修士論文

中性*K*中間子スペクトロメータ用 straw drift chamberの開発

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻

丸山 那由太

平成 18 年

概 要

電磁相互作用によるストレンジネス生成反応は、メソン-バリオン相互作用の強さ、ハドロンの構造などを通じて生成過程のメカニズム知るために重要な研究対象である。中でも *n*(*γ*, *K*⁰) 人反応は終状態・始状態で電荷の関与が無い非常にユニークな反応であるが、この反応を測定することが実験的に困難であったため、電磁相互作用によるストレンジネス生成過程の研究は主に *K*⁺ 中間子生成を通じて実験が行われてきた。

そこで我々は、中性 K 中間子スペクトロメータ (NKS) を建設し共鳴状態の影響の小さい閾値領 域での n(y, K⁰)A 反応測定に初めて成功した。しかし、NKS は既存のスペクトロメータを改良し て建設されていることもあり、前方でのアクセプタンスが極端に小さいなど、改良すべき点が明 らかになった。

この改良点を踏まえて、NKS に代わる新型スペクトロメータ (NKS2) を新たに建設した。NKS2 は *n*(*y*, *K*⁰) 人反応測定に特化した中性 *K* 中間子スペクトロメータであり、NKS での問題点を踏ま えて検出器の配置を最適化している。これにより、NKS2 は *K*⁰ 中間子の生成領域を全て覆い、ア クセプタンスの制約を排除できる。

本研究では、NKS2用に新たに開発された飛跡検出器の一つであるストロードリフトチェンバー について、その設計・製作の過程・性能評価について記述する。CDCと併せてトラッキングを行 い、崩壊点位置分解能の向上を目的として設計した。検出領域は内径100mm、外径155mm、高さ 300mm、ビーム平面上で±150°を覆い、立体角で2.1*π*sr の領域を覆っている。

東北大学核理研の標識化光子ビームを用いて、液体重水素を用いたデータ収集を現在遂行中で ある。実験データの解析により SDC の性能評価を行った。検出効率として約 98% を達成、位置 分解能として σ = 320~470 μ m を達成した。また CDC と併せての崩壊点位置分解能は σ = 1.1mm であった。

目 次

第1章	実験の背景、物理	1
1.1	はじめに	1
1.2	電磁相互作用におけるストレンジネス生成過程	1
1.3	NKS を用いた $n(\gamma, K^0)$ A 反応実験	4
1.4	本論文の目的	4
第2章	NKS2のセットアップ	7
2.1	標識化光子ビーム	8
2.2	液体重水素標的	10
2.3	プラスチックシンチレーションカウンタ	11
	2.3.1 IH (Inner Hodoscope)	11
	2.3.2 OH (Outer Hodoscope)	12
2.4	680 双極電磁石	15
2.5	ドリフトチェンバー	16
	2.5.1 SDC (Straw Drift Chamber)	16
	2.5.2 CDC (Cylindrical Drift Chamber)	17
2.6	トリガー計数率の抑制....................................	18
	2.6.1 Sweep Magnet	19
	2.6.2 Vacuum Chamber	19
	2.6.3 EV (Electron Veto Counter)	19
第3章	SDCの設計、製作の過程	21
3.1	設計の動機	21
3.2	ドリフトチェンバーの動作原理	22
	3.2.1 ガス内の荷電粒子の通過	22
	3.2.2 ガス原子の電離	23
	3.2.3 ガス増幅	24
	3.2.4 ガスの選択	26
3.3	SDC の構造	27
3.4	読み出し回路....................................	29
第4章	性能評価	34
4.1	閾値電圧の決定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
4.2	シングルレート	34
4.3	SDC の解析方法	36
44	检出 动率	40

A.3	平美駅にのける HDL ノログラミノグ	51
A.2	HDL 記述と FPGA への書き込み	51
A.1	TUL モジュール	50
付録A	TUL におけるトリガーロジックの形成	50
第5章	まとめと今後	49
4.7	実験中に起きたトラブルと対策	46
4.5 4.6	位置分解能	41 44

表目次

1.1	電磁相互作用によるストレンジネス生成反応とその閾値	2
1.2	電磁相互作用によるストレンジネス生成反応の代表的な実験機関	2
2.1	<i>K⁰の</i> 崩壊過程	8
2.2	IH の設置位置とサイズ 1	3
2.3	OHV の設置位置とサイズ	5
2.4	OHH の設置位置とサイズ	5
2.5	CDC のワイヤー配置 1	7
3.1	Korff による α の近似式のパラメータ 2	5
3.2	SDC のワイヤー配置	.8
3.3	SDC の構造	9
4.1	SDCの電圧	-1

図目次

1.1	電磁相互作用によるストレンジネス生成反応素過程の全断面積2
1.2	電磁相互作用によるΛ生成素過程断面積の理論計算
1.3	K 中間子生成の Feynman Diagram 3
1.4	NKS 概略図
1.5	重水素標的における NKS の K^0 アクセプタンス ϵ
2.1	
2.1	18時間、第2天駅里の18時回 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.2	NKS2の胎職因と町面因
2.5	NR32の検田協研 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.4	加速品の運転 \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I} \mathcal{I}
2.5	クガーの個成 \dots
2.0	ッカーの回応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.7	Inner Hodoscope
2.0	** 学習子増倍管の構造と Fine Mesh PMTの構造 13
2.9	Outer Hodoscope 14
2.10	680 双極電磁石による磁場 16
2.12	Straw Drift Chamber のレイアウトと写直
2.13	CDC のワイヤー配置図と写直
2.14	スイープマグネットと真空チェンバー \dots 19
2.15	Electron Veto Counter
3.1	ドリフトチェンバーの動作原理 22
3.2	エネルギー損失のグラフ 23
3.3	ガス増幅計算のためのセルの模式図 24
3.4	Ar – C ₂ H ₆ ガスとドリフト速度の関係 27
3.5	ストロードリフトチェンバーのセルレイアウト
3.6	SDC、セルのレイアウト 29
3.7	ストロー支えの構造
3.8	SDC セルのオーバーラップの模式図30
3.9	garfield による SDC セルの電場計算 31
3.10	ASD カードの回路図
3.11	pre AMT ブルダウン抵抗の回路図 33
3.12	ASD カードのビンアサイン
4.1	ノイズカウントの閾値電圧依存性 34

4.2	シングルレートの電圧依存性................................	35
4.3	シングルレートのビーム強度依存性................................	36
4.4	SDC のドリフト時間	37
4.5	トラッキングの χ^2 分布	38
4.6	x-t relation	39
4.7	トラッキングミス	39
4.8	検出効率の電圧依存性....................................	40
4.9	検出効率の角度依存性 (layer1)	41
4.10	検出効率の角度依存性....................................	42
4.11	SUMOR のレート毎の検出効率.................................	43
4.12	layer 毎に見た位置分解能	44
4.13	ワイヤ毎に見た位置分解能	45
4.14	崩壊点位置分解能	46
4.15	ストローのアルミ蒸着が剥がれたと思われる時間のカレントモニター......	47
4.16	アルミ蒸着が剥がれたストローの写真とそれが起きた場所	47
A.1	TUL-8040	50
A.2	Quartus II の GUI を用いた HDL 記述の例	52
A.3	本実験のトリガーロジックの一部	52
A.4	HDL による Mean Timer の記述	52
D 1	and Atm	- 7
B.I	SDC 主体図	57
B.2		57
B.3		58
В.4		58
B.5	八の字王枉	59

第1章 実験の背景、物理

1.1 はじめに

物質の基本要素の一つである原子核の状態を知ることは、強い相互作用の研究という点で重要 な役割を占めている。原子核の深部の状態を知るためには、ストレンジネス量子数を含むバリオ ン(ハイペロンと言う)を用いる手段が近年行われている。ハイペロンは、通常の原子核の構成 要素である陽子や中性子とは異なる量子数を持つため、パウリの排他原理の効果を受けず、深い 束縛状態を知るための探針になり得るからである。

ハイペロンを含んだ原子核 (ハイパー核) は 1953 年に原子核乾板中で発見された。それ以来ストレンジネス核物理は中間子ビームを使った (K^- , π^-) や (π^+ , K^+) 反応を用いて発展してきた。近年、これらの反応に加えて、米国 Jefferson 国立研究所において電子線を用いた ($e, e'K^+$) 反応によるハイパー核分光実験が行われ、その利点が明らかにされた [1]。この反応は電磁相互作用によってストレンジネスを生成する。($e, e'K^+$) 反応による分光学的手法が確立した現在、電磁相互作用によるストレンジネス生成過程の理解は非常に重要である。その中でも、電荷を伴わない (γ, K^0) 反応の実験が重要な位置にある。

我々の研究グループでは、*n*(*γ*, *K*⁰)Λ反応を測定して、電磁相互作用におけるストレンジネス生成過程の検証を研究の対象としている。

1.2 電磁相互作用におけるストレンジネス生成過程

電磁相互作用によるストレンジネス生成反応は、メソン-バリオン間相互作用の強さ、ハドロンの構造などを通じて生成過程のメカニズムを知るために重要な研究対象である。1950年代後半から理論的、実験的に研究が行われてきた。特に近年に至っては、ビームの精度が向上してきた事もあり、良質な実験データが得られるようになった。

電磁相互作用によるストレンジネス生成には表 1.1 に示すように 6 つの素過程がある。

表 1.2 に示すように、陽子標的の K^+ 中間子生成反応に対する実験は多くの実験機関でなされてきた。しかし K^0 中間子生成反応の実験は、我々の研究の前までは無かった。電荷のない K^0 中間子を高分解能で収集することが困難であったためである。図 1.1 に SAPHIR の実験値と Kaon-MAID [6]の理論値の比較を示す。 K^+ 中間子生成反応はデータ点が多い。それに対し K^0 中間子生成反応は限られた γp のデータ点があるだけで、 γn による測定は存在しない。

図 1.2 に 2 つの理論モデルによる A 生成素過程の全断面積の γ 線のエネルギー依存性 (A)、及び $E_{\gamma} = 1.05$ GeV においての全断面積の角度依存性 (B) を示す。理論モデルは、実線が Kaon-MAID モデル [6]、点線が Saclay-Lyon A(SLA) モデル [7] である。

閾値近傍のエネルギー領域では、どのモデルもアイソバー模型に基づいている。このモデルは ストレンジネス生成素過程を現象論的に計算する手法として、広く用いられている。図 1.3 で示 すダイアグラム中の結合定数をパラメータとして、実験データを再現するように決める。その際、

	反応	閾値 [MeV]
1)	$\gamma p \to K^+ \Lambda$	911.1
2)	$\gamma p \to K^+ \Sigma^0$	1046.1
3)	$\gamma p \to K^0 \Sigma^+$	1047.5
4)	$\gamma \mathbf{n} ightarrow \mathbf{K}^{0} \Lambda$	915.4
5)	$\gamma n \to K^0 \Sigma^0$	1052.1
6)	$\gamma n \to K^+ \Sigma^-$	1050.5

表 1.1: 電磁相互作用によるストレンジネス生成反応とその閾値

表 1.2: 電磁相互作用によるストレンジネス生成反応の代表的な実験機関

加速器/検出器	標的	ビーム	生成	エネルギー [GeV]
ELSA/SAPHIR [2]	р	γ	$K^+\Lambda, K^+\Sigma^0, K^0\Sigma^+$	~ 2.6
JLab/CLAS [3]	р	γ, e	$K^+\Lambda, K^+\Sigma^0$	0.5 ~ 6.0
SPring-8/LEPS [4]	р	$ec{\gamma}$	$K^+\Lambda, K^+\Sigma^0$	1.5 ~ 2.4
ESRF/GRAAL [5]	р	γ	$K^+\Lambda$	0.5 ~ 1.5
LNS/NKS	п	γ	$K^0\Lambda$	0.9 ~ 1.1



図 1.1: 電磁相互作用によるストレンジネス生成反応素過程の全断面積の、SAPHIR による実験値 (点) [2] と Kaon-MAID による理論値 (実線) [6] との比較。 $p(\gamma, K^0)\Sigma^+$ に関してはデータ点が少な く、 γn に関しては全く測定されていない。

フィッティングに用いたデータなどによりモデルの違いが生じる。そのため K⁺ 生成過程はデータ 点が多く計算結果はモデルごとに良く合っているが、実験データが得られていない K⁰ 生成過程は モデルごとの計算結果が大きく異なっている。



図 1.2: 電磁相互作用による Λ 生成素過程断面積の理論計算 実線は Kaon-MAID [6]、点線は SLA [7] による計算結果である。左図は全断面積のエネルギー依 存性、右図は E_{γ} = 1.05GeV での微分断面積の角度分布を表す。



図 1.3: K 中間子生成の Feynman Diagram

したがって *K*⁰ 生成過程のデータが求められている。特に本研究で測定する *n*(γ, *K*⁰)Λ はユニー クな反応で、その特徴は次の通りである。

- 始状態・終状態で電荷が関与しないため、Born 項での t-channel 交換項が寄与しない。
- *p*(*γ*, *K*⁺)Λ反応とアイソスピン鏡映であり、Born 項での u-channel の Σ⁰ 交換項ではフレーバー SU(3) 対称性により、寄与する結合定数が 2 つの反応で逆符号になる。(*g*_{Σ⁰*K*⁺*n*} = -*g*_{Σ⁰*K*⁰*n*})
- 閾値領域においては、s-channel における核子共鳴状態の寄与が少ない。

これまでの K⁺ 中間子生成反応の測定だけでは、ダイアグラムが入り混じっていてそれぞれの寄 与を分離することができず、各モデルで考慮する粒子の共鳴状態が異なっている。しかし、これ らの特徴から、閾値領域での n(y, K⁰)A 反応を測定し、K⁺ 生成過程と K⁰ 生成過程を比較するこ とでハイペロン生成に寄与するそれぞれの過程を分離して研究することが可能になる。こうして ストレンジネス電磁生成機構の解明に重要な情報を与える。

1.3 NKS を用いた $n(\gamma, K^0)$ 人反応実験

そこで我々はストレンジネス生成機構の全容を明らかにするため、東北大学原子核理学研究施設 (核理研)の0.8~1.1GeV 標識化光子ビームを用いて $n\gamma$ 反応での K^0 中間子測定を世界に先駆けて 行った [8]。そのために大立体角中性 K 中間子スペクトロメータ (Neutral Kaon Spectorometer : NKS) を建設し、2003 年春から 2004 年春にかけて炭素及び液体重水素を標的として行った。 $n(\gamma, K^0)\Lambda$ 反応によって生成される K_S^0 は $\pi\pi$ に 2 体崩壊する。そのうち $\pi^+\pi^-$ に崩壊した事象を測定し、 $\pi^+\pi^-$ の不変質量分布から K^0 中間子を同定する。

NKS は、最大 0.48T まで励磁可能な双極電磁石、飛跡検出のためのドリフトチェンバー、飛行時間測定プラスチックシンチレーションカウンタ、電子対生成によるバックグラウンド除去のためのプラスチックシンチレーションカウンタで構成されていた (図 1.4)。

 K^0 中間子の生成断面積は小さく、他のハドロニックなイベントとの分離が重要になる。 K_s^0 中間子の寿命が $c\tau = 2.68$ cm と、バックグラウンドとなる ρ などの粒子と比べて長いことを利用し、2 つの飛跡から求めた崩壊点が標的領域の外にあるイベントを選択することで他のイベントとの分離ができ、 K^0 中間子の測定が可能となった。得られた生成断面積の形から、重心系での角度分布は後方にピークを持つことを示唆した。

しかし、図 1.5 に示すように NKS は高運動量の K⁰ のアクセプタンスが非常に小さいため、得られた実験データは低運動量領域の限られたものとなった。よって、K⁰ 生成反応の限られた高運動量領域のみ測定されたため、理論との比較が制限された。

1.4 本論文の目的

そこで我々は、より高い運動量領域での K^0 生成反応を測定するため、NKS に代わるスペクトロ メータ (NKS2) を新たに設計・建設し、現在実験を遂行中である。NKS2 は閾値領域での $n(\gamma, K^0)\Lambda$ 反応測定に特化した中性 K 中間子スペクトロメータで、検出器の配置を最適化することにより K^0 中間子生成領域をほぼ 100% 覆うことができる。これによりアクセプタンスの制約を排除でき、多 方面から理論との比較が可能になる。また、 Λ 粒子の崩壊によって生じる陽子と π^- を、 K^0 と同



図 1.4: NKS 概略図

双極電磁石、ドリフトチェンバー、プラスチックシンチレータで構成されている。実光子ビームの 進行方向に対して左側 (Left arm) と右側 (Right arm) を定義し、Left arm と Right arm それぞれで粒 子を検出したイベントを収集することで K_s^0 の2体崩壊によって生じる $\pi^+\pi^-$ の同時測定を行った。

時に測定することが可能で、これまでは解析できなかった崩壊点が標的内部にある事象も測定することができる。これにより、収量が大幅に増加すると共に、A 粒子の偏極度に関する情報が得られる。NKS2 による *K*⁰ 中間子生成データが電磁相互作用によるストレンジネス生成過程の研究にとって重要な役割を果たすと期待されている。

本論文では、まず第2章で実験装置の説明をしたのちに、NKS2のトラッキングデバイスとして 新たに製作したストロードリフトチェンバー (Straw Drift Chamber: SDC) について、構造の説明 (第3章)や、実験で使用した際のデータを用いて性能評価を行う(第4章)。



図 1.5: 重水素標的における NKS の K⁰ アクセプタンス [9, 10]

図はアクセプタンスの運動量依存性と実験室系での角度依存性を表したもので、下図は上図を2次元に射影したものである。モンテカルロシュミレーションを用いて標的内部から K⁰ を等方的に 発生させた。実際に使用した解析プログラムに通しているので解析効率も含まれている。NKS 実 験では、Region1 以外は統計が不十分であったため充分な議論ができなかった。

第2章 NKS2のセットアップ



図 2.1: 東北大学原子核理学研究施設、第2実験室の概略図

LINAC からの 200MeV の電子を STB リングで 1.2GeV まで加速し、制動放射により光子を生成す る。制動放射後の電子を光子標識化装置 (タガー)で検出することで光子のエネルギーと時間を測 定する。標識化された光子を標的に照射し、反応によって生成した荷電粒子を NKS2 を用いて検 出する。

実験は図 2.1 にあるように東北大学原子核理学研究施設(核理研)・第2実験室において行う。 STB(ストレッチャー・ブースター)リング 1.2GeV の標識化光子ビームを液体重水素に照射する。 旧NKS スペクトロメータの問題点等を踏まえて新たに検出器を加えられた NKS2 スペクトロメー タ(図 2.3)を用いて K⁰ を検出する。実験の大まかな流れは次の通りである。

- 線形加速器 (LINAC) で 300MeV まで加速された電子を、STB リングに入射し、1.2GeV に加速したのち、その状態でリング内に保持する。
- STB リングの周回電子軌道に 11µmφ のカーボンファイバー (ラジエータ)を挿入する事で制 動放射による γ線を発生させる。制動放射を起こし軌道を外れた電子を、48本+12本のプラ スチックシンチレーションカウンタ (タガー)により検出し、これにより γ線のエネルギーと 時間を測定する。
- γ線が液体重水素標的に当たり、n(γ, K⁰)Λ反応がおこる。
- 反応した K⁰ の内、半分は寿命の短い K⁰_S である。表 2.1 にあるように K⁰_S は、約 69 %の分 岐比で π⁺ と π[−] に崩壊する。



図 2.2: NKS2 の俯瞰図 (左) と断面図 (右)

なお、これ以降、680 双極電磁石の中心を座標の原点とし、左手系でビーム方向を x 軸、ヨーク 方向を y 軸、高さ方向を z 軸と定義する。ビームの進行方向に対して左側 (Left)、右側 (Right) と する。

π⁺ と π⁻ は、680 双極電磁石で偏向を受け、図 2.3 で示す IH(Inner Hodoscope)、SDC(Straw Drift Chamber)、CDC(Cylindrical Drift Chamber)、OH(Outer Hodoscope) で測定する。 ホド スコープである IH と OH によって時間情報を得て π の同定を行い、ドリフトチェンバーで ある SDC と CDC から得られる位置情報によって運動量を得る。π⁺, π⁻ の運動量から不変質 量を求めて K⁰_S の同定をする。

	K_S^0	K_L^0
質量	497.648 ± 0.022 MeV	497.648 ± 0.022 MeV
寿命	(0.8953±0.0006)×10 ¹⁰ 秒 $c\tau = 2.6842$ cm	$(5.18 \pm 0.04) \times 10^8$ 秒 $c\tau = 15.51$ m
崩壊過程(崩壊比)	$\pi^{0}\pi^{0} (31.05 \pm 0.14)\%$ $\pi^{+}\pi^{-} (68.95 \pm 0.14)\%$	$\begin{array}{c} 3\pi^0 \ (21.05 \pm 0.23)\% \\ \pi^+\pi^-\pi^0 \ (12.59 \pm 0.19)\% \\ \pi^\pm e^\mp \nu_e \ (38.81 \pm 0.27)\% \\ \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu \ (27.19 \pm 0.25)\% \end{array}$

表 2.1: K⁰の崩壊過程

2.1 標識化光子ビーム

まず線形加速器 (LINAC) で加速された電子がストレッチャー・ブースター (STB) リングに入射 される。電子は STB リングで加速され、1.2GeV で保持される。

電子の周回軌道に直径 11 μ m のカーボンファイバー (ラジエータ)を挿入することにより制動放 射を起こさせ、それによって γ 線が放出される。ラジエータは電子加速中は軌道上から外されて



図 2.3: NKS2 の検出器群



Beam Intensity

図 2.4: 加速器の運転サイクル

LINAC から入射した電子は、入射後 1.2 秒で 1.2GeV まで加速され、41 秒間その状態を保持する。 その後 0.1 秒で磁場を下げ、次の入射に備える。

おり、保持状態になると軌道上に挿入される。ラジエータの動作時間は 38 秒で、γ線の強度を一定にするために、周回電流が少なくなるにしたがって、周回軌道の中心に近づくように計算機で 制御されている。典型的な加速器とラジエータのサイクルを図 2.4 に示す。反跳電子はタガーで検 出される。

タガーは 48 本の Tagger Finger(以下 TagF)と、の 12 本の Tagger Backup(以下 TagB) で構成されている。図 2.5 の高エネルギー側から順に TagF1,TagF2,...,TagF48、TagB1,...,TagB12 と名前がつけられている。反跳電子のエネルギーによって異なる軌道を取るため、タガーが反応した場所に



図 2.5: タガーの構成

反跳電子は STB リングの偏向電磁石の磁場で運動量分析し、タガーで検出した。タガーは 48 本 のフィンガーカウンタと、その後方で設置したバックアップカウンタからなる。両者の同時計数 を取ることでバックグラウンドを軽減する。

よって反跳電子のエネルギーを知ることができる。電子ビーム 1.2GeV とこの反跳電子エネルギー から、制動放射による y 線のエネルギーを得る。バックグラウンドを減らすため、TagF 4 本に対 して TagB 1 本が覆うように作られ、TagF と TagB のコインシデンスを取る。TagF は、実験室内 の回路で対応する TagB とコインシデンスを取った信号を測定室に送る。コインシデンスを取っ た TagF を 4 本ずつ OR を取ったものを SUM と呼び、SUM1 ~ SUM12 全ての OR を取ったものを SUMOR と呼び、SUMOR の数を制動放射によって生成された y 線の数と定義している。

SUM や SUMOR を式に表すと次の通りである。またタガーの回路図を図 2.6 に示す。

 $SUM1 = (TagF1 \otimes TagB1) \oplus (TagF2 \otimes TagB1) \oplus (TagF3 \otimes TagB1) \oplus (TagF4 \otimes TagB1)$ (2.1)

$$SUMOR = SUM1 \oplus SUM2 \oplus \ldots \oplus SUM12$$
(2.2)

TagF1本は長さ20mm、厚さ5mmで、幅は入射電子のエネルギーが1.2GeVのとき、エネルギー アクセプタンスがおよそ6MeV になるようにカウンターごとに変えてある。幅は最も大きなもの で8mm、小さなもので5mmである。タガーによって γ 線のエネルギーを $0.8 \sim 1.1$ GeV の領域で 標識化することができる。

2.2 液体重水素標的

本実験では液体重水素を標的として用いる(図 2.7)。理想としては中性子のみを標的として用いたいが、現実的に中性子だけを集めることは困難である。そこで、中性子と陽子のみで構成され



図 2.6: タガーの回路



図 2.7: 液体重水素標的

ている最も簡単な構造の原子核を持つ重水素を中性子標的の代わりに用いる。核子が少ないため バックグラウンドが少なく、他の原子と比べて核子間の束縛状態が単純なため解析が比較的容易 である。液体にすることで密度を高め標的厚を稼いでいる。

液体重水素標的の容量は直径 40mm、厚さ 30mm 円筒形で、双極電磁石の中心から 15mm 上流の位置にある。円筒の中心軸方向に γ ビームが当たるように配置されている。

2.3 プラスチックシンチレーションカウンタ

荷電粒子の飛行時間 (Time Of Flight, TOF)の測定、及びデータ収集のトリガーを生成するための プラスチックシンチレーションカウンタとして IH (Inner Hodoscope) と OH (Outer Hodoscope)を 製作した。IH と OH の検出時間差から TOF を求め、チェンバー情報と併せて π の同定を行う。

2.3.1 IH (Inner Hodoscope)

IH は、双極電磁石の中心から約8cmの位置、液体重水素の外側に円形に配置されている全16本の厚さ5mmのプラスチックシンチレーションカウンタである。平面散乱角度で約-165°~+165°



図 2.8: Inner Hodoscope のレイアウト (左) と各ホドスコープの設置位置 (右)

を覆うが、ビームが通り抜ける窓をビーム下流に設けてある。窓の上にあるシンチレータを IHL1、 下にあるものを IHR1、窓の左にあるものをビーム下流から数えて IHL2,IHL3,...,IHL8、左にある ものを IHR2,...,IHR8 と定義する。IHL2 と IHR2 は計数率の高い所であるため、他の左右のシンチ レータより細く設計されている。デッドスペースを無くすため、シンチレータは台形に作られ隙間 を極力減らすように設計されている。IH のレイアウトとホドスコープの設置位置を図 2.8 に示す。

IH は 680 双極電磁石の中に配置されているため、耐磁性の光電子増倍管 (Photomultiplier、以下 PMT)を用いる必要がある。磁場に強い PMT として Fine Mesh 型の PMT が挙げられる。通常用 いられる PMT は図 2.9 上のようにダイノードが並んでおり、ダイノードに段階的に電圧をかける ことによって次々に 2 次電子を放出して増幅する構造である。しかし本実験においては PMT を磁 場中で使用し、通常の PMT では、電子が円柱型の PMT の軸に対して角度をなしながら斜めに進 むような構造となっていて、磁場中においては電子が磁場の影響を受けてダイノードに入射しな い可能性が高くなりゲインの劣化が予想される。一方、Fine Mesh PMT はダイノードが網目状に なっており (図 2.9 下)、電子が磁場に巻きつきながら進んでもダイノードに入射しやすくなってい るため磁場の影響を受けにくい構造になっている。IH にはこの Fine Mesh PMT(浜松ホトニクス株 式会社 [11] 型番:H6152-01B,1inch)を用いている。

設置するスペースが限られていたため、シンチレーションカウンタの片側のみに PMT を取り付けた。

IH はビームラインに近い場所にするため、粒子の通過数が多くなる。こうなると多くの電子が 増幅されるが、ダイノードの最終段近くになると沢山の電流が流れて印加電圧が低下してしまい、 望む増幅が見込めなくなる。このようなゲインの低下を防ぐために、PMTの最終3段のダイノー ドにはブースタ電源によって補助電圧を供給する。

2.3.2 OH (**Outer Hodoscope**)

OH は、CDC の外側に配置された左右 21 本ずつ、計 42 本の厚さ 20mm のプラスチックシンチ レーションカウンターである。それぞれに対して縦置き (OHVL,OHVR、それぞれ 12 本) と横置



図 2.9: 光電子増倍管の構造と Fine Mesh PMT の構造。 上図が通常の PMT の構造を示し、下図が Fine Mesh PMT のダイノード部分の構造である。

ID	幅	幅	中心からの距離	角度	長さ
	[deg]	[mm]	[mm]	[deg]	[mm]
IH1	18.0	24.55	81	-9.0 ~ 9.0	66
IH2	12.0	16.30	81	9.0 ~ 21.0	160
IH3	24.0	32.95	81	21.0~45.0	160
IH4	24.0	32.95	81	45.0 ~ 69.0	160
IH5	24.0	32.95	81	69.0 ~ 93.0	160
IH6	24.0	32.95	81	93.0~117.0	160
IH7	24.0	32.95	81	$117.0 \sim 141.0$	160
IH8	24.0	32.95	81	141.0 ~ 165.0	160

表 2.2: IH の設置位置とサイズ。左右はビームラインに対して対称。

き (OHHL,OHHR、それぞれ9本)がある。さらに縦置きは、前方と後方で少し構造が異なる。IH と同様デッドスペースを無くす為、シンチレータ部分を台形にして隙間を無くす工夫をしている。 読み出しのほとんどは、磁場に弱い通常のPMTを用いるため、特殊な形状のライトガイドによっ て、シンチレーション光を磁場の外に送っている。縦置き、横置き共に両側読み出しであり、縦



☑ 2.10: Outer Hodoscope

図下側から γ ビームを入射する。OHVR10~12 には、680 双極電磁石の電源ケーブルとの干渉が あるため、他の OH とは違った PMT を使用している。

置きは上下で PMT の Up と Down を定義し、横置きも便宜上ビーム上流側を Up、下流側を Down と定義している。PMT は磁場の影響が多少あると思われる位置に配置しているため、磁気シール ドとして鉄管を取り付けている。

OHの配置図を図 2.10 に示す。

前方 OHVL1~8、OHVR1~8

中心から 1200mm の位置に配置され、平面散乱角度で約 ±1.4° ~ ±59°、鉛直方向 ±374mm を覆っている。

後方 OHVL9~12、OHVR9~12

中心から 930mm の位置に配置され、平面散乱角度で約 ±113.8° ~ ±163.4°、鉛直方向 ±250mm を 覆っている。OHVR10 ~ 12は 680 双極電磁石の電源ケーブルとの干渉を避けるため、磁場中に PMT を置かなければならない。そのため、Fine Mesh PMT(浜松ホトニクス株式会社 型番:R5924-70,2inch) を用いる。左右でライトガイドの形状が異なる。

OHHL1~9, **OHHR1~9**

旧NKS 実験では双極電磁石の内側に縦置きにシンチレータを設置し、光ファイバーによりヨー クの外のPMT ヘシンチレーション光を送っていたため、著しく時間分解能が悪かった。それを踏 まえて、NKS2 ではシンチレータを横置きに設置し、通常用いられるルサイトライトガイドでシ ンチレーション光をヨークの外にある PMT へ運ぶ。鉛直方向上から OHHL1,OHHL2,...,OHHL9、 OHHR1,...,OHHR9 と定義した。ビーム平面上にある OHHL5 と OHHR5 は計数率が他のものより も高くなることを考慮に入れて、シンチレータの幅が狭くなっている。

表 2.3: OHV の設置位置とサイズ。左右はビームラインに対して対称。

ID	幅	幅	中心からの距離	角度	長さ
	[deg]	[mm]	[mm]	[deg]	[mm]
OHV1	7.2	150	1200	1.4 ~ 8.6	748
OHV2	7.2	150	1200	8.6~15.8	748
OHV3	7.2	150	1200	15.8 ~ 23.0	748
OHV4	7.2	150	1200	23.0 ~ 30.2	748
OHV5	7.2	150	1200	30.2 ~ 37.4	748
OHV6	7.2	150	1200	37.4 ~ 44.6	748
OHV7	7.2	150	1200	44.6 ~ 51.8	748
OHV8	7.2	150	1200	51.8 ~ 59.0	748
OHV9	12.4	200	930	113.8 ~ 126.2	500
OHV10	12.4	200	930	126.2 ~ 138.6	500
OHV11	12.4	200	930	138.6 ~ 151.0	500
OHV12	12.4	200	930	151.0 ~ 163.4	500

表 2.4: OHH の設置位置とサイズ。左右はビームラインに対して対称。

ID	幅	Х	У	Z	長さ
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
OHH1	82.5	0.0	1140	310.5	1600
OHH2	80.0	0.0	1140	228.5	1600
OHH3	80.0	0.0	1140	146.5	1600
OHH4	80.0	0.0	1140	64.5	1600
OHH5	45.0	0.0	1140	0.0	1600
OHH6	80.0	0.0	1140	-64.5	1600
OHH7	80.0	0.0	1140	-146.5	1600
OHH8	80.0	0.0	1140	-228.5	1600
OHH9	82.5	0.0	1140	-310.5	1600

2.4 680 双極電磁石

680 双極電磁石は東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) で元々サイクロ トロン電磁石として使われていたものを NKS2 用に改造した双極電磁石である。磁極半径 800mm、 磁極間距離 680mm の双極電磁石である。ホールプローブによる測定を行い、TOSCA [12] の計算 (図 2.11) との比較、確認をした。1000A の電流をコイルに流した時、磁石中心の磁場の強さは約 0.42T である。



図 2.11: TOSCA の計算によって算出した 680 双極電磁石の磁場の鉛直方向成分 680 双極電磁石の中心を原点として Z 方向(鉛直方向)毎に磁場の強さを算出した。下のグラフの 左側は Y 方向、右側は X 方向を示す。

2.5 ドリフトチェンバー

680 双極電磁石によって偏向を受けた荷電粒子のトラッキングを行い、運動量を測定するための ドリフトチェンバーである。SDC (Straw Drift Chamber) と CDC (Cylindrical Drift Chamber) で構成 されている。求めた運動量から不変質量を求めて K_s^0 の同定をする。

2.5.1 SDC (Straw Drift Chamber)

SDC は、標的付近のトラッキングを行う事を目的として設計された、ストロードリフトチェン バーである。円筒 3 層構造で、内径 100mm、外径 155mm、検出領域は高さ 300mm、ビーム平面 上で約 ±150°、立体角で 2.07πsr であり、CDC の内側に設置されている。読み出し数は 202 チャン ネルで、ビーム前方は高計数率であるため、セルの大きさが側方のセルの半分になっている。SDC のレイアウトと実際の写真を図 2.12 に示す。

本論文では、主にSDCの動作特性について研究する。ドリフトチェンバーの動作原理やSDCの 構造、信号の読み出しなどに関しては、第3章で詳しく説明する。



図 2.12: Straw Drift Chamber のレイアウト (左) と実際の写真 (右)

2.5.2 CDC (Cylindrical Drift Chamber)

表 2.5: CDC のワイヤー配置。

size [deg] は中心から見たセルの張る角度 (直径)、size [mm] はセルの半径、radius は中心からセン スワイヤーまでの距離である。

group #	layer #	size	size	stereo angle	radius	number of sense wire
		[deg]	[mm]	[deg]	[mm]	
1	4(X)	4.75	10.36	-	250	67
	5(X')	4.75	11.10	-	268	68
2	6(U)	3.50	11.30	6.4750	370	89
	7(U')	3.50	11.84	6.7900	388	90
3	8(X)	2.70	11.54	-	490	119
	9(X')	2.70	11.96	-	508	120
4	10(V)	2.20	11.71	-6.7100	610	143
	11(V')	2.20	12.05	-6.9080	628	144
5	12(X)	1.85	11.78	-	730	175
	13(X')	1.85	12.07	-	748	176

CDC は荷電粒子の飛跡を再構成するためのハニカム型ワイヤードリフトチェンバーである。円 筒 10 層構造であり、layer4,5、8,9、12,13 は鉛直方向にワイヤーを張ったアキシアルワイヤー、 layer6,7、10,11 は鉛直方向もトラッキング可能にするために、鉛直方向から傾けてワイヤーを張っ たステレオワイヤーである。

内径 200mm、外径 800mm、高さ 530mm、重量 250kg、ガス領域の容量 920*l*、全ワイヤー数 5985 本、検出領域はビーム平面上で ±165°、立体角で 1.123 π sr であり、680 双極電磁石の磁場領域を 覆うように設計されている。セルは六角形の構造であり、読み出し数は 1191 チャンネルである。



図 2.13: CDC のワイヤー配置図 (上) と実際の写真 (下)

2.6 トリガー計数率の抑制

データ収集のトリガー条件は、

trigger = (SUMOR
$$\otimes$$
 (nIH \geq 2)) \otimes (nOH \geq 2) \otimes $\overline{\text{EV}}$ (2.3)

である。したがって、ビーム上流や標的付近において、対生成により発生した *e*⁺*e*⁻ もトリガー条件に適応するため、このイベントが主なバックグラウンドになる。そこで以下のような工夫を施した。

2.6.1 Sweep Magnet

制動放射により発生した光子は、ビームハローを除去するため、標的の上流 3.8m の位置に設置 した内径 10mm、厚さ 250mm の鉛コリメータを通す。そこで発生した e⁺e⁻ を除去する目的で、コ リメータのすぐ下流にスイープマグネットと呼ばれる双極電磁石を設置した。スイープマグネッ トで曲げられた e⁺e⁻ はコンクリートシールドによって除去する。磁極間距離は 100mm で、300A の電流を流し、その時の磁場は 1.05T である。

2.6.2 Vacuum Chamber

光子ビームライン上の物質量を減らし、対生成される e^+e^- を抑制する目的で真空チェンバーを 設置した。コリメータから標的手前約 20cm までを 20kPa 程度に真空引きをする。Geant4 による シミュレーションにより、標準状態の空気と真空チェンバーを置いた場合とを比較した結果、上 流から発生する e^+e^- は約半分程度に抑制されることが分かった [9]。



図 2.14: スイープマグネットと真空チェンバー

図の左から光子ビームが入射する。青いラインはそれぞれエネルギーが 0.6, 1.2GeV の電子が入射 した場合の起動を表しており、磁場の強さは 1.05, 1.50T のときのものである。

2.6.3 EV (Electron Veto Counter)

EV はビーム上流やターゲット領域で発生した *e*⁺*e*⁻ などのバックグラウンドを抑制するために 図 2.15 のようにビーム平面上に置かれている。ビーム上流はシンチレーションカウンタのみであ るが、ビーム下流はシンチレーションカウンタとルサイトチェレンコフカウンタを用意する。

シンチレーションカウンタの大きさは、EVS-1,2 が幅 50mm× 長さ 500mm× 厚さ 20mm、EVS-3 が幅 50mm× 長さ 1000mm× 厚さ 20mm、EVS-4 が幅 200mm× 長さ 600mm× 厚さ 20mm である。 ルサイトチェレンコフカウンタは、厚さが EVS-1,2 の 2 倍で、EVS-1,2 の上流側に設置した。

前方のシンチレーションカウンタ (EVS-L1,2、EVS-R1,2) のみに関して言えば、この幅 (ビーム 平面に対して -25mm < Z < 25mm) を覆うことで、 e^+e^- からのバックグラウンドトリガーを約 32% に減らすことができる [9]。



図 2.15: EV のレイアウト

EVS はシンチレーションカウンタ、EVL はルサイトチェレンコフカウンタである。厚みは強調してある。

第3章 SDCの設計、製作の過程

3.1 設計の動機

CDC と組み合わせて崩壊点の位置を測定する検出器として、求められる性能は以下の通りである。

- •より内側に設置するため、高計数率に耐えられること (~100kHz)。
- *K*⁰ から崩壊した π⁺π⁻ はあらゆる角度に放射するため、回転対称性が良いこと
- 限られた領域 (中心からの距離が 85mm ~ 200mm) に設置できること。
- 内側にあるので、物質量が少ないこと。
- 分解能が 250µm 程度あること。

位置検出器として挙げられるのは、ドリフトチェンバー、SSD (Silicon Strip Detector)、TPC (Time Projection Chamber) などがある。

これら位置検出器のおおまかな動作原理と特徴は以下の通りである。

ドリフトチェンバー

荷電粒子が検出領域中のガス分子の電子を弾き、形成した電場でアノードワイヤーにドリフト させる。電場形成を円形にすることにより荷電粒子の入射角度に依存しない検出が可能であるこ と(ハニカムセル型、ストロー型)、セルを狭めることにより高計数率下の測定が可能なことなど が特徴である。

SSD [13]

シリコン基板の中を荷電粒子や光子が通過する時に、電子・ホールペアが生成される。この生 成された電子とホールを電場を与えることで分離し、その電荷量を電極で読み出すことで通過位 置を検出する。シリコン基板を重ねることで3次元でのトラッキングが可能だが、物質量が多く なってしまい多重散乱の影響が避けられなくなる。

TPC [14]

荷電粒子が検出領域中のガス分子の電子を弾き、与えられた電場で読み出しパッドへドリフト する。読み出しには GEM (Gas Electron Multiplier) などが用いられ、増幅して読み出す。物質量が 少なく、時間情報も得られるが、読み出し数が多くなってしまう欠点もある。 以上のような各検出器の特徴から、高計数率に強い、読み出し数が少ないなどの理由により、ス トロードリフトチェンバーに決定した。

3.2 ドリフトチェンバーの動作原理

ドリフトチェンバーは次のような順番で動作する。



図 3.1: ドリフトチェンバーの動作原理

(1) 荷電粒子がガス内を通過するとガス分子にエネルギーを与え、ガス分子を電離させる。電離した電子はガス分子と衝突しながらセンスワイヤーに向かってドリフトする。(2) 高電場領域において、ドリフトした電子がガス分子と非弾性散乱をし、新たに2次電子を放出する。これが次々に起こり、電子は増幅する。

3.2.1 ガス内の荷電粒子の通過

荷電粒子が物質中を通過するとエネルギーが失われる。そのエネルギー損失の量は次の Bethe-Bloch の式で求められる。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{max}}}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$
(3.1)

ここで N_A はアボガドロ数、 $r_e \ge m_e$ はそれぞれ電子の古典半径と静止質量、c は光速、z は 1.6×10^{-19} C を単位とした入射荷電粒子の電荷、 $Z \ge A$ はガスの陽子数と質量数、 $\beta = u/c$ (u は入射荷電粒子の速度)、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ 、 T_{max} は最大運動エネルギー、I は有効電離ポテンシャル、 δ は物質を構成する原子内の電子による電場の遮蔽効果を表したパラメータである。(ここでは $\delta \sim 0$ である)



図 3.2: エネルギー損失のグラフ。

3.2.2 ガス原子の電離

荷電粒子が失ったエネルギーはガス分子に与えられ、電子・イオンペアを作る。電離した電子は、 センスワイヤー (アノード)に与えた電圧により生成された電場から力を受けてセンスワイヤーに 向かってドリフトする。電場の中で加速した電子は移動するたびガス分子と衝突して終端速度に 達し、結果的にドリフト速度は電場に依存してほぼ一定になる。本実験で用いる Ar – C₂H₆(50% ,50%)(3.2.4 節で詳しく解説する。)の、一般に使用する電場領域でのドリフト速度は約 5cm/µsec である。

電場とドリフト速度の関係はガスによって異なるので後で議論する。

3.2.3 ガス増幅

ドリフトした電子が高電場領域(数kV/cm)に入ると、衝突してから次に衝突する前に、ガス分子を電離可能なエネルギーを電場から得る。ガス分子の電離によって放出された電子を二次電子と呼び、さらにこれらの電子が同様に次々とガス分子を電離させる。この現象を電子雪崩と呼ぶ。

今ガス増幅領域に電子が n_0 個入ったと仮定する。電子が単位距離進んだとき電離衝突を起こす数(平均自由行程 λ_I の逆数)を第一 Townsend 係数 α として定義し、dxだけ進んだ場所での電子の数をnとすると、

$$dn = n\alpha dx \tag{3.2}$$

積分して

$$n = n_0 e^{\alpha x} \tag{3.3}$$

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x} \tag{3.4}$$

となる。M はガス増幅度である。

しかし、一般に電場は一様ではなく、 $\alpha = \alpha(x)$ であり、ガス増幅度 M は、

$$M = \exp\left(\int_{a}^{r_{c}} \alpha(x)dx\right)$$
(3.5)

と表される。ここで r_c は電子雪崩が起こる領域の半径、a はセンスワイヤーの半径である。

以上の事から、平均自由行程からガス増幅の始まる高電場を求め、ガス増幅がどの程度か議論 してみる。図 3.3 のようなセルを考える。 $a = 10\mu m = 0.01 mm$ 、b = 5 mm、ワイヤーにかける電圧 $V_0 = 1900V$ を想定する。これは後述する SDC の大セルを想定した。



図 3.3: ガス増幅計算のためのセルの模式図

まず電離断面積から電子の平均自由行程を求め、ガス増幅が始まる高電場がどの程度か求める。 平均自由行程 λ_e は、

$$\lambda_e = \frac{1}{n\sigma} \tag{3.6}$$

で与えられる。nは分子密度であり、ガスの場合、気体の状態方程式から、n = P/kTであるので、 ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K] = 1.36×10^{-28} [atm m³/K]、標準状態 p = 1[atm]、T = 300K を代入して、 $n = 2.45 \times 10^{25}$ [/m³] = 2.45×10^{19} [/cm³]を得る。アルゴンの電子・イオン対生成に必 要なエネルギー (W 値という) は 26eV であり、このエネルギーでの電離断面積は 1.5×10^{-16} [cm²]

$$\lambda_e = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{2.45 \times 10^{19} \cdot 1.5 \times 10^{-16}} = 2.72 \times 10^{-4} \,[\text{cm}]$$
(3.7)

加速した電子が W 値,26eV 以上であればアルゴン分子から電子をたたき出すことができる。つまり、

$$T = \lambda_e e E [eV]$$

$$26 = 2.72 \times 10^{-4} e E$$

$$E = \frac{26}{2.72 \times 10^{-4}}$$

$$= 9.56 \times 10^4 [V/cm]$$

(3.8)

以上の電場領域で電子雪崩が起こる。

次にガス増幅を求める。ガス増幅領域では理論的なモデルがすでにできており、Rose と Korrf のモデル [16] によると α は、

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \tag{3.9}$$

となっている。ここで、A,Bはガスの種類で決まる定数であり、pは圧力である。

1	. Kom			
	Gas	А	В	
		(/cm Torr)	(V/cm Torr)	
	He	3	34	
-	Ar	4	100	
	He	14	180	
	He	26	350	
	He	20	466	

表 3.1: Korff による *α* の近似式のパラメータ

電位と電場は r の関数としてそれぞれ次のように与えられる。

$$V = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \ln \frac{r}{a}$$
(3.10)

$$E = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r}$$
(3.11)

まず、式 (3.8)、(3.11) から、ガス増幅の始まる半径 r_c を求める。

$$E = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r}$$

$$9.56 \times 10^4 = \frac{1900}{\ln \frac{5}{0.01}} \frac{1}{r_c}$$

$$r_c = 3.20 \times 10^{-3} \text{ [cm]}$$

$$= 3.20 \times 10^{-2} \text{ [mm]}$$

$$= 320 \text{ [}\mu\text{m]}$$

(3.12)

これと式 (3.5)、(3.9)から、

$$\begin{split} M &= \exp\left(\int_{a}^{r_{c}} \alpha(r)dr\right) \\ &= \exp\left(\int_{a}^{r_{c}} pA \exp\left(-\frac{pB}{E(r)}\right)dr\right) \\ &= \exp\left(\int_{a}^{r_{c}} pA \exp\left(-\frac{pB \ln(b/a)}{V_{0}}r\right)dr\right) \\ &= \exp\left(\int_{0.001}^{0.032} 760 \cdot 14 \cdot \exp\left(-\frac{760 \cdot 180 \cdot \ln(5/0.01)}{1900}r\right)dr\right) \\ &\approx \exp\left(\int_{0.001}^{0.032} 10640 \cdot e^{-447r}dr\right) \\ &= \exp\left(\frac{10640}{-447} \left[e^{-447r}\right]_{0.001}^{0.032}\right) \\ &\approx e^{15.2} \\ &\approx 4.0 \times 10^{6} \end{split}$$
(3.13)

この値は一般的なドリフトチェンバーの増幅度(10⁶)と一致する。

また、SDC の小セルを想定する ($a = 10\mu$ m = 0.01mm、b = 2.5mm、 $V_0 = 1700$ V) と、 $M \approx e^{15.4} \approx 4.9 \times 10^6$ を得た。

3.2.4 ガスの選択

3.2.2 節によると、通過荷電粒子からガス分子にエネルギーが移行するが、与えられたエネルギー が回転や振動に使われると効率が悪い。そこでベースガスとして単原子分子ガスであるネオンや アルゴンなどが用いられる。しかし主にガス増幅領域において、イオン化したガス分子が再び電子 を取り込むことによってX線を放出し、ガス増幅領域外のガス分子を電離させ、ここから再びド リフトが始る。これを繰り返すことによって放電現象が起き安定した動作が得られなくなる。こ れを抑えるため、光子を吸収する目的でクエンチガスを加える。クエンチガスには光子を吸収し てエネルギーを得たときに、電離よりも回転や振動にエネルギーを使う多原子分子有機ガスであ るメタンやエタンなどが用いられる。

この互いに逆の性質を持つベースガス(電離しやすい)とクエンチガス(電離しにくい)の混 合によって安定した動作が期待できる。 SDC には Ar – C₂H₆ を用いる。これは図 3.4 に表すように、ドリフト速度が一定の 5cm/ μ sec 程度である。最大ドリフト距離、つまりセルの大きさが半径 2.5mm を想定すると、ドリフト時間は最大で 0.5 μ sec であり、2MHz までの計数率で動作すると予想される。



図 3.4: Ar – C₂H₆ ガスとドリフト速度の関係

3.3 SDCの構造

ストロードリフトチェンバーは、導電体の円筒(ストロー)の中心にセンスワイヤー(アノード) を通して一つのセルするドリフトチェンバーである。ワイヤーに電圧を与えることによって電子 をドリフトさせるための電場を作り、また比例計数領域を実現する。特徴は以下の通りである。

- 電場が完全に軸対称で、入射粒子の角度に依存しない測定が可能。
- セルが互いに独立しているため、メンテナンスが容易。
- 高計数率下での使用が可能。
- layerを増やすと多重散乱の影響が無視できなくなる。

崩壊点の位置を求める検出器として、位置分解能が 250µm、CDC と組み合わせた時の崩壊点位 置分解能が 1mm 程度をゴール値として設計をした。

SDCの構造は、単独で飛跡を検出できるように3層で設計し、ビーム前方は高計数率であるため、セルの大きさがその他のセルの半分の大きさになっている。表 3.2、表 3.3 に詳しいワイヤー 配置を示す。

layer が外側になるにしたがってセルの大きさを大きくし、SDC の中心から見たセルの張る角度 が一定になるようにした。layer2 は大セルと小セルの間に、位置調整のための中セルを設けた。

セルの大きさで異なる高電圧をかける。つまり全7種類の高電圧を用意する。

ストローは英国 Lamina 社製アルミナイズドマイラーのストローを用いる。アルミナイズドマイ ラー 12μm の帯状のものを 2 枚、2 重螺旋状にしたものでそれに接着剤の厚みが加わり、ストロー の厚さは 30μm である。アルミ蒸着面は内側で、厚さは 100Åである。



図 3.5: ストロードリフトチェンバーのセルレイアウト

表 3.2: SDC のワイヤー配置。

size[deg] は SDC の中心から見たセルの張る角度 (直径)、size[mm] はセルの半径、radius は SDC の 中心からワイヤーまでの距離である。

layer	size	size	radius	number of sense wire
(セルの大きさ)	[deg]	[mm]	[mm]	
1(大)	4.8	4.605	110	56
(/[/)	2.4	2.305		11
2(大)	4.8	5.110	122	56
(中)	3.6	3.835		2
(小)	2.4	2.560		10
3(大)	4.8	5.670	135.3	56
(小)	2.4	2.835		11

ストロードリフトチェンバーは導電体の円筒の中にセンスワイヤーを通して一つのセルとなっている。そのため、ストローとワイヤーの支え方を工夫しなければならない。

そこで、NKS2 実験における SDC は、ストローを支えるためのベースプレートとワイヤーを支 えるためのベースプレートを独立に設けることにした。具体的には図 3.7 の通りである。

まず、ストローの端を切って開く。ストローをベースプレート1に通しベースプレート2でスト ローの開いた部分を挟む。その際、内側の蒸着面と銅板が電気的に接するように、銀ペーストを 塗った。スペーサーをはさみ、ベースプレート3でフィードスルーを固定する。

図 3.8 のようにストローを密着させ、出来るだけデッドスペースを無くすために、設計上 20µm ~45µm のオーバーラップを設けている。そのため、ストローは少し変形するが、garfield [17](図 3.9) における電場計算から、通常のセルと変形したセルの電位、電場、ドリフト時間に違いが見られないため、深刻な問題は無いと思われる。

信号の読み出しに関しては 3.4 節で詳しく説明するが、CDC がフィールドワイヤーにマイナス の高電圧をかけて電場を生成しているのに対し、SDC はセンスワイヤーにプラスの高電圧を与え ている。そのため、センスワイヤーと読み出しカードを直接つなげることができない。そこで、セ ンスワイヤーと読み出しカードの間にコンデンサを入れ、直流成分をカットしてチェンバー信号 のみを読み出しカードに伝えるようにしている。コンデンサには、1000pFの耐高電圧の静電容量



図 3.6: SDC、セルのレイアウト

表 3.3: SDC の構造

内径	100mm
外形	155mm
ガス領域の高さ	300mm
検出領域	$\pm 150^{\circ}$
window の材質	Myler (200µm)
straw の材質	Aluminized Myler (30µm)
	蒸着アルミ厚 100 Å
読み出しチャンネル数	202
読み出しカード	ASD(Amplifier Shaper Discriminator) card
sense wire の材質	W couted Au
wire の張力	50gW

のものを使っている。

3.4 読み出し回路

ASD カード

チェンバー信号の読み出しには、ジー・エヌ・ディー社製の ASD カード (GNA-060) を用いた。 ASD は Amplifier Shaper Discriminator の略で、チェンバーからの微弱な電気信号を増幅・整形し



図 3.7: ストロー支えの構造



図 3.8: SDC セルのオーバーラップの模式図。重なる厚さはストローの厚み分程度である。

ロジック信号に変える役割を果たす。センスワイヤーからの微弱な電気信号が減衰したり、信号に ノイズが乗ったりすることを抑えるため、ASD カードはセンスワイヤーの近くに置かれている。

- メインチップは SONY 社の CXA3183Q という ASD chip というチップである [18]。欧州原 子核研究機構 (CERN) の ATLAS 実験用に開発された [19]。このチップが信号の増幅、整形、 ロジック化の役割を担う。1 カード毎に4 チップ実装し、1 チップあたり4 チャンネルなの で、カードあたり 16 チャンネルである。
- 動作電圧は、V_− = −3.0V、V₊ = 3.0 ~ 3.3V である。出力コネクタから供給する。
- 閾値電圧も出力コネクタから供給する。16 チャンネル共通である。
- プレアンプ、メインアンプで増幅された信号と閾値電圧がコンパレータによって比較され、 ロジック化される。閾値電圧の有効範囲は -0.6 ~ +0.6V である。
- 消費電流は、V₋系が55mA、V₊系が300mAで、消費電力はカード1枚あたり1065mWで ある。SDC、CDC 合わせて88枚あるので、V₋系が4.9A、V₊系が29Aの電流を消費し、全



図 3.9: garfield による SDC セル (layer1 小セル) の電場計算 左が変形なしのセル。右がストローの両側が 100µm ほど押されて変形しているセルを表している。 ストローの変形を表現するために、ストローをグラウンドに落としたワイヤーと平面で代用して いる。上から等電位曲線、等電場曲線、ドリフトラインと等到達時刻曲線を表す。

消費電力は94Wである。

- 耐放射線は 100Gy、及び 1MeV 中性子フラックス 1.2×10¹²/cm² である。
- 入力インピーダンスは約90Ωである。

- 入力レート約 100kHz までは安定した動作を保障する。
- プレアンプの増幅率は 0.8V/pC である。
- メインアンプの増幅率は約7倍で、差動信号を出力する。
- 出力はLVDS(Low Voltage Differential Signaling) 規格のオープンエミッタ差動信号である。名前の通り ECL 差動信号に比べて低電圧で、消費電力は ECL の約 1/4 である。



図 3.10: ASD カードの回路図

pre AMT ボード

ASD カードからの出力はオープンエミッタの"LVDS もどき"の信号であるため、直接 TDC に 入れることが出来ない。そこで pre AMT と呼ばれる変換ボードを新たに作った。このボードに は"LVDS もどき"の信号を通常の LVDS に変換するためにプルダウン抵抗を入れている。また、 ASD カードに電源供給と閾値電圧を供給する役割も同時に果たす。閾値電圧は基本的に1クレー トで共通だが、可変抵抗を取り付けることにより ASD カード単位で閾値を設定することも可能で ある。

AMT-VME-TDC

TDCとして、AMT-VME-TDCを用いる。その特徴は以下の通りである。

• 1 モジュール 64 チャンネル、ECL または LVDS 入力である。



図 3.11: pre AMT プルダウン抵抗の回路図

INPUT signal			
信号	ピン	番号	信号
GND	1	2	GND
IN1	3	4	GND
IN2	5	6	GND
IN3	7	8	GND
IN4	9	10	GND
IN5	11	12	GND
IN6	13	14	GND
IN7	15	16	GND
IN8	17	18	GND
IN9	19	20	GND
IN1 O	21	22	GND
IN11	23	24	GND
IN12	25	26	GND
IN13	27	28	GND
IN14	29	30	GND
IN15	31	32	GND
IN16	33	34	GND

OUTPUT signal			
信号	ビン番号		信号
GND	1	2	Vth
POWER-	3	4	GND
POWER+	5	6	POWER+
TEST IN-	7	8	TEST IN+
D OUT+1	9	10	D OUT-1
D OUT+2	11	12	D OUT-2
D OUT+3	13	14	D OUT-3
D OUT+4	15	16	D OUT-4
D OUT+5	17	18	D OUT-5
D OUT+6	19	20	D OUT-6
D OUT+7	21	22	D OUT-7
D OUT+8	23	24	D OUT-8
D OUT+9	25	26	D OUT-9
D OUT+10	27	28	D OUT-10
D OUT+11	29	30	D OUT-11
D OUT+12	31	32	D OUT-12
D OUT+13	33	34	D OUT-13
D OUT+14	35	36	D OUT-14
D OUT+15	37	38	D OUT-15
D OUT+16	39	40	

図 3.12: ASD カードのピンアサイン

- マルチヒット TDC であり、1 イベントで 10 ヒットまで記録できる。
- 0.78ns/bit@40MHz システムクロック で測定でき、その時間分解能は 380ps(RMS) である
- コモンスタート、コモンストップ、連続測定の各オペレーションモードがある。本実験では コモンストップモードで測定をする。
- 50ms まで測定できる。
- 消費電力は最大 9W(5V × 1.8A) である。

第4章 性能評価

SDC の性能評価をする。なおデータには 2006 年 11 月 2 日から 2006 年 11 月 13 日まで核理研にお いて行われた本実験のデータを用いた。

4.1 閾値電圧の決定

ASD カードに与える閾値電圧の変化によってノイズレートがどのように変化するかを調べた。 ビームや線源を当てない状態で閾値電圧を変化させ、1分間あたりのスケーラーのカウントを求 めた。

図 4.1 を見ると、-0.2V 付近で信号が発振しているだろう事がわかる。ワイヤーによって多少の 個体差が見られたので、今後 SDC の閾値電圧は -0.25V と設定した。



図 4.1: ノイズカウントの閾値電圧依存性

4.2 シングルレート

ビームを用いてシングルレート測定を行った。図 4.2 はシングルレートの電圧依存性を見たものである。SUMOR(2.1 節参照) を γ ビームの強度と見立てて、SUMOR 2MHz で正規化してある。layer1 小セルのレートが 1700V 辺りから 0 になっているのは、これ以上の電圧をかけると放電が起こり、電圧供給モジュールのカレントリミットで電圧が落ちるためである。おそらく 4.7 節で書かれている放電が起きていると考えられる。layer3 小セルの 1850V 付近も同様である。

これを見ると、大セルは 1750V ~ 1950V 付近、小セルは layer1 は分からないが、1600V ~ 1750V 付近、中セルは 1700V ~ 1900V 付近にプラトー領域があることが分かる。



図 4.2: シングルレートの電圧依存性

上から大セル(約+45°)、中セル(約+15°)、小セル(約+15°と0°)である。layer1小セルは1700V 付近、layer3小セルは1850V付近で放電が起こり、電圧供給モジュールのカレントリミットで電 圧が落ちている。小セル,1-35,2-35,3-34はビームが直接当たっている所であるためレートが高い。

次にシングルレートのビーム強度依存性を見てみる。ビーム強度に比例して生成する π⁺π⁻、e⁺e⁻ の量が増えるため、チェンバーのシングルレートも線形に増えると期待できる。しかしチェンバー を通過する荷電粒子の単位時間当たりの数が多くなるとアルゴン原子から電子を弾き出す総量が 増え、電離したアルゴンイオンと電子の再結合が追いつかなくなる。こうなるとシングルレート 対ビーム強度が線形にならなくなり、検出効率が低下する (レート負け)。

図 4.3 にシングルレートのビーム強度依存性を示す。測定した SUMOR 2.5MHz ではレート負け は観測できなかった。



図 4.3: シングルレートのビーム強度依存性

上から大セル (約 +45°)、中セル (約 +15°)、小セル (約 +15° と 0°) である。電圧は図 4.2 から、大 セル 1900V、中セル 1800V、小セル 1700V と設定した (layer 共通、但し layer1 小セルは放電のた め 1600V に設定した)。

4.3 SDCの解析方法

解析手順は、TDC 情報をドリフト距離に換算する、トラッキングを行う、の2ステップで行う。

TDC 情報をドリフト距離に換算する

まずセンスワイヤーと一次電離点の距離をフィッティングにより算出する。

実験により得られた TDC 情報に対してキャリブレーションを行い、時間 0 と1 チャンネルあた りの時間 (AMT は約 0.78ns である)を求め、ドリフト時間に換算する。換算したドリフト時間の 図を図 4.4 に示す。



図 4.4: SDC のドリフト時間

上から layer1、layer2、layer3 で、左から大セル、小セル、中セルである。セルの大きさに対応したドリフト時間が見える。

ドリフト時間とドリフト距離の関係は線形ではなくうまく関数を見つける必要がある。分布を 見てどの関数でフィッティングするか決めるが、ここでは SDC には 2 次関数を用いている。SDC の x-t relation を図 4.6 に示す。

ドリフト距離は、仮定した近似的な x-t relation を元に、求めたい layer を抜いてトラッキングを 行い (CDC もトラッキングに参加する)、そこから求めた粒子の通過位置から求めている。トラッ キングと x-t relation の導出の繰り返しを行い、トラックに対する χ^2 が収束したところで良いパラ メータが得られたと判断する。

流れ図にすると次の通りである。

37



図 4.5 に χ^2 の収束の様子を表す。右図はトラッキングとフィッティングを 4 回繰り返した時の χ^2 分布である。



図 4.5: トラッキングの χ^2 分布

左図は SDC、CDC 共に適当な 1 次関数でドリフト距離を求めトラッキングした χ^2 分布で、右図 は SDC に 2 次関数、CDC に 4 次関数を用いてトラッキングとドリフト距離のフィッティングを 4 回繰り返した後の χ^2 分布である。

図 4.6 において、x-t relation は通常<の形になるが、layer2 は薄く<の形に見える。これは layer2 を抜いてトラッキングしているため、図 4.7 のようにトラッキングに失敗したと思われる時のドリフト距離がプロットされているためである。layer1 と layer3 の距離が離れているため、layer2 をトラッキングに参加させないとトラッキングの自由度が顕著に表れてしまう。セル1つだけではワイヤーの左右どちらを荷電粒子が通過したか分からないので、ドリフトチェンバーは設計と解析の工夫が必要である。



☑ 4.6: x-t relation

縦軸にトラッキングから得た粒子の通過距離を、横軸にTDCから求めた時間をプロットしている。 赤線は2次関数でフィットした曲線である。



図 4.7: トラッキングミスの模式図

色のついた丸がセルのドリフト時間から求めたドリフト距離で、赤丸がトラッキングに参加しているセルのドリフト距離、緑丸がトラッキングに参加していないセルのドリフト距離。今、layer2を抜いた全ての layer でトラッキングを行い、 χ^2 の最も良い青点線のトラックが選ばれた。しかし実際は赤点線のトラックが正しく、layer2 もトラッキングに参加していたらこれが選ばれていた。

トラッキング

磁場中でトラッキングを行うため、曲がった飛跡に対するトラッキングが必要である。ここで は詳細は省くが、例えば [21] を参照。

4.4 検出効率

最適な電圧値を決定するために、検出効率を layer ごとに求める。求めたい layer を抜いてトラッキングを行い、飛跡が通った場所にヒットがある確率を検出効率とする。具体的にはまず 3 つの layer それぞれをを大セル左右 3 つずつ (±120°,±80°,±40°) と前方の小セル 2 つずつ (±7°) の全 8 つのグループ (layer2 は左右中セル (±14.5°) を加えた全 10 グループ) に角度ごとにグルーピング をする。仮えば layer1 の検出効率を求める場合には、layer1 を抜いてトラッキングを行い、layer2 の +40° のグループにヒットがあった時に、layer1 の同じグループ (+40°) にヒットがある確率を layer1(+40°) の検出効率というように、layer ごと、角度ごとに検出効率を求める。検出効率を式 にすると次のようになる。

efficiency =
$$\frac{ 求める layer で対応する角度にヒットがあったイベント数} 隣りの layer でヒットがあったイベント数 (4.1)$$

まず、検出効率の電圧依存性を調べる。後述するように角度によって検出効率は変わらないと 思われるので、大セルは +40°、小セル -7°の検出効率を選んだ。図 4.8 を見ると、layer2 小セル で 1700V に多少変な構造が見られるが、大セルは 1800V、小セルは 1600V、中セルは 1700V 程度 以上で全ての layer の検出効率は 90% 以上を達成していることがわかる。



図 4.8: 検出効率の電圧依存性上から layer1, layer2, layer3、左から大セル, 小セル, 中セルである。

以上の結果から、データ収集時の電圧は表 4.1 のように決定した。

layer (size)	HV[V]
1(大)	1900
(/」ヽ)	1600
2(大)	1900
(/」ヽ)	1700
(中)	1850
3(大)	1900
(小)	1700

表 4.1: 検出効率の電圧依存性から決定した SDC の電圧

次に、検出効率の角度依存性を調べる。まず、図 4.9 で見られるように layer1 の -80° 付近の検 出効率が特に下がっていることが分かる。これは、4.7 節で書かれている放電が layer1-wire18 に起 きたので、このセルのセンスワイヤーを抜いたためである。

そのほかの部分を見てみる。図 4.10 を見ると、全ての layer の全ての角度で、検出効率は 95% 以上を達成していることが分かる。しかし前方 (0°)の検出効率が相対的に下がっている。その原因は、本実験においてビーム強度が一定でなく強い強度の時があり、4.2 節にあるレート負けを起こしてしまったためと推測する。



図 4.9: layer1 の検出効率の角度依存性

-80°付近の検出効率が下がっている。これは layer1-wire18 が故障していたため。

そこでビーム強度によって前方と後方の検出効率がどのようになるのか調べてみる。図 4.11 に SUMOR のレートが < 2MHz、2 ~ 3MHz、3 ~ 4MHz、> 4MHz の時の検出効率を同様に角度ご とに求める。図 4.11 に示すように、ビームの強度に依存した変化は見られなかった。しかしどの SUMOR レートでも検出効率は 95% 以上であることがわかった。

4.5 位置分解能

次に位置分解能の評価をした。位置分解能の定義は、TDCから求めたドリフト距離と、自身を 抜いたトラックから求めた距離の差(残差)とする。layer毎、大きさ毎に見た分解能スペクトルを



図 4.10: 検出効率の角度依存性



図 4.11: SUMOR のレートが < 2MHz、2 ~ 3MHz、3 ~ 4MHz、> 4MHz の時のそれぞれの検出 効率。

図 4.12 に示す。フィッティングは正規分布を用いた。layer2 の分布でマイナス側にテールが見られ るのは、図 4.7 でのトラッキングミスの影響である。分解能は約 σ = 320 ~ 470 μ m であり、この タイプの典型的な分解能 (~200 μ m) は出ていない。これはトラック自身が誤差を持っているため である。



図 4.12: layer 毎に見た位置分解能

上から layer1, layer2, layer3、左から大セル, 小セル, 中セルである。

次に、位置分解能をワイヤ毎に見てみる。横軸にワイヤ番号、縦軸に位置分解能をプロットした図を図 4.13 に示す。端のワイヤーの分解能が悪いのは、統計が少ないためで、特に layer2 は前述した通り、残差分布がマイナス側にテールを引いていてフィッティングが上手くいっていないためである。その他はワイヤ番号に依存せず、約 300µm 前後の分解能が出ていることが分かる。

4.6 崩壊点位置分解能

崩壊点位置分解能の考察をする。崩壊点はトラックが2本以上引けたイベントに対して、その トラックの最近接点の中点を崩壊点として再構成する。図4.14 はタングステン(5cm×5cm×厚 さ0.2mm)の極薄標的を用いて、SDCをトラッキングに用いた場合と用いない場合で崩壊点分解 能を評価した図である。比較すると、SDCを用いた時、用いない時と比べて位置分解能は3倍に



図 4.13: ワイヤ毎に見た位置分解能。横軸にワイヤ番号、縦軸に分解能をプロットした。

向上することが分かる。SDCを用いた時の崩壊点位置分解能は 1.1 ± 0.1mm を達成している。 キャリブレーションパラメータや x-t パラメータを正しく調整することにより分解能を向上させ ることが可能である。



図 4.14: 崩壊点位置分解能

上がトラッキングによって再構成した崩壊点を2次元プロットしたもので、下がそれをx軸に射影 したものである。左がSDCをトラッキングに参加させたときで、右が参加させないときである。 フィッティングには1次関数+正規分布1+正規分布2を用いた。

4.7 実験中に起きたトラブルと対策

実験中、ビームが出ていないにもかかわらず、センスワイヤーに電流が流れるという現象が起こった。これは電圧に関するスタディをしている時、通常より高い電圧をかけている時に起きた。 実験後 SDC を NKS2 セットアップから取り出して見てみると、ストローに蒸着されているアルミが剥がれていた。剥がれ方の特徴は次の通りである。

- ビームのレートが比較的高い時に起きている。
- ワイヤーにかける電圧が高い時に起きている。(実際に使う電圧値は 1700V である。)
- 小セルのみに起こり、layer1は隣り合うセルと接している付近、layer2はビーム上流側、layer3 はビーム下流側でアルミ蒸着が剥がれた。
- ストローのほぼ中央でアルミ蒸着が剥がれたものが多かった。
- 剥がれたアルミは修理時には見当たらなかった。

これらのことからアルミ蒸着面が剥がれた原因を推測してみる。 主な要因は次の2つであると考えられる。

- 1. ワイヤーとストローの蒸着面が接近していること。
- 2. 必要以上の高電圧をかけていること。



図 4.15: ストローのアルミ蒸着が剥がれたと思われる時間のカレントモニター

横軸が時刻、縦軸が電流値である。rate meter は SUMOR のレート (γ線のレート)を示すが、キャ リブレーションを行っていないので相対的な目安である。電流値は電圧供給モジュールの current output を用い、SDC2 が layer1 小セル、SDC4 が layer2 小セル、SDC6 が layer3 小セルを表す。上 の矢印と数字は小セルにかけていた電圧値で、各 layer に共通にかけていた。電流値が飽和してい るものは、電圧供給モジュールの仕様である。なおこのデータは 2006 年 10 月 1 日のものである。



図 4.16: アルミ蒸着が剥がれたストローの写真 (左図) とそれが起きた場所 (右図) 写真はストローを切り開いたところで、銀色のアルミ蒸着が剥がれて、後ろの文字が透けて見え ている。

以上の事と剥がれたアルミが見当たらなかったという事から、蒸着したアルミが放電によって蒸 発して、他の所に貼り付いた、又はチェンバーガスと共に外に排出されてしまったと考えられる。

剥がれた場所が図 4.16 右のようになっているのは、セルのオーバーラップ (3.3 節) によりスト ローの接している部分が変形して周りの部分よりワイヤーに接近していたため (layer1 小セル) と 推測される。また layer2 小セルに関しては、ストローが両端でしか固定されていないため、スト ローの中央が隣のストローに押されて下流側に寄ってしまい、ストロー中央の上流側がワイヤー に接近したためであると考えられる。layer3小セルもこれと同様である。 現在はストローを交換し、必要以上に電圧をかけないことで正常に動作している。

第5章 まとめと今後

電磁相互作用によるストレンジネス生成過程を明らかにするために、中性 *K* 中間子スペクトロメー タ (NKS2) を新設し、核理研の標識化光子ビームを用いて閾値領域における *n*(γ, *K*⁰)Λ 反応の測定 が現在遂行中である。

本論文では、NKS2の粒子飛跡検出器である straw drift chamber(SDC)の設計、製作、性能評価 を行った。以下に研究の結果をまとめる。

- NKS2の崩壊点位置分解能を測定するため、CDCと組み合わせて使う粒子飛跡検出器として
 回転対称性の良いストロードリフトチェンバーを開発した。
- 実際にビームを用いて実験を行い、閾値電圧を-0.25Vに設定し、検出効率として約98%を 達成、位置分解能として σ = 320 ~ 470μm を達成した。また CDC と併せての崩壊点位置分 解能は約1.1mm であった。
- 高電圧時に放電が起き、ストローのアルミ蒸着面が剥がれるというトラブルに見舞われた。
 原因は電圧の上げ過ぎと、ストローにオーバーラップを設けたことによるワイヤーとストローの接近だった。現在はストローを交換し、必要以上の高電圧をかけないことで正常に動作している。
- 位置分解能として 250µm を、崩壊点位置分解能として 1mm をゴール値とした。まだそこには達していないが、解析を進めることで目標に到達することが可能である。

今後として、パラメータ合わせをより精密に行い、位置分解能の向上を目指す。中間子生成の スペクトルを導出し、電磁相互作用によるストレンジネス生成過程を明らかにする。

付録A TULにおけるトリガーロジックの形成

第2章でも少し触れたが、本実験では次のようなトリガーでデータ収集を行っている。

trigger =
$$(SUMOR \otimes (IH \ge 2)) \otimes (OH \ge 2) \otimes EV$$
 (A.1)

ここで重要となるのはホドスコープのヒットである。IH、OHともに2発以上検出する事をトリ ガーの条件としている。NIMの回路でもmultiplicity logic 回路は存在するが、本実験においてはホ ドスコープはIHが16本、OHが42本と大量であるため、それを入力できるNIM回路のmultiplicity logic は存在しない。また、OHはUpとDownがあり、単純にコインシデンスを取ると遅い方の信 号で時間が決まってしまう。そこでOHのUpとDownには両者の時間の中間を取る Mean Timer を用いたいが、信号数が大量にあるのでこれもNIMの回路でまかなうことは困難である。以上の 理由から multiplicity logic と Mean Timer は、TUL-8040(以下 TUL)という汎用モジュールを用い て回路を生成する。

A.1 TULモジュール



🗷 A.1: TUL-8040

TUL(Tohoku Universal Logic module)とは、米国 Jefferson 国立研究所において行われた E01-011 実験のために東北大学原子核グループで作られた汎用モジュールである。PLD(Programmable Logic Device)を搭載することによって、設計者が自由にその機能を変更でき、その場で任意の回路を組 むことができる。

NIM 回路を多数使用しなければならない複雑な回路も、プログラミングによって比較的簡単に 記述することができ、モジュールの通過時間も 50nsec 程度に抑えられることが大きな利点である。 TUL は ALTERA 社 [22] の APEX 20K シリーズの FPGA を採用している。FPGA(Field Programmable Gate Array) とは大規模な FPD で、多数の論理ゲートと Flip-Flop が配列上に敷き詰 められており、その間の結線を自由に変更することが可能である。

TUL で採用した APEX20K300E-1X という FPGA はすでに原子核実験で使用されており、充分 な実績がある [23]。

TUL の特徴は以下の通りである。

- VME 規格のモジュールである。モジュール間のデータ転送は行わず、電源供給としてのみ VME クレートが使われる。
- 入力は、ECL/LVDS 64 チャンネル (64 ピンフラットケーブル×2) と NIM 16 チャンネル (そのうちレジスタコントロール用に NIM-in0~3ch が使われる)である。
- 出力は、ECL 32 チャンネル (32 ピンフラットケーブル×2) と NIM 8 チャンネルである。
- 側面に 16bit のディップスイッチ、前面に 4bit のロータリースイッチと 4 つの LED があり、 状況によって使うことが出来る。

TUL に使用している FPGA はプログラムをデバイス上の SRAM(Static Random Access Memory) に書き込んでいる。そのため電源を切ると初期化されてしまうので、同一ボード上に EEP-ROM(Electrical Erasable Programmable Read Only Memory)を実装してある。EEPROM に予めプロ グラムを書きこんでおけば、電源を入れた際に ROM から FPGA に自動的にダウンロードされる。 各デバイスには専用の JTAG コネクタが用意されていて、HDL で記述されたプログラムは JTAG 経由でデバイスに書き込まれる。

A.2 HDL記述とFPGAへの書き込み

プログラムは HDL(ハードウエア記述言語、Hardware Description Language) を用いる。HDL は 大規模な論理回路を開発するのに有力であり、論理回路の動作を言語レベルで設計・検証できる。 HDL で記述し、コンパイルされた論理回路は FPGA に書き込まれる。HDL プログラムの作成・ コンパイル及び FPGA への書き込みには、ALTERA 社の PLD 開発支援ソフト「Quartus II」を用 いた。

HDL には Verilog HDL や VHDL 等いくつかの種類があり、Quartus II ではこれらの言語のほか に GUI で視覚的に HDL を記述することができる。

A.3 本実験における HDL プログラミング

本実験のトリガーロジックの概略図は図 A.3 の通りである。IH はディスクリミネータを通して 直接 TUL multiplicity logic へ行き、OH は Up と Down の mean time を TUL Mean Timer で取って から TUL multiplicity へ行く。

以下それぞれの構造について解説する。



図 A.2: Quartus II の GUI を用いた HDL 記述の例



図 A.3: 本実験のトリガーロジックの一部



図 A.4: HDL による Mean Timer の記述。

左右の信号を反対方向にディレイさせ各ディレイ毎に AND を取って行くことによって、Mean Timer を実現する。

Mean Timer

HDL における Mean Timer の記述は図 A.4 のような論理回路で実現できる。左右から 2 本のディレイラインを用意する。一方のディレイラインには左側から、もう一方は反対の右側から信号を

入れ、各点で AND を取っていく。すべての AND から最も早い信号を選ぶことで、2 つの信号の mean time を作ることができる。

2つの信号の入力時間をそれぞれ t_1, t_2 、1本のディレイラインの中のディレイセルの個数を n 個、 ディレイセルでの通過時間を δt とする。左から x 個目のディレイセルを通過した際に 2 つの信号 がコインシデンスしたとすると、その時刻 T は次のとおりになる。

$$T = t_1 + x\delta t = t_2 + (n - x)\delta x \tag{A.2}$$

この式より *x* を消去すると、コインシデンス時刻 *T* は、

$$T = \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{n\delta t}{t} \tag{A.3}$$

と書け、 $n\delta t$ は一定であるため、T は入力 t_1, t_2 の mean time になることが分かる。

以上の議論から、図 A.4 で表される論理回路は Mean Timer に相当することが分かる。また Mean Timer が動作するためには 2 つの入力の時間差が、ディレイラインによる通過時間 ($n\delta t$) 以下にしなければならないことが分かる。

このような回路で作った Mean Timer は 0.31ns(RMS) の精度である [24]。

Multiplicity Logic

Multiplicity Logic のメインの回路は Verilog HDL の記述を使って実現している。Verilog HDL の記述で行ったプログラムを以下に示す。

```
1:module multiplicity2
2:( reset, clock, in, out1, out2, out3, out4 );
3:
4:parameter NumberOfInputs = 32 ;
 5:parameter InActive = 1'b0 ;
6:parameter Active = 1'b1;
7:
8: input reset;
9: input clock;
10: input [NumberOfInputs-1:0] in;
11: output out1;
12: output out2;
13: output out3;
14: output out4;
15:
16: reg Gate1;
17: reg Gate2;
18: reg Gate3;
19: reg Gate4;
20: integer SUM, i;
21:
22: always@(posedge clock or negedge reset) begin
23: SUM = 0;
24: if( reset ) begin
25:
      Gate1 <= InActive;</pre>
26:
      Gate2 <= InActive;
```

```
27:
          Gate3
                     <= InActive;
28:
          Gate4
                     <= InActive;
29:
30:
        end
        else begin
31:
32:
          SUM = 0;
33:
          for(i=0 ; i < NumberOfInputs ; i = i + 1) begin</pre>
34:
           if( in[i] ) begin SUM = SUM +1 ; end
35:
          end
36:
37:
          case (SUM)
38:
          0: begin
39:
             Gate1 <= InActive;</pre>
40:
              Gate2 <= InActive;</pre>
41:
             Gate3 <= InActive;</pre>
              Gate4 <= InActive;</pre>
42:
43:
            end
44:
            1: begin
45:
             Gate1 <= Active;
46:
              Gate2 <= InActive;</pre>
47:
              Gate3 <= InActive;</pre>
              Gate4 <= InActive;</pre>
48:
            end
49:
50:
            2: begin
51:
              Gate1 <= Active;</pre>
52:
              Gate2 <= Active;</pre>
53:
              Gate3 <= InActive;</pre>
54:
              Gate4 <= InActive;</pre>
55:
            end
56:
            3: begin
57:
              Gate1 <= Active;</pre>
58:
              Gate2 <= Active;</pre>
59:
              Gate3 <= Active;</pre>
60:
              Gate4 <= InActive;</pre>
61:
            end
62:
            4: begin
63:
              Gate1 <= Active;</pre>
64:
              Gate2 <= Active;</pre>
65:
              Gate3 <= Active;</pre>
              Gate4 <= Active;</pre>
66:
67:
            end
68:
            default: begin
69:
             Gate1 <= InActive;</pre>
70:
              Gate2 <= InActive;</pre>
71:
              Gate3 <= InActive;</pre>
72:
              Gate4 <= InActive;</pre>
73:
            end
74:
          endcase
75:
        end
76: end
77: assign out1 = Gate1;
78: assign out2 = Gate2;
79: assign out3 = Gate3;
80: assign out4 = Gate4;
```

81:
82: endmodule

module 宣言

1:module multiplicity2
2:(reset, clock, in, out1, out2, out3, out4);
82: endmodule

Verilog HDL では、module 宣言で始まり、endmodule 宣言で終わる部分までで、1 つの回路ブロックを記述する。module の後に回路の名前を定義する。()の中では module での入出力信号名を宣言する。

入出力宣言

- 8: input reset;
- 9: input clock;
- 10: input [NumberOfInputs-1:0] in;
- 11: output out1;
- 12: output out2;
- 13: output out3;
- 14: output out4;

次に module 宣言した際に記述した入出力信号の属性 (端子方向とビット幅)を宣言する。端子方向は、

- input :入力端子
- output : 出力端子
- inout : 双方向端子

の3つがある。in はビット幅を持っており、最下位桁ビット(LSB,Least Significant Bit)が0、最上位桁 ビット(MSB,Most Significant Bit)がNumberOfInputs-1(=31)の32ビットの幅を持つ。[MSB:LSB] の記述の無いものは全て1ビットとして扱われる。

レジスタ宣言、ワイヤ宣言

reg Gate1;
 reg Gate2;
 reg Gate3;
 reg Gate4;

この module では使われていないが、wire 宣言された信号は、組み合わせ回路の入力や module 間の接続に使用される。wire はレモケーブル等の信号線のイメージを持っている。

一方 reg 宣言では、値が保持できる変数 (register) を宣言し、この変数は順序回路の記述に用いられる。reg 宣言がないものは wire 信号として扱われる。

always 文

```
22: always@(posedge clock or negedge reset) begin
    statements
```

76: end

順序回路は always 文を用いて記述する。()の中に書かれたイベントが起こった時に statements が実行される。

この論理回路は、clock の立ち上がり又は reset の立ち下がりがあった時に statements が実行される。その際 reset が0 の時は out1~out4 からは出力しないようになっている (reset というよりは veto として機能している)。それ以外のときは、in が Active になっているビットの数を数えて、その数に応じて out1(入力1つ以上)、out2(入力2つ以上)、out3(入力3つ以上)、out4(入力4つ以上) から出力するようになっている。

付録B SDC主要部の図面



図 B.1: SDC 全体図



図 B.2: ベースプレート 1





図 B.4: ベースプレート 3



参考文献

- [1] E.V.Hungford *Electroproduction of strange nuclei*, Nuclear Physics A. 691, 21 (2001)
- [2] K.-H.Glander et al. Kaon photoproduction at SAPHIR for photon energies up to 2.6 GeV, Nuclear Physics A. 754, 294 (2005)
- [3] R.Bradford et al. *Differential Cross Sections for* $\gamma + p \rightarrow K^+ + Y$ *for* Λ *and* Σ^0 *Hyperons*, Nuclear Experiment, 0509033 (2005)
- [4] R.G.T.Zegers et al. Beam-Polarization Asymmetries for the $p(\vec{\gamma}, K^+)\Lambda$ and $p(\vec{\gamma}, K^+)\Sigma^0$ Reactions for $E_{\gamma} = 1.5 2.4$ GeV, Physical Review Letter, 91, 092001 (2003)
- [5] J.P.Bocquet et al. Strangeness photoproduction at GRAAL, Nuclear Physics A 691, 466 (2001)
- [6] F. X. Lee, T. Mart, C. Bennhold, H. Haberzettl and L. E. Wright, *Quasifree kaon photoproduction on nuclei*, Nuclear Physics A 695, 237 (2001)
- [7] T. Mizutani et al. *Off-shell effects in the electromagnetic production of strangeness*, Physical Review C. 58, 75 (1998)
- [8] K.Tsukada, Doctral thesis (2005)
- [9] ニツ川健太,修士論文 (2005)
- [10] 藤林丈司,修士論文 (2005)
- [11] 浜松ホトニクス株式会社, http://jp.hamamatsu.com/
- [12] http://www.vectorfields.co.uk/
- [13] S.Bouvier, The silicon strip detector for STAR, Nuclear Intruments and Methods. 549,27 (2005)
- [14] Peter Glassel, et al. *The ALICE TPC An innovative device for heavy ion collisions at LHC*, Nuclear Intruments and Methods. (2005)
- [15] NIFS DATEBASE, https://dbshiro.nifs.ac.jp/
- [16] F.Sauli, PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRE PROPOTIONAL AND DRIFT CHAM-BERS, CERN Report 77-09 (1997)
- [17] Garfield -simulation of gaseous detectors- http://garfield.web.cern.ch/garfield/
- [18] http://www-online.kek.jp/ sosamu/ASD-PRR.pdf

- [19] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN Internal Report, CERN/LHCC/97-16 and CERN/LHCC/97-17, April 1997.
- [20] Y.Arai and M.Ikeno, 64Ch AMT-VME Module User's Manual, http://ccweb1.kek.jp/group/atlas/tdc/AMT-VME/AMT-VMEmanual.pdf
- [21] H.Wind, *Momentum Analysis by using a quintic spline model for the track*, Nuclear Intruments and Methods. 115,431 (1974)
- [22] ALTERA 社, http://www.altera.co.jp
- [23] S.Ajimura, S.Minami, and M.Nomachi, OULNS Annual Report (2001)
- [24] 野村洋,修士論文 (2003)

謝辞

本論文を作成するにあたり、沢山の方からご協力して頂きました。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、大変お世話になりました。大学の講義や、他の実験でお忙 しい中、論文の更正を始めとして適切な助言を頂きました。心より感謝しております。橋本治教 授には、学部4年生の時のセミナーを代表として、物理の面白さを改めて教えていただきました。 本当に感謝しております。金田雅司助手には、何も分からない私に対して、色々なことを一から教 えていただきました。誠に感謝してしております。塚田暁助手には、実験中のノウハウを丁寧に 教えていただきました。ご迷惑を掛けることも多々あったと思いますが、誠心的にご指導して頂 きました。本当にありがとうございます。千賀信幸技官には、SDC 筐体の工作において、本当に お世話になりました。お忙しいにもかかわらず様々な面で優しく接してくれた事、本当に感謝し ております。二ツ川健太氏には、近しい世代として、色々なことに相談に乗ってくれました。本当 にありがとうございます。前田和茂助教授、神田浩樹助手には、実験中やミーティング時などに 誠意あるご意見を頂きました。心より感謝いたします。宮城要平氏、井口亜蘭氏、川崎泰斗氏に は、実験のサポートを惜しみ無くしていただきました。ありがとうございます。核理研の方々に は、実験を通して色々お世話になりました。本当に感謝しております。

田村裕和教授には、ハイパー核や実験学について、分かりやすくご教授して頂きました。本当 にありがとうございます。藤井優助手には、コンピュータ等の知識に関して、私の興味を駆り立て る事をお話して下さいました。ありがとうございます。小池武志助手には、物理学に関して、興味 深い話を沢山して下さいました。誠に感謝しております。三輪浩司助手には、同じ部屋で気さく に話し掛けて下さいました。何気ない質問にも誠心的に答えてくれたこと、感謝しています。川 村直子氏には、日常の細かい所まで配慮して頂きました。物品の注文などではご迷惑をお掛けし ました。本当にありがとうございます。

また、諸先輩方や、同期、後輩の方々には私生活も含めて様々な面でお世話になりました。本 当にありがとうございます。

私を支えてくれた全ての人に、心から感謝申し上げます。ありがとうございました。