

ハイパー核寿命測定のための エアロジェルチェレンコフ検出器の開発

東北大学理学部物理学科
B4SB2020 上原 圭太

2018 年

目次

第 1 章	はじめに	4
1.1	ハイパー核	4
1.2	${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命	4
1.3	ハイパー核寿命測定実験	5
1.4	ミッシングマス法	5
1.5	チェレンコフ検出器	6
第 2 章	本研究の目的	7
第 3 章	製作したエアロジェルチェレンコフ検出器	8
3.1	製作したエアロジェルチェレンコフ検出器	8
3.2	得られる光電子数の計算	10
第 4 章	性能評価実験	11
4.1	実験セットアップ	11
4.2	実験結果	11
第 5 章	まとめと今後	16
	謝辞	17
	参考文献	18

1	過去に測定された ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命	4
2	ハイパー核 (${}^3_{\Lambda}\text{H}$) 寿命測定実験	5
3	エアロジェルを詰めるための箱	8
4	エアロジェルを詰めるための箱 (模式図)	8
5	製作したエアロジェルチェレンコフ検出器	8
6	製作したエアロジェルチェレンコフ検出器 (模式図)	8
7	エアロジェルの透過率	9
8	量子効率	10
9	実験セットアップ	11
10	実験セットアップ (模式図)	11
11	イベント数—電荷グラフ (エアロジェルなし)	12
12	光電子数—位置相関 (エアロジェルなし)	12
13	イベント数—電荷グラフ (エアロジェル 3 枚)	13
14	光電子数—位置相関 (エアロジェル 3 枚)	13
15	イベント数—電荷グラフ (エアロジェル 5 枚)	13
16	光電子数—位置相関 (エアロジェル 5 枚)	13
17	イベント数—電荷グラフ (エアロジェル 7 枚)	13
18	光電子数—位置相関 (エアロジェル 7 枚)	13
19	光電子数フィッティング (エアロジェル 3 枚)	14
20	光電子数フィッティング (エアロジェル 5 枚)	14
21	光電子数フィッティング (エアロジェル 7 枚)	14
22	光電子数とエアロジェルの枚数の関係	14

表目次

1	得られる光電子数計算	10
2	エアロジェルの枚数と実験と計算による光電子数比較	15

第 1 章

はじめに

本章では本研究で扱うハイパー核および、我々の研究グループが予定しているハイパー核の一種である ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命測定実験の概要について述べる。

1.1 ハイパー核

通常の原子核はアップクォーク、ダウルクォークのみで構成された陽子、中性子によって構成される。それら 2 つのクォークに加え、ストレンジクォークを加えたバリオンをハイペロンと呼び、ハイペロンを含む原子核のことをハイパー核と呼ぶ。このハイペロンは他の核子によるパウリの排他律の効果を受けて原子核の内部深くに束縛されるため、原子核の深部の構造について調べることができる。我々の研究グループでは、このようなハイパー核のうち Λ 粒子を含むもの (Λ ハイパー核) を中心に研究を行っている。

1.2 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命

${}^3_{\Lambda}\text{H}$ とは陽子、中性子、 Λ 粒子の 3 つの核子によって構成される原子である。近年この ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ は理論による計算と実験によって求められた値とでその寿命の長さに有意違いが見られた為、ハイパー核の中でも注目を受けている。理論による計算では、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の原子核には Λ 粒子はとても浅く束縛されているため ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命は Λ 粒子の寿命とほぼ同じ 263 ps 程度であると考えられていた。しかしその一方、近年の実験によって求められた寿命はおよそ 200 ps 程度であった [図 1]。これらの実験はどれも重イオンビームを利用した ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 生成によって寿命の測定を行っている。

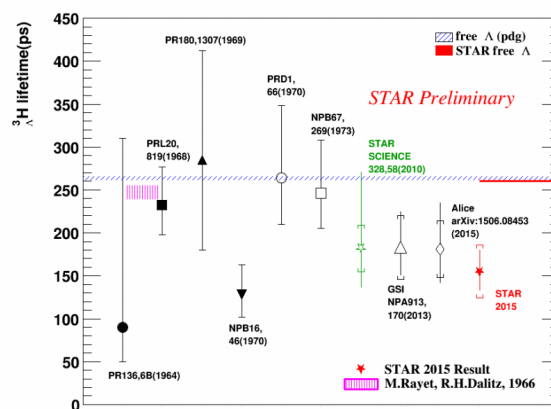


図 1 過去に測定された ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命 [1]

1.3 ハイパー核寿命測定実験

前節で述べたような ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命の理論と実験結果の乖離に対して、我々の研究グループでは東北大学電子光理学センターにて、今までの実験方法と異なる手法によって ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命の測定を行うことを予定している。実験のセットアップは図2の通り。この実験では光子ビームを ${}^3\text{He}$ 標的に当てることで ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を生成する。また、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成と同時に K^+ 中間子が生成される。そのためこの反応は (γ, K^+) と記述される。この入射した光子ビームのエネルギーと K^+ 中間子の運動量ベクトルを測定することで、ミッシングマス法を用い ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を同定し、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ が崩壊した際の π^- 中間子をとらえることで崩壊時間を測定、標的に光子ビームが入射した時間との差を求めることで直接的に寿命を測定する。ただし、この実験では大量の π^+ 中間子によるバックグラウンドが存在するため、 K^+ 中間子との識別をする必要性が存在する。そのため、エアロジェルチェレンコフ検出器を標的直後に置くことでデータの収集段階から、バックグラウンドの抑制を行う。

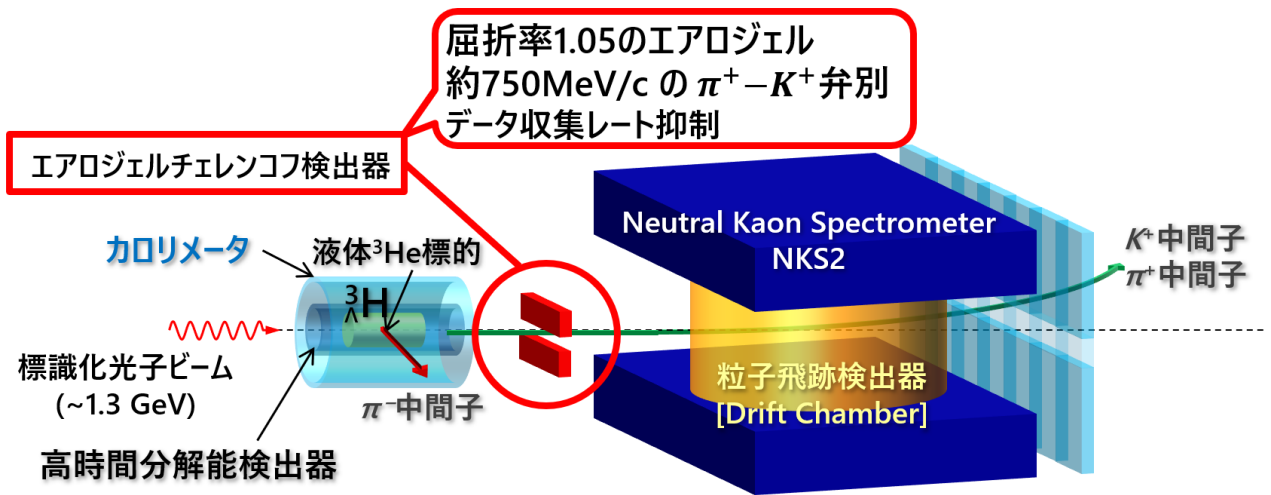


図2 ハイパー核 (${}^3_{\Lambda}\text{H}$) 寿命測定実験

1.4 ミッシングマス法

前に述べたハイパー核寿命測定実験では ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成を (γ, K^+) 反応におけるミッシングマス法を用いることで同定する。この際ミッシングマスは式(1)によって計算される。

$$M_{hyp} = \sqrt{(E_{\gamma} - E_K + M_A)^2 - (p_{\gamma}^2 + p_K^2 - 2p_{\gamma}p_K \cos \theta)} \quad (1)$$

ここで M_A は標的核子の質量であり、既知の値を用いる。 E_{γ}, p_{γ} はそれぞれ光子ビームのエネルギーと運動量であるが、光子の質量は0であるため、 $E_{\gamma} = p_{\gamma}$ である。また、 K^+ 中間子の運動量 p_K と K^+ 中間子のビーム軸に対する角度 θ は磁気スペクトロメータ(NKS2)によって測定する。

1.5 チェレンコフ検出器

チェレンコフ検出器はチェレンコフ放射の原理を利用した粒子識別をするための検出器である。通常、光が物質中を通過する際、通過する物質の屈折率を n とした場合、光の速度は $\frac{1}{n}$ となる。この、物質中の光の速度より速い速度で荷電粒子が物質中を通過する場合、荷電粒子は光を放出しながら物質中を通過する。この光をチェレンコフ光と呼ぶ。このようなチェレンコフ光の放射の原理から、適当な屈折率を持つ物質を選ぶことで、チェレンコフ光の発生の有無によって速度の異なる荷電粒子を識別することが可能になる。予定しているハイパー核寿命測定実験では K^+ 中間子と π^+ 中間子を識別するためにチェレンコフ検出器を導入する。ここで輻射体としてはエアロジェルを用いるため、この検出器はエアロジェルチェレンコフ検出器と呼称される。

第 2 章

本研究の目的

本研究は、予定されているハイパー核寿命測定実験に必要な π^+ 中間子と K^+ 中間子を識別するためのエアロジェルチェレンコフ検出器を開発することが目的である。この検出器は、図 2 に示している通り、実験セットアップ中の標的直後に導入することでデータの収集段階からバックグラウンドの抑制を行う。この際、従来の加速器実験で用いられる光電子増倍管を用いたエアロジェルチェレンコフ検出器では後ろに置く磁気スペクトロメータ (NKS2) によって磁場がかかってしまうため、正常に動作することが難しい。そのため、磁場に影響されないエアロジェルチェレンコフ検出器を開発することが本研究の最終的な目標となる。具体的な解決策としては、光電子増倍管の代わりに光の読み出しとして、磁場に対して安定した性能を持つ SiPM (浜松ホトニクス社製 MPPC) を用い、エアロジェルチェレンコフ検出器を製作することを考えている。ただし、本論文では MPPC を光検出器としたエアロジェルチェレンコフ検出器の製作及び評価の前段階として行った、従来用いられる光電子増倍管を用いたエアロジェルチェレンコフ検出器の製作及び評価に関して述べるものとする。

第3章

製作したエアロジェルチェレンコフ検出器

3.1 製作したエアロジェルチェレンコフ検出器

本研究で製作したエアロジェルチェレンコフ検出器は図5、図6で示す。まず、厚紙で箱を製作しその中に0.2mm厚のテフロンシートを敷き、エアロジェルを詰めた(図3、図4)。この際用いたエアロジェルはJapan Fine Ceramics Center製の屈折率1.05のエアロジェルであり、1枚当たりのサイズは縦110mm、横110mm、厚さ12mmである。また、用いたエアロジェルの透過率は図7の通り。エアロジェルの枚数を変えることで得られる光電子数がどのように変化するか測定を行うために、このエアロジェルが3枚、5枚、7枚入るようなサイズで3つの箱を製作した。エアロジェルを詰めた後に、箱の開口部を直接光電子増倍管の入射窓に固定した。光電子増倍管は浜松ホトニクス社製のR1250を用いた。



図3 エアロジェルを詰めるための箱

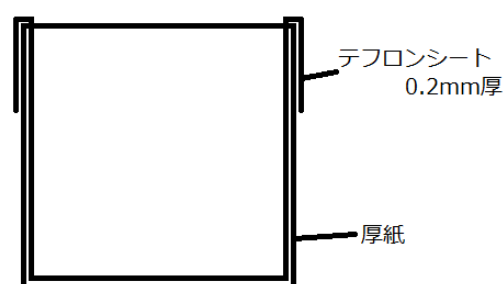


図4 エアロジェルを詰めるための箱(模式図)

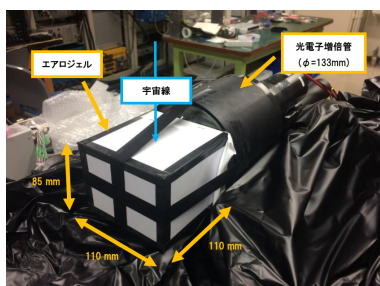


図5 製作したエアロジェルチェレンコフ検出器

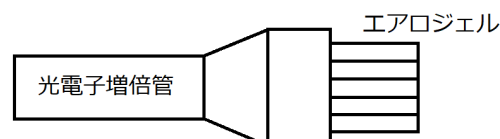


図6 製作したエアロジェルチェレンコフ検出器(模式図)

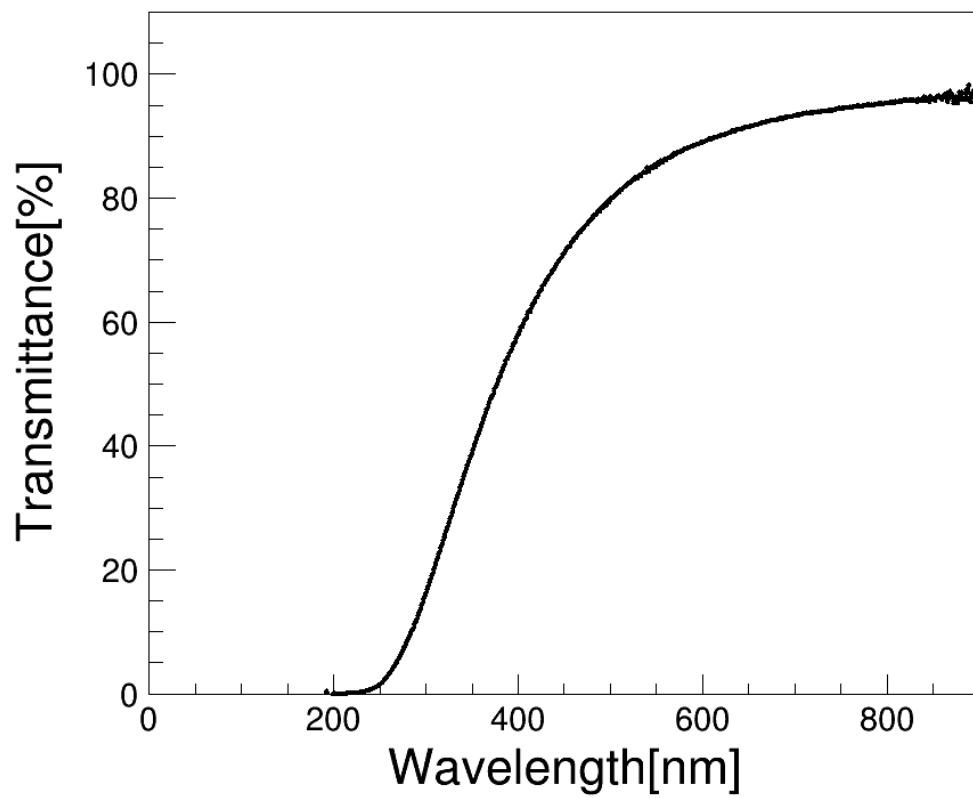


図7 エアロジェルの透過率

3.2 得られる光電子数の計算

あらかじめ製作したエアロジェルチェレンコフ検出器において得られる光電子数を計算した。まずエアロジェル内で放出される光子数の計算を行う。光子数の計算には以下の式（式 (2) 参照）を用い、今回は宇宙線、つまりは主として μ 粒子を観測することから $\beta = 0.995$ とし、波長 λ は用いる光電子増倍管の感度波長から 300～650nm とした。

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \quad (2)$$

すると、エアロジェル 1cm あたり約 68 個の光子が発生することが計算できる。エアロジェル内で放出された光子は光電子増倍管によって光電子へと変換され、信号が増幅されることになるが、この変換の際に光電子増倍管の量子効率がかかってくる。今回用いた光電子増倍管の量子効率は図 8 のようになっている。今回は大雑把に量子効率が 10% だと見積もって計算する。するとエアロジェル 1cm あたりで得られる光電子数は約 6.8 個となる。この値から今回製作したエアロジェルの厚み、3 枚、5 枚、7 枚のそれぞれの検出器から得られる光電子数を計算すると表 1 のようになる。ただし、ここで得られた値はあくまでエアロジェル内で放出された光子がすべて光電子増倍管に入射した場合に得られる最大の値であって、実験で得られる値は少なくなることが予想される。

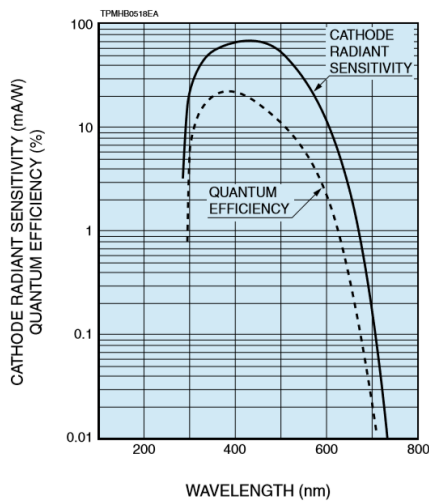


図 8 量子効率 [2]

エアロジェルの厚み	得られる最大の光電子数
3 枚	21 個
5 枚	40 個
7 枚	57 個

表 1 得られる光電子数計算

第 4 章

性能評価実験

4.1 実験セットアップ

製作したエアロジェルチェレンコフ検出器の評価を行うために、宇宙線測定を行った。この時の実験セットアップは図 9、図 10 の通り。製作した検出器の下にはシンチレーターを 2 本置き、両側から光電子増倍管で読み出すことでトリガー信号として利用した。また宇宙線測定時には製作した検出器の光電子増倍管には電圧-2400V をかけ、製作したエアロジェルが 3 枚、5 枚、7 枚の検出器のほかに、エアロジェルなし、つまりはエアロジェルの詰まっている箱のついていない光電子増倍管のみによる測定も行った。

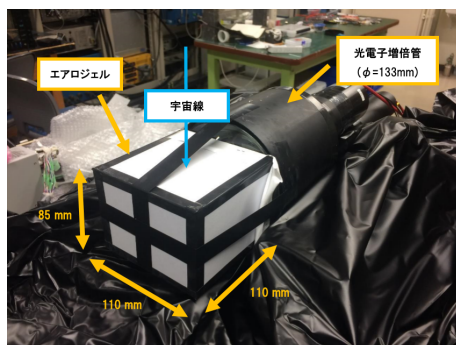


図 9 実験セットアップ

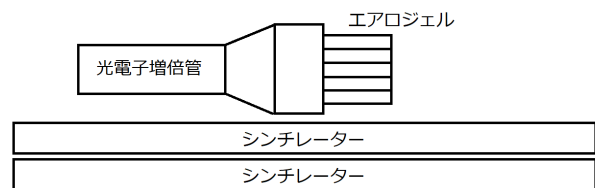


図 10 実験セットアップ (模式図)

4.2 実験結果

4.2.1 エアロジェルなし

エアロジェルなしで宇宙線を測定し、横軸に電荷を、縦軸にイベント数をとったグラフを図 11 で示す。このグラフからペDESTALが 16.3 pC に、また、拡大しガウス関数でフィッティングすることで光電子数 1 のピークが 19.6 pC にあることを求めた。このことから光電子数 1 個あたりの電荷が 3.3 pC であることが分かる。これ以降、光電子数で議論していく場合があるが、いずれも得られた信号の電荷からペDESTALの 16.3 pC を引き、光電子数 1 個分の 3.3 pC で割った値を用いている [式 (3)]。さらに、宇宙線が通った位置を横軸に、光電子数を縦軸にとり、相関をとったものが図 12 である。この時、製作した検出器の下に置いたシンチレーターの両側に光検出器を設置し、それぞれで得られた信号の時間情報の差を利用することで宇宙線が通った位置を割り出した。ここで、宇宙線が通った位置における 0 cm はちょうどシンチレーターの真ん中にあたる場

所であり、製作した検出器における光電子増倍管の入射面が上に乗っている場所である。そのため、図 12 では横軸 0 cm の位置に多数のイベントが見られているが、これは宇宙線が光電子増倍管に直接入射することによって入射面でチェレンコフ光が放射され、検出されたイベントであると考えられる。

$$\begin{aligned}
 (\text{光電子数}) &= \{(\text{電荷}) - (\text{ベデスタル})\} / (\text{光電子 1 個分の電荷}) \\
 &= \{(\text{電荷}) - (16.3\text{pC})\} / (3.3\text{pC})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

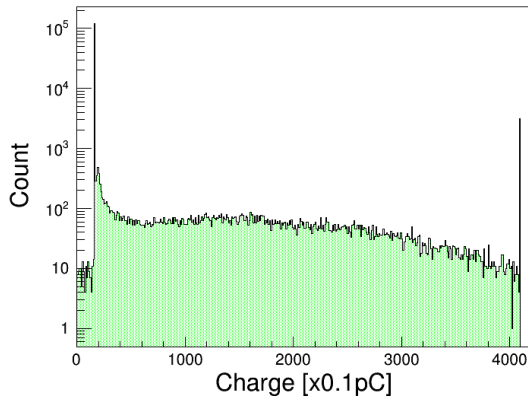


図 11 イベント数—電荷グラフ（エアロジェルなし）

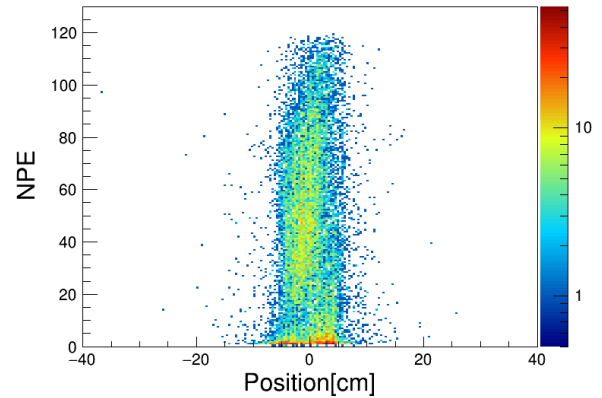


図 12 光電子数—位置相関（エアロジェルなし）

4.2.2 エアロジェル 3 枚・5 枚・7 枚

エアロジェル 3 枚、5 枚、7 枚を入れた箱を光電子増倍管に取り付けることで製作した検出器についてもエアロジェルなしの場合と同様の方法で解析を行った。これによって得られたイベント数—電荷グラフは図 13、図 15、図 17 の通り。ここではエアロジェルなしの場合との比較のために、エアロジェルなしのヒストグラムを青色で上から重ね書きしている。この際ヒストグラムの高さを合わせるためエアロジェルなしのヒストグラムにはそれぞれ、電荷が 200～420 pC の総イベント数によるエアロジェル 3 枚、5 枚、7 枚との比によるファクタをかけている。したがって、緑色で見えている部分が宇宙線がエアロジェルに入り、チェレンコフ光を発生させたイベントあると考えればよく、それ以外の部分では綺麗にグラフが重なっていることが確認できる。また、エアロジェル 3 枚、5 枚、7 枚のそれぞれについて光電子数と位置の相関をとったものが図 14、図 16、図 18 である。いずれのエアロジェルの枚数でも、先ほどのエアロジェルなしのときにとった光電子数-位置相関（図 12）と異なり、位置が 0 cm の部分だけでなくおよそ 0～15 cm の場所（図 14、図 16、図 18 の赤丸部）にも多数のイベントが見られている。これは光電子増倍管の入射面からのエアロジェルが存在する距離とほぼ一致しているため、これらのイベントは宇宙線がエアロジェルに入り、チェレンコフ光を発生させたイベントであると考えることができる。

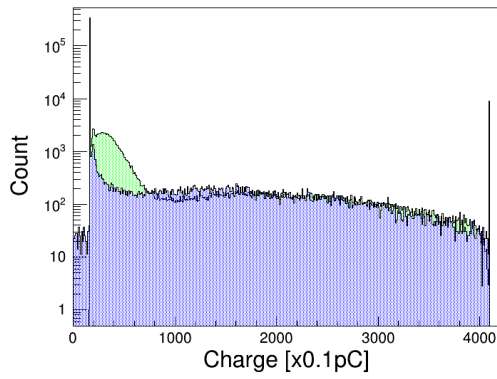


図13 イベント数—電荷グラフ（エアロジェル3枚）

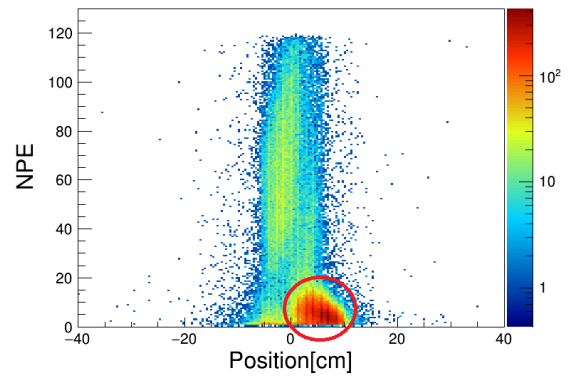


図14 光電子数—位置相関（エアロジェル3枚）

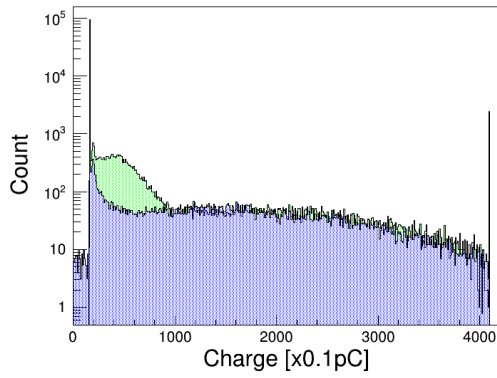


図15 イベント数—電荷グラフ（エアロジェル5枚）

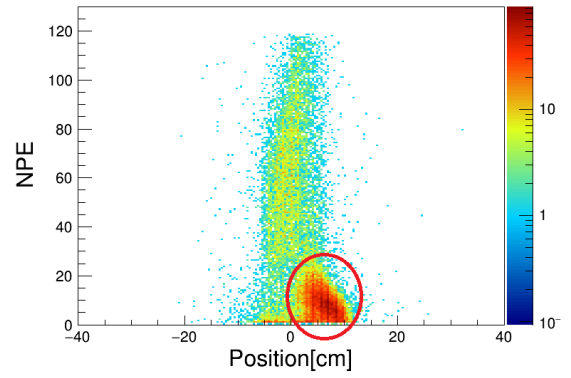


図16 光電子数—位置相関（エアロジェル5枚）

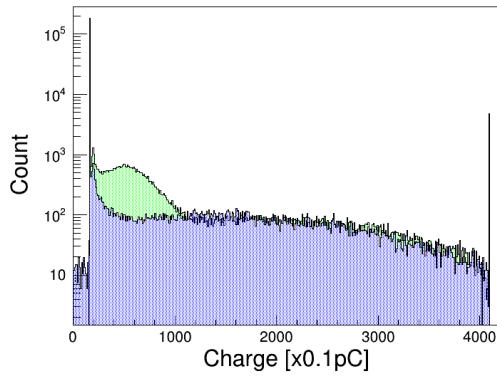


図17 イベント数—電荷グラフ（エアロジェル7枚）

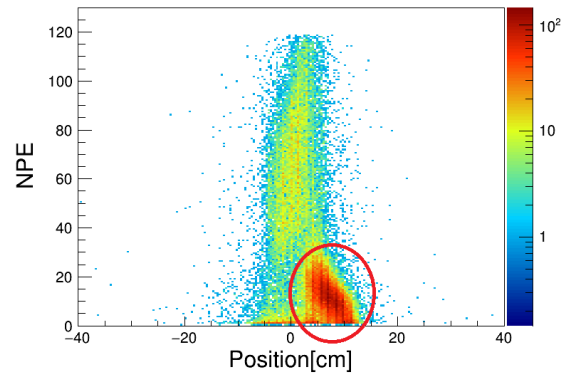


図18 光電子数—位置相関（エアロジェル7枚）

光電子数—位置相関の図から宇宙線がエアロジェルに入り、チェレンコフ光を発生させたイベントであると考えられる位置 0~15 cm のイベントを選んだ光電子数分布を図 19、図 20、図 21 に示す。この際フィッティングの関数としてはガウス関数にポアソン関数を畳み込んだ関数にバックグラウンドをガウスとして足した関数を用い、フィッティング結果としてはそれぞれ図中青い線で示している。図中上の赤い線はガウス関数で

フィッティングしたものになっており、図中の下の赤い線はバックグラウンドをガウス関数でフィッティングした線になっている。いずれの図においてもガウス関数だけでフィッティングした時よりもガウス関数にポアソン関数を畳み込んだ関数を用いたほうが綺麗にフィッティングできていることがわかる。それぞれのエアロジェルの枚数で実験によって得られた光電子数は表2の通りであり、計算によって求めた得られうる最大の光電子数に対して、実験で得られた光電子数はおよそ 20% 程度であった。20% 程度まで下がってしまった理由としては、用いたエアロジェルが完全に透明ではないために、エアロジェル内で放出された光子が何度か反射し光電子増倍管に入射する前に減衰してしまったことが考えられる。そのため、今後検出効率の向上が必要となった場合には、今回の実験で用いたエアロジェルよりも透明度の高いエアロジェルを利用する、もしくはエアロジェル内で放出された光子をより効率よく光電子増倍管に入射させるような検出器の構造に改良する等の必要があると考えられる。また、縦軸に光電子数、横軸にエアロジェルの枚数を取り、プロットすると図 22 のようになる。この図から光電子数とエアロジェルの枚数におおよその線形性があることがわかる。

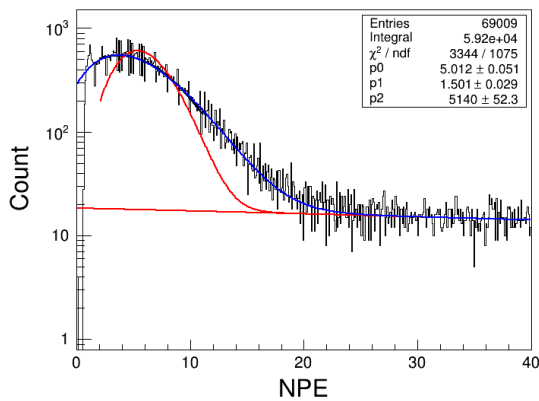


図 19 光電子数フィッティング (エアロジェル 3 枚)

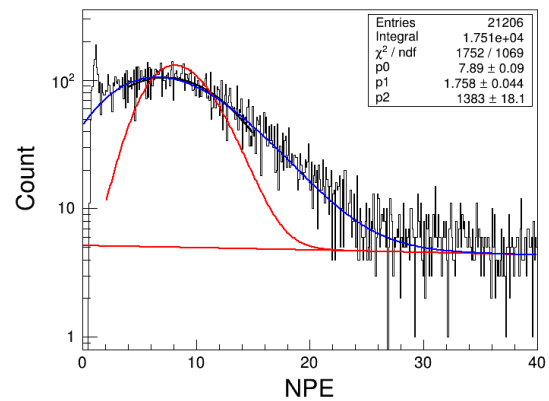


図 20 光電子数フィッティング (エアロジェル 5 枚)

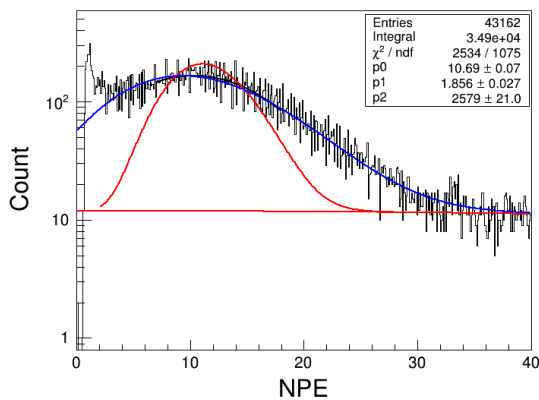


図 21 光電子数フィッティング (エアロジェル 7 枚)

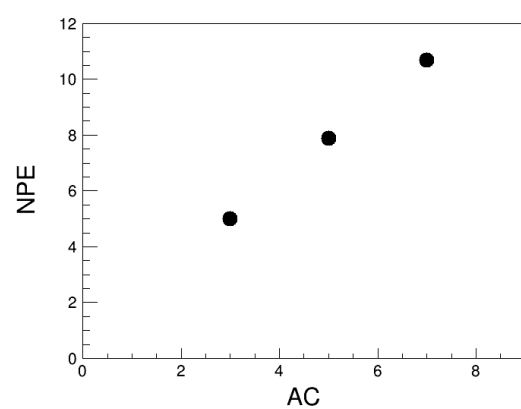


図 22 光電子数とエアロジェルの枚数の関係

エアロジェルの厚み	実験で得られた光電子数 [個]	計算で得られた最大の光電子数 [個]	割合
3 枚	5.01	21	23.9%
5 枚	7.89	40	19.7%
7 枚	10.69	57	18.8%

表 2 エアロジェルの枚数と実験と計算による光電子数比較

第 5 章

まとめと今後

ハイパー核寿命測定のために磁場の影響を受けないエアロジェルチェレンコフ検出器の開発を行った。光電子増倍管用いたエアロジェルチェレンコフ検出器をエアロジェルの枚数（厚み）を変え、3 種類製作し宇宙線測定によって性能を評価した。その結果として、エアロジェルの枚数 3 枚、5 枚、7 枚に対して、光電子数 5.01 個、7.89 個、10.69 個を得ることができ、理論的に得られうる最大の光電子数に対して約 20% の検出効率を得た。また、エアロジェルの枚数と得られた光電子数にはおよそ線形性があることを確認した。このことから、今後、実際に導入する検出器を製作する際に、検出する光電子数を増やさなければいけない場合にエアロジェルの枚数を増やすことで改善することができるであろうことが考えられる。

また、今回得られた結果はあくまで本来製作しなければならない磁場の影響を受けない検出器の前段階として製作した従来と同じ検出器による結果である。今後、光電子増倍管の代わりに MPPC を光の読み出しとして用いる検出器を製作し、実際の実験に用いることができるかどうか評価することが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方のご指導・ご助力をいただきました。深く感謝いたします。指導教官である中村哲教授には、丁寧かつ熱心にご指導いただきました。毎週のミーティングでは私の研究の進捗報告に対して、必ずアドバイスをいただきました。本当にありがとうございました。今後ともご指導よろしくお願いいたします。永尾翔助教には本研究の方針から、実験手法や解析手法など何から何まで大変お世話になりました。授業準備やご自身のお仕事で忙しい中、熱心にわかりやすく私の初歩的な疑問にも回答してくださったこと、研究の相談に乗ってくださったこと、大変感謝いたしております。またその他にも田村裕和教授、金田雅司助教、後神利志助教、三輪浩司助教、本田良太郎助教には、ゼミやミーティング、研究発表等の場で様々なアドバイスをいただきました。ありがとうございました。同研究グループの先輩である外山裕一氏、相田元気氏、竹内大貴氏、室井佑太氏、小西由浩氏、板橋浩介氏には、ミーティングや日々の研究生活を通して様々なアドバイスをいただくとともによく声をかけていただき、それが研究室の生活の中で励みになっておりました。感謝申し上げます。同輩の上松武氏、下谷豪史氏、菅原和哉氏、河原健太氏、酒井大輔氏、小湊和也氏とは同じ居室で1年間共に過ごしました。研究や大学院入試のための勉強等で疲れ、苦しい時でも、皆とともに過ごすことで楽しく過ごすことができたと思っています。特に同研究グループの上松氏とは研究内容についてよく議論し、お互いにハイパー核研究に関して理解を深めあうことができました。最後に、ここに書ききることのできなかった方々を含め、本研究に関わっていただいたすべての方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Yifei Xu et al. Proc. 17 (2017) 021005
- [2] R1250 データシート 浜松ホトニクス https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1250_TPMH1213E.pdf (2010)