マインツにおける崩壊パイ中間子分光実験のための コリメータの設計

東北大学理学部物理学科

髙橋　佑太

平成 26 年

概要

我々東北大学、マインツ大学を中心とする国際共同実験グループ（A1 Hypernuclear Colaboration）はハイパー核分光実験における新たな手法として、ハイパー核崩壊パイ中間子分光実験を創始、推進してきた。前回実験においては実験原理を実証し、また、$^{4}_{\Lambda}$H の基底状態の質量を $\sim$ 100 keV の精度で決定した。しかし、準自由ハイペロンからの崩壊パイ中間子によるバックグラウンド（QuasiFreeBackGround:QFBG）が大きく、$^{4}_{\Lambda}$H 以外のハイパー核のピークは観測できなかった。次回実験において QFBG を抑制し、S/N 比を向上するための手法としてコリメータの設置を考案した。これにより次回実験においてさらなるハイパー核のピークの観測が期待される。本研究では QFBG の抑制のためのコリメータの設計、製作を行った。

目次

1 はじめに 3

1.1 ハイペロンとハイパー核 3

1.2 電子線によるハイパー核崩壊パイ中間子分光実験 4

2 前回実験 7

2.1 前回実験のセットアップ 7

2.2 前回実験の結果と課題 8

2.3 コリメータによる QFBG の抑制方法 9

3 本研究の目的 10

4 QFBG の抑制のためのコリメータの設計 11

4.1 設計にあたり見積もった項目 11

4.2 Bethe-Bloch Formula による計算 11

4.3 Geant4 によるモンテカルロシミュレーション 12

4.4 コリメータの設計 14

5 結論 15

図目次

1 ${}^{4}_{\Lambda}$H、${}^{4}_{\Lambda}$He の束縛エネルギーの実験値 [3] と理論計算 [4] の比較 [1] 4
2 バリオン 8 重項とメソン 9 重項 [1] 4
3 ハイパー核崩壊パイ中間子分光実験の概念図 [1] 5
4 前回実験のセットアップ概念図 [1] 7
5 π^- の運動量スペクトラム [2] 8
6 コリメータによる QFBG の抑制方法概念図 9
7 シミュレーションにおける配置 12
8 コリメータの厚さに対する π^- 中間子生存率の z 依存性 13
9 抑制効率のコリメータ厚さ依存性 13
10 標的コリメータ間距離 13
11 異なる標的コリメータ間距離に対する π^- 中間子生存率の z 依存性 . . . 14
12 抑制効率の標的コリメータ間距離依存性 14
13 コリメータセットアップ 15
14 コリメータ設置架台草案図 15
15 W-ヘビーアロイブロック 16
16 C,Al,W に対する π^- 中間子生存率の z 依存性 16

1　はじめに

1.1　ハイペロンとハイパー核

通常原子核を構成する核子 (N) である陽子 (p)、中性子 (n) はアップクォーク (u) 及びダウンクォーク (d) のみで構成されている。アップとダウンの次に軽いクォークであるストレンジクォーク (s) を含むバリオンを “ハイペロン (Y)” と呼ぶ。ハイパー核とはこのハイペロンを構成要素として含む原子核である。アップ、ダウン、ストレンジクォークを含むスピン 1/2 のバリオンはバリオン 8 重項、メソンはメソン 8 重項をそれぞれ組む (図 2 参照)。

ハイペロンはストレンジネス量子数を持つので原子核中の核子からのパウリの排他律の効果を受けず、原子核深部の軌道に束縛されうる。このため、ハイペロンをプローブとして用いることで原子核深部の構造を調べることができる。また、N-N 相互作用は通常核の散乱実験でよく理解されているが、Y-N 相互作用はハイペロンの寿命の短さから直接散乱実験は困難である。しかし、ハイペロンの一種である Λ 粒子の寿命は ~ 200 ps であり、これは Λ が原子核に束縛され、一定の軌道を回るには十分な時間であることから、Λ ハイパー核の分光実験が可能となる。よって、Y-N 相互作用の理論計算とハイパー核分光実験の結果を比較することで Y-N 相互作用を明らかにすることができ、さらには Y-Y 相互作用の理解、その先にバリオン間力の理解への拡張が期待される。

その理解のための問題の一つとして Λ-N 相互作用における荷電対称性の破れ (Charge Symmetry Breaking:CSB) が挙げられる。荷電対称性とは、核力において陽子と中性子の入れ替えに対して性質が変わらないことである。しかし、4 体系の Λ ハイパー核である ${}^{4}_{\Lambda}$H とその鏡映核である ${}^{4}_{\Lambda}$He の基底状態の束縛エネルギーにおいて、荷電対称性が成り立っていると仮定したときの理論計算と実験結果に ~ 350 keV の差が観測された。その比較を図 1 に示した。この差は Λ の束縛するコアとなっている ^{3}H と ^{3}He の波動関数の違いや、$\Lambda N - \Sigma N$ カップリングの効果を導入しても説明ができない。これは Λ に対する陽子と中性子の相互作用の大きさが異なることを示しており、核力で常識とされる荷電対称性が破れていること (CSB) を意味する。

4 体系の理論計算と実験値の差から、Λ-N 間の家電対称性の破れの大きさを理論的に決定し、7 体系のアイソスピン 1 を持つハイパー核に拡張する試みもなされた。しかし、アイソスピン 3 重項をなす 7 体系のハイパー核（${}^{7}_{\Lambda}$He、${}^{7}_{\Lambda}$Li*、${}^{7}_{\Lambda}$Be）の束縛エネルギーの理論計算と実験値を比較したとき、CSB の効果を導入するとその差がさらに大きくなることが分かった。

そこで、CSB の理論計算のもととなっている 4 体系のハイパー核である ${}^{4}_{\Lambda}$H、${}^{4}_{\Lambda}$He のエマルジョン実験結果の検証が必要とされる。また、これまでのエマルジョンによる ${}^{4}_{\Lambda}$H、${}^{4}_{\Lambda}$He のデータはその誤差の大きさから信頼性に乏しいという議論があり、この問題に対

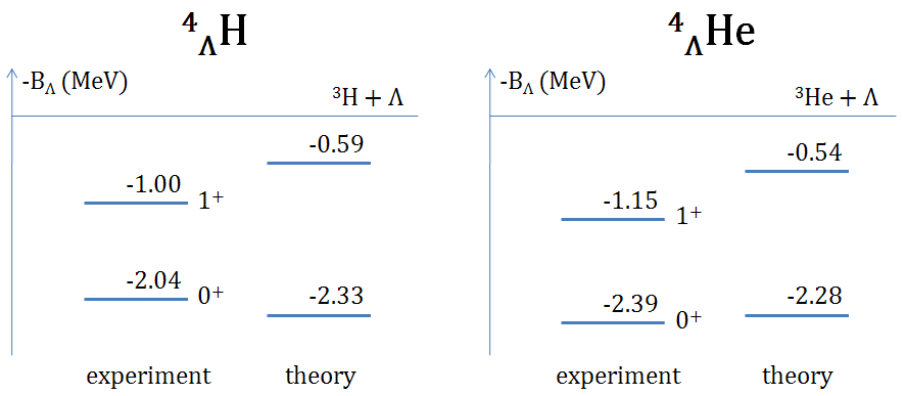
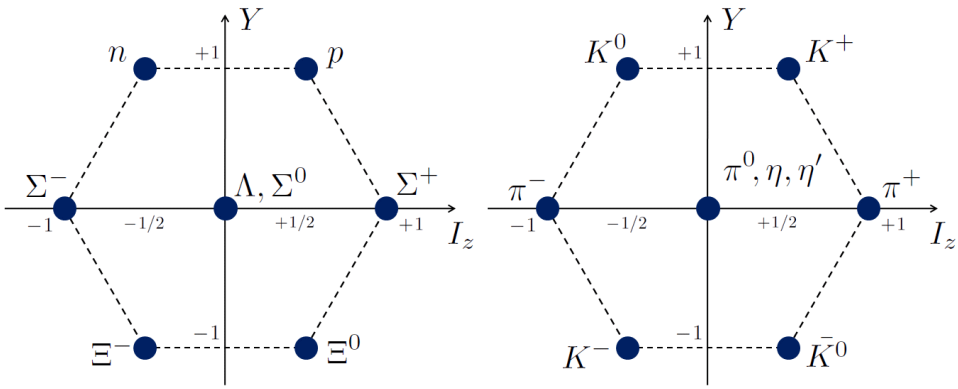


図 1: $^4_\Lambda$H、$^4_\Lambda$He の束縛エネルギーの実験値 [3] と理論計算 [4] の比較 [1]



(a) バリオン 8 重項　　(b) メソン 9 重項

図 2: バリオン 8 重項とメソン 9 重項 [1]

する知見を与えるために、ハイパー核の質量絶対値のより良い精度での測定が必要とされる。

以上より、ハイパー核の分光実験を行うことは物理学の発展に非常に重要である。次項ではハイパー核の分光実験の新たな手法である電子線によるハイパー核崩壊パイ中間子分光実験について述べている。

1.2　電子線によるハイパー核崩壊パイ中間子分光実験

この実験の概念図を図 3 に示した。この実験手法では標的に電子線を照射し、仮想光子を介して標的原子核内の陽子を Λ 粒子に変換する $(e, e'K^+)$ 反応を用いて、Λ ハイパー核と K^+ 中間子を生成する。この時、運動量移行が ~ 400 MeV/c と大きいため、$(e, e'K^+)$ 反応で直接生成されたハイパー核 ^AZ を標的とした場合、$^A_\Lambda(Z-1)$ に加えて、運動量移行によって破砕した原子核の一つに Λ 粒子が束縛したハイパーフラグメントも生成される。生成されたハイパー核が標的内で停止後、π^- 中間子と通常原子核の 2 体に中間子弱

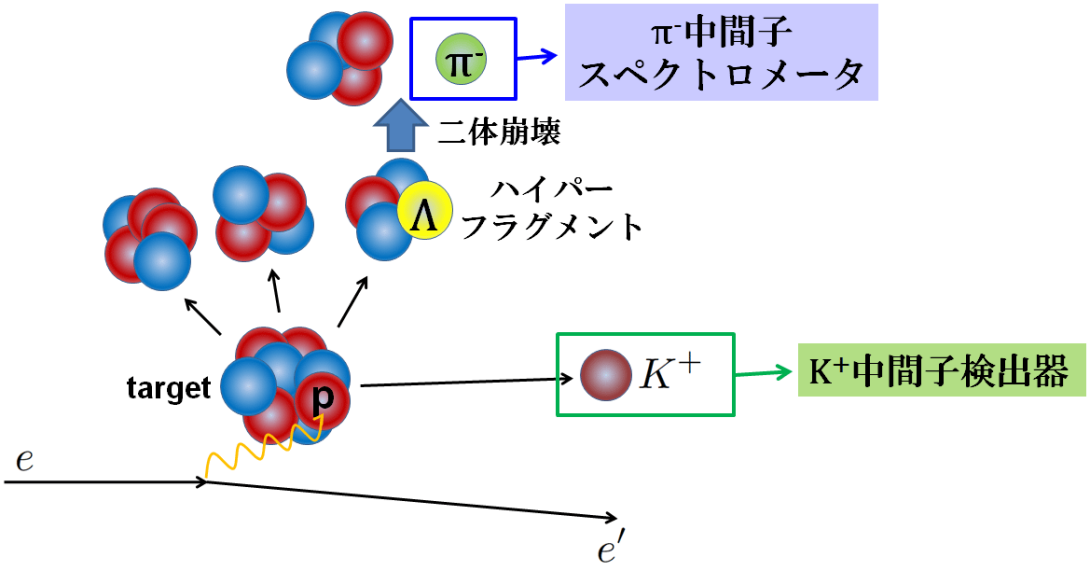


図 3: ハイパー核崩壊パイ中間子分光実験の概念図 [1]

崩壊した場合、ハイパー核の質量 M_{HYP} は以下の式で記述できる。

$$M_{HYP} = \sqrt{M_{ncl}^2 + p_{\pi^-}^2} + \sqrt{M_{\pi^-}^2 + p_{\pi^-}^2} \tag{1}$$

ここで、M_{ncl}、M_{π^-} はそれぞれ通常原子核の質量と π^- 中間子の質量、p_{π^-} は π^- 中間子の運動量である。これより、通常原子核の質量と π^- 中間子の質量は非常に良い精度 (~ 0.1 keV) での既知の値であるので、π^- 中間子の運動量の絶対値を測定することによってハイパー核の質量の絶対値を求めることができる。測定量である π^- 中間子の運動量は ~ 100 MeV/c と低いので、スペクトロメータの運動量分解能が $\sim 10^{-3}$ だとしてもハイパー核の質量を ~ 100 keV(FWHM) で分光可能である。

さらにこの実験手法の利点として、1 種類の標的に対して、一度の実験で複数種のハイパー核分光が可能であることが挙げられる。今まで行われてきた (π^+, K^+) 反応、$(e, e'K^+)$ 反応などを用いた反応分光実験は散乱粒子の運動量からミッシングマスを求める手法であるため、1 種類の標的に対して 1 種類のハイパー核の分光しか行うことができなかった。しかし、この実験ではハイパーフラグメントの分光も可能なため、1 種類の標的に対して、一度の実験で複数種のハイパー核分光が可能である。

π^- 中間子の運動量の絶対値を精度良く測定するために π^- 中間子の標的内におけるエネルギー損失を小さくする必要がある。そのため、標的を薄くしつつ、収量を稼ぐ必要があるが、これは大強度一次電子ビームを用いることで可能である。また、ハイペロン生成を伴わない過程で生成された π^- 中間子が大量のバックグラウンドとして検出されることが想定されるので、ハイペロン生成の識別のために、同時に生成される K^+ 中間子をタグする必要がある。

以上より、この実験において大強度一次電子ビーム、π^- 中間子の運動量を測定するための高分解能のスペクトロメータ、ハイペロン生成イベントの識別のための K^+ 中間子

検出器の 3 点が要請される。、これらの条件を全て満たす施設の一つに MAINZ 大学の MAMI-C が挙げられ、我々は MAMI-C においてこの実験を行ってきた。

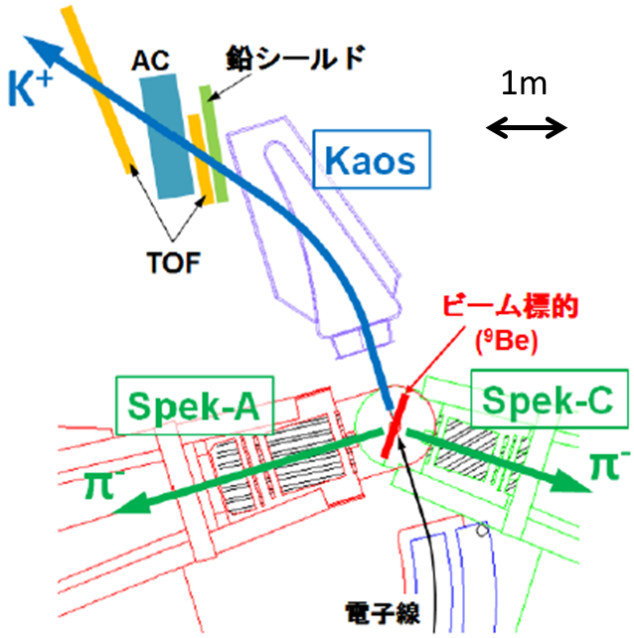


図 4: 前回実験のセットアップ概念図 [1]

2　前回実験

2.1　前回実験のセットアップ

2012 年に行った前回実験のセットアップの概念図を図 4 に示した。図下部から上方に 1508MeV の電子線が標的 (125μm 厚 ^{9}Be) に入射し、仮想光子を介して標的原子核内の陽子を Λ に変換し、同時に K^+ が生成される。この K^+ はハイペロン生成イベントの識別のために前方の Kaos スペクトロメータにより検出される。Kaos には K^+ の外に e^+、π^+、p が大量のバックグラウンドとして入射してくると想定されるため、鉛シールドで e^+ を抑制し、エアロジェルチェレンコフ検出器を用いて π^+、K^+ の弁別を行い、Time of Flight により p、K^+ の弁別を行った。また、ハイパー核から放出された π^- 中間子は 2 つのスペクトロメータ、Spek-A、Spek-C により分光される。Kaos、Spek-A、Spek-C のセットアップを表 1 に示した。

前回実験はハイパー核崩壊パイ中間子分光実験の原理実証を主な目的としたものである。そのため、ハイパーフラグメントの中で最も大きな収量が期待される $^4_\Lambda$H を観測対象とした。また、エマルジョン実験の結果より $^4_\Lambda$H の 2 体弱崩壊によって放出される π^- の運動量は 132.9 MeV/c 程度であることが分かっているため、Spek-C のアクセプタンスはそれに合わせたセットアップとした。

表 1: Kaos、Spek-A,C のセットアップ

	Central Momentum [MeV/c]	Momentum Range [MeV/c]	Angle to Reference Direction [deg]	Angle to Beam Direction [deg]	Angle to Target [deg]	Factor of Effective Target Thickness
Kaos	924	680-1220	17	0	54	1.70
Spek-A	115	103-126(130)	108	91	37	1.25
Spek-C	125	109-140(145)	109	126	0	1

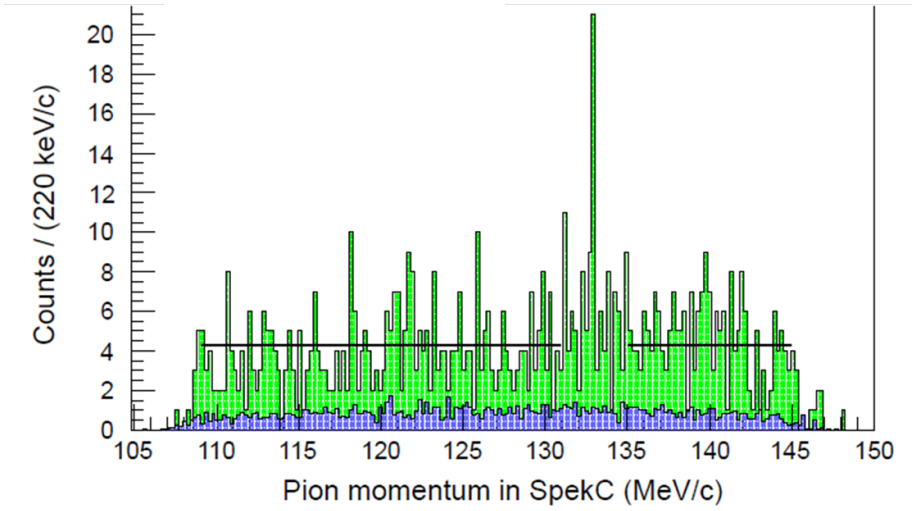


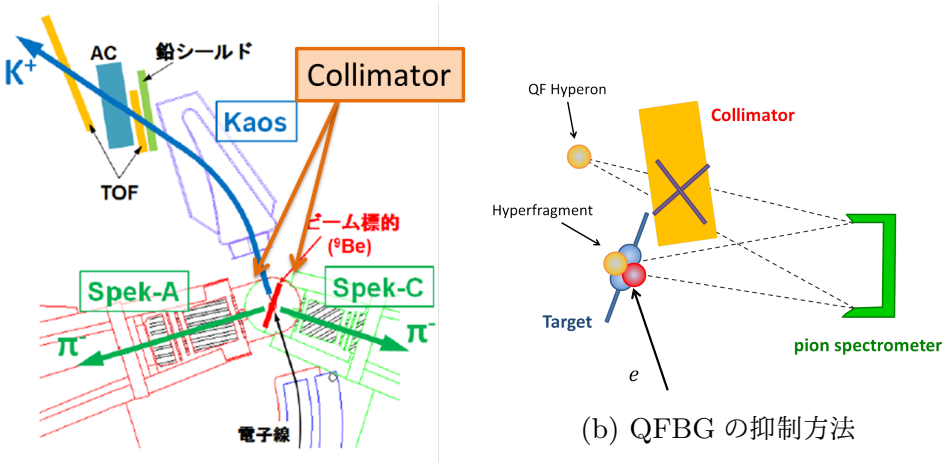
図 5: π^- の運動量スペクトラム [2]

2.2　前回実験の結果と課題

前回実験で得られた π^- 中間子の運動量のヒストグラムを図 5 に示した。~ 133 MeV/c に ${}^4_\Lambda$H のピークが立っているのがわかる。これより、崩壊パイ中間子分光実験が可能であることの実証と、${}^4_\Lambda$H の質量の絶対値を ~ 100 keV という良い精度で求めることができた。しかし、バックグラウンドが大きく、S/N 比が良くないことからその他のハイパー核によるピークが見れないことが課題として挙げられた。図 5 の青メッシュで表されるのはアクシデンタルコインシデンスバックグラウンドであり、水平な直線で表されるのは準自由生成されたハイペロンに起因するバックグラウンド (QuasiFree BackGround : QFBG) である。アクシデンタルバックグラウンドは Kaos、Spek-A,C のシングルレートを下げることで抑えられる。そのために次回実験に向けて既存の検出器の改良を行った。しかし、QFBG は K^+ のタグによるハイペロン生成イベントの弁別は原理的に不可能である。そのため、既存の装置とは別に抑制機構が必要となる。そこで、新たにコリメータ

表 2: : Λ、Σ^0、Σ^- のパラメータ

粒子	質量 [MeV/c^2]	寿命 [sec]	$c\tau$ [cm]
Λ	1115.683 ± 0.006	$(2.631 \pm 0.020) \times 10^{-10}$	7.89
Σ^0	1192.642 ± 0.024	$(7.4 \pm 0.7) \times 10^{-20}$	2.22×10^{-9}
Σ^-	1197.449 ± 0.030	$(1.479 \pm 0.011) \times 10^{-10}$	4.434



(a) コリメータの設置位置

(b) QFBG の抑制方法

図 6: コリメータによる QFBG の抑制方法概念図

を設置することで QFBG を抑制することを考えた。

2.3　コリメータによる QFBG の抑制方法

前述したとおり、ハイペロン生成イベントは K^+ と π^- の検出により、タグされる。これによりハイパー核の生成イベントのタグをするが、同時に準自由なハイペロン生成イベントもタグされることになる。よって、QFBG の抑制には現存する検出器以外に新たな機構が必要となる。その新たな機構としてコリメータの設置を考案した。$(e, e'K^+)$ 反応より生成されうるハイペロンの中で主にバックグラウンドの原因となるのは Λ、Σ^-、Σ^0 が考えられる。これらのハイペロンについて表 2 にまとめた。コリメータによる QFBG の抑制方法の概念図を図 6 に示した。測定するパイオンは標的内で停止したハイパー核に起因するもののみであることと、準自由ハイペロンはビーム前方に集中して生成されることから、ビーム下流側、標的へのビームの入射位置からのスペクトロメータのアクセプタンスを削らない位置にコリメータを設置することで、QFBG のみを抑制でき、S/N 比を向上できると考えた。

3　本研究の目的

前述のとおり前回実験において QFBG の抑制が課題の一つとして挙げられた。次回実験において、QFBG を抑制し、S/N 比の向上をすることで、前回実験よりも精度良く ${}^{4}_{\Lambda}\mathrm{H}$ の質量の絶対値を求めることができるだけでなく、前回実験では見られなかったハイパー核によるピークの観測が期待される。本研究では次回実験のための QFBG の抑制方法としてコリメータの設置を考案し、その設計、製作を行った。

表 3: W,Pb、Pt,Al における Bethe-Bloch Formula の計算結果と価格

	Z/A	density:ρ [g/cm^3]	ρ Z/A	stoppable thickness[mm]	[¥/kg]
W	0.40	19.25	7.74	30	4,500
Pb	0.39	11.34	4.47	51	1,000
Pt	0.40	21.45	8.58	27	4,500,000
Al	0.48	2.70	1.30	138	174

4 QFBG の抑制のためのコリメータの設計

4.1 設計にあたり見積もった項目

コリメータの設計にあたり見積もった項目は次の三点である。

- 材料
- 形状
- 設置位置

これらの項目を最適化するために Bethe-Bloch Formula による計算と Geant4 によるモンテカルロシミュレーションを行った。

4.2 Bethe-Bloch Formula による計算

まず、Bethe-Bloch Formula を用いて、コリメータに適した材料と厚さを見積もった。QFBG の p_{π^-} は 100–200 MeV/c の連続した分布となっている。そのため、コリメータには $p_{\pi^-} = 200$ MeV/c の π^- を止めるのに十分な厚さが要求される。また、真空箱中の標的近くに設置することから最小限の大きさであることも要求される。この 2 点の要請を満たすものを見積もった。

Bethe-Bloch Formula とは物質中を通過する荷電粒子のエネルギー損失の式であり、次式で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2}[ln(\frac{2m_e\gamma^2\nu^2 W_{max}}{I^2}) - 2\beta^2 - \delta - \frac{2C}{Z}] \tag{2}$$

計算の結果とそれぞれの価格について表 3 に示した。この結果より、密度の高いものを使用することでコリメータの大きさをよりコンパクトに抑えることができることが分かった。しかし、コストの問題もあり、現実的に購入できるものかつ、より密度の高いものとして、タングステンをコリメータに用いることを考えた。ただし、純タングステンは非常

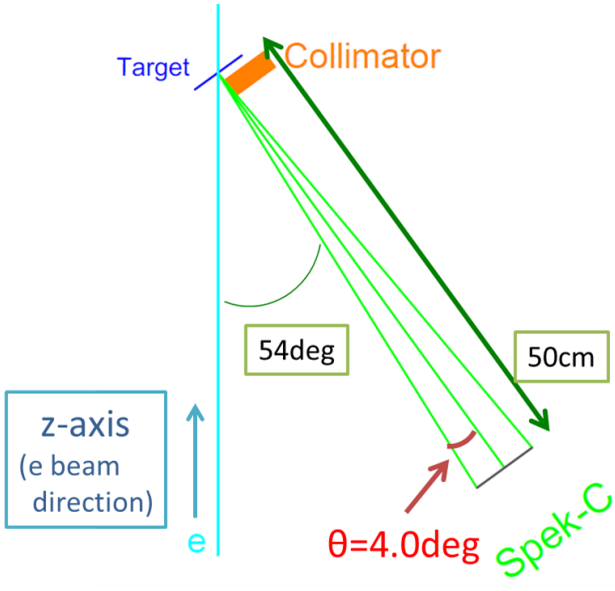


図 7: シミュレーションにおける配置

に硬く加工が困難なため、加工性に優れたタングステンベースの合金である W-ヘビーアロイ（W:Ni:Cu=94:4:2）に決定した。また、厚さについては $p_{\pi^-} = 200$ MeV/c の π^- を止めるのに必要十分な厚さとして 30 mm と見積もった。

4.3 Geant4 によるモンテカルロシミュレーション

続いて、Geant4 におけるモンテカルロシミュレーションにより、コリメータの形状、設置位置について最適な値を見積もった。シミュレーションにおいて仮定した配置を図 7 に示した。シミュレーションにおいて電子ビームの入射方向を z 軸、標的と電子ビームの交差位置を原点とした。標的、Spek-C の位置関係は実際の配置と同様にした。

コリメータの効果を見積もるために、準自由ハイペロンからの崩壊パイ中間子とみたてた π^- を +z 軸方向に沿って生成し、その Spek-C における生存率をもとにコリメータの抑制効率を定義し評価した。生存率は次式で定義した。

$$survival\ ratio = \frac{counts\ of\ \pi^-(with\ collimator)}{counts\ of\ \pi^-(without\ collimator)} \tag{3}$$

まず、抑制効率のコリメータ厚さ依存性を見積もった。異なるコリメータ厚さに対する生存率の z 依存性を図 8 に示した。これより z 依存性が $z = 3$ mm から変化を見せることから抑制効率を定量的に評価するため、次式のように定義した。

$$suppression\ efficiency = \frac{\int_3^{50}(1 - survival\ ratio)dz}{\int_3^{50} dz} \tag{4}$$

計算結果のプロットを図 9 に示した。抑制効率がコリメータ厚さ 30 mm で飽和していることが分かった。この結果と Bethe-Bloch Formula の計算による見積もりからコリメー

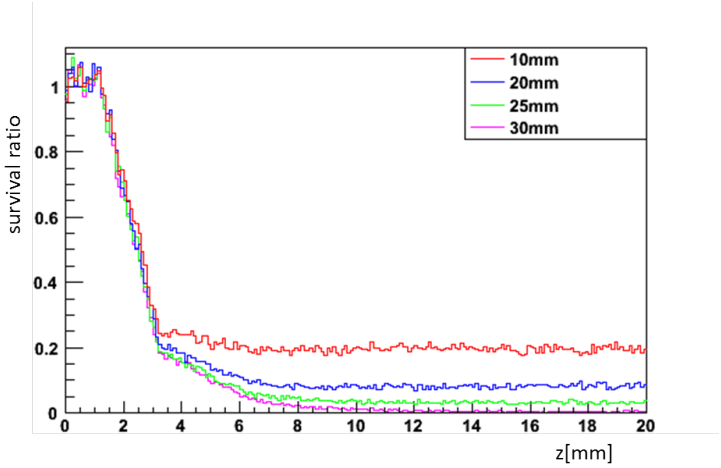


図 8: コリメータの厚さに対する π^- 中間子生存率の z 依存性

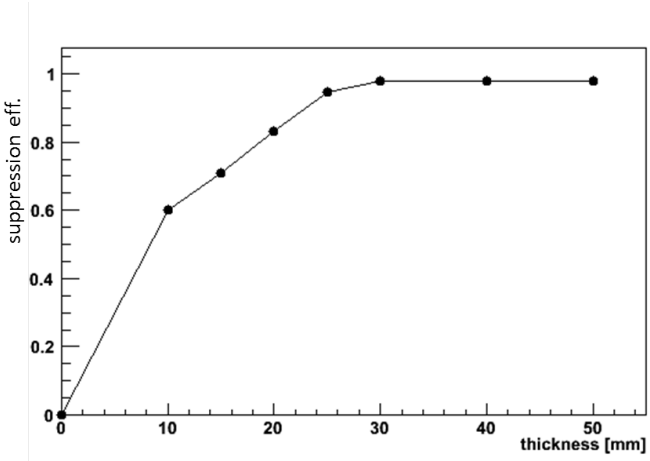


図 9: 抑制効率のコリメータ厚さ依存性。30 mm 以上で抑制効率は飽和している。

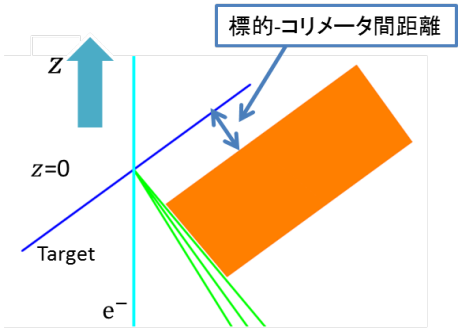


図 10: 標的コリメータ間距離

タ厚さについて 30 mm が最適と判断した。

次に、標的コリメータ間距離依存性を見積もった。標的コリメータ間距離は図 10 で示したパラメータである。異なる標的コリメータ間距離に対する生存率の z 依存性を図 11 に示した。先ほどと同様に、z 依存性が $z = 1$ mm から変化を見せ始めることから抑制効

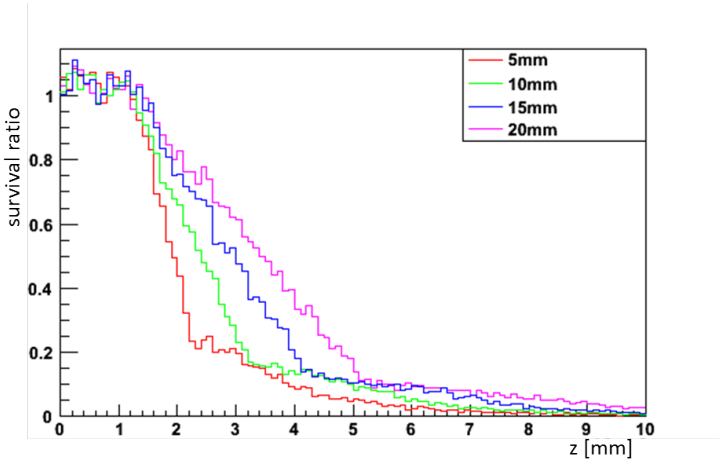


図 11: 異なる標的コリメータ間距離に対する π^- 中間子生存率の z 依存性

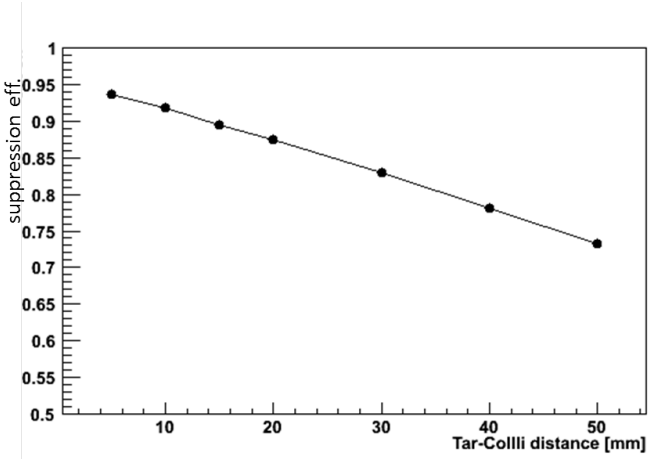


図 12: 抑制効率の標的コリメータ間距離依存性。距離が小さいほど抑制効率は高くなる。

率を次式のように定義した。

$$suppression\ efficiency = \frac{\int_1^{50}(1 - survival\ ratio)dz}{\int_1^{50} dz} \tag{5}$$

計算結果のプロットを図 12 に示した。この結果から標的とコリメータは近いほど抑制効率が良くなることがわかった。

4.4 コリメータの設計

以上の結果から、次のようなコリメータを設計した。材料：W-ヘビーアロイ寸法：50(W)×40(H)×30(T) [mm] なお、標的とコリメータをより近い配置にしたとき、Kaos 側のアクセプタンスより 5 mm の余裕を持たせるために 1 辺にテーパーをつけた。設置位置については俯瞰図を図 13 に示した。図の中央に標的、コリメータが位置し、それらを囲う真空チェンバーを青の円で表した。また、Spek-C、Spek-A、Kaos のアクセプタンスをそれぞれ緑、赤、紫の線で示した。

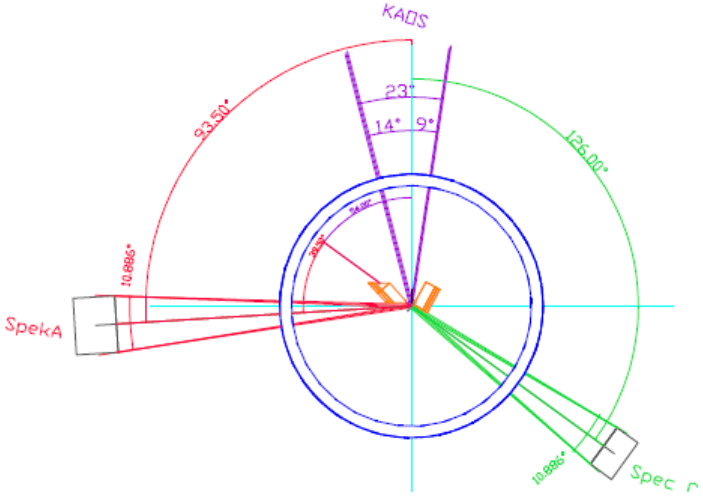


図 13: コリメータセットアップ

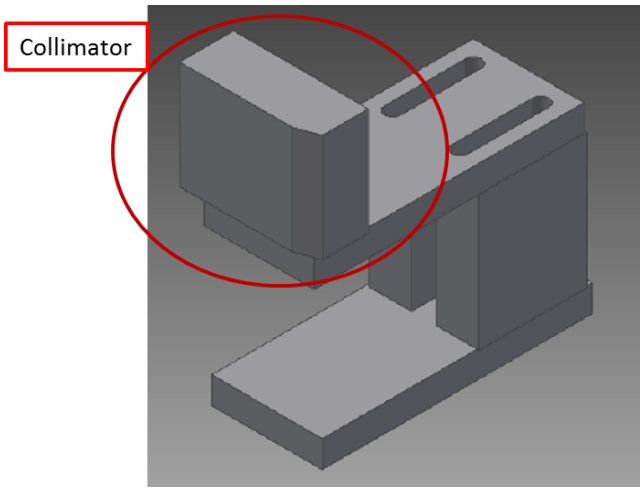


図 14: コリメータ設置架台草案図

また、コリメータを設置する架台の設計も同時に行った。その草案図を図 14 に示した。

5　結論

Bethe-Bloch Formula による計算と Geant4 によるシミュレーションより QFBG 抑制のためのコリメータの設計を行った。設計をもとに発注、納品した実際の W-ヘビーアロイブロックの写真を図 15 に示した。写真のブロックは未加工であるが、次回実験に合わせ、ドイツで加工する予定である。

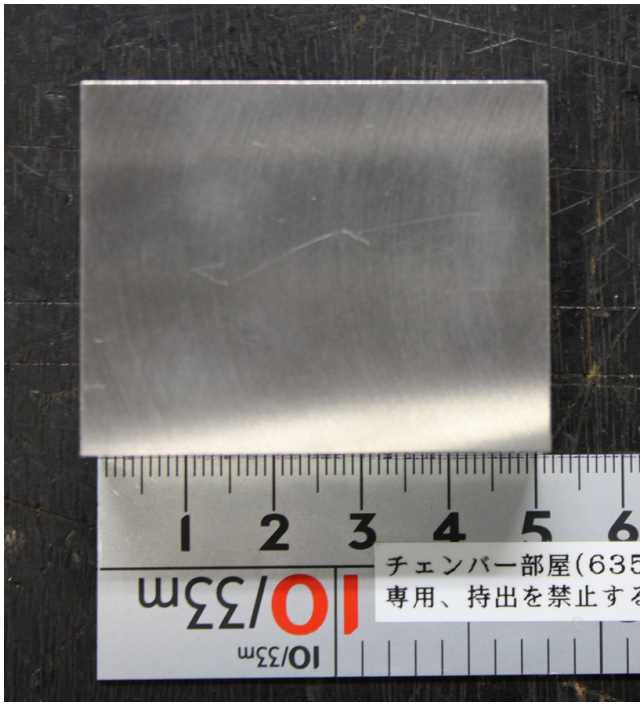


図 15: W-ヘビーアロイブロック

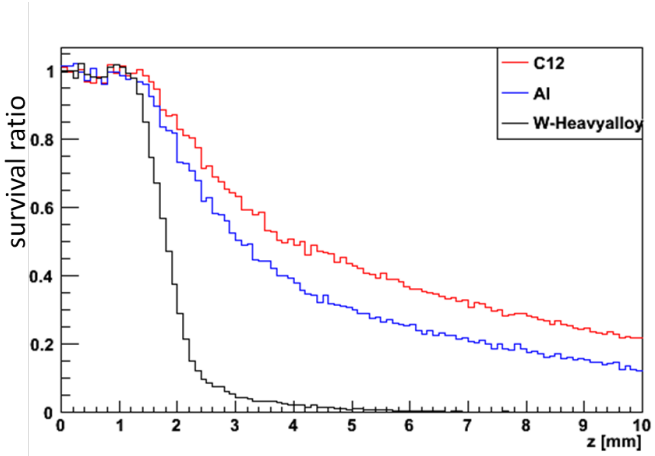


図 16: C,Al,W に対する π^- 中間子生存率の z 依存性

また、議論の中で電子線のハローがコリメータに当たった場合を考えると、より Z の低い材料、例えば炭素、アルミニウム等を使った方が良いのではないかと指摘があった。そこで、厚さ 150 mm の C、Al と厚さ 30 mm の W-ヘビーアロイをそれぞれ用いた場合の抑制効率について比較してみた。しかし、図 16 に示したように C,Al(T:150 mm) を用いた場合は W-ヘビーアロイ (T:30 mm) に比べ π^- の抑制効率が非常に悪くなる。よって、QFBG を抑制する目的において W-ヘビーアロイを用いるのが最適であると考えた。

参考文献

[1] 永尾翔 修士論文 東北大学（2010）

[2] Patric. Achenbach. (private communication)

[3] M. Julic *et al.,* Nucl. Phys. B **52** (1973) 1

[4] E. Hiyama *et al.,* Phts. Rev. C **65** (2001) 011301