修士論文

第三世代ラムダハイパー核分光用 散乱電子スペクトロメータおよび トリガーロジックの研究

東北大学理学研究科 物理学専攻 横田孝介

平成 20 年

奇妙さ量子数をもつ 粒子は核子とは異なり、原子核に束縛されハイパー核を生成しても、核 子からのパウリ排他率を受けない。そのため、ハイペロンは原子核深部を探るプローブとしてユ ニークな役割を果たし、ハイパー核の研究、特にその分光学的実験研究は、ハドロン多体系とし ての原子核研究を大きく進展させることが出来る。

我々は過去二回 (e,e'K⁺) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験を米国ジェファーソン研究所にて 行った。これらの実験は二つの磁気スペクトロメータを使用しそれぞれ散乱電子、K⁺ 中間子を検 出する事により Missing Mass を求める同時計測実験であり、ハイパー核の束縛状態を観測する事 が目的である。

これらの実験が持つ長所は、(π⁺, K⁺)反応により過去に測定されたハイパー核の鏡像核を生成 できる事、陽子をΛ粒子に変える反応であるので軽い核の場合に中性子過剰核を生成できる事、 ジェファーソン研究所の一次電子線加速器 (CEBAF)を用いる事で、数百 keV(FWHM)のエネル ギー分解能での測定が可能である事などが挙げられる。

2000年に行われた第一世代実験である E89-009 は世界初の (e, e'K⁺) 反応を用いたハイパー核 分光実験であり、 $^{12}_{\Lambda}$ B の励起スペクトルで 750 keV(FWHM) というエネルギー分解能を達成し、 (e, e'K⁺) 反応が Λ ハイパー核分光に有効な手法であることを実証した。しかし E89-009 では散乱 電子側における大量のバックグラウンドにより十分なビーム強度を使用出来ず統計が制限された こと、K⁺ 中間子側のスペクトロメータが分解能を制限したこと、という二つの問題点があった。 しかし我々は 2005 年に行われた第二世代実験である E01-011 において、この二つの問題点を改善 した。散乱電子側に生じる大量のバックグラウンドは散乱電子スペクトロメータ全体をスプリッ ター出口の鉛直方向に傾ける tilt 法を用い、超前方でのイベントを避ける事で、より高いビーム 強度での実験を可能にした。K⁺ 中間子側では (e, e'K⁺) 反応に特化した高分解能大立体角 K⁺ 中 間子スペクトロメータを新設 (HKS) する事で、より良い運動量分解能を実現した。

我々は現在 2009 年夏に開始予定の第三世代実験 (E05-115)の最終調整を行っている。この実験は、 標的として扱う原子核の質量数領域を拡大する事を目的の一つとしており、前回実験でも用いた ⁶Li から ⁵²Cr など A~50 の中重核に渡る広い質量数領域のハイパー核分光を行う予定である。

中重核領域ではさらに計数率の高いバックグラウンドが予想される。我々はHKS に続いて散乱 電子側スペクトロメータを新設し(HES)、それに伴いスプリッター磁石も新設した。このスペク トロメータはアクセプタンスが非常に広く、前回実験の約10倍のΛハイパー核の収量を稼ぐ事が 可能となる。

また、より良い検出効率の実現のため検出器群を改良した。散乱電子側ではトリガーカウンタと して使用するシンチレータホドスコープ(EHODO)を新設した。E01-011で使用したシンチレー タホドスコープでは構造上の問題により、実験中のセグメント単位での取り外しが不可能なため、 不具合を起こした光電子増倍管を交換することが出来なかった。よって、本論文ではEHODOの サポートデザインについても議論・設計すると共に、散乱電子側に生じるバックグラウンドの計 数率や、仮想光子起因電子に対する検出領域を考慮し、EHODO本体の配置やサイズを決定した。

また、検出器群の変更に応じて散乱電子側と K⁺ 中間子側のトリガー論理を新設しなければな らない。我々の実験では、非常に多くの検出器からの信号を処理する必要があるため、実験のト リガーロジックは FPGA で構成されている。よって、FPGA に組み込むための実験回路をプログ ラミングで作成する必要がある。本論文では、FPGA プログラミングの手法について記述し、作 成した新しいトリガー論理について議論する。

目 次

第1章	序論	11
1.1	ハイパー核分光実験の背景	11
1.2	過去のハイパー核実験	11
1.3	(e,e'K ⁺) 反応によるハイパー核分光	12
1.4	本研究の目的	12
第2章	(e,e′K ⁺) 反応による Λ ハイパー核分光	13
2.1	(e,e′K ⁺) 反応による Λ ハイパー核生成の運動学	13
2.2	実験条件....................................	14
	2.2.1 Virtual photon energy	14
2.3	CEBAF	16
2.4	$(e,e'K^+)$ 反応を用いた過去の実験	16
	2.4.1 第一世代実験(E89-009)概要	16
	2.4.2 第二世代実験(E01-011)概要	17
笛の音	第二世代字段 115	9 1
 わり 早 9 1	第二世代美歌 E03-113 E05 115 概要	⊿⊥ 91
ა.1 აე	E00-110 慨女 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21 91
ე.∠ ეე	E05-110 ビッドアック	21 92
J.J	取乱电丁県スペントロスーク・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
24	5.5.1 ILS 側の検山谷轩	20 97
0.4	K 中间ナスハットロメータ	21
9 5	3.4.1 HKS 側の検山器群 Dot 111 実験システレーシェン	21
3.5	E05-115 美験ンミュレーンヨノ	30
	3.5.1 Λ 八1 八一核収重、ハッククフリノト計数率の見損もり	30
	3.5.2 シミュレーションによる予想スペクトル生成	30
第4章	散乱電子側 TOF カウンタの設計・開発	39
4.1	E05-115 実験における性能要求と改善点	39
4.2	GEANT4を用いた散乱電子側シミュレーション	42
	4.2.1 シンチレータ間の距離によるイベントロスの見積もり	42
	4.2.2 アクセプタンス・計数率の見積もり	42
4.3	まとめ	48
弗 5草	EU5-115 実験トリカーロンツクの開発・研究	49
5.1	GEANT4 実験シミュレーションによるトリカーロシックの研究	49
		50
	5.1.2 HKS 側の検出器単位のトリカーロジック	51

4

		5.1.3 HKS トリガーロジックのシミュレーション	51
	5.2	TUL-8040とは?	57
		5.2.1 使用背景と目的	57
		5.2.2 TUL-8040 仕様	57
	5.3	TUL 動作テスト	60
		5.3.1 セットアップと実験アウトライン	60
	5.4	E05-115 実験回路論理の考察	63
		5.4.1 散乱電子側回路	63
		5.4.2 K ⁺ 中間子側回路	73
笋	6 音	キとめ	Q1
শ	0 早		91
付	録A	LNS(原子核理学研究施設)検出器テスト実験概要	85
	A.1	実験目的....................................	85
	A.2	検出器セットアップ	85
	A.3	Grouping 回路作成	85
	A.4	結果	86
		A.4.1 時間分解能の導出	86
		A.4.2 グルーピングロジック評価	88
付	緑 B	Quartus2 使用方法	89
	B.1	Quartus2	89
	B.2	。 新規プロジェクト作成	89
	B.3	Pin Assignment (ピン アサインメント)	90
	B.4	シミュレーション	90
	B.5	ダウンロード	92
	B.6	データの圧縮方法....................................	92
		B.6.1 Module Assignment	93
	B.7		94
		B.7.1 Hold time and Set Up time	94
	B.8	Verilog-HDL による回路記述	95



2.1	(e,e'K ⁺) 反応の概略図
2.2	$p(e,e'K^+)\Lambda$ 反応の E_{γ} 依存性
2.3	$^{12}C(e,e'K^+)^{12}_{\Lambda}B$ による Λ ハイパー核生成断面積の散乱 K^+ 中間子角度依存性 15
2.4	Virtual Photon Flux の散乱電子角度依存性 15
2.5	CEBAF 加速器の概観 16
2.6	E89-009 で得られたスペクトル 17
2.7	E01-011 実験 setup の概略図
2.8	E01-011 で得られたスペクトル 19
31	F05-115 実験スペクトロメータ・セットアップ図 22
3.2	E00110 (風火、マーロン) Cンーンンロー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.3	E01 011 久敏にのける(株) CO 軟化 CO WU CO
3.4	E05-115 実験用散乱雷子側 Q-Q-D マグネットを乗せた架台の tilt テスト 25
3.5	HES 創検出器模式図 25 (2) 1 2 + 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 -
3.6	HKS 側検出器の模式図 28
3.7	GEANT4 を用いた HES 側シミュレーション図
3.8	標的での散乱電子の角度分布33
3.9	バックグラウンドイベントのエネルギー分布
3.10	制動放射起因電子とK ⁺ 中間子の運動量の相関図
3.11	52 Cr cross section 理論計算 [7]
3.12	52 Cr 予想スペクトル
4 1	
4.1	
4.2	
4.3	散乱電子側の Hodoscope の Layout
4.4	電子の入射用とシンナレータ位直の関係 43
4.5	Xp vs X at EHODOLayer 1 43
4.6	
4.7	
4.8	Virtual Photon Distribution at Hodoscope Layer1
4.9	EHODOI の Z 方向 位置 C Acceptance の 依存性 45
4.10	
4.11	利期 別 地 四 の 電 子 に よ る EHUDU の 計 数 率
4.12	
4.13	EHUDU サ小一ト 美初与具払入凶 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
5.1	仮想光子起因電子の EHODO Layer 1、Layer 2 における位置相関図 50

HKS Geant シミュレーション結果 5.252各検出器面の K⁺ 中間子の xy 分布 5.353TOF1X x と TOF2X x の Hit position 相関図 $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$ 5.454AC Layer1 x、AC Layer2 x、AC3 Layer3 x σ Hit position 相関図 \ldots 5.555WC Layer1 x と WC Layer2 x の Hit position 相関図 \ldots 5.656HKS 検出器のグルーピング模式図..... 5.7565.8585.9585960 60 5.13 TUL テスト実験結果 Jitter の確認 6162645.16 Pulse shaper 配線図 655.17 Pulse shaper 通過前と通過後..... 65665.196768 69 697071717274757677785.32 HKS TUL propagation time 一覧 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 79検出器セットアップ A.1 86 EHODO プロトタイプのセットアップ図 A.2 87 Grouping efficiency 見積もり..... A.3 88 90 B.1 Quartus2 起動画面 B.2Quartus2 Pin Assignment 91 B.3 91 B.4 92Quartus2 プロジェクト圧縮方法..... B.5 93B.6 94B.7 94**B.8** シミュレーション結果 95

6

B.9 HES trigger logic 宣言部 .	
B.10 HES trigger logic 動作部()	順次回路)
B.11 HES trigger logic 配線図 .	

表目次

1.1.1 クォーク、レプトン 一覧 1	1
2.3.1 CEBAF の主な性能	6
2.4.2 E01-011 実験条件	8
3.2.1 E05-115 実験条件	2
3.3.2 散乱電子側スペクトロメータ性能比較	3
3.3.3 HES ドリフトチェンバーの主な仕様 2	6
3.4.4 HKS の仕様	7
3.4.5 HKS 側検出器の主な仕様2	9
3.5.6 仮想光子起因電子のパラメータ作成初期条件 3	2
3.5.7 E05-115 A ハイパー核収量見積もり	4
3.5.8 E01-011 時の HKS による K 中間子計数率 3	5
3.5.9 E05-115 バックグラウンド計数率見積もり 3	5
3.5.1Œ05-115 実験シミュレーションパラメーター覧 3	5
4.1.1 E05-115 EHODO 仕様	0
4.2.2 GEANT4 パラメータ一覧 4	2
5.1.1 HKS GEANT4 パラメータ 一覧	1
5.2.2 TUL-8040 入出力一覧 5	9
5.4.3 散乱電子側におけるセレクタ下位2ビットによるトリガー論理7	1
5.4.4 HES Grouping trigger logic	2
5.4.5 HKS LC 入出力信号一覧	9
A.3.1LNS テスト実験用 Grouping logic 一覧 (F5、B5 は統計が少ないため除外) 8	5
A.4.2TOF 時間分解能一覧	6
A.4.3時間分解能一覧	7
B.2.1TUL-8010 のデバイス設定一覧8	9

第1章 序論

1.1 ハイパー核分光実験の背景

通常の原子核は u、d の二種類のクォークから構成されている。クォークの一覧図を表 1.1.1 に 示す。ハイパー核とは自然界にある通常の原子核を構成する陽子 [uud]、中性子 [udd] だけではな く、A[uds]、∑⁰[uds]、Ξ⁻[dss] のように s(ストレンジネス) クォーク含んだバリオン (ハイペロン) を含む原子核のことである。フェルミオンである核子はパウリの排他律を受けるため、原子核の 深部を探るプローブとしては扱い難い。しかしハイペロンは核子と異なり s クォークを含んでお り、核子からのパウリの排他律を受けない。よってハイペロンは原子核深部の構造を探るプロー ブとして扱うことが出来る。さらにはハイペロン 核子 (YN)相互作用やYY相互作用の理論モ デルに実験データを提供する事によって、核子間相互作用の理解を深めることが可能になる。 次の節にて過去のハイパー核実験について述べる。

	スピン	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	1/2	+2/3	u	с	\mathbf{t}
	1/2	-1/3	d	S	b
レプトン	1/2	-1	е	μ	au
	1/2	0	$ u_e$	$ u_{\mu}$	$ u_{ au}$

表 1.1.1: クォーク、レプトン一覧

1.2 過去のハイパー核実験

ハイパー核の研究は 1952 年に初めて Λ ハイパー核を発見した以降、精力的に行われた。1960 年 代までは主に泡箱を用いた A≤ 16 のハイパー核の探索が米国のブルックヘブン国立研究所(BNL) 等で行われてきた。これは、泡箱の中で生成されたハイパー核が弱崩壊する過程でハイパー核の 束縛エネルギーを測定するものである。しかしこの方法では軽い核しか探索できず、測定できる 束縛状態も主に基底状態に限られていた。

1970年代になると、BNLや欧州合同原子核研究所 (CERN)等で (K^-,π^-) 反応を用いた実験が行われるようになった。この反応の特徴は、運動量移行が小さいため原子核深部ではなく主に最外核に Λ が束縛されることである。これにより、泡箱では不可能であった p 殻に Λ が束縛された状態を測定することができた。しかし、 K^- ビームの強度が小さいために十分な統計を得るのは困難であった。

その後、 (π^+, K^+) 反応を用いた実験が行われるようになった。この反応では運動量移行が大きくなり、 Λ を深い束縛状態に束縛することができる。 (π^+, K^+) 反応は (K^-, π^-) と比べて反応断面

積が小さいことが問題であるが、 π^+ ビームを強くすることで解決できる。これらの実験により Liから Ca にいたるまでの Λ ハイパー核を測定することができるようになった。

従来のハイパー核分光実験の今ひとつの問題はエネルギー分解能が十分ではなかったことである。 そのため、高分解能かつ大立体角の超伝導 K⁺ 中間子スペクトロメータ (SKS) を高エネルギー 加速器研究機構 (KEK) の KEK-PS K6 ビームラインに設置することにより Pb までのさらに幅広 い質量数領域のハイパー核を測定できるようになった。

1.3 (e,e'K⁺)反応によるハイパー核分光

 $(e,e'K^+)$ 反応は電磁相互作用による K⁺ 中間子生成反応であり、仮想光子と陽子が電磁相互作用 により Λ と K⁺ に変わる反応である。実験的には、反跳電子と、K⁺ 中間子を測定し、Missing Mass を導出することでハイパー核の束縛エネルギーを求める。 $(e,e'K^+)$ 反応は反応断面積が ~100nb/sr と小さく、また e' と K⁺ のコインシデンス実験であるため実験を行うには大強度連続電子線が 必要となるが 1990 年代前半、米国ヴァージニア州のジェファーソン研究所に連続電子線加速器 (CEBAF) が建設されたことにより、実験が可能となった。

また、(e,e'K⁺)反応を用いる利点を以下に記述する。

- 運動量移行が大きい (~400 MeV/c) ために様々な束縛状態のハイパー核の測定が可能である
- (π⁺,K⁺)、(K⁻,π⁻)反応では中性子をΛ に変換するが、(e,e'K⁺)では陽子をΛ 変換するため鏡像核の測定が可能となる。
- spin-filp、spin-non-flip 状の生成断面積が同程度であるため、スピンに依存したハイパー核の構造を測定することが可能となる。

以上のように (e,e'K⁺) 反応を用いた実験によってハイパー核に関する新しい知見が得られると 期待できる。

1.4 本研究の目的

我々は過去二回、 (π^+, K^+) 反応を用いた実験を行った。現在、我々は 2009 年夏に行う予定である 次世代実験 E05-115 の準備段階である。E05-115 では散乱電子側のスペクトロメータを一新(HES の導入)し、それに伴い、散乱電子側のトリガーとしての役割も担うホドスコープ(EHODO)を 新設した。

本論文では、過去の (e,e'K⁺) 反応を用いた実験の概要を第2章で、その後、次世代実験 E05-115 実験のセットアップ状況や、実験シミュレーション結果を第3章で、EHODO の設計について第 4章で述べる。

第5章では、E05-115に向けて作成した実験回路について考察する。

第2章 $(e,e'K^+)$ 反応による Λ ハイパー核分光

この章では (e,e'K⁺) 反応の性質について説明し、この反応を用いた Λ ハイパー核分光実験のために必要な入射電子ビームの性能要求から、我々の過去の実験で得られた成果について述べる。

2.1 (e,e'K⁺)反応による Λ ハイパー核生成の運動学



図 2.1: (e,e'K⁺) 反応の概略図

入射電子の運動量ベクトルと散乱電子の運動量ベクトルで定義される平面を Scattering plane、 運動量移行 $q = p_e - p_{e'}$ の方向を z 軸とし、 q と K⁺ 中間子の運動量 (p_K)で定義される平面を Reaction plane とする。

入射電子:
$$P_e = (E_e, \vec{p}_e)$$
 (2.1)

散乱電子:
$$P_{e'} = (E_{e'}, \vec{p}_{e'})$$
 (2.2)

4 元運動量移行:
$$Q = (\omega, \vec{q})$$
 (2.3)

$$K 中間子: P_{K^+} = (E_K, \vec{K}) \tag{2.4}$$

陽子:
$$P_N = (E_N, \vec{p}_N)$$
 (2.5)

図 2.1 に $(e,e'K^+)$ 反応の概略図、2.1 に各種パラメータを示す。 Λ 粒子の electro-production の 三重微分断面積は次の様になる。

$$\frac{d^3\sigma}{dE_{e'}d\Omega_{K}} = \Gamma \left[\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \epsilon_L \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \epsilon \frac{d\sigma_P}{d\Omega_K} \cos 2\phi_K + \sqrt{2\epsilon_L(1+\epsilon)} \frac{d\sigma_I}{d\Omega_K} \cos \phi_K \right]$$
(2.6)

ここで、 σ_T 、 σ_L は横波成分 (Transverse) と縦波成分 (Longitudinal) の断面積を、 σ_P 、 σ_I は偏極成分 (P) と干渉成分 (I) を表している。また、 Γ は virtual photon flax、 ϵ 、 ϵ_L は偏極の横波成分と縦波成分を表し、式 2.3 の 4 元運動量移行 Q を用いて次の様になる [9][4]。

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2} \frac{E_{\gamma}}{1-\epsilon} \frac{E'_e}{E_e}$$
(2.7)

$$\epsilon = \left(1 + \frac{2|\vec{q}|^2}{Q^2} \tan^2 \frac{\theta_e}{2}\right),\tag{2.8}$$

$$\epsilon_L = \frac{Q^2}{\omega^2} \epsilon \tag{2.9}$$

$$E_{\gamma} = \omega + \frac{Q^2}{2m_N} \tag{2.10}$$

2.2 実験条件

2.2.1 Virtual photon energy



図 2.2: $p(e,e'K^+)\Lambda$ 反応の E_{γ} 依存性(横軸は Baryon Mass、W[GeV])[2]。赤い矢印が仮想光子 エネルギー ω =1.5[GeV/c]の所である。

図 2.2 に E_{γ} 依存性を示す。これを見ると素過程 $p(e,e'K^+)\Lambda$ 反応の断面積は、Baryon Mass が 1.7[GeV]~1.9 GeV 周辺で最大かつほぼ一定となっている。2009 年の夏に実験開始予定の E05-115 は、仮想光子のエネルギーを、Baryon Mass~1.9 GeV に相当する ~1.5 GeV となる様に入射ビームエネルギーと、散乱電子の中心運動量を決定した。また、図 2.3、2.4 のように、K⁺ 中間子、Virtual ptohon flux の散乱電子の角度依存性は共に前方ピークを持っているため、共に出来る限 り前方で検出する必要がある。



(e,e'K⁺) kaon angular distribution, harm. osci, DWIA

図 2.3: $^{12}\mathrm{C}(\mathrm{e,e'K^+})^{12}_{\Lambda}\mathrm{B}$ による Λ ハイパー核生成断面積の散乱 $\mathrm{K^+}$ 中間子角度依存性 [4]



図 2.4: Virtual Photon Flux の散乱電子角度依存性 [4]

2.3 CEBAF

以上の様な要求を満たす電子線加速器は現在において、米国 Virginia 州にある Jeferson 研究所 (JLab)の連続電子線加速器 CEBAF (Countinuos Electron Beam Accelerator Facility)のみで ある。図 2.5 に CEBAF の概観図を、表 2.3.1 に主な性能を示す。



図 2.5: CEBAF 加速器の概観。

Maximum Beam Energy	$6 {\rm GeV}$
Maximum Beam Intensity	$200\mu A/Hall$
Momentum bite	$< 1 \times 10^{-4}$
Beam Bunch Width	2ns (499Hz)

表 2.3.1: CEBAF の主な性能。

CEBAF は 2 つの超伝導加速器から構成され、Injector から打ち出された電子を北と南(図 2.5 参照)にある超伝導加速器によって各々600 MeV づつ加速する事によって、最大 5 周で 6 GeV の 電子線を取り出す事が可能である。加速された電子は 3 つの Hall (Hall A、Hall B、Hall C)に 分けられるため、各 Hall で得る電子線は 499[MHz] (~2[nsec])のバンチ構造を持つ。 我々の過去の実験は全て Hall C で行われている。E05-115 も Hall C で行う予定であり、現在セッ トアップの最終調整段階である。

2.4 (e,e'K⁺)反応を用いた過去の実験

2.4.1 第一世代実験(E89-009)概要

2000年春、我々のグループは世界初の $p(e,e'K^+)\Lambda$ 反応によるハイパー核生成実験(E89-009) を JLab-Hall C にて行った [3]。

E89-009 では Λ ハイパー核生成に寄与した K⁺ 中間子を Hall C 既設の SOS (Short Orbit Spectrometer)で、散乱電子を Enge Split-Pole Spectrometer で検出し同時計測した。 この実験で得られたハイパー核のスペクトルを図 2.6 に示す。スペクトルの分解能は S_{1/2}Λ で



図 2.6: E89-009 で得られたスペクトル [15]。ターゲットは ¹²C であり、300[keV/bin] となって いる。

750[keV] (FWHM) となった。このエネルギー分解能は、ハイパー核反応分光実験では当時最 高であり、 $(e,e'K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験が可能であることを証明した [1][2]。 しかし、課題として以下のような点が挙げられた。

- 1. 散乱電子側への大量のバックグラウンド。この原因は主に標的における制動放射と電子 電 子散乱(M¢ller 散乱)である。これらのバックグラウンドが超前方に集中したため、入射 ビーム強度を下げなければならなくなり、検出効率が悪くなってしまった。
- 2. K⁺ 中間子側スペクトロメータによる運動量分解能の制限。既存の SOS スペクトロメータの K⁺ 中間子運動量分解能が全体の分解能を制限しており、また、立体角が小さく検出効率が 悪くなってしまった。

第二世代実験では、これらの課題に取り組んだ。

2.4.2 第二世代実験(E01-011)概要

2005年、第2世代目の実験である E01-011 が行われた [3]。前回実験の問題を考慮し改善した点は以下のことである。

- 散乱電子スペクトロメータを鉛直上向きに傾ける tilt 法の採用
- 高分解能 K⁺ 中間子スペクトロメータ (HKS) の新設



図 2.7: E01-011 実験 setup の概略図

ビームエネルギー	$1.851 { m ~GeV}$
仮想光子エネルギー	$1.5 \mathrm{GeV}$
散乱電子中心運動量	$0.35~{\rm GeV/c}$
散乱電子散乱角度	水平方向 :0°
	公古古向 √ 5°
	如且刀闩:4:0
K ⁺ 中間子中心運動量	1.2 GeV/c
K ⁺ 中間子中心運動量 K ⁺ 中間子散乱角度	1.2 GeV/c > 1°

表 2.4.2: E01-011 実験条件 [4]

セットアップを図 2.7 に、実験条件を表 2.4.2 に示す。

E01-011 では、tilt させた散乱電子側スペトロメータ(ENGE Spectrometer)で、散乱電子を、 新設した K⁺ 中間子側スペクトロメータ(HKS)で K⁺ 中間子を検出して、同時計測を行った。

tilt 法の適用により、第一世代実験では 0.67 μ A、標的厚 22 mg/cm² の条件下で散乱電子側の計数率が約 200 MHz であったが、第二世代実験では 30 μ A、標的厚 100 mg/cm² の条件下で散乱電子側の計数率が約 1 MHz と、劇的に改善した。また、HKS を新設する事で、超前方に生じる陽電子を避けつつ、K⁺ 中間子を大立体角 (~16 msr)で検出する事に成功した。

図に E01-011 実験において得られた ${}^{12}_{\Lambda}B$ のエネルギースペクトルを図 2.8 に示す [3]。この図にお ける S_{1/2A} のピークの分解能は 490 keV(FWHM) である。



図 2.8: E01-011 で得られたスペクトル [3]。ターゲットは ¹²C、bin 幅は 150[keV/bin] である。

E01-011 では散乱電子側スペクトロメータをスプリッターと合わせて使用した。また、散乱電 子側スペクトロメータを tilt させる事によって散乱電子側で生じるバックグラウンドを劇的に減 らし、かつ、より高い入射ビームエネルギーを選択することで、Λ ハイパー核の収量を増やす事 に成功した。しかし、散乱電子側で用いた Enge スペクトロメータはスプリッターと合わせてかつ tilt させるという我々の使用目的に合わせて設計されておらず、また立体角も我々の要求する性能 を十分に満たしていない。

よって E05-115 では散乱電子側スペクトロメータ、スプリッターを新設し、次世代実験の目的で ある広い質量数領域の A ハイパー核分光に向けて準備を行った。

第3章 第三世代実験E05-115

本章では、本論文の主要テーマである散乱電子スペクトロメータを軸に、2009年ジェファーソン研究所にて我々が行う第三世代実験(E05-115)のセットアップや、シミュレーション結果の報告を行う。

3.1 E05-115 概要

これまで我々は過去2回の実験によって、(e,e'K⁺)反応を用いたハイパー核分光実験の有効性 を証明するため、主に軽い核でのハイパー核分光実験を行ってきた。

次世代実験、E05-115 では、より広い質量数領域でのハイパー核分光を目指しており、第二世代実 験時に標的核として使用した⁶Li、⁷Li、¹⁰B、¹¹B、¹²C、²⁸Si だけでなく、⁵²Cr のような中重核も 標的核として使用する事で、より重い Λ ハイパー核の分光学的研究を行う。中重核の Λ ハイパー 核分光実験により Λ N 相互作用に関する情報を得ることが出来る。中重核理論計算も、Bydzovsky らによって行われ、⁵²Cr などのハイパー核分光を行うことは、非常に重要である。

しかし、中重核領域の A ハイパー核分光を行うことは、より困難であると予想される。特に、散 乱電子側に発生する制動放射起因電子によるバックグラウンドが ~Z² に比例し増加するため、軽 い核と同程度の S/N 比でのデータ収集を行う事が非常に難しい。また、前回実験時に使用した散 乱電子側スペクトロメータ(ENGE)は、スペクトロメータを傾ける tilt 法の適用や、スプリッ ター磁石と組み合わせる実験に最適ではない。

そこで我々は、 $(e,e'K^+)$ 反応に特化した高統計・高分解能散乱電子側スペクトロメータ(HES)を 新設した。また、次世代実験の実験条件を考慮したスプリッター磁石も新設した。

散乱電子側のスペクトロメータのアップグレードに応じ、HES検出器群も改良した。HES検出器 群の改良については四章で説明する。本章では、モンテカルロシミュレーションにより E05-115 で予想される A ハイパー核の収量やバックグラウンドの計数率を標的核別に研究した。

3.2 E05-115 セットアップ

図 3.1 が実験のセットアップ図、表 3.2.1 が実験条件である。E05-115 では、CEBAF からの高 品質な 1 次電子線ビームを標的核に照射し、散乱電子と、K⁺ 中間子をスプリッター磁石で振り分 け、それぞれのスペクトロメータで散乱電子、又は K⁺ 中間子を検出して同時計測を行う。前回実 験からのアップグレードはスプリッター磁石、散乱電子側スペクトロメータ(HES)の新設であ る。詳細は次節に示す。



図 3.1: E05-115 実験スペクトロメータ・セットアップ図。図の最下部から入射した電子線が標的 核に衝突する。スプリッターによって分けられた赤い軌跡の散乱電子を HES で、青い軌跡の K⁺ 中間子を HKS でそれぞれ検出して同時計測を行う。

表 3.2.1: E05-115 実験条件

ビームエネルギー	2.344[GeV]
仮想光子エネルギー	$1.5[\mathrm{GeV}]$
散乱電子中心運動量	$0.967 [{ m GeV/c}]$
K ⁺ 中間子中心運動量	$1.2[{\rm GeV/c}]$
tilt 角	6.5 $^{\circ}$

3.3 散乱電子側スペクトロメータ

この節では散乱電子側スペクトロメータを新設する前と後(EngeとHES)を比較し、HES新 設に対するメリットや要求する性能について考察する。

表 3.3.2 に E01-011、E05-115 の散乱電子側スペクトロメータの仕様を示す。HES の磁石構成は

	Enge	HES
磁石構成	split pole magnet	Q-Q-D
中心運動量	$0.276~{\rm GeV}$	$0.854~{\rm GeV/c}$
運動量アクセプタンス	$0.20\text{-}0.50~\mathrm{GeV/c}$	$0.70\text{-}1.0~\mathrm{GeV/c}$
立体角	${\sim}7~{\rm msr}$ w/Splitter	${\sim}10~{\rm msr}$ w/Splitter
運動量分解能 $(\Delta p/p)$	4.0×10^{-4} (FWHM)	2.0×10^{-4} (FWHM)

表 3.3.2: 散乱電子側スペクトロメータ性能比較

HKSと同様に、それぞれ縦・横収束の四重極磁石(Q1、Q2)と、双極磁石(D)から構成されて いる。QQDの構成を選択した最大の理由は、散乱電子の収束の自由度が大きい事である。 また、中心運動量を上げた事により、 $p(\gamma, K^+)\Lambda$ の反応断面積が最も大きくなる仮想光子のエネ ルギー(ω =1.5 GeV)(図2.2 参照)を選択する際のメリットも大きい。散乱電子の中心運動量を P_{el} とすると、仮想光子のエネルギーは以下のようになる。

$$E_{\omega} = E_i - \sqrt{m_{e\prime}^2 + P_{e\prime}^2} \simeq E_i - P_{e\prime}$$

CEBAF で加速される電子は北と南に配置される超伝導加速器によって各々約 600 MeV づつ加速 されるため、一周で約 1.2 GeV、二周で約 2.4 GeV の電子を取り出す事が可能である。入射電子 ビームのエネルギーを 2.4 GeV と仮定した場合、仮想光子のエネルギーが約 1.5 GeV となる。こ れは、ENGE スペクトロメータの場合の入射電子ビームエネルギー $E_i \simeq 1.8$ GeV に相当する。 図 3.2、3.3 にそれぞれ E01-011、E05-011 時の標的での散乱電子角度分布を示す。HES を新設し た事により、E01-011 時以上の入射ビームエネルギーを選択して制動放射や M ϕ ller 散乱起因電子 によるバックグラウンドの分布を、より前方に集中させる事が出来る。加えて、仮想光子起因電 子の分布は、バックグラウンドとなる電子の分布よりも入射エネルギーに対する依存性が少ない 事や、HES の大立体角化によって、S/N 比を改善しつつ、 Λ ハイパー核の収量を増やす事が可能 になった。

また、スペクトロメータの新設に伴い、tilt 法を考慮した架台も新設した。図 3.4 は新設した tilt 用架台に散乱電子側 Q-Q-D マグネットを乗せ、tilt のテストをした時の写真である。

3.3.1 HES 側の検出器群

図 3.5 が散乱電子側の検出器の模式図である。位置検出器であるドリフトチェンバーを2台 (EDC1(Honey Comb Cell)、EDC2(plane))、時間検出器であるプラスチックシンチレーション カウンタを二層(EHODO1、EHODO2)で構成されている。EDC1、EDC2の仕様を表 3.3.3 に 示す。新設した EHODO1、EHODO2 については次章に記述する。



図 3.2: E01-011 実験における標的での散乱電子角度分布。横軸が x'[mrad] (スプリッター出口水 平方向) 縦軸が y'[mrad] (スプリッター出口垂直方向)。赤が仮想光子起因電子、緑が制動放射 起因電子、青が Møller 散乱起因電子の分布である。



図 3.3: E05-115 実験における標的での散乱電子角度分布。E01-011 時よりも入射電子線のエネル ギーを上げたため、バックグラウンドとなるイベントがより前方に集中しており、またスペクト ロメータの立体角を拡げることにより前回実験時と比べ、S/N 比を改善しつつ収量を増やす事が 出来る。



図 3.4: E05-115 実験用散乱電子側 Q-Q-D マグネットを乗せた架台の tilt テスト。EQ1 を散乱電 子側のビーム前方四重極磁石、EQ2 をビーム後方の四重極磁石とする。





EDC1		
	Sensitive area	100 × 12 × 30[cm]
	Layer	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
	Distance between Layers	$7.5[\mathrm{cm}]$
	Cell size	$1.0[\mathrm{cm}]$
EDC1 Resolution		
	Position(horizontal;x)	$\sigma = 86 [\mu \mathrm{m}]$
	Position(vertical;y)	$\sigma = 210 [\mu { m m}]$
	Angle(horizontal;x')	$\sigma = 0.7$ [mrad]
	Angle(vertical;y')	$\sigma = 2.8 [mrad]$
EDC2		
	Sensitive area	$120 \times 30 \times 14$ [cm]
	Layer	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
		5[mm] drift distance, μ =150[$\mu m]$
EDC2 Resolution		
	Position(horizontal;x)	$\sigma = 162[\mu \mathrm{m}]$
	Position(vertical;y)	$\sigma = 163 [\mu m]$
	Angle(horizontal;x')	$\sigma = 0.33$ [mrad]
	Angle(vertical;y')	$\sigma = 0.33 [mrad]$

表 3.3.3: HES ドリフトチェンバーの主な仕様

3.4 K中間子スペクトロメータ

この節では、K⁺ 中間子スペクトロメータ(HKS)の概要を説明する。主な仕様を表 3.4.4 に示 す。HKS は前回実験の E01-011 の時に新設したスペクトロメータであり、運動量分解能の向上、 立体角の拡大、陽電子バックグラウンドの除去を目的に作られた。E05-115 でも基本的な構成は 変えず、使用実績のある HKS を K⁺ 中間子側に導入する。

磁石構成	Q-Q-D
中心運動量	$1.2 \ {\rm GeV/c}$
運動量アクセプタンス	$1.05-1.35 { m ~GeV/c}$
	$\sim 10 \text{ msr}$
運動量分解能 $(\Delta p/p)$	2.0×10^{-4} (FWHM)

表 3.4.4: HKS の仕様

3.4.1 HKS 側の検出器群

HKS 側の検出器の模式図を図 3.6 に示す。 K^+ 中間子側には主に π^+ 中間子、陽子のバックグラウンドが存在する。そのため、HKS 側の検出器は粒子識別のための検出器と、位置検出器から構成される。

HKS 側検出器を、ビーム上流から順に説明すると、まず、位置検出器であるドリフトチェンバー (HDC1、HDC2)を配置し、その後方に、TOF 粒子識別検出器とトリガーカウンタとしての役割 を持つ TOF カウンタ(TOF1Y、TOF1X、TOF2X)を設置する。また、陽電子、π⁺ 中間子サプ レッションのためのエアロジェルチェレンコフ検出器(AC)を TOF カウンタで挟むように設置 する。そして、物質量の大きい陽子サプレッションのための水チェレンコフ検出器(WC)をその 後方に設置する。最後方に、今回新しくルサイトチェレンコフ検出器(LC)を導入し、TOF カウ ンタ、WC のバックアップとして使用する。

表 3.4.5 に HKS 側検出器の主な仕様をまとめた。

チェレンコフ検出器原理

チェレンコフ検出器は、荷電粒子が屈折率 n の物質中での光の速度 c/n を超えた時に発生する チェレンコフ光を捕える事で、荷電粒子を検出する。よって、輻射材として用いる物質の屈折率 を選ぶことで、チェレンコフ検出器による粒子識別が可能になる。HKS 中心運動量 1.2 GeV/cの π^+ 中間子、K⁺ 中間子、陽子を識別する場合、

$$\beta_{\pi} = 0.993, \quad \beta_K = 0.924, \quad \beta_p = 0.787$$

より、

$$\beta_{\pi} c {\leq} \frac{c}{n_1} {\leq} \beta_K c, \hspace{0.2cm} \beta_K c {\leq} \frac{c}{n_2} {\leq} \beta_p c$$



図 3.6: HKS 側検出器の模式図

$1.00 \le n_1 \le 1.08, \quad 1.08 \le n_2 \le 1.27$

の様に n_1 、 n_2 の条件を満たす屈折率を持った輻射材が必要になる。E05-115では、 n_1 にエアロジェル(n=1.05)を、 n_2 に純水(n=1.33)を使用する。

表 3.4.5: HKS 側検出器の主な仕様	羕
------------------------	---

	sensitive volume $[cm^3]$	construction
Drift Chamber		
HDC1	$120 \times 30 \times 14$	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
		5[mm] drift distance, σ =150[μ m]
HDC2	$120 \times 30 \times 14$	xx',uu'(30[deg]),xx',vv'(-30[deg]),xx'
		5[mm] drift distance, σ =150[μ m]
TOF counter		
HTOF1Y	$120 \times 30 \times 2$	3.5^W \times 9 segments: PMT Hamamatsu H1949 $2"\phi$
HTOF1X	$120 \times 30 \times 2$	7.5^W \times 17 segments: PMT Hamamatsu H1949 $2"\phi$
HTOF2X	$170 \times 35 \times 2$	9.5^W \times 18 segments: PMT Hamamatsu H1949 $2"\phi$
Aerogel Cherenkov counter		
AC1	169 × 46 × 31	$20^W \times 7$ segments:PMT photonics 5" ϕ
AC2	$169 \times 46 \times 31$	$20^W \times 7$ segments:PMT photonics 5" ϕ
AC3	$169 \times 46 \times 31$	$20^W \times 7$ segments:PMT photonics 5" ϕ
Water Cherenkov counter		
WC1	187.5 × 35 × 8	15.6^W \bigstar 12 segments: PMT Hamamatsu H7195 2" ϕ
WC1	187.5 × 35 × 8	15.6^W \bigstar 12 segments: PMT Hamamatsu H7195 2" ϕ
Lucite Cherenkov counter		
LC	$189 \times 35 \times 8$	13.5^W \bigstar 13 segments: PMT photonics 3"tube

3.5 E05-115 実験シミュレーション

3.5.1 Λ ハイパー核収量、バックグラウンド計数率の見積もり

この節では、実験のビームコンディションや、検出器の配置などを考慮し、ターゲットごとのハ イパー核収量やバックグラウンド計数率を見積もる。実験シミュレーションには CERN が開発し たオープンシミュレーションパッケージである GEANT4 を使用した。ここで、計算の簡略化のた め標的の厚さを 100[mg/cm²] に規格化した。図 3.7 は HES に電子を入射したときの軌跡である。 また、EQ1 入口にコリメータを配置し、EQ1 入口の中心から-3 cm 以上に入射した散乱電子を選 択する事で、バックグラウンドを減少させている。



図 3.7: GEANT4を用いた HES 側シミュレーション図。作成した散乱電子の入射パラメータファ イルをイベント毎にシミュレーションプログラムに読み込ませ、HES に入射している。

入射した散乱電子がスプリッターによって曲げられ、HES の Q1 マグネット (EQ1)、Q2 マ

グネット(EQ2)、Dマグネット(ED)を通過した後、検出器群を通過した軌跡が見える。シ ミュレーションでは、検出器ごとに散乱電子を検出したフラグを立てることによってトリガーを 組む。散乱電子側のイベントトリガーカウンタとして用いる EHODO1 と EHODO2 のトリガー 条件は、バックグラウンドを見積もる場合が(EHODO1⊗EHODO2)、仮想光子起因電子の時が (EHODO1⊗EHODO2⊗EDC1⊗EDC2⊗Q1-Q2-Dマグネット通過フラグ)であり、スタディによっ てトリガー条件を変更している。また、それぞれのマグネットには磁場計算ソフト(TOSCA)を 用いて計算した磁場をパラメータ化して入力している[4]。

仮想光子起因電子の各種パラメータ生成

HES 側の GEANT4 シミュレーションを実行する際の、仮想光子起因電子の各種パラメータを 求めるため、以下の式に入射ビームエネルギー、散乱電子の中心運動量等のパラメータを与える (表 3.5.6 参照。表中のアクセプトは、GEANT4 に入力する範囲を意味する。)。入射電子数あたり の仮想光子数を表す量は次のように定義される [4][9]。

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2} \frac{E_{\gamma}}{1-\epsilon} \frac{E'_e}{E_e}$$
(3.1)

ここで E_{γ} は実験室系における仮想光子のエネルギーのことである。実験室系の仮想光子、陽子の 4元ベクトルをそれぞれ $k = (E_{\gamma}, \vec{k}), P_{Nlab} = (E_{Nlab}, \vec{p}_{Nlab})$ として実験室系と重心系の全エネル ギーが保存することを用いると

$$(P_{Nlab} + k)^2 = (P_N + Q)^2$$
(3.2)

である。これを解いて

$$E_{\gamma} = \omega + \frac{Q^2}{2m_N} \tag{3.3}$$

を得る。この Γ を m_e の1次まで展開すると以下のようになる[9]。

$$\Gamma = \frac{\alpha}{4\pi^2\omega} (a_1 - a_2 - a_3) \tag{3.4}$$

ここに

$$a_1 = \frac{E_e^2 + E_{e'}^2}{2E_e^2} \left(\frac{m_e^2 \omega^2}{4E_e^2 E_{e'}^2} + \sin^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}$$
(3.5)

$$a_2 = \frac{E_{e'}}{E_e} \frac{m_e^2 \omega^2}{4E_e^2 E_{e'}^2} \left(\frac{m_e^2 \omega^2}{4E_e^2 E_{e'}^2} + \sin^2 \frac{\theta_e}{2} \right)^{-2}$$
(3.6)

$$a_3 = \frac{(E_e + E_{e'})^2}{4E_e^2} \left(\frac{\omega^2}{4E_e E_{e'}} + \sin^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}$$
(3.7)

である。

以上の式に、入射ビームエネルギーなどの初期条件を代入して得られる散乱電子のターゲットでの散乱角度と運動量を用いて、HES側のGEANT4シミュレーションを実行する。

入射ビームエネルギー E_i		$2.344~{\rm GeV}$
散乱電子運動量		0.422-1.26 GeV/c
散乱角度(極座標 θ)		$0 \thicksim 300~m{\rm rad}$
散乱角度(極座標 ϕ)		$0 \thicksim 2\pi$ rad
アクセプト散乱角度(水平方向	X_t')	-150 \thicksim 150 $m {\rm rad}$
アクセプト散乱角度(垂直方向	Y_t')	$20 \sim 120 \ mrad$

表 3.5.6: 仮想光子起因電子のパラメータ作成初期条件

∧ ハイパー核の収量見積もり計算

式 3.4 に示した Γ を用いて Λ ハイパー核の収量を見積もる。また、HES、HKS の立体角は GEANT4 シミュレーションを用いて算出する。HES の立体角を *SA* とすると、

$$SA = \Delta \Omega \cdot \Delta p \cdot \frac{(Accept)}{(Generate)}$$
(3.8)

となる。 $\Delta\Omega$ 、 Δp はそれぞれ立体角、運動量の一様生成幅である。(*Generate*)はGEANT4シミュレーションに与えたイベント数であり、(*Accept*)はGEANT4シミュレーションでEHODO \otimes EDC1、2 \otimes Q1-Q2-Dマグネット通過フラグを満たすイベント数である。 仮想光子起因電子の計数率は以下の計算式により導出できる[4]。

$$N_{vp}[/sr/sec] = C[\text{electron}/\text{cm}^2/\text{sec}] \cdot \iint \Gamma d\Omega_{e'} dE_{e'}[/\text{electron}] \cdot \frac{d\sigma_{\gamma}}{d\Omega_K} [\text{nb/sr}]$$
(3.9)

この式は 2.6 を $d\Omega_{e'}$ と $dE_{e'}$ で積分したものであり、K 中間子側の立体角あたりの収量を表して いる。したがって生成されるハイパー核の個数を見積もるには HKS の立体角で積分する必要があ る。C は以下のように定義され、ビーム強度や標的の核子数の情報を含む定数である [4]。

$$C = 10^{-9} \times \frac{(\text{Beam Intensity}[\mu A])}{\text{Elementary Charge}[C/\text{electron}]} \frac{(\text{Target Thickness}[mg/cm^2]) \cdot (\text{Avogadro Number}[/mol])}{\text{Target Mass}[g/mol]}$$

定数 C を求めるに従い、標的の厚さを $100[mg/cm^2]$ 、ビーム強度を $30[\mu A]$ 、 γ の吸収断面積を ターゲットを問わず 100[nb/sr] にそれぞれ仮定した。以上の計算式を用いて Λ ハイパー核の収量 を GEANT4 シミュレーションにより導出した。

制動放射起因電子の計数率の計算

本論文中の制動放射は、標的中を進行している電子が原子核のクーロン力によって加速度を受けて電磁波を発生する事を意味する。原子番号が Z の標的核の、標的中での制動放射の微分断面 積は以下のようになる。また、以下の数式の詳細は参考文献 [14] に記載されている。

$$\frac{d^2\sigma_b}{d\Omega_\omega d\omega} = \frac{2\alpha^3 E^2}{\pi\omega m_e^4} \left[b_1 G_2(\infty) + b_2 (X - 2Z^2 f((\alpha Z)^2)) \right]$$
(3.10)

ここに

$$b_{1} = \frac{2y-2}{(1+l)^{2}} + \frac{12l(1-y)}{(1+l)^{4}}$$

$$b_{2} = \frac{2-2y+y^{2}}{(1+l)^{2}} - \frac{4l(1-y)}{(1+l)^{4}}$$

$$X = X^{el} + X^{inel}$$

$$= Z^{2} \left[\log \frac{a^{2}m_{e}^{2}(1+l)^{2}}{a^{2}t'_{min}+1} - 1 \right] + Z \left[\log \frac{a'^{2}m_{e}^{2}(1+l)^{2}}{a'^{2}t'_{min}+1} - 1 \right]$$

$$y = \frac{\omega}{E}, \quad l = \left(\frac{\theta\omega E}{m_{e}}\right)^{2}$$

$$a = \frac{184.15}{(2.718)^{1/2}Z^{1/3}m_{e}}$$

$$a' = \frac{1194}{(2.718)^{1/2}Z^{2/3}m_{e}}$$

$$t_{min} = \left[\frac{\omega m^{2}(1+l)^{2}}{2E(E-\omega)} \right]^{2}$$

$$G_{2}(\infty) = Z^{2} + Z$$

$$f(x) = 1.202z - 1.0369z^{2} + 1.008\frac{z^{2}}{1+z}$$

である(数値の意味は文献[14]を参照)。これらの計算式に入射電子のエネルギー等の値を代入し 反応断面積を算出し、反応を起こしたイベントに対して、散乱電子のターゲットでの散乱角度や 運動量の値を導出する。

GEANT4 シミュレーションによる A ハイパー核収量とバックグラウンド計数率の導出



図 3.8: 標的での散乱電子の角度分布。入射粒子は仮想光子起因の散乱電子。横軸が水平方向角度 *m*rad、縦軸が鉛直方向角度 *m*rad である。

図 3.8 は仮想光子起因電子の標的での角度分布であり、カット条件は、全ての磁石と検出器を通 過したイベントである。また、入射粒子のパラメータがイベント毎に定義されたファイル(以下 シードファイル)の作成は、A ハイパー核の収量を見積もる際は仮想光子起因電子の、バックグ ラウンドの計数率を見積もる際はバックグラウンドのシードファイルを生成し、GEANT4 シミュ レーションを行った。バックグラウンドの計数率を見積もる場合、HKS 側の K⁺ 中間子の計数率 と、HES 側の制動放射起因のイベントとの同時計測を計算し、バックグラウンドの計数率を求め る。また、A ハイパー核の収量を見積もる場合は、散乱電子の入射パラメータから HKS に入射す る粒子の入射パラメータを導出し、HKS 側の Geant シミュレーションを行い、HKS 側のアクセ プタンスを考慮する。

 Λ ハイパー核の収量見積もりの結果を表 3.5.7 に、バックグラウンドの計数率の計算結果を表 3.5.9 に示す。HES や Splitter の新設などによって、 Λ ハイパー核の収量は前回実験の約5倍を実現でき る。一方で、ビームカレントを上げる効果により、制動放射起因電子の計数率は前回実験以上を予 想している。但し、前回実験では M ϕ ller 散乱起因の電子も検出してしまったため、全てのバック グラウンドの計数率は、前回実験を下回ると予想される。よって、E05-115 では Λ ハイパー核の 収量を前回実験の約5倍を得ると同時に、S/N 比も改善すると見込まれる。GEANT4 シミュレー ションに用いたパラメーター覧を表 3.5.10 に示した。

また、HKS 側の K⁺ 中間子の計数率は、前回実験の値 (表 3.5.8) を用いて、E05-115 での計数 率を導出する。

$$R_{E05} = R_{E01} \times (\text{Ratio of HKS Acceptance})$$
(3.11)

$$\simeq \frac{8[msr]}{15[msr]} \times R_{E01}$$
(3.12)

R_{E05} は E05-115 での K⁺ 中間子の計数率、R_{E01} は E01-011 での K⁺ 中間子の計数率を示す。E05-115 の HKS 立体角は GEANT4 を用いて算出した。

表 3.5.7: E05-115 Λ ハイパー核収量見積もり。簡単のため標的核の厚さを 100 mg/cm²、 Λ 生成の断面積を 100 nb/sr と仮定する。

Target(Beam Current : $30 \ \mu A$)	E05-115 A ハイパー核収量 [/hour]
$^{-7}$ Li (Beam Current : 15 μ A)	32
$^{10}\mathrm{B}$	44
$^{12}\mathrm{C}$	37
$^{40}\mathrm{Ca}$	11
$^{51}\mathrm{V}$	9
$^{52}\mathrm{Cr}$	9
^{89}Y	5

バックグラウンドは HES 側の制動放射起因電子と、HKS 側の K⁺ 中間子との同時計数を計算 した。同時計数幅を 2 nsec とするため、

 $BG.rate = (HKS Rate) \times (HES Rate) \times Coincidence Windows(2[nsec]))$

となる。

表 3.5.8: E01-011 時の HKS による K 中間子計数率 [4]。ビームカレントは 30 μ A、標的核厚は 100 mg/cm² である。

Target	$R_K [\text{Hz}]$
⁶ Li	$307 \pm 98(sys) \pm 4.1(stat)$
$^{7}\mathrm{Li}$	$447 \pm 144(sys) \pm 5.5(stat)$
⁹ Be	$619 \pm 195(sys) \pm 8.0(stat)$
$^{10}\mathrm{B}$	$373 \pm 118(sys) \pm 4.2(stat)$
$^{12}\mathrm{C}$	$193 \pm 49 (sys) \pm 2.0 (stat)$
$^{28}\mathrm{Si}$	$140 \pm 35(sys) \pm 1.5(stat)$
$^{51}\mathrm{V}$	$86.5\pm27(sys)\pm2.7(stat)$
⁸⁹ Y	$100 \pm 29(sys) \pm 3.4(stat)$

表 3.5.9: E05-115 バックグラウンド計数率見積もり。

Target(Beam Current : $30[\mu A]$)	HKS K^+ rate[Hz]	HES e' rate[MHz]	B.G. $rate[Hz]$
$\phantom{aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa$	119	0.28	6.66×10^{-2}
$^{10}\mathrm{B}$	199	0.48	1.91×10^{-1}
$^{12}\mathrm{C}$	102	0.56	1.14×10^{-1}
$^{40}\mathrm{Ca}$	70	1.62	2.27×10^{-1}
$^{52}\mathrm{Cr}$	46.1(V51)	1.78	1.64×10^{-1}
⁸⁹ Y	53.3	2.65	2.84×10^{-1}

表 3.5.10: E05-115 実験シミュレーションパラメータ一覧

入射ビームエネルギー	$2.344~{\rm GeV}$
ビームカレント	$30 \ \mu A(\text{Li7:15} \ \mu A)$
標的核の厚さ	100 mg/cm^2
HES と HKS の同時計数幅	$2.0 \times 10^{-9} \text{ sec}$
—————————————————————————————————————	0.3
K ⁺ 中間子飛程	10 m
tilt 角	6.5 $^{\circ}$

バックグラウンドのエネルギー分布

予想されるスペクトルを生成する際に、バックグラウンドのエネルギー分布を知る必要がある。 そのため、HES 側に制動放射起因電子、HKS 側に K⁺ 中間子のイベントを発生させ、束縛エネル ギー(B_{Λ})を求めるシミュレーションを行った。なお、ターゲットには ⁵²Cr を使用した。 B_{Λ} を 求める計算式を以下に示す。

$$B_{\Lambda} = \sqrt{(E_i + M_t - E_K - E_e)^2 - \Delta P^2} - M_{51V} - M_{\Lambda}$$

$$\Delta P^2 = \Delta P_x^2 + \Delta P_y^2 + \Delta P_z^2 \tag{3.13}$$

$$\Delta P_x = -P_{ex} - P_{Kx} \tag{3.14}$$

$$\Delta P_y = -P_{ey} - P_{Ky} \tag{3.15}$$

$$\Delta P_z = P_i - P_{ez} - P_{Kz} \tag{3.16}$$

作成したバックグラウンドと、その際の $P_{e'}$ 、 P_{K^+} の相関図を図 3.5.1、3.5.1 に示す。予想スペクトル生成時には、バックグラウンドの横軸 (B_{Λ})を図 3.5.1 の分布に従って決定した。



図 3.9: バックグラウンドイベントのエネルギー分布

3.5.2 シミュレーションによる予想スペクトル生成

前節のシミュレーションによって導出した S/N 比をもとに、 52 Cr ターゲットの予想スペクトル を作成した。また、この予想スペクトルを考察し本実験での Time Allocation を決める上での参 考にする。予想スペクトルを立てる際の横軸と、対応する Cross section の値は Bydzovsky 氏の理 論計算結果を参照する [7]。参照した 52 Cr の Bydzovsky 氏の計算結果を図 3.11 に示す。導き出し た S/N 比と図 3.11 の理論計算結果をもとに、E05-115 実験における予想スペクトルを作成した。 作成した 52 Cr の予想スペクトルは図 3.12 となる。


図 3.10: 制動放射起因電子と K⁺ 中間子の運動量の相関図



図 3.11: ⁵²Cr cross section 理論計算 [7]



図 3.12: ⁵²Cr 予想スペクトル。分解能は 400 keV(FWHM)、Data Taking の時間は 144 時間(6 日間)と仮定した。

第4章 散乱電子側TOFカウンタの設計・開発

この章では散乱電子側のトリガーカウンタとしての役割も担う TOF カウンタ(EHODO)の開発について述べる。

4.1 E05-115 実験における性能要求と改善点

次世代実験である E05-115 も、E01-011 と同様に散乱電子側のトリガーカウンタとして用いる予 定であり、K⁺ 中間子側の TOF 分解能、≃100 psec を達成することが望ましい。加えて、E01-011 の経験をもとにした改善点は主に以下の3点である。

- X方向に敷き詰められたシンチレータの間を抜けるイベントを防ぐ
- サポート (EHODO 架台)の工作精度を考慮する
- シンチレーター本単位の取り外しを可能にする(シンチレータ単位に磁気シールドを用意 する)



図 4.1: E01-011 実験での EHODO 全体図。全てのシンチレータを水平方向に敷き詰めて並べているため、一間隔の長さのずれが累積し、数本のシンチレータに対して、現物合わせの調整が必要であった。

図 4.1、4.2 は、前回実験での散乱電子側ホドスコープの全体図と拡大図である。X 方向に敷き 詰めて並べており、製作上の誤差がそのままシンチレータ間の隙間となってしまい、結果として数



図 4.2: E01-011 実験での EHODO 拡大図

本収まらない状態になってしまった。また、サポートの構造上、実験中に(tilt時に)シンチレー タを一本単位で取り外すことが困難であった。そのため、前回実験では不具合が起きたシンチレー タを残してデータ収集を行った。

よって、E05-115では、メンテナンスを考慮した EHODO の設計を行った。

表 4.1.1: E05-115 EHODO 仕様

NAME	Sensitive volume $[mm^3]$	Construction
EHODO1	1170 × 300 × 10	50^W mm × 29 segments PMT:Hamamatsu H6612 $\phi1.5~{\rm cm}$
EHODO2	$1170 \times 300 \times 10$	50^W mm × 29 segments PMT:Hamamatsu H6612 $\phi 1.5~{\rm cm}$

図 4.3 が E05-115 実験における EHODO1、EHODO2 のレイアウトであり、表 4.1.1 が EHODO の構成表である。29 本のシンチレータを区別するため、

新設した EHODO では隣り合うシンチレータ同士が干渉しないようにジグザグに配置し、それ ぞれ X 方向に 1[cm] のオーバーラップを持たせた。オーバーラップを持たせることで、ジグザク に配置した影響によるイベントロスを無くし、かつ、敷き詰めた場合に必ず生じてしまうシンチ レータの隙間を無くす事が出来る。



図 4.3: 散乱電子側の Hodoscope の Layout

4.2 GEANT4を用いた散乱電子側シミュレーション

EHODOの最適な大きさや位置を導くため、必要なスペクトロメータや検出器を配置し、GEANT4 でのシミュレーションを行った。主なパラメータを表 4.2.2 に示す。

入射ビームエネルギー	$2.344~{\rm GeV}$
散乱電子中心運動量	$0.844~{\rm GeV/c}$
散乱電子運動量	0.422-1.266 GeV/c
D マグネットから EHODO Layer1 距離	180 cm
EHODO Layer 間距離	$30 \mathrm{~cm}$
tilt 角	6.5 $^{\circ}$

表 4.2.2: GEANT4 パラメーター覧

4.2.1 シンチレータ間の距離によるイベントロスの見積もり

EHODO をジグザグ配置にした時の、イベントロスを見積もる。散乱電子の入射角とシンチレー タの位置イベントロスの見積もりは以下の計算式で行った。また、粒子の入射角の定義は図 4.4 で 説明する。

- $tan(x'_{max}) = 1 \operatorname{cm}(\operatorname{OverLap}) \div 3 \operatorname{cm}(\operatorname{Distance})$ (4.1)
 - $x'_{max} \simeq 18.4 \deg \tag{4.2}$
 - $\simeq 321 \, mrad(最大検出角)$ (4.3)
 - (4.4)

300 mrad 以上の入射角度を持った散乱電子ならば、隙間を抜けずに検出できる事が分かる。EHODO Layer 1 での仮想光子起因電子の水平方向位置 x cm、水平方向角度 x/ mrad の相関図を示す。入 射角度の分布に対して、EHODO の検出領域が十分広い事が分かる。

しかし、実際にはシンチレータの端に当たり光量が少ないイベントのパルスは、ディスクリミネータの閾値以下のの可能性がある。よって、以下のスタディは、入射粒子のエネルギーロスによってカットをかけている(図4.6参照)。

4.2.2 アクセプタンス・計数率の見積もり

仮想光子起因電子のシードファイル(節3.5.1参照)を用いて EHODO の EDC1、EDC2 で検 出されたイベントに対しての検出領域を検証する。また、制動放射起因電子のシードファイル(節 3.5.1参照)を用いて、EHODO の各セグメントに入射する電子の計数率を見積もる。

アクセプタンスの見積もり

EHODOの仮想光子起因電子に対するアクセプタンスのビーム方向(Z方向)位置依存性を検証 した(図4.9参照)。HES検出器群に入射する散乱電子の軌跡を散乱電子側スペクトロメータの上



図 4.4: 電子の入射角とシンチレータ位置の関係



 \boxtimes 4.5: Xp vs X at EHODOLayer 1



図 4.6: エネルギーロスによるカット。シンチレータの端に当たり光量が少なくなってしまったイベントを排除している。

から見た図を、図 4.7 に示す。また、図 4.8 に D マグネットからの距離 180 cm に置いた場合の散 乱分布図を示す。横軸にビーム方向右側を正とする x cm、縦軸に鉛直方向を正とする y cm をと る。赤色の枠で囲まれた部分が EHODO の検出領域である。



図 4.7: EHODO のビーム検出領域図。Z[cm] は D マグネットからの距離を表す。



図 4.8: Virtual Photon Distribution at Hodoscope Layer1(EHODO1)。EHODO1の位置は ED から 180[cm] であり、横軸 X[cm]、縦軸 Y[cm] とする。赤色の枠が EHODO1の検出領域であり、 ほぼ 100 パーセントのアクセプタンスを実現している。



図 4.9: EHODO1 の Z 方向位置と Acceptance の依存性



図 4.10: オーバーラップとアクセプタンスの関係。横軸がオーバーラップの値であり、数ミリの ずれならば問題ない事が分かる。

ジグザグ配置によるイベントロスとオーバーラップの依存性も確認する必要がある。図 4.10 は EHODO のアクセプタンスのオーバーラップ依存性である。横軸をオーバーラップ [cm]、縦軸を アクセプタンスとする。また、全てのセグメントのオーバーラップを一律に変化させた。オーバー ラップ約 4 mm まではアクセプタンスは、ほぼ 100 パーセントであり、数ミリ単位までのずれな らば、ほとんど影響が無い事が分かる。

EHODO 各セグメントの計数率の見積もり

前回実験では散乱電子側に不具合を起こしたシンチレータが存在した。そのため、シミュレーション段階で EHODO の各セグメントに対する電子の計数率を調べておく必要がある。計数率の 見積もりには制動放射起因電子のシードファイルを用いた。各ターゲットによる EHODO が検出 する電子の計数率を図 4.11 に示す。

ターゲットに 89Y を用いた場合、最大 200[kHz] 程の計数率となっており、注意が必要である。



図 4.11: 制動放射起因の電子による EHODO の計数率。横軸は Layer1 のセグメント ID、縦軸は Layer2 のセグメント ID となる。

4.3 まとめ

EHODO がシミュレーション上では要求した性能を満たしている事が分かった。現在ではホド スコープ本体やサポートの建設も完了しており(図4.12、4.13参照)、米国ジェファーソン研究所 での調整段階に入っている。

また、EHODOは散乱電子側実験トリガーとしての役割を担っているため、次章ではグルーピン グシミュレーション結果から EHODO のトリガー回路を作成し、評価する。



図 4.12: EHODO サポート実物写真全体図



図 4.13: EHODO サポート実物写真拡大図。図の様にライトガイド部分をバーで固定する事で EHODO の各セグメントに水平方向、垂直方向に安定感を持たせる。

第5章 E05-115実験トリガーロジックの開発・ 研究

E01-011の際に我々のグループは TUL-8040[5] (Tohoku Universal Logic module)というロジッ クモジュールを開発した。この TUL-8040 を使用する事で複雑なロジックを、プログラムで作成、 変更する事が可能になった。

本章ではまず、トリガーロジックを作成する際に行ったシミュレーションについて議論する。その後、TUL-8040 について記述し、作成した E05-115 のトリガーロジックについて説明を行う。

5.1 GEANT4実験シミュレーションによるトリガーロジックの研究

我々が行う実験では、散乱電子側、K⁺ 中間子側の両方に数 MHz のバックグラウンドが存在す る。K⁺ 中間子側の主なバックグラウンドである π^+ 中間子や陽子は、オフラインの解析でほぼ全 てのイベントを排除する事が可能であるが、散乱電子側の計数率が制動放射起因のイベントによ り非常に高計数率のため (~数 MHz)、バックグラウンドの計数率が数 kHz になる。Computer efficiencey がトリガーの計数率 $\geq 1 \text{ kHz}$ で急速に落ちるため、 Λ ハイパー核の収集効率が減少し てしまう。

よって、オンラインでのバックグラウンド計数率を最小限に抑えたい。そこで、トリガーとな る検出器のセグメントを複数のグループに分け、グループ毎にトリガーロジックを組み(以下グ ルーピング)、収集するデータを仮想光子起因電子または、K⁺中間子の検出領域に限定した。 これによって、標的外から来るイベントや、磁石や架台に当たりAハイパー核反応や制動放射の 運動学から外れたイベントをオンラインで落す事が可能になる。この節では散乱電子側、K⁺中間 子側それぞれについて、トリガーロジックに施すグルーピングを決定するためのシミュレーショ ンについて議論する。なお、グルーピングのモンテカルロシミュレーションには、第三章と同様 に GEANT4 シミュレーションパッケージを用いた。

5.1.1 HES トリガーロジックのシミュレーション

HES 側のトリガーカウンタは EHODO Layer1、Layer 2 である。よって、HES 側は仮想光子起 因電子の EHODO Layer1 と Layer2 の水平方向位置の相関を調べることにより、トリガーロジッ クを決定した。ターゲットには ⁵²Cr を仮定した。



HES e' distributions

図 5.1: 仮想光子起因電子の EHODO Layer 1、Layer 2 における位置相関図。Segment width は、 散乱電子が通過した際の Layer1 Segment ID と Layer2 Segment ID の差である。横軸に Layer 1 のシンチレータ ID、縦軸に Layer 2 のシンチレータ ID を示す。また、黒い四角が実際に作成した グルーピングロジックである。

決定する必要があるのはグループ化するシンチレータの本数であるため、シミュレーションを行 い、グループ化した本数とアクセプタンスの相関を調べた。ここで、アクセプタンスとはグルー プピングする前と後のイベント数の比であり、アクセプタンス 100 パーセントの場合は、グルー ピングによるイベントロスが無いことを意味する。

図 5.1 を見ると、EHODO Layer1 のセグメント ID と EHODO Layer2 のセグメント ID の差が 4 までのイベントをトリガーにする事で、アクセプタンス ~100[%] を達成できる事が分かる(セ グメント ID は章 4.3 参照)。よって、E05-115 ではディスクリミネータでデジタル化した信号を TUL モジュールに ECL 入力し、セグメントの ID に沿って順に 4 本ずつ OR ロジックに入れる。 そして、29/4~7 グループの信号を TUL モジュールから NIM 出力させ、散乱電子側のトリガー ロジックを作成する。図 5.1 の黒い枠で囲まれた領域がトリガー領域になる。

5.1.2 HKS 側の検出器単位のトリガーロジック

各検出器のトリガーロジックは以下の様になる。

$$TOF = TOF1X \otimes TOF1Y \otimes TOF2X$$

$$(5.1)$$

$$AC = AC1 \oplus AC2 \oplus AC3 \tag{5.2}$$

$$WC = WC1 \otimes WC2 \tag{5.3}$$

(5.4)

オンラインで K⁺ を識別するため、二種類のチェレンコフカウンターを用いる。その際の K⁺ の トリガーは以下の様になる。

$$K^+ = (TOF) \otimes (AC_{not}) \otimes (WC)$$

ここで、新設した LC は WC のバックアップとして動かす予定である。また、各チェレンコフカウンターのトリガー段階での除去能率を調べるための Unbias トリガーも作成する。

$$\text{Unbias} = (\text{TOF})$$

これらの HKS トリガー信号と、HES 側のトリガーカウンタ EHODO との同時計測により、実験 トリガーを作成する。

5.1.3 HKS トリガーロジックのシミュレーション

HKS 側のトリガーは最大で TOF1X、TOF1Y、TOF1Y、WC.、AC.、LC. の計 6 本から構成 される。HES 側のグルーピングと同様に、粒子の検出器への入射角などからグループ化する本数 を見積もる。HKS の GEANT4 シミュレーションに用いた各種パラメータを表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1: HKS GEANT4 パラメーター覧

K ⁺ 中間子中心運動量	$1.2 \ {\rm GeV/c}$
—————————————————————————————————————	$1.05 \text{\sim} 1.35 \ \mathrm{GeV/c}$
散乱角度(水平方向)	$-272 \thicksim 28.0m \mathrm{rad}$
散乱角度(鉛直方向)	-150 ~ 150 $m \mathrm{rad}$

GEANT4 シミュレーションにより作成した K⁺ 中間子の飛跡を図 5.2 に示す。横軸 z[cm] の絶 対値が HKS の D マグネットからの距離であり、ビーム水平方向を x[cm] とする。また、ビーム方 向左側(高運動量側)を正とする。グルーピングを行う事で、同程度の運動量を持った粒子をグ ループ化するためオンラインでチェレンコフ検出器の除去能率の運動量依存を確認できる利点も ある。

以下に検出器別のグルーピングスタディの結果を記述する。図 5.3 に各検出器面で検出される粒子の xy 分布を示す。x は水平方向位置、y は鉛直方向位置である。

HKSのトリガーはTOFトリガー、WCトリガー、ACトリガー、LCトリガーを組み合わせて 作成するため、グルーピングはそれぞれの検出器のトリガーを作成する段階で行う。 以上の状況を踏まえて、TOF1XとTOF2Xについてグルーピングスタディを行った。



図 5.2: HKS Geant シミュレーション結果。Z[cm] 値が D マグネットからの距離を表す。トリガー には、マグネット通過フラグ ⊗TOF1X⊗TOF2X⊗KDC1⊗KDC2 を用いた。K⁺ 中間子の運動量 により色分けしている。



図 5.3: 各検出器面の K⁺ 中間子の xy 分布。赤いラインがセグメントの境界面である。上段が TOF カウンタ、中段が WC、下段が AC となっている。また、AC Layer1 と AC Layer2 の間にある AC Layer2 は省略した。



図 5.4: TOF1X x[cm] と TOF2X x[cm] の Hit position 相関図。TOF1X のセグメントの境界を赤 いラインで、TOF2X のセグメントの境界を青いラインで表示した。セレクタが0 である場合のグ ルーピングロジックを四角で囲んだ。

図 5.4 に、横軸 TOF1X の x cm、縦軸 TOF2X の x cm とした TOF1X と TOF2X の相関図を 示す。赤いライン(17本)と緑のライン(18本)はそれぞれ、TOF1X のセグメントの境界 x cm と TOF2X のセグメントの境界 x cm である。図 5.4 より、HKS 検出器に入射する粒子に対して、 x 方向の角度に対して条件を設けても正しいイベントを取りこぼさない事が分かる。よって、本 実験では TOF トリガーロジックを複数設け、角度方向の制限の程度を変更できる仕様にした。図 5.4 で四角で囲んである領域は、セレクタが0の場合のグルーピングであり、制限が最も厳しい場 合に相当する。

同様に、AC、WC についてもグルーピングスタディを行った。HKS のトリガーロジックは TOF カウンタを軸に行うため、チェレンコフカウンタのグルーピングは TOF カウンタに比べ、制限を 緩くした。結果を図 5.5、5.6 に示す。

図 5.7 に、HKS 検出器に対して行うグルーピングの模式図を示す。この様に、TOF カウンタを 軸に計五グループ作成した。

HKS 側では、スペクトロメータを tilt していないため、HES 以上に非常に綺麗な水平方向(x)の相関が確認できる。そのため、水平角度方向に対して、より厳しい条件を設ける事が可能である。以上の様に行ったグルーピングシミュレーションをもとに、回路作成を行なった。

しかし、NIM モジュールを使用しグルーピングを行う場合、大量のモジュールが必要となり、 その結果、回路の複雑性や人為的ミスが増えてしまう。また、一度作成したロジックを変更する 場合、変更する部分が多いほど非効率的になる。

そこで、前回実験の時にプログラムによって回路を作成及び変更が可能な新しいモジュール(TUL-8040)が制作された。今回実験の論理回路作成も、プログラムによって行った。次節からは、実際に作成したトリガーロジックを記述する。



図 5.5: AC Layer1 x cm、AC Layer2 x cm、AC3 Layer3 x cm の Hit position 相関図。AC Layer1 のセグメントの境界を黒いラインで、AC Layer2 のセグメントの境界を赤いラインで、AC Layer3 のセグメントの境界を緑のラインで表示した。AC はグループ化するセグメントの本数が多いため、二つのグループのみ表示する。



図 5.6: WC Layer1 x cm、WC Layer2 x cm の Hit position 相関図。WC Layer1 のセグメントの 境界を赤いラインで、WC Layer2 のセグメントの境界を緑のラインで表示してある。グループ化 した領域が干渉しているためグループ毎に色分けした。



図 5.7: HKS 検出器のグルーピング模式図

5.2 TUL-8040とは?

5.2.1 使用背景と目的

最近の原子核実験では検出器系の複雑化が進んでいる。それに伴い、トリガー回路論理をNIM モジュールを組み合わせる事で構成するという従来の方法では、「モジュールの数の増大」、「論理 回路変更の困難さ」、「propagation time の増大」が問題になっていた。

そこで我々は民間で多くの使用実績のある ALTERA 社の FPGA (Field Programmable Gate Array) [16] を実装した汎用ロジックモジュール TUL-8040 (Tohoku University Logic)を開発した。

FPGAとは設計者がその場で機能を書き込むことが出来る高集積LSIの事であり、多数の論理 素子とフリップフロップが配列状に敷き詰められ、論理素子の機能、素子間の結線を自由に変更 することが可能である。

我々の実験に FPGA を用いる事で、上記の困難を解決するだけでなく、回路作成作業をプログ ラムで行える事によって、シミュレーションツールを用いた事前動作チェックの容易さや、実験本 番での配線ミスのリスクを無くすというメリットも大きい。

ただ、配線作業をプログラムで行う事によって発生する不具合を考慮しなければいけない。そのためには事前段階での緻密なシミュレーションや、プロトタイプを用いた動作テストなど、実験本番に向けた研究が必要不可欠である。

また、FPGA プログラミングの開発環境には ALTERA 社の Quartus2 を用いた。簡単な使い方は 本論文の AppendixB に記述した。

5.2.2 TUL-8040 仕様

TUL は 80ch (ECL 64 + NIM 16)の入力と、40ch (ECL 32 + NIM 8)の出力、4 bits の Rotary Switch、16 bits の Dip Swith、4 bits の LED を搭載している(表 5.2.2 参照)。また、 ALTERA 社製 APEX20K (EP20K300E)という FPGA が搭載されており、11,520 個の論理素子 (LE、Logic Element)と、152chの入出力が存在する。これらによって、TUL では高度な演算処 理が可能となる。

APEX20K は、複数の LAB (Logic Array Block)によって構成され、各 LAB には 8 個の LE と、Local interconnect が存在する。

• Mega LAB

Mega LAB は 16 個の LAB と ESB (エンベデッド・システム・ブロック)から構成されている。 Raw interconnect と Column interconnect によって、I/O Bank や内部デバイスと接続されている (5.8 参照)。

• LAB

LAB は 8 個の LE から構成されている。Local interconnect によって、同じ LAB 内の LE に接続 することが可能である。又、MegaLAB interconnect によって、同じ MegaLAB 内の LAB に、接 続することが可能である。

• LE



図 5.8: デバイス内部構造

LEはFPGA内部構造の最小単位である。図 5.9の様に、FPGAのロジックセルは、主に4あるい は6入力のルックアップテーブル(Look Up Table:以下LUT)とフリップフロップ(Flip Flop) の2つから構成されている。設計者のプログラムに応じて、LE同士が結線される事によって、様々 な論理を組む事が出来る。

• I/O Bank

Input や Output などのピンが Assign されている領域である。

• LUT

ROM や RAM に真理値を書き込み、その表を参照し、組み合わせ論理を実現する。4、又は6の 入力が存在し、それぞれの bit 数に応じたアドレスデコーダ部をもとに 1bit 出力を行う(図 5.9 参 照)。別に「分散型メモリ」とも呼び、小型のメモリとして使用することも可能である。



図 5.9: LE 内部構造簡略図

Inputs		Outputs	
ECL / LVDS	$64 \mathrm{ch}$	ECL	32 ch
NIM	$16 \mathrm{ch}$	NIM	8ch
Rotary SW	4 bits	LED	4 bits
Dip SW	16 bits		

表 5.2.2: TUL-8040 入出力一覧



図 5.10: TUL 表面パネルと側面概観 [5]

5.3 TUL 動作テスト

この節では TUL の動作テスト、主に TDC を取るなどのデータ収集を行うことで非同期回路や 同期回路の特徴を理解し、E05-115 で TUL を扱う準備をした。

同期回路を構成する場合、TUL内部クロックの周波数に応じた jitter が存在する。よって動作 テストでは、TUL内部クロックがもたらす jitter の挙動の扱いについて詳しく述べる。

5.3.1 セットアップと実験アウトライン



図 5.11: TUL 動作テスト実験セットアップ図。PMT 両端シンチレータを二枚設置し宇宙線を測定した。



図 5.12: テスト実験回路図

図 5.11 に実験のセットアップ図を示す。二枚のシンチレーションカウンタのトリガーを TUL 内部クロック非同期式とクロック同期式の二通り用意し、TDC の挙動を考察した。

5.3. TUL 動作テスト

1. TDC Start by TUL (TUL 内部クロックを用いた同期式), Stop by NIM.

2. TDC Start by TUL (And Logic を用いた非同期式), Stop by NIM.

トリガーロジックを同期または非同期式にする事で、TDCのjitterの有無を計測する。TUL内部クロックを用いた同期式の場合、クロックの周波数~200 MHzを用いたためjitterは約5 nsecになると予想される。TULの内部クロックについては次節で説明する。

実験結果は図 5.13 に示す。TUL 内部クロックの周波数 f、伴う jitter を δf とすると、

$$\frac{-1}{2f} \le jitter \le \frac{1}{2f} \tag{5.5}$$

となり、jitter を考慮した TDC を tdc'、考慮する前を tdc とすると tdc'は、

$$tdc' = tdc + \delta f \tag{5.6}$$

のようになる。ここで、シンチレータ F1 と B1 に作用する jitter は等しいため Time of flight を 求める計算式、

$$TOF.F1 and B1 = \frac{tdc'_{F1r} + tdc'_{F1l}}{2} - \frac{tdc'_{B1r} + tdc'_{B1l}}{2}$$
(5.7)

を計算すると、TUL 内部クロックによる jitter は消える。図 5.13 の上の図が Time of flight を プロットした図であり、下の図では \sim 5 nsec あった jitter が消えている事が分かる。



図 5.13: TUL テスト実験結果。上の図が F1 と B1 の間の Time of flight、下の図が F1r と F1l の Mean Time である。

また図 5.14 はトリガーを NIM で組む場合(左)と、TUL で組んだ場合(右)を比較した図で ある。



図 5.14: TUL テスト実験結果 TOF 比較。トリガーを NIM で組む場合(左:非同期式)と、TUL で組んだ場合(右:同期式)を比較した図である。

TUL に内部クロックによる jitter が TOF 分解能に影響を及ぼさない事が分かった。次節では、 作成した実験回路の考察を行う。

5.4 E05-115 実験回路論理の考察

この節では、データ検出トリガー信号を出力する役割を担う散乱電子側、 K 中間子側の論理回 路の設計及び説明をする。

5.4.1 散乱電子側回路

散乱電子側のトリガー論理回路は以下の3つのTULモジュールで構成されている。

HES Hodoscope Layer1

HES Hodoscope からの信号を PMT 単位で MeanTimer に通し、シンチレータ単位で OR を取 る事でグループ化する。配線図を図 5.15 に示す。

Pluse shaper

HES 側、HKS 側共に多数の出力が必要なため、TUL は信号を束ねる役割も担っている。その 際 OR ロジックを用いる事が多いが、各チャンネル間のタイミングの違いによって出力パルスの 幅が広くなってしまう。そのため、TUL からの出力の直前に Pulse shaper を設置する。 Pulse shaper の配線図を図 5.16 に示す。

Pulse shaper の役割はパルス幅を一定値にして出力することである。配線図を見て分かるよう に、入力した直後に2つの信号に分けている。片方はNOTをとり、LCELL(3~4[nsec] delay) 10 個の delay chain に、もう片方はNOTを取らずLCELL1 個に通す(LCELL は LE を素通しさ せた delay)。この2つの信号を同期させる事で、NOTを取らない信号が inst11 に到着した時間 (T₁)から、NOTを取った信号が inst11 に到着した時間(T₂)までの間、inst11 からの出力が1 になる。出力信号の Width を T'、LCELL による propagation time を δt とすると、

$$T' = T_2 - T_1 = 10\delta t - \delta t = 9\delta t \sim 30[nsec]$$

$$(5.8)$$

となり、約 30[nsec] の幅を持った出力になる。inst11 からの出力信号は、もう一度 2 つに分け られ、それぞれ LCELL20 個の delay chain と、LCELL3 個の delay chain に通したあと、NOR 回 路を通す。OUT が初期値 0 の場合 OUT を 1 にするためには、inst32 に入力される信号の両方が 0 の必要があり、そのためには inst33 に入力される信号のもう片方(初期値 0 のため)を 1 にする 必要がある。しかし、OUT が 1 の時は、前者の条件のみで OUT が 1 に保たれる。Pulse shaper の出力は、入力が ~30[nsec] 以上のパルスに対して、

$$T' = T_2 - T_1 = 20\delta t - 3\delta t = 17\delta t \sim 50[nsec]$$
(5.9)

となる一定の Width を持ったパルスが出力される。実際にオシロスコープにて観察した波形を図 5.17 に示す。



 \boxtimes 5.15: HES Hodoscop Layer
1 TUL

29本のシンチレータからの信号を4本ずつ束ね、計7チャンネルの信号を出力する回路である。各 出力の直前にはORロジックによって生じる pulse widthのバラつきを抑えるために、widthを制 限する Shaper を設置してある。また、EHODO Layer2 に用いる回路も、この回路と同じである。



図 5.16: Pulse shaper **配線図**



図 5.17: Pulse shaper 通過前と通過後



図 5.18: Mean Timer 配線図

Mean Timer

HDL で記述した Mean Timer の配線図を図 5.18 に示す。Mean Timer には 2 つの delay line が あり、それぞれの line の端に Input を設置する。1 つの LCELL を通過する度に AND を取ってお りそれぞれの delay line に対して 11 個の LCELL を配置し、11 × δt の coincidence window を確保 する事で FPGA での Mean Timer を可能にしている。但し、注意点として、coincidence window 以上の伝播時間差がある 2 つの入力信号では出力は 1 にならない。

Module Assignment

我々のグループで使用している TUL-8040 には APEX20K シリーズの FPGA が搭載されてお り、この FPGA には LAB の LAB である MegaLAB という単位で ESB が組み込まれている。そ のため、一つのモジュールの処理を一つの MegaLAB で行う場合と、二つの MegaLAB に分断化 して行う場合とでは数 n[sec] の時間差が生ずる。E05-115 では各検出器の信号をグループ化し、グ ルーピングトリガーを作成するためグループ化モジュールの propagation time を各検出器内で出 来る限り揃える事が望まれる。

Quartus2 では、作成したロジックが FPGA 内で作業される場所を GUI で確認できる (Floor plan view)。Floor plan view の説明を図 5.19 に載せる。色が付いている場所に作成・配置したロジックや I/O があり、この場所を変更する事でタイミング調整が可能になる。

図 5.20 が修正前の EHODO Layer1 回路の Floor plan view である。回路全体の処理は高速化 する様に最適化する為、幾つかのグループ化モジュールの処理が複数の MegaLAB に渡っている。 この為、出力信号までの伝播時間に差が現れてしまう(図 5.22)。

そこで、入力信号に必要な平行作業段階でのモジュールの作業 MegaLAB を指定し、MegaLAB interconnect 数を各グループ化モジュールで一律にした。また、モジュールを目的の I/O Bank と 同等の Raw interconnect 上に設置することによって、各信号におけるモジュール ~I/O 間の伝播



Floor plan view of TUL-8040

図 5.19: Floor plan viewの説明図。赤い枠が MegaLAB であり、縦 18 ×横4個存在する。MegaLAB 内には複数個のLAB が存在し(青い枠)、LAB 内には複数個のLE が存在する。Module Assignment は LE 単位で可能である。また、作成したロジックモジュールを MegaLAB 単位で配置すること も可能である。



図 5.20: Floorplan View(修正前)。回路上に平行動作が必要な OR モジュールが七つあるが、一 つのモジュールが分断化してしまっている。分断化してしまったモジュールとしていないモジュー ルが混在する事によって MagaLAB interconnect が増加し、ECL Input から Output までの時間 にポートごとにバラつきが生じてしまい散乱電子側のイベントトリガーを組むときに影響を及ぼ す可能性がある。



図 5.21: MegaLAB interconnect (修正前)。一つのモジュールによって表されたロジックを複数の MegaLAB で処理を行っているため、横軸の MegaLAB interconnect が 6~11 の所に一つの MegaLAB が存在している。コンパイラによって処理が分断化されたモジュールは、実験時にタイ ミングを揃える事が望ましいグループ化モジュールのため変更が必要である。



図 5.22: Time From Input To ECL Output (修正前)

時間の差を抑える事が出来た。図 5.23 に Assignment 変更後の Floorplan View (FPGA 内部の作業場所一覧図)を、図 5.24、5.25 に結果を示す。

			The Annual Control of	
-	-			
-			• I	
	-			
				
	-		-	
-			-	
-	-		- 1]
	-			
-			-	
-	•		-	
			-	
	•			
			•	
		}	-	
-			-	
	-		-	
	-		-	

図 5.23: Floorplan View (修正後)それぞれのモジュールを一つの MegaLAB に配置する事によって、各信号における伝播時間の差を抑えている。

HES Hodoscope Layer2

HES Hodoscope Layer1の処理と同様なので省略する。

HES Trigger

HES Hodoscope Layer1 と、HES Hodoscope Layer2のTULからの出力信号を入力信号とする。 また、TUL 誤作動時の事を考え NIM Input を 2 チャンネル設けておき、TUL のセレクタの下位 2 ビットによってトリガー論理を 4 通りに変更できるようになっている。セレクタによるトリガー 論理については表 5.4.3、トリガー回路図は図 5.26 参照。

また前章で記述したように入力信号をグループ化することによって、HESのトリガー信号に角度方向に制限を設ける。表 5.4.3 における grouping trigger に対応しており、トリガーロジックは表 5.4.4 に示す。



図 5.24: MegaLAB interconnect (修正後)修正前は存在した10~20の connect が無くなって いる。これは、あるモジュールにおける MegaLAB 数をそれぞれ一つに制限したため、各モジュー ルにおける MegaLAB interconnect が無くなったためである。この作業によって、それぞれの Input 信号が Output まで到達する時間差を抑える事が出来た。



図 5.25: Time From Input To ECL Output (修正後)

下位2ビット値	トリガー論理
00	hes ehodo 1 \otimes hes ehodo 2 grouping trigger
01	hes ehodo 1 \otimes hes ehodo 2
10	NIMI4 trigger
11	NIMI5 trigger

表 5.4.3: 散乱電子側におけるセレクタ下位 2 ビットによるトリガー論理



図 5.26: hes trigger 回路図。EHODO のグルーピングした信号を Input とする。さらにセレクタ によって、トリガーの構成を外部の NIM 入力信号か TUL かを選択可能にした。

表 5.4.4: HES Grouping trigger logic

EH1G1	\otimes	EH2G1 EH2G2
EH1G2	\otimes	EH2G1 EH2G2 EH2G3
EH1G3	\otimes	EH2G2 EH2G3 EH2G4
EH1G4	\otimes	EH2G3 EH2G4 EH2G5
EH1G5	\otimes	EH2G4 EH2G5 EH2G6
EH1G6	\otimes	$EH2G5 \mid EH2G6 \mid EH2G7$
EH1G7	\otimes	$EH2G6 \mid EH2G7$
さらに本実験では、Counting room まで信号を伝播する際に生じるタイミングのずれを考慮し なくてはならない。例えば、PMT からの信号のパルス幅を 40[nsec] に設定した場合、

 (パルス幅)-(信号間の Counting room までの伝播時間差)-(信号間の TUL 内部での伝 搬時間差)

を計算し、さらに安全ファクターを加えた上で慎重にクロック周波数を与える必要がある。

5.4.2 K⁺ 中間子側回路

この節では K⁺ 中間子側検出器のトリガーロジックを説明する。基本的な方針は前回実験に用いた回路と等しく、変更点はグルーピングロジックと、Lucite Counterの導入である。さらに E05-115 に向けて検出器毎に Module assignment を施す事によって、入力信号に対するタイミング調整を行う。

TOF Counter (TOF1X, TOF1Y)

HKSのTOF CounterはTOF1X、TOF2X、TOF1Yの3つ存在する。使用するTUL Module はTOF1X、TOF1Yで1台、TOF2Xで1台の計2台である。最初にTOF1X、TOF1Yで使用す る回路について説明する。図 5.27 が記述した回路図である。

TOF1X、TOF1Yを同一TUL Module にて扱うが、互いの信号が干渉することはなく、独立している。基本的な原理は HES 側の EHODO1、EHODO2 に用いた原理と等しく非同期で扱い、信号をグループ化する役割を担っている。只、セレクタを用いグループ化するロジックに幅を持たせることが可能である。また、グループ化した信号の他に全ての信号の OR ロジックを取った信号も出力している。

TOF Counter (TOF2X)

TOF1X、TOF1Y とほとんど同じ設計である。上下の PMT からの入力信号を Mean Timer に 介し、その出力を用いてグループ化している。グループ化のロジックはセレクタを用いて変化出 来る。回路図を 5.28 に示す。同様に、グループ化した信号の他に全ての信号の OR ロジックを取 り、出力している。detector 毎に全ての信号の OR を取り出力する事は TOF Counter に限っての ことではなく、WC、AC、LC についても同様の処理をする。

Aerogel cherencov Counter

AC1、AC2、AC3 の 3 Layer 全ての処理を 1 つの TUL Module にて行う。1 Layer の信号をグ ループ化する部分と、3 Layer を用いてトリガーを組む部分は TUL 内部クロックとの同期式であ る。また両端 PMT からの入力信号の AND を取るか OR を取るかをセレクタを用いる事で選択出 来るようにしている。回路図を図 5.29 に示す。

Water cherencov Counter

AC に用いた回路と原理はほぼ等しい。変更点は 3 Layer が WC1、WC2 の 2 Layer になってい る所である。



図 5.27: HKS TUL TOF1X and TOF1Y 回路図



図 5.28: HKS TUL TOF2X 回路図



図 5.29: HKS AC 回路図



図 5.30: HKS WC 回路図

Lucite cherencov Counter

次世代実験に向けて新設したカウンタであり、同時に FPGA 回路も新しく用意する必要がある。 Lucite cherencov Counter (LC) には 13segment 存在するため、TUL 内部で各信号をグループ化 している。図 5.31 に配線図を示す。





全体のトリガーロジックは全ての OR を取った信号と、グループ化の出力信号の OR を取った 信号を用意しており、グループ化の対象シンチレータの個数はセレクタによって変更できる様に した。入出力信号数は表 5.4.5 を参照 (dummy 信号は、OR ロジックのタイミング調整のために 使用した)。

HKS trigger

全ての検出器に対して、Layer 単位で全ての OR を取った出力が存在する。しかし、TUL ごとの interconnect 数の違いによって、Propagation time に差が生じてしまう。横軸に検出器 ID、縦軸に Propagation time を取ったグラフを 5.32 に示す。

Intput and Output Number	
Input	ECL 26ch + Reset 1[ch] + Dummy 1[ch]
Output	ECL 1ch + NIM $6[ch]$ + LED $4[ch]$

表 5.4.5: HKS LC 入出力信号一覧



図 5.32: HKS TUL propagation time 一覧

縦軸の値は全ての Channel の prppagation time の平均値であり、誤差棒は最小値と最大値を表示している。また、全ての信号は NIM 出力であり、入力信号(平均値の対象)は対応する検出器の信号である。実際は粒子の Time of flight や、Counting room までの配線等によって信号間でさらに伝播時間に差が生じてしまうが、TUL 内部での propagation time に最大 70[nsec] の伝搬時間 差があるため、外部で論理演算を行う際に注意が必要である。

第6章 まとめ

我々は過去二回 (e,e/K⁺) 反応を用いた Λ ハイパー核分光実験を米国ジェファーソン研究所にて 行った。

2000年に行った第一世代実験である E89-009 は、世界初の $(e,e/K^+)$ 反応を用いた Λ ハイパー核 分光実験であり、 $^{12}_{\Lambda}B$ の励起スペクトルで 750[keV](FWHM) というエネルギー分解能を達成し、 $(e,e/K^+)$ 反応が Λ ハイパー核分光に有効な手法であることを実証した。

しかし、第一世代実験では散乱電子側における大量のバックグラウンドにより十分なビーム強度 を使用出来ず統計が制限されたことや、K⁺ 中間子側のスペクトロメータが分解能を制限したこ と、などの問題点があった。

2005年に行った第二世代実験である E01-011 では、これらの問題を以下の二点の方法により改善 させた。一つ目は、散乱電子側のスペクトロメータをスプリッター出口鉛直方向に傾ける事 (tilt 法)によって、超前方に生じるバックグラウンドを避ける事で、より高いビーム強度での実験を可 能にした。二つ目は、(e,e/K⁺)反応に特化した K⁺ 中間子側のスペクトロメータを新設 (HKS) す る事で、より良い運動量分解能を実現した。

そして現在、我々は2009年開始予定の、第三世代実験であるE05-115の最終調整段階である。 この実験では、標的核の質量数領域を拡大する事を目的の一つとしており、標的として軽い核で は前回実験でも用いた⁶Li、¹²C、中重核領域では⁴⁰Ca、⁵²Crを新しく使用する予定である。 中重核領域では、さらに計数率の高いバックグラウンドが予想される。この問題に対処するべく、 我々はHKSに続いて散乱電子側スペクトロメータを新設し(HES)、それに伴いスプリッター磁石 も新設した。このスペクトロメータはアクセプタンスが非常に広く、今まで以上の収量を稼ぐこ とが可能となる。

また、より良い検出効率の実現のため、検出器群を改良した。散乱電子側ではトリガーカウンタ として使用するシンチレータホドスコープ(EHODO)を新設した。E01-011で用いたホドスコー プには以下の問題点があった。

- 実験中のシンチレーター本単位での取り外しが出来なかった
- X方向に敷き詰められたシンチレータの間を抜けるイベントがあった
- サポート設計・製作間の誤差により現物調整が必要になってしまった

これらの問題に対処するべく、サポートのデザインを一新した。以下に対処方法を記述する。

- ジグザグにシンチレータを配置し光電子増倍管の磁気シールドをシンチレータ単位に設け、
 一本単位での取り外しを可能にした
- シンチレータにオーバーラップを持たせる事で、間を抜けるイベントを無くした

● 誤差が累積するようなデザインを避けた

また、モンテカルロシミュレーションを行いサイズや配置を最適化する事で、シンチレーター 本辺りの計数率を調整し、シンチレータのジグザグ配置によるイベントロスを無くした。 現在、EHODOの製作は完了しており、米国ジェファーソン研究所にて性能確認をしている。 検出器の改良に応じて、実験のトリガー論理も新設しなければならない。我々の実験では、非常に 多くの検出器からの信号を処理する必要があるため、前回実験時に TUL-8040 を開発した。TUL-8040 には、FPGA が搭載されており、プログラミングによって製作した回路をダウンロードして 使用する事が出来る。

E05-115 時に向けた検出器の改良に応じて、トリガー論理を新設した。次世代実験では、散乱 電子側に数 MHz、K⁺ 中間子側に数 kHz のバックグラウンド計数率が予想される。よって、オン ライン段階でバックグラウンドとなるイベントを最小限に抑えたい。そのため、HES、HKS の検 出器群のトリガーロジックをそれぞれ、仮想光子起因電子の検出領域、K⁺ 中間子の検出領域に限 定する事で、余分なバックグラウンドをオンライン段階で排除する(グルーピング)。現在では、 グルーピングを用いたトリガー回路の作成は完了した。

Appendix

付録A LNS(原子核理学研究施設)検出器テ スト実験概要

最後に 2008 年春に東北大学付属核理学研究所で行った検出器のプロトタイプを用いた動作テスト実験の概要と結果を述べる。

A.1 実験目的

動作テスト実験に用いる検出器は、新設した HES 側のシンチレーションカウンタ(EHODO1、 EHODO2)のプロトタイプであり、1レイヤー5本を2レイヤーの合計10本のシンチレータを 用いた。より正確な時間分解能、TOF分解能の導出や、kHzオーダーの計数率のもと、TULで組 んだグルーピングロジックの動作確認を行い評価した。

また、同時に K^+ 中間子側のチェレンコフ検出器 (Water、AminoG sult)のテストも行った。 K^+ 中間子側の検出器を用いた動作テストの実験結果は論文を参照。

A.2 検出器セットアップ

検出器のセットアップを図 A.1 に示す。

A.3 Grouping 回路作成

表	A.3.1:	LNS テスト	·実験用	Grouping	logic –	·覧(F5、	B5 は統計が少ないため除	外)

Group 1	$(\ \mathrm{F1} \oplus \mathrm{F2} \oplus \mathrm{F3} \oplus \mathrm{F4} \) \otimes (\ \mathrm{B1} \oplus \mathrm{B2} \oplus \mathrm{B3} \oplus \mathrm{B4} \)$
Group 2	$(F1 \otimes B1) \oplus (F1 \otimes B2) ~ \textbf{~} (F4 \otimes B3) \oplus (F4 \otimes B4)$
Group 3	$(~\mathrm{F1}\oplus\mathrm{F2}~)\otimes(~\mathrm{B1}\oplus\mathrm{B2}~)$
Group 4	$(ext{ F3} \oplus ext{F4}) \otimes (ext{ B3} \oplus ext{B4})$
Group 5	$(ext{ F2} \oplus ext{F3}) \otimes (ext{ B2} \oplus ext{B3})$
Group 6	$($ F1 \otimes B4 $) \oplus ($ F4 \otimes B1 $)$
Group 7	$(ext{ F2} \otimes ext{B1}) \oplus (ext{ F3} \otimes ext{B2})$
Group 8	$(ext{ F2}\otimes ext{B3})\oplus (ext{ F3}\otimes ext{B4})$



図 A.1: 右側がビーム上流側でありテストする検出器をトリガーカウンタ(T1、T2 計 2 台)で挟 む。また、EHODO プロトタイプの間にドリフトチェンバー(DC1、DC2 計 2 台)を配置する事 でグルーピングロジックを評価する。

A.4 結果

A.4.1 時間分解能の導出

トリガーカウンタ2台を用いて時間分解能の導出を行った。対称のシンチレータは統計の多かった F2、F3、B2、B3の4台である。表 A.4.2 に TOF 時間分解能一覧を、表 A.4.3 にシンチレータ 単体の時間分解能一覧を示す。

TOF ID	Resolution [psec]	$\operatorname{error}(\sigma[\operatorname{psec}])$
T1+F2	116.80	0.88
T1+F3	135.42	1.46
T1+B2	112.03	0.97
T1+B3	125.45	1.49
T2+F2	116.29	0.99
T2+F3	124.64	1.27
T2+B2	109.02	1.07
T2+B3	117.31	1.65

表 A.4.2: TOF 時間分解能一覧



図 A.2: EHODO プロトタイプのセットアップ図

前節で述べた様に Layer 間にドリフトチェンバーを挟むように設置した。それぞれのシンチレー タのラベルは図を参照。

Schintilator ID	Resolution [psec]
F2	82.44
F3	100.75
B2	73.7
B3	89.22

表 A.4.3: 時間分解能一覧

A.4.2 グルーピングロジック評価

実験時にオンラインで Scaler 出力し TUL でのグルーピングをカウントした。このデータと、オ フライン解析によって導き出したグルーピングのカウントを比較し、オンラインでの Grouping efficiency を見積もった。Grouping efficiency はオンラインでの Scalar の値と、オフラインでのカ ウントの値との比で表わす。図 A.3 に結果を示す。



図 A.3: Grouping efficiency 見積もり。ほとんどのグルーピングロジックにおいて efficiency ~ 90[%] を達成したが、 ~ 100[%] は数チャンネルのみである。Bug check に用いた Grouping 6 では、特に efficiency が低い。

今回のテスト実験ではタイミング調整や FPGA のプログラミングによる問題により期待した efficiancy を達成できなかった。E05-115 に向けては、さらに厳しいタイミング調整や、より細か な FPGA に関する知識が必要になる。

付録B Quartus2使用方法

現在我々のグループでは、Quartus2というソフトウェアを用いて、論理回路プログラミング を行っている。Quartus2では、GUIを用いたBlock Diagram を作成することが出来る。よって、 セットアップさえ出来てしまえば、簡単なプログラムなら初心者でもすぐに作ることが可能であ る。また、GUIを用いているため、見る人や使う人が設計者と異なる場合でも理解しやすいのも 利点の一つである。

この章では、Quarus2のセットアップ、操作方法等を簡潔に述べる。

B.1 Quartus2

現在我々のグループではQuartus2 4.0、4.1、4.2 のライセンスを保持しており、それぞれの バージョンに対応したパラレルポート接続のプロダクトキー(ドングル)がある。Quartus2 はプ ロダクトキーをドライバが認識しなければ、Quartus2 が有する開発ツールのほぼ全てが使用でき ない。また、パラレル-USB 変換を用いて、USB 接続にしても開発ツールは動作しない。 次の節からは Quartus2 の操作方法を説明する。

B.2 新規プロジェクト作成

図 B.1 が Quartus2 の起動画面である。Quartus2 では作成した回路はプロジェクトによる階層 構造となっておりデバイスアサインメントや、その他の設定ファイルはプロジェクトを管理する ディレクトリに作られる。よって新たに回路を作成する場合は「新規ファイル作成」ではなく、

•「新規プロジェクト作成」 「ディレクトリ選択」 「デバイス選択」

と進み、新たにプロジェクトを作成する。また、TUL使用時のデバイス設定は表 B.2.1 に示す。

Family	APEX20KE
Device	EP20K300EQC240-1X
Package	PQFP
Pin count	240
Speed grade	1
Core voltage	1.8[V]

表 B.2.1: TUL-8010 のデバイス設定一覧



図 B.1: Quartus2 起動画面

B.3 Pin Assignment (ピン アサインメント)

Quartus2で回路を作成する際、例えば入力信号を定義した場合、その信号がデバイス上(TULの場合 APEX20KE)のどのピンに相当するのかを設定する必要がある。只、TULのI/Oに関する部分は完成されているため既存のピンアサインメントを作成したプロジェクトにインポートする事で使用環境を整える事が出来る。インポートの手順は、

• 「Assignment」 「Inport assignment」 「***.qsf」ファイル選択

と進み、既存のピン アサインメントをインポートする。インポートが成功した場合、図 B.2 の様 に入力、出力信号使用時に使うラベルが、ピン番号と対応する。

B.4 シミュレーション

シミュレーションを行うには作成した回路への入力信号や出力信号を自分で定義する必要がある。

• 「新規ファイル作成」 「タブ移動」 「Vector Waveform file」

によって「Vector Waveform file」を作成する(図B.3参照)。

作成した「Vector Waveform file」の設定画面が表示されるが、作成した段階ではノードが読み 込まれていないため、

• 「Node」を右クリック 「Node fineder」 「ALL」

Assign Pin	8					X
Select a de Floorplan E You must p	Select a device pin and the type of assignment you wish to make. You can also make pin assignments in the Assignment Editor and the Floorplan Editor. You can reserve unused pins on a device-wide basis with the Unused Pins tab in the Device & Pin Options dialog box. You must perform a smart compilation on the design before routing SignalProbe signals.					
Available <u>P</u>	ins & Existing Assignme	nts:				
Number:	Name:	I/O Ban I/O Standard:	Туре:	SignalProbe Source Name	Enabled Status	Clo R 🔨
2	EOLO0	3 LVTTL	Row I/O, LVDSRX16p		Off	
3	ECLO1 ECLO2	3 LVTTL	Row I/O, LVDSRX16n Row I/O, LVDSRX15n		Off	
7	ECLO3	3 LVTTL	Row I/O, LVDSRX13n		Off	
8	ECLO4 ECLO5	3 LVIIL 9 IV/TTI	Row I/O, LVDSRXTTp Row I/O LVDSRXTDp		0#	~
<						>
∏ <u>S</u> how 'nd	o connect' pins		☐ S <u>h</u> ow	current and potential SignalP	robe pins	
Assignme	nt					
Pin <u>n</u> ame	ECLO0		SignalPr	obe source:		
			Sign	a <u>l</u> Probe enable		
I/U stand	ard: LVIIL		Clock:			
<u> ∏</u> eser	ve pin (even if it does r	not exist in the design file):				
Asi	nput tri-stated		▼ <u>R</u> egister	'S:		
		Change	Delete Ena	ble All SignalProbe Routing	Disa <u>b</u> le All SignalPr	obe Routing
					ОК	Cancel

 \blacksquare B.2: Quartus
2 Pin Assignment

New	×
Device Design Files Software Files Other Files	1
AHDL Include File Block Symbol File Chain Description File Hexadecimal (Intel-Format) File Memory Initialization File SignalTap II File Tcl Script File	
Vector Waveform File	
OK Cancel	

図 B.3: Quartus2 シミュレーションファイル作成

を選択し作成した回路に用いる信号を定義する。最後に入力信号ごとに波形を手動で入力し、シ ミュレータを走らせる。シミュレータを走らせた結果は図 B.4 の様になり、回路のロジックに応 じて出力信号が表示される。また、シミュレータで認識できる伝播遅延は設定したデバイスアサ インメントに依存するソフトウェア上の伝播遅延であり、実際ハードウェア上でも数 n[sec] の伝 播遅延は生ずため、厳しいタイミング調整が必要な場合は注意がいる。

Ne	w	
ſ	Device Design Files Software File: AHDL Include File Block Symbol File Chain Description File Hexadecimal (Intel-Format) File Memory Initialization File SignalTap II File Tcl Script File Text File Vector Waveform File	3 Other Files
		OK Cancel

図 B.4: Quartus2 シミュレーションファイル作成

B.5 ダウンロード

作成した回路のコンパイルが上手くいけば、プロジェクトが管理されているディレクトリにダウンロードファイル(***.sof、***.pof)が生成される。TULには記憶領域が二系統存在し、一つが電気に対して揮発性な RAM 領域、もう一つが電気に対して不揮発性な ROM 領域である。例によって ROM 領域には回数制限が存在するため、テストなどで TUL を使う場合は RAM にダウンロードして使用するのが望ましい。ダウンロードする際は、

•「Tools」「Programmer」「***.sof、***.pof を選択」 「Start」

と進む。ROM に書き込む場合は規格が「EPC8」となっていないとダウンロード出来ない。

B.6 データの圧縮方法

一つのプロジェクトを新規作成した場合ワークディレクトリには大量のファイルが出力される。 そのため、使わなくなったプロジェクトはアーカイブとして保存しておく事が望ましい。この節 ではプロジェクトの圧縮方法について説明する。Quartus2のトップ画面から、

B.6. データの圧縮方法



図 B.5: Quartus2 プロジェクト圧縮方法

• 「Project」 「Archive Project」 プロジェクト選択(図 B.5 参照)

以上の操作で選択したプロジェクトを圧縮し保存出来る。解凍する場合も同様に、

• 「Project」 「Restore Archive Project」 アーカイブ選択

の操作で解凍できる。

B.6.1 Module Assignment

コンパイルによって作成した回路の処理時間は最適化される。しかし、モジュールごとのタイ ミング調整が必要な場合、各モジュールの作業場所を設定しなければならない。Quartus2では

• Report Compilation report Fitter Floor plan view

で、作成したロジックが FPGA 内で作業される場所を GUI で確認できる(但しコンパイルが必要)。Floor plan view の説明を図 5.19 に載せる(各用語は本論文の5章を参考すること)。色が付いている場所に作成・配置したロジックや I/O があり、この場所を変更する事でタイミング調整が可能になる。

我々のグループで使用している TUL-8040 には APEX20K シリーズの FPGA が搭載されてお り、この FPGA には LAB の LAB である MegaLAB という単位で ESB が組み込まれている。そ のため、一つのモジュールの処理を一つの MegaLAB で行う場合と、二つの MegaLAB に分断化 して行う場合とでは数 n[sec] の時間差が生ずる。E05-115 では各検出器の信号をグループ化し、グ ルーピングトリガーを作成するためグループ化モジュールの propagation time を各検出器内で出 来る限り揃える事が望まれる。

よって本論文中では検出器毎にグループ化モジュールの propagation time の調整のために Module Assignment を行っている。まだまだ良く分からない所が多いので各自色々使ってみて検証してく ださい。

B.7 使用上の注意点

B.7.1 Hold time and Set Up time



 \boxtimes B.6: Holdtime and SetUp time[13]

同期式フリップフロップには「CLK」の立ち上がりで「D」などの入力信号が変化してはいけない時間がある(「Q」の値が保障できない)。このクロック立ち上がり前の変化してはいけない時間を「セットアップタイム (t_{su} : setup time)」、うしろを「 ホールドタイム (t_h : hold time)」という。(図 B.6 参照)これらの time violation は Quartus2 のシミュレーションツールを用いて、確認出来る。図 B.7 に、確認のために作成した回路図を示す。



図 B.7: Time violation 確認のための回路

作成した回路に対してシミュレーションを行った。図 B.8 に入出力の結果を示す。TUL 内部クロックの周波数は~250[MHz] を用いる。

シミュレーション結果を見ると、Hold time による Time violation が観測出来る。黒いラインが 設定した Pulse であり、赤いラインがシミュレーションの結果出力である。NIM Output の出力 信号の立ち上がりに不確定信号が見られるが、カウンタによって Output の Pulse width をクロッ ク周波数のカウンタ倍しているため、Setup time による Time violation が見られたクロック立ち 上がりの、次のクロック立ち上がりでは Time violation は見られない。

B.8. Verilog-HDL による回路記述



図 B.8: シミュレーション結果

B.8 Verilog-HDL による回路記述

E05115 における HES、HKS の trigger logic は Verilog-HDL よって記述してある。順次回路や selector を用いた回路では Verilog-HDL にて記述したほうが容易であり理解しやすい場合が多い。 以下に HES の trigger logic の記述部を示す。

基本構成は宣言部と動作部からなり、宣言部で扱う入出力信号やレジスタの宣言をする。HES の trigger logic は TUL 内部 clock との同期式であり、動作部は順次回路となっている。宣言部から説明を始める。

- Module 宣言部 A30 (30 行目): ここで module 宣言を行う。定義する module 名はファイル名 と別にしても問題は無いが、生成されるシンボルファイル名はファイル名ではなく、ここで 宣言した module 名になるため注意が必要。引数には入力信号、出力信号の一覧を記述する。
- 入出力信号宣言部 A38:入出力信号の宣言を行う。それぞれの変数の型については図 B.9 を参照。ここで、output で定義した出力信号をレジスタ宣言している。一般的に、if 文や for 文 等を用いた組み合わせ回路や、フリップフロップ等の順次回路を記述した場合に演算結果を 保持するために使用される。
- wire 宣言 A58: Sel とはセレクタの値を保持するための変数であり、この変数を wire 型として 定義している。wire 型はネット型の一つであり、簡潔に説明すると wire 定義した変数は配 線の役割を担っている。つまり、2bit で定義した Sel という変数は 2 本の配線の結合の有無 を表しており、セレクタの下位 2bit によって trigger logic を選択している。通常、明示的に 宣言していない変数は、wire 型と定義される。

```
30 module trigger select
31 (
       // {{ALTERA ARGS BEGIN}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
32
       EH1G1, EH1G2, EH1G3, EH1G4, EH1G5, EH1G6, EH1G7, EH1,
       EH2G1, EH2G2, EH2G3, EH2G4, EH2G5, EH2G6, EH2G7, EH2,
34
       clk, reset, sel0, sel1, out1, out2
36
       // {{ALTERA_ARGS_END}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
37 );
38 // Port Declaration
39 parameter INACTIVE
                           = 1'b0;
40 parameter ACTIVE
                           = 1'b1;
41 parameter MAXCOUNTER
                          = 9;
42 parameter COUNTERBITS
                          = 4;
43 parameter MINCOUNTER
                          = 4'b0;
44
       // {{ALTERA_IO_BEGIN}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
45
       input EH1G1, EH1G2, EH1G3, EH1G4, EH1G5, EH1G6, EH1G7, EH1,
46
             EH2G1, EH2G2, EH2G3, EH2G4, EH2G5, EH2G6, EH2G7, EH2;
47
       input clk;
48
       input reset;
49
       input sel0;
50
       input sel1;
51
       output out1;
52
       output out2;
53
       // {{ALTERA_IO_END}} DO NOT REMOVE THIS LINE!
54
      reg out1 , status;
55
      reg [COUNTERBITS-1:0] counter;
56
      reg logic;
57
58
       wire [1:0] Sel;
       assign Sel = { sel0 , sel1 };
```

図 B.9: HES trigger logic 宣言部

```
61
        always 0( posedge clk or negedge reset ) begin
            if( ~reset ) begin
 63
                 logic
                        <= INACTIVE;
 64
                out1
                        <= INACTIVE;
65
                counter <= MINCOUNTER;
66
            end
67
            else begin
                case( Sel )
68
69
                2'b00 :
                             logic
                                      <= (EH1G1 & (EH2G1 | EH2G2)) |
                                          (EH1G2 & (EH2G1 | EH2G2 | EH2G3)) |
71
                                          (EH1G3 & (EH2G2 | EH2G3 | EH2G4) ) |
                                          (EH1G4 & (EH2G3 | EH2G4 | EH2G5) ) |
                                          (EH1G5 & (EH2G4 | EH2G5 | EH2G6) ) |
74
                                          (EH1G6 & (EH2G5|EH2G6|EH2G7))|
75
                                          (EH1G7 & (EH2G6|EH2G7));
76
                2'b01
                       :
                             logic
                                      <= EH1 & EH2;
                                          INACTIVE;
77
                2'b10
                                      <=
                       :
                             logic
                             logic
                2'b11
                         :
                                      <= ACTIVE;
79
                endcase
81
                if ( counter >= MAXCOUNTER ) begin
                            <= INACTIVE;
                     out1
                     counter <= MINCOUNTER;
84
                end
85
                else if( counter != MINCOUNTER ) begin
86
                     counter <= counter + 1;
                end
                else if ( logic & ~status ) begin
                     counter <= counter + 1;</pre>
                     out1
                             <= ACTIVE;
91
                end
92
                else begin
                    out1
                             <= INACTIVE;
94
                end
95
                status <= logic;
            end
        end
        assign out2 = out1;
100 endmodule
```

図 B.10: HES trigger logic 動作部(順次回路)

動作部: always 文は記述した条件が1になると、以下の動作を実行する。条件式は clock の立ち 上がり、又は Reset 信号の立ち下りである。初期状態が全て INACTIVE (0) だと仮定した 場合、clock の立ち上がりにて logic が1になった時に初めて output が ACTIVE (1) にな る。それと同時に counter の値が1つ増え、その後 status に logic の値である1が書き込ま れる。そのため次の clock 立ち上がりでは、

```
else if(counter!=MINCOUNTER) begin
```

の条件が満たされ counter の値が 1 つ増える。この条件を繰り返し counter の値が MAX-COUNTER と等しくなった際の、次の clock 立ち上がりにて、

else if(counter;=MAXCOUNTER) begin

の条件に引っ掛かり、output と counter の値が初期化される。よって、counter の値によって出力信号のパルス幅の調整が可能となる。



図 B.11: HES trigger logic 配線図

参考までに、Verilog-HDL によって記述した HES trigger logic の配線図を図 B.11 に示す。記述 した方と比べると非常に複雑であり、分かり難い。

参考文献

- [1] L.Yan et al. Phys.Rev.C 73(2006) 044607
- [2] L.Yuan, M.Saraour, T.Miyoshi, et al. Hypernuclear spectroscopy using the (e,e'K⁺) reaction. Physical Review C, Vol.64, No.4, p.44302, 2001
- [3] 岡安雄一、Spectroscopic study of light Lambda hypernuclei via the (e,e'K⁺) reaction、博 士論文 東北大学 (2008)
- [4] 川間大介、電子ビームによる次世代ラムダハイパー核分光実験用高分解能散乱電子スペクト ロメータの研究、修士論文 東北大学(2007)
- [5] 野村洋、(e,e'K⁺)反応による Λ ハイパー核分光用高分解能 K 中間子スペクトロメータの研究、 修士論文 東北大学(2003)
- [6] 河合正晴、(e,e'K) 反応を用いた次世代ラムダハイパー核分光実験のための K 中間子検出器の 開発、修士論文 東北大学(2008)
- [7] P.Bydzovsky, Photo- and electro-production of medium mass hypernuclei (2008)
- [8] O.Hashimoto, H.Tamura, Progress in Particle and Nuclear Physics Volume 57, Issue 2, October 2006, Pages 564-653
- [9] C.E.Hyde Wright et al., Proc. 1985 CEBAF Summer Workshop
- [10] M. Sotona, S. Furullani, Progr. Theoret. Phys. Suppl. 117 (1994) 151.
- [11] R.Bradford et al. Differential Cross Sections for $\gamma + p \rightarrow K^+ + Y$ for Λ and Σ^0 Hyperons. Physical Review C,Vol.73,p.035292,2006
- [12] O.Hasimoto, L.Tange, J.Reinhold, S.N.Nakamura, et al. Jlab PAC-33 proposal, January 16,2008
- [13] ディジタル回路と Verilog-HDL (技術評論社)
- [14] Y.S. Tsai. Pair production and bremsstrahlung of charged leptons. Reviews of Modern Physics, Vol. 46, No. 4, pp. 815?851, 1974.
- [15] L. Yuan, M. Sarsour, T. Miyoshi, Hypernuclear spectroscopy using the (e, e'K⁺) reaction, Physical Review C, Vol.73,044607(2006)
- [16] ALTERA, APEX20K Programmable Logic Device Family Data Sheet