

H28 年度 物理学課題研究 P2

霧箱による陽電子の観測

京都大学理学部 4 回生

片山裕太 中野雄介

2017 年 3 月 3 日

目次

1	はじめに.....	3
2	理論的背景.....	3
2.1	反粒子.....	3
2.1.1	Klein-Goldon 方程式.....	3
2.1.2	Dirac の空孔理論.....	3
2.1.3	陽電子の発見.....	4
2.2	霧箱.....	4
2.2.1	霧箱の原理.....	4
2.2.2	Wilson 霧箱.....	4
2.2.3	拡散霧箱.....	4
2.2.4	磁場中の電子の飛跡.....	5
3	実験装置と実験方法.....	6
3.1	霧箱の製作.....	7
3.2	霧箱の動作方法.....	8
3.3	α 線の観測.....	9
3.4	β 線の観測.....	9
3.5	霧箱内温度.....	9
3.6	β 線を磁石で曲げる.....	11
4	解析・考察.....	12
4.1	電子・陽電子の識別.....	12
4.2	エネルギースペクトル.....	12
4.2.1	磁場の測定.....	13
4.2.2	曲率半径の測定.....	14
4.2.3	^{90}Sr のエネルギー分布.....	15
5	まとめ.....	16
6	謝辞.....	17
7	参考文献.....	17

1 初めに

本実験の目的は、理論上は存在するが一般にはなかなか触れられない反粒子の存在に触れ、視覚的に確認することである。

本実験では、電子の反粒子である陽電子を観測の対象として選び、観測方法として霧箱を選択する。

2 理論的背景

2.1 反粒子

2.1.1 Klein-Gordon 方程式

相対論的なエネルギーと運動量の関係式

$$E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2 \quad (1)$$

に対して、演算子の置き換え

$$E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \mathbf{p} \rightarrow -i\hbar \nabla \quad (2)$$

を行うと Klein-Gordon 方程式(3)を得る。

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \phi = m^2 \quad (3)$$

D'Alembert 演算子□を用いると簡単に表せる。

$$(\square^2 + m^2)\phi = 0 \quad (4)$$

自由粒子の解

$$\phi = N \exp(i\mathbf{x} \cdot \mathbf{t} - iEt) \quad (5)$$

を代入すると、

$$E = \pm \sqrt{\mathbf{p}^2 + m^2} \quad (6)$$

のエネルギー固有値を得る。

これは許されるエネルギーとして正のエネルギーに加えて負のエネルギーも現れている。ここから生じる負のエネルギーの取り扱いによる困難が生じた。

2.1.2 Dirac の空孔理論

Dirac 方程式の導入によって、負のエネルギー解が現れた。この問題に対して Dirac は Pauli 排他原理を仮定して解釈した。全ての負のエネルギー状態は既に占有されているものとし、真空を無限個の

$E < 0$ の電子で埋め尽くされていると考える。そうすると正エネルギーの電子は排他原理によって負のエネルギー順位に落ちることができず、正のエネルギーで安定する。一方で、負エネルギーから正エネルギーの状態へ電子が励起すると空孔ができる。その空孔による粒子が正の電荷とエネルギーを持った電子の反粒子として観測され、これを陽電子と考えることができる。

2.1.3 陽電子の発見

以上で述べたように、Dirac は陽電子の存在を示唆する理論を考え出した。その後、1932 年に Anderson による霧箱を使った実験で電子と逆符号の電荷と同じ質量を持つ粒子が観測されたことによって、陽電子の存在が認められた。

2.2 霧箱

2.2.1 霧箱の原理

霧箱とは、1897 年に Charles Wilson が発明したもので、霧を発生させた気体の中に荷電粒子が通過すると飛跡ができる装置である。

過飽和状態の気体の中に荷電粒子を入射させると気体分子のイオン化が起こる。そのイオンを核に霧ができ、飛跡として観測できる。(図 2.1)

過飽和状態の作り方は大きく分けて二つあり、断熱膨張と温度勾配によるものである。

2.2.2 Wilson 霧箱

断熱膨張を用いて過飽和状態を作り出す。箱の中の空気を減圧して箱の中の温度を下げる。温度が下がると飽和蒸気量が少なくなるので箱の中が一瞬過飽和状態になる。この時に放射線が通ると飛跡が見える。欠点として、一回の観測で見える時間が短く、一度見た後には再度長時間の準備が必要。

2.2.3 拡散霧箱

箱の中に温度勾配を作ることで過飽和状態を作り出す。上部を温め、下部を冷やすことで蒸気が冷やされて下へ向かい、液体となる。その下りていく途中の区間に過飽和区間が存在する(図 2.2)。メリットとしては一度で見える時間が長く、準備も容易なので今回はこちらを採用する。デメリットとしては過飽和区間が限られた場所にしか存在しないという点がある。

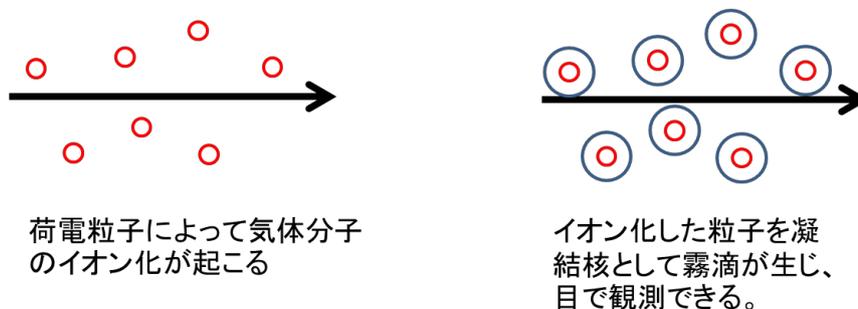


図 2.1 霧箱の原理

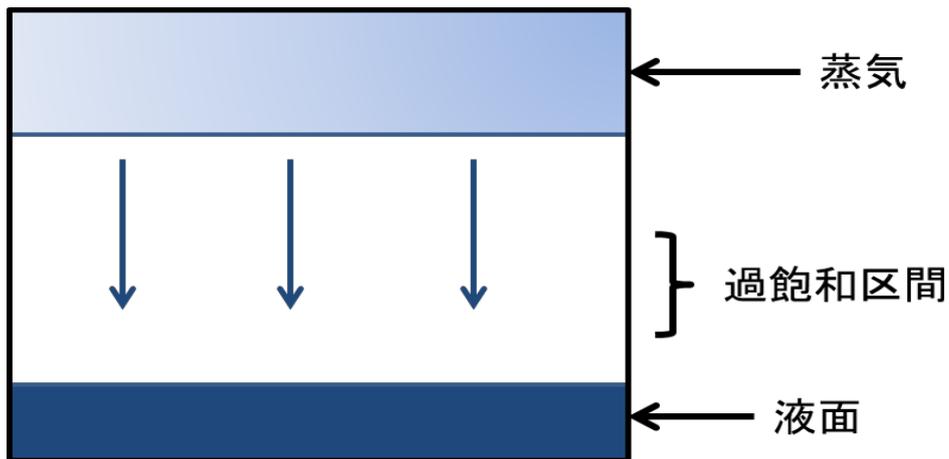


図 2.2 拡散霧箱の仕組み

2.2.4 磁場中の電子の飛跡

電荷 $-e$ [C]の電子が磁場 B [T]から受ける力は、磁場に対して垂直な方向の電子の速度 v [ms^{-1}]とすれば

$$F = -ev \times B \quad (7)$$

となる。この時、電子は円軌道を描く。円運動をするので、半径 r [m]、電子の質量 m_e [kg]、光速 c [ms^{-1}]とすれば、円運動なので

$$m_e \frac{v^2}{r} = evB \quad (8)$$

となる。ここで今知りたいのは（非相対論的な）運動量 p [$\text{kg}\cdot\text{ms}^{-1}$]なので

$$\begin{aligned} pc &= m_e v \cdot c \\ &= eBrc \\ &= 3 \times 10^8 rB [\text{eV}] \\ &= 300rB [\text{MeV}] \end{aligned} \quad (9)$$

となり、曲率半径と磁場が分かれば電子のエネルギーを求めることができる。

ここでは電子の場合を考えたが、陽電子の場合は電荷の符号が逆になるので受ける力の向きが逆になり、反対方向に曲がる。よって、電子の曲がる方向を調べれば電荷の正負を判別することができる。

3 実験装置と実験方法

3.1 霧箱の製作

図 3.1 に霧箱の概略図を示す。

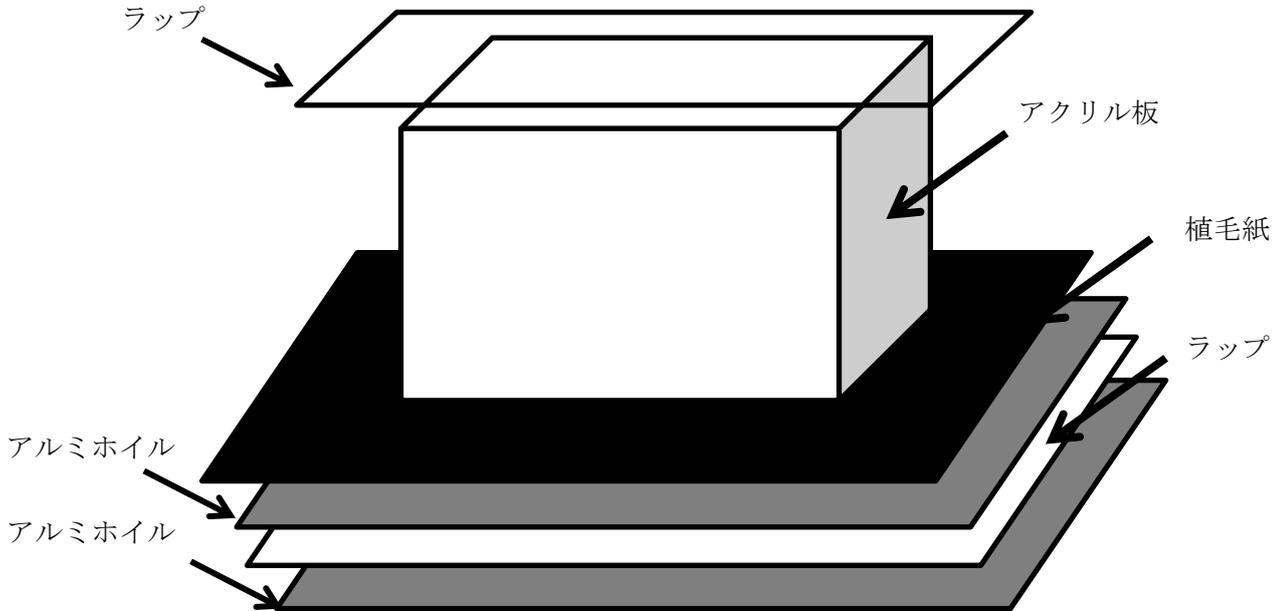


図 3.1 霧箱の概略図

今回の実験では拡散霧箱を作製した。名古屋大学理学研究科のF研のHP (<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/ippan/hcloudchamber/make/>)にある高感度霧箱の作り方を参考に霧箱を作製した。

作成の手順としては、まず 10 cm×10 cm で厚さ 2 mm のアクリル板 4 枚を用い箱の外枠を作る。次に、底に植毛紙を敷き、その下からアルミホイル、ラップ、アルミホイルの順に底を包む。箱の上部には脱脂綿を 4 辺に伝わせテープで固定する。その上からラップでふたをする。

各部位の役割は以下のとおりである。

- アクリル板…霧箱の外枠を作る。温度勾配を作るためにはなるべく熱伝導率が低いもの(具体的にはガラス等)の方が良いが、加工のしやすさや取り扱いの観点からアクリルを選んだ。
- ラップ(ふた)…内部の蒸気を外に逃がさないためのもの。
- 脱脂綿…霧箱の上部に蒸気を充満させてイオン核を供給するためのもの。
- 植毛紙…光の反射を防ぎ飛跡を見やすくするもの。
- アルミホイル、ラップ…上からアルミホイル、ラップ、アルミホイルの順に層状に重ね、下部に空気の層を作り保温性を高めるためのもの。

霧箱の製作途中の写真は図 3.2 のとおりである。

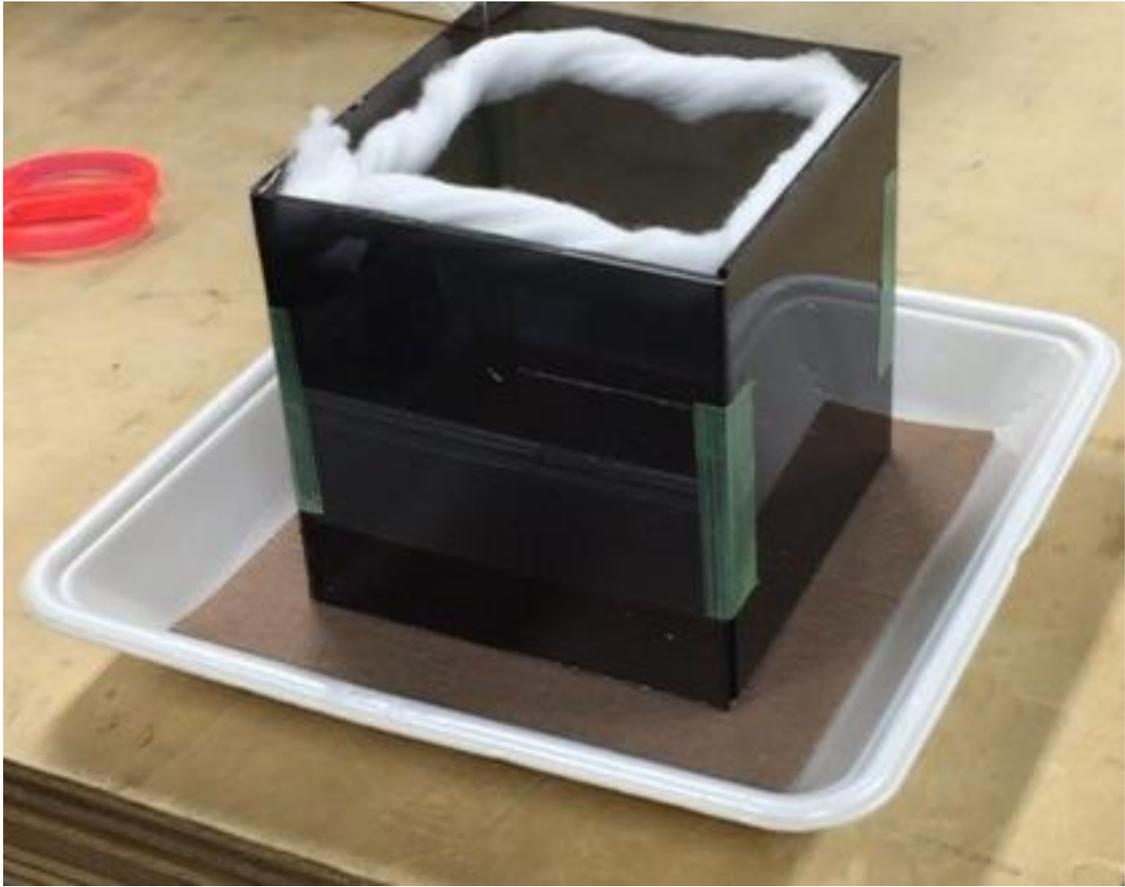


図 3.2 実際に製作した霧箱

3.3 α 線の観測

まず一番観測が簡単な α 線の観測を行った(α 粒子は+2の電荷を持ち、粒子としては重くて遅いので相互作用しやすく太い飛跡として見えやすい)。この時、線源にはトリウム入りのタングステン棒を用いた。短く切ったタングステン棒をペットボトルのキャップに固定し、霧箱の中に入れて冷却を開始した。このとき、観測できる温度に冷えるまで時間がかかることに注意する(常温から観測温度まで10~20分程度)。また、液体窒素の量についても入れすぎると霧箱が冷え切ってしまう、エタノールが凍ってしまうので注意が必要である。今回の実験では一度にトレイから溢れない程度(およそ200 ml)使用した。

3.4 β 線の観測

先程の霧箱と同じ材料で大きさを一辺15 cmの立方体にしたものをもう一つ作り、それで実験を行った。 β 線は α 線と比べて $\frac{dE}{dx}$ が小さく(空気中で α 線はおよそ1 MeV/cm、 β 線はおよそ3 KeV/cm)、飛跡がとても見づらい。それらの理由で霧箱中のエタノール濃度を上げるために先ほどよりも多い、250 mlのエタノールを霧箱内に注いだ。この時、線源には ^{90}Sr (β 線源)と ^{22}Na (β^+ 線源)を用いた。この時にエネルギーロスを少なくするためにアクリル板に直径3 mmの穴をあけ、そこをラップでふさいで窓を作った(^{22}Na 使用時のみ)。

3.5 霧箱内温度

β 線の飛跡が見えるまで霧箱の過飽和領域(液面から5 mm程)の温度変化を計測した(図3.4)。-15°Cを下回ったあたりから徐々に飛跡が見え始め(16分)、はっきりした飛跡が見え始めるのは-20°Cを下回ったあたりからだった(20分)。その後-30°C辺りまでは安定して飛跡が見え続けたが、-40°C辺りを下回ると飛跡が見えなくなるようだった。温度が折り返してゆっくりと上がっていく過程では-15°C辺りまで飛跡が見え続けた。

そこで、-20°C~-30°C辺りを飛跡が見える温度の目安として実験することにした。その結果、飛跡を20分程度観測し続けることができた。

温度計は図3.5のものを使用した。霧箱上部のラップの隅に穴をあけ、そこに温度を測定する棒を通し先端を液面から5 mm程度浮かせて固定した。ラップの穴は空気が漏れないようにラップで一部覆った。

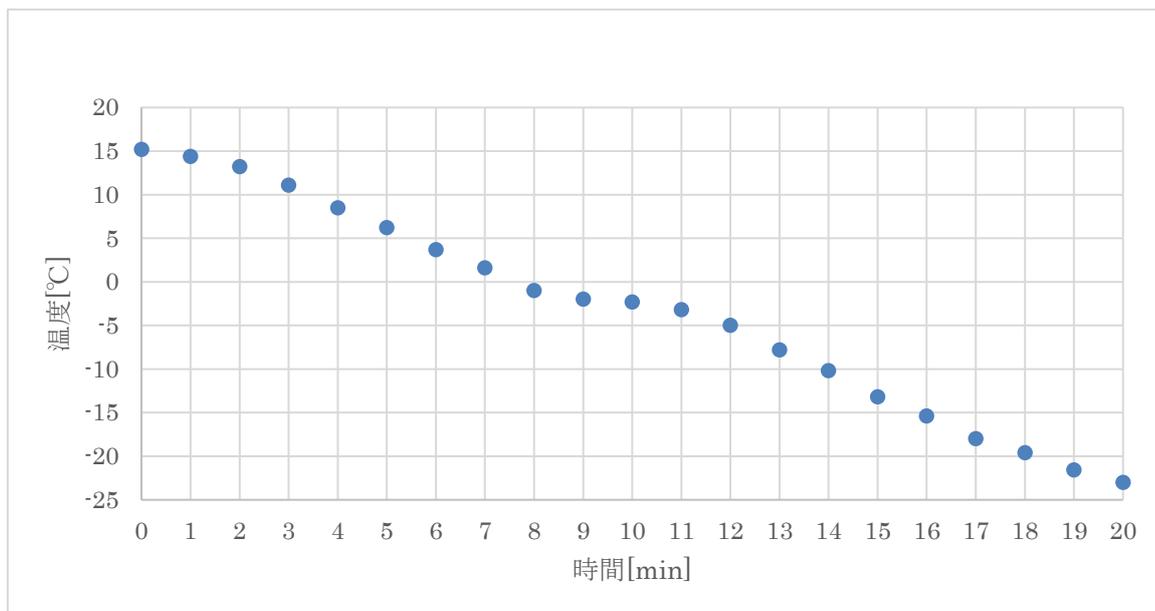


図 3.4 霧箱の温度時間変化（過飽和領域）



図 3.5 使用した温度計（エスコ EA701MA）（測定温度 -50°C ～ 150°C 、温度分解能 0.1°C ）

3.6 β 線を磁石で曲げる

線源を用いて飛跡を見ることができたので、磁石を用いて β 線を曲げ ^{90}Sr のエネルギースペクトルを測定するための実験を行った。この時磁石は直径5 cm、厚さ1 cmのネオジウム磁石を用いた。その磁石の上に霧箱を直接おいて β 線を曲げた。また、周囲の環境放射線を減らすために厚さ5 cmの鉛で囲い、その鉛の一部を取り除き線源を近づけて観測を行った。



図 3.6 霧箱セッティング

4 解析・考察

4.1 電子・陽電子の識別

磁場 B 中を電荷 q の荷電粒子が速度 \mathbf{v} で通過すると、粒子は Lorentz 力 $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の力を受ける。電荷の正負が異なれば力を受ける向きも異なるので、軌道の曲がる向きから電荷の正負を判別することができる。この方法によって、電子と陽電子を識別した。

以下の写真(図 4.1)は磁場がかかった霧箱内を電子と陽電子が通過した際の軌跡である。線源としては ^{22}Na と ^{90}Sr を用いた。



図 4.1 磁場下で曲がっている β 線と β^+ 線の飛跡(左が線源 ^{22}Na で右が線源 ^{90}Sr 。共に線源は左側に配置し磁場は鉛直上向き。)

鉛直上向きの磁場に対して左から入射してきた放射線が左の写真では反時計回り、右の写真では時計回り、と向きが異なることが分かる。このことから電子と陽電子を観測し識別することができたといえる。

4.2 エネルギースペクトル

磁場 $B[\text{T}]$ 中を走向する電子(陽電子)については運動量 $p[\text{MeV}/c]$ 、飛跡の曲率半径 $r[\text{m}]$ の間に前述した $pc = 300rB$ (式 9)の関係式が成り立つ。飛跡から曲率半径を求めることによって電子の運動量、ひいては電子の運動エネルギーが求められる。ここでは相対論的エネルギーを運動エネルギーと静止エネルギーの和として以下の近似を用いて計算する

$$E + m_e c^2 = \sqrt{(pc)^2 + (m_e c^2)^2} \quad (10)$$

$$\therefore E = \sqrt{(300rB)^2 + (m_e c^2)^2} - m_e c^2 \quad (11)$$

従って、磁場と曲率半径が定まれば、運動量あるいは運動エネルギーを算出することが出来る。

4.2.1 磁場の計測

実験ではネオジウム磁石を用いており、磁場は空間で異なる値を持っている。この解析では磁場を一様なものとして計算しているため、各点で磁場を計測したのち平均した値を一様磁場の強さとする。飛跡の現れる過飽和領域の高さを 1.5 cm として、上面と底面で各点の磁場の強さをガウスメーターで測定した。(図 4.2)

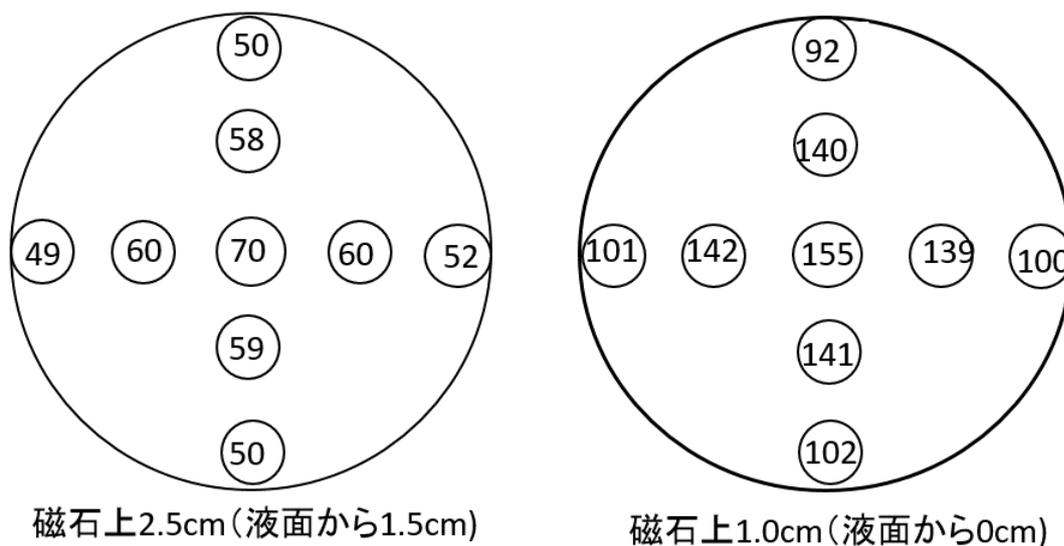


図 4.2.磁場の分布[mT]

平均値 90.0 mT を一様磁場の強さとして解析を進めていく。なお、空間的なばらつきがあり、上面と底面では磁場の強さに 2 倍近くの差があるので、一つの目安として捉えるべきだろう。

4.2.2 曲率半径の測定

今回ビデオ撮影した動画の中から、曲がっている飛跡の画像を抜き出し、各飛跡に対して円をフィッティングする。今回の解析では `jw_cad` という製図用のフリーソフトを使用した。



図 4.3 円を飛跡にフィッティングした一例（線源は ^{90}Sr で赤い線が飛跡、青い円はフィッティングした円。）

飛跡上の適当な 3 点を選ぶと円を描ける機能があるので、その機能を用いて円とみなせる飛跡の部分に円をフィッティングした。円をフィッティングしたら画像内における曲率半径が表示されるので、現実の大きさに換算する。この方法によって各飛跡に対する曲率半径を得る。

4.2.3 ^{90}Sr のエネルギー分布

これまで説明したように磁場 B と各飛跡に対する曲率半径が求まったのでエネルギーを算出することができて、得られたヒストグラムを図 4.4 に示す。ここでは 30 分の動画に対して、磁場領域内で反時計回りに曲がっている飛跡を解析対象とした。(大きく散乱している飛跡や不明瞭な飛跡は除いた。)

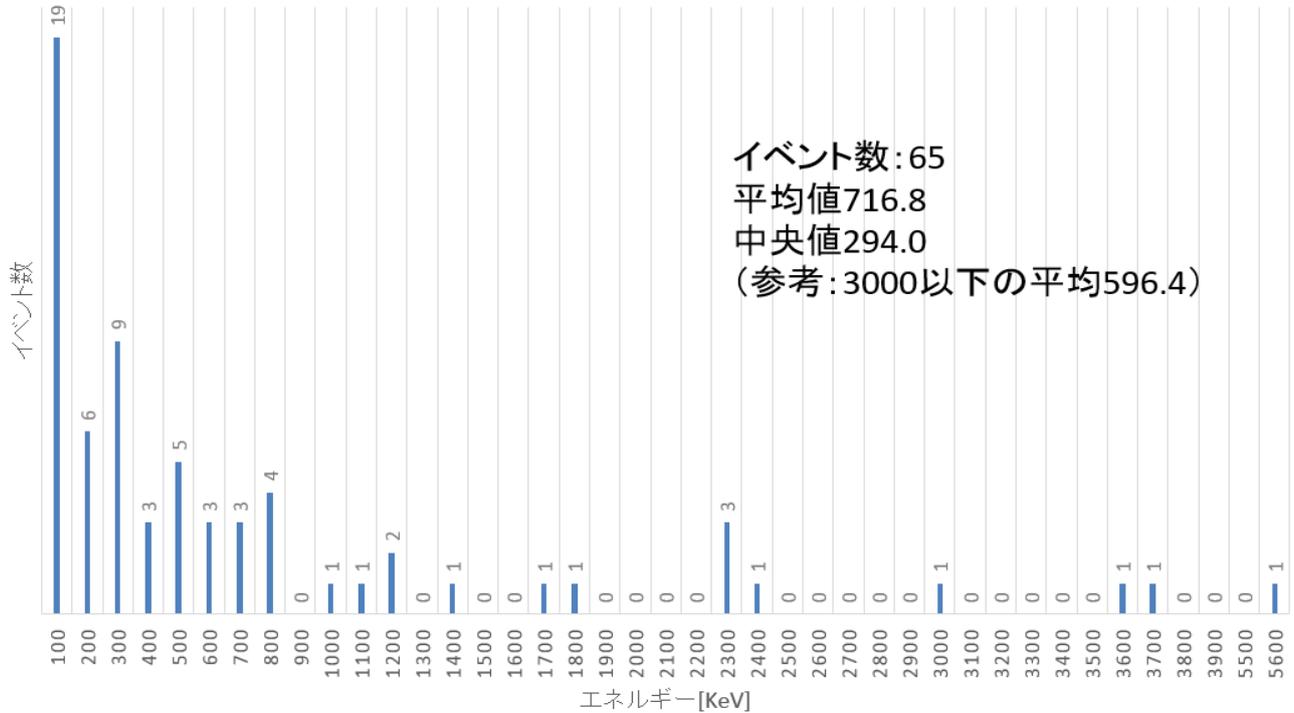


図 4.4 ^{90}Sr エネルギースペクトル[KeV]

図 4.4 から高エネルギー領域のものが少ないが、おおよそ連続的であることが分かり、スペクトルの概形を窺い知ることができた。低エネルギー側に偏った分布になっているのは、厚さ 2 mm のアクリルを通過したためにエネルギーが低下した原因の他、高エネルギーの飛跡を霧箱の感度の問題から検出しづらい可能性（その傾向は実際に見られた）、磁場の強度を低く見積もってしまった可能性、直線的な飛跡の正確な曲率の計算が難しい点が理由として挙げられる。

今回の磁場には空間的なばらつきがあり、上面と底面では 2 倍近く磁場の強さが異なるため、飛跡の通過した高さによってはエネルギーも 2 倍程度異なる。動画撮影は鉛直方向からのみで、実際には観測できた飛跡の通過点が低い（磁場が強い）ものがあつたためにエネルギーを低く見積もってしまった可能性がある。

またエネルギーが大きく外れているものもあつたが、直線的で曖昧な飛跡を無理に計算したことと、飛跡が実際には高い領域を通過していた可能性が考えられる。

曲率半径の測定においては、低エネルギー側では散乱の効果が無視できないことや、高エネルギー側では飛跡が霧箱内で見えづらい、また直線的な飛跡なので正確な計算が困難、磁場のばらつきがあるという問題があつた。これらのことを考慮すると、正確なエネルギースペクトルを計算できたというよりも、おおまかな目安として分布を検討できたと考える方が妥当だと思われる。

5 まとめ

本実験において当初の目的であった、 α 線、 β 線を見る、そして陽電子の発見ということは達成できた。それに付随して、線源由来の β 線のおおよそのエネルギーを測定することもできた。

本実験の反省点としては以下のことが挙げられる。

- 霧箱の最適化

霧箱の材質を熱伝導率の低いものにすれば飛跡の見える時間が延び、観察が容易になったのではないか。また霧箱の亚克力板は互いにテープで固定しただけであったので気密性の問題や耐久面の問題もあるのではないかと思われる。撮影するに当たり、光の反射も問題に上がったので、植毛紙を変えることで抑えられた可能性がある。

- 霧箱の動作確認

α 線を用いて霧箱の動作を確認するまでが長く、手間取ってしまった。冷え切るまで最大20分程度、温度にして -20°C （過飽和領域）を下回るまでなかなか見えないことに注意する。

- 環境放射線の除去

霧箱の周囲を鉛で囲って環境放射線の除去に挑んだが、四方を囲うだけではそれほど効果は得られなかった。上部も囲うことでどれだけの効果があるのかはわからないが、セッティング次第ではもう少しその効果を抑えられた可能性がある。

- 高エネルギーの飛跡

より高エネルギーの磁石を用いる、もしくは大きな霧箱を用いることでより正確なエネルギーを計算できることが期待されるが、実際のところ今回用いた永久磁石は比較的強力なものであり、これ以上の磁場を用いるのであれば十分に安全に気を付けて行わなければならない。霧箱を大きくすることで観察できる範囲は広がるが、一回の実験にかかる時間や準備が大変な上に、取り扱いが大変になると考えられる。

- 霧箱の感度

高エネルギーの β 線の飛跡が見えづらいのではないかという傾向は飛跡ごとに対して多少見られたが、解析自体に曖昧さがあったので検証しきれなかった。

- 磁場の一様性

実際の磁場の測定にはばらつきがあったが、一様であることを仮定して計算した。液面から過飽和領域の高さは測定したが、高さによっては飛跡にかかる磁場が最大2倍程度異なる点を考慮していなかった。水平方向からも撮影すれば飛跡の通過領域をより限定することや、飛跡毎の通過点を特定することも可能かもしれない。しかし環境放射線の遮蔽の問題もあるため難しいかもしれない。

6 謝辞

今回の実験に当たり多くの方に助力いただきました。中家教授にはご多忙の中、部屋に顔を出してもらい多くのアドバイスや経験談をいただきました。畑教授には理論ゼミで親切丁寧にご教授していただきました。隅田助教には実験の細かいところから教えていただき、ありがとうございました。TA の篠原さん、中村さんのお二人には常に頼れる相談役として実験をサポートしていただきました。この場を借りて皆様に心より感謝を述べたいと思います。

7 参考文献

- Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, W.R.Leo, Springer-Verlag
- 名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理系 F 研高感度霧箱を作ろう (<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/ippan/hcloudchamber/make/>)
- サイエンスの森 霧箱の原理・作り方 (http://sciwood.com/kiribako_science/betasen-mieru-kiribako/)
- うみほしの霧箱研究室 (<https://www.umihoshi.com/index.php>)
- 原子核物理の基礎 (6) 放射線と物質の相互作用 (http://www.rist.or.jp/atomica/database_bun.html)
- エスコデジタル温度計 (<https://www.monotaro.com/p/0356/4486/>)