

高エネルギー陽子ビームのための
高時間分解能
チェレンコフビームカウンターの

平成12年度物理学主専攻卒業論文

学籍番号 970340

氏名 坂井 真吾

指導教官 三明 康郎

江角 晋一

目次

第1章 序論

第2章 基本原理

- 2 - 1 飛行時間測定法
- 2 - 2 チェレンコフ光
- 2 - 3 光電子増倍管

第3章 チェレンコフカウンター

- 3 - 1 開発方針
- 3 - 2 放射媒体の形状の原理
- 3 - 3 カウンターの試作

第4章 予備実験

第5章 チェレンコフカウンターの性能評価

- 5 - 1 セットアップ
- 5 - 2 位置の最適化
- 5 - 3 光電子数の見積もり
- 5 - 4 時間分解能の測定

第6章 まとめ

謝辞

参考文献

第 1 章 序論

高エネルギー原子核衝突実験ではおびただしい数の粒子が生成される。衝突後の状態を知るためには生成された粒子を識別する必要がある。実験でもちいられている有効な粒子識別装置としては飛行時間測定器がある。この装置は、一定の距離において設置したスタートカウンターとストップカウンターにより粒子が通過する時間を測定し、その違いによって粒子の識別をおこなうことができる。粒子識別の精度の良さはこの飛行時間測定器の時間分解能の良さにかかってくる。飛行時間測定器の時間分解能はスタートカウンターの時間分解能とストップカウンターの時間分解能に依存し

$$S = \sqrt{S_{start}^2 + S_{stop}^2}$$

であたえられる。したがって飛行時間測定器の時間分解能を向上させるためにはスタートカウンターおよびストップカウンターの時間分解能を向上させる必要がある。

我々の研究室では、飛行時間測定器の時間分解能を向上させるためストップカウンターとして Pestov Spark Counter や TOF Counter などその高時間分解能化を進めている。一方、スタートカウンターの高時間分解能化も必要である。

本研究ではプロトンビームをもちいた衝突実験を想定し、飛行時間測定器にスタートのタイミングをあたえるビームカウンター(スタートカウンター)の開発をおこなった。現在の衝突実験ではビームカウンターとしてシンチレーション光をもちいたシンチレーションカウンタとチェレンコフ光を用いたチェレンコフカウンターがある。シンチレーションカウンターでは時間分解能は40~50 ps程度えられているが、シンチレーション光の特性、すなわち時間応答の遅い成分(燐光、遅発蛍光)があるために、これ以上の時間分解能の向上は難しいといわれている。チェレンコフカウンターはSPSの重イオン衝突において時間分解能30(ps)が得られている。したがって本研究ではチェレンコフ光をもちいてさらなるビームカウンターの時間分解能の向上を目指した。

第2章 基本原理

2 - 1 飛行時間法

原子核、原子核衝突では多くの荷電粒子が生成される。それらを識別する方法として飛行時間法（TOF 法）がある。飛行時間法とは「一定の運動量をもつ粒子が一定の距離を通過するのに要する時間を測定することにより、粒子の速度を知り、それによって粒子のエネルギーを知る。」方法である。

実際の実験においては電磁石をもちいて磁場中の荷電粒子の曲率半径 r を測定し

$$P = qBr \quad (\text{式 1})$$

(p : 運動量、 q : 電荷、 B : 磁場の強さ、 r : 曲率半径)

より荷電粒子の運動量 P を求める。粒子の速度 v は飛行時間測定装置、一定の距離に置いたスタートカウンターとストップカウンターで測定されたそれぞれの通過時刻の差から速度を決める装置、によって求める。求められた P 、 v を用い

$$mc^2 = cp\sqrt{\beta^2 - 1} \quad (\text{式 2})$$

により粒子の質量 m がもとめられ、粒子の種類が決定される。

この飛行時間法による粒子識別能力は、時間測定に用いる検出器の時間分解能によるところが大きい。飛行時間測定器の時間分解能はスタートカウンターの時間分解能

s_{start} とストップカウンターの時間分解能 s_{stop} をもちいて

$$s_{tof} = \sqrt{s_{start} + s_{stop}} \quad (\text{式 3})$$

により与えられる。したがって飛行時間測定器の時間分解能を向上させるにはスタートカウンターおよびストップカウンターの時間分解能の向上が必要である。

2 2 . チェレンコフ光

物質中を通過する荷電粒子の速さ v が、その物質中の光の速さ c/n (c は真空中での光の速さ、 n は物質の屈折率) より大きいとき、粒子の飛跡にそって物質が発する弱い光のことをチェレンコフ光という。特徴は光の性質 (色・強さ) が物質に無関係であることと、図に示すように粒子を頂点とする円錐面にそって光が広がることである。

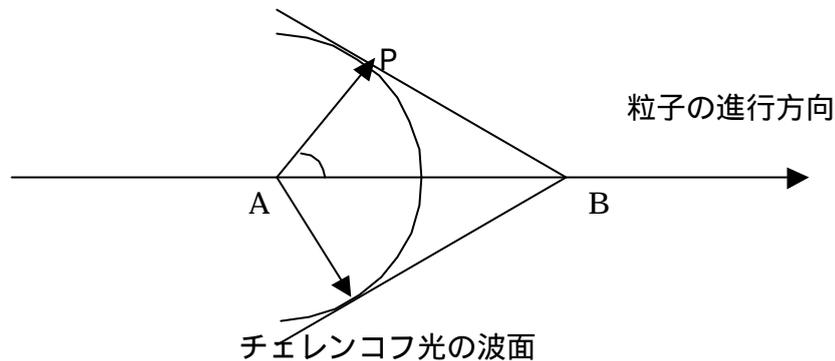


図 (1) チェレンコフ光放射

チェレンコフ光の放射角度 θ_c は

$$\cos \theta_c \equiv \frac{1}{\beta n} \quad (\text{式 4})$$

によって与えられる。これはホイヘンスの波動論によって説明される。今図 () の A~B を荷電粒子が進むとする。このとき飛跡 AB 上の任意の点からでたチェレンコフ光は波面 PB を形成する。任意の時間 t においてチェレンコフ光の進んだ距離 $AP = (c/n) \cdot t$ 、一方粒子の進んだ距離 $AB = v \cdot t$ 。したがって

$$\cos \theta_c = \frac{PB}{AB} = \frac{1}{\beta n} \quad (\text{式 5})$$

粒子飛跡の単位長さあたり発生するチェレンコフ光の量は

$$\frac{dN}{dx} = \frac{q^2 z^2}{r_e m_e c^2} \int \sin^2 \theta_c dE \quad (\text{式 6})$$

ここで $m_e = 0.511003(\text{Mev})$ (電子の質量)

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.817983 \times 10^{-13} \text{ (cm)} \quad \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137} \text{ (微細構造定数)}$$

で与えられる。荷電粒子が物質中を通過するときに、チェレンコフ放射によって失うエネルギーは一般的には電離損失や放射損失に比べてはるかに小さいといわれている。今回の実験では光電子増倍管をもちいてチェレンコフ光を測定する。光電子増倍管で光電子として測定されるチェレンコフ光の数は

$$N_{pe} = L \frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2} \int \mathbf{e}_{coll}(E) \mathbf{e}_{det}(E) \sin^2 \mathbf{q}_c(E) dE \quad (\text{式 7})$$

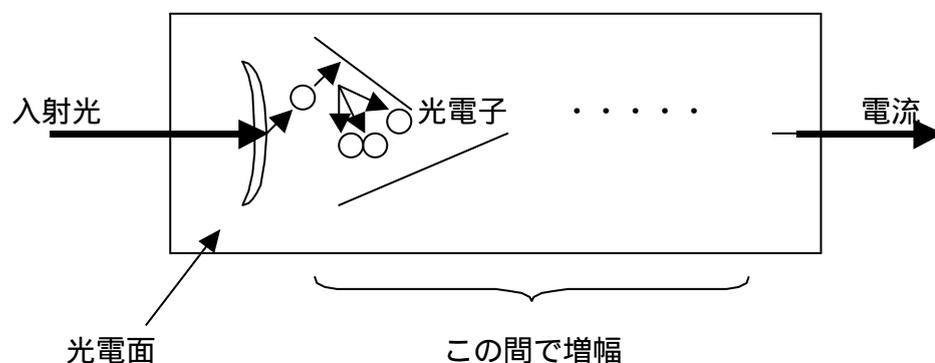
$$= N_0 \times L \times \sin^2 \mathbf{q}_c$$

$$N_0 = \frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2} \int \mathbf{e}_{coll} \mathbf{e}_{det} dE$$

で与えられる。ここで L は荷電粒子が進む長さ、 \mathbf{e}_{det} は光電子増倍管の量子効率、 \mathbf{e}_{coll} はカウンターの集光率を表す。

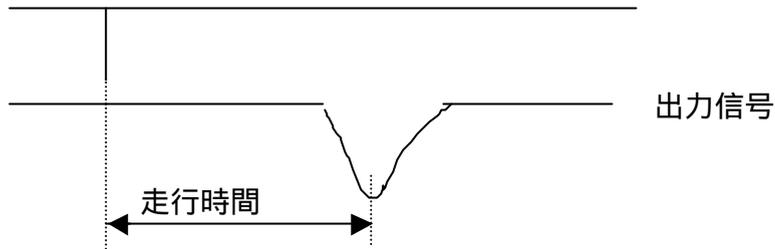
2 - 3 . 光電子増倍管と時間分解能

時間分解能を測定するのに光電子増倍管がもちいられる。光電子増倍管とは、光電効果により光を光電子に変換、増幅し測定可能な電流に変換する装置である。



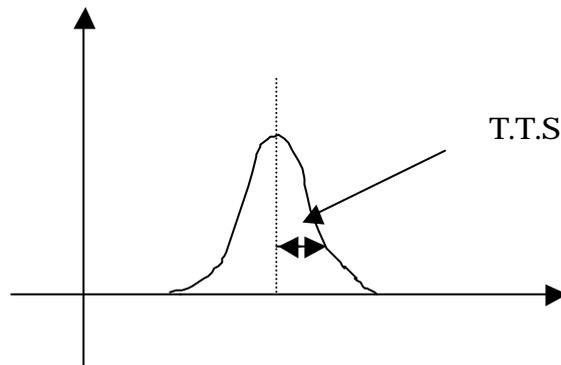
図(2) 光電子増倍管

図(3)に示すように入射光が光電面に達してから電流がピークに達するまでの時間を電子走行時間という。



図(3) 電子走行時間

実際何度か電子走行時間を測定すると完全に同じ値ではなく時間的なひろがりをもつ。



図(4) 電子走行時間の広がり (T.T.S)

その分布の半値幅を電子走行時間の広がり (T.T.S) という。電子走行時間の広がり
の値は光電子増倍管の種類によって異なる。この電子走行時間の広がり
は時間分解能に直接関係するもので、時間分解能 は入射光電子数 N_{pe} と電子走行時間の広がり TTS を
もちいて、

$$s \cong \frac{TTS}{\sqrt{N_{pe}}} \quad (\text{式 } 8)$$

と表される。したがって入射光電子がおおいほど時間分解能はよくなる。

第3章 チェレンコフカウンター

3 - 1 開発方針

陽子ビームを用いた衝突実験ではシンチレーション光を用いたシンチレーションカウンターが使用されている。時間分解能は 40~50(ps)程度得られている。しかしシンチレーション光の特性上これ以上の時間分解能は困難といわれている。そこで本研究においては SPS の重イオン衝突で時間分解能 30(ps)が得られているチェレンコフカウンターの適用を考えた。時間分解能は光電子数 N_{pe} に対して

$$s \propto \frac{1}{\sqrt{N_{pe}}} \quad (\text{式 9})$$

のある関係がある。したがって高時間分解能を得るためにはチェレンコフ光の集光率を高める必要がある。さらに高時間分解能を得るためにはチェレンコフ光の到達時間にはばらつきがないことと、光電子増倍管の特性上光を 1 点に集光して入射する必要がある。本研究では以上 3 つの条件を満たすようなカウンターの構造を考えた。

3 - 2 放射媒体の形状の原理

今回試作したチェレンコフカウンターはチェレンコフ光の集光率をあげるため放射媒体と集光器を一体化した。具体的には放射媒体内で発生したチェレンコフ光を放射媒体と空気の境界面で反射させて集光をおこなう。さらに反射したチェレンコフ光を一点で集光するために媒体の形状に放物線の性質をもちいた。放物線の式は

$$y^2 = 4px \quad (\text{式-10}) \quad (p \text{ は焦点})$$

であらわされ、放物線の軸に平行に入射した光、いいかえれば軸と同じ傾きで入射した光は焦点に集まるという性質をもつ。基本原理「2 - 2 チェレンコフ光」で記したようにチェレンコフ光はある一定の角度で円錐状に放射される。したがって焦点 $(p, 0)$ が原点 $(0, 0)$ にくるようにし、放物線の軸をチェレンコフ光の放射角度と同じだけ回転する。それをさらに x 軸のまわりで 360 度回転させれば円錐状に放射されたチェレンコフ光を 1 点に集めることが可能である。

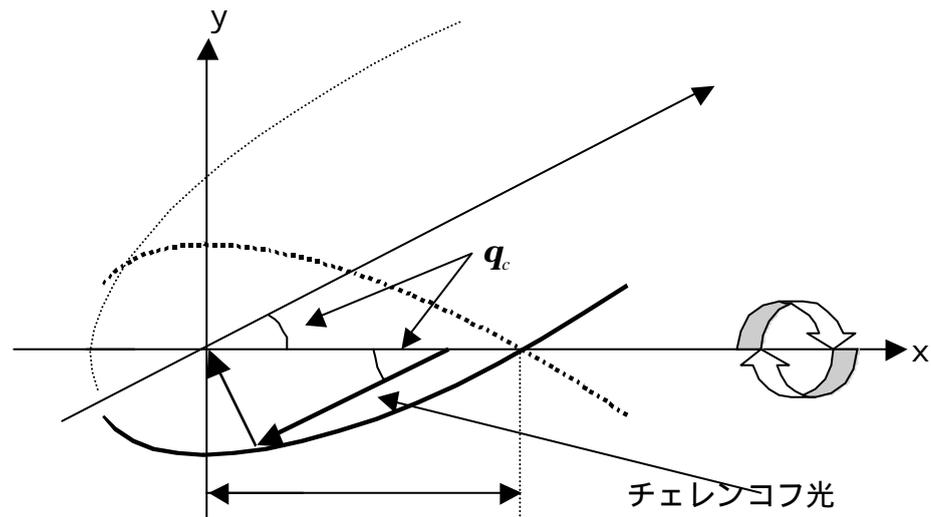
原点が焦点となる放物線の式は

$$y^2 = 4p(x + p) \quad (\text{式 } 11)$$

チェレンコフ光の放射角度を q_c とすれば、(式 11)を原点の周りに q_c 回転した放物線の式は

$$(-x \sin q_c + y \cos q_c)^2 = 4p(x \cos q_c + y \sin q_c + p) \quad (\text{式 } 12)$$

で表される。カウンターを制作するにあたっては $x > 0$ 、 $y < 0$ の領域の部分を x 軸周りの 360 回転した。



図(5) チェレンコフカウンターの原理

3 - 3 カウンターの試作

今回試作したチェレンコフカウンターを図(6)に示す。このカウンターは放射媒体と光電子増倍管が一体となったものである。放射媒体内で発生したチェレンコフ光が媒体の外へ透過するのを防ぐため媒体のまわりにアルミ箔をまき、チェレンコフ光以外の光が光電子増倍管に測定されないようにアルミ箔の上を遮光テープでまいた。放射媒体の形状は(式 11)にしたがう関数である。チェレンコフ光の放射媒体には屈折率が1.5のアクリライトを用いた。放射媒体の波長領域は350nm以上である。光電子増倍管はHAMAMATUのH2483(R2083)を用いた。主な仕様は以下のとおりである。

大きさ・・・2 inch

立ち上がり時間・・・0.7ns

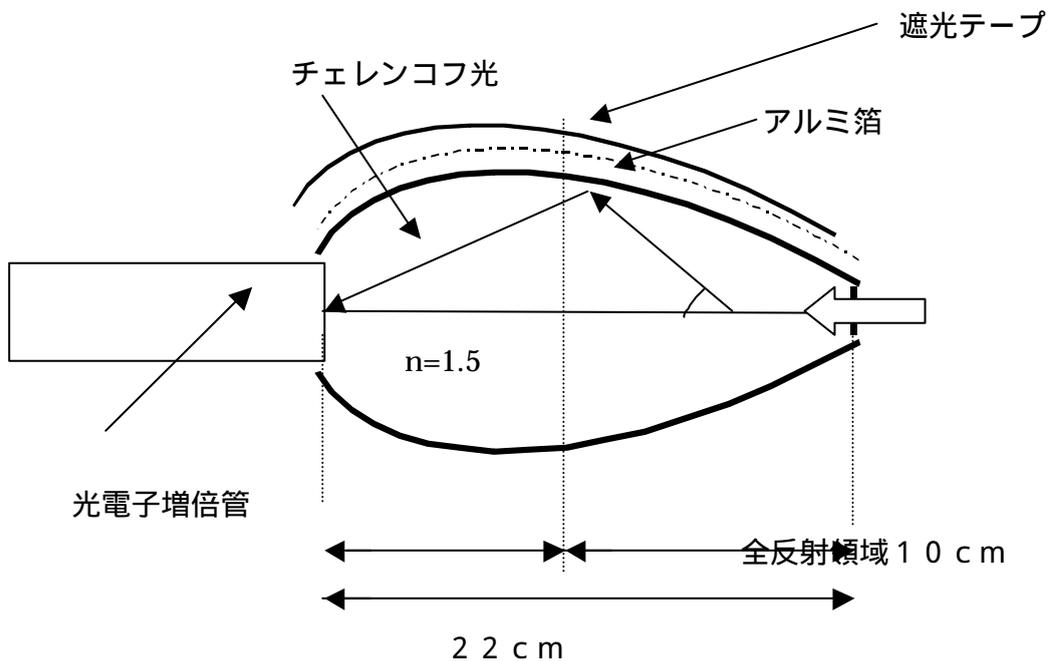
電子走行時間・・・16ns

電子走行時間の広がり・・・370 ps

量子効率・・・~25%

波長領域・・・350nm~650nm

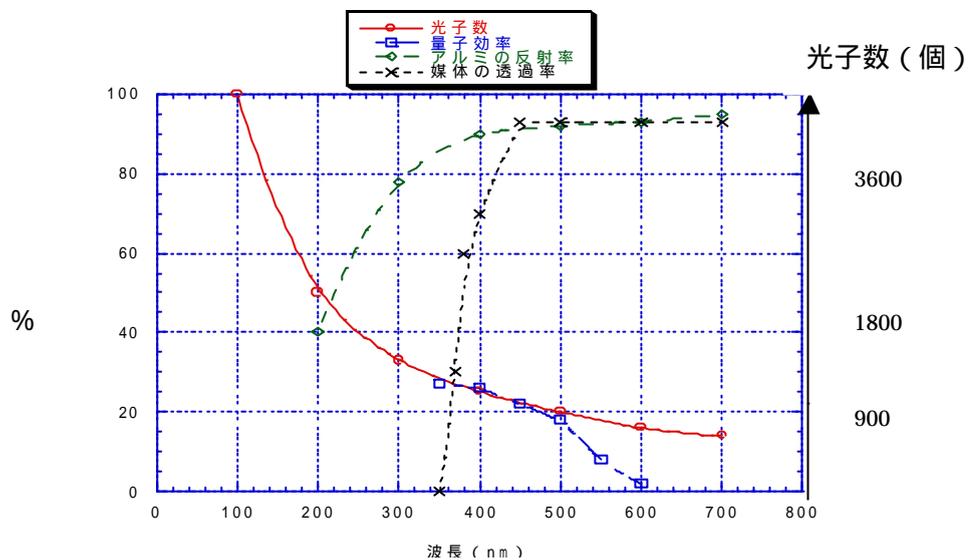
荷電粒子(入射粒子)は2 GeV/cのパイオンビームをもちいる。



図(6) カウンターの形状

したがってこのカウンターの波長感度領域は 350~650(nm)、エネルギー領域としては 1.8 ~ 3.4 (eV)。今回の試作にあたり (式 11) において $p = 3.5$ と決め、長さは 22 cm とした。また荷電粒子の運動エネルギーが 2 GeV/c なのでチェレンコフ光の放射角度 $q_c = 48$ (度)である。チェレンコフ光の光電子増倍管への到達時間は 1.13(ns)~1.14(ns)で到達時間のばらつきは非常に小さい。この形状から期待される光電子数は 730 (個)、時間分解能は 13.7(ps)である。光電子数は以下のようにして見積もった。

今回開発にもちいた光電子増倍管の量子効率、アルミの反射率、媒体の透過率との波長の関係はグラフ (1) のようになる。



グラフ (1)

したがって全反射領域において

$$\int \mathbf{e}_{\text{det}} \mathbf{e}_{\text{coll}} dE = 0.192 \text{ (eV)}$$

その他の領域では

$$\int \mathbf{e}_{\text{det}} \mathbf{e}_{\text{coll}} dE = 0.168 \text{ (eV)}$$

この値を (式 7) 代入して

$$N_{pe} = 730 \text{ (個)}$$

したがって時間分解能は (式 8) に代入して

$$s = 13.7 \text{ (ps)}$$

となる。

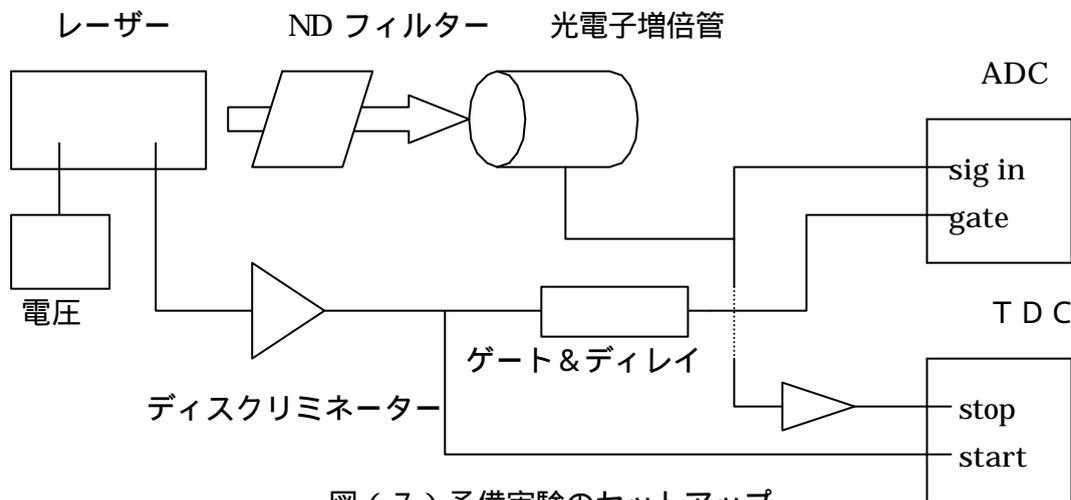
第4章 予備実験

この章では大学の実験室でおこなったチェレンコフカウンターに用いる光電子増倍管の予備実験について述べる。

<目的>

チェレンコフカウンターに用いる光電子増倍管の予備実験をおこう。

<セットアップ>



図(7) 予備実験のセットアップ

<装置>

・レーザー

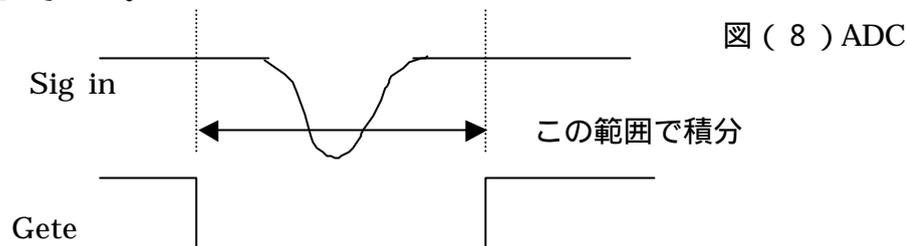
光源としてHAMAMTUのピコ秒ライトパルサーをもちいた。これはレーザーダイオードをもちいた、パルス幅50(ps)以下、パルス繰り返し、単発~2MHzの長短パルス光源である。波長は410nmである。

・TDC (Time to Digital Converter)

装置にスタートの信号が入ってきてからストップ信号が入ってくるまでの時間差を測定する装置。おなじ測定を何度もおこなうとTDCの値は常に一定の値にならずある値のまわりに分布をつくる。この分布をガウス分布で近似したときの分布の広がり()が時間分解能である。

- ・ ADC(Analog to Digital Converter)

電荷量を測定する装置。Sig in に入ってきた出力波形を gate の幅で積分して電荷量を求める。



ADC を用いて電荷量を測定したときの分布をガウスフィットしたときの ADC の平均値 μ と光電子増倍管に入射した光が光電効果によって光電子になる数 N_{pe}

$$m = aN_{pe} \quad (\text{式 } 13)$$

の関係がある。すなわち ADC の平均値 μ と光電子数には比例関係がある。さらにガウスフィットしたときの標準偏差 s のあいだには

$$s = a\sqrt{N_{pe}} \quad (\text{式 } 14)$$

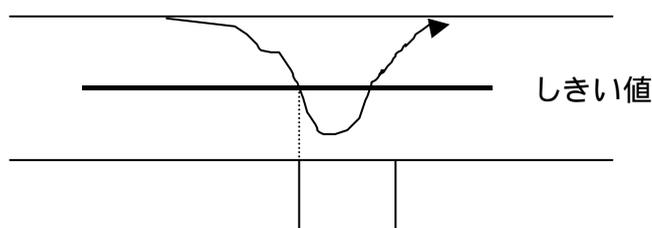
したがって(式 13)(式 14) から光電子数は

$$N_{pe} = \left(\frac{m}{s}\right)^2 \quad (\text{式 } 15)$$

から求まる。

- ・ ディスクリミネーター

あるしきい値(スレッシュホールド)以上のアナログ信号を NIM 信号に変換する装置。



図(9) ディスクリミネーター

・ ND フィルター

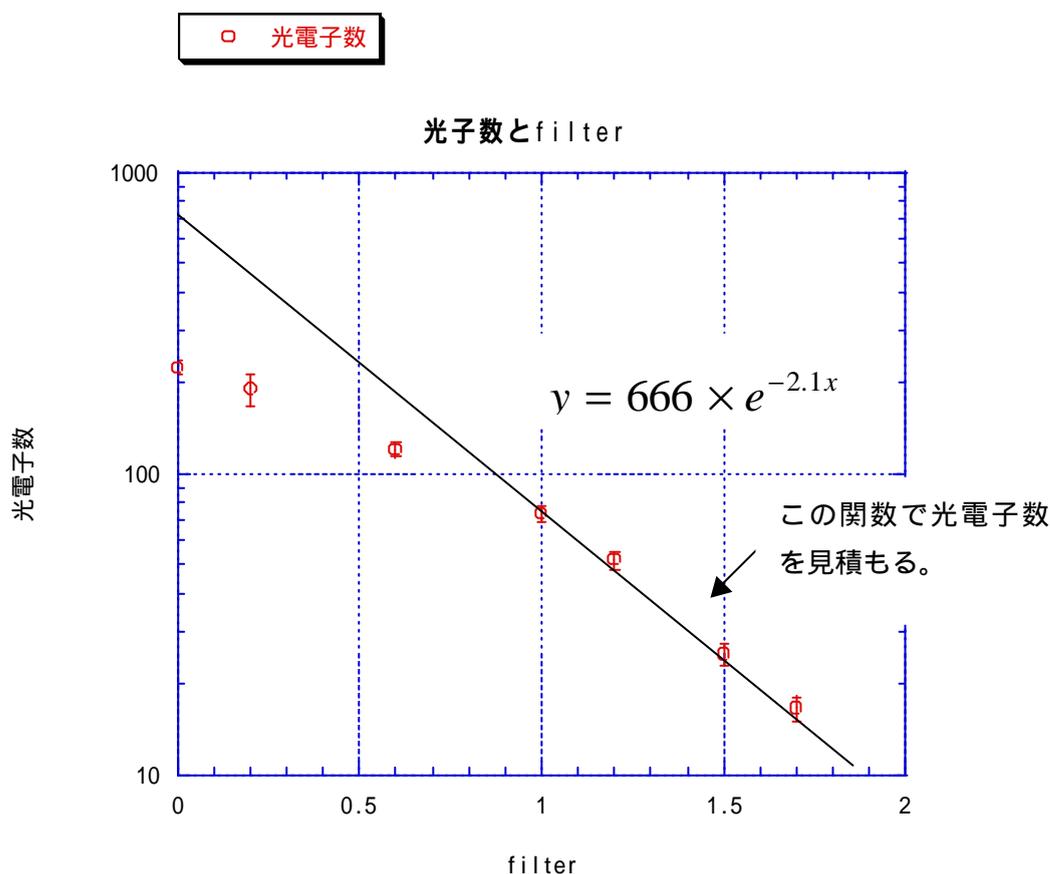
光子数を調整することができる。そのフィルターの光学濃度 OD と光電子数には以下のような関係がある。

$$N_{pe} = a \times 10^{-b \times OD} \quad (\text{式 16})$$

したがってレーザーと光電子増倍管の間に ND フィルターをおくことによってレーザーからくる光子数を調整することができる。

<実験1 フィルターと光電子数の関係>

ND フィルターを光電子増倍管の前に電圧を変化させながら ADC の値を測定し (式 - 15) から光電子を計算した。グラフのプロット点はそれぞれの電圧で得られた光電子数を平均したものである。

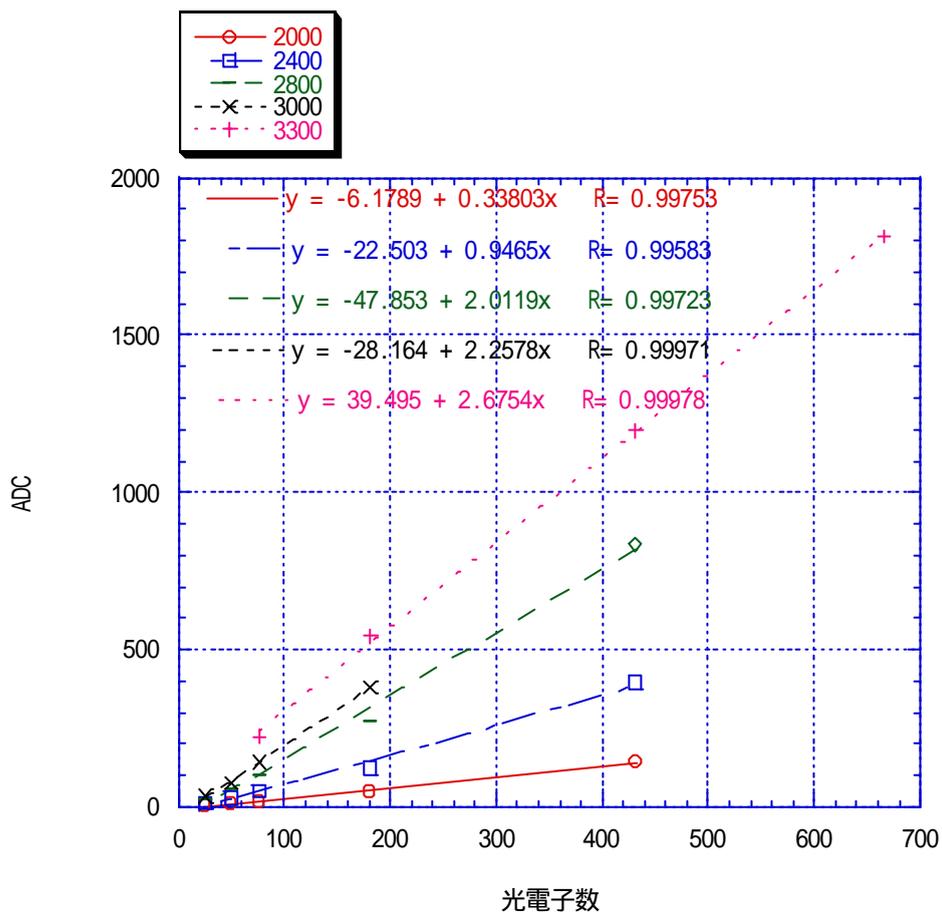


グラフ (2) 光電子数とフィルターの関係

フィルターが 1.0 より少ないところで線形性が失われている。これは光電子増倍管への入射光子数が多すぎたためだと考える。したがって今後はフィルター 1.0 以上のところもちいてフィットした関数で光電子数を見積もることにした。

<実験2 光電子数と ADC の関係>

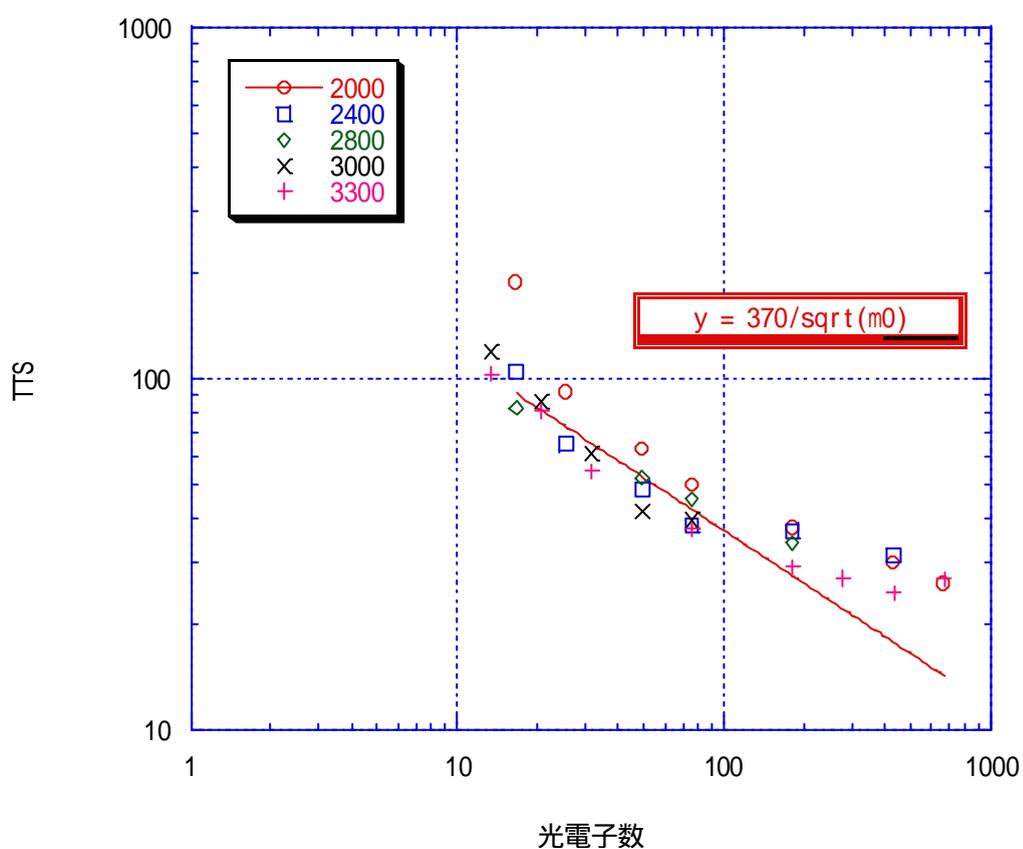
実験1よりNDフィルターと光電子数の関係がわかった。したがってフィルター変えながらADCを測定することによりKEK実験でもちいる光電子増倍管の光電子数とADCの関係がわかる。予備実験では光電子増倍管に電圧を2000V、2400V、2800V、3000V、3300VかけADCと光電子数の関係を調べた。結果をグラフ(3)にしめす。



グラフ(3) 光電子数とADCの関係

<実験3 - 光電子数と時間分解能の関係>

ND フィルターを変えながら電圧 2000V、2400V、2800V、3000V、3300V での TDC 分布を測定することにより光電子数と時間分解能の関係を調べた。結果をグラフ(4)



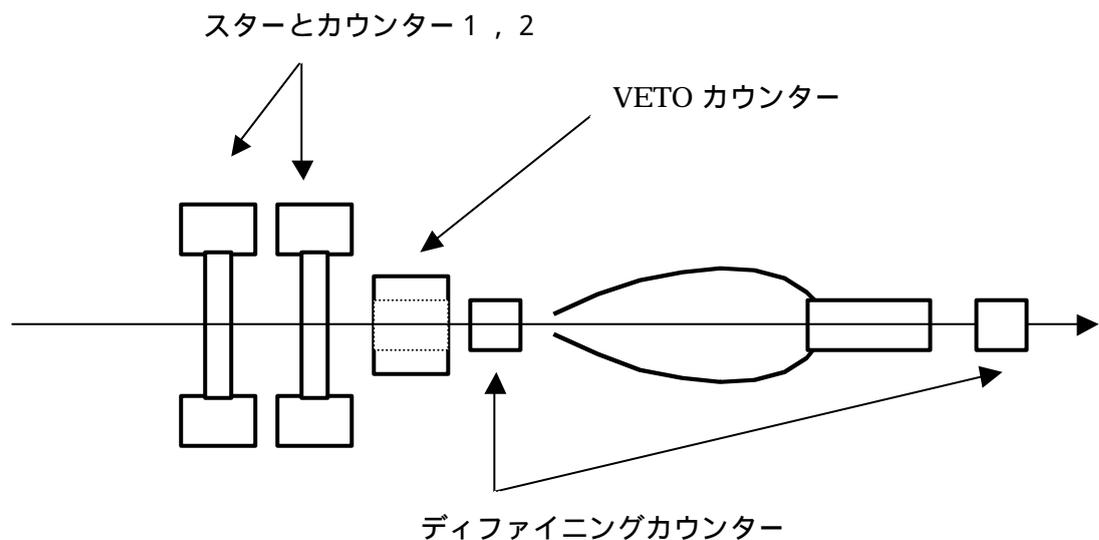
グラフ(4) 光電子数と時間分解能

第5章 チェレンコフカウンターの 性能評価

この章では2000年12月に KEK 東カウンターホールT1 ビームラインでおこなった2 GeV/c のパイ中間子ビームをもちいておこなった新型チェレンコフカウンターの性能評価について述べる。

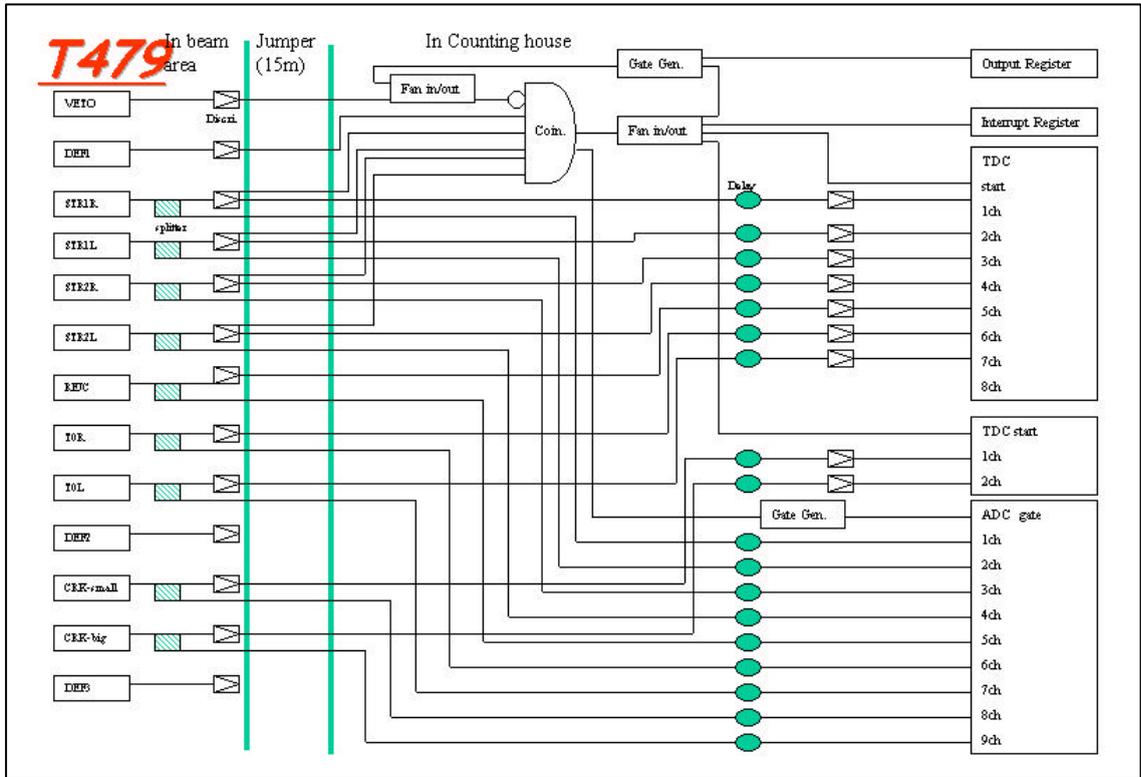
5 - 1 セットアップ

以下にセットアップをしめす。



図(10) セットアップ

今回の性能評価ではチェレンコフカウンターの時間分解能をより正確に測定するために2本のスタートカウンターをもちいることにした。さらにチェレンコフカウンター内の核反応の測定に及ぼす影響を取り除くため実験後半でチェレンコフカウンターの後ろにディファイニングカウンターを置いた。本実験での回路図を次のページにしめす。



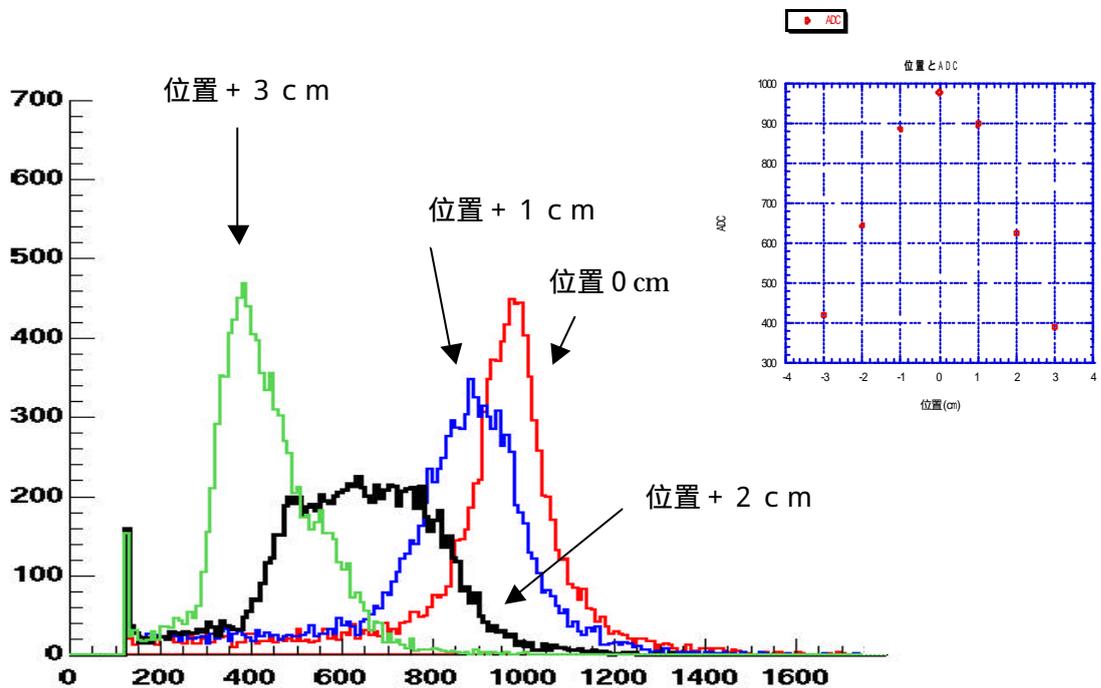
5 - 2 位置の最適化

<目的>

時間分解能は光電子数の平方根に反比例する（式 9）。したがって高時間分解能を得るために光電子数がいちばんおおくえられる位置、すなわち ADC の値がいちばん大きいところを以下のようにして決めた。

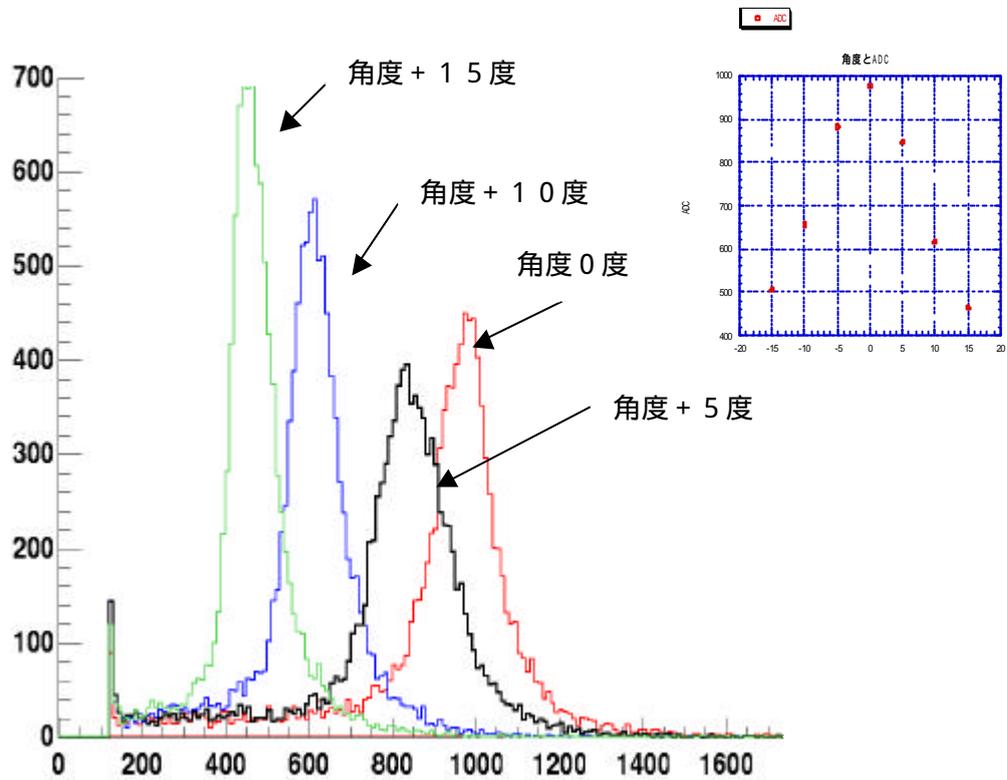
<手順と結果>

まずはじめにチェレンコフカウンターを左右に 1 cm ずつ動かしてそれぞれの位置での ADC の値を測定した。結果をグラフ（5）にしめす。位置が 0 cm（すなわちセットアップ時の状態）でいちばん大きな値が得られている。したがってこの位置でビームがチェレンコフカウンターの中心を貫通していると考えられる。ビームの中心からチェレンコフカウンターが離れると ADC のピークの値はだんだん小さくなっていった。したがってビームの中心から離れると光電子増倍管にチェレンコフ光が集まりにくくなる考える。



グラフ（5）位置と ADC の関係

次にチェレンコフカウンターを位置 0 cm のところにおきチェレンコフカウンターを 5 度ずつ左右に回転させ ADC の測定をおこなった。結果をグラフ (6) にしめす。



グラフ (6) 角度と ADC

この結果角度 0 度 (すなわちセットアップ時の状態) のときいちばん大きい値が得られた。さらにチェレンコフカウンターがビーム軸にたいして傾くと ADC の値が小さくなっていった。(光電子が集まらなくなっていく。) 今後の測定は位置 0 cm、角度 0 度のところで測定をおこなう。

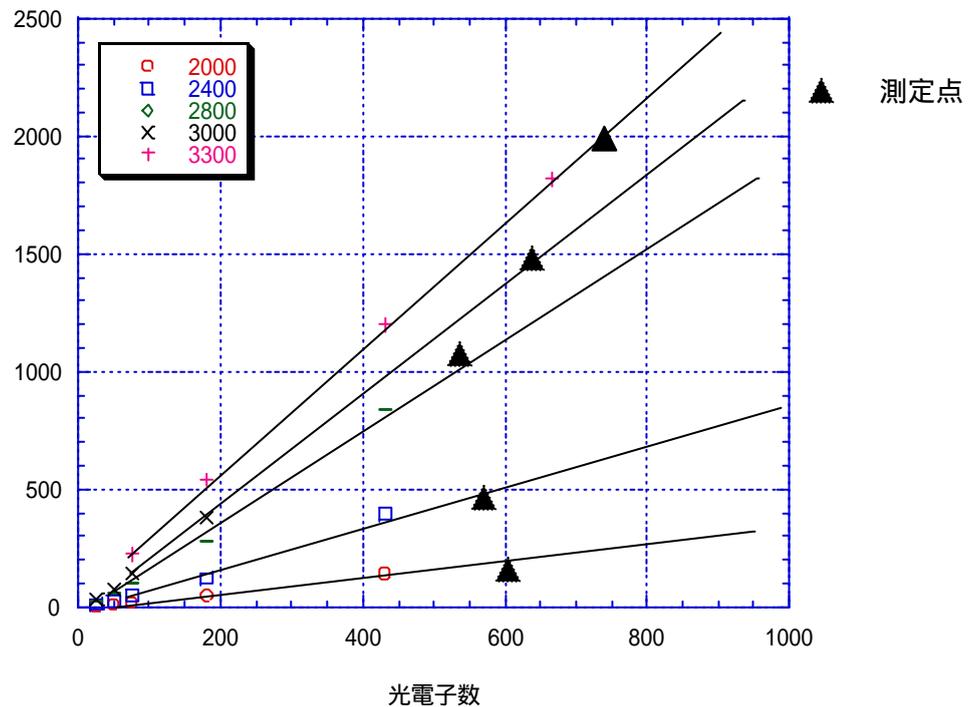
5 - 3 光電子数の見積もり

< 目的 >

光電子数を測定することにより今回開発したカウンターの N_0 を求める。

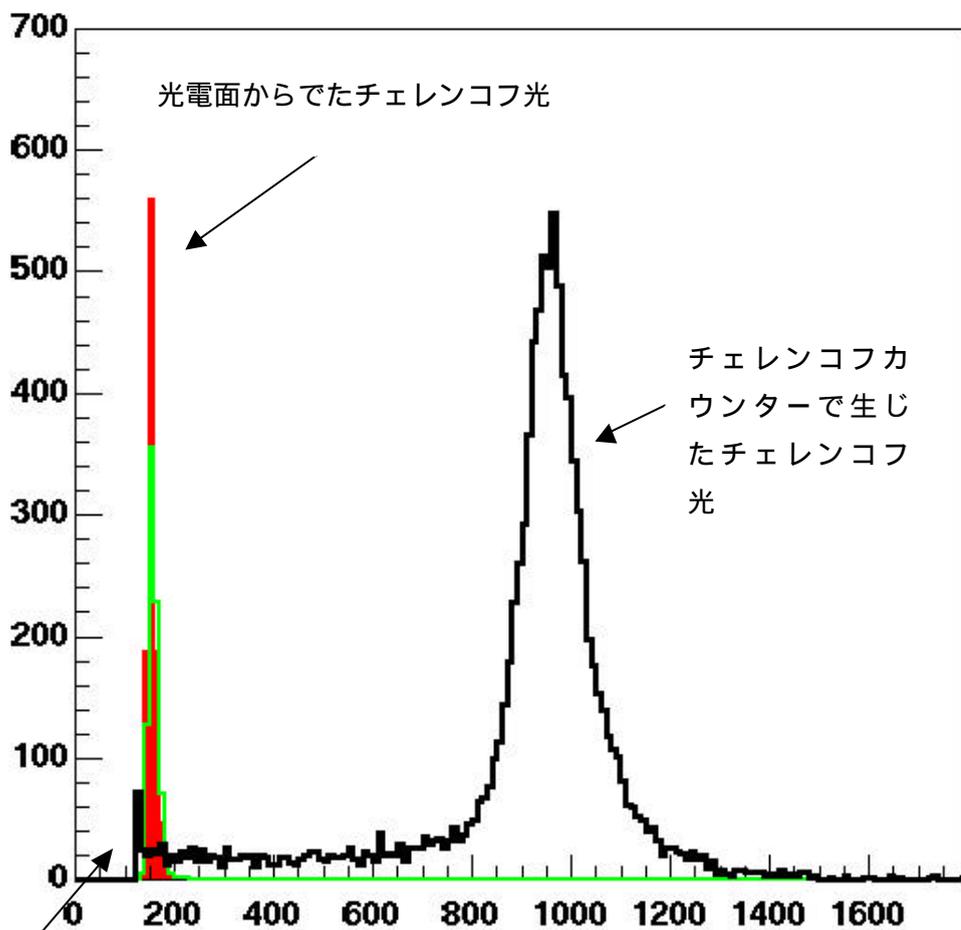
< 手順 >

ADC の平均値と光電子数には比例関係がある。したがってチェレンコフカウンターの ADC を測定することにより光電子数を見積もることができる。今回は第 4 章の予備実験で得られた光電子数と ADC の関係をもちいた (グラフ 3)。ADC の測定は光電子増倍管に電圧を 2000V、2400V、2800V、3000V、3240V をかけおこなった。結果をグラフ (7) にしめす。



グラフ (7) 光電子数と ADC の関係

この結果から光電子数を 620 ± 56 (個) と見積もった。しかしビームが光電子増倍管を貫通していることからこの値には光電子増倍管のガラス面からでるチェレンコフ光の光電子も含まれている。したがって光電子増倍管のガラス面からの光電子数の見積もりをおこなった。測定はビームライン上に遮光した光電子増倍管を置き電圧を 2800 V かけておこなった。ADC 分布をグラフ (8) にしめす。測定の結果ガラス面からのチェレンコフ光の ADC の値は 43.2 (ch) であった。この値からガラス面からの光電子数を 28 (個) と見積もった。したがってこのカウンターから得られた光電子数は 590 ± 56 (個) である。



グラフ (8) チェレンコフカウンターの ADC 分布および光電面からの ADC 分布

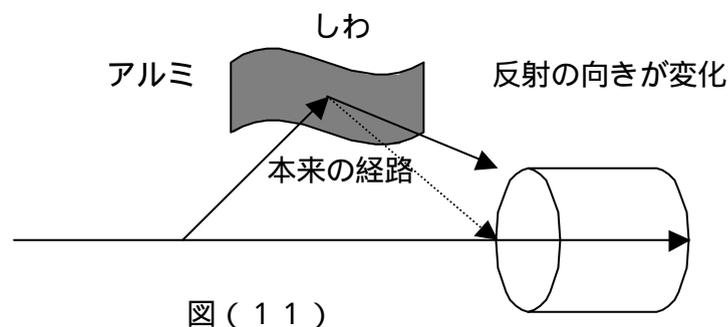
<考察>

- (1) このカウンターから得られた光電子数は 590 ± 56 (個) であった。したがってこのチェレンコフカウンターの N_0 は

$$N_0 = 53.6 \pm 5$$

今後を増やす方法としては波長感度領域(紫外光領域に対して)が広い光電子倍管や放射媒体を用いることが考えられる。

- (2) 実験前の予想ではチェレンコフカウンターから得られる光電子数は730個あった。実際測定に得られた値は 590 ± 56 (個) で予想よりも少なかった。この原因について考えた。1つの原因としてアルミでの集光率が予想より悪かったためだと考える。集光率が低下した原因はアルミをまくさいアルミの面にしわができたためだと考える。そのためチェレンコフ光は予測した反射の向きとは違う方向に反射され光電子増倍管の光電面に到達しなかったと考える。



5 - 4 時間分解能の測定

5 - 4 - 1 時間分解能の解析法

5 - 1 のセットアップから得られるチェレンコフカウンターの時間分解能にはスタートカウンター 1, 2 の時間分解能も含まれている。したがってチェレンコフカウンターのだけの時間分解能を得るために以下のような解析をおこなうことにした。

$$\begin{aligned}\sqrt{s_{ST1}^2 + s_{st2}^2} &= s_{TDC(ST1)-TDC(ST2)} \\ \sqrt{s_{ST1}^2 + s_{CRK}^2} &= s_{TDC(ST1)-TDC(CRK)} \\ \sqrt{s_{ST2}^2 + s_{CRK}^2} &= s_{TDC(ST2)-TDC(CRK)}\end{aligned}\quad (\text{式 } 17)$$

ここで $s_{TDC(ST1)-TDC(ST2)}$ はスタートカウンター 1 の TDC 分布とスタートカウンター 2 の TDC 分布の引き算をしたときの TDC 分布の広がりをである。その他の右辺も同様である。この 3 つの連立方程式を解くことによりチェレンコフカウンターの時間分解能をもとめた。

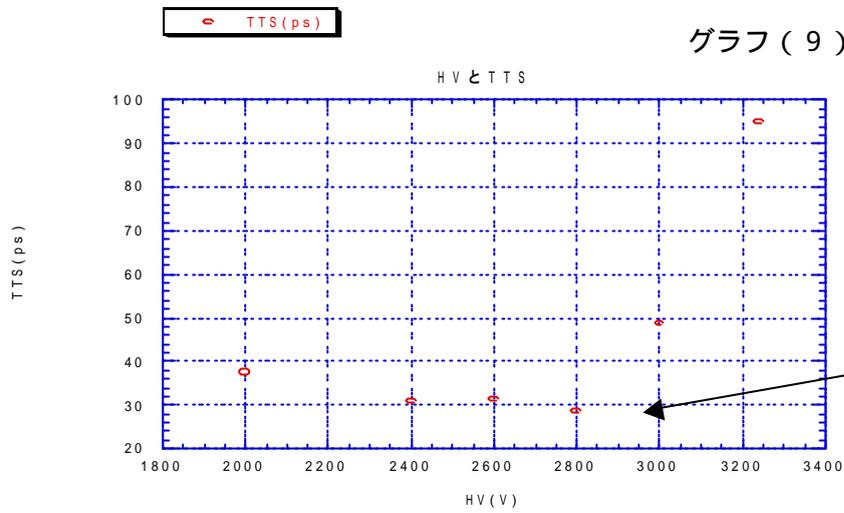
5 - 4 - 2 電圧、しきい値の最適化

< 目的 >

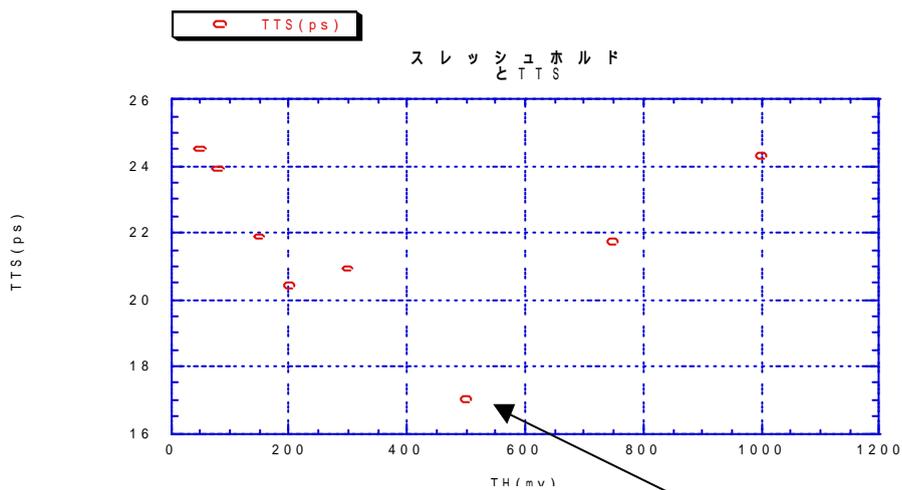
高時間分解能をえるために電圧、しきい値の最適化をおこなった。

< 手順と結果 >

光電子増倍管に電圧を 2000 V から 200 V ずつかけていき 3240 V までの時間分解能を測定した。ディスクリミネーターのしきい値は -100 mV に設定した。結果をグラフ (9) にしめす。2800 V でいちばんいい結果 (時間分解能 28.6 ps) が得られた。つぎに電圧を 2800 V に固定してしきい値を変化させ時間分解能の測定をおこなった。結果をグラフ (10) にしめす。結果しきい値が -500 mV でいちばんいい結果 (時間分解能 18 ps) が得られた。



2800 Vで
時間分解能
28 (ps)
が得られた



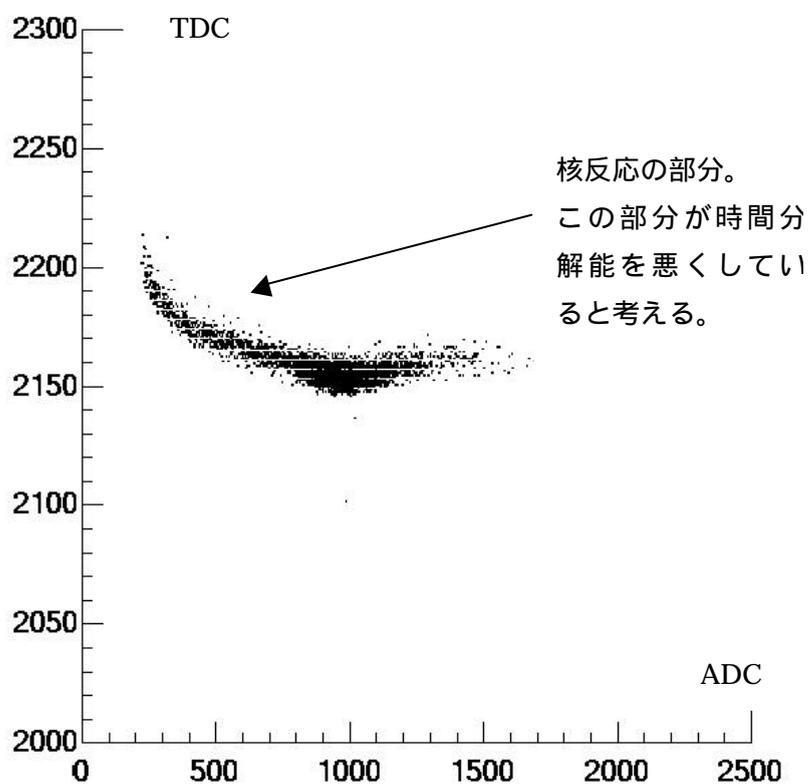
グラフ (10)

電圧 2800 V、
しきい値 500 mV
で時間分解能 18 (ps)
が得られた。

< 考察 >

5 - 3からチェレンコフカウンターからえられる光電子数は 590 ± 56 (個)である。したがって(式 - 8)から期待される時間分解能は 15.2 ± 0.8 (ps)である。測定で得られた時間分解能は 18 (ps)であった。したがってこの時間分解能が悪くなった原因の考察をおこなった。

時間分解能が 18 ps (電圧 2800 V 、しきい値 -500 mV) 得られたときの ADC TDC 分布をグラフ (11) にしめす。グラフ (11) をみると ADC のチャンネルが $100 \sim 700$ (CH) で TDC の値がおおきいすなわち到達時間が遅いことがわかる。したがってこの部分が時間分解能を悪くしていると考えた。この部分はビームによって発生したチェレンコフ光以外の寄与、すなわちビーム以外によるチェレンコフカウンターの核反応が考えられる。したがってチェレンコフカウンターの後ろにさらにディファイニングカウンターをおけばこの効果を取り除くことができ、さらなる高時間分解能化ができると考えた。



グラフ (11) TDC ADC 分布

5 - 4 - 3 ディファイニングカウンターを2つ用いた

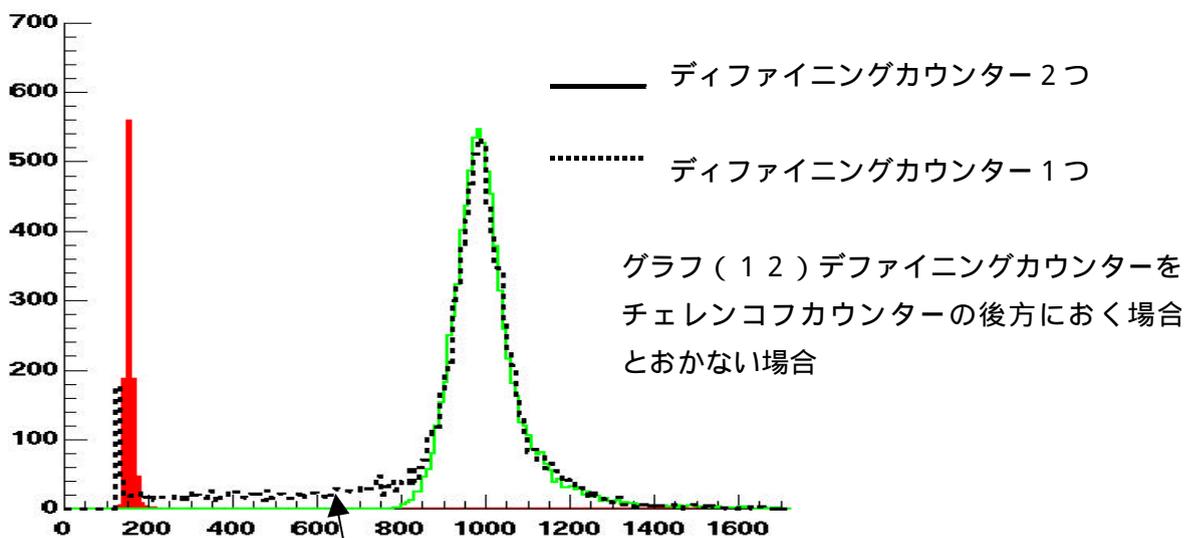
時間分解能の測定

<目的>

5 - 4 - 2で述べたように5 - 1のセットアップではチェレンコフ光以外のものも測定にかかっていると考えられる。したがってチェレンコフカウンターの後ろにディファイニングカウンターをおくことによりチェレンコフ光だけの寄与を測定した。

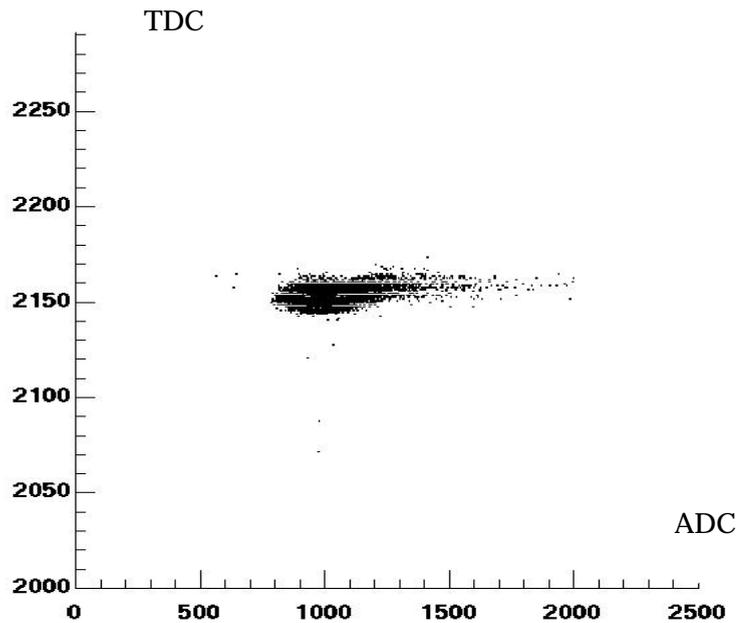
<手順と結果>

チェレンコフカウンターの後ろにディファイニングカウンターをおき測定をおこなった。そのときの ADC 分布（比較のためにディファイニングカウンター1つの場合と光電面からの光電子による ADC 分布も同時にしめす）をグラフ（12）にしめす。



ディファイニングカウンターをチェレンコフカウンターの後方におくことにより核反応の効果がきえた。

ディファイニングカウンターをチェレンコフカウンターの後方におくことにより核反応の影響を取り除くことができた。このときの ADC TDC 分布をグラフ (1 3) にしめす。



グラフ (1 3) チェレンコフカウンター後方にディファイニングカウンターをおいたときの ADC TDC 分布

到達時間が遅い部分がきえ時間のばらつくがちいさくなった。この分布から ADC (電荷量) と TDC (到達時間) の間には相関関係がないと考えられる。

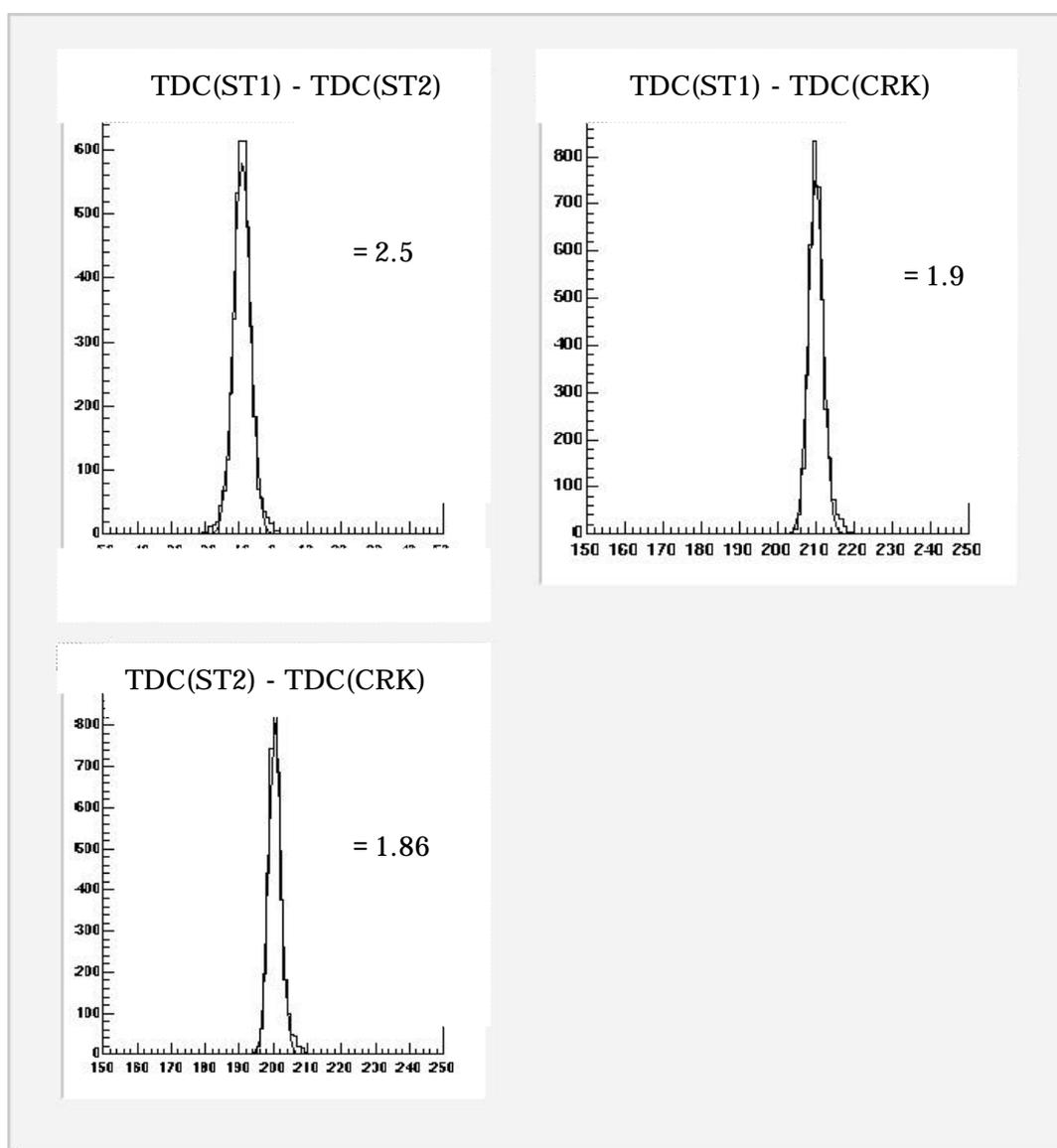
次にチェレンコフカウンターの時間分解能を求めるために TDC(ST1) - TDC(ST2)、TDC(ST1) - TDC(CRK)、TDC(ST2) - TDC(CRK)の分布をつくった。結果をグラフ (1 4) にしめす。この結果より

$$\begin{aligned} \sqrt{s_{ST1}^2 + s_{ST2}^2} &= 2.5 \\ \sqrt{s_{ST1}^2 + s_{CRK}^2} &= 1.9 \\ \sqrt{s_{ST2}^2 + s_{CRK}^2} &= 1.86 \end{aligned}$$

以上の結果からチェレンコフカウンターの時間分解能は

$$S_{CRK} = 14.9 \pm 1.3 \quad (\text{ps})$$

となった。これは現在得られているシンチレーションカウンターの時間分解能よりいい時間分解能である。



グラフ (1 4)

スタートカウンター 1, 2 のそれぞれの時間分解能は

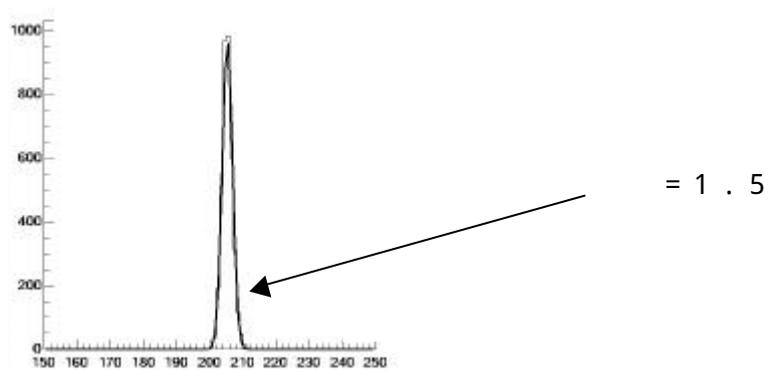
$$s_{ST1} = 44.3 \pm 0.8(ps), s_{ST2} = 44.1 \pm 0.8(ps) \text{ である。}$$

< 考察 >

1. チェレンコフカウンターの時間分解能を上記の方法以外の方法でも求めた。
スタートカウンター 1, 2 を平均したものとチェレンコフカウンターの時間分解能の間には

$$\sqrt{s_{ST}^2 + s_{CRK}^2} = s_{TDC(ST)-TDC(CRK)} \quad (\text{式 18})$$

の関係がある。ここで ST は 2 つの平均をあらわす。TDC(ST) - TDC(CRK) の分布をグラフ (15) にしめす。



グラフ (15)

ここでスタートカウンター 1, 2 の性能は同じであると仮定して

$$s_{ST} = \frac{44.3 + 44.1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 31.3(ps)$$

したがって (式 18) から

$$s_{CRK} = 18.9 \pm 1.0(ps)$$

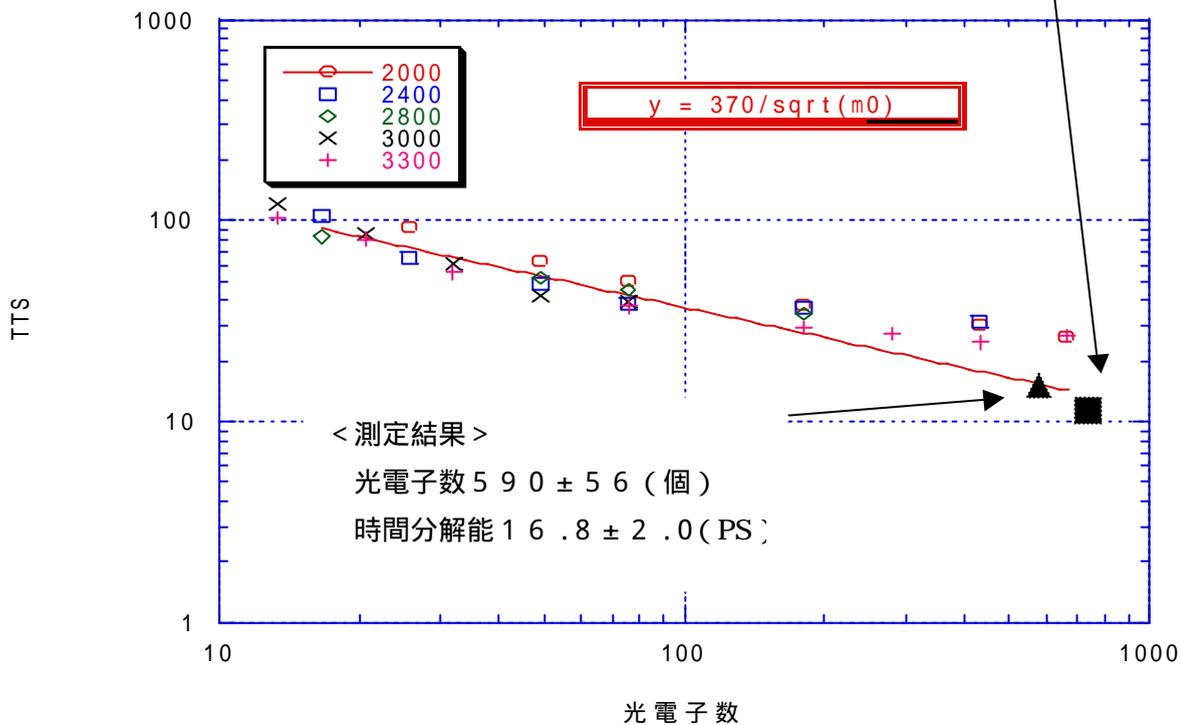
第6章 まとめ

本研究では陽子ビーム用高時間分解能チェレンコフビームカウンターの開発をおこなった。実験前の予想では光電子数 730 (個)、時間分解能は 13.7(ps)であった。実験の結果このカウンターでは光電子数 590 ± 56 (個)、時間分解能は 16.8 ± 2.0 (ps)が得られた。またこのカウンターでは $N_0 = 53.6 \pm 5.0$ である。

実験前の予想

光電子数 730 (個)

時間分解能 13.7 (ps)



今後さらに高時間分解能をすすめるうえで以下の方法が考えられる。

1. TTS の値が小さい光電子増倍管を使用する。
 2. 波長感度領域が広い媒体の使用。(具体的には石英でできたクォーツの使用)
- 同時にカウンターの小型化もすすめていく必要がある。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、多大なご指導、ご助言をいただきました三明康郎教授に深く感謝の意を表します。

また、本論文を作成するにあたり、ご協力いただいた皆様にお礼を述べさせていただきます。

江角晋一氏には、KEK 実験ならびにその後の解析にいたるまでたくさんの助言、アドバイスをいただきました。

佐藤進氏には、本研究をおこなうにあたり自分の気がつかないところをご指摘いただきました。

箱崎大祐氏、ならびに相沢美智子氏には卒論をおこなううえで何度も相談にのっていただいたり、たくさんの助言をいただきました。

小野雅也氏には計算機の使い方を教えていただいたり、KEK 実験においてはさまざま面でサポートしていただきました。

鶴岡裕士氏にはこの卒論をおこなうにあたり最も重要な光電子増倍管の使い方を教えていただきました。

本研究をおこなうにあたり、ご協力いただいたみなさまにもう一度感謝の意を表します。

参考文献

- 1 . Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments
Springer-Verlag W.R.Leo
- 2 . 放射線計測の理論と演習 上・下巻 現代工学社
ニコラス ツルファニディス (坂井英次 訳)
- 3 . 物理学事典 培風館
- 4 . 放射線計測ハンドブック 日刊工業新聞社
GLENN F. KNOLL (木村逸郎、坂井英次 訳)
- 5 . SUBATOMIC PHYSICS PRENTICE HALL
HANS FRAUENFELDER ERNEST M.HENLEY

