管の線形性測定におけるチャンネル間のばらつき

出力のピーク電流値	分布の平均	分布の標準偏差
3 mA	0.9997	9.77×10^{-4}
5 mA	0.9999	9.62×10^{-4}
10 mA	0.9998	1.09×10^{-3}
20 mA	0.9987	1.48×10^{-3}
30 mA	0.9964	1.93×10^{-3}
40 mA	0.9943	2.57×10^{-3}
50 mA	0.9921	3.21×10^{-3}

表 4.2: 3/4" 光電子増倍管の各測定ピーク電流値での偏差の平均とその標準偏差

浜松フォトニクスが、製造した光電子増倍管の 3%を対象におこなったサンプリング調査の結果得られた、光電子増倍管の各ピーク電流値での線形性曲線の比の値の分布の平均と標準偏差の値。

4.4 規格化の点の正当性

われわれの装置でのこれまでの線形性の測定では、規格化の点²に ピーク電流値が 5mA であるときの 4:1 の比をもちいてきた。しかし、この電流値で、光電子増倍管が本当に線形を保っているかどうかわからない。

表 4.4 は、製造元の浜松フォトニクスが、発送する光電子増倍管の 3%について、線形性測定のサンプリング調査をおこなったものの一部(30本)について線形性測定の各ピーク電流値での分布の平均と標準偏差である。これを見ると、ピーク電流値 10mA でも、ほとんどの光電子増倍管が、0.1% 以下の非線形性しか持っていないことがわかる。よって、ピーク電流値 5mA のところでの規格化をおこなっても、光電子増倍管の非線形性 0.5%を見分けるのに大きな影響を与えないと思われる。この表を見る限り、規格化の点が 10mA のところでも良いようだが、そのすぐ上のピーク電流値から非線形成分が大きくなるので、10mA での規格化は望ましくないとした。

4.5 浜松フォトニクスによる線形性測定結果との比較

KTeV 実験用の光電子増倍管の製造を担当している浜松フォトニクスは、製造した光電子増倍管から無作為抽出した 3%のものについて、その線形性を測定している。われわれの測定が、浜松フォトニクスによる測定結果とどの程度一致しているかを見ておくことは、われわれの測定装置の評価のためにも必要である。

² そこでのピーク電流値では、光電子増倍管が線形性を保っているとして、そこでの 4:1 の比の値で他のピーク電流値での線形性の比の値を割る点のこと。

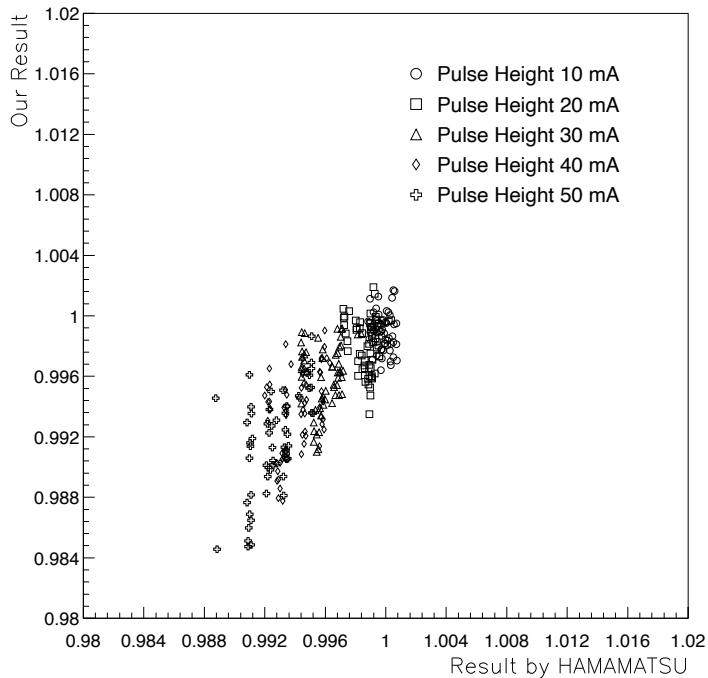


図 4.4: われわれの線形性測定と浜松フォトニクスの測定との相関

合計 12 本の光電子増倍管について、いくつかのチャンネルで線形性の測定をおこなった。各出力ピーク電流値に対する非線形成分を浜松ホトニクスが得た結果と同時に示したのが、図 4.4 である。図中では、各ピーク電流値ごとにプロットの点を変えてある。確かに直線状の相関が見られる。この図の各点において、浜松フォトニクスが得た結果とわれわれが得た結果の差を取ったもの（われわれの結果から浜松フォトニクスのものを差し引いた。）を各ピーク電流ごとに表したものが、図 4.5 である。これをみるとずれの平均値は、どのピーク電流値の場合でも、0.001% 以下であることが、読みとれる。しかし標準偏差は $\pm 0.25\%$ 程度にまでおよぶ。これらは、測定ごとにばらつきはあるが、全体として偏りがないことを示している。

4.6 線形性曲線の増幅率への依存性

実際の光電子増倍管の線形性の検査においては、その増幅率が 2500、5000、7500 の 3 つの場合でおこなう³。そのため最後に、光電子増倍管にかける高電圧をかえて、光電子増倍管の増幅率をさげた場合、線形性曲線がどのように振舞うかを見ておく。

一般には、増幅率を下げるために、印加する高電圧を下げる、光電子増

³これには、低い増幅率の場合でも線形性が良い光電子増倍管を探して、それを pure-CsI 電磁カロリメータの光量の多い部分に使用するという目的がある。

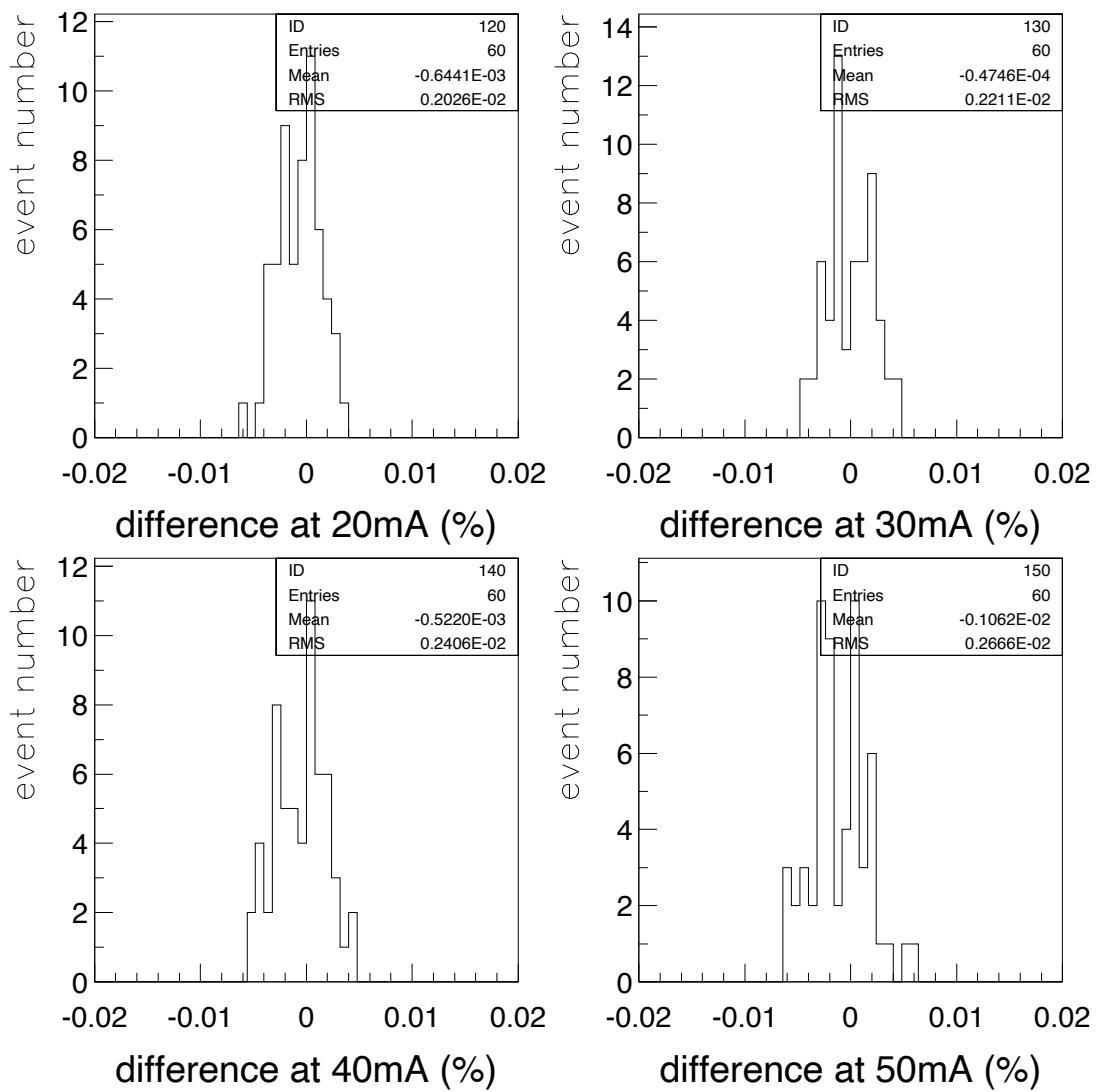


図 4.5: われわれの線形性測定結果の浜松フォトニクスの結果からのずれ

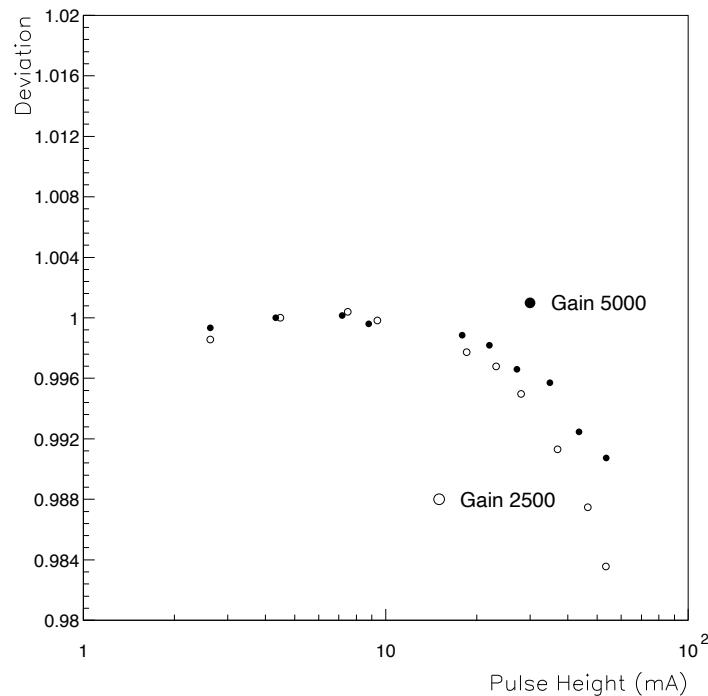


図 4.6: 増幅率を変えた場合の線形性曲線の変化

倍管内で増幅過程の途上にある電子は、互いの空間電荷に打ち勝てなくなり、軌道をはずれる電子が増える。そのため線形性は悪くなる、あるいは悪くなり始める出力ピーク電流が小さくなる。

図 4.6は、光電子増倍管の増幅率が、5000 の場合と 2500 の場合の線形性曲線である。前述した予想のとおり、増幅率がさがると線形性が悪くなっているのが分かる。また、われわれの測定装置でこの効果を見るのが可能であることも分かった。

第 5 章

結論と課題

今回、一度に多数の光電子増倍管の線形性測定をおこなえる装置を開発してきた。一度に複数の測定を行なうという要請は、開発に多くの制限を与えた。しかし、それでもまず第一に精度良く測定ができるることを念頭において、測定回路を選定し、残る回路の非線形性は、補正によって取り除くという方法をとることで、出力ピーク電流値 5mA から 50mA までの線形性の測定を標準偏差で 0.2%程度でおこなえるようになった。

光電子増倍管の線形性の検査で、出力ピーク電流値 30mA で $\pm 0.5\%$ の非線形性をみわける点においては、正確にこの仕様をみたさない光電子増倍管は KTeV 実験で使用しないわけではないので、十分役割を果たせると考えている。

さらなる改良をめざすには、光源の安定とその出力の頻度に課題がのこっているとおもわれる。これらが解決されれば、測定回路の選定が、よりノイズの多い回路にま拡張でき、さらに線形性の小さな回路をえらぶことができるからである。

付録 A

光電子増倍管の基礎知識

A.1 光電子増倍管の原理

光電子増倍管は、光子を観測し、それを電子に変換、增幅することによって、入射光子数に比例した電気信号を得る光検出器である。

光電子増倍管の内部の構造は図 A.1 のように光電面、複数のダイノード（ふつう 9 ~ 14 段）、陽極からなっている。一般には、光電面側に負の高電圧をかけ、陽極側を接地して使用する。そして、これにより各ダイノード間に電子を加速するための電場を形成する。

光電子増倍管は以下のように動作する。まず光電子増倍管に入射してきた光子は、ある確率（量子効率）で光電面から電子（一次電子）をたたき出す。たたき出された電子は、電場により第一ダイノード（Dy1）にむかって加速され、第一ダイノードからさらに多くの電子をたたき出す。続くダイノード（Dy2 ~ Dy8）でこの過程が繰り返され、最終的に陽極に到達するときには、電子数は一次電子に対して 10^6 から 10^7 倍に増幅される。これが陽極電流つまり光電子増倍管の出力となるのである。

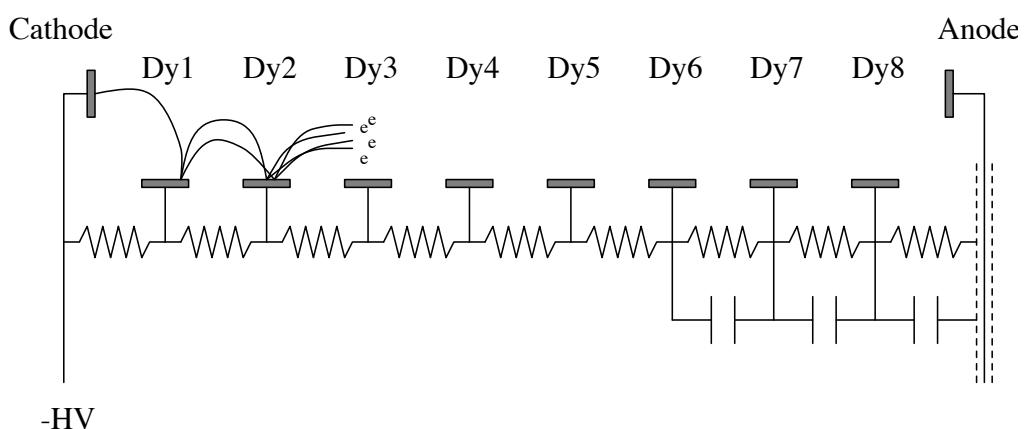


図 A.1: 光電子増倍管の構造図

このように光電子増倍管は、その動作に増幅過程を含むので、弱い光を検出することができる。そのため放射線の計測においては、シンチレーターなどと組み合わせてよくもちいられている。

A.2 光電子増倍管の線形性

光電子増倍管の重要な特性の一つに線形性というものがある。これは光電子増倍管の出力が入射光の強度に比例するという性質である。

しかし一般に、出力の増大にともない、線形性は理想的な比例関係からずれてくる。図 A.2 はこれを表している。横軸は光電子増倍管に入射する光量で縦軸はそのときの光電子増倍管からの出力である。

この非線形性には、次の 2 つの要因が考えられる。

- (1) 増幅過程での多数の電子の供給のため、ダイノード電位を動作電位で一定に保てなくなる。(図中 A の原因)
- (2) 光電子増倍管内の空間電荷の影響により、反発し逃げだす電子ができる。 (図中 B の原因)

これら線形性を崩す要因に対しては、ダイノードへの電流供給のために図 A.1 のように最終段付近にコンデンサーをいれたり、空間電荷に打ちかつ電場が最終段付近のダイノード間に形成されるようにダイノード間の抵抗比を調整する対策がとられる。

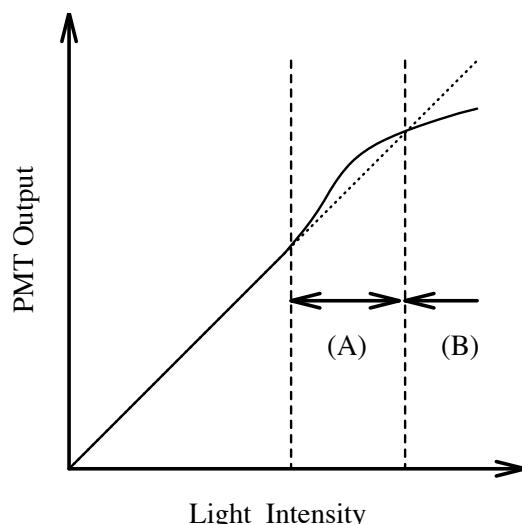


図 A.2: 光電子増倍管の線形性

付録 B

CP 非保存について

B.1 CP 変換

物理学においては、現象の理解の助けのために様々な対称性が、その現象中に見い出されてきた。その対称性の中によく知られたものとして、空間反転変換や荷電共役変換に対する対称性がある。

空間反転変換は、P(パリティ) 変換ともよばれ、三次元空間 (x,y,z) において、その座標の取り方を (-x,-y,-z) とする変換である。荷電共役変換 (C 変換) とは、電荷の反転、つまり電荷の +、- を入れ換える変換であり、粒子、反粒子の入れ換えに相当する。これらの変換は、重力、電磁力、強い相互作用に対しては、その法則を変えない。いいかえると、これらの変換に対して、重力、電磁力、強い相互作用は対称性を持つと考えられている。

CP 変換とは、これら両変換を同時に施す変換である。弱い相互作用は、C 変換、P 変換単独では、対称性をもたないが、この CP 変換に対しては、良い対称性を持つと考えられていた時期があった。

B.2 中性 K 中間子における CP 非保存

CP 対称性は、知られているすべての相互作用で成立すると考えられていた。しかし、1964 年に V.L.Fitch、J.W.Cronin らによって、その対称性が弱い相互作用において破れていることが発見された。

その実験では、CP 変換の固有状態で - と思われていた K 中間子の長寿命成分が、CP 変換の固有状態が + である $\pi^+ \pi^-$ に崩壊したことが発見されたのである。この崩壊は弱い相互作用によって起こっているため、弱い相互作用で CP 対称性が破れていることを示している。

中性 K 中間子系で起こる CP 非保存の現象は、2 つの解釈によって説明される。一つは、間接的 CP 非保存といい、中性 K 中間子の長寿命成分が

$$K_L = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2}}(K_2 + \epsilon K_1)$$

と CP 変換の固有状態が - である K_1 成分をわずかに含み、その K_1 が同じ固有状態の $\pi\pi$ 系に崩壊するというものである。

もう一つは、直接的 CP 非保存といい、 K_2 成分が $\pi\pi$ に崩壊するもので、崩壊時に CP の固有状態を破るという解釈である。

他に準レプトン崩壊でも CP 非保存が観測されている。

上の K_1 、 K_2 は強い相互作用の固有状態 K^0 、 \bar{K}^0 で記述すると、

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

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

と書かれる。そのため K_L は、

$$K_L = \frac{1}{\sqrt{2(1+\epsilon^2)}}((1+\epsilon)K_2 + (1-\epsilon)K_1)$$

となる。

準レプトン崩壊では、 K^0 は $\pi^- l^+ \nu_l$ に、 \bar{K}^0 は $\pi^+ l^- \bar{\nu}_l$ にしか崩壊しない。そのため K_L の $\pi^- l^+ \nu_l$ の崩壊幅と $\pi^+ l^- \bar{\nu}_l$ の崩壊幅の非対称度を測定すれば、 ϵ のおおきさが決定できるのである。

$$\delta_l = \frac{\Gamma(\pi^- l^+ \nu_l) - \Gamma(\pi^+ l^- \bar{\nu}_l)}{\Gamma(\pi^- l^+ \nu_l) + \Gamma(\pi^+ l^- \bar{\nu}_l)} = (0.327 \pm 0.012) \times 10^{-2} \sim 2Re(\epsilon)$$

これら CP 非保存を説明するための理論もいくつか提案されている。

一つは、小林益川理論である。クォークの混合の度合いを表す小林益川行列中に虚数の位相を導入することで、自然に直接的 CP 非保存の存在を予言している。

他の代表的な理論には、超弱理論というものがある。これは、 $S = 2$ の相互作用が CP 非保存を引き起こすとしている。しかし、こちらは K^0 、 \bar{K}^0 の混合による間接的 CP 非保存が存在するだけで、直接的 CP 非保存はないとしている。また中性 K 中間子にしか、この現象は起こらないとしている。

付録 C

KTeV 実験

C.1 KTeV 実験の目指すこと

KTeV 実験は CP 非保存の起源の探索に決着をつけることを目的としている。

以下に KTeV 実験で目指す精度と感度のおもなものを挙げておく。

E832 実験

$$\Delta Re(\varepsilon'/\varepsilon) \quad 10^{-4}$$

E799-II 実験

崩壊過程	現在の値	E779-II
$K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	$< 4.3 \times 10^{-9}$	1×10^{-11}
$K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$	$< 5.1 \times 10^{-9}$	$O(10^{-11})$
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$< 2.2 \times 10^{-4}$	$< 10^{-8}$
$K_L \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$	$(1.7 \pm 0.28) \times 10^{-6}$	10^4 events

C.2 KTeV 実験の検出器

ここでは KTeV 実験の検出器について簡単に説明する。

まず、テバトロンからの運動量 $900 \text{ GeV}/c$ の一次陽子ビームをベリリウム標的に照射し、そこで二次ビームを生成する。この二次ビームは荷電粒子を含むので、磁場に通され荷電粒子を除去する。さらに 2 本の K_L ビームをつくるためにコリメーターに通され、その後 KTeV 検出器に入射される。このときの K_L の運動量は $20\text{-}220 \text{ GeV}/c$ (平均 $70 \text{ GeV}/c$) で、スピル (20 秒) あたり最高 2×10^8 個の K_L が入射する。

図 C.1 は KTeV 検出器の全体図である。この検出器は崩壊領域 (DECAY REGION) と検出器系にわけることができる。

崩壊領域(図中 99m から 159m)は余計な反応を抑えるために、 10^{-4} torr の真空がひかれている。E832 実験ではここに再生物質が設置され、2 本の K_L ビームの 1 本を照射し、 K_S ビームを再生する。 K_L 、 K_S のビームはこの崩壊領域で崩壊し、そして下流に位置する検出器系で、その崩壊過程がとらえられるのである。

以下、おもな検出器を挙げていく。

ドリフト・チェンバー

c1 から c4 に位置する。c2 と c3 の間にある解析用磁石が通過する荷電粒子に $200\text{GeV}/c$ の運動量遷移を与える。それにより荷電粒子は軌道を曲げられる。ドリフト・チェンバーがその軌道を測定することにより K 粒子崩壊で生成する荷電粒子の運動量と崩壊位置を決定する。

遷移輻射検出器 (TRD)

標的から 183m のところに位置する。崩壊で生成した電子と荷電 π 中間子とを精度良く選別する。

pure-CsI 電磁カロリメータ

標的から 186m のところに位置する。電子や光子の検出をおこなう。1%以下のエネルギー分解能と 1mm 以下の位置分解能が期待されている。

光子ベトー用検出器 (CA)

pure-CsI 電磁カロリメータの、中性粒子がぬけるための穴(ビームホール)の周りに設置される。ビームホール付近の pure-CsI 結晶からのエネルギーの漏れによる分解能の低下を防ぐ。

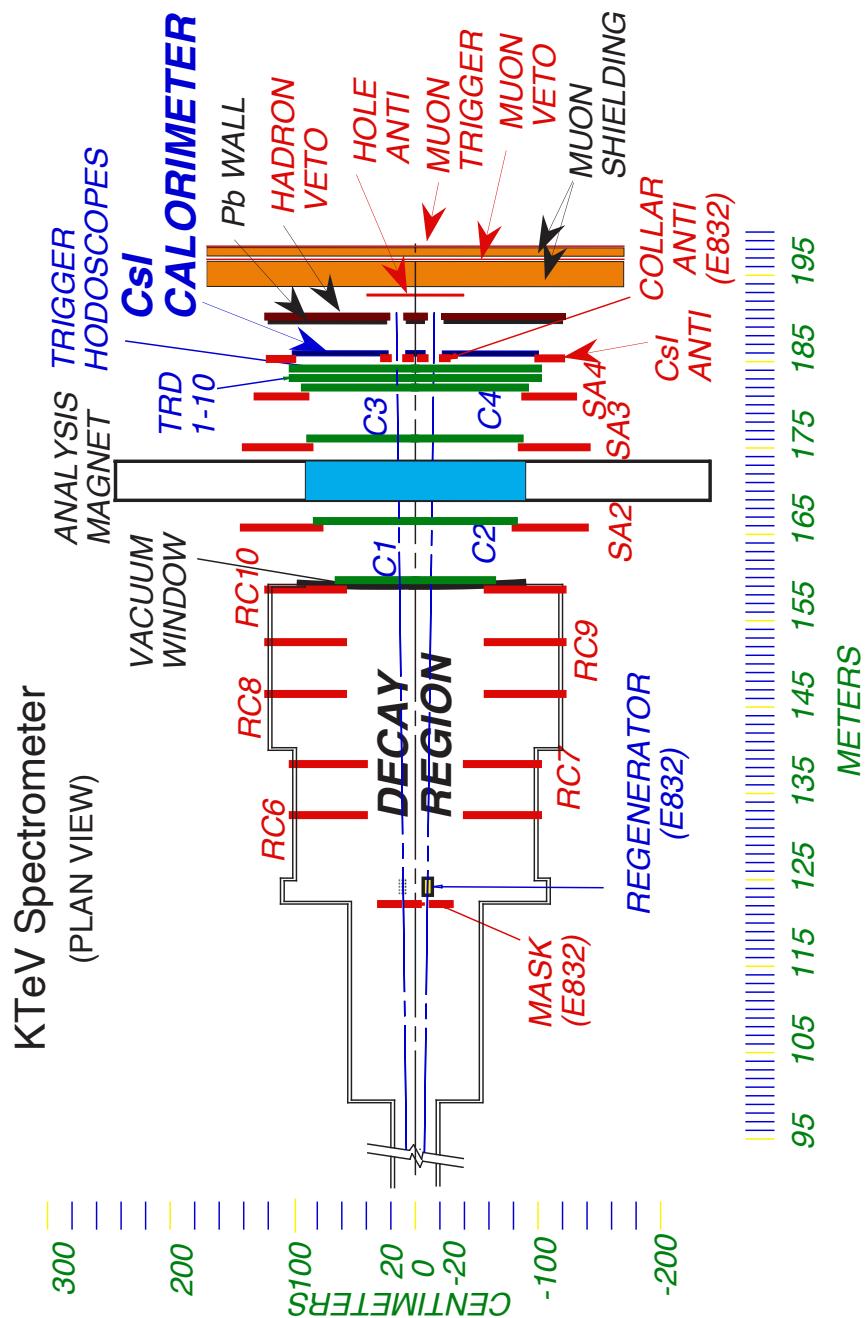


図 C.1: KTeV 実験の検出器