

# 逆輸送行列を用いたデータ解析における 系統誤差の見積もり方法

東北大学理学部 物理学科

藤田真奈美

平成 26 年

## 概要

$(e, e'K)$  反応を用いたハイパー核分光実験 E05-115 実験では  $\Lambda, \Sigma^0, {}^7_{\Lambda}\text{He}, {}^9_{\Lambda}\text{Li}, {}^{10}_{\Lambda}\text{Be}, {}^{12}_{\Lambda}\text{B}, {}^{52}_{\Lambda}\text{V}$  のハイパー核が測定された。これら生成したハイパー核のミッシングマスを求めるため検出面における検出器の情報から標的位置における粒子の情報を求める必要がある。この際、各磁石の光学的性質を使い標的位置における運動量へ変換する。この時逆輸送行列を用いて標的位置での粒子の情報を計算するが、TOSCA と Geant4 シミュレーションを用いて求めた逆輸送行列では、磁気スペクトロメーターの運動量分解能  $\delta p/p \sim 10^{-4}$  を再現するまでの精度が無い。よって逆輸送行列を最適化する必要がある。この最適化を行なうコード自身の系統誤差を見積もるのがこの論文の主題である。今回、3種類の初期逆輸送行列を最適化した結果、再計算した  $\Lambda, \Sigma$  のミッシングマスは 100keV 程度、 ${}^{12}_{\Lambda}\text{B}$  のミッシングマスは 200keV 程度の精度で真の値を再現する事がわかった。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>2</b>
1.1	ハイパー核研究の意義	2
1.2	ハイパー核生成のメカニズム	2
1.3	目的	4
<b>2</b>	<b>E05-115 実験</b>	<b>4</b>
2.1	CEBAF 加速器	4
2.2	$(e, e'K^+)$ 実験コンセプト	5
2.3	$(e, e'K^+)$ 実験セットアップ	6
<b>3</b>	<b>ミッシングマスの系統誤差の見積もり</b>	<b>7</b>
3.1	ミッシングマスの導出	7
3.2	最適化の方法	8
3.3	逆輸送行列の最適化の過程	8
3.4	疑似データを用いた系統誤差の見積もり	9
3.5	本研究のサンプル	11
<b>4</b>	<b>考察と結論</b>	<b>15</b>
4.1	考察	15
4.2	結論	17

# 1 はじめに

## 1.1 ハイパー核研究の意義

クォーク3つから構成されるバリオンのうち、通常核と言われる陽子、中性子はuクォーク、dクォークから構成される。それに対しsクォークを含んだバリオンをハイペロンという。このハイペロンを含んだハイパー核の研究には大きく2つの意義がある。1つは原子核を束縛している核力、即ち核子相互作用をバリオン間相互作用へと拡張し、より高いレベルで研究出来る事である。2つ目は 粒子は原子核中の核子からのパウリの排他律の制約を受けないので原子核深部のプローブとなり、原子核深部の情報を引き出すことができる事である。

## 1.2 ハイパー核生成のメカニズム

ハイパー核を生成する方法としては、ストレンジネスを持った粒子を原子核に打ち込んでクォーク交換反応を起こすという反応が考えられる。例えば  $(K^-, \pi^-)$  反応はそのようにしてハイパー核を生成している。または、核内でストレンジネスを生成するという方法も可能である。

今までの実験で主に使われてきた反応には  $(e, e'K^+)$  と  $(\mu^+, K^+)$ 、 $(K^-, \mu^-)$  反応の3種類がある。ここでは特に、3種類の反応のうち我々の実験で用いる  $(e, e'K^+)$  反応のメカニズムと特徴について述べる。

$(e, e'K^+)$  反応とは、図1のような反応である。入射電子 ( $e$ ) は仮想光子 ( $\gamma^*$ ) を介して電磁相互作用で陽子と反応して散乱され ( $e'$ )、仮想光子と反応した陽子からはK中間子 ( $K^+$ ) とハイパー核が生成されるという反応である。

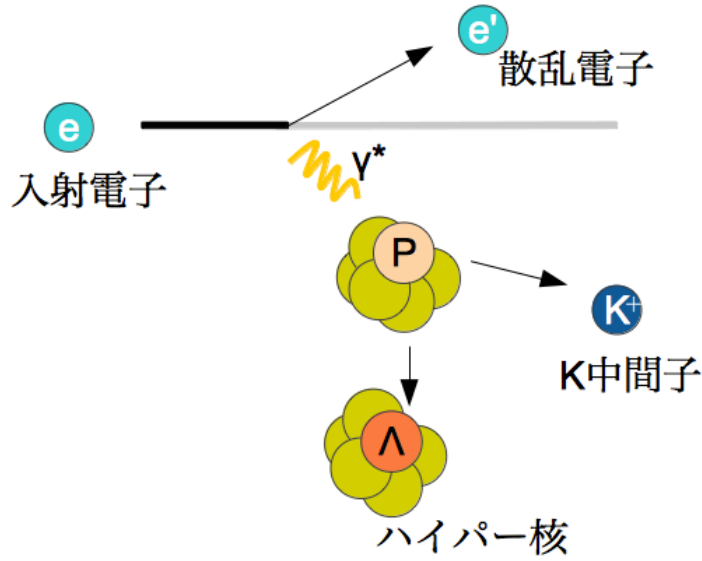


図 1:  $(e, e' K^+)$  反応の概略図

3 種類のハイパー核生成反応の特徴として典型的な例を表 1 に示す。 $(K^-, \pi^-)$  反応には in-flight( $K^-, \pi^-$ ) と stopped( $K^-, \pi^-$ ) の 2 種類ある。停止した状態の K 中間子が原子核に捕獲され、原子核表面の核子と反応するのが stopped( $K^-, \pi^-$ ) 反応であり、K 中間子が運動中に反応するのが in-flight( $K^-, \pi^-$ ) 反応である。

反応	反応の型	生成断面積 [ $\mu b/sr$ ]	ビーム運動量 [GeV/c]	の反跳運動量 [MeV/c]	のスピンの
in-flight ( $K^-, \pi^-$ )	$n \rightarrow \Lambda$	$10^3$	0.8	$q < 100$	nonflip
Stopped ( $K^-, \pi^-$ )	$n \rightarrow \Lambda$	$10^2$	0	$q = 250$	nonflip
$(\pi, K^+)$	$n \rightarrow \Lambda$	10	1.0	$q > 300$	nonflip
$(e, e' K^+)$	$p \rightarrow \Lambda$	$10^{-1}$	1.5	$q > 300$	flip/nonflip

表 1: ハイパー核生成反応典型例比較

まず  $(\pi^+, K^+)$ ,  $(K^-, \pi^-)$  反応では中性子を  $\Lambda$  に変換するのに対し、 $(e, e' K^+)$  反応では陽子を変換するので  $(\pi^+, K^+)$ ,  $(K^-, \pi^-)$  反応で生成されるハイパー核と鏡像関係にあるハイパー核を生成できる。さらに  $\Lambda$  粒子の質量は PDG によると  $1115.685 \pm 0.006 \text{ MeV}$  とわかっているのでこの値を用いて、さらにエネルギー絶対値の校正が行える。このエネルギー絶対値校正の精度を求めるのが、本研究のテーマである。 $(\pi^+, K^+)$ ,  $(K^-, \pi^-)$  は spin0 の粒子、パイ中間子・K 中間子を介して起こり、ハイパー核は前方で主に non-spin-flip 状態であるのに対し、spin1 の仮想光子を介して起こる  $(e, e' K)$  ではハイパー核の spin-flip 状態と non-spin-flip 状態の生成断面積は同程度である。 $(e, e' K^+)$ ,  $(\pi^+, K^+)$  反応は  $(K^-, \pi^-)$

反応に比べ運動量移行が大きく、軌道角運動量を大きく変化させる事が出来るので深い束縛状態を励起する事が出来る。

そして実験では  $(\pi^+, K^+)$ ,  $(K^-, \pi^-)$  では二次ビームを使うので、これまでに達成されたエネルギー分解能は 1.5 ~ 2MeV であるのに対し、 $(e, e'K^+)$  は 1 次ビームを使うので、ビームインテンシティが高く、2.1 章にも書いてあるように標的の厚さを薄くできるので標的中でのエネルギー損失を抑えることが出来る。このため、500keV(FWHM) という高いエネルギー分解能を達成する事が期待できる。

以上述べた  $(e, e'K^+)$  反応を用いたハイパー核分光実験が、米国ジェファーソン研究所でこれまでに 3 度行われた。そのうち 3 度目の実験、2009 年に行われた E05-115 実験でも非常に高分解能のミッシングマススペクトラムが得られた。

### 1.3 目的

E05-115 実験で得られたスペクトラムにつける解析コード自身に起因する系統誤差を、疑似データを用いて見積もることがこの研究の目的である。

## 2 E05-115 実験

### 2.1 CEBAF 加速器

$(e, e'K^+)$  実験を行うためには次のような事が要求される。

- ビームエネルギーが 粒子、K 中間子生成の閾値以上である事。  
この閾値というのは光子エネルギーで言うと約 900MeV、系全体のエネルギー  $W$  で言うと 1.6GeV 以上が、 $\Lambda, \Sigma^0$  生成には必要である。
- duty factor が高い。  
実験ではあまり強すぎるビームを当てるとバックグラウンドが増大してしまう。特にこの実験は散乱電子と K 中間子の同時計測実験であるので、アクシデンタルコインシデンスが特に問題となる。全体のバックグラウンドは両サイドの掛け合わせとなり、

$$BG_{total} = BG_{HES} \times BG_{HKS} \quad (1)$$

と書ける。

この式からわかるように、例えば各スペクトロメーター側のバックグラウンドが 10 倍になると全体のバックグラウンドは 100 倍になる。そこで、バックグラウンドが増大しすぎないような強さのビームを継続的に当てる必要があり、よって duty factor が高い事が要求される。

- ビーム強度が高い。  
表 1 にもあるように  $(e, e'K^+)$  反応の生成断面積は、 $(\pi^+, K^+)$ ,  $(K^-, \pi^-)$  反応に比べ 2 ~ 4 桁ほど小さい。 $(\pi^-, K^-)$ ,  $(K^+, \pi^+)$  反応は強い相互作用で生じる反応であるの

に対し、 $(e, e'K^+)$  は電磁相互作用であるので  $(e, e'K^+)$  の生成断面積は 2~4 桁程小さい。よって収量を稼ぐために強度の高いビームを当てて、多く反応を起こす必要がある。また、ビーム強度が高いと標的厚を薄くできるので標的中でのエネルギー損失や多重散乱の効果を減らし、精度の高い実験が可能になるという利点もある。

以上の要求を満たす米国ジェファーソン研究所にある CEBAF 加速器を用いて我々のグループは実験を行った。CEBAF 加速器は図 2 のように 2 本のライナックで 0.6GeV ずつ加速し、最大ビームエネルギーは 6 GeV となる。CEBAF の主な性能は表 2 のとおりである。

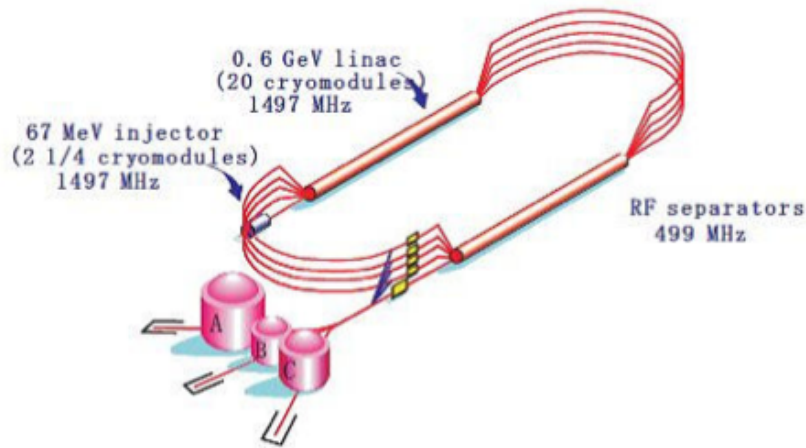


図 2: CEBAF 加速器の概略図 [8]

最大ビームエネルギー	6GeV
最大ビーム強度	200 $\mu$ A/Hall
ビームエミッタンス	2 $\mu$ m $\cdot$ mrad
ビームエネルギーの広がり	$\leq 1 \times 10^{-4}$ (FWHM)
ビームバンチ間隔	2ns (499MHz)

表 2: CEBAF の主な性能

## 2.2 $(e, e'K^+)$ 実験コンセプト

実験で我々が求めたいのはハイパー核のミッシングマスである。ミッシングマスはこのように書ける。

$$M_{HYP}^2 = (E_e + M_{target} - E_{e'} - E_K)^2 - (\vec{p}_e - \vec{p}_{e'} - \vec{p}_K)^2 \quad (2)$$

このうち表2にもあったようにビームの運動量 ( $P_e$ ) は、CEBAF 加速器が  $\delta p/p \sim 1 \times 10^{-4}$  以下の不確定さで供給する為、既知の電子質量を用いてビームエネルギー ( $E_e$ ) も十分な精度でわかる。標的の質量は十分な精度で測定されているので、散乱電子と K 中間子の運動量を測定すればミッシングマスが求まる。よってこれらを測定したいが、 $(e, e'K^+)$  反応では散乱電子も K 中間子も前方に集中して出る。2つのスペクトロメーターを出来るだけ前方に設置しようとする物理的に干渉するので、スプリッターマグネットと呼ばれる双極子磁石をおいて荷電粒子を正負の方向に分離し、それぞれ K 中間子検出器、散乱電子検出器で測定する。E05-115 実験ではこの K 中間子検出器に HKS、散乱電子検出器に HES という磁気スペクトロメーターを用いた。

### 2.3 $(e, e'K^+)$ 実験セットアップ

我々のグループは2009年にJLabにおいてE05-115実験を行った。測定したのは、 $\Lambda, \Sigma^0, {}^7_\Lambda\text{He}, {}^9_\Lambda\text{Li}, {}^{10}_\Lambda\text{Be}, {}^{12}_\Lambda\text{B}, {}^{52}_\Lambda\text{V}$  である。

図3のようにCEBAFからの2.3GeVの電子ビームが標的内で $(e, e'K^+)$ 反応を起こし、散乱電子とK中間子はスプリッターマグネットで分けられ、それぞれHES,HKSの検出面Reference Plane(RP)で測定される。HES,HKSは $10^{-4}$ という高い運動量分解能を持った磁気スペクトロメーターである。表3にHES,HKSのパラメーターを記したHES,HKSはどちらも2つのクワドロポールマグネット(Q)と1つのダイポールマグネット(D)で構成されている。Qマグネットはビームを収束させるために用いられ、Dマグネットは粒子を運動量毎に分けるために用いられる。

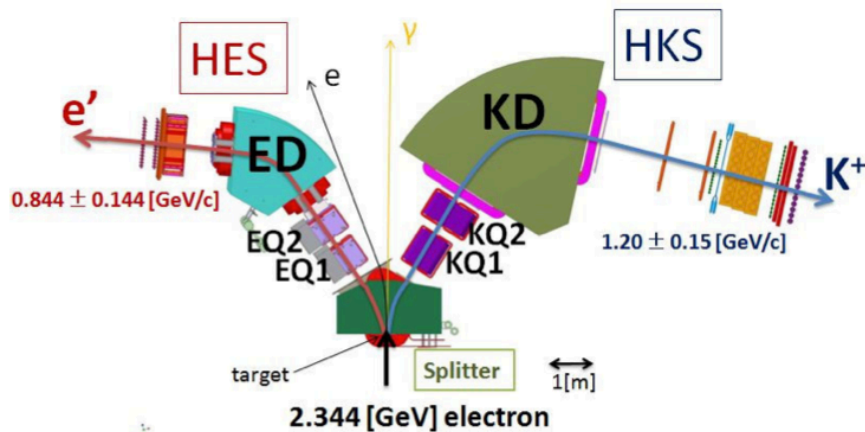


図 3: E05-115 実験セットアップ [4]

	HKS	HES
構成	Q-Q-D	Q-Q-D
中心運動量	1.2[GeV/c]	0.844[GeV/c]
運動量分解能	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
立体角	11msr	8msr

表 3: 磁気スペクトロメーターのパラメータ

### 3 ミッシングマスの系統誤差の見積もり

#### 3.1 ミッシングマスの導出

我々が欲しいのは標的におけるミッシングマスだが、実際の測定はRPで行うので、ここでの粒子の位置角度情報を標的における角度・運動量情報に変換する事を考える。方法は色々あるが、我々は各磁石の光学的性質を使って標的における運動量を求める、逆輸送行列を用いる方法を採用している。他に代表的な方法としては Runge Kutta 法により運動方程式を逐次的に解く方法がある。

標的における散乱電子とK中間子の位置・角度・運動量の情報(下付き文字T)とRPにおける位置・角度・運動量の情報(下付き文字RP)の関係は最低次では1次の項のみで以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} x_{RP} \\ x'_{RP} \\ y_{RP} \\ y'_{RP} \\ p \end{pmatrix} = M_0 \begin{pmatrix} x_T \\ x'_T \\ y_T \\ y'_T \\ p \end{pmatrix}$$

この  $M_0$  を輸送行列と呼び、両辺に輸送行列の逆行列をかける事で標的における情報が引き出せる。

$$\begin{pmatrix} x_T \\ x'_T \\ y_T \\ y'_T \\ p \end{pmatrix} = M_0^{-1} \begin{pmatrix} x_{RP} \\ x'_{RP} \\ y_{RP} \\ y'_{RP} \\ p \end{pmatrix}$$

このときの  $M_0^{-1}$  を逆輸送行列と呼ぶ。ミッシングマスを計算する為に必要な標的における角度・運動量情報を引き出す為には、この逆輸送行列を求める必要がある。ただし、RPの各成分を標的における成分の1次式で表しただけでは精度が不足するため、実際の逆輸送行列はこれらの多項式で表される。例えば、標的におけるx方向の角度情報は

$$x'_T = \sum_{a+b+c+d=0}^n C_x(a, b, c, d) (x_{RP})^a (x'_{RP})^b (y_{RP})^c (y'_{RP})^d$$

のように書ける。我々が現在用いている逆輸送行列はスペクトロメーターの運動量分解能  $\delta p/p \sim 10^{-4}$  を再現するために6次(n=6)まで計算をしている。実験においてはRPでの



運動量の測定は行えないので、上式の右辺に運動量の項は無い。さらに、電子ビームのサイズがとても小さい（標的付近で  $100\mu m$  程度）ので  $x_t, y_t$  は 0 と仮定出来る。

逆輸送行列は三次元磁場計算ソフト TOSCA と Geant4 でのモンテカルロシミュレーションによって求める。しかし、この TOSCA 計算や Geant4 は現実を完全に再現できていないので、初期逆輸送行列は不完全で  $10^{-4}$  の精度を達成する事は出来ない。よって逆輸送行列がより現実の磁場などを再現出来るように修正する、すなわち行列を最適化する必要がある。

### 3.2 最適化の方法

行列の最適化は式 (2) に定義した  $\chi^2$  を最小にするように行列要素を求める。

$$\chi^2 = \chi^2(\Lambda) + \chi^2(\Sigma^0) + \chi^2({}^{12}B_{g.s.}) \quad (3)$$

$$\chi^2(\Lambda) = \frac{\omega_\Lambda}{N_\Lambda} \sum_{i=0}^{N_\Lambda} \left( \frac{M_\Lambda^i - M_\Lambda}{\sigma_\Lambda} \right)^2 \quad (4)$$

$$\chi^2(\Sigma^0) = \frac{\omega_{\Sigma^0}}{N_{\Sigma^0}} \sum_{j=0}^{N_{\Sigma^0}} \left( \frac{M_{\Sigma^0}^j - M_{\Sigma^0}}{\sigma_{\Sigma^0}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\chi^2(H) = \frac{\omega_H}{N_H} \sum_{i=0}^{N_H} \left( \frac{M_H^i - M_H}{\sigma_H} \right)^2 \quad (6)$$

例えば  $\chi^2(\Lambda)$  は式 (3) のように、イベント毎に再計算したミッシングマスと PDG の値の差を期待される質量分解能で割り、重みをかけて、イベント数で割る。これを最小にするので、スペクトラムの中心値が PDG 値に収束するような計算を行っている。全体の  $\chi^2$  は、最適化の指標として入れるスペクトラムの各  $\chi^2$  の和をとり式 (2) のように書く。指標として  ${}^{12}B_{g.s.}$  が入っているのは、過去の実験によって  ${}^{12}B_{g.s.}$  の  $B_\Lambda$  が  $11.37 \pm 0.06 \text{ MeV}$  とわかっているからである [1]。ただし、 ${}^{12}B_{g.s.}$  の質量自体が求める物理量であるため、中心値はフィットにより決定し、この値に収束する事を要求していない。ただし、過去の実験結果より大きく外れた値に収束しないように、このフィッティング領域に制約をかけている。

### 3.3 逆輸送行列の最適化の過程

RP (reference plane) での同時計測散乱電子と K 中間子の位置・角度情報を用いて逆輸送行列を最適化する手順を以下に記す。

#### 1. イベントの選定

最初の LOOP では初期逆輸送行列を用いてミッシングマスを計算し、その 1 内に入るイベントのみを選別し、以下の計算を行う。

2. ミッシングマスの計算  
逆輸送行列を用いて計算した標的における運動量と角度の情報を用いてミッシングマスを計算する。
3. 逆輸送行列の最適化  
3で計算したミッシングマスがPDG値に近づくように逆輸送行列の要素を最適化する。具体的には $\chi^2$ を最小にするような行列を探す。
4. iteration  
上の2と3を何回か繰り返す。この繰り返しの回数を、以下では iteration の回数と呼ぶ。  
2から4までの行程を1回のLOOPと呼ぶ。
5. 逆輸送行列の選定  
1回のLOOPの中では iteration の数だけ逆輸送行列が生成されるがこのうち最もよく最適化できた逆輸送行列、即ち式(2)で定義した $\chi^2$ を最小にする逆輸送行列を選ぶ。
6. 次のLOOP  
5で選ばれた逆輸送行列を用いて次のLOOPの計算を行う。

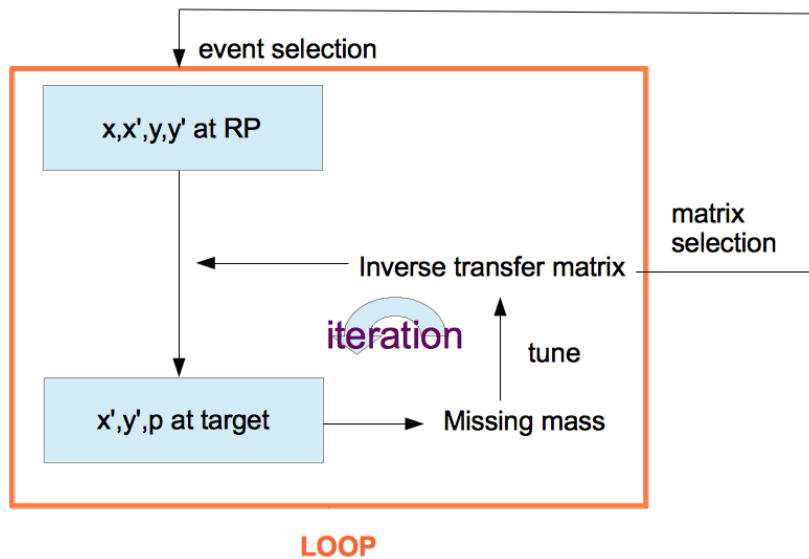


図 4: 逆輸送行列の最適化の過程

### 3.4 疑似データを用いた系統誤差の見積もり

実際の解析だけではこの解析コード自身からくる系統誤差は見積もれない。そこで Blind Analysis という方法でこの誤差を見積もる。最適化して得られた逆輸送行列を用いて標的

で生成したハイパー核のミッシングマスを計算したとき、その中心値がどれほどの精度で決定できるのかは自明ではない。つまり、最適化に用いた  $\Lambda$  や  $\Sigma^0$  が正しく PDG の値に一致していても、その逆輸送行列で生成ハイパー核のミッシングマスが真の値になるとは保証されていない。このミッシングマスの真の値からのずれを次のような手順で見積もった。

#### 手順

1. ミッシングマスがある値になるような疑似データを作成する。このとき、解析者にはこのミッシングマスの値を知らせない。
2. 現実世界で磁場に関する精度の不足の為に初期逆輸送行列が歪んでしまう事を再現するように、手で歪ませた逆輸送行列を用いてミッシングマスを計算する。
3. リアルデータの解析に用いるものと全く同一のコードを用いて、逆輸送行列の最適化を行う。
4. 逆輸送行列が最適化出来たら、ミッシングマスを再計算しその値を得る。
5. 1 の値と 4 の値を比較し、そのずれがこのコードを用いて解析を行なう事から生じる系統誤差となる。

手順の 1 番にあるように解析者は生成した疑似データの値を知らないなので、この一連の手順をこの論文中では Blind Analysis とよぶ。

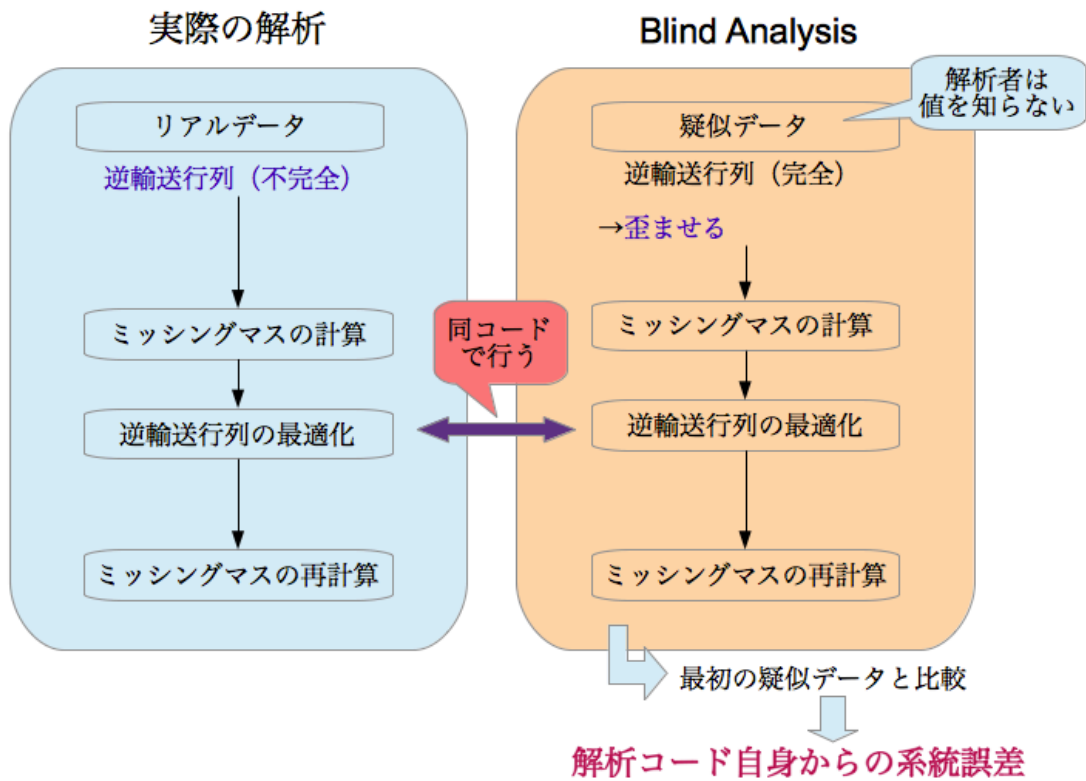


図 5: 実際の解析と Blind Analysis

### 3.5 本研究のサンプル

今回の研究では表 3 に挙げた 3 通りのサンプルについて最適化を行なった。まず、使用した初期逆輸送行列は 2 種類で、1 つは TOSCA と Geant4 シミュレーションから求めた行列、もう 1 つはそれにさらに手で歪みを加えているものである。また、指標として最適化に入るものは 1 では、 $\Lambda, \Sigma^0$  のみで、2、3 では  $\Lambda, \Sigma^0, {}_{\Lambda}^{12} B_{g.s.}$  が入っている。

表 4: セットアップ

サンプル番号	使用した初期逆輸送行列	tune に入るもの
1	TOSCA + Geant4	$\Lambda, \Sigma^0$
2	TOSCA + Geant4	$\Lambda, \Sigma^0, {}_{\Lambda}^{12} B$
3	TOSCA + Geant4 + 手で歪めた	$\Lambda, \Sigma^0, {}_{\Lambda}^{12} B$

#### 1. サンプル 1

図 6 は再計算したミッシングマスと生成した値の差 ( $\Delta MM$ ) が LOOP 毎にどのよう

に変化するかを見ている。使用した初期逆輸送行列は TOSCA+Geant4 シミュレーションで求めたもので最適化に入るのは  $\Lambda, \Sigma^0$  のみの場合である。最適化を行っても、 $\Lambda, \Sigma^0$ 、ハイパー核のミッシングマスは 0 に戻らない。 $\Lambda, \Sigma^0$  の場合は 70keV ほどずれている。このずれを解消するため、31LOOP 目で 70keV のオフセットをかけた。すると、 $\Lambda, \Sigma^0$  の場合はほぼ 0 へ戻り、ハイパー核のミッシングマスも同程度移行した。この理由に関しては 4 章で考察する。図 7 は、再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化を示す図である。

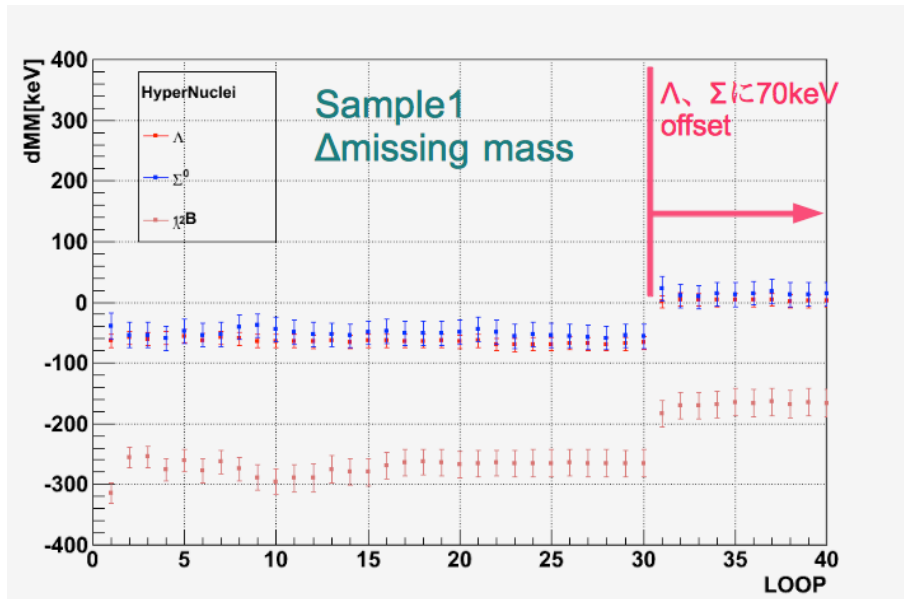


図 6: サンプル 1 での再計算したミッシングマスと生成した値の差の変化

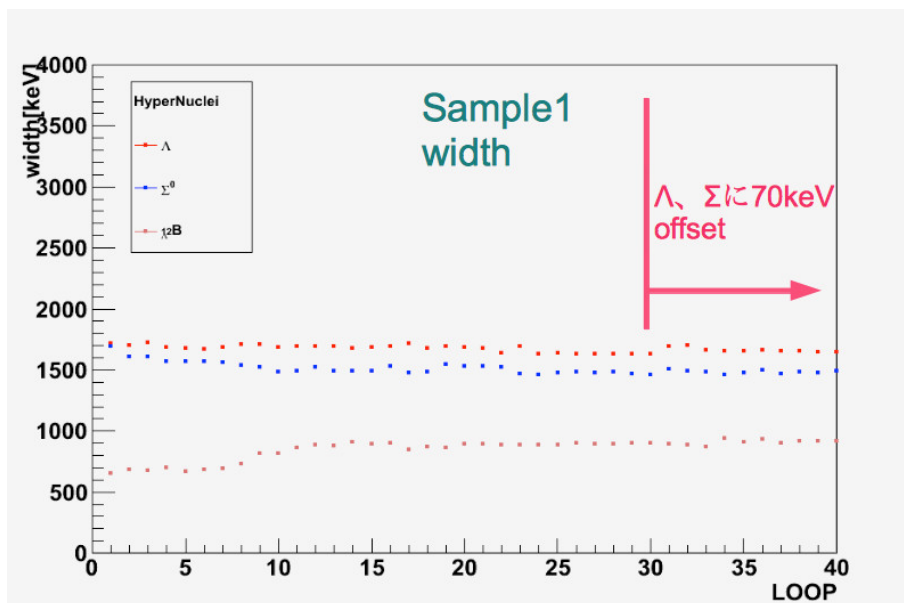


図 7: 再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化 (サンプル 1)

## 2. サンプル 2

次にサンプル 2 は、用いた行列は先ほどのサンプル 1 と同じだが、最適化には  $\Lambda, \Sigma^0$  に加え、 ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  を入れた場合である。 $\Delta MM$  がやはり 0 に戻らないのはサンプル 1 同様である。しかし 1 では  ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  は 300keV ほどずれていたものが、ここではそれが 140 ~ 150keV ほどになっていた。1 のスタディでかけた 70keV のオフセットを 26LOOP 目でかけてみると、 $\Lambda, \Sigma^0$  は 20 ~ 30keV の範囲内で 0 に戻るが、 ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  は 1 と異なり移行しなかった。図 9 は、再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化を示す図である。

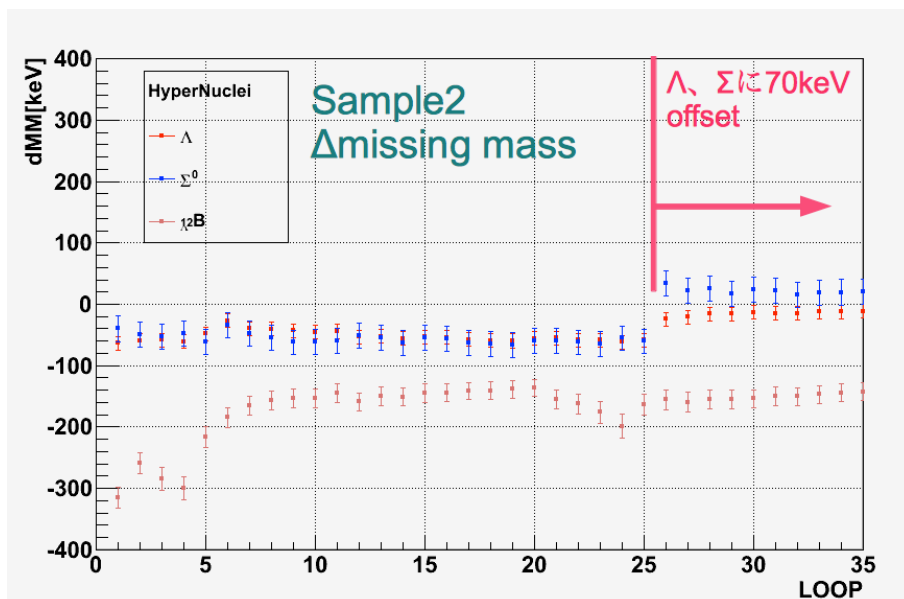


図 8: サンプル 2 での再計算したミッシングマスと生成した値の差の変化

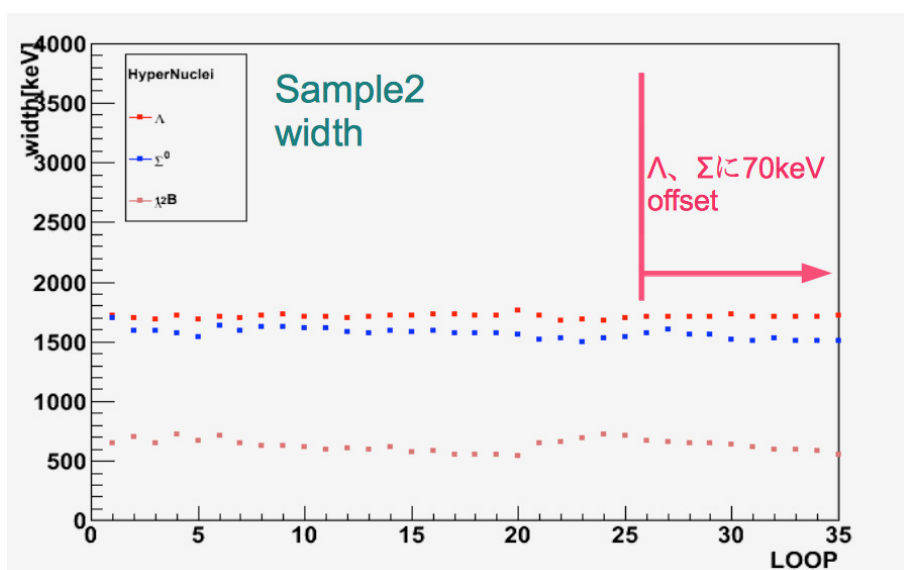


図 9: 再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化 (サンプル 2)

### 3. サンプル 3

最後にサンプル 3 は、使用した初期逆輸送行列が TOSCA+Geant 4 シミュレーションで作ったものに手で歪みを加えた場合である。最適化に入るのは  $\Lambda, \Sigma^0, {}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  である。2 同様  $\Lambda, \Sigma^0, {}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  全てずれていて、31LOOP 目で  $\Lambda, \Sigma^0$  に 70keV のオフセットを入れた。すると  $\Lambda, \Sigma^0$  は 20 ~ 30keV 以内で 0 に戻るが  ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  は移行しなかった。図 11 は、再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化を示す図である。

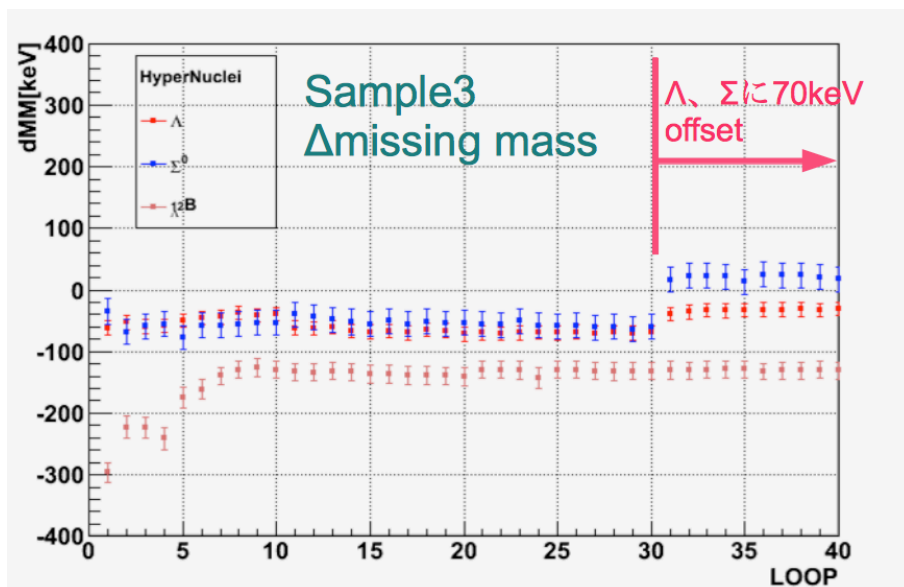


図 10: サンプル 3 での再計算したミッシングマスと生成した値の差の変化

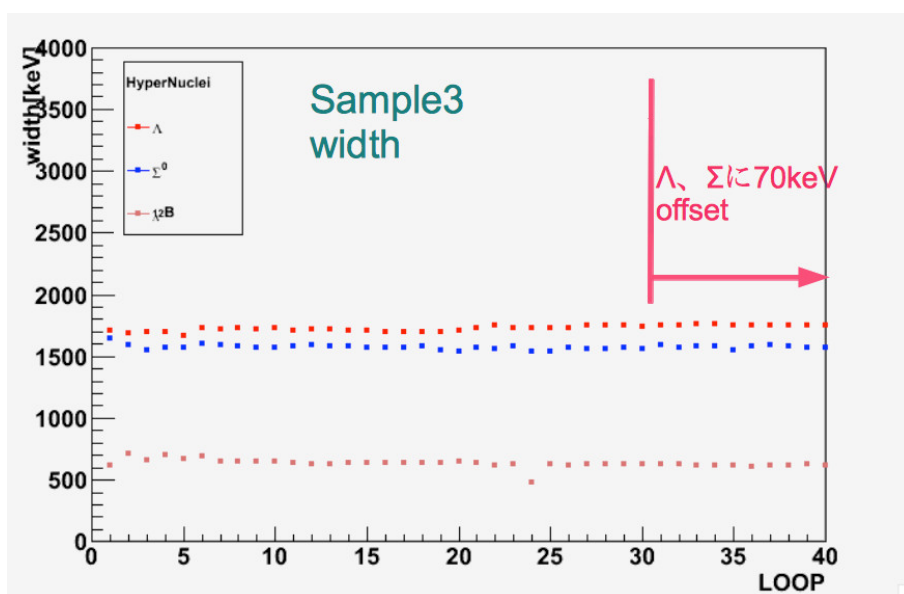


図 11: 再計算したミッシングマススペクトラムの幅の変化 ( サンプル 3 )

## 4 考察と結論

### 4.1 考察

キャリブレーションの指標となる  $\Lambda, \Sigma^0$  は、本来きちんと PDG 値に戻る事が期待される。しかし、今回最適化を行なった全てのサンプルで約 70 ~ 100keV ほどずれるという事



がわかった。この理由として現在考えられるのは以下の事である。まず、図 12 は今回の解析で使用した疑似データである。青の斜線が入ったスペクトラムがバックグラウンドを含んだ  $\Sigma^0$  のスペクトラムで、赤で着色してあるのが、バックグラウンドを差し引いた  $\Sigma^0$  のみのスペクトラムである。バックグラウンドはリアルデータの形とシグナル・ノイズ比を再現するような形が入っている。図 12 を見ると、バックグラウンドの形が非対称である事、さらに  $\Sigma^0$  自体の形も非対称である事がわかる。最適化の中でガウシアンフィットを行い、その 1 のイベントを選ぶ場所がある。スペクトラムが非対称であるのでこのガウシアンフィットがイベント数の多い方に引っ張られ、本来の中心値からずれている事が考えられ、このためにミッシングマスのオフセットが生じている事が考えられる。

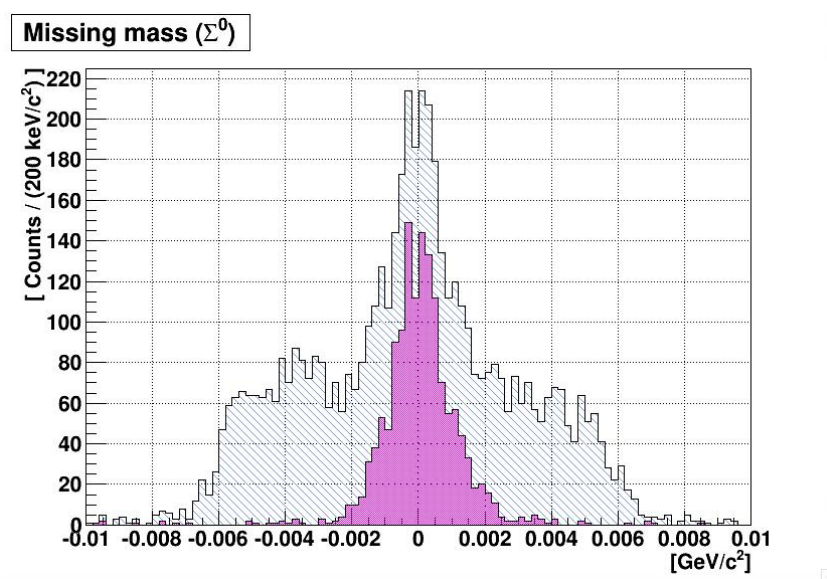


図 12: 作成した疑似  $\Sigma^0$  のミッシングマス [GeV/c<sup>2</sup>]

1 ではオフセットを入れた後、 ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  は移行していなかったが、2 と 3 では移行した。これは、最適化に  ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  を入れたためにこれがアンカーとして働いているからである。1 と 2 で同じオフセットを入れても、 $\Lambda, \Sigma^0$  の値が大きくずれなかった。これはアンカーが影響しないのではなく、中心値がほどほど正しい値になるような行列に最適化され落ち着くからである。 ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  を最適化に入れたときはそこに制限がかかっているために、その分ミッシングマスのスペクトラムの幅が太くなる。

また図 8 を見ると顕著にわかるが、最適化を始めてすぐに  ${}_{\Lambda}^{12}B_{g.s.}$  は 0 から大きく外れた値をとりその後、0 には戻らないが一定の値に落ち着く。本来初期逆輸送行列が完璧なものであれば最適化後すぐにある一定の値に落ち着くはずである。これは次のような理由による。確かに、ここで用いた行列は磁場に関して手で歪みを入れていないという点においては完璧な行列であるが、行列の生成点を点で仮定しているという意味では完璧な行列ではない。実際は標的は厚さを持っている。入射電子も散乱電子も K 中間子もそれぞれ標的の中ではエネルギー損失をし、その値は生成点に依存する。しかし、実際の実験においてもシミュレーションにおいても、標的中のどれほどの深さの点でハイパー核が生成した

かを知る事は出来ない。今回行なったシュミレーションでは、ハイパー核生成点をおある 1 点に仮定して、標的中でのエネルギー損失の補正を行っていない。このために、行列は不完全なものになってしまっている。サンプル 1、2 で用いた初期逆輸送行列は手で歪めていないにもかかわらず、最適化し始めた頃に値が揺れているのはこのためである。

## 4.2 結論

以上の研究から考えられることは、 $\Lambda, \Sigma^0$  に 100keV 程度のオフセットを入れても初期逆輸送行列に依存せずハイパー核のミッシングマスにはほぼ影響が無いということである。ただし、今回調べることでできたサンプルの数が少なく、今後より多くのサンプルを用いて検証することでより確実にこの結果を主張できる。

3.2 において、最適化に用いるピークとして  ${}^{12}_{\Lambda}B_{g.s.}$  を入れたときは、フィッティングの中心値に収束するようにして、さらにこのフィッティングには制約をかけていると述べた。今回のサンプル 2 と 3 の最適化では、中心値が過去の  $(e, e'K^+)$  実験とコンシステントなエマルジョン実験で測られた値の  $\pm 100\text{keV}$  以内になるように制限していた。エマルジョン実験のエラーバーは  $\pm 60\text{keV}$  でついていたので、この範囲の制限、あるいはもっと狭い範囲や広い範囲の制限をかけたとき、ハイパー核がどのように動くかを今後研究していく。

また、CH2 標的は厚さを持っていて、 $\Lambda, \Sigma$  が標的中のどこで生成されたかによって、エネルギー損失がかわってくる。今回の逆輸送行列の最適化には、このエネルギー損失の補正がかかっていない。これを補正する方法を考える事も今後の課題である。

## 参考文献

- [1] M. Jurie et al., Nucl. Phys. B52 (1973) 1
- [2] O.Hashimoto and H.Tamura, Prog.Part.Nucl.Phys 57(2006)564
- [3] 川間大介、Investigation of high-precision  $\Lambda$  hyper nuclear spectroscopy via the  $(e, e'K^+)$  reaction、博士論文、東北大学 (2012)
- [4] 後神利志、電子ビームを用いた中重 ハイパー核分光実験 JLab E05-115 のための散乱電子スペクトロメーターの開発、修士論文、東北大学 (2010)
- [5] 日下 潤一郎、電磁生成反応による中重ハイパー核分光実験のデザイン、修士論文、東北大学 (2014)
- [6] 後神利志, private communication
- [7] Proposal to PAC 40 for A Study with High Precision on Electro-production of the  $\Lambda$  and  $\Lambda$ -Hypernuclei in the Full Mass Range
- [8] <http://www.jlab.org/visitors/science/works.html>