修士論文

# (e, e'$K^+$) 反応での Λ ハイパー核分光実験用 K 中間子のトリガー及び検出器の開発

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

加藤 文章

平成 16 年

## 概 要

現在、我々は米国ジェファーソン研究所(以下JLAB)にて２００５年６月から開始する、1.8 GeVの高品質電子ビームによる $(e, e'K^+)$ 反応を用いたΛハイパー核分光実験 (E01-011 実験) に向け準備を行っている。

２０００年、JLABにて $(e, e'K^+)$ 反応を用いた世界初のハイパー核分光実験 (E89-009) が行われた。この実験では散乱電子の測定にEngeスペクトロメータ、$K^+$ の測定にはJLABに常設されているSOSスペクトロメータが用いられた。実験は成功を収め、ハイパー核生成反応実験としては最高のエネルギー分解能 900 keV(FWHM) を実現し、この反応はハイパー核の研究において強力な手段であることが示された。しかし、同時にいくつかの問題点が明らかとなった。

一つは、散乱電子側の多量のバックグラウンドであり、もうひとつは $K^+$ の測定に使用したSOSがエネルギー分解能と検出効率を制限していたことである。

E01-011 実験では E89-009 実験での問題点を改善し、Λハイパー核の励起準位をエネルギー分解能 400 keV [FWHM] 以下という精度で測定することを目標としている。そこで、新たに $K^+$ の測定に高分解能大立体角 $K^+$ 中間子スペクトロメータ (HKS) を導入する。また散乱電子側では制動放射・Møller散乱によるバックグラウンドを排除する為、Engeスペクトロメータ全体をビーム分散に対して垂直方向に傾ける”Tilt法”で最適化を行う。Tilt法により散乱電子側のバックグラウンドは激減し、結果として E89-009 実験に比べ、ビーム強度を約 50 倍、またターゲットの厚さを約５倍にする事が可能となる。それに伴ってハイパー核の生成率は 60 倍となるが、HKS 側でバックグラウンドとなる $\pi^+$、p の singles rate が非常に高くなることが予想される。

このような理由から $K^+$ 側では、$\pi^+/K^+$ 弁別に屈折率 1.055 の Aerogel Cherenkov 検出器 (以下 AC 検出器)、$K^+/p$ 弁別に屈折率 1.33 の Water Cherenkov 検出器 (以下 WC 検出器) を用いて trigger level での粒子識別を行う。AC 検出器は 7 segments × 3 面で設置し、1 面当たり $\pi^+$ に対して 95% 以上のサプレッションを要求する。また WC 検出器は、12 segments × 2 面で設置し、1 面当たり p に対して 97.5% 以上のサプレッション性能を要求する。WC 検出器に関しては要求を満たす為、輻射体である純水 (抵抗率 ; ～20 MΩ·cm) に波長変位剤 Amino-G salt を溶かして使用する。

しかしながら AC 検出器では accidental coincidence によって $K^+$ を veto してしまう事象 (以下 accidental $K^+$ kill ) が、さらに WC 検出器では p rejection に伴って $K^+$ まで落としてしまう事象が生じる。その為、trigger level で落としてしまう $K^+$ の割合 (以下 $K^+$ kill ratio) をどのようにして抑え、効率のよい”$K^+$ trigger” の作成するかが重要となる。

accidental $K^+$ kill ratio に対しては、GEANT モンテカルロシミュレーションで得られた検出器に対する粒子の hit position が水平方向に強い相関関係を持つことに注目し、HKS 側の検出器の segments を利用していくつかのグループに分け、グループ単位で trigger を作成することで減らす。グループ分けには新たに開発した FPGA を搭載した VME モジュール TUL-8040 を使用する。グループ分けをした結果、グループ化しなかった場合に 5% だった accidental $K^+$ kill ratio を約 0.3% にまで抑えることが可能である。

p rejection に伴う $K^+$ kill に対しては、WC 検出器の $K^+/p$ 弁別性能を向上させることで対処する。このような考えの基、２００４年６月に KEK-PS の T1 ラインにて実際に E01-011 実験で使用する

WC 検出器を $K^+$、p、$\pi^+$ が混在するハドロンビームに曝して実験 (T554 実験) を行った。T554 実験では、Amino-G salt の濃度を変えながら、WC 検出器を HKS の運動量アクセプタンスとマッチさせた 1.05、1.2、1.35 GeV/$c$ のビームに曝し、$K^+$/p 弁別性能が最も良くなるよう Amino-G salt の濃度最適化をした。その結果 1.05 及び 1.2 GeV/$c$ の場合、$K^+$/p 弁別性能は濃度に依存しないことが分かったが、1.35 GeV/$c$ においては濃度と $K^+$ kill ratio の間に相関性を確認した。その相関性から運動量 1.35 GeV/$c$ において、もし濃度を 100mg/$l$ にすれば、p を 99 % rejection という厳しい条件を課しても、$K^+$ kill ratio の値は約 1% に抑えられることが分かった。また Amino-G salt の経年変化の懸念から、WC 検出器を約二ヶ月半、宇宙線に曝し、経年変化による発光量の時間変動も調べた。この２つの実験から、p rejection による $K^+$ kill ratio 及び発光量の安定性を考えると、本実験において Amino-G salt 濃度 100mg/$l$ が適性濃度となることが分かった。

# 目 次

**第 1 章　序論** **1**
1.1 Λ ハイパー核 . . . . . 1
1.2 Λ ハイパー核実験の歴史的背景 . . . . . 1
1.3 $(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光の特徴 . . . . . 1
1.4 本研究の目的 . . . . . 2

**第 2 章　(e,e'K$^+$) 反応による Λ ハイパー核分光実験** **3**
2.1 (e,e'K$^+$) 反応による Λ ハイパー核の生成過程 . . . . . 3
2.2 E89-009 実験 . . . . . 6
2.2.1 CEBAF . . . . . 6
2.2.2 E89-009 実験の概要 . . . . . 7
2.3 E01-011 実験の概要 . . . . . 8
2.3.1 E01-011 実験のセットアップ . . . . . 9
2.3.2 HKS 側で予想されるバックグラウンド . . . . . 12
2.4 K$^+$ 測定検出器 . . . . . 13
2.4.1 HKS Drift Chamber . . . . . 14
2.4.2 TOF hodoscope . . . . . 15
2.4.3 Aerogel Cherenkov 検出器 . . . . . 17
2.4.4 Water Cherenkov 検出器 . . . . . 19

**第 3 章　HKS 側 K$^+$ trigger** **20**
3.1 概要 . . . . . 20
3.2 K$^+$ trigger . . . . . 20
3.3 TUL-8040 モジュール . . . . . 23
3.4 グループ分けによる trigger level での粒子識別 . . . . . 23
3.4.1 TOF trigger logic . . . . . 24
3.4.2 AC trigger logic . . . . . 25
3.4.3 WC trigger logic . . . . . 25
3.4.4 Trigger level での粒子識別 . . . . . 26
3.5 3 章まとめ . . . . . 27

**第 4 章　E01-011 実験 K$^+$/p 弁別用 WC 検出器** **30**
4.1 概要 . . . . . 30

4.2 Cherenkov 検出器の機構 . . . . . 30
4.3 E01-011 実験用 WC 検出器の構成 . . . . . 32
4.4 T554 実験 . . . . . 33
4.4.1 T554 実験セットアップ . . . . . 33
4.4.2 解析方法 . . . . . 36
4.4.3 解析結果 . . . . . 41
4.4.4 Fluorotrans の効果 . . . . . 43
4.4.5 考察 . . . . . 45
4.5 WC 検出器の宇宙線測定による長期安定性 . . . . . 46
4.5.1 セットアップ . . . . . 46
4.5.2 解析方法 . . . . . 47
4.5.3 解析結果 . . . . . 49
4.5.4 考察 . . . . . 52
4.6 4 章まとめ . . . . . 53

**第 5 章 まとめ** **54**

**付 録 A 波長変位剤 -Amino-G salt-** **57**
A.1 蛍光作用 . . . . . 57
A.1.1 蛍光のメカニズム . . . . . 57
A.1.2 燐光のメカニズム . . . . . 59
A.1.3 発光プロセスを持たない場合 . . . . . 60
A.2 波長変位剤 -Amino-G salt- . . . . . 60
A.2.1 波長変位剤 . . . . . 60
A.2.2 Amino-G salt . . . . . 61

**付 録 B T554 実験の解析データ** **62**

# 図 目 次


2.1 (e, e'$K^+$) 反応の運動学 . . . . . 4
2.2 $^{12}$C ターゲットにおける仮想光子フラックスに関与した電子の散乱角依存性 [2] . . 4
2.3 Λ ハイパー核生成における散乱 $K^+$ の角度分布 . . . . . 5
2.4 素過程 p($\gamma$,$K^+$)Λ 反応の断面積の $E_\gamma$ 依存性 . . . . . 5
2.5 CEBAF (超伝導連続電子線加速器) 概観図 . . . . . 6
2.6 E89-009 実験のセットアップ図 . . . . . 7
2.7 E89-009 実験で得られた $^{12}$C(e, e'$K^+$) 反応による $^{12}_{\Lambda}$B の励起エネルギー . . . . . 8
2.8 E01-011 実験のセットアップ図 . . . . . 9
2.9 Momentum 0.3 GeV/$c$ ± 40% 領域の電子のターゲットに於ける散乱角分布 . . . . . 10
2.10 HKS 側 検出器のセットアップ . . . . . 13
2.11 HDC layer 構造 . . . . . 14
2.12 HDC の cell 構造 . . . . . 14
2.13 $K^+$/p、$\pi^+$/$K^+$ での 飛行時間差の運動量依存性 . . . . . 15
2.14 HTF1X の概観及びセットアップ図 . . . . . 16
2.15 HTF1Y のセットアップ図 . . . . . 16
2.16 Cherenkov 輻射体を aerogel ( $n$ = 1.055)、water ( $n$ = 1.33) とした場合での $\pi^+$ ,$K^+$ ,p の Cherenkov 発光量の運動量依存性 . . . . . 17
2.17 Aerogel Cherenkov 検出器のセットアップ図 . . . . . 18
2.18 Water Cherenkov 検出器のセットアップ . . . . . 19

3.1 GEANT モンテカルロシュミレーションから得られた HKS 側での粒子の軌道 . . . . 21
3.2 各検出器の位置での水平方向の相関 . . . . . 22
3.3 TUL-8040 モジュール . . . . . 23
3.4 TOF グループ分け . . . . . 24
3.5 AC グループ分け . . . . . 25
3.6 WC グループ分け . . . . . 26
3.7 グループ分けによる HTF1X と HTF2X の segments 間における相関 . . . . . 28
3.8 $K^+$ trigger logic . . . . . 29
3.9 $\pi^+$ trigger logic . . . . . 29
3.10 p trigger logic . . . . . 29

4.1 Cherenkov 放射 . . . . . 31
4.2 PMT の分光感度特性 [22] . . . . . 31
4.3 WC 検出器壁面；スノーホワイトの反射率と PMT の分光感度の関係 . . . . . 32

4.4 T554 実験のセットアップ図 . . . . . 33
4.5 T554 trigger logic . . . . . 34
4.6 WC 検出器の概観図 . . . . . 35
4.7 WC 検出器の外壁部に fluorotrans を巻いた図 . . . . . 35
4.8 $K^+$/p、$\pi^+$/$K^+$ での飛行時間差と運動量依存性 . . . . . 36
4.9 Time of flight のみによる粒子識別 . . . . . 37
4.10 . . . . . 37
4.11 . . . . . 38
4.12 入射粒子の運動量と光電子数の関係 . . . . . 39
4.13 deuteron cut . . . . . 39
4.14 $K^+$/p survival ratio . . . . . 40
4.15 Momentum 1.2 GeV/$c$ において 4.8 式の threshold を其々97, 98, 99 %に設定した場合に於ける $K^+$kill ratio と Amino-G salt 濃度の相関。 . . . . . 41
4.16 Momentum 1.35GeV/$c$ において 4.8 式の threshold を其々97, 98, 99 % に設定した場合に於ける $K^+$kill ratio と Amino-G salt 濃度の相関。 . . . . . 42
4.17 光電子数と Amino-G salt 濃度の相関 . . . . . 43
4.18 Momentum 1.2 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻かない場合の WC 検出器の光電子数分布 . . . . . 44
4.19 Momentum 1.2 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻いた場合の WC 検出器の光電子数分布 . . . . . 44
4.20 Momentum 1.35 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻かない場合の WC 検出器の光電子数分布 . . . . . 45
4.21 Momentum 1.35 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻いた場合の WC 検出器の光電子数分布 . . . . . 45
4.22 Cherenkov 輻射体に純水 ($n$ = 1.33) を選んだ場合での $\mu$ の Cherenkov 光の発光量と運動量の依存性 . . . . . 46
4.23 宇宙線による WC 検出器の長期安定性セットアップ写真 . . . . . 47
4.24 . . . . . 47
4.25 得られた光電子数に二次関数+Gaussian で fitting 行った場合 . . . . . 48
4.26 光電子数の時間変化 . . . . . 48

A.1 蛍光物質のポテンシャル曲線 . . . . . 58
A.2 燐光物質のポテンシャル曲線 . . . . . 59
A.3 発光プロセスが生じない場合でのポテンシャル曲線 . . . . . 60
A.4 Amino-G salt の pH 値 . . . . . 61

# 表 目 次


2.1 CEBAF の性能 . . . . . 6
2.2 E01-011 実験におけるスペクトロメータの性能及びビームの条件 . . . . . 11
2.3 E01-011 実験で期待されるエネルギー分解能 (keV、FWHM) . . . . . 11
2.4 E01-011 実験において見積もられる singles rate ( kHz ) . . . . . 12
2.5 HKS 側検出器群 . . . . . 13

3.1 Cherenkov 検出器を用いた粒子識別 . . . . . 27

4.1 E01-011 実験用 WC 検出器の構成 . . . . . 32
4.2 T554 実験 検出器群 . . . . . 33
4.3 fluorotrans を巻かない場合の光電子数の中心値 . . . . . 43
4.4 fluorotrans を巻いた場合の光電子数の中心値 . . . . . 43
4.5 fluorotrans を巻かない場合の $K^+$ kill ratio . . . . . 44
4.6 fluorotrans を巻いた場合の $K^+$ kill ratio . . . . . 44
4.7 Amino-G salt の経年変化による光電子数の 1 日当たりの減少率 . . . . . 49
4.8 濃度 30 mg/$l$ での経年変化前における $K^+$ kill ratio . . . . . 51
4.9 経年変化の効果 (減少率; 9.232%) を加えた濃度 30 mg% での $K^+$ kill ratio . . . . . 51
4.10 濃度 50 mg/$l$ での経年変化前における $K^+$ kill ratio . . . . . 51
4.11 経年変化の効果 (減少率; 4.400%) を加えた濃度 50 mg% での $K^+$ kill ratio . . . . . 51

B.1 図 4.15 の momentum 1.2 GeV/$c$、threshold 97, 98 ,99% の場合 $K^+$ kill ratio . . . . . 62
B.2 図 4.16 の momentum 1.35 GeV/$c$、threshold 97, 98 ,99% の場合 $K^+$ kill ratio . . . . . 63
B.3 図 4.17 の momentum 1.2 GeV/$c$ に於ける Amino-G salt 濃度と光電子数の関係 . . . . 63

# 第1章　序論

## 1.1　Λハイパー核

通常、原子核は陽子と中性子からなるが、それらの他にストレンジネスと呼ばれる量子数を持つバリオン (ハイペロン) を含み構成される原子核が存在する。このような原子核をハイパー核と呼ぶ。ハイペロンとはストレンジクォークを含むバリオンであり、ストレンジネスとアイソスピンによって区別され、Λ、Σ、Ξ 及び Ω と名づけられている。Λ 粒子を含むものを Λ ハイパー核という。Λ 粒子は陽子や中性子と異なり, ストレンジネスという新たな量子数を持つので、原子核中で核子からのパウリ排他律を受けず原子核の深部まで入り込むことができる。これにより原子核深部の構造を調べることが可能となり、原子核の構造を研究するうえで重要な役割を果たしている。

## 1.2　Λハイパー核実験の歴史的背景

１９５２年に宇宙線を用いたエマルジョン実験によって Λ ハイパー核は発見された [11]。１９７０年中頃から CERN に於いて ($K^-$,$\pi^-$) 反応によるカウンタ実験が行われ、Λ ハイパー原子核の研究は、基底状態に限定されていたものから励起状態にまで進められるようになった [12],[13],[14],[15]。さらに１９８０年後半からは ($\pi^+$,$K^+$) 反応を用いた分光実験が KEK を中心に行われ、Λ ハイパー核の励起状態のより詳細な観測を実現させた [16],[17],[18]。

これらの反応では $K^-$、$\pi^+$ という中間子ビームを用いている。これら中間子ビームは陽子ビームを元に作られる２次ビームであり、エネルギー的及び空間的に広がりが生じ、ハイパー核の励起エネルギーに対する分解能が数 MeV に制限されてしまった。このことは、数 100 keV 程度のエネルギー分解能が必要と予測されるスピン軌道相互作用によるエネルギー準位差や、1 MeV 以下のエネルギー分解能が必要とされるコア核の励起状態の詳細な研究を行うには不十分であった。このような研究を行う為に、２次ビームではなくエネルギーが揃い、エミッタンスも良い電子ビームのような１次ビームを用いて分解能を格段に良くすることが待望された。

２０００年には米国ジェファーソン研究所の CEBAF で得られる大強度電子ビームを用いることで、初めて (e, e'$K^+$) 反応でのハイパー核分光実験が可能となり、この実験によって従来の２次ビームを用いた実験を大きく上回る高分解能が得られることが実証された [7]。

## 1.3　$(e, e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光の特徴

(e,e'$K^+$) 反応での Λ ハイパー核生成は、核内の陽子を Λ 粒子に変える反応であるため、中性子過剰ハイパー核が生成できるという特徴がある。また中間子ビームによる生成反応では、生成断面積の大きな前方角度で測定する限りスピン反転状態が励起されないのに対し、電子ビームを使用

する (e, e’ $K^+$) 反応では、スピン反転･非反転状態は同程度に励起されるので、スピンに依存する相互作用やその構造に関する研究に適している。また (e,e’$K^+$) 反応は運動量移行が約 400 MeV/*c* と大きい為、様々な深い束縛状態を励起することができる。

## 1.4　本研究の目的

現在、我々は米国ジェファーソン研究所 (以下 JLAB) にて２００５年６月から開始する、(e, e’$K^+$) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験 (E01-011 実験) に向け着々と準備を行っている。

E01-011 実験では Λ ハイパー核の励起準位をエネルギー分解能 0.3〜0.4 MeV (FWHM) という高分解能で測定することをを目標としている。本実験ではハイパー核生成に関与した $K^+$ を新たに製作した高分解能 $K^+$ 中間子スペクトロメータ (HKS) で測定し、散乱電子の測定には”Tilt 法” により最適に配置した Enge Spectorometer を用いる。これにより、E01-011 実験では２０００年に行われた E89-009 実験と比較しビーム強度を 50 倍、ターゲットの厚さを 5 倍にすることが可能となるが、それに伴い HKS 側での singles rate が非常に高くなると予想される。そのため trigger level で非常に精度の良い粒子識別が重要とされる。そこで本研究では、trigger level で落としてしまう $K^+$ の割合 (以下 $K^+$ kill ratio) をどのようにして抑え、効率のよい”$K^+$ trigger” の作成していくかを目的とする。

その為２章では、本実験の目的やセットアップについて述べる。後半では特に $K^+$ 側を中心に説明する。

また 3 章では、HKS 側の非常に高い singles rate によって生じる accidental coincidence 起因での $K^+$ kill ratio に注目し、この ratio をできる限り抑えるように作成した $K^+$ trigger について議論する。

そして 4 章では、trigger level での $K^+$/p 弁別を目的として開発した Water Cherenkov 検出器 (以下 WC 検出器) について議論する。WC 検出器の $K^+$/p 弁別性能の向上を目指し、２００４年６月に KEK-PS の T1 ラインで、実際使用する WC 検出器をビームに曝し実験 (T554 実験) を行った。またテストベンチにおいて WC 検出器を用いた宇宙線測定を行い、これらの結果から、E01-011 実験で WC 検出器の改良すべき点について議論する。

最後に、５章で本研究の内容をまとめる。

# 第2章　(e,e'K$^+$)反応による Λハイパー核分光実験

この章では、まず始めに (e,e'K$^+$) 反応の運動学について説明し、その後世界初の (e,e'K$^+$) 反応による Λ ハイパー核分光実験 (E89-009) について述べる。また後半では 2005 年 6 月から開始する E01-011 実験の概要及びセットアップについて、特に K$^+$ 側を中心に説明する。

## 2.1　(e,e'K$^+$)反応による Λ ハイパー核の生成過程

(e, e'K$^+$) 反応について、散乱電子 e' と K$^+$ を同一平面で観測するときハイパー核生成の 3 重微分断面積は 2.1 式のようになる [1]。図 2.1 に (e, e'K$^+$) 反応の運動学の図と反応に関するパラメータを表示する。

$$\frac{d^3\sigma}{dE_{e'}d\Omega_{e'}d\Omega_K} = \Gamma\left(\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon_L\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}\right) \tag{2.1}$$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2}\frac{E_\gamma}{1-\varepsilon}\frac{E'_e}{E_e} \qquad (\alpha;\ \text{微細構造定数}) \tag{2.2}$$

$$E_\gamma = \omega + \frac{q^2}{2m_p} \tag{2.3}$$

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{2\,|\mathbf{q}|^2}{Q^2}\tan^2(\frac{\theta_e}{2})\right]^{-1} \tag{2.4}$$

$$\varepsilon_L = \frac{Q^2}{\omega^2}\varepsilon \tag{2.5}$$

ここで 2.1 式中 $\sigma_T$、$\sigma_L$ は其々横波、縦波成分の断面積、$\Omega_{e'}$、$\Omega_K$ は散乱電子側、K$^+$ 側の立体角である。また Γ は仮想光子のフラックス、$E_\gamma$ は実効光子エネルギー、$\varepsilon$、$\varepsilon_L$ は仮想光子の横及び縦偏極であり、$m_p$ は陽子の静止質量である。

これにより、散乱電子での散乱角依存性に着目すると $\theta_e$〜0° で仮想光子フラックス Γ は最大となる (図 2.2 参照)。また (e,e'K$^+$) 反応でのハイパー核生成の断面積は ($\pi^+$,K$^+$) 反応と同様に、大きな運動量移行のため前方ピークを持つので、散乱 K$^+$ の生成率は 0° で最大となる (図 2.3 参照)。

以上のことから、ハイパー核生成に伴って放出される散乱電子、K$^+$ 共にできる限り前方で同時測定することが必要となる。しかし電子と K$^+$ 中間子を同時測定する為には、連続ビームが求められる。これは、パルス状ビームを用いた場合、瞬間的なビーム強度が非常に高くなり、同時に多

数の粒子が放出されるため、accidental coincidence の割合が高くなり、同時測定が困難となる為である。

また素過程 p(e,e'$K^+$)Λ の断面積は実効光子エネルギー 1.1～1.5 GeV の領域で最大かつほぼ一定となる [4]。そして $E_\gamma$ が大きい程、Λ 粒子の反跳運動量が小さくなるので、原子核に取り込まれ Λ ハイパー核に成り易くなる。このようなことから $E_\gamma$=1.5 GeV 付近が最適であると考えられる。

一方、入射電子のエネルギーが高くなるとハイパー核の生成率が増すが、Λ 以外の $K^+$ photo production channel も開き、$K^+$ 中間子のバックグラウンドとなる。これよりバックグラウンドを避ける為、入射電子のエネルギーを閾値以下の $E_e$=1.8 GeV 付近が最適となる。

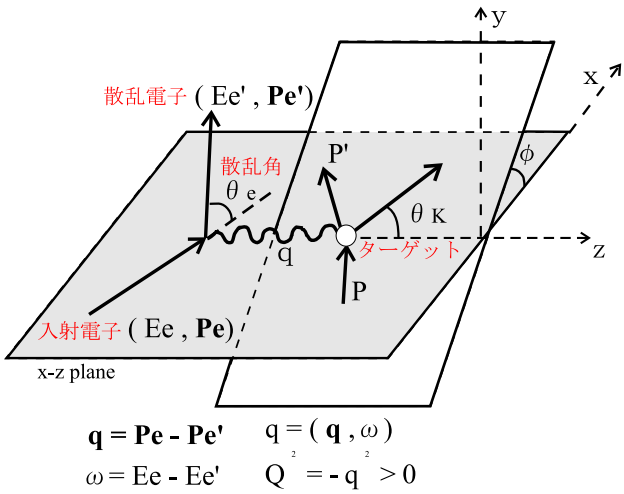



図 2.1: (e, e'$K^+$) 反応の運動学

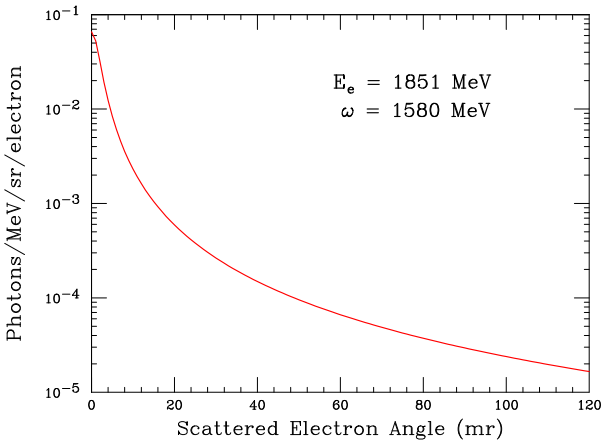



図 2.2: $^{12}$C ターゲットにおける仮想光子フラックスに関与した電子の散乱角依存性 [2]
縦軸; 入射電子当たりの仮想光子フラックス、横軸；散乱電子の散乱角。ビームのエネルギーは 1.851 GeV、仮想光子のエネルギーが 1.58 GeV を仮定している。

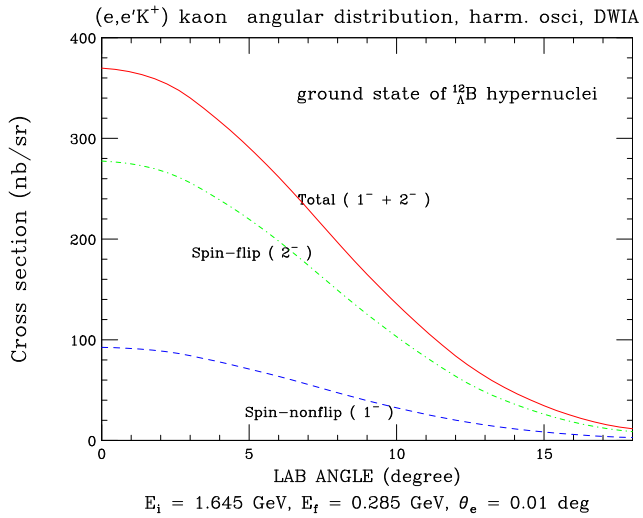



図 2.3: Λ ハイパー核生成における散乱 $K^+$ の角度分布
$^{12}C(e,e'K^+)^{12}_{\Lambda}B$ 反応における横軸；$K^+$ の散乱角、縦軸；$^{12}_{\Lambda}B$ 基底状態の微分断面積、による実験室系での相関。青線は Λ の spin が反転しない場合、緑線は Λ の spin が反転した状態、また赤線は spin 反転·非反転状態合わせた $^{12}_{\Lambda}B$ 基底状態の微分断面積を表している。但し入射電子のエネルギーを 1.645 GeV、散乱電子のエネルギー 0.285 GeV 散乱電子の散乱角を 0.01 ° と仮定している。[2][3]

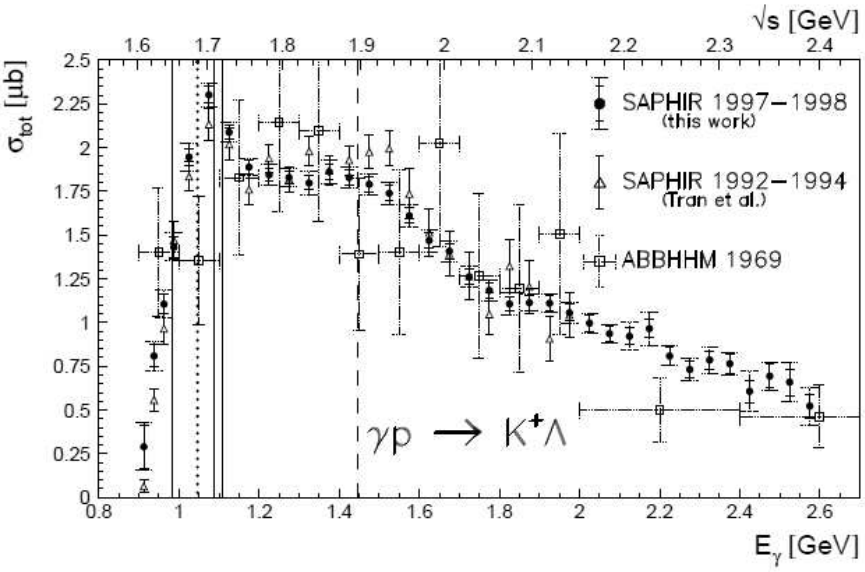



図 2.4: 素過程 $p(\gamma,K^+)\Lambda$ 反応の断面積の $E_\gamma$ 依存性
縦軸；全断面積、横軸；入射 γ 線のエネルギーを表している [4]。

## 2.2 E89-009 実験

前節で述べた要求を満たす電子線を供給できるのは、現在のところ米国バージニア州にある JLAB の超伝導連続電子線加速器 (CEBAF) だけである。この節では、CEBAF 及び 2000 年春 JLAB Hall C で行われた (e,e'$K^+$) 反応を用いた最初の実験 (E89-009) について記述する。

### 2.2.1 CEBAF

CEBAF は超伝導空洞、超伝導電磁石でできた２つの直線加速器からなり、周長 1 km の規模を持つ。図 2.5 に CEBAF の概観を示す。本実験では injector から打ち出された電子を北と南にある 2 つの超伝導線形加速器でそれぞれ 440 MeV づつ加速させる。これを 2 周繰り返すことで、エネルギー 1.8 GeV の電子線が得られる。加速された電子線は繰り返し周波数 1497 MHz を持ち、最大 100 $\mu$A の強度で 3 つの実験室 (Hall A, B, C) に、バンチ構造 499 MHz の電子線を加速器の許容範囲内で異なるエネルギーで同時に分配することができる。以下表 2.1 に CEBAF の性能を示す。

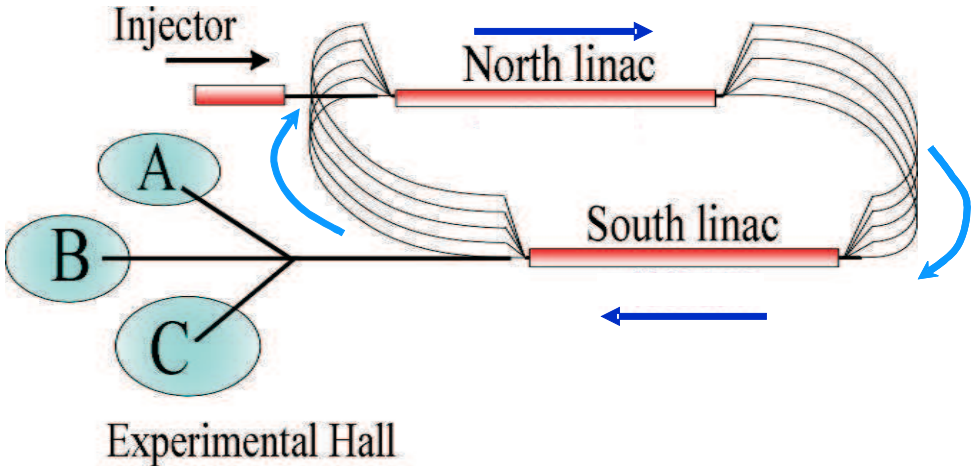



図 2.5: CEBAF (超伝導連続電子線加速器) 概観図

| | |
|---|---|
| 最大ビーム電流 | 200 $\mu$A |
| 最大エネルギー | 6 GeV |
| エミッタンス | ～ 2.0 $\mu$m·mrad |
| エネルギー幅 | $2.5\times10^{-5}$ (FWHM) |
| 加速周波数 | 1497 MHz |
| ビームバンチ | 499 MHz |

表 2.1: CEBAF の性能

### 2.2.2　E89-009 実験の概要

図 2.6 に E89-009 実験のセットアップを示す。E89-009 実験では 2.1 節で述べたように Λ 粒子以外のハイペロンからのバックグラウンドを抑えることを考慮し、エネルギー 1.8 GeV の電子線を $^{12}$C ターゲットにターゲット厚 22 mg/cm$^2$、ビーム強度 1.6 $\mu$A の条件下で入射しデーター収集を行った。

2.1 節で述べたように (e,e'K$^+$) 反応では、散乱電子と K$^+$ を共にできる限り前方で測定を行う。その為、スプリッターマグネットをターゲット直後に配置し、荷電粒子を電荷の正負によって左右に分離し、K$^+$ の測定には Hall C に常設の Short Orbit Spectrometer(SOS) [5] で、また散乱電子を Enge split-pole Spectrometer [6] で測定を行った。実験は成功を収め、ハイパー核生成反応実験としては最高のエネルギー分解能 900 keV(FWHM) が実現され (図 2.7)、(e,e'K$^+$) 反応によるハイパー核分光実験がハイパー核研究において強力な手段であることが示された。しかし、同時に問題点がいくつか明らかとなった。

問題点の 1 つは、電子ビームを用いることによる多量のバックグラウンドである。これは E89-009 実験では仮想光子フラックスが最大になるよう、散乱電子の検出方向は 0° を含む角度に設定していたが、ターゲットで制動放射した電子も 0° で最大であった為、この制動放射による電子が Enge Spectrometer に大量に入射し、その結果散乱電子側の計数率は 200 MHz となり accidental coincidence の原因となった。これにより、S/N 比の悪化から、実験可能なビーム強度やターゲットの厚さが制約されてしまったことである。

もうひとつは K$^+$ の測定に使用した JLAB 既設の SOS がエネルギー分解能、検出効率を制限していたことである。

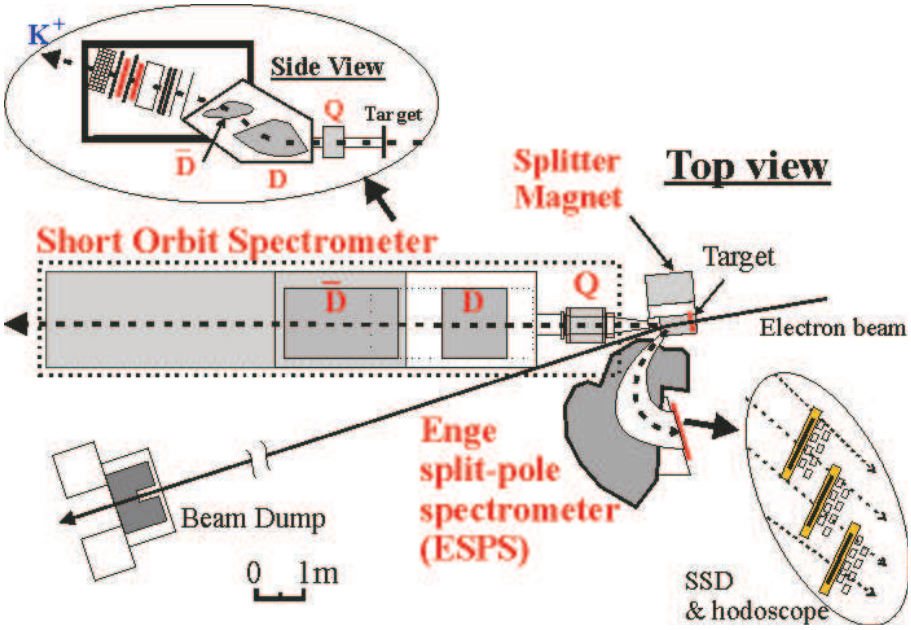



図 2.6: E89-009 実験のセットアップ図

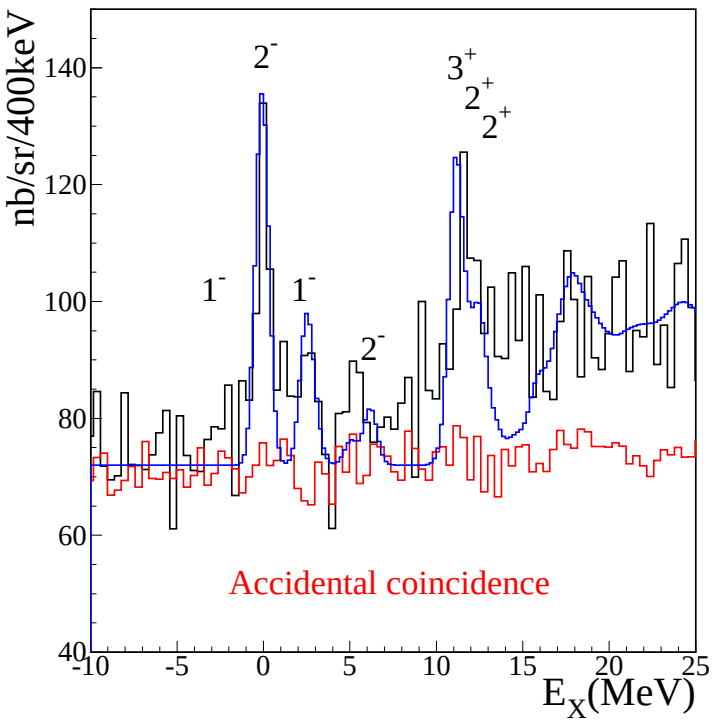



図 2.7: E89-009 実験で得られた $^{12}$C(e, e'K$^+$) 反応による $^{12}_{\Lambda}$B の励起エネルギー
横軸は $^{12}_{\Lambda}$B の励起エネルギー、縦軸は微分断面積 $d\sigma/d\Omega$ である。ヒストグラム中の赤色部分は、accidental coincidence によるバックグラウンドである。また青色曲線は 900 keV の分解能を仮定した場合での、理論計算によるもの [7],[8]。

## 2.3 E01-011 実験の概要

２００５年６月より JLAB Hall C で開始する E01-011 実験では前節で述べた E89-009 実験での問題点を改善し、(e, e'K$^+$) 反応による新たなハイパー核分光実験を行う。E01-011 実験では、新たに K$^+$ の測定用に高分解能大立体角 K$^+$ 中間子スペクトロメータ (HKS) を導入する。また散乱電子側では制動放射・Møller 散乱による電子の accidental coincidence でのバックグラウンドを排除する為、Enge Spectrometer を鉛直方向に 7.75° 傾ける (Tilt 法)[29][33]。これによりビーム当たりの Λ ハイパー核起因の電子数は減るが、散乱電子側のバックグラウンドも減少する。結果として E89-009 実験に比べ、ビーム強度を約 50 倍にまたターゲットの厚さを約 5 倍にする事を可能とし、S/N 比が約 10 倍程度向上する。

以上の点を実現することで、ハイパー核の生成率を約 60 倍、エネルギー分解能は 400 keV (FWHM) 以下となる。これにより図 2.7 が約 1ヶ月のビームタイムで得られたのに対し E01-011 実験ではターゲット当たり数日のビームタイムで高分解能かつ高統計のスペクトルが得られると期待される。

### 2.3.1　E01-011 実験のセットアップ

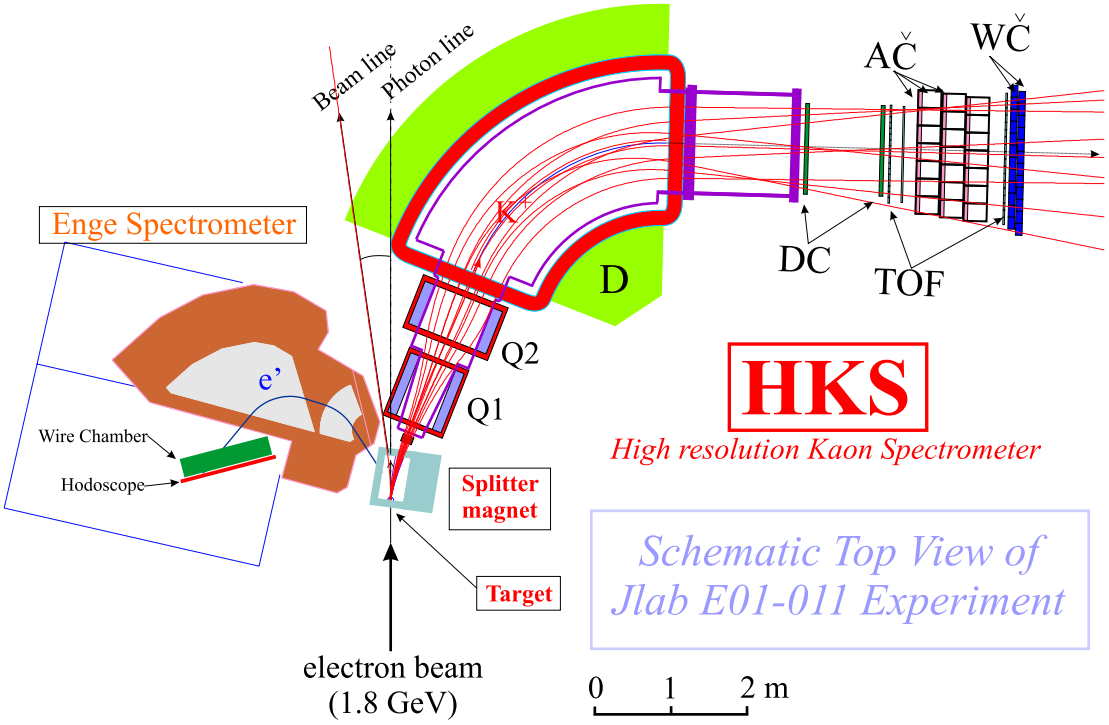



図 2.8: E01-011 実験のセットアップ図

E01-011 実験のセットアップを図 2.8 に表示する。本実験では E89-009 実験同様にスプリッターマグネットをターゲット直後に配置し、荷電粒子の電荷の正負によって左右に分離を行う。

**・Enge Spectrometer**

散乱電子は E89-009 実験でも使用した Enge Spectrometer を Tilt 法によって鉛直方向に 7.75° 傾けて測定を行う。

前回のセットアップと大きく違うのは検出角度である。E89-009 実験では散乱電子の検出方向を 0° を含む角度に設定した為、制動放射・Møller 散乱による電子が Enge Spectrometer に大量に入射し accidental coincidence の原因となった。図 2.9 に Enge Spectrometer の運動量アクセプタンスに入る電子に関して、ターゲットで

1. 制動放射した電子
2. Møller 散乱による電子
3. 仮想光子起因による電子

の角度分布を示す。図 2.9 より制動放射、仮想光子起因による電子は共に角度前方にピークを持つが、仮想光子起因の電子は比較的緩やかに減少していく。また Møller 散乱による電子は散乱電子の運動量を 0.3GeV/$c$ ± 40%(Enge の運動量アクセプタンス) とした場合、3° にピークを持つ。そ

こで Møller 散乱による電子を避ける為、散乱角が 4.5° 付近に Enge Spectrometer のアクセプタンスがくるよう Tilt 角及び鉛直方向の offset を調節することによって仮想光子起因の電子を選択して測定することができる。但し、ターゲット直後に設置されたスプリッターマグネットにより、Enge Spectrometer 入口では運動量によって水平方向に広がる。その為、仮想光子のみを収集するならば、Enge Spectorometer 全体を鉛直方向に傾ける必要がある。このように、E01-011 実験では Tilt 法を用いることで制動放射・Møller 散乱による電子の accidental coincidence によるバックグラウンドを排除する。

また粒子の運動量を求める為、スペクトロメータの焦点面には角度及び位置検出用に新たにドリフトチェンバーが設置される。また最後部に設置された２面の hodoscope で粒子の飛行時間を求め、HKS 側で検出される $K^+$ 中間子との coincidence を取る。

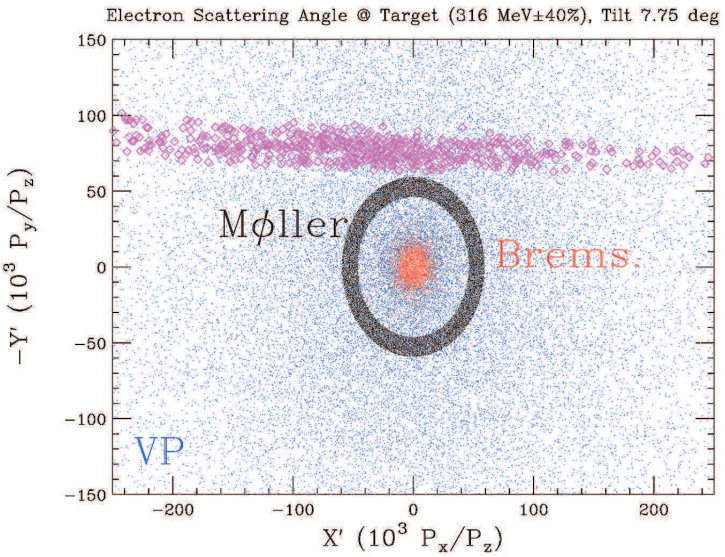



図 2.9: Momentum 0.3 GeV/$c$ ± 40% 領域の電子のターゲットに於ける散乱角分布

Enge Spectrometer のアクセプタンスに入る運動量 (0.3 GeV/$c$ ± 40%) の電子のターゲットに於ける散乱角分布。横軸；水平方向、縦軸；鉛直方向であり、赤い点は制動放射による電子、黒い点は Møller 散乱による電子、青い点は仮想光子起因による電子を表す。図中のピンク色の四角点は Enge Spectrometer を 7.75°(tilt 角) 傾けた時に焦点面に達する電子を表している。この場合 Enge spectrometer のアクセプタンスは、Møller 散乱による電子の外にきており、焦点面に達する電子の殆どは仮想光子起因 (Λ ハイパー核生成に関わった) によるものである。

### ・HKS Spectrometer

$K^+$ 中間子は、新たに導入した HKS を用いて測定を行う。HKS は２つの四重極磁石 (Q1,Q2) と双極磁石 (D) から構成される。また $K^+$ の寿命 (12 nsec) は短く、検出するまでに $K^+$ が崩壊し、測定される $K^+$ の個数が減少してしまう。そのため HKS では、できるだけ焦点面までの距離が短くなるように設計した。

E89-009 実験で使用した SOS の立体角は 5 msr であったが、今回使用する HKS は前方に設置するスプリッターマグネットも含め 16 msr となり、より多くの $K^+$ を捕らえることが可能となる。

また、E01-011 実験では陽電子によるバックグラウンドを避ける為、HKS はビーム方向に対し

て 1°〜13° で散乱された $K^+$ を検出するように配置される。そして、双極子磁石後方に $K^+$ 検出用の測定器 (詳細は 2.4 節で述べる) を設置する。

表 2.2 に E01-011 実験に於けるスペクトロメータの性能を示す。以上のセットアップのもと E01-011 実験において我々は表 2.3 のようなエネルギー分解能を期待する。

| ビーム条件 | |
|---|---|
| ビームエネルギー | 1.8 GeV |
| ビームのエネルギー安定性 | $< 1 \times 10^{-4}$ |
| 全体の構成 | Splitter magnet ＋ HKS ＋ Enge Spectrometer |
| **HKS** | |
| 構成 | Q1 ＋ Q2 ＋ D |
| 中心運動量 | 1.2 GeV/$c$ |
| 運動量アクセプタンス | ±12.5% |
| 運動量分解能 | $2 \times 10^{-4}$(FWHM) |
| 立体角 | 16 msr |
| $K^+$ 検出角 | 7 ° |
| 角度アクセプタンス | 1 °〜13 ° |
| **Enge Spectrometer** | |
| 中心運動量 | 0.316 GeV/$c$ |
| 運動量アクセプタンス | ±30% |
| 運動量分解能 | $4 \times 10^{-4}$(FWHM) |
| tlit 角 | 7.75 ° |
| 角度アクセプタンス | 3.7 °〜5.7 ° |

表 2.2: E01-011 実験におけるスペクトロメータの性能及びビームの条件

| Target | $^{12}$C | $^{28}$Si | $^{51}$V | $^{89}$Y |
|---|---|---|---|---|
| Beam momentum | ≤180 | | | |
| $K^+$ momentum | 230 | | | |
| e' momentum | 120 | | | |
| $K^+$ angle | ≤134 | ≤56 | ≤32 | ≤18 |
| Target(100 mg/cm$^2$) | ≤180 | ≤171 | ≤148 | ≤138 |
| Overall | ≤390 | ≤360 | ≤350 | ≤345 |

表 2.3: E01-011 実験で期待されるエネルギー分解能 (keV、FWHM)

### 2.3.2 HKS 側で予想されるバックグラウンド

E01-011 実験では Tilt 法の採用により、陽電子による singls rate が非常に高くなるが、陽電子の放出方向はほぼ 0° である為、$K^+$ の検出方向が 0° を含まないよう HKS は設置され、陽電子によるバックグラウンドを避られる。その為、E01-011 実験において HKS 側の主なバックグラウンドは $\pi^+$、p といったハドロンとなる。

このような考えのもと、本実験で使用するターゲット $^{12}$C, $^{28}$Si, $^{51}$V に対して HKS 側で予想される主な粒子の singles rate を以下の条件で見積もった。

1. E89-009 実験での $^{12}$C ターゲットに於ける singles rate の実測値を使い、EPC コードを用いスケールすることで HKS 側の $\pi^+$ と p の rate を見積もった。

2. 準自由生成の $K^+$ の断面積は $A^{0.8}$ の依存性を持つと仮定して計算した。0.8 は $^{12}$C($\gamma$,$K^+$) の実験結果によりとったものである [10]。

3. 1.8 GeV の $1.9\times10^9$ 個の電子に対し、発生した陽電子は trigger カウンターに掛からない
この数は電流 30 $\mu$A の場合、10 $\mu$s に相当する。

| | HKS | | | | Enge | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Target | $e^+$ | $\pi^+$ | $K^+$ | p | $e^-$ | $\pi^-$ |
| $^{12}$C | ＜100 | 420 | 0.34 | 150 | 1000 | 2.8 |
| $^{28}$Si | ＜100 | 420 | 0.29 | 130 | 1900 | 2.8 |
| $^{51}$V | ＜100 | 410 | 0.26 | 120 | 2650 | 3.0 |

表 2.4: E01-011 実験において見積もられる singles rate ( kHz )

ビーム強度 30 $\mu$A, target の厚さ 100 mg/cm$^2$ の条件のもと、E89-009 実験のデータを用いて E01-011 実験で予想される singles rate を見積もった。

表 2.4 はビーム強度 30 $\mu$A、ターゲット厚 100 mg/cm$^2$ の場合によるものである。表 2.4 に示す様に HKS 側の $\pi^+$ 及び p の singles rate は非常に高くデータ収集系で処理に於いて我々が要求したい上限 1 kHz を越えてしまうため、$K^+$ を trigger level で効率良く選別する必要がある。このような理由により、我々は E01-011 実験においてサプレッションファクターとして $\pi^+$ に対して $1\times10^{-4}$、p に対して $5\times10^{-4}$ を要求する。この要求を満たす為、閾値型の２種類 (Aerogel、Water) の Cherenkov 検出器を用い trigger level で粒子識別を行う。

また offline では Time of flight 分布 (以下 TOF 分布) を用いて粒子識別を行う。

## 2.4 $K^+$ 測定検出器

この節では E01-011 実験において、$K^+$ 中間子の測定に使用する各検出器についての性能及びセットアップについてまとめる。表 2.5 に HKS 側で用いる検出器をまとめた。また其々の検出器を図 2.10 のようにセットアップする。

| name | size | memo |
|---|---|---|
| Drift Chamber<br>HDC 1, 2 | $30^H \times 120^W \times 7.62^T$ cm | xx',uu'(+30 ° ),vv'(-30 ° )<br>5 mm drift distance |
| Plastic scintillation counter<br>HTF1X<br>HTF1Y<br>HTF2X | <br>$30^H \times 125^W \times 2^T$ cm<br>$30^H \times 125^W \times 2^T$ cm<br>$35^H \times 170^W \times 2^T$ cm | <br>$7.5^W$ cm × 17 segments, PMT;H1949-50<br>$3.5^H$ cm × 9 segments, PMT;H1949-50<br>$9.5^W$ cm × 18 segments, PMT;H1949-50 |
| Aerogel Cherenkov<br>HAC 1, 2, 3 | $40^H \times 135^W \times 30^T$ cm | $20^W$ cm × 7 segments, PMT;16 × 5"<br>radiator;hydrophobic aerogel ( n = 1.055) |
| Water Cherenkov<br>HWC 1, 2 | $35^H \times 185^W \times 8^T$ cm | $15.6^W$ cm × 12 segments, PMT;H7195<br>radiator;water (n = 1.33), 波長変位剤；Amino-G salt |

表 2.5: HKS 側検出器群

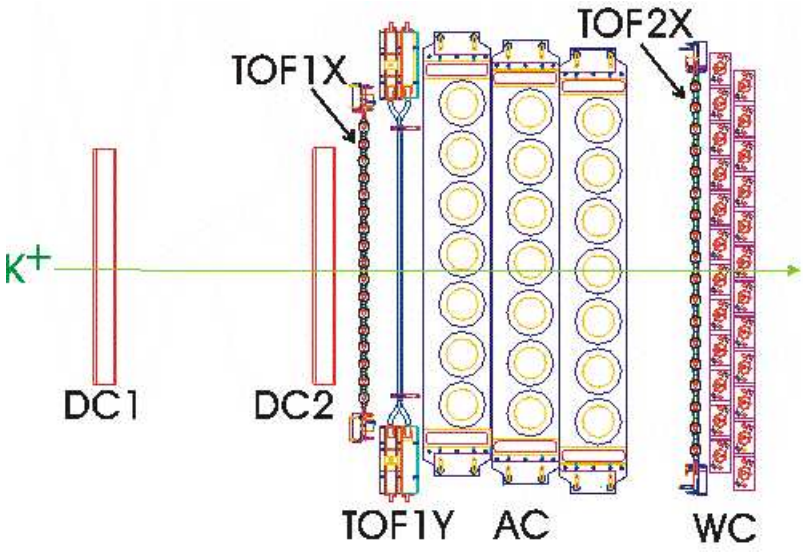



図 2.10: HKS 側 検出器のセットアップ

図 2.10 中の DC1、DC2 は HKS Drift Chamber。TOF1X、TOF1Y、TOF2X は TOF hodoscope。AC は Aerogel Cherenkov 検出器。WC は Water Cherenkov 検出器を表している。また図中の矢印は粒子の入射方向を表している。

### 2.4.1 HKS Drift Chamber

焦点面での粒子の位置及び角度を測定する為に 6 面の drift chamber を 2 台用いる (HDC1、HDC2)。この chamber は E89-009 実験の SOS 側で使用された chamber と同タイプのものであり、前回の実験から位置分解能 150 $\mu$m(rms) の性能を持つことが保証されている [9]。

HDC1 と HDC2 の間は 1 m 離して設置する。各 chamber には、6 面の独立した測定面 (ビームの入射方向から順に U, U', X, X', V, V') があり、計 12 面で測定を行う。図 2.11 に HDC の layer 構造を示す。X 面はビームの dispersion の方向であり、U、V は X に対して其々+30 ° 、−30 ° 傾いている。また右肩に ' がついている面は左右の不定性を解くために半 cell ずらした面を意味しており、U'、V' は其々X' 面に対し +30 ° 、−30 ° 傾いている。HDC1、HDC2 共に動作範囲は 122×30 cm$^2$ であり、各 drift cell は 60 $\mu$m の potential wire と 30 $\mu$m の sense wire が 5 mm 間隔で交互に並んでいる。図 2.12 に HDC の cell 構造について示す。

wire には金メッキされたタングステンを用いている。wire plane 前後には cathode foil が在り、各 cathode foil が 6.35 mm の間隔で並んでいる。cathode foil には 両面に厚さ 1.200Å で Cu コートを施した 0.0005" の Mylar から構成されている。本実験では、Ar+$C_2H_6$ を 50%+50% で用い、各面での Hit position を元に、焦点面での位置及び角度を求める。

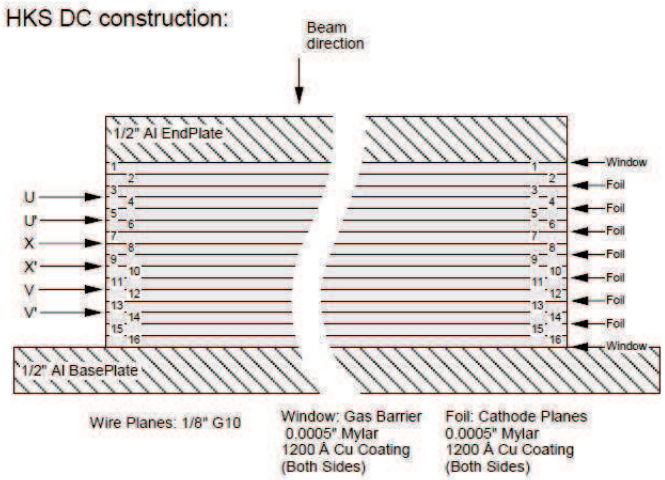



図 2.11: HDC layer 構造

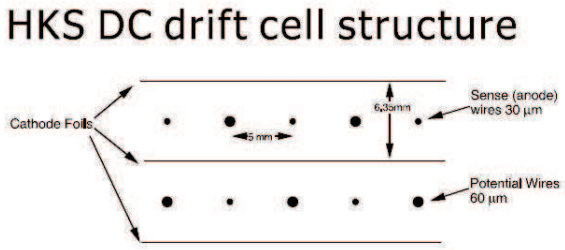



図 2.12: HDC の cell 構造

### 2.4.2 TOF hodoscope

E01-011 実験で使用する HKS TOF hodoscope はプラスチックシンチレーター部分を Bicron 社 BC-408、両端の PMT に Hamamatsu H1949-50 を使用した hodoscope であり、HKS 側で観測される荷電粒子の飛行時間及び timing カウンターとして使用される。図 2.10 で示すように本実験で TOF hodoscope を 3 面で設置し、其々HTF1X; 17 segments , HTF1Y; 9 segments , HTF2X; 18 segments として用いる。また X はビームの dispersion の方向に対し PMT を垂直に設置し (図 2.14)、Y は PMT を水平に設置 (図 2.15) したカウンターであることを意味する。

2.3.2 節で述べたが、E01-011 実験にでは offline において TOF 分布を用いて粒子識別を行う。その為、HTF1X と HTF2X の距離を、HKS 側運動量領域における飛行時間差で $K^+$ と $\pi^+$ が十分弁別できるように取らなければならない。HTF1X と HTF2X の距離を 1.5m にすると、1.35 GeV/$c$ の $K^+$ と $\pi^+$ の飛行時間差は約 310 ps となるため (図 2.13 参照)、TOF 分布において $\pi^+$ と $K^+$ を $4\sigma$ で弁別するには、約 77 ps 以下の分解能が必要となる。

以上の理由から KEK-PS T1 ラインにてテスト実験 (1.2 GeV/$c$ の $\pi^+$) を行った結果、HTF1X と HTF2X 間 (1.5 m の距離を取り) の TOF 分布は 77 ps という分解能を達成し、本実験に於いても $K^+$ と $\pi^+$ を十分弁別できることを示した。

また本実験では、1X と 1Y での Hit から荷電粒子の大まかな位置を求め、それと前方部に設置してある HKS Drift Chamber での情報から求めた track が consistent かどうか見る。

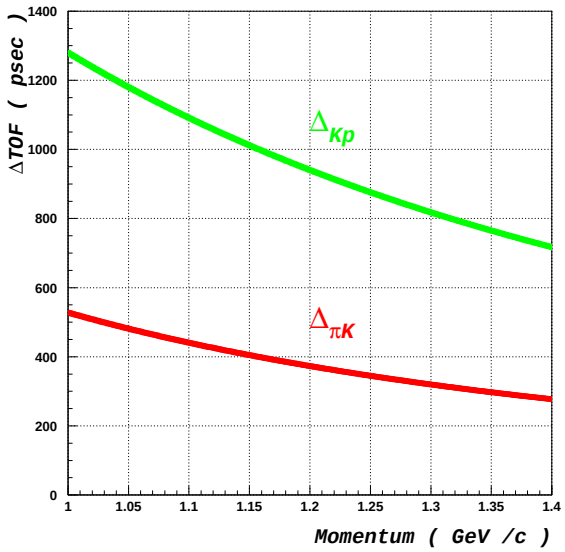



図 2.13: $K^+$/p、$\pi^+/K^+$ での 飛行時間差の運動量依存性

上図は HTF1X と HTF2X 間の距離を 1.5 m とした場合の $K^+$/p、$\pi^+/K^+$ での 飛行時間差の運動量依存性である。横軸; 粒子の Momentum (GeV/$c$)、縦軸; 飛行時間差 (psec )

図 2.13 は緑色の曲線は p と $K^+$ の飛行時間差、赤色の曲線は $\pi^+$ と $K^+$ の飛行時間差と運動量の関係である。この飛行時間差は粒子 i, j の質量を其々$m_i$, $m_j$ とし運動量を $p$ とした場合

$$\Delta TOF_{ij} = (L/c)\{\sqrt{1+(m_i/p)^2} - \sqrt{1+(m_j/p)^2}\ \} \tag{2.6}$$

で求まる。ここで 2.6 式の $L$ は飛行距離、$c$ は光速である。

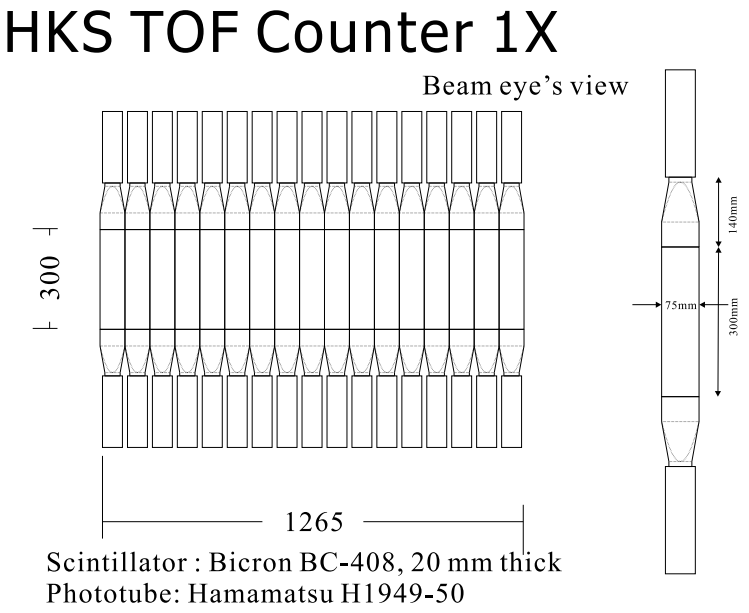



図 2.14: HTF1X の概観及びセットアップ図

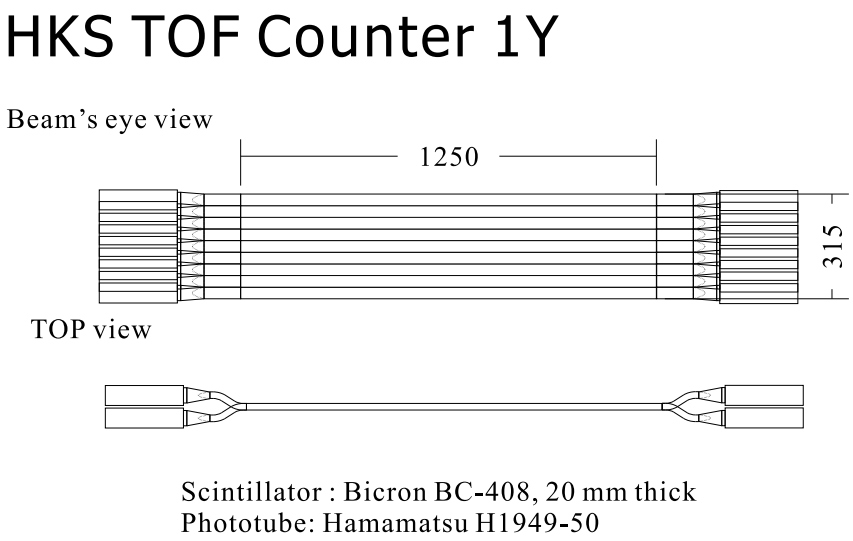



図 2.15: HTF1Y のセットアップ図

### 2.4.3 Aerogel Cherenkov 検出器

$K^+$ と $\pi^+$ の弁別を目的とし、Cherenkov 輻射体に hydrophonic aerogel (屈折率 $n$ = 1.055) を使用する。図 2.16 に E01-011 実験での HKS 側で予測される粒子 ($\pi^+$, $K^+$, p) に対して、Cherenkov 光の発光量 (Number of photoelectron) の運動量依存性を表示する。この図から解るように、hydrophonic aerogel(以下 aerogel) による $K^+$ に対する Momentum の閾値は 1.45 GeV/$c$ となり、HKS 側の運動量領域 1.05〜1.35 GeV/$c$ の領域で Aerogel Cherenkov 検出器による $\pi^+$/$K^+$ 弁別が充分なされる。

E01-011 実験用 Aerogel Cherenkov 検出器には Matushiata Electric Works の hydrophonic aerogel SP-50 を Cherenkov 輻射体とし、上下の PMT に Hamamatsu R1250 及び Photonis XP4572B/D1 を使用する。

図 2.17 で Aerogel Cherenkov 検出器のデザイン及びセットアップ図を表示する。図 2.17 で表示した影付きの部分が Aeogerl Cherenkov 輻射体の本体部である。Aerogel Cherenkov 検出器の内部には $5^H \times 5^W \times 1^T$ cm$^3$ の Aerogel タイルが 5 層重ねで図 2.17 のように敷き詰められ、残りのスペースを使ってタイルがずれぬよう、Aerogel タイルをナイロンワイヤーで固定している。また Aerogel Cherenkov 検出器の内壁部は拡散反射剤として Millipore を使って覆っている。

図 2.10、2.17 で表示するように E01-011 実験では Aerogel Cherenkov 検出器を HTF1Y と HTF2X の間に設置し、ビームの運動量アクセプタンス 1.05〜1.35 GeV/$c$ を全てカバーするよう、Aerogel Cherenkov 検出器を 7 segments、3 面で配置する。また前節で触れたが、本実験では $\pi^+$ に対し suppression factor $10^{-4}$ が必要である。その為我々は 3 面の Aerogel Cherenkov を用い、1 面当たり $\pi^+$ に対して 95% 以上のサプレッション能力を要求する。

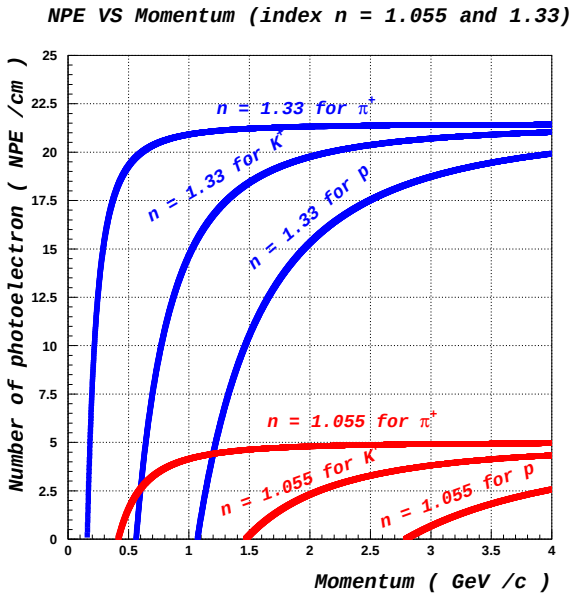



図 2.16: Cherenkov 輻射体を aerogel ( $n$ = 1.055)、water ( $n$ = 1.33) とした場合での $\pi^+$ ,$K^+$ ,p の Cherenkov 発光量の運動量依存性
但し PMT の量子効率を 20% , 集光率を 30% と仮定して光電子数を求めた。計算の詳細は 4.2 節にて述べる。

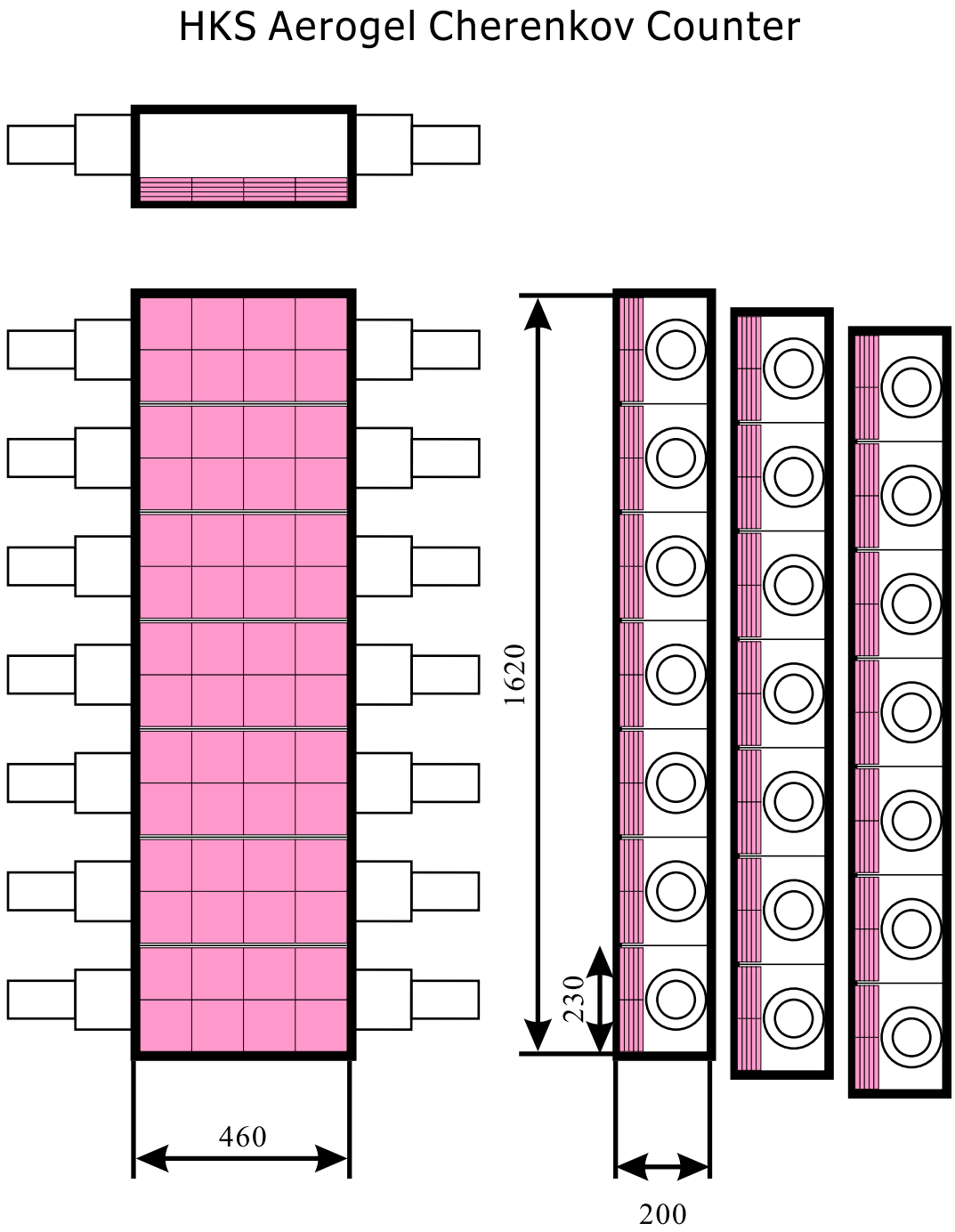



図 2.17: Aerogel Cherenkov 検出器のセットアップ図
図中の単位は mm

### 2.4.4 Water Cherenkov 検出器

$K^+$ と p の弁別を目的とし、チェレンコフ輻射体に純水 (抵抗率 〜 20 MΩ · cm ；屈折率 $n = 1.33$) を使用する。また詳細は４章にて述べるが、チェレンコフ輻射体となる純水に波長変位剤として 7-Amino-1. 3-naphthalenedisulfonic-acid. monopotassium salt hydrate (以下 Amino-G salt) を溶かして使用する。

E01-011 実験では図 2.10 で表示するように WC 検出器を detector 最後方部に設置する。この理由は WC 検出器は物質量が大きい為、WC 検出器より後方部では多重散乱が影響するためである。ビームの運動量アクセプタンス 1.05〜1.35 GeV/$c$ を全てカバーするよう、WC 検出器を 12 segments、2 面で配置する (図 2.18 参照)。また 2.3.2 節で触れたが、本実験では p に対し suppression factor 5 × $10^{-4}$ が必要である。その為我々は２面の WC 検出器を用い、1 面当たり p に対して 97.5% 以上のサプレッション能力を要求する。

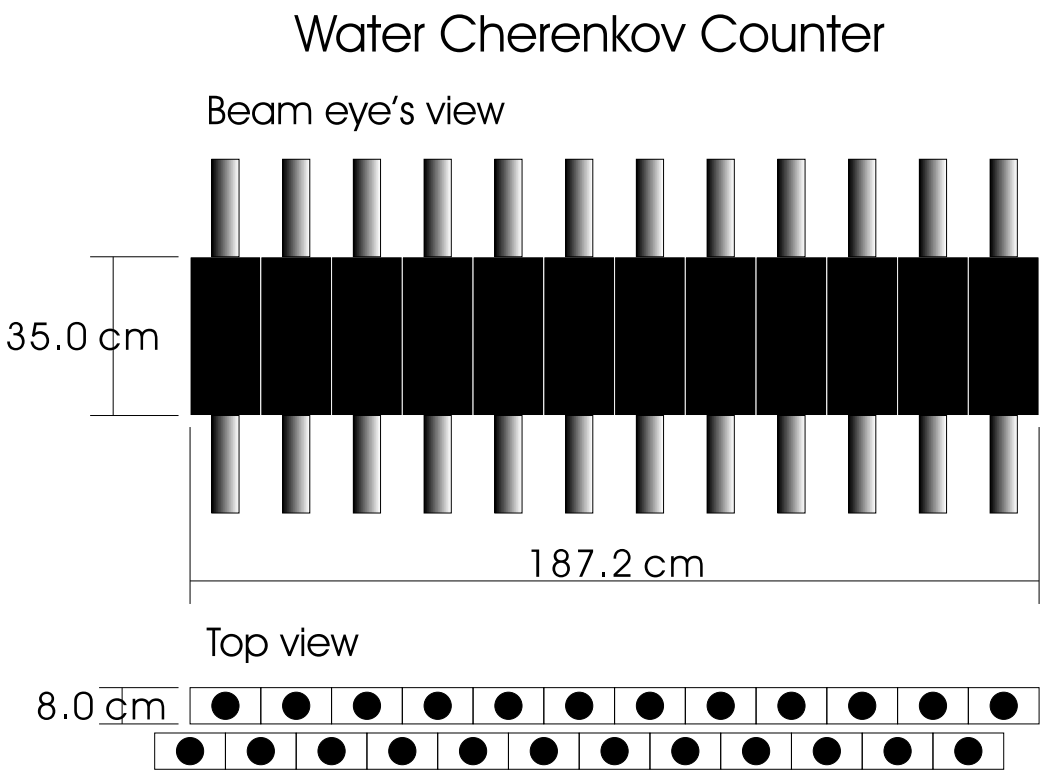



図 2.18: Water Cherenkov 検出器のセットアップ

# 第3章　HKS側 $K^+$ trigger

## 3.1　概要

E01-011 実験における trigger は散乱電子 (Enge) と HKS 側の coincidence を要求する。しかしながら、2.3.2 節で述べたように、HKS 側の singles rate (表 2.4 参照) は非常に高くなることが見積もられる。その為、我々は 2 種類の閾値型 Cherenkov 検出器を用いて trigger level での粒子識別を行う。効率の良いデータ取得の為には、trigger rate を 1 kHz 以下に抑える必要がある。一方で、高計数率の下では偶発的に $\pi^+$ と $K^+$ が同時にくる (以下 accidental coincidence) ことで、AC 検出器によって $K^+$ を veto してしまう事象 (以下このような事象を accidental $K^+$ kill と呼ぶ。) が生じる。この章では accdidental $K^+$ kill をできる限り抑え、” 効率の良い $K^+$ trigger” を作成することに重点をおき議論を進めていく。

## 3.2　$K^+$ trigger

HKS 側では、我々は２種類の閾値型 Cherenkov 検出器 (AC、WC) によって online で粒子識別を行う。2.4 節で述べた述べた検出器群を用いた $K^+$ trigger は

$$K^+\ trigger \;=\; (\overline{AC}) \times (WC) \times (TOF) \tag{3.1}$$

となる。ここで各検出器間の論理式は layer 間の AND 又は OR で作成され最も効率よく veto を行う場合 AC、WC、TOF は其々

$$(AC) \;=\; AC1 \oplus AC2 \oplus AC3 \tag{3.2}$$

$$(WC) \;=\; WC1 \otimes WC2 \tag{3.3}$$

$$(TOF) \;=\; HTF1X \otimes HTF1Y \otimes HTF2X \tag{3.4}$$

のようになる。このような論理を組んだ場合、HKS 側の singles rate は極めて高い為 accidental $K^+$ kill が問題となる。具体例として p、$\pi^+$、$K^+$ の singles rate を表 2.4 を参考に其々150、500、0.3 kHz とし、TOF のゲート幅 20 nsec、 WC のゲート幅 20 nsec、veto で使用する AC のゲート幅を 100 nsec とした場合、accidental $K^+$ kill の rate は

$$\begin{aligned}(\ accidental\ K^+\ kill\ rate) &= (\ 500 \times 10^3\ \ [\mathrm{Hz}]\ ) \times (\ 300\ \ [\mathrm{Hz}]\ ) \times (\ 100 \times 10^{-9}\ \ [\mathrm{sec}]\ ) \\ &= 15\ \ [Hz] \end{aligned} \tag{3.5}$$

となる。このように accidental coincidence によって約 5% の $K^+$ を見逃すことになる。我々はこのような accidenta $K^+$ kill ratio をできる限り減らすことを考えて $K^+$ trigger を作成しなければならない。

accidental $K^+$ kill ratio を抑止する方法として、GEANT モンテカルロシミュレーションで得られた検出器に対する粒子の hit position が水平方向に強い相関関係 (図 3.2 参照) を持つことに注目した。すなわち HKS 側の検出器をいくつかの segment に分けることで、グループ単位で trigger を作成する。この場合、全検出器を 1 つのグループとし trigger を形成する時と比較し、singles rate を実質的に抑え、accidental $K^+$ kill ratio を減少させることができる。

また粒子の飛跡に対して水平方向に検出器のグループを形成すれば、図 3.1 に示すようにグループ毎に入射する粒子の Momentum がある程度決まってくる。その為、グループ毎に Cherenkov 検出器の threshold を設定することで、効率よく $K^+$ を選び出すことができる。

しかし、このようなグループ分けを従来の NIM モジュールを使用して形成した場合、大量のモジュールを必要とし、配線も複雑となる為、グループパターンの変更が困難となる。このような理由から、我々は新に開発したプログラムによって容易に論理を変更できるモジュール”TUL-8040” を使用する。そしてこのモジュール内でグループ分けを行い、$K^+$ trigger の作成を行う。

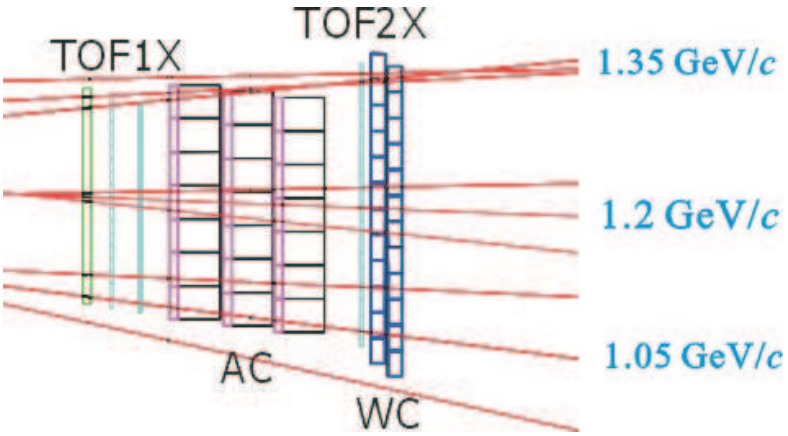



図 3.1: GEANT モンテカルロシュミレーションから得られた HKS 側での粒子の軌道
各 momentum 毎に target での散乱角が (7−2.7) ° ,7 ° ,(7+2.7) ° の 3 本の軌道を表す

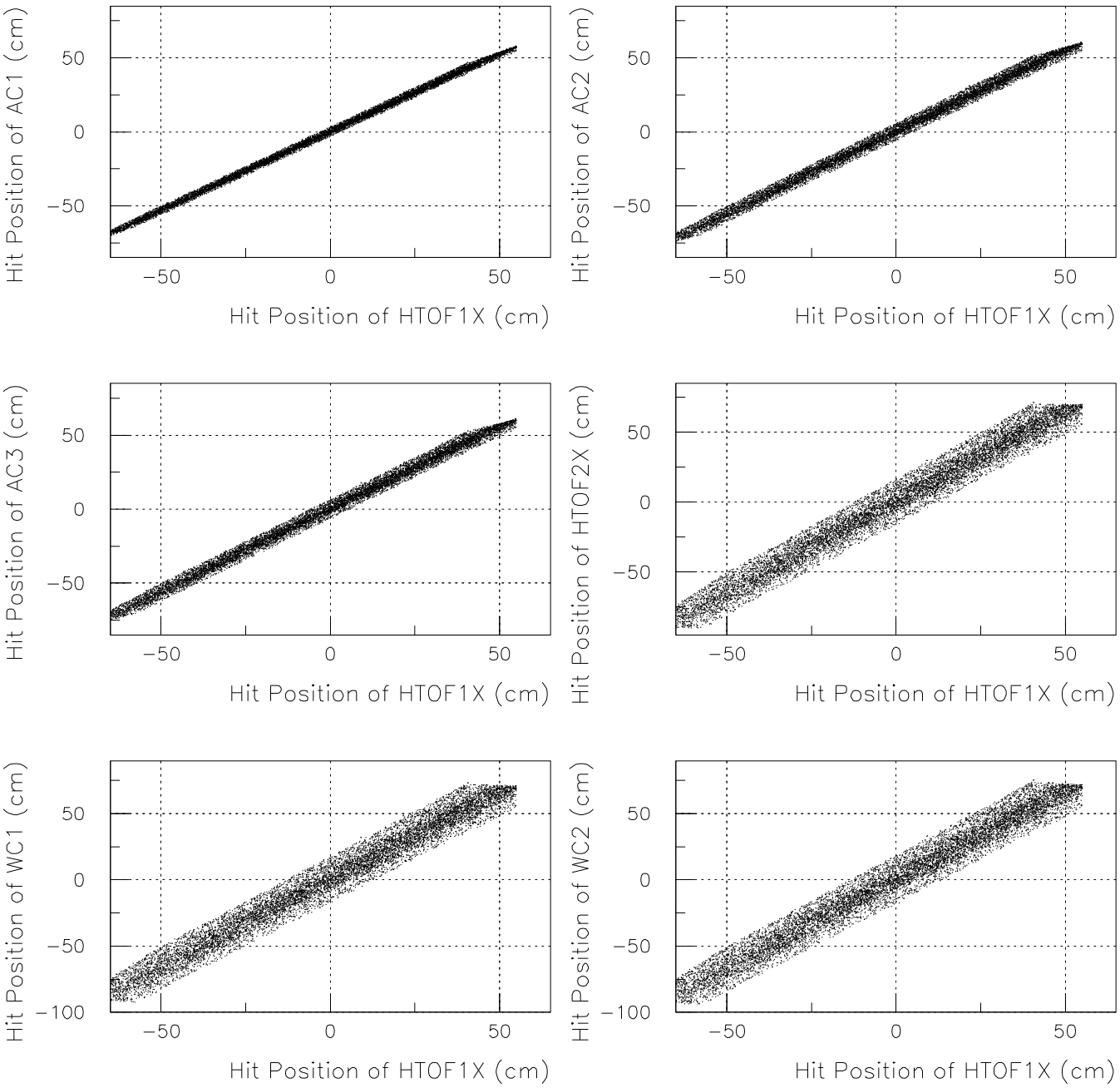



図 3.2: 各検出器の位置での水平方向の相関
横軸；HTF1X での水平方向の位置 (cm)、縦軸；左上から AC1、AC2、AC3、HTF2X、WC1、WC2 での水平方向の hit position (cm)

## 3.3 TUL-8040 モジュール

TUL-8040(以下 TUL ) は FPGA[1](Field Programmable Gate Array) を搭載した汎用モジュールである。TUL には ALTERA 社の APEX 20K シリーズの FPGA が搭載されている。この FPGA は 10000 個を越える論理素子を持っており、僅か 1 台で数十台の NIM module と同等な機能を持つ。TUL 上には 33 MHz の発振器を備えており、FPGA の clock boost 機能を用いることで、最高 300 MHz までの内部 clock を作ることができる。この機能により同期式論理回路の持つ jitter を、約 3.3 ns にまで抑えることが可能である。

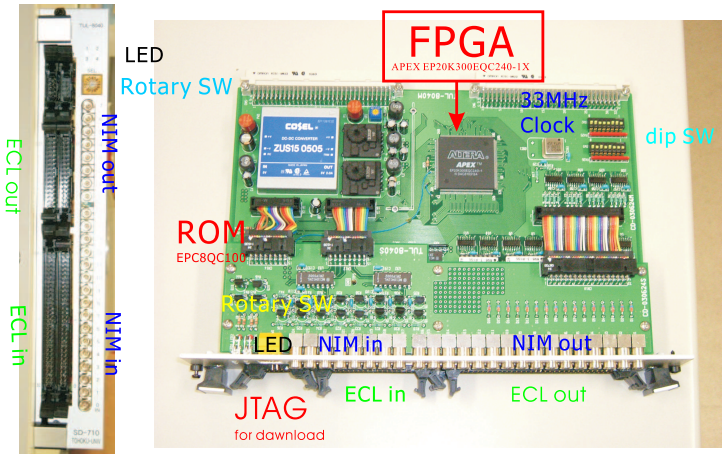



図 3.3: TUL-8040 モジュール

## 3.4 グループ分けによる trigger level での粒子識別

この節ではグループ分けよる各検出器の trigger logic について説明する。またその logic を用いた $K^+$、p、$\pi^+$ trigger についてまとめる。

グループ分けの部分は、3.2 節で触れたように新しい汎用トリガーモジュール TUL を用いて作成する。TUL を用いることにより、trigger logic の自由度が格段に増え実用性の高いグループ分け trigger を構築することが可能となる。TUL を用いた、グループ分けの論理は同期式で行う為、TUL からの出力は 1 clock 分 (〜3 nsec) の幅を持っている。しかし、trigger 作成後にグループ分けに関係しない HTF1Y と coincidence をとり timing を決定すれば、この jitter を抑える事ができる。

[1]書き換え可能な大規模集積回路。利用者はソフトウェアで設計、シュミレーションを行う事ができる。FPGA には小さな論理ブロックを組合せ、チップ内部の自由な配線領域で接続することにより非常に自由かつ大規模で高速な回路を実現可能とする。そして何度でも回路を消去して書き換えられるソフトウェア的な要素を持つ [19]。
また FPGA は既に原子核実験で使用され、充分な実績がある [20][21]。

### 3.4.1 TOF trigger logic

TOF hodoscope は HTF1X( 縦に 17 segments )、HTF1Y( 横に 9 segments ) 及び HTF2X( 縦に 18 segments ) の合計 3 面からなる。各 hodoscope には両端に PMT が使用されている。この内 HTF1Y は図 2.15 のように上下にセグメント化されている為、グループ分けに関係しない。

TOF hodoscope で使用する PMT ; Hamamatsu H1949-50 は 2 つの output を持つ。一方はアナログ情報を取得する為、直接 counting House に送り ADC に入れる。もう一方の信号は時間情報の収集及び trigger に使用する。ノイズによる時間分解能の悪化を避ける為、Hall 内でまず discriminator を用いて論理 pulse に変換し counting house に送る。その後長距離の信号伝搬により鈍った pulse を整形する為、counting house で再度 discriminator に通し、TDC やスケーラーまた trigger 作成の為 TUL に入れる。

TUL の内部では、まず上下の PMT の平均時間をとり、その後グループ分けを行う (図 3.3 参照)。また平均時間のとり方は、clock を使用せず、素子の遅れに依存して動作を逐次進める非同期式で行い、グループ分けでは TUL の内部 clock を用い同期式によって作成を行う。但し、HTF1Y は非同期で平均時間をとった後に 9 本の論理和を非同期でとる。図 3.4 に TOF trigger logic の図を表示する。

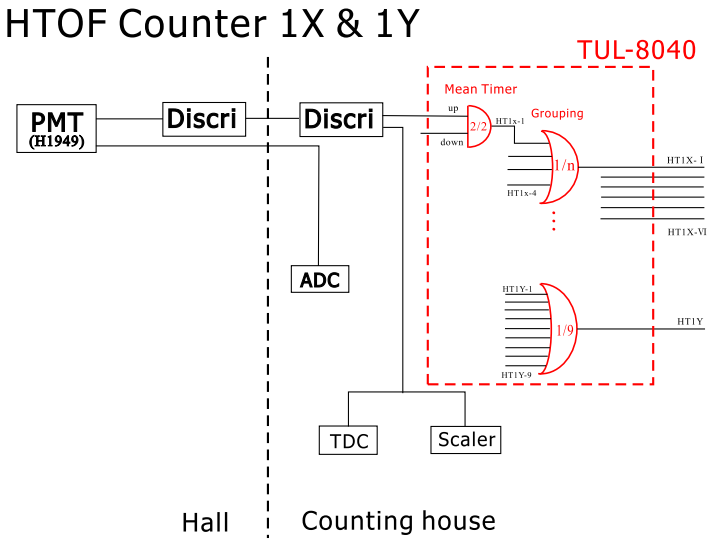



図 3.4: TOF グループ分け

### 3.4.2 AC trigger logic

2.4.3 節で述べた様に Aerogel Cherenkov 検出器は 3 面から構成され、各 layer にはそれぞれ 7 個の検出器がある。検出器の上下其々に、Hamamatsu R1250 または Photonis XP4752B/D が使用される。この PMT は output が 1 つしか存在しない為、PMT からの出力を counting house に送った後、Splitter によって pulse を 2 つに分ける。その内 1 つは ADC に入れ、もう一方の信号は discriminator を用いて論理 pulse に変換する。論理 pulse はその後データ収集の為に TDC と Scaler に、また trigger 作成の為に TUL に入れグループ分けを行う。

AC の $V_{th}$(discriminator の threshold) は dark current 付近に設定する為、TUL 内ではまず上下の PMT の論理積を要求する。その後、layer 単位でグループ分けを行った後、各グループごとに N/3( N は 3 つの入力のうち N 個の論理和を意味する。 ) の coincidence を要求する。ここで N = 1 にした場合、最も効率良く $\pi^+$ を抑えることが可能となる。しかし $K^+$ の kill rate が高くなった場合、$K^+$ の kill rate を抑止する為 TUL 内部で N = 1, 2, 3 と容易に調整を行えるようにした。図 3.5 には AC trigger logic の図を表示する。

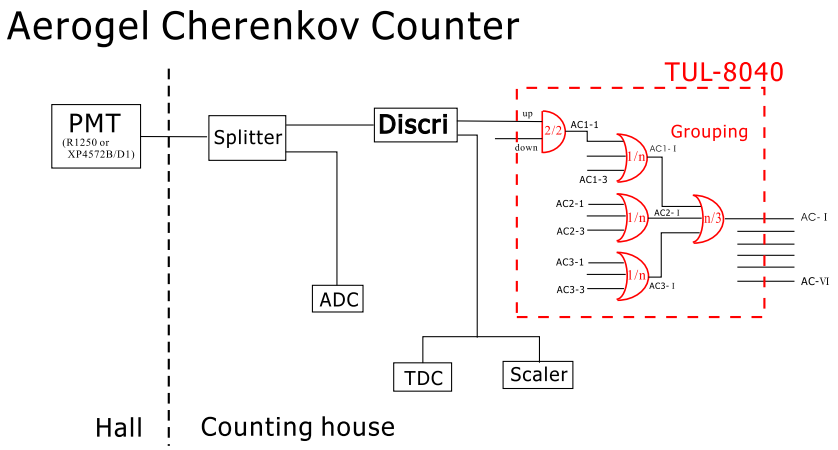



図 3.5: AC グループ分け

### 3.4.3 WC trigger logic

2.4.4 節で述べた様に WC 検出器は 2 面から構成され、各 layer にはそれぞれ 12 個の検出器からなる。各検出器には、PMT ; Hamamatsu H7195 が取り付けてある。PMT 出力 pulse の内、一方は直接 counting house に送り ADC の情報を収集し、もう一方の信号は TDC と trigger に使用するため、discriminator で論理 pulse に変換する。その後データ収集の為 TDC と Scaler に、また trigger 作成の為に TUL に入れグループ分けに使用する。

TUL 内では上下の PMT の論理積を取る。その後、layer 単位でグループ分けを行った後、各グループごとに N/2( N は 2 つの出力のうち N 個の論理積を意味する。) の coincidence を要求する。その為 N = 2 にした場合、WC で最も効率良く p を抑えることが可能となる。しかし p rejection のために設定する threshold によって $K^+$ kill ratio が高くなった場合、この $K^+$ kill ratio の抑制を行うため、AC 同様に TUL 内部で N = 1, 2 と随時調節を行えるようにした。図 3.6 には WC trigger logic

の図を表示する。

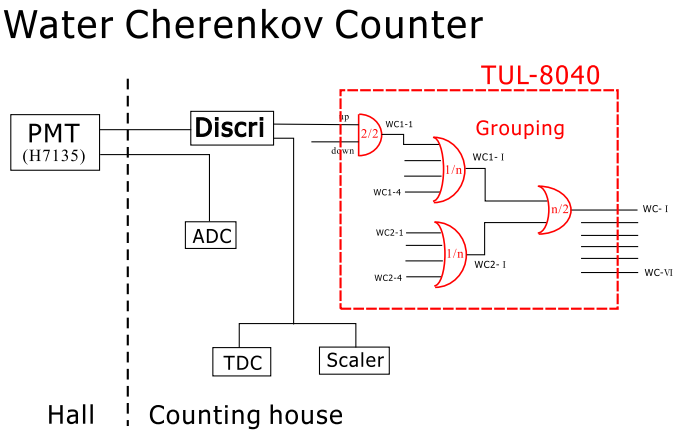



図 3.6: WC グループ分け

### 3.4.4 Trigger level での粒子識別

HKS 側の運動量領域に於いて、AC 検出器 ( $n$=1.055 ) では $\pi^+$ にのみ Cherenkov 光が発生するが ( 図 2.16 参照 )、WC 検出器では $\pi^+$、$K^+$、p 全ての粒子で Cherenkov 光が生じる。しかし図 2.16 に示すように、p、$K^+$ による Cherenkov 光の発光量には差がある為、discriminator の $V_{th}$ を最適化することにより p と $K^+$ の弁別 ($K^+$ の方が p より発光量が大きい) が可能である。我々はグループ分けした後に、各 Cherenkov 検出器の情報を用い trigger level で粒子識別を行う。この節では $K^+$、$\pi^+$、p の trigger を具体的に示す。また Cherenkov 検出器の発光パターンによる各粒子の識別を表 3.1 にまとめる。

#### a) $K^+$ trigger

$K^+$ は AC 検出器からの信号はないが、WC 検出器では $V_{th}$ 以上の発光量がある。その為、$K^+$ trigger を作成は、TOF と WC の coincidence をとり AC を veto として使用する。図 3.8 に $K^+$ を識別するための trigger logic を表示する。

#### b) $\pi^+$ trigger

$\pi^+$ の場合 AC、WC 双方検出器で発光し、また WC 検出器でも threshold 以上の発光量となる。但し、Aerogel Cherenkov 検出器は $\pi^+$、$K^+$、p の内 $\pi^+$ でのみ発光する。その為、$\pi^+$ を識別するには AC と TOF の論理積をとれば良い。また図 3.9 に $\pi^+$ を識別するための trigger logic を表示する。

**c) proton trigger**

p の場合 AC、WC 検出器双方から信号はない。その為、p を識別するには HTF1X と HTF2X の論理積を取る際に、WC と AC の論理和を veto として使用する。図 3.10 に p を識別するための trigger logic を表示する。

| particle | $\pi^+$ | $K^+$ | p |
|---|---|---|---|
| AC | yes | no | no |
| WC | yes | yes | no |

表 3.1: Cherenkov 検出器を用いた粒子識別

## 3.5　3 章まとめ

E01-011 実験において、HKS 側で見積もられる singles rate は表 2.4 に示すように非常に高い。その為表 2.4 を参考にし、$K^+$ trigger を (3.1) 式の基、以下のような条件

1. p、$\pi^+$、$K^+$ の singles rate を其々150、500、0.3 kHz

2. TOF のゲート幅 20 nsec、WC のゲート幅 20nsec、veto で使用する AC のゲート幅を 100 nsec

を課した場合、accidental $K^+$ kill rate は 15 Hz となり、kill ratio は約 5 % となる。このような理由から、$K^+$ trigger に於いて accidental $K^+$ kill ratio をできる限り減らす方法が必要となる。

我々は、GEANT モンテカルロシミュレーションで得られた検出器に対する粒子の hit position が水平方向に強い相関関係を持つことに注目し、accidental kill を抑制する方法として、HKS 側の検出器をいくつかの segment に分けることで、グループ単位で trigger を作成し、accidental $K^+$ kill ratio を減少させる。

この際、グループ単位での trigger を作成する為に、新たに開発した FPGA を搭載した VME モジュール TUL を使用する。AC、WC、TOF のグループごとによる trigger を作成し最終的に図 3.8 に示すような $K^+$ の trigger 組む。

その結果 1、２の条件で、もし 6 つのグループに分けた場合、図 3.7 で示すようにグールプごとに重複した領域が入っていることを考慮に入れても、グループ内での実効的な singles rate は表 2.4 に表示した値の約 1/4 となり、グループ当たりの accidental $K^+$kill rate は

$$\begin{aligned}(\,accidental\ K^+\ kill\ rate\ /\ group) &= (\,125\times10^3\ \ [\mathrm{Hz}]\,)\times(\,75\ \ [\mathrm{Hz}]\,)\times(\,100\times10^{-9}\ \ [\mathrm{sec}]\,)\\ &\approx 0.95\ \ [\mathrm{Hz}] \qquad (3.6)\end{aligned}$$

のようになる。ここで $K^+$ の singles rate は非常に小さく $K^+$ が 2 個以上同時に来るとは考え難い。このような条件を考慮すれば、$K^+$ trigger 全体における accidental $K^+$ kill rate は約 0.95 Hz となり、accidental $K^+$ kill ratio は約 0.3% まで抑制することができる。

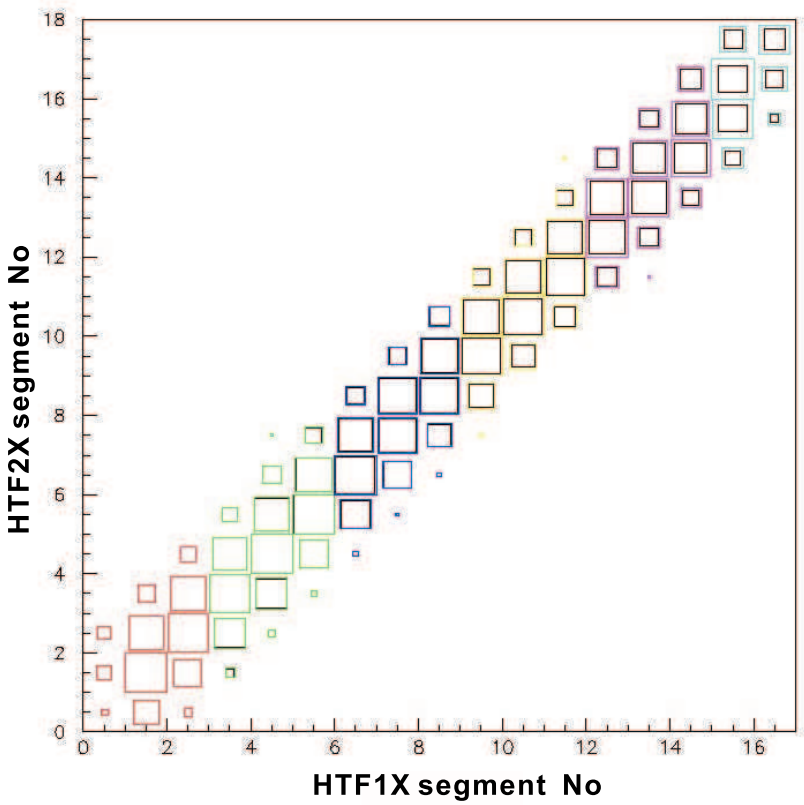



図 3.7: グループ分けによる HTF1X と HTF2X の segments 間における相関

GEANT シミレーションから求めた HTF1X と HTF2X 間の hit position(図 3.2 参照) に基づき、6 グループにした場合での、HTF1X と HTF2X の segments 間の相関図。横軸は HTF1X の segment No.、縦軸は HTF2X の segment No. である。また赤、緑、青、黄、ピンク、水色は其々グループ 1、2、3、4、5、6 を意味している。このグループ分けの場合、シミュレーション結果から、HTF1X の No. 1〜No. 3 に対応する HTF2X は No. 1〜No. 5 まで含まれる (グループ 1)。また HTF1X の No. 4〜6 に対応する HTF2X は No. 2〜7 まで含まれる。このようにグループ間に segment の重複がある為、グループ当たりの singles rate を考えるとき、この重複を考慮しなければならない。6 グループに分けた場合、重複を考慮しなければ 1 グループ当たりの singles rate は表 2.4 の 1/6 となるが、実際は重複がある為にグループ当たりの実効的な singles rate は約 1/4 となる。

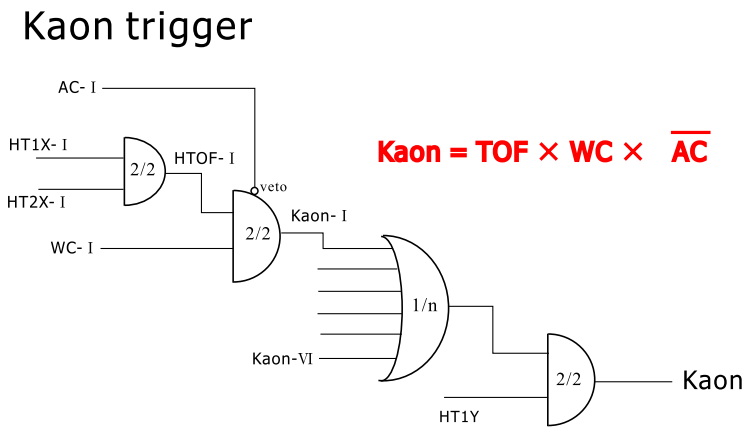



図 3.8: $K^+$ trigger logic

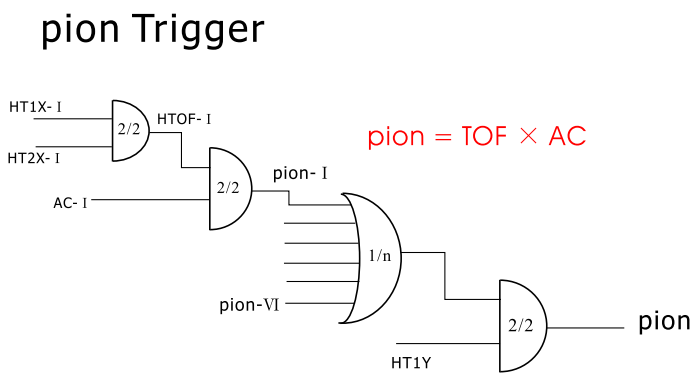



図 3.9: $\pi^+$ trigger logic

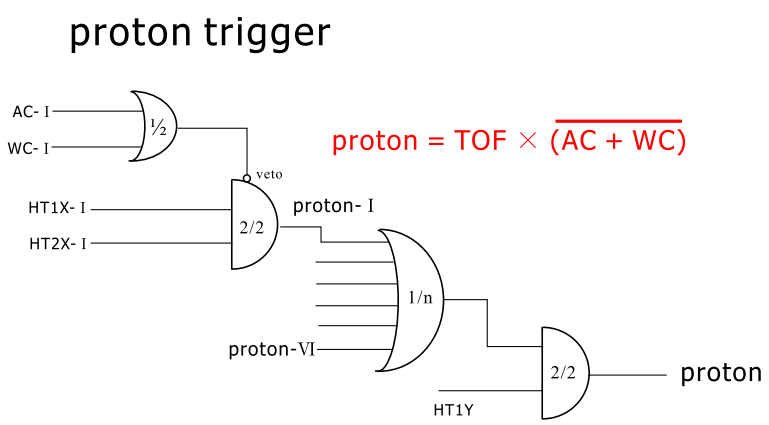



図 3.10: p trigger logic

# 第4章　E01-011実験 $K^+/p$ 弁別用 WC検出器

## 4.1　概要

E01-011 実験では Enge Spectoromater 全体を Tilt 法により最適に配置することで、E89-009 実験と比較しビーム強度を 50 倍、ターゲットの厚さ 5 倍にすることが可能となる。しかしながら、これに伴い HKS 側では $\pi^+$、p といったバックグラウンドの singles rate が非常に高くなると予想される (表 2.4)。このため HKS 側では trigger level において非常に精度の良い粒子弁別が必要となり、そのうち $K^+/p$ 弁別は、閾値型の WC 検出器を２面で使用する。WC 検出器 1 面あたりにおいて p のサプレッションに 97.5 % 以上 の性能を要求するが、WC 検出器では p rejection に伴い $K^+$ を落としてしまう事象が生じる。我々は、WC 検出器の $K^+/p$ 弁別性能を向上させることでこのような $K^+$kill をできる限り抑える。

この章では本実験で使用する WC 検出器の開発経緯と WC 検出器の $K^+/p$ 弁別性能の向上を目指し、２００４年６月に KEK-PS の T1 ラインで行った実験 (T554 実験)、及び実機を用いて行った宇宙線測定の結果から、WC 検出器の改良すべき点について議論する。

## 4.2　Cherenkov 検出器の機構

Cherenkov 検出器は、荷電粒子が屈折率；$n$ の物質中での光の速度 $c/n$ より速い速度 $\upsilon > c/n$ ；($\upsilon = \beta c$) で通過する場合に発生する Cherenkov 光を捕らえることで粒子検出を行う。我々が用いる閾値型の Cherenkov 検出器の場合、$\upsilon > c/n$ の条件で荷電粒子の速度 $\upsilon$ に閾値が設けられる。その為識別したい粒子の速度に応じて、合致する屈折率を持つ物質を使用する。

Cherenkov 輻射の波面は荷電粒子の荷電粒子の通過直線上から発生する球状ホイヘンス波として形成され (図 4.1 参照)、Cherenkov 波の放射される方向と荷電粒子の進行方向とのなす角 (Cherenkov 角) は

$$\cos\theta_c = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n} \tag{4.1}$$

また輻射体長さ $l$ に対して発生する Cherenkov 光の波長 $\lambda$ が十分小さい場合、波長 $\lambda_1$ から $\lambda_2$ の間に放出される Cherenkov 光の単位長さあたりの光子数 $dN/dl$ は

$$\frac{dN}{dl} = 2\pi\alpha \sin^2\theta_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \qquad (\alpha;\ \text{微細構造定数}) \tag{4.2}$$

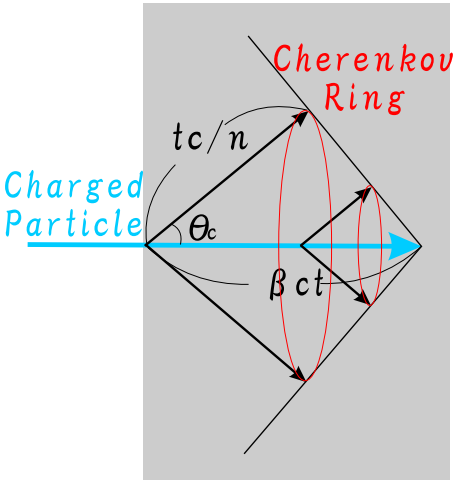



図 4.1: Cherenkov 放射

Cherenkov 光はホイヘンスの原理によって荷電粒子の進行方向の角度 $\theta_c$ で円錐状で伝搬していく

で与えられる。さらに Cherenkov 検出器の集光効率 $\varepsilon_{coll}$ と PMT の量子効率 $\varepsilon_{det}$ の効果を考慮すると 4.2 式は

$$\frac{dN}{dl} = 2\pi\alpha \sin^2\theta_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \varepsilon_{coll}(\lambda)\varepsilon_{det}(\lambda) \tag{4.3}$$

となる [34]。

ここで、図 4.2 に示す PMT の分光感度曲線から本稿では PMT の有効感度波長を 300 nm～650 nm とし、また Cherenkov 検出器の集光効率 $\varepsilon_{coll}$、PMT の量子効率 $\varepsilon_{det}$ を其々 $\varepsilon_{coll}$ = 20%、$\varepsilon_{det}$ = 30% と仮定する。本稿ではこのような仮定の基に計算した、Cherenkov 発光量と運動量依存性を図 2.16、4.12、4.22 に示した。

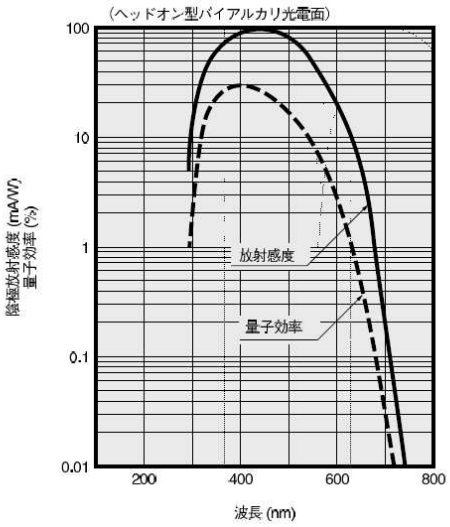



図 4.2: PMT の分光感度特性 [22]

## 4.3　E01-011 実験用 WC 検出器の構成

表 4.1 に E01-011 実験で使用する WC 検出器の構成をまとめる。E01-011 実験で用いる WC 検出器は、内壁、外壁部に反射率が非常に高い” 三菱レイヨン アクリライトスノーホワイト ＃402” という一枚板のアクリルを使用している。図 4.3 にスノーホワイトの反射率を表示する。この測定では入射光の波長を変化させてスノーホワイトを照射し、スノーホワイトの反射率を測定した。また図 4.3 下部には PMT の有効感度波長領域 (300nm〜650nm) を表示している。

この結果から PMT の有効感度領域の波長を持つ光に対しスノーホワイトは反射率が最大で 94.5%、透過率は最大で 3.0% となり光量の損失を防ぐのに適した素材であることが分かった。

| | |
|---|---|
| size | $35^H \times 15.6^W \times 8^T$ cm |
| 容器の材質 | 3 mm 厚の白色アクリル<br>三菱レイヨン アクリライトスノーホワイト ＃402 |
| PMT を接着する窓の材質 | 3 mm 厚の透明アクリル<br>三菱レイヨン JTV アクリル |
| PMT | Hamamatsu H7195 |
| Cherenkov 輻射体 | 純水 (屈折率 $n$ = 1.33 ; 抵抗率 〜20 MΩ・cm )<br>波長変位剤；Amino-G salt |
| 遮光剤 | エツミ ブラックカーテン |

表 4.1: E01-011 実験用 WC 検出器の構成

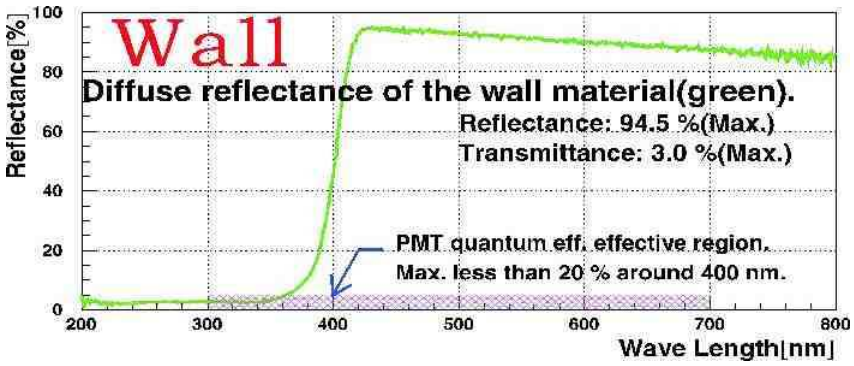



図 4.3: WC 検出器壁面；スノーホワイトの反射率と PMT の分光感度の関係

また２００２年に KEK-PS の T1 ラインでの実験 (T530 実験) において、Cherenkov 輻射体である純水に Umbelliferone と Amino-G salt[1]を溶かし、HKS 側の運動量 (1.2 GeV /$c$) において $K^+$/p 弁別性能を比較した結果、弁別性能及び取扱い易さから Amino-G salt が WC 検出器に適していることが分かった。またこの際検出器の位置依存性や角度依存性はたいしてないことが実験から分かった [24],[25],[26],[27],[29]。

[1]付録 A

## 4.4　T554 実験

我々は E01-011 実験での実機による $K^+/p$ 弁別性能の向上を目的とし、２００４年６月に KEK-PS の T1 ラインにてテスト実験を行った (T554)。T554 実験では、波長変位剤；Amino-G salt の濃度を変えながら、WC 検出器を HKS の運動量アクセプタンスとマッチさせた運動量 1.05、1.2、1.35 GeV/$c$ の $K^+$、p、$\pi^+$、d が混在するハドロンビームに曝し、$K^+/p$ 弁別性能の濃度依存性及び、E01-011 実験での Amino-G salt の最適濃度を検証した。

### 4.4.1　T554 実験セット アップ

T554 実験のセットアップ図及び detector package を図 4.4、表 4.2 に表示する。

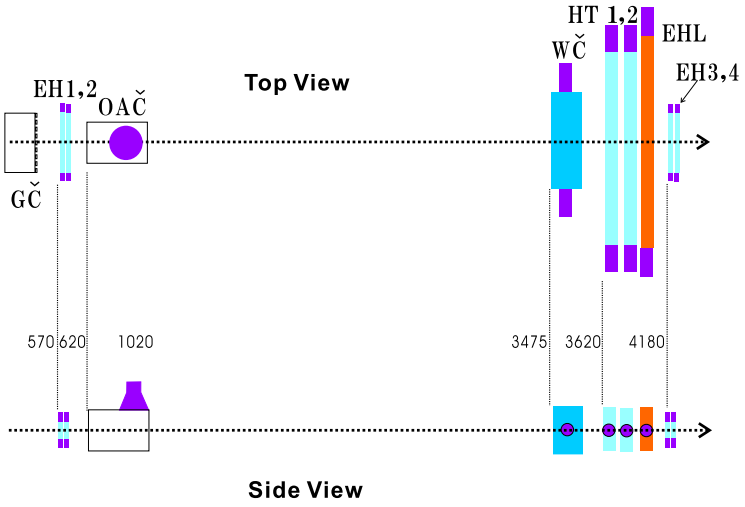



図 4.4: T554 実験のセットアップ図

EH、HT はそれぞれ timing counter( plastic scintillator ) を表し、WC は Water Cherenkov、OAC は Aerogel Cherenkov を意味する。

| name | size | memo |
|---|---|---|
| EH1,2,3,4 | $12^H \times 4^W \times 0.6^T$ cm | BC-418, PMT ; R3784 |
| HT1,2 | $30^H \times 75^W \times 2^T$ cm | BC-408, PMT ; H1949-50 |
| EHL | $3^H \times 140^W \times 2^T$ cm | RX-408 PMT;H7195 |
| Aerogel Cherenkov | $11^H \times 11^W \times 25^T$ cm | PMT;R1250 |
| OAC | | radiator;hydrophonic aerogel ( n = 1.055) |
| Water Cherenkov | $35^H \times 185^W \times 8^T$ cm | PMT;H7195 |
| WC1,WC2 | | radiator;water ($n$ = 1.33), 波長変位剤；Amino-G salt |

表 4.2: T554 実験 検出器群

T554 実験では実験の都合上、２台 (WC1、WC2) の WC 検出器 (表 4.2) を交互に用い測定を行った。これにより検出器 (WC1、WC2) ごとの特性を打ち消す為、同じ濃度で測定したデータを用いて Normalize を行った。

E01-011 実験では、HKS 側の中心運動量 1.2 GeV/$c$、運動量アクセプタンス± 12.5 %となることから、T554 実験では運動量 1.05 、1.2 、1.35 GeV /$c$ のハドロンビーム (p、$\pi^+$、$K^+$、d など) を WC 検出器に曝した。また WC 検出器の Cherenkov 輻射体である純水 ( 屈折率 $n$ = 1.33 ; 抵抗率 ～ 20 MΩ・cm ) に Amino-G salt を溶かし、濃度を 0、1、2、6、8、10、16、20、25、30、35、50、100、500、1000、2000 mg/$l$ の計 16 点で測定を行った。

また我々は、前述のセットアップ以外に、検出器側面の反射率の向上を目的として、WC 検出器機 (図 4.6) に、より反射率の高い fluorotrans[2]を図 4.7 のように巻き、Amino-G salt 濃度 20 mg/$l$ にて fluorotrans を巻いた場合と、巻かなかった場合との比較を行った。

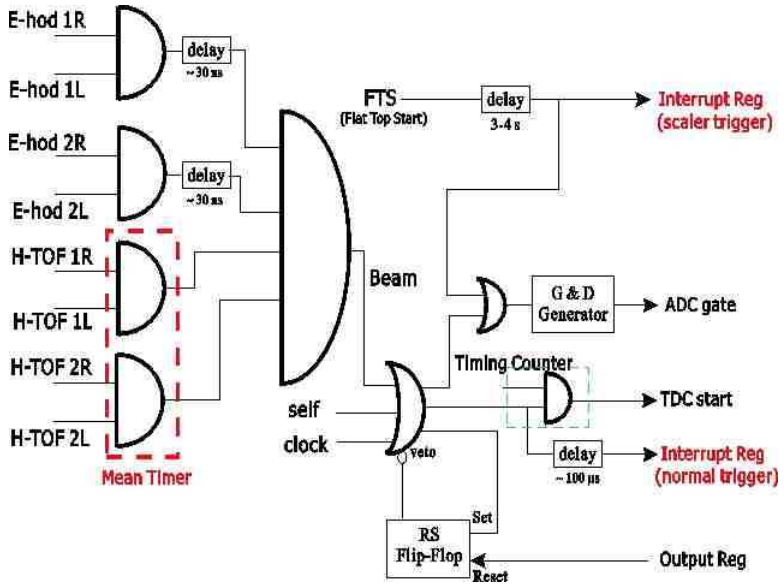



図 4.5: T554 trigger logic

trigger には、ビーム上流側に設置した EH1,2 シンチレーションカウンターと下流側の HT1,2 シンチレーションカウンターの coincidence で作成した。また trigger は上流側 EH1 で決まるよう調整した。

[2]PMT の有効波長領域 (図 4.2 参照) にわたって反射率が高い。もとはタンパク質検出用のろ紙なので、丈夫であり水にも溶けない為扱い易い [28]。

図 4.6: WC 検出器の概観図
遮光する前の WC 検出器。WC 検出器は使用する際、遮光する為、検出器の外側にブラックカーテンを巻く。

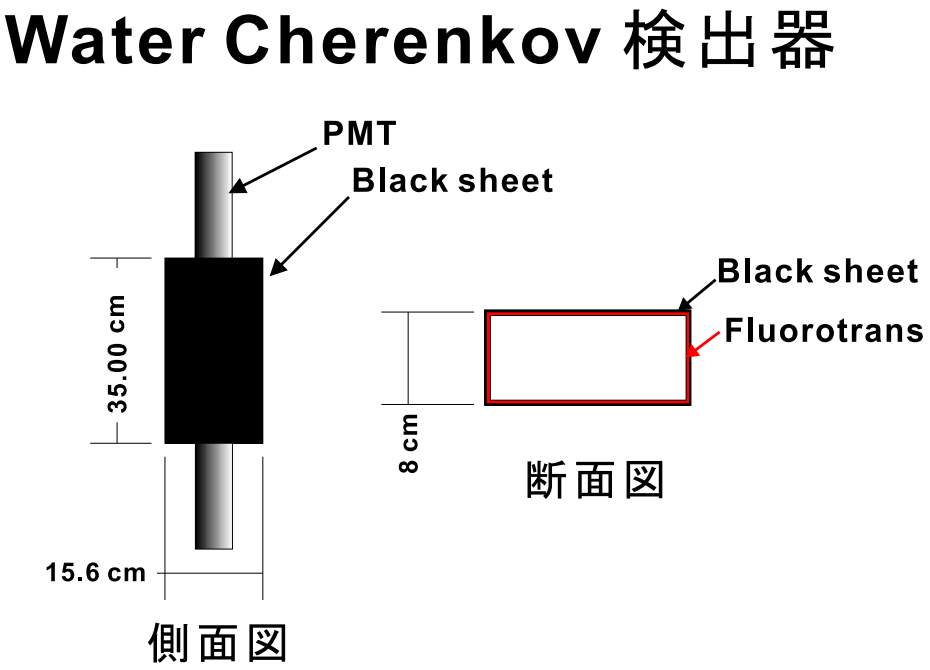



図 4.7: WC 検出器の外壁部に fluorotrans を巻いた図
外壁部に fluorotrans を巻き、その上に遮光用のブラックカーテンを巻く。

### 4.4.2　解析方法

**a) Particle ID　(粒子識別)**

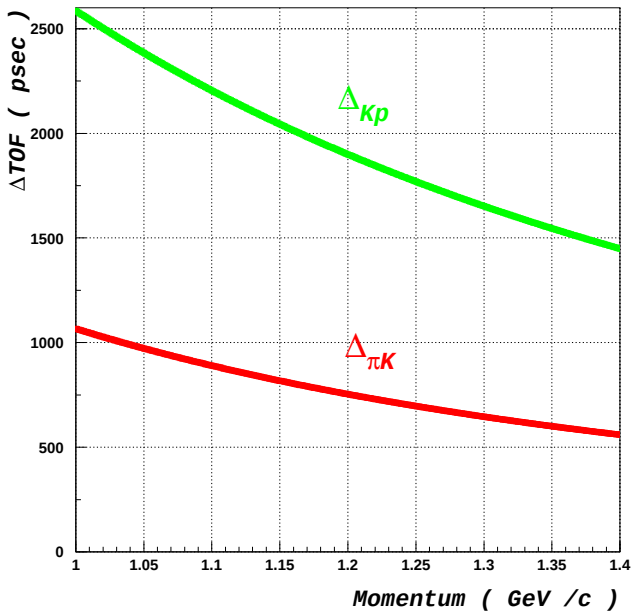



図 4.8: $K^+$/p、$\pi^+$/$K^+$ での飛行時間差と運動量依存性
上図は距離 3.03m に於ける赤曲線；$\pi^+$ と $K^+$、緑曲線；p と $K^+$ の飛行時間差と運動量の関係 (2.6 式参照) である。縦 軸; 飛行時間差 (psec)、横軸; 運動量 (GeV/$c$)

今回我々は図 4.4 の上流側の EHOD2 と下流側との HTOF1 の Time of flight(以下 TOF 1), 上流側の EHOD2 と下流側の HTOF2 との Time of flight(以下 TOF 2) を用い Particle ID の作成を試みた。図 4.8 は TOF1(カウンター間の距離 3.03 m) での Time of flight と運動量の関係である。図 4.8 から Momentum 1.35 GeV/$c$ において $\pi^+$ と $K^+$、p と $K^+$ の飛行時間差は其々0.60 nsec、1.65 nsec となる。ここで TOF 1 分布において $K^+$ と $\pi^+$ を 3$\sigma$ で弁別を行う為には、約 200 ps 以下の分解能が必要となる。我々が使用した HTOF1、HTOF2 には 2.4.2 節で述べた HKS TOF hodoscope を使用した為、分解能として $\sigma$= 77 psec が期待でき、$\pi^+$/$K^+$ 弁別は十分おこなえると考えられた。

しかし、解析を行ったところ TOF1、TOF2 だけで粒子識別した結果 $\pi^+$ と $K^+$ を識別するのは困難である判った。図 4.9 に実際 TOF1、TOF2 だけで作成した Particle ID を示す。また図 4.10 には Aerogel Cherenkov 検出器 (以下 AC) のみを使って求めた $\pi^+$ の分布を図 4.9 のヒストグラムに当てはめて表示した。

図 4.9、図 4.10 から解るように TOF1、TOF2 だけで作成した Particle ID では $K^+$ と $\pi^+$ を弁別するのは困難となる。その為なるべく真の $K^+$ を選出できるよう、今回我々は解析の段階において以下の 4.4、4.5、4.6、4.7 の論理に従い Particle ID を作成した。

$$p\ \ particle\ \ ID\ \ =\ \ TOF\ \ and\ \ TOF2\ \ and\ \ \overline{AC} \tag{4.4}$$

$$K^{+}particle\ \ ID\ \ =\ \ TOF\ \ and\ \ TOF2\ \ and\ \ \overline{AC} \tag{4.5}$$

$$\pi^{+}particle\ \ ID\ \ =\ \ TOF\ \ and\ \ TOF2\ \ and\ \ AC \tag{4.6}$$

$$d\ \ particle\ \ ID\ \ =\ \ TOF\ \ and\ \ TOF2 \tag{4.7}$$

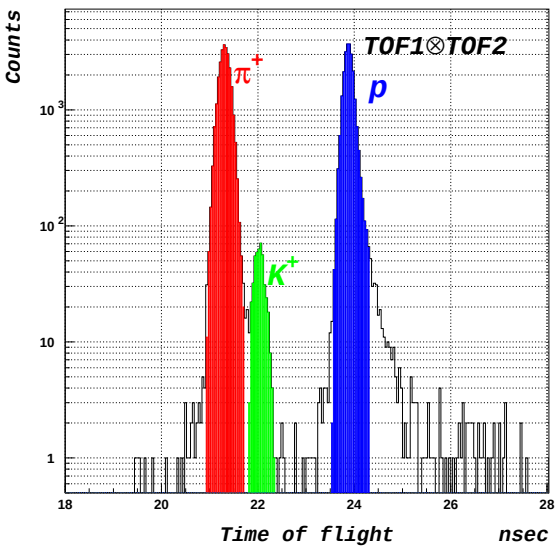



図 4.9: Time of flight のみによる粒子識別

上図は TOF1 と TOF2 を用いて粒子識別したものを TOF1 での time of flight のヒストグラムに上書きしたものである。赤；$\pi^{+}$、緑；$K^{+}$、青；p

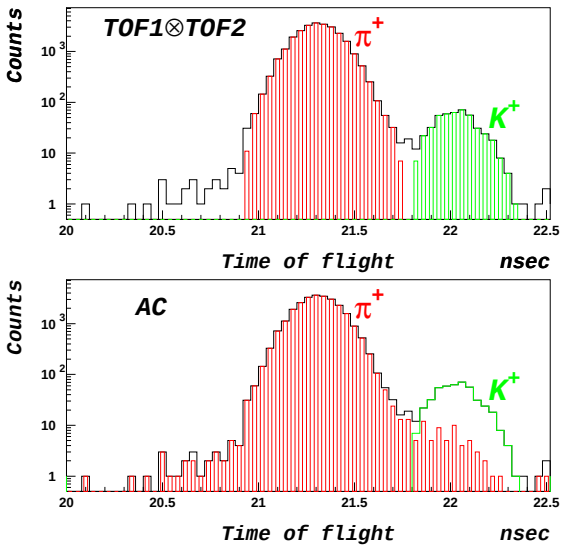



図 4.10:

図 4.10 の上の図は TOF1 and TOF2 で作成した $\pi^{+}$ と $K^{+}$ の分布を TOF1 による time of flight のヒストグラムに上書きしたものである。また下の図は $\pi^{+}$ を AC だけで識別し、上の図に当てはめたものである。この図から解るように TOF1 と TOF2 だけでは、$K^{+}$ と $\pi^{+}$ が弁別しきれていないことが分かる。

**b) 光電子数 (Number of photoelectron) の決定方法**

T554 実験では、ノイズの影響から pedestal run(clock trigger) による WC 検出器の ADC pedestal の分布が数 10 chnnel に渡って拡がっており、pedestal run によるデータから ADC pedestal の channel を決定するのは困難となる。
しかしながら、このノイズが電源による同期したノイズであれば、WC 検出器の信号を入力した ADC モジュール内の他 channel の信号と WC 検出器の信号を比較し、相関性を調べ、同期したノイズ信号を補正することで、pedestal の位置決定が可能となる。

**・Noise monitor**

WC 検出器の左右の PMT での相関、同じ ADC モジュール内の他検出器の信号 (Noise monitor) と WC 検出器の相関について見たものを図 4.11 に表示する。

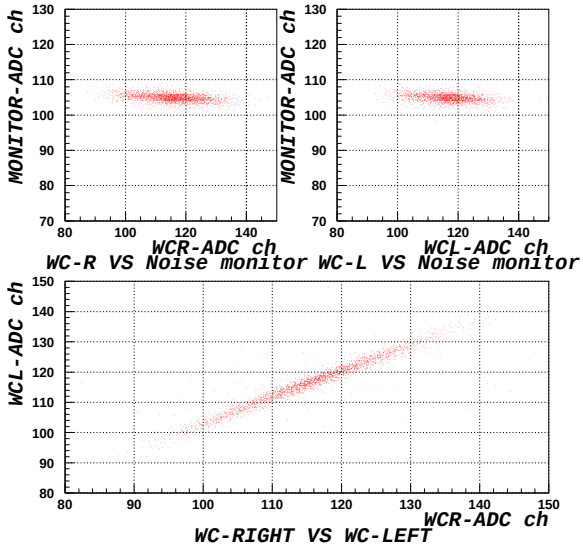



図 4.11:
図 4.11 の上図右は WC 検出器の左側の PMT と Noise monitor の相関、左は WC 右側の PMT との相関。下図は WC 検出器の左右の PMT での相関。縦軸;TDC channel、横軸;ADC channel

図 4.11 の上図から解かるように、WC の ADC ノイズと Noise monitor との間には同期性による相関が見られない。他方、WC 検出器の左右間においては同期性の相関が見られる。これより、T554 実験で問題になった pedestal run でのノイズは電源による同期的なものではなく、WC 検出器にだけ、つまり clock trigger のケーブル上 (左右共に) にだけノイズがのっていたと考えられる。

以上、前述の方法を使用して pedestal を補正することは不可能であり、違う方法で WC 検出器の ADC pedestal の位置を決定する必要がある。

・**Deuteron cut**

T554 実験で使用した WC 検出器の Cherenkov 輻射体は純水 (屈折率 $n = 1.33$) である。ここで Cherenkov 輻射体を純水にした場合での各粒子に於ける Momentum と光電子数の関係を図 4.12 に表示する。

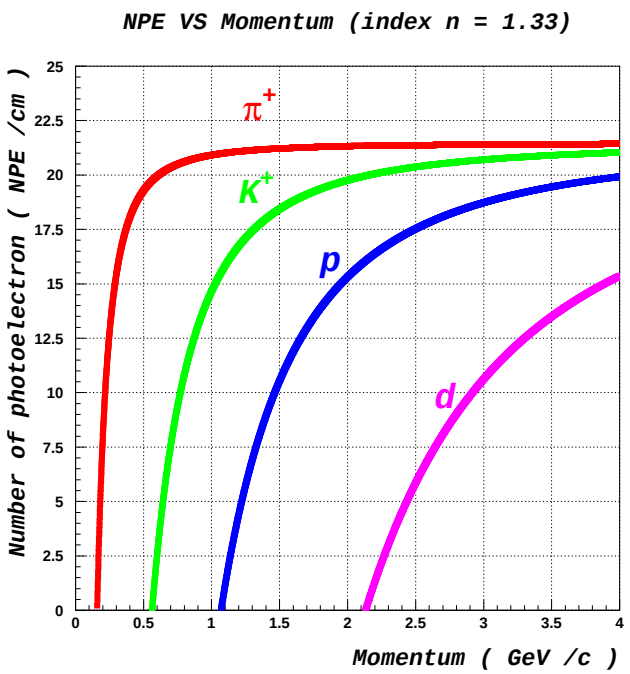



図 4.12: 入射粒子の運動量と光電子数の関係 (4.2 節参照) 赤 ; $\pi^+$、緑 ; $K^+$、青 ; p、ピンク ; d

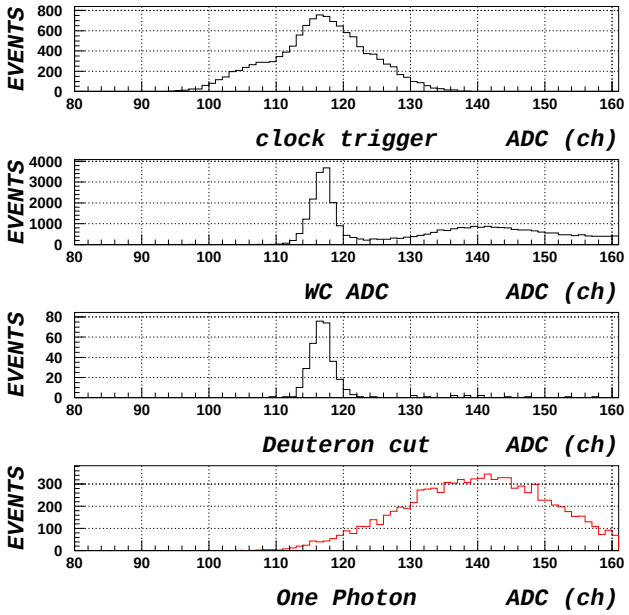



図 4.13: deuteron cut

1 段の図は、pedestal run(clock trriger) による pedestal。2 段目の図は WC の ADC 分布。3 段の図は、WC の ADC 分布から deuteron のみを選択した図。4 段目の図は one photon peak を表示した図

T554 で測定した運動量領域は 1.05 〜 1.35GeV /$c$ である。しかし図 4.12 から判るように、deuteron に対する Momentum の閾値は 2 GeV /$c$ 以上となっており、今回の実験において deuteron は WC 検出機では検出できない (Cherenkov 光を発しない) と考えられる。

これを踏まえ、今回 WC の ADC pedestal の位置の決定方法として、WC の ADC から deuteron を選択することによって pedestal を取り出した。

但し、Particle ID は timing counter 間の time of flight から作成しているので、WC 検出器自身で deuteron が Cherenkov 光を発しなくとも、ADC データから deuteron を識別することは可能である。結果、pedestal run での WC 検出器の pedestal の図と、deuteron を取り除いた後の pedestal の図を図 4.13 に示す。

以上の方法で求めた pedestal と図 4.13 の 4 段目に表示した single photon peak の差から光電子数を決定する。そして最終的に光電子数表示に補正した左右の PMT の ADC を足し合わせる。

### c) Separation parameter

E01-011 実験では、data taking の為、online で $5 \times 10^{-4}$ の p サプレッションを達成する為、２面 (１面；１２台) の WC 検出器を用い１面当たり約 97.5% 以上の p rejection を要求する。その為 WC 検出器１台当たりには最大 97.5% p rejection が必要とされる。以上のことを踏まえ、今回 WC 検出器による $K^+$/p 弁別性能を表すパラメータとして 4.9 式の $K^+$ kill ratio を採用した。4.8、4.9 式は、図 4.14 のように、ある光電子数 (横軸) を threshold とし、その threshold を設定した場合 $K^+$(緑)、p(青) の生き残った個数は何 %(縦軸) かを示した場合における p の threshold(4.8 式)、また 4.8 式に threshold を設定した時 $K^+$ が何 % 切り落とされたか (4.9 式) を意味する。

このようなパラメータを用い、ビームの Momentum 1.05、1.2、1.35 GeV/$c$ での $K^+$/p 弁別性能と Amino-G salt 濃度との相関性を調べた。

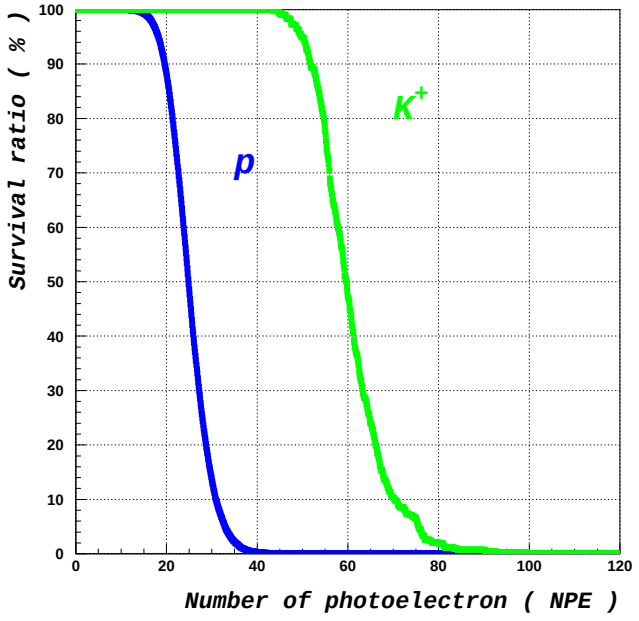



図 4.14: $K^+$/p survival ratio
ある光電子数 (横軸) を threshold とし、その threshold を設定した場合 $K^+$(緑)、p(青) の生き残った個数が何 %(縦軸) になるかを表示した。

$$threshold\,;\,p\ \ rejection\ \ 97, 98, 99\,\% \ = \ N_{p\ kill}/N_{p\ all} \times 100 \tag{4.8}$$

$$K^+\ \ kill\ \ ratio \ = \ N_{K^+\ kill}/N_{K^+\ all} \times 100 \tag{4.9}$$

$N_{p\ all}$ ; p の全カウント数
$N_{p\ kill}$ ; threshold を設定した時に切り落とす p のカウント数
$N_{K^+\ all}$ ; $K^+$ の全カウント数
$N_{K^+\ kill}$ ; p の threshold を設定した時に切り落とされた $K^+$ のカウント数

### 4.4.3　解析結果

4.4.2 節で述べた方法により得られた $K^+$ kill ratio と Amino-G salt 濃度との関係を図 4.15、図 4.16 に表示する。ここで図 4.15 は Momentum 1.2 GeV/$c$ において、threshold を 97、98、99% にした場合での $K^+$ kill ratio の Amino-G salt 濃度依存性。図 4.16 は Momentum 1.35 GeV/$c$ での、threshold を 97、98、99% にした場合の $K^+$ kill ratio の Amino-G salt 濃度依存性である。また Momentum 1.05 GeV/$c$ では threshold=99 % という厳しい条件においても、全濃度で $K^+$ kill ratio は 0 % となり、$K^+$/p は完全に弁別される。

図 4.17 には Momentum 1.2 GeV/$c$ における、$K^+$ と p による光電子数と Amino-G salt 濃度の相関を表示する。

・**Momentum 1.2 GeV**/$c$

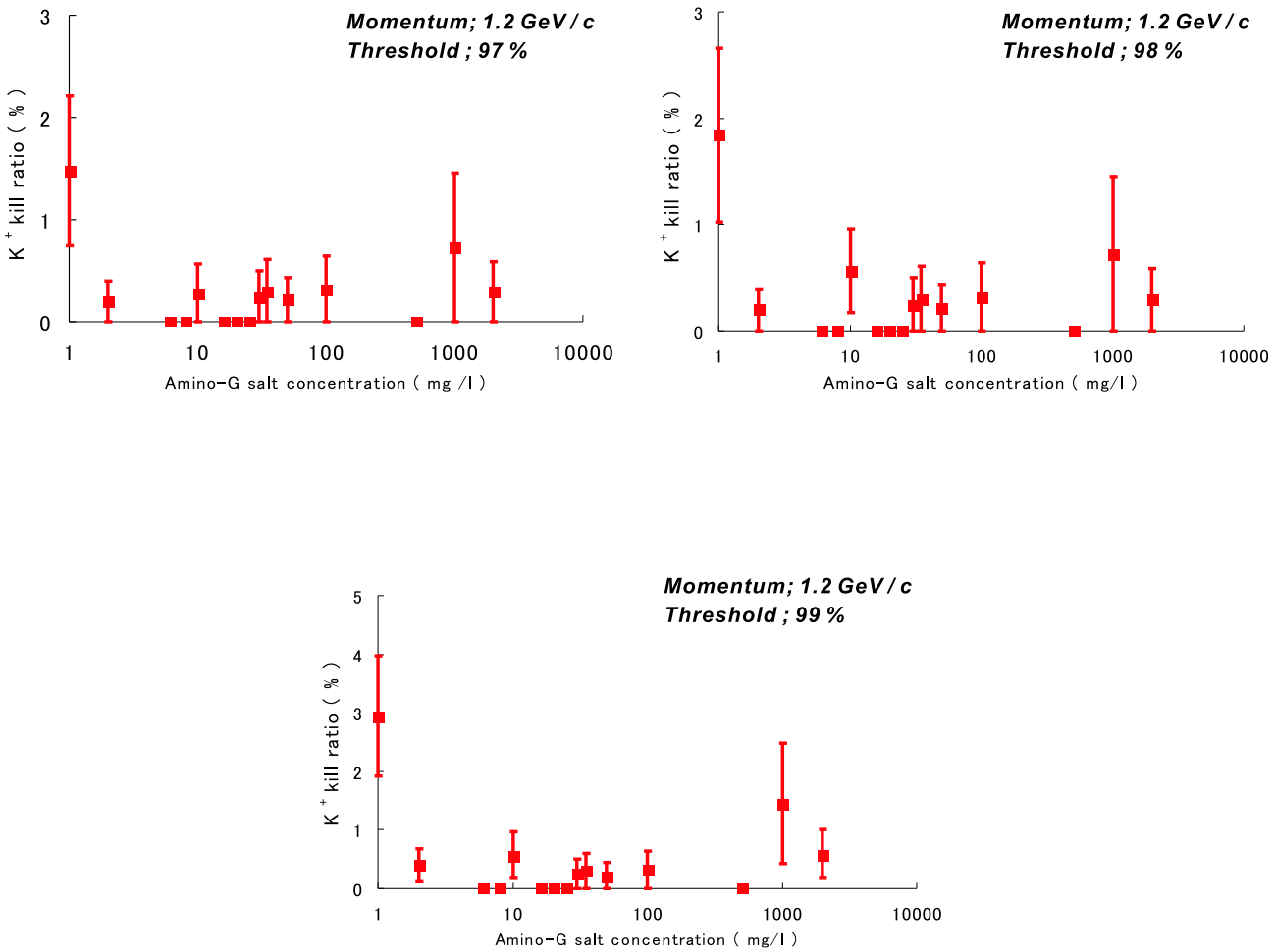
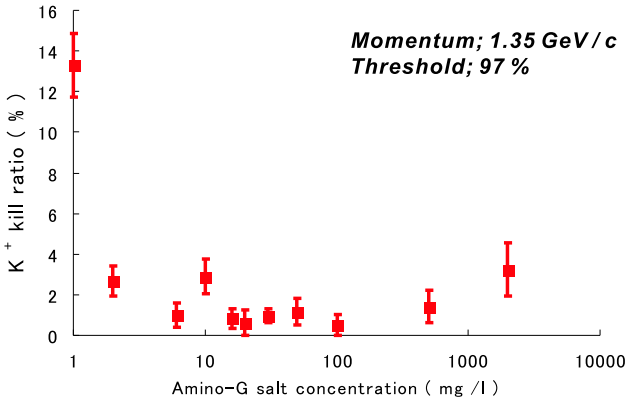
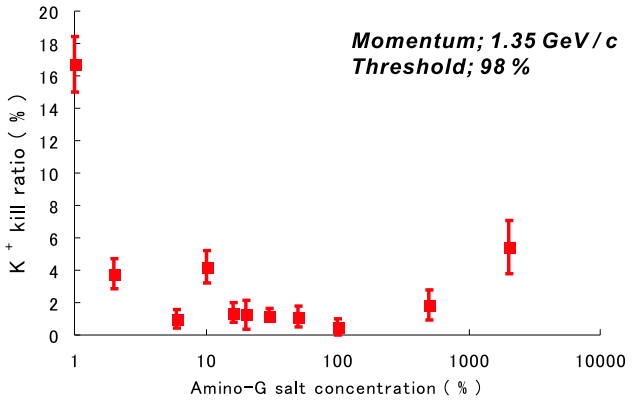



図 4.15: Momentum 1.2 GeV/$c$ において 4.8 式の threshold を其々97, 98, 99 %に設定した場合に於ける $K^+$kill ratio と Amino-G salt 濃度の相関。
error は統計誤差によるものである。

・**Momentum 1.35 GeV**/*c*



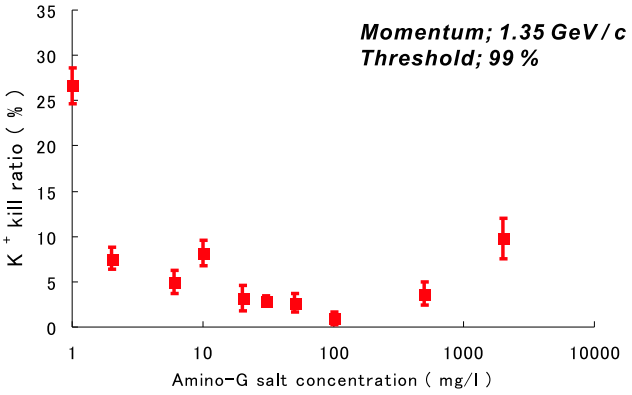




図 4.16: Momentum 1.35GeV/*c* において 4.8 式の threshold を其々97, 98, 99 % に設定した場合に於ける $K^+$kill ratio と Amino-G salt 濃度の相関。
error は統計誤差によるものである。

・光電子数と Amino-G salt 濃度の相関

図 4.17 に表示する光電子数と Amino-G salt 濃度の相関は、Momentum 1.2 GeV/$c$ で観測した WC 検出器の光電子数分布上にて p(青)、$K^+$(緑) の分布に対し Gaussian で fitting を行い、その結果得られた中心値を縦軸にし、各濃度 (横軸) で表したものである。

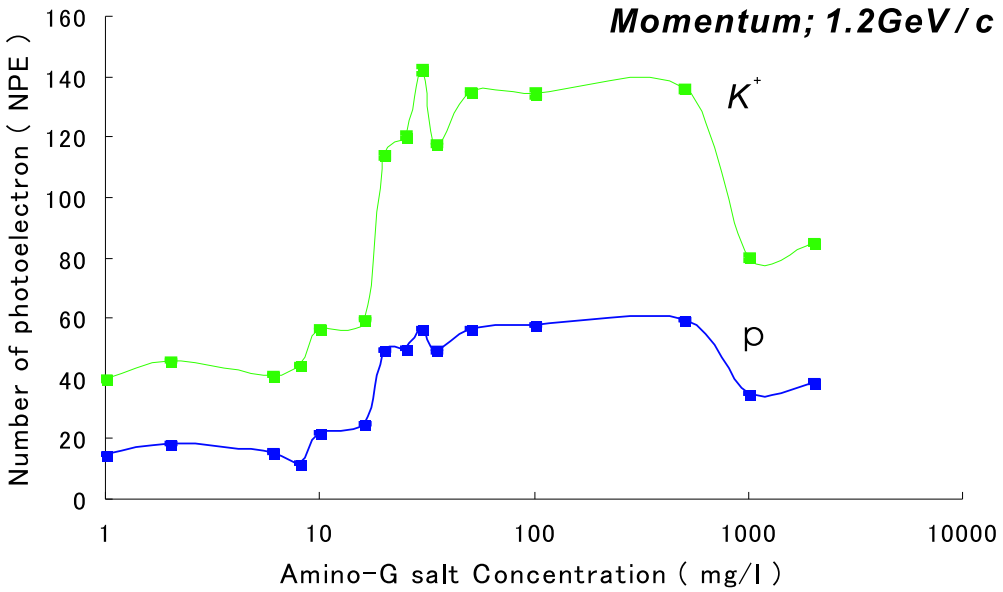



図 4.17: 光電子数と Amino-G salt 濃度の相関

### 4.4.4 Fluorotrans の効果

表 4.3、4.4 は其々、実機に fluorotrans を巻かなかった場合, 実機に fluorotrans を巻いた場合で Momentum 1.2、1.35 GeV/$c$ のビームに曝し、得られた WC 検出器の p、$K^+$ の光電子数分布 (図 4.18〜4.21; 青 p、緑 $K^+$、赤 $\pi^+$、ピンク d) に対し Gaussian で fitting を行い、その結果得られた中心値を表示したものである。

| Momentum | $K^+$ (NPE) | p (NPE) |
|---|---|---|
| 1.2 GeV/$c$ | 114.15 ± 0.84 | 49.32 ± 0.06 |
| 1.35 GeV/$c$ | 118.91 ± 1.10 | 68.26 ± 0.07 |

表 4.3: fluorotrans を巻かない場合の光電子数の中心値

| Momentum | $K^+$ (NPE) | p (NPE) |
|---|---|---|
| 1.2 GeV/$c$ | 147.56 ± 0.79 | 62.69 ± 0.06 |
| 1.35 GeV/$c$ | 153.20 ± 0.68 | 87.40 ± 0.06 |

表 4.4: fluorotrans を巻いた場合の光電子数の中心値

表 4.5、4.6 は其々、実機に fluorotrans を巻かなかった場合、巻いた場合で Momentum 1.2、1.35 GeV/$c$ に於いて、threshold を 97、98、99% で設定を行い (4.8 式)、4.9 式で $K^+$ kill ratio を求めたものを表示した。

| Momentum | 1.2 GeV /$c$ | 1.35 GeV /$c$ |
|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.64 ± 0.64 |
| Threshold 98 % | 0 | 1.27 ± 0.90 |
| Threshold 99 % | 0 | 3.18 ± 1.40 |

表 4.5: fluorotrans を巻かない場合の $K^+$ kill ratio

| Momentum | 1.2 GeV /$c$ | 1.35 GeV /$c$ |
|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.29 ± 0.21 |
| Threshold 98 % | 0 | 0.59 ± 0.30 |
| Threshold 99 % | 0 | 1.19 ± 0.42 |

表 4.6: fluorotrans を巻いた場合の $K^+$ kill ratio

表 4.3、4.4 から解るように WC 検出器の外壁部に fluorotrans を巻くことによって $K^+$, p 共に運動量に関係なく光電子数の中心値が約 1.3 倍増加している。これより、最初の懸念通り内部で発生したチェレンコフ光が WC 検出器の外壁に使われているスノーホワイトを透過し発光量を損失していることが明らかとなった。

また表 4.5、4.6 から Momentum 1.2 GeV /$c$ では発光量の損失に伴う $K^+$/p 弁別性能の変化は現れないが、Momentum 1.35 GeV /$c$ では発光量の損失に伴い $K^+$/p 弁別性能が影響を受け、threshold 98 % において $K^+$ kill ratio の値は fluorotrans を巻くと 1.27 % から 0.59 % へと抑えることができる。

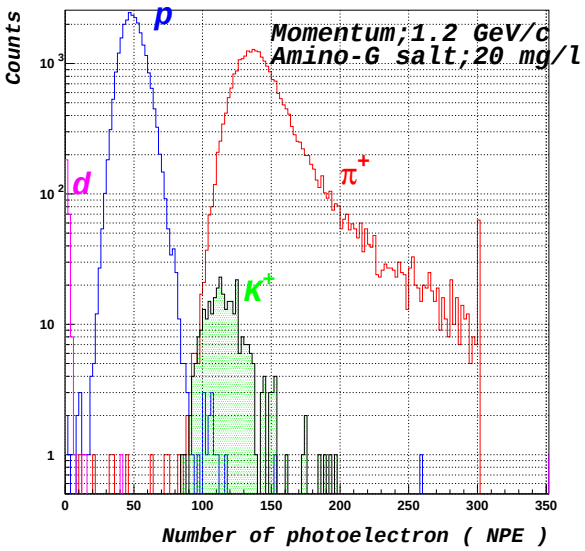



図 4.18: Momentum 1.2 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻かない場合の WC 検出器の光電子数分布

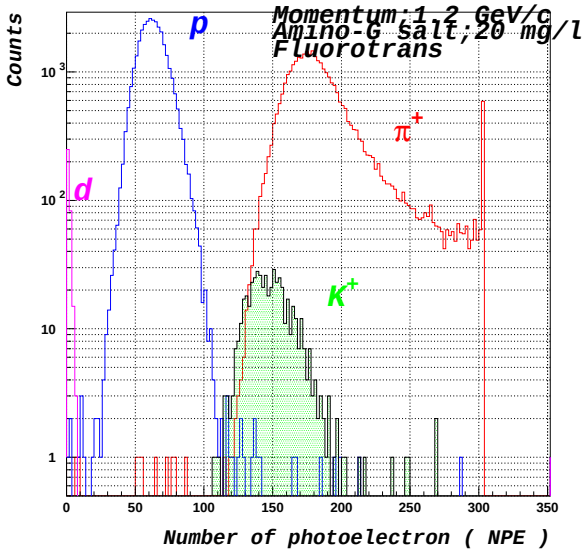



図 4.19: Momentum 1.2 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻いた場合の WC 検出器の光電子数分布

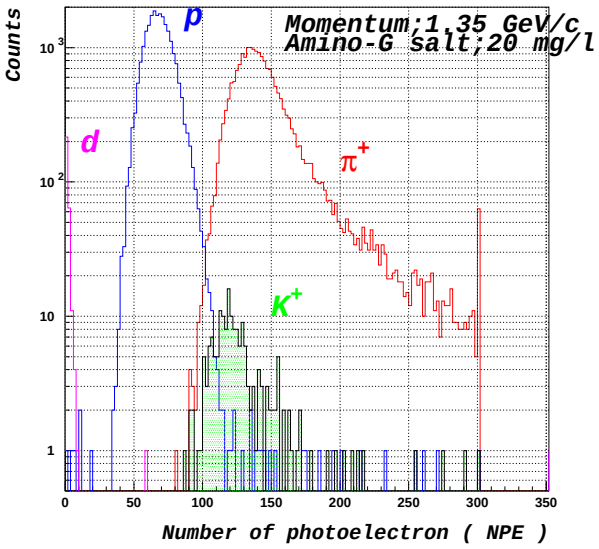



図 4.20: Momentum 1.35 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻かない場合の WC 検出器の光電子数分布

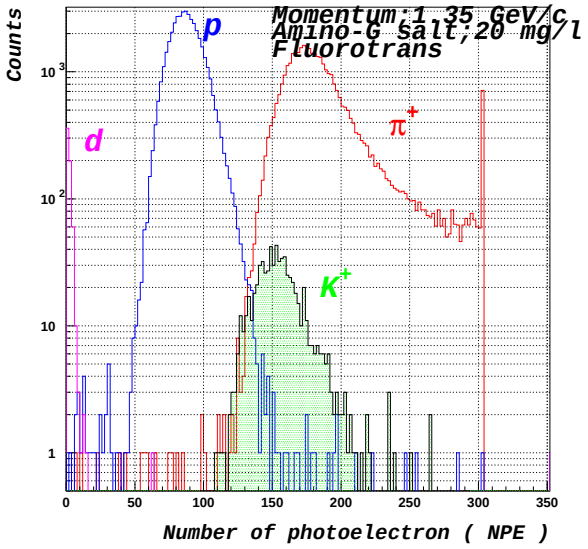



図 4.21: Momentum 1.35 GeV/$c$ に於いて Amino-G salt の濃度を 20 mg/$l$ とし fluorotrans を巻いた場合の WC 検出器の光電子数分布

### 4.4.5 考察

図 4.15 から分かるように、Moumentum 1.2 GeV/$c$ では Amino-G salt の濃度変化は $K^+$/p 弁別性能にさほど影響してこないと考えられる。但し、グラフを見る限りでは濃度 6〜500 mg/l の領域で $K^+$ kill ratio の値が 1% 以下となり、この領域で比較的弁別性能が優れている。

また図 4.16 から Momentum 1.35 GeV/$c$ に於ける $K^+$ kill ratio と Amino-G salt 濃度の関係に相関性が確認できる。この運動量では threshold 97、98 % に於いて、Amino-G salt の濃度 8〜500 mg/l 間で $K^+$ kill ratio の値が 2 % 以下となり、比較的 $K^+$/p の弁別性能が優れていることが解る (但し、10 mg /$l$ の plot だけ相関線から大きく外れており、他点に比べこの点だけ $K^+$ kill ratio の値が悪い。)。

また運動量 1.35 GeV/$c$ では threshold を 99 % という厳しい条件で設定すると、Amino-G salt 濃度 8〜500 mg/l の領域で 100 mg/$l$ が最も $K^+$/p 弁別性能が優れていることが解り、$K^+$ kill ratio の値は 1.01 % となる。

図 4.17 グラフから Amino-G salt の濃度と WC 検出器の発光量の間に相関性が確認できる。その相関性は Amino-G salt の濃度 1〜10mg/$l$ の領域では、濃度の増加に伴い光電子数は緩やかに増加していく。10mg$l$/〜30mg/$l$ の領域では濃度の増加に従い、光電子数は急激に増す。そして 30mg/$l$ 以降では光電子数は一時的に飽和状態となるが、500mg/$l$〜1g/$l$ の間で光電子数は急激に減少する。

以上の事から WC 検出器内で発生した Cherenkov 光の波長は Amino-G salt の蛍光作用によって PMT の波長感度領域側にシフトする。そして結果的に PMT で観測することで、図 4.17 のように水溶液中の Amino-G salt の増加に従い、その効果も増す。但し、図 4.17 から解るように Amino-G salt の濃度を 500 mg/$l$ 以上にすると、逆効果となる。

また、実機の外壁部に fluorotrans を巻くことで発光量の損失を防ぐことができ、その効果は、Amino-G salt 濃度 20 mg/$l$、Momentum 1.35 GeV/$c$ において $K^+$kill ratio の値を約 1/2 に抑えることを可能とする。

## 4.5 WC 検出器の宇宙線測定による長期安定性

E01-011 実験では、テストビームによって WC 検出器で p の threshold(4.8 式) の位置を一度決め、その後決定した threshold の位置を動かすことなく本測定へ移行する。その為、E01-011 実験では WC 検出器の発光量の安定性が必要とされる。しかし、長期に渡って測定を行うことで Amino-G salt の経年変化による劣化等で光電子数の変動などが懸念される。このため、我々は T554 実験から得られた適正濃度において、WC 検出器を用い、宇宙線による Amino-G salt の経年変化を調べた。また WC 検出機を用いた宇宙線の測定においては、図 4.22 で示すように Momentum の閾値によって宇宙線が検出できないとか、発光量が少量のため集光に困難を擁する等の問題は生じない。

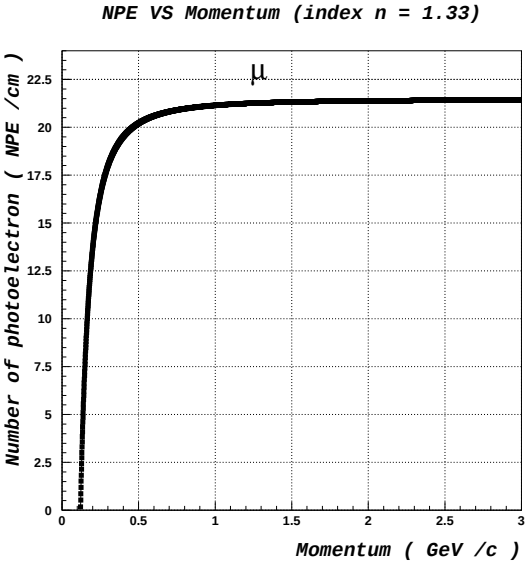



図 4.22: Cherenkov 輻射体に純水 ($n$ = 1.33) を選んだ場合での $\mu$ の Cherenkov 光の発光量と運動量の依存性

PMT の量子効率を 20% , 集光率を 30% と仮定して光電子数を求めた (4.2 節参照)。図 4.22 より $\mu$ に対する Momentum の閾値は 0.12 GeV/$c$ となる。また地表付近において $\mu$ の強度分布は Momentum 0.4〜0.6 GeV/$c$ で最大となるので、今回の測定ではこの Momentum 領域における宇宙線で経年変化を調べることとなる。

### 4.5.1 セットアップ

測定のセットアップは、図 4.23、4.24 のように WC 検出器の上下にプラスチックシンチレーションカウンターをクロスで挟み、この上下のシンチレーションカウンターの coincidence を trigger と

した。また今回 Amino-G salt の濃度に 30、50 mg /$l$ を使用した。

この濃度にした理由は、30 mg/$l$ は図 4.17 に於いて、発光量が飽和状態になり始める濃度であり、他方 50 mg/$l$ はすでに発光量が飽和状態となり安定状態となっている為である。この為、おそらく 50 mg/$l$ は30 mg/$l$ と比較し経年変化の影響が少ないと考え、上記の２種類の濃度で測定を行った。また観測期間を約 2ヶ月半とし、1 Run 当たり約 6 日毎で測定を行った。また WC 検出器内の水温の変動が経年変化に影響する可能性が考えられた為、実験室の室温を 24 ℃に固定し測定を行った。

図 4.23: 宇宙線による WC 検出器の長期安定性セットアップ写真

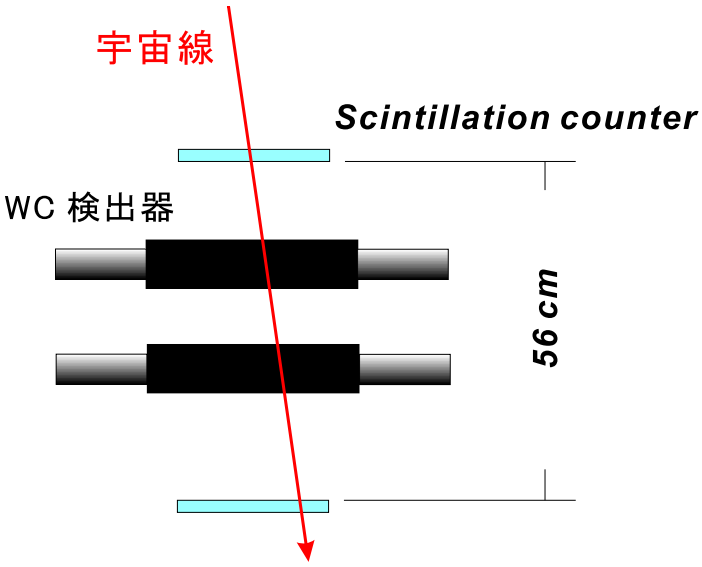



図 4.24:
上から 1、4 段目にプラスチックシンチをクロスで設置し、その間に WC 検出器を２台配置した。

### 4.5.2 解析方法

左右の PMT による ADC Channel を Number of photoelectron に規格化したのち、左右の ADC を足し合わせ、得られたデータに対し fitting を行う。

但し、図 4.22 から分かるように、Cherenkov 輻射体が純水 (屈折率 $n = 1.33$) の場合、Momentum 0.12GeV/$c$ 以上の $\mu$ は全て測定可能となる。その為宇宙線の強度分布を考えると、WC 検出器で測定される Cherenkov 光の数 (光電子数) に広がりが生じる。そこで今回、光電子分布の形状から二次関数+Gaussian という関数を用い fitting(図 4.25) を行った。

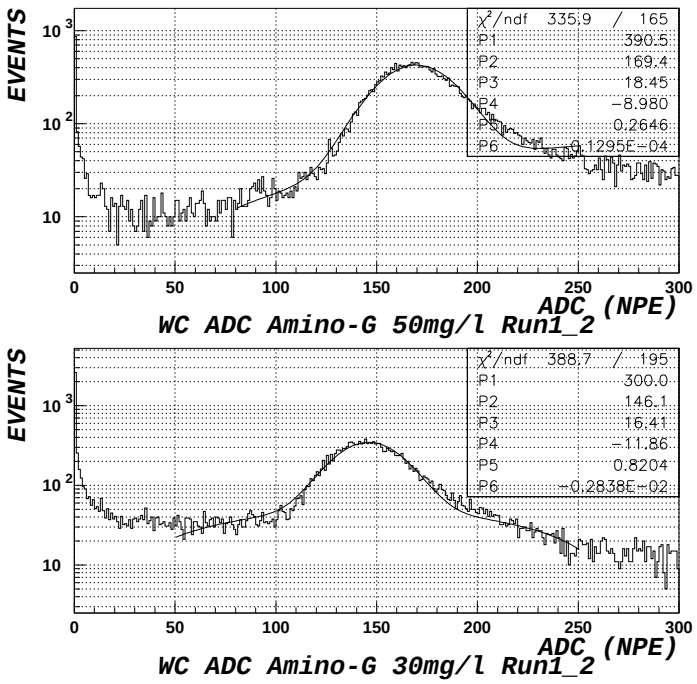



図 4.25: 得られた光電子数に二次関数+Gaussian で fitting 行った場合
図 4.25 の上図は Amino-G 濃度が 50 mg /$l$ の場合。下図は濃度 30 mg/$l$ のものである。

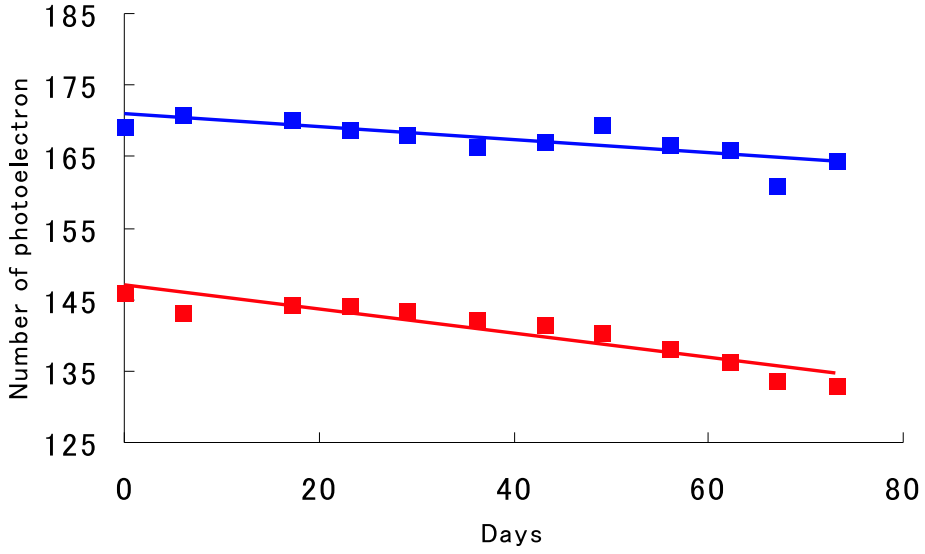



図 4.26: 光電子数の時間変化
上図は縦軸が光電子数、横軸を時間 (day) でプロットしたものである。青のプロットは純水に Amino-G salt を 50 mg/$l$, 赤の Amino-G salt を 30 mg/$l$ 溶かしたものを意味する。また fitting は最小二乗法によるものである。

### 4.5.3　解析結果

図 4.26 から分かるように、時間の経過に伴い発光量が緩やかに減少していることが解る。そこで減少率がどのくらいかを調べる為、図 4.26 のグラフから時間経過と発光量の 2 量間に線形 1 次式の関係があるとして最小二乗 fit を行い 1 日当たりの減少率を求めた。その結果減少率は其々

| Amino-G salt 濃度 | 30 mg/$l$ | 50 mg/$l$ |
|---|---|---|
| 減少率 (%/$day$) | 0.1154 %/$day$ | 0.0550 %/$day$ |

表 4.7: Amino-G salt の経年変化による光電子数の 1 日当たりの減少率

となり、WC 検出器内に 80 日間 Amino-G salt 水溶液をいれたままにすると、その発光量は 30 mg/$l$ で 9.232 %、50 mg/$l$ で 4.4 % 減少する。
この結果、もし E01-011 実験において WC 検出器内に Amino-G salt 溶液を入れ長期で測定を行う場合、その期間中に上記の様な発光量の減少が起きると仮定し、以下の方法でこの減少率がどの位 $K^+$/p 弁別性能に影響するかを調べた。

その方法は

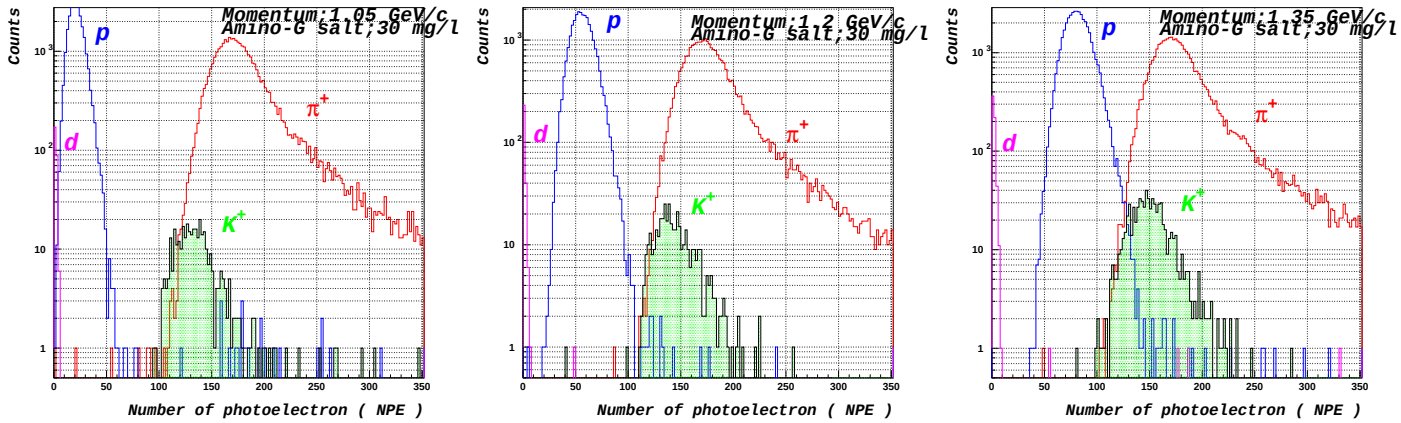
**1)**… T554 実験で Amino-G salt の濃度が 30, 50 mg/$l$ で測定したデータを使用し、WC 検出器の ADC データに上記で求めた減少率の効果を加える。

**2)**…その結果得られたデータで減少率の影響を調べる。但し、この時 threshold の位置は減少の効果を加える前の位置に固定し、その threshold によって切り落とされた $K^+$ の数と $K^+$ の全カウント数を 4.9 式に代入し得られた値を、減少率の効果を入れた $K^+$ kill ratio とする。

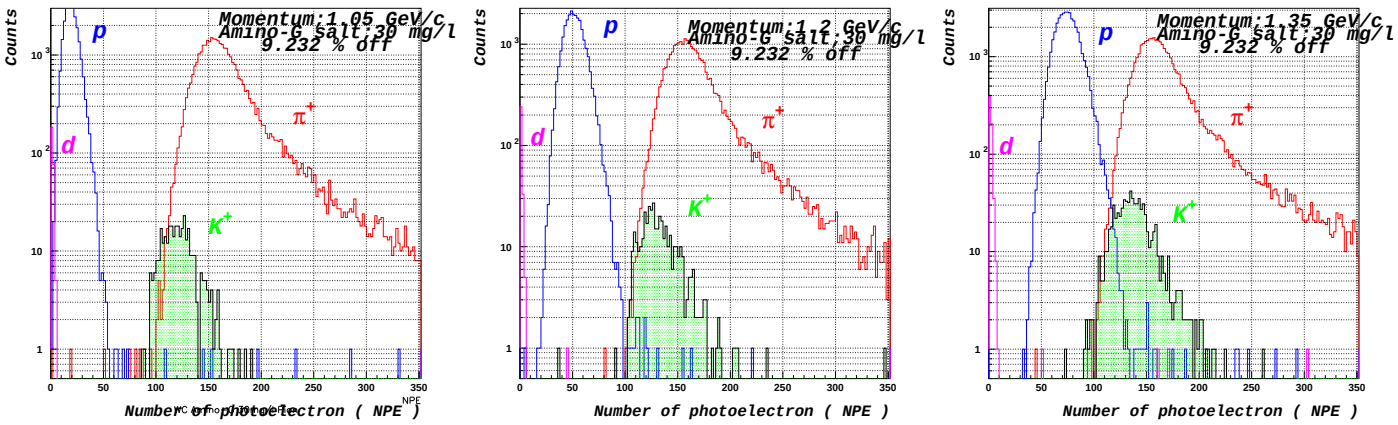
また減少率には 80 日間経過した際の減少率 (30 mg/$l$ ; 9.232 %、50 mg/$l$ ; 4.400 % ) を使用した。

結果、減少率の効果を加えた場合と効果を加える前の光電子数分布図と $K^+$ kill ratio の値を表にまとめる。

#### ・30 mg/$l$ の場合

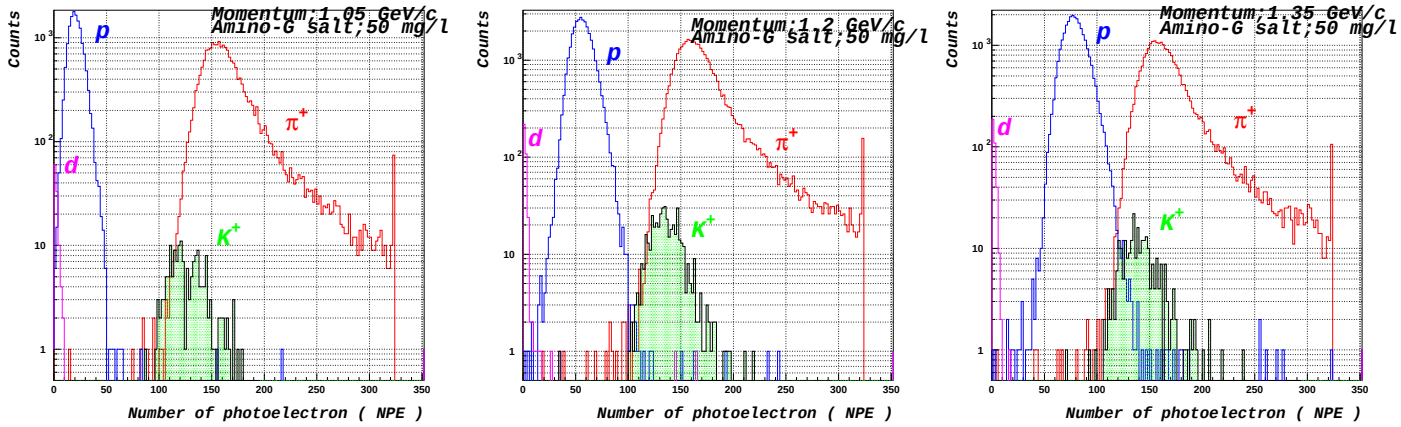


左から Momentum 1.05, 1.2, 1.35 GeV/$c$ の光電子分布図

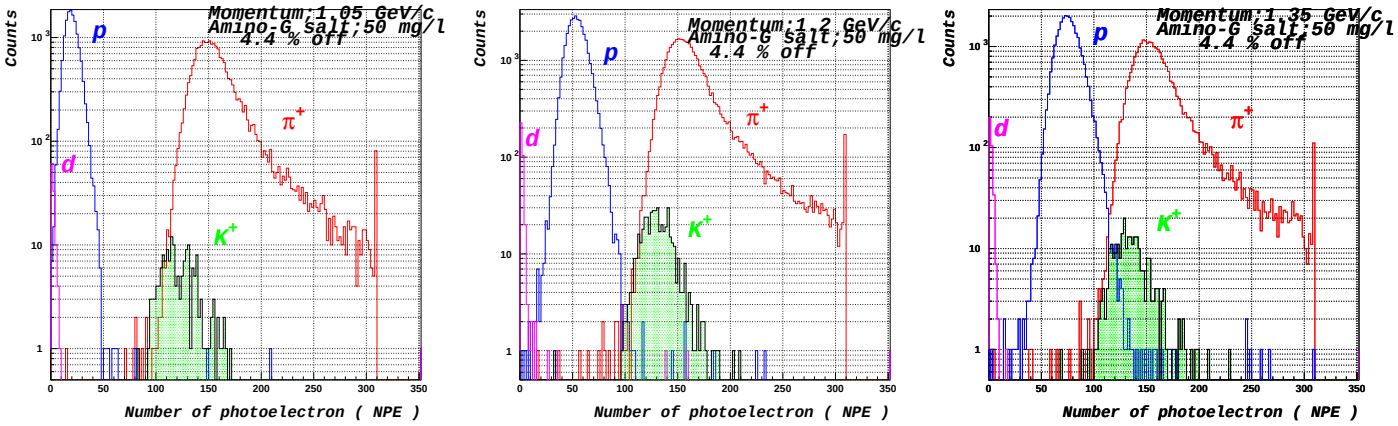



減少率 9.232 %を加えた光電子分布図 (左から Momentum 1.05, 1.2, 1.35 GeV /$c$)

## ・50 mg/$l$ の場合




左から Momentum 1.05, 1.2, 1.35 GeV /$c$ の光電子分布図




減少率 4.400 %を加えた光電子分布図 (左から Momentum 1.05, 1.2, 1.35 GeV /$c$)

### 発光量減少に伴う $K^+$ kill ratio の変化

### ・30 mg/l の場合

| Momentum | 1.05 GeV /*c* | 1.2 GeV /*c* | 1.35 GeV /*c* |
|---|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 0.96 ± 0.37 |
| Threshold 98 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 1.23 ± 0.37 |
| Threshold 99 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 2.88 ± 0.57 |

表 4.8: 濃度 30 mg/*l* での経年変化前における $K^+$ kill ratio

| Momentum | 1.05 GeV /*c* | 1.2 GeV /*c* | 1.35 GeV /*c* |
|---|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 1.23 ± 0.41 |
| Threshold 98 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 2.29 ± 0.62 |
| Threshold 99 % | 0 | 0.25 ± 0.25 | 4.66 ± 0.78 |

表 4.9: 経年変化の効果 (減少率; 9.232%) を加えた濃度 30 mg% での $K^+$ kill ratio

### ・50 mg/l の場合

| Momentum | 1.05 GeV /*c* | 1.2 GeV /*c* | 1.35 GeV /*c* |
|---|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 1.15 ± 0.37 |
| Threshold 98 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 1.15 ± 0.57 |
| Threshold 99 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 2.69 ± 0.87 |

表 4.10: 濃度 50 mg/*l* での経年変化前における $K^+$ kill ratio

| Momentum | 1.05 GeV /*c* | 1.2 GeV /*c* | 1.35 GeV /*c* |
|---|---|---|---|
| Threshold 97 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 1.92 ± 0.76 |
| Threshold 98 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 2.69 ± 0.93 |
| Threshold 99 % | 0 | 0.22 ± 0.22 | 5.38 ± 1.40 |

表 4.11: 経年変化の効果 (減少率; 4.400%) を加えた濃度 50 mg% での $K^+$ kill ratio

### 4.5.4　考察

図 4.26 より、宇宙線による WC 検出器内の Amino-G salt 溶液の経年変化測定から、時間経過に伴い純水内の Amino-G salt が劣化し、それに伴い発光量が減少することが解った。また表 4.7 より減少の度合は濃度と相関を持つと判断できる。

この Amino-G salt 濃度と劣化の間に相関性が生じる原因として以下の理由が考えられる。Amino-G salt 濃度 30 mg /*l* は、図 4.17 において発光量が飽和状態へと移る直前の濃度である。その為、今回の経年変化測定に於いて、純水内で Amino-G salt が分解等により劣化すると、最終的に Amino-G salt の濃度は 30 mg/*l* 以下となる。その結果、蛍光能力もその濃度に伴ったものになったと考えることが可能である。これにより経年変化後の Amino-G salt 30 mg/*l* では水溶液中で図 4.17 で急激に発光量が変化する濃度領域 (30 mg/*l* 以下) に移り、急激に発光量が減少したと考えられる。

他方、50 mg/*l* も経年変化により、最終的に水溶液中の Amino-G salt の濃度が 50 mg/*l* 以下となり、その濃度に伴う蛍光能力になったと考えられる。しかし 50 mg/*l* は図 4.17 から分かるように、発光量の安定領域内に位置し、経年変化によって水溶液中の Amino-G salt が 50 mg/*l* 以下になっても、まだ安定領域域内に位置すると期待できる。この為 50 mg/*l* は30 mg/*l* と比較し減少率は緩やかなものとなる。

しかし、たとえ水溶液中の Amino-G salt の濃度が 50 mg/*l* 以下になったとしても、図 4.17 から分かるように、30 mg/*l* 以下にならなければ発光量に変化は生じない。その為、50、30 mg/*l* 両方の濃度に於いて Amino-G salt 自身の劣化以外に WC 検出器内で使用した純水そのものが劣化し、水溶液の透過率が悪化したことも、発光量の減少の要因になったと考えられる。

また T554 実験のデータを使用した発光量の減少に伴う $K^+$ kill ratio 変化の結果から、Momentum 1.05、1.2 GeV /*c* では経年変化による影響を受けない。しかしながら、1.35 GeV /*c* においては、発光量の減少率により $K^+$ kill ratio が影響を受け、その効果は threshold を 98% に設定した場合、30 mg/*l* で 1.7 倍、50 mg/*l* で 2.3 倍 $K^+$ kill ratio が増加する。また 30 mg/*l* と 50 mg/*l* を比較し経年変化後もどちらの $K^+$ kill ratio が優れているかは、error も考慮すると、これだけで判断するのは難しい。

## 4.6　4章まとめ

今回 E0-011 実験で使用する WC 検出器を使用し、Amino-G salt による $K^+$/p 弁別性能の濃度依存性、及び Amino-G salt の経年変化を中心に測定を行った。

その結果 Momentum 1.05、1.2 GeV /*c* では、$K^+$/p 弁別性能は Amino-G salt 濃度に大きくは依存しないが、Momentum 1.35 GeV/*c* においては濃度依存性を確認した。Momentum 1.35 GeV/*c* での濃度依存性から、Amino-G salt 濃度 100mg/*l* では、threshold 99% という厳しい条件を課した場合で $K^+$ kill ratio は 1.01 % という値を示し、100 mg/*l* で $K^+$/p 弁別性能が最も優れていることが分かった。また WC 検出器の外壁部に fluorotrans を巻くと、$K^+$/p 弁別性能がアップすることが判明した。これにより fluorotrans 巻くことで、Amino-G salt 濃度 20 mg/*l*、Momentum 1.35 GeV/*c* において $K^+$ kill ratio の値を約 1/2 に抑えることが可能となる。

また図 4.17 に示すように Amino-G salt の濃度と WC 検出器の発光量の間の相関性を確認した。その相関は Amino-G salt の濃度 1～10mg/*l* で発光量が緩やかに増加し、10mg*l*/～30mg/*l* 領域で発光量は急増する。そして 30mg/*l* 以降で発光量は一時飽和状態となるが、500mg/*l*～1g/*l* の間で減少に転じる。

この相関性は、Amino-G salt の経年変化による劣化 (発光量減少) に影響し、測定の結果、発光量安定領域に位置する 50 mg/*l* の方が 30 mg/*l* より劣化に伴う発光量の変化が少ないことが分かった。

経年変化による発光量の減少効果を T554 実験のデータに基づき、$K^+$ kill ratio にどの位影響を与えるかを調べた結果、Momentum 1.05、1.2 GeV/*c* では影響が小さいが、1.35 GeV/*c* において 30mg/*l* で値が 1.7 倍、30mg/*l* で値が 2.3 倍 (threshold 98 %) となることが分かった。

以上の点を踏まえ E01-011 実験では WC 検出器内の Amino-G salt の濃度を HKS 側の運動量 (1.2 ± 12.5% GeV/*c*)、発光量の安定性を考慮し、濃度 100 mg/*l* で使用すべきと言うことができる。

また WC 検出器の外壁部に fluorotrans を巻くことで、WC 検出器の $K^+$/p 弁別性能の向上が期待できる。

# 第5章　まとめ

我々は米国ジェファーソン研究所にて２００５年６月から (e, e'$K^+$ ) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験 (E01-011 実験) を開始する。

E01-011 実験では、Λ ハイパー核の励起準位をエネルギー分解能 0.3〜0.4 MeV (FWHM) という高分解能で測定することを目標としている。本実験ではハイパー核生成に関与した $K^+$ を新たに導入した高分解能 $K^+$ 中間子スペクトロメータ (HKS) で測定し、散乱電子の測定には"Tilt 法" により最適に配置した Enge Spectoromater を用いる。これにより、散乱電子側のバックグラウンドは激減し、２０００年に行われた E89-009 実験に比べ、ビーム強度を 50 倍、ターゲットの厚さ５倍にすることが可能となるが、それに伴い HKS 側では $\pi^+$、p に対する singles rate が非常に高くなると予想される。

その為、trigger level において精度の良い粒子識別を必要とし、２種類の閾値型 Cherenkov 検出器 ( Aergel、Water ) を用いて粒子識別を行う。Aerogel Cherenkov 検出器は 7 segments × 3 面で設置し、1 面当たり $\pi^+$ に対して 95% 以上のサプレッションを求める。また Water Cherenkov 検出器は、実機での $K^+$/p 弁別性能を上げる為、Cherenkov 輻射体となる純水 (抵抗率 ; 〜20 MΩ·cm) に波長変位剤 Amino-G salt を溶かして使用する。そして 12 segments × 2 面で設置し、1 面当たり p に対して 97.5% 以上のサプレッションを要求する。

しかしながら、AC 検出器では accidental coincidence によって accidental $K^+$ kill ratio が、また WC 検出器では p rejection に伴う $K^+$ kill ratio をできる限り抑えることを考慮しなければならない。

このような理由より、accidental $K^+$ kill ratio に対しては、GEANT モンテカルロシミュレーションで得られた検出器に対する粒子の hit position が水平方向に強い相関関係を持つことに注目し、HKS 側の検出器をいくつかの segment に分けることで、グループ単位で trigger を作成する。これにより全検出器を 1 つのグループとし trigger を形成する時と比較し、singles rate を実質的に抑え、accidental $K^+$ kill ratio を減少させることができる。またグループ分けには東北大で、開発した FPGA を搭載した VME モジュール TUL-8040 を使用する。AC、WC、TOF のグループごとによる trigger を作成し最終的に $K^+$ の trigger 組む。その結果、もし 6 つのグループに分けた場合、グループごとに重複した領域が入っていることを考慮に入れても、グループ内での実効的な singles rate は約 1/4 となり、$K^+$ の accidental coincidence による $K^+$kill ratio は 0.3% まで抑えることが可能となる。

また p rejection に伴う $K^+$ kill ratio に対しては、$K^+$/p 弁別を目的として開発した WC 検出器の $K^+$/p 弁別性能の向上させることで対処する。このような考えの基、２００４年６月に KEK-PS の T1 ラインにて実際 E01-011 実験で使用する WC 検出器を $\pi^+$、$K^+$、p が混在するハドロンビームに曝して実験 (T554 実験) を行った。T554 実験では、Amino-G salt の濃度を変えながら、実機を Momentum 1.05、1.2、1.35 GeV/$c$ のビームに曝し、$K^+$/p 弁別の適正濃度を調べた。その結果 1.05

及び 1.2 GeV/$c$ では、$K^+$/p 弁別は濃度に依存しないが 1.35 GeV/$c$ においては p に 99 % という厳しい条件を課しても、$K^+$ kill ratio の値は約 1% に抑えることができる。また Amino-G salt の経年変化のを調べるため、WC 機を約２ヶ月半宇宙線に曝し、発光量の変移を調べた。その結果、発光量と Amino-G salt 濃度の依存性 (図 4.17) において発光量安定領域に位置する濃度では、経年変化の影響を受け難い。この２つの実験から、HKS の運動量アクセプタンスの考慮及び発光量の安定性を考えると Amino-G salt 濃度 100mg/$l$ が本実験において適性濃度と考えられる。

また、T554 実験では実機に fluorotrans を巻いた場合、$K^+$ kill ratio の値を fluorotrans を巻かなかった場合に比べ約半分に抑えることが判明した。その為、E01-011 実験でも $K^+$ kill ratio をできる限り抑える目的で、Water Cherenkov 検出器の外壁に fluorotrans を巻くことを推奨する。

本研究の成果により、E01-011 実験において、我々は $K^+$ trigger において $K^+$ kill ratio 1.3% 以下に抑えることが可能であるということを示すことができた。

# 謝辞

本稿を作成するにあたり、多くの方のご指導、ご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

指導教官である中村哲助教授には、本研究において適切な助言を頂きました。また本稿執筆の際には物理のみならず、論理的な文章の書き方までもご指導頂き、心より感謝申し上げます。

橋本治教授には、物理から日常生活まで大変お世話に成りました。また私に E01-011、T554 実験という機会を与えて頂き、ありがとうございました。。藤井優助手にはお忙しい時期にも関わらず、最後まで丁寧に本稿の校正をして頂き、ありがとうございました。田村裕和教授には、セミナーを通してハイパー核のみならず物理を分かり易く教えて頂きました。高エネルギー研究所の高橋俊行助教授には、プログラミングに関していろいろ教えて頂き、ありがとうございました。

住浜水季氏、鵜飼美冬氏、小池岳志氏、ヒューストン大学の三好敏喜氏には本研究の解析手法や校正に最後までおつきあい頂き、心より感謝申し上げます。

渡辺崇史氏、亀岡覚氏、塚田暁氏、三浦勇介氏には、関わる実験が違いましたが、実験方法や解析方法、また物理に対する考え方について教わる事が多々ありました。

岡安雄一氏は Water Cherenkov 検出器の実験において実験手法や解析手法について丁寧にご指導、ご助言して頂きました。また日常生活でも励ましの言葉等を頂いたこと心から感謝しております。

野村洋氏には本稿第 3 章の校正について丁寧にご指導頂きました。同氏のご指導、ご助言がなければ、本稿をまとめることはできなかったと思います。本当にありがとうございました。

松村彰彦氏には本研究のテーマをどのようにするか悩んでいた際、相談に乗って頂きました。本当にありがとうございました。

大谷篤氏、本多大介氏には同学年ながらも実験方法や解析方法を基礎から教えて頂きました。本研究の解析できたのも、両氏から教えて頂いたことが土台になっていた思います。また同期の江島光彦氏、近岳士氏には実験準備等の手伝いや助言を頂きました。2 年という短い期間でしたが、同期の皆様と一緒に励ましながら研究できたことを幸せに思います。

修士 1 年の野中健一氏には、本稿を執筆中にいろいろな場面で支えて頂きました。どうもありがとうございました。2005 年 6 月から開始する E01-011 実験で、同氏がご活躍されることを期待しています。木下沙理氏、二ッ川健太氏、八幡啓介氏、馬越氏には本稿作成において図の作成や、文章の校正を手伝って頂き深く感謝しております。

すでに社会人としてご活躍されている小山田正学氏、山内大和氏には行動力と精神面で教わることが多々ありました。本稿の作成を最後までやり遂げることができたのも、両氏から教わった精神的強さによるものだと思います。

技官の加藤守夫氏、千賀伸幸氏には実験治具を作成する際、大変お世話になりました。ありがとうございました。秘書の川村直子氏には普段の学生生活を支えて頂き、ありがとうございました。

最後になりますが本稿の作成にあたり、ご協力下さった全ての方々に深く感謝致します。

# 付 録A　波長変位剤 -Amino-G salt-

## A.1　蛍光作用

蛍光作用は主に光ルミネセンスによって起きる。一般に蛍光作用には、一重項同士の遷移による蛍光と、三重項励起状態から一重項基底状態への遷移による燐光がある。燐光は禁制遷移を伴う為、同重項間の遷移と比較し遷移確率は低い。

また三重項励起状態から一重項基底状態へ遷移する際、パウリ排他律よりその過程でスピンの向き変わらなければならない。その為、三重項励起状態から一重項基底状態へ一気に戻る事ができず、燐光もゆっくり漏れ出す事となる。このような理由より、燐光の寿命[1]は蛍光に比べ長くなる。次に蛍光、燐光の発光メカニズムをポテンシャル曲線を用い説明する。

### A.1.1　蛍光のメカニズム

図 A.1 を用いて蛍光プロセスを経路毎に説明する。

・A → B : 一重項基底状態の底 ( A 点 ) にある電子が、外部からの光エネルギーにより一重項励起状態の B 点に遷移される。この際、一般的に電子の質量は原子核に比べ非常に小さいので、電子遷移は極めて短時間 ( $10^{-16}$ sec 以内 ) に起こる。これは原子核振動の周期 ( $10^{-12}$〜$10^{-14}$ sec ) より短い為、原子核間の相対的な位置は電子遷移によりほとんど変化しない (Franck-Condon の原理)。これにより、エネルギー吸収による電子遷移に対し、電子は A 点の真上 ( B 点 ) に遷移する。

・B → C : B は一重項励起状態の底 ( C 点 ) でないので、熱や振動を通してエネルギーを損失し、底 C へ遷移する。

・C → D : C 点から、一重項基底状態の D 点に電子が遷移する。その際 $E_{CD} = h\nu - E_{BC}$ のエネルギーをもった光を発する。これが蛍光となる。その後、熱や振動を通してエネルギーを損失し、再度一重項基底状態の底 ( A 点 ) へ遷移する。

[1]物質によって違いがあるため、一概に言えないが、蛍光の平均的な発光寿命は $10^{-9}$〜$10^{-7}$ sec、また燐光は $10^{-3}$〜10 sec である。

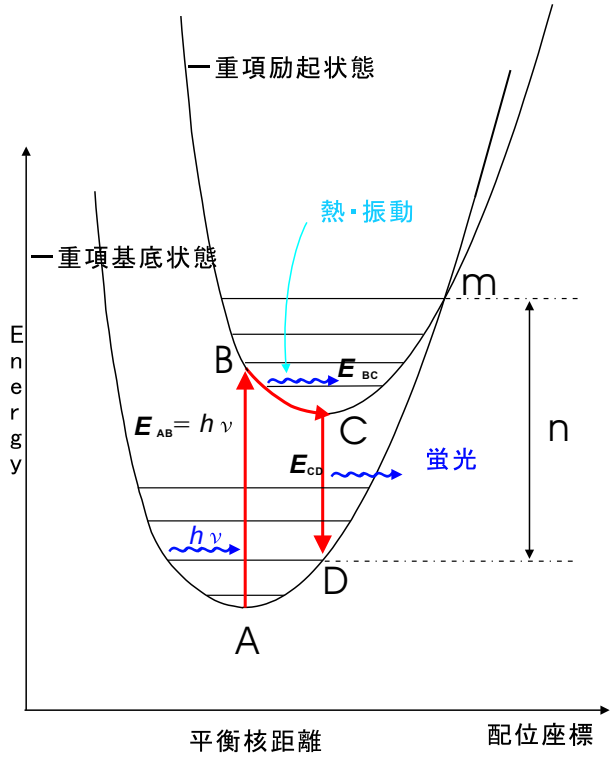



図 A.1: 蛍光物質のポテンシャル曲線

横軸:原子間の配位距離、縦軸:energy レベル。上図は、ポテンシャル曲線を使用し、蛍光プロセスを表示したものである。蛍光プロセスの経路は赤線で示されている。また図中下部の曲線は一重項基底状態であり、上部の曲線は一重項励起状態を表している。また $E_{AB}$、$E_{BC}$、$E_{CD}$ は其々、経路間でのエネルギーの差分である。

以上より図 A.1 において、高いエネルギー状態に励起されても、まず C に遷移してから蛍光は発生することが意味している。すなわち、熱・振動エネルギーとなった部分のエネルギーは、蛍光のエネルギーとならないので、蛍光のエネルギーは常に吸収された光のエネルギーより低い (つまり波長が長い) ことになる。これを Stokes の法則と呼ぶ 。

しかし B 点において系の温度を上昇させれば、系のエネルギーが増加し、B 点より高い m 点への移動が可能となる。すると、電子遷移の経路は A → B → m → D となり、発光過程を経ず、基底状態へと遷移する。このことより、蛍光剤を用いる時、温度が高ければ蛍光の強度は減少し、温度を下げる事で蛍光の強度は増す。

## A.1.2　燐光のメカニズム

図 A.2 を用いて燐光プロセスを経路毎に説明する。

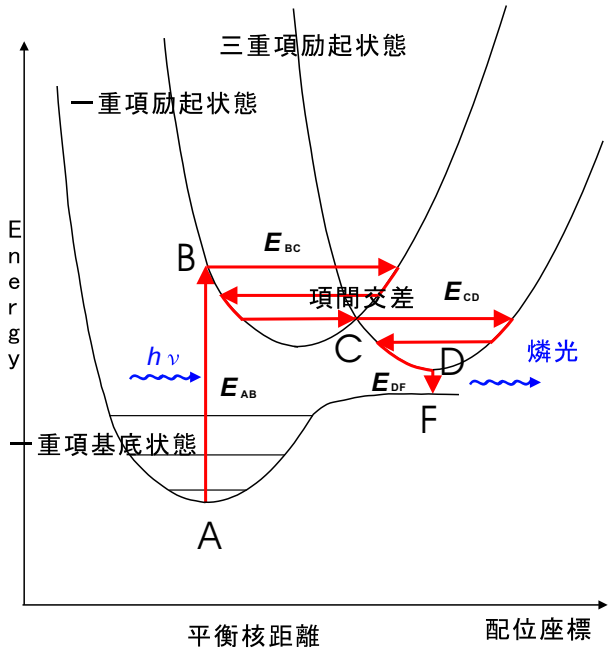



図 A.2: 燐光物質のポテンシャル曲線

横軸:原子間の配位距離、縦軸:energy レベル。上図は、ポテンシャル曲線を使用し、燐光プロセスを表示したものである。燐光プロセスの経路は赤線で示されている。また図中下部の曲線は一重項基底状態、中部の曲線は三重項励起状態、そして上部の曲線は一重項励起状態を表している。また $E_{AB}$、$E_{BC}$、$E_{CD}$、$E_{DF}$ は其々、経路間でのエネルギーの差分である。

・A → B : 一重項基底状態の底 ( A 点 ) にある電子が、外部からの光エネルギーにより一重項励起状態の B 点に遷移される。またこの時、Franck-Cordon の原理より、エネルギー吸収による電子遷移に対し、電子は A 点の真上 ( B 点 ) に遷移する。

・B → C : B は一重項励起状態の底でない為、熱や振動を通してエネルギーの失活過程を経て、底に向かい遷移する。しかし燐光プロセスでは、C 点に於いて、一重項励起状態から三重項励起状態へ非放射的に転換が起きる (項間交差)。

・C → D : C 点から三重項基底状態の底 D 点へ、失活過程を経て電子が遷移する。

・D → F : D 点から一重項基底状態の F 点に電子が遷移し、その際燐光が発生する。その後、熱や振動を通してエネルギーを損失し、再度一重項基底状態の底 ( A 点 ) へ遷移する。

### A.1.3　発光プロセスを持たない場合

最後に図 A.3 を用いて発光プロセスを持たない場合について説明する。

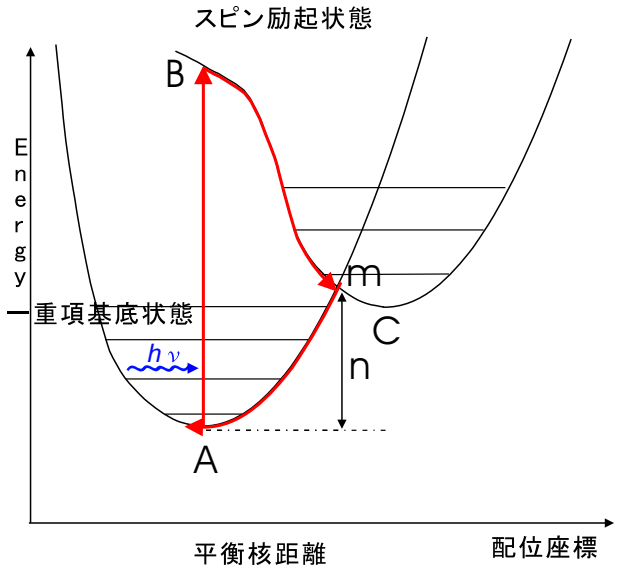



図 A.3: 発光プロセスが生じない場合でのポテンシャル曲線
横軸:原子間の配位距離、縦軸:energy レベル。上図は、ポテンシャル曲線を使用し、発光プロセスが生じない場合について表したものである。。プロセスの経路は赤線で示されている。また図中下部の曲線は一重項基底状態、上部の曲線はスピン励起状態を表している。

基底状態と励起状態の交点を m とし、m のエネルギーレベルが C より高い場合、電子は C へ遷移することなく、A → B → m → A の経路で基底状態へと戻る。

## A.2　波長変位剤 -Amino-G salt-

この節では、波長変位剤として我々の研究で良く用いられる蛍光剤について触れる。特に本研究で使用した、Amino-G salt を中心に述べる。

### A.2.1　波長変位剤

波長変位剤は蛍光剤の事であり、Cherenkov 検出器や有機シンチレーションカウンターでよく使用される。Cherenkov 検出器だけについて言えば、Cherenkov 光による光子数の波長分布は 1/(波長)$^2$ に比例するため可視領域の光子数は少なくなる。その為、波長変換剤を添加することにより、紫外線領域側の Cherenkov 光を PMT の感度波長領域側にシフトさせ光子数増やし検出効率を上げる。

### A.2.2 Amino-G salt

Amino-G salt(化学名：7-Amino-1. 3-naphthalenedisulfonic-acid. monopotassium salt hydrate。分子式：$C_{10}H_9NO_6S_2$) は波長 248.0、308.0、355.0 nm に光吸収のピークをもち、最大蛍光量が波長 455.0 nm に分布を持つ [23]。その為 Amino-G salt の使用により、Cherenkov 光を PMT の有効感度領域の波長領域を持つ光に変換することが可能となり、結果として PMT で検出される光量が増加する。 図 A.4 に Amino-G salt の濃度と pH 値について示す。

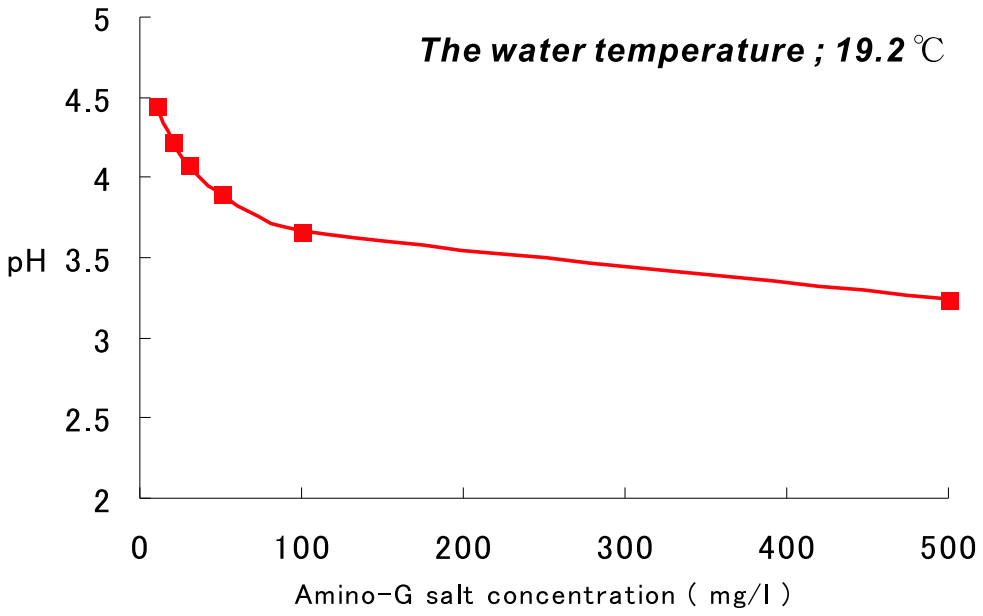



図 A.4: Amino-G salt の pH 値

縦軸:pH 値、横軸:Amino-G salt の濃度。純水の条件:抵抗率 20 MΩ·cm、水温 19.2 ℃。また測定にはガラス電極による pH 測定器を用いた。

# 付 録B　T554実験の解析データ

ここでは、本稿で示した図4.15、4.16、4.17のプロット図での数値データについてまとめておく。図4.15、図4.16のエラーは、4.9式より二項分布近似による分散から求めた(B.1式参照)。また図4.17のエラーは、Gaussianでfitした際に求まる平均値に対しての誤差を使用した。

$$\sigma_{error} = \frac{\sqrt{N_{K^+\ kill}\left(1 - \frac{N_{K^+\ kill}}{N_{K^+\ all}}\right)}}{N_{K^+\ all}} \times 100 \tag{B.1}$$

| momentum 1.2 GeV $/c$ | | | |
|---|---|---|---|
| Amino-G salt 濃度 (%) | $K^+$ kill ratio (%) | | |
| | threshold 97 % | threshold 98 % | threshold 99 % |
| 1 mg/$l$ | 1.48 ± 0.73 | 1.85 ± 0.82 | 2.95 ± 1.03 |
| 2 mg/$l$ | 0.20 ± 0.20 | 0.20 ± 0.20 | 0.40 ± 0.30 |
| 6 mg/$l$ | 0 | 0 | 0 |
| 8 mg/$l$ | 0 | 0 | 0 |
| 10 mg/$l$ | 0.28 ± 0.28 | 0.56 ± 0.40 | 0.56 ± 0.40 |
| 16 mg/$l$ | 0 | 0 | 0 |
| 20 mg/$l$ | 0 | 0 | 0 |
| 25 mg/$l$ | 0 | 0 | 0 |
| 30 mg/$l$ | 0.25 ± 0.25 | 0.25 ± 0.25 | 0.25 ± 0.25 |
| 35 mg/$l$ | 0.30 ± 0.30 | 0.30 ± 0.30 | 0.30 ± 0.30 |
| 50 mg/$l$ | 0.21 ± 0.22 | 0.22 ± 0.22 | 0.22 ± 0.22 |
| 100 mg/$l$ | 0.32 ± 0.32 | 0.32 ± 0.32 | 0.32 ± 0.32 |
| 500 mg/$l$ | 10 | 0 | 0 |
| 1000 mg/$l$ | 0.73 ± 0.73 | 0.73 ± 0.73 | 1.46 ± 1.03 |
| 2000 mg/$l$ | 0.29 ± 0.24 | 0.30 ± 0.30 | 0.58 ± 0.42 |

表 B.1: 図 4.15 の momentum 1.2 GeV/$c$、threshold 97, 98 ,99% の場合 $K^+$ kill ratio

| momentum 1.35 GeV /$c$ | | | |
|---|---|---|---|
| Amino-G salt 濃度 (%) | $K^+$ kill ratio (%) | | |
| | threshold 97 % | threshold 98 % | threshold 99 % |
| 1 mg/$l$ | 13.32 ± 1.56 | 16.70 ± 1.72 | 26.64 ± 2.03 |
| 2 mg/$l$ | 2.68 ± 0.76 | 3.80 ± 0.90 | 7.59 ± 1.25 |
| 6 mg/$l$ | 1.00 ± 0.58 | 1.00 ± 0.58 | 5.02 ± 1.26 |
| 10 mg/$l$ | 2.89 ± 0.86 | 4.21 ± 1.03 | 8.16 ± 1.40 |
| 16 mg/$l$ | 0.83 ± 0.48 | 1.38 ± 0.61 | 3.58 ± 0.98 |
| 20 mg/$l$ | 0.64 ± 0.64 | 1.27 ± 0.90 | 3.18 ± 1.40 |
| 30 mg/$l$ | 0.96 ± 0.36 | 1.23 ± 0.41 | 2.88 ± 0.62 |
| 50 mg/$l$ | 1.15 ± 0.66 | 1.15 ± 0.66 | 2.69 ± 1.00 |
| 100 mg/$l$ | 0.50 ± 0.50 | 0.50 ± 0.50 | 1.00 ± 0.71 |
| 500 mg/$l$ | 1.40 ± 0.80 | 1.87 ± 0.93 | 3.74 ± 1.30 |
| 2000 mg/$l$ | 3.26 ± 1.31 | 5.43 ± 1.67 | 9.78 ± 2.19 |

表 B.2: 図 4.16 の momentum 1.35 GeV/$c$、threshold 97, 98 ,99% の場合 $K^+$ kill ratio

| momentum 1.2 GeV /$c$ | | |
|---|---|---|
| Amino-G salt 濃度 (%) | 光電子数 | |
| | $K^+$ | p |
| 1 mg/$l$ | 39.94 ± 0.46 | 14.92 ± 0.03 |
| 2 mg/$l$ | 46.01 ± 0.33 | 18.50 ± 0.03 |
| 6 mg/$l$ | 41.28 ± 0.31 | 15.57 ± 0.25 |
| 8 mg/$l$ | 44.53 ± 0.33 | 11.69 ± 0.03 |
| 10 mg/$l$ | 56.53 ± 0.53 | 21.80 ± 0.04 |
| 16 mg/$l$ | 59.59 ± 0.36 | 25.04 ± 0.03 |
| 20 mg/$l$ | 114.15 ± 0.84 | 49.32 ± 0.06 |
| 25 mg/$l$ | 120.32 ± 0.81 | 50.18 ± 0.06 |
| 30 mg/$l$ | 142.11 ± 1.07 | 56.53 ± 0.07 |
| 35 mg/$l$ | 117.67 ± 0.77 | 49.45 ± 0.06 |
| 50 mg/$l$ | 135.19 ± 0.72 | 56.36 ± 0.06 |
| 100 mg/$l$ | 134.43 ± 0.98 | 57.56 ± 0.09 |
| 500 mg/$l$ | 136.11 ± 0.95 | 59.40 ± 0.07 |
| 1000 mg/$l$ | 80.09 ± 0.83 | 35.10 ± 0.06 |
| 2000 mg/$l$ | 84.97 ± 0.68 | 38.92 ± 0.05 |

表 B.3: 図 4.17 の momentum 1.2 GeV/$c$ に於ける Amino-G salt 濃度と光電子数の関係

# 参考文献


[1] W.Bertozzi C.E.Hyde-Wright and J.MFinn Proc.1985 CEBAF Summer Workshop (1985)

[2] O.Hashimoto S.N.Nakamura L.Tang J.Reinhold et al.,Jlab E01-011 Second Readiness Review (2003)

[3] T.Motoba et al, Prog. Theo. Phys. Sippl. No.117 151. (1994)

[4] SAPHIR Collaboration Eur. Phy. J. A19, 251-273 (2004)

[5] W.J Cummings, SOS, Handbook

[6] J.E.Spencer and H.A.Enge, NIM 49, 181. (1967)

[7] T.Miyoshi et al,Phys.Rev.Lett 90, 232502 (2003)

[8] T.Motoba Mesons and Light Nuclei: 8th conference, edited by J.Adam et al, 125 (2001)

[9] Toshinobu Miyoshi, Doctor Thesis (2002)

[10] H.Yamazaki et al, Phys. Rev. C 52, 1157 (1995)

[11] M.Danysz et al, Phil. Mag. 44, 348 (1953)

[12] W.Bruckner, et al. Phys. Lett 55, 107 (1975)

[13] G.C. Bonazzola, et al. Phys. Rev. Lett 34, 683 (1975)

[14] W.Bruckner, et al. Phys. Lett 62, 481 (1976)

[15] W.Bruckner, et al. Phys. Lett 79, 152 (1978)

[16] C.Milner, et al. Phys. Rev. Lett 54, 1237 (1985)

[17] H.H.Pile, et al. Phys. Rev. Lett 66, 2585 (1991)

[18] W.Bruckner, et al. Nucl. Phys. A, 534, 478 (1991)

[19] ALTERA http://www.altera.co.jp

[20] S.Ajimura, S.Minami, and M.Nomachi, OULNS Annual Report (2001) in press

[21] 吉田 瑞樹, 修士論文, 東京大学 (2001)

[22] 浜松ホトニクス http://www.hpk.co.jp

[23] 加藤 貞幸, 放射線計測 (培風舘)

[24] E.Heiberg.and.J.Marshall, The review of scientific instruments vol 27, No 8

[25] A.Bezaguet et al, NIM 158, 303 (1979)

[26] N.A.Poter, Il Nuovo Cimento V2, 526 (1957)

[27] P.Nemethy et al, NIM 173,251 (1980)

[28] 日本ジェネティクス http://www.n-genetics.com

[29] 岡安 雄一, 修士論文, 東北大学 (2001)

[30] 大坂 岳, 修士論文, 東北大学 (2002)

[31] 小山田 正学, 修士論文, 東北大学 (2003)

[32] 野村 洋, 修士論文, 東北大学 (2003)

[33] 松村 彰彦, 修士論文, 東北大学 (2003)

[34] K. クラインクネヒト, 放射線検出器 (培風舘)

[35] 上田 正康 他, 物性における光学的問題・塑性 (共立出版)