

霧箱による陽電子の観測

2016年度 P2発表

2017 2/24

片山裕太

中野雄介

発表のアウトライン

- 初めに
- 理論的背景
 - 反粒子の歴史的な解釈
 - 霧箱の原理
 - 運動量測定
- 実験過程
 - α 線観測
 - β 線観測
 - 磁場中の β 線の飛跡
- 解析 考察
- 終わりに

はじめに

- 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。
- 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。

理論的背景

反粒子

電子と同じ質量、スピンをもち、電荷などの正負を持つ数の符号が逆の粒子。

- Klein-Gordon方程式

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 t} + \Delta^2 \phi = m^2 \phi$$

の解

$$\varphi = N e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{x} - iEt}$$

この時にエネルギーは

$$E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}$$

となり負のエネルギーが式に現れる

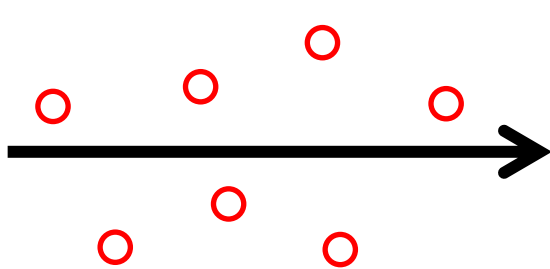
Diracの空孔理論

- 先程の負のエネルギーの粒子を受けて、Diracが「真空とは、負のエネルギーの電子が完全に満たされた状態である」という理論を考え出した。(1930)
- 真空にエネルギーを与えると $E < 0$ の電子が励起してholeができ、これが電荷 $+e$, エネルギー $-E$ の反粒子としてふるまう。
- 実際に1932年、陽電子がAndersonによって陽電子が発見される。

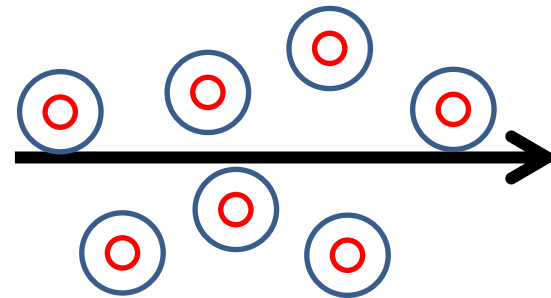
この陽電子を実際に見てみたい！

霧箱の仕組み

- 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



荷電粒子によって気体分子のイオン化が起こる



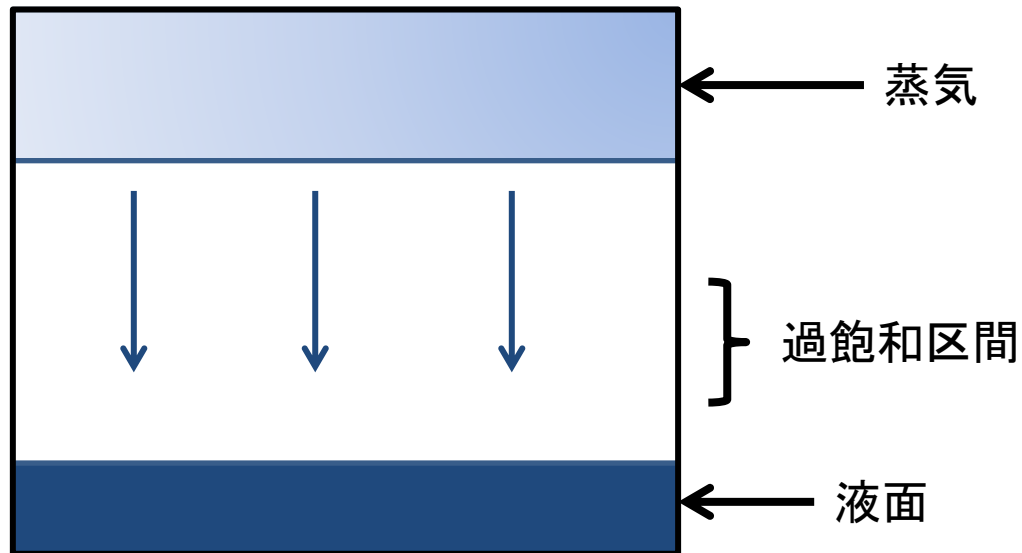
イオン化した粒子を凝結核として霧滴が生じ、目で観測できる。

Wilson霧箱と拡散霧箱

- Wilson霧箱
 - 断熱膨張を用いて過飽和状態を作り出す。一回の観測で見える時間が短く、一度見た後には準備が必要。
- 拡散霧箱
 - 温度勾配を作ることで過飽和状態を作り出す。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。

拡散霧箱の仕組み

- 容器内の上部を高温に、下部を低温にして温度勾配を作り、上部からアルコール等の蒸気を満たす。
- 上部に充満した蒸気は低温で冷やされ、下部に拡散され液体になるが、その間で過飽和状態になる区間が存在する。



運動量測定

- 磁場中を進む電子はローレンツ力を受けて曲がる。磁場の強さと曲率半径を求めることで運動量を測定することができる。

電子には以下の式が成り立つ

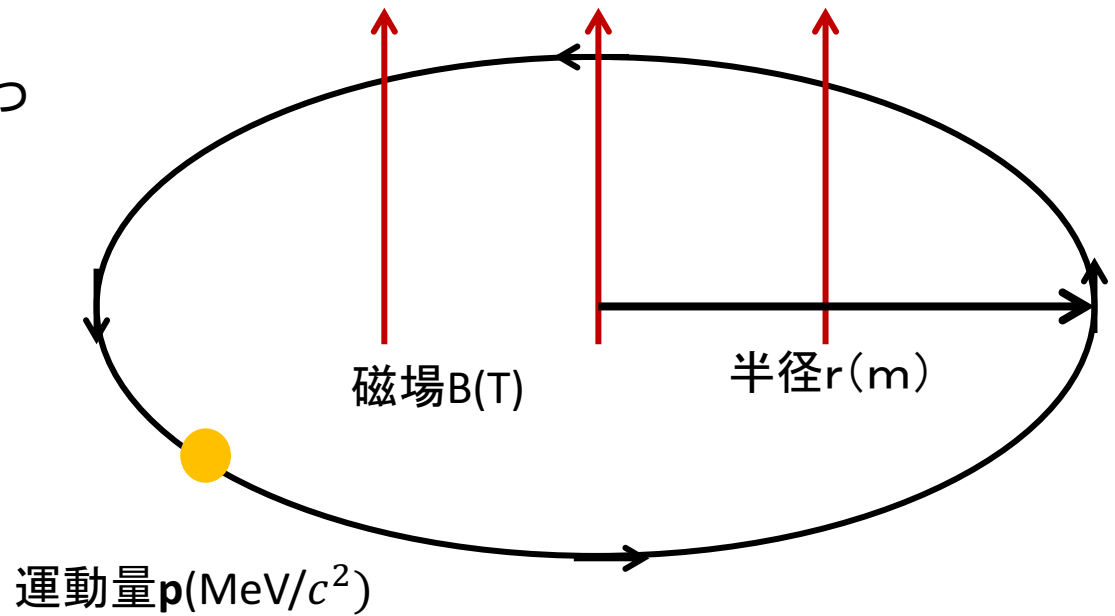
$$pc = 300rB$$

p:運動量[MeV/c²]

r:半径[m]

B:磁場[T]

c:光速[m/s²]



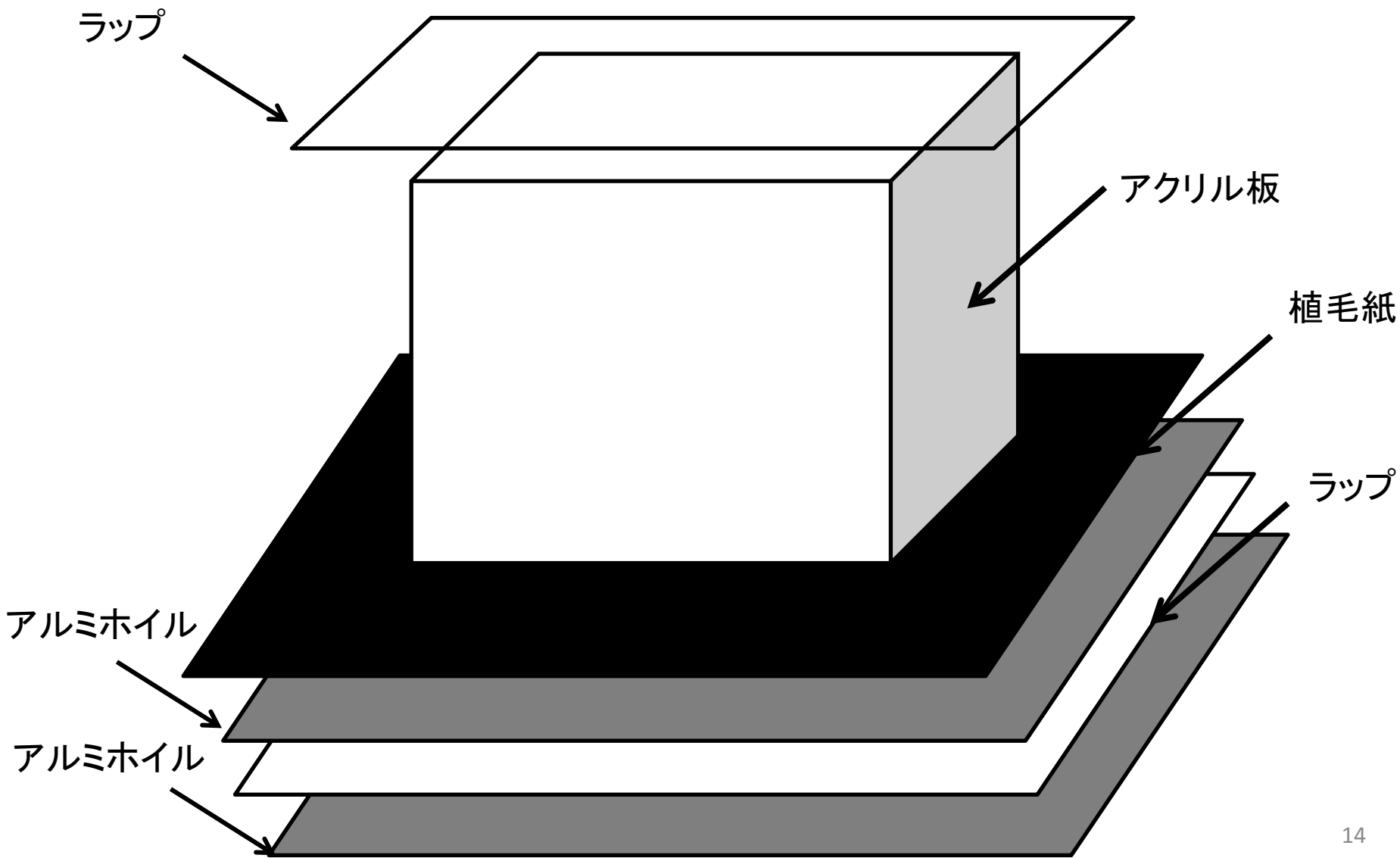
実験の流れ

1. α 線の飛跡を観測する
2. β 線の飛跡を観測する
3. β 線を磁石で曲げる

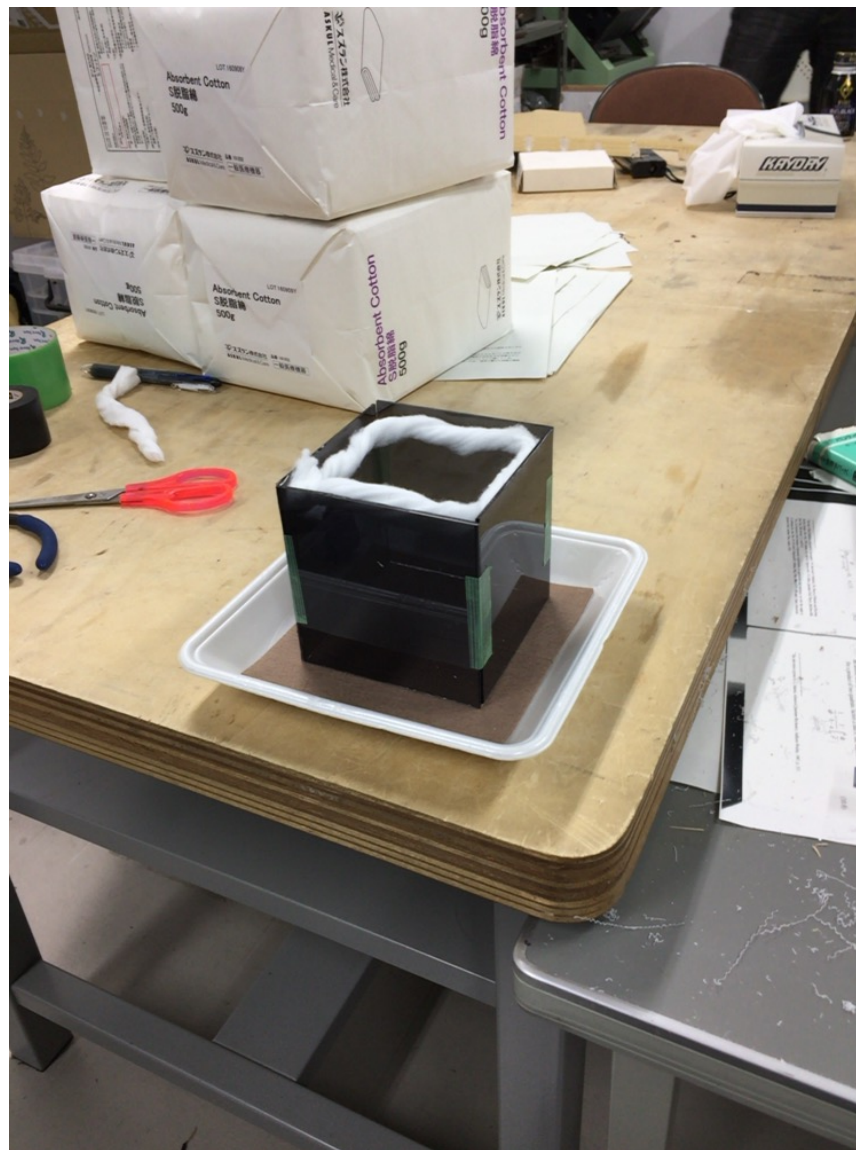
α 線の飛跡を観測する

- 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製作する。

霧箱の概略図



霧箱の写真



霧箱の作成

- 10cm × 10cmで厚さ2mmの亚克力板4枚を用い箱の外枠を作る。
- 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。

実験方法

- 箱の中をエタノールで底が完全につかるほど十分に満たし、中央に α 線源(トリウム入りのタングステン棒)をペットボトルのキャップの上に固定して置く。
- 発泡スチロールのトレイの上に霧箱を置き、液体窒素を注ぐ。10分ほどして十分に冷えるとLEDライトで照らすことで α 線が見え始める。カメラを霧箱の上部に固定して撮影する。

撮影の様子



α 線が見えるまで

- いざ霧箱が完成したはいいが、なかなか見えない！
 - なぜ見えないのか？
 - 温度が低すぎる？
 - 明かりが足りない？
 - 植毛紙がよくない？

実際は...

- 見え始める時間が遅いことに気付かず、まだ見え始めてもいないのにあきらめて見るのをやめてしまっていた。
- TAの篠原さんが僕たちがあきらめた後も見続けていて初めて発見！

α 線の動画



α 線の画像



β線の飛跡を観測する

- 先程の霧箱と同じ材料で一辺15cmの立方体の霧箱を作製し、それを用いてβ線を観測する。

β線が見えるまで

- さて、これでβ線が見えると線源 (^{90}Sr) を中に入れ、やってみたが全然安定して見えない。
 - なぜ見えないのか？
 - そもそも電子は見にくい？
 - 温度勾配が小さい？
 - 線源が弱い？
 - エタノールが足りない？

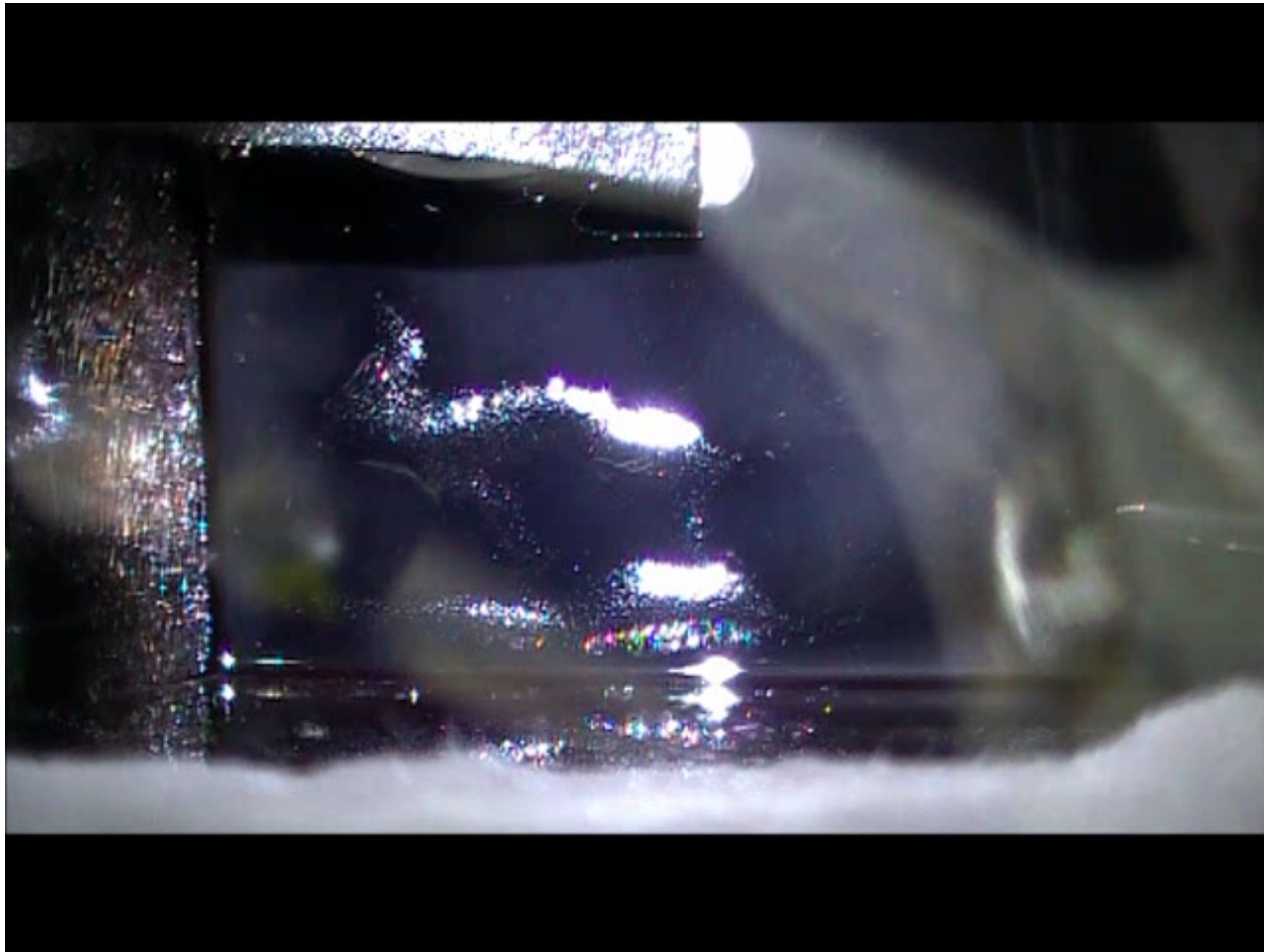
試行錯誤

- 電子は見えにくい？
 - $\frac{dE}{dx}$ が α 線に比べて小さいので見えにくいのは確か。だがそれにしても全然見えない。
- 温度勾配
 - 上部を手で温めてみたが効果はなかった。
- 線源が弱い？
 - 線源の表面(一番強く β 線が出ている面)を過飽和区間に垂直に置いてみたところ全く軌跡が見えなくなった。
- エタノールを多量に加えた
 - 軌跡がはっきり見えるようになった！

まだ残る疑問

- エタノールを増やすと軌跡がはっきり見えるようになったが、やはり線源の向きを変えると見えなくなる。
 - 軌跡が見えにくくなる、数が減るのではなく全く（環境放射線も）見えなくなった。

β線の動画



β線のシャワー

- 試しに線源を中から取出し、環境放射線のみを見ようとするとなぜか線源有りの時より数が多く見えた。
- さらにその状態で線源を霧箱に近づけるとβ線が一気に見える現象に遭遇した。

β線のシャワーの動画



磁場中のβ線

- 霧箱の下にネオジウム磁石（円柱形、直径5cm 厚さ1cm）を置き、霧箱内に磁場を発生させる。
- 周囲の環境放射線を減らすために鉛で囲って遮断する。

セットアップの様子



実験手法

- 線源には ^{90}Sr と ^{22}Na を使用する。
- 囲った鉛の一部を取り除き、そこに線源を向けて飛んできた電子を磁場でまげて撮影する。
- ^{22}Na から飛んでくる陽電子は厚さ2mmのアクリル板を透過できそうになかったので、アクリル板に直径3mmの穴をあけラップで蓋をし、そこに向けて設置した。

解析

磁場中のβ線

磁場は垂直上向きに貫いている



線源の向き

磁場中の β^+ 線

線源の向き

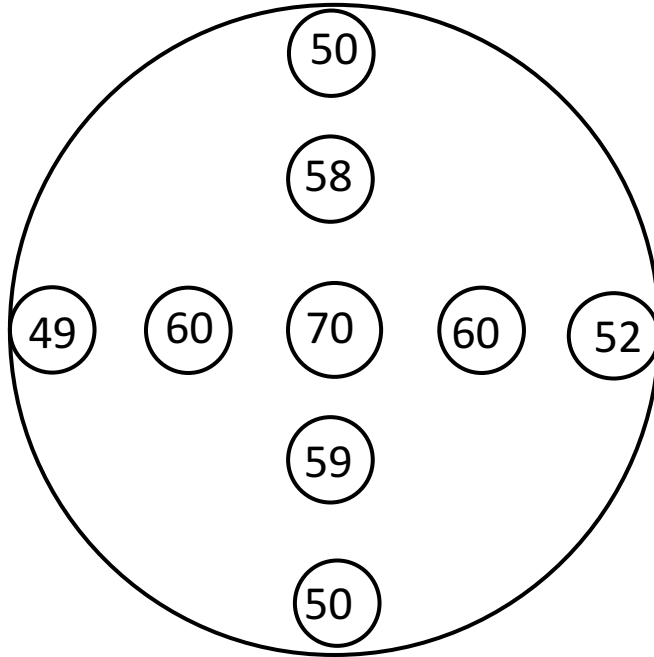


磁場による飛跡の向き

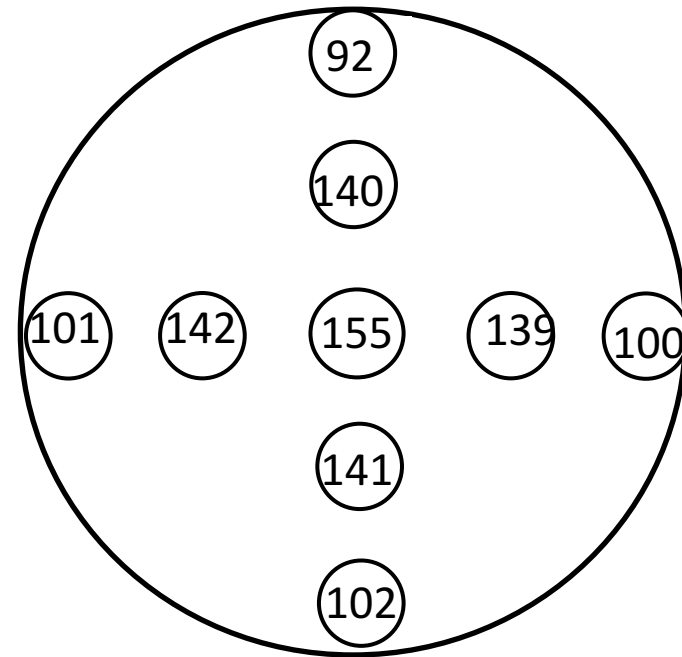
- これらの動画から飛跡が時計回りと反時計回りの飛跡を観測することができた
⇒陽電子を観測することが出来た
- 具体的にエネルギー分布を調べてみる

磁場の測定

- ガウスメーターを用い、磁場の分布を調べた。(mT)



磁石上2.5cm(液面から1.5cm)

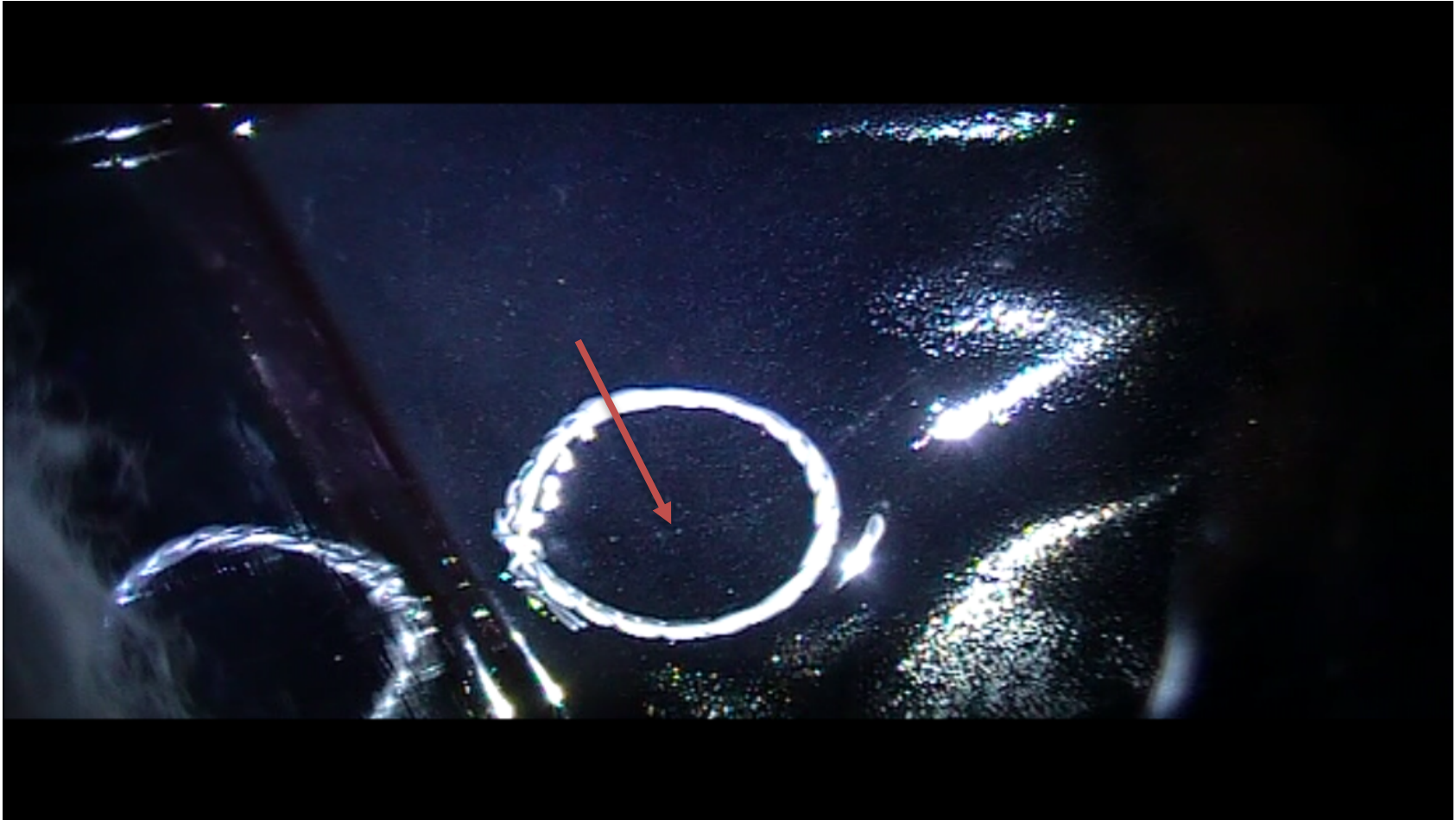


磁石上1.0cm(液面から0cm)

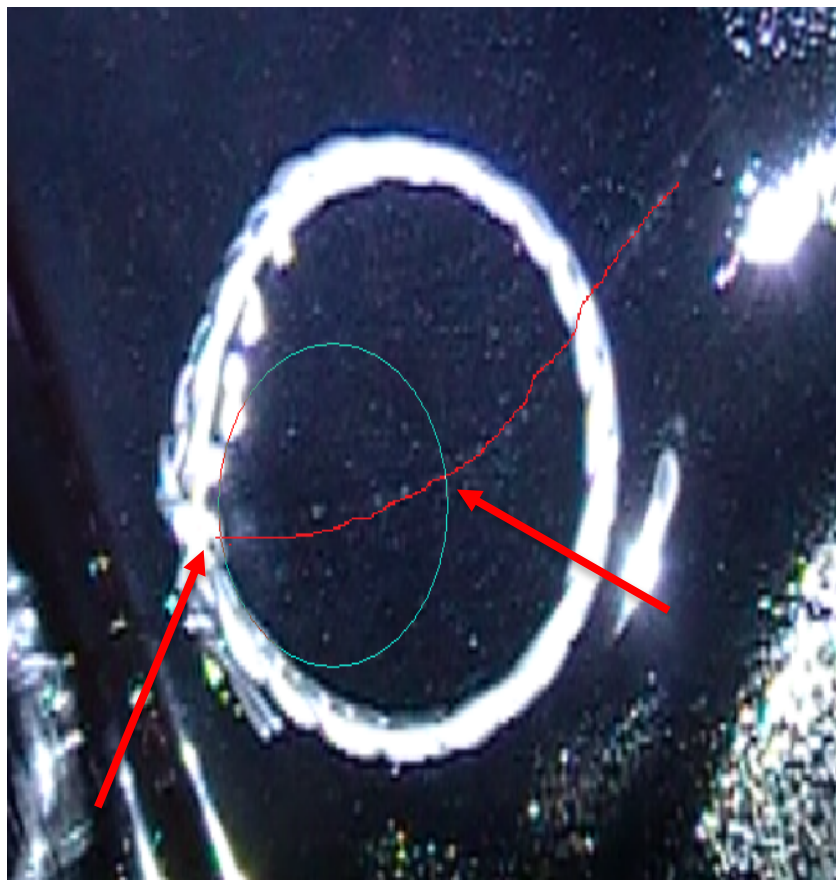
⇒ 平均値90.0mT(過飽和領域を1.5cmとして)

曲率半径の測定

動画で曲がっていると確認できる飛跡の画像を抜き出す



飛跡に対する円の決め方



円を
動かす



飛跡上の2点を適当に選ぶ

円を動かして飛跡に合わせる

これを繰り返し、最も合った円を決定する

曲率半径の測定

円を決定できたら、表示された曲率半径を実物大に換算する

曲率半径21.131mmと表示

⇒

実物大では27.6mm



曲率半径 r を求めたら前述した式

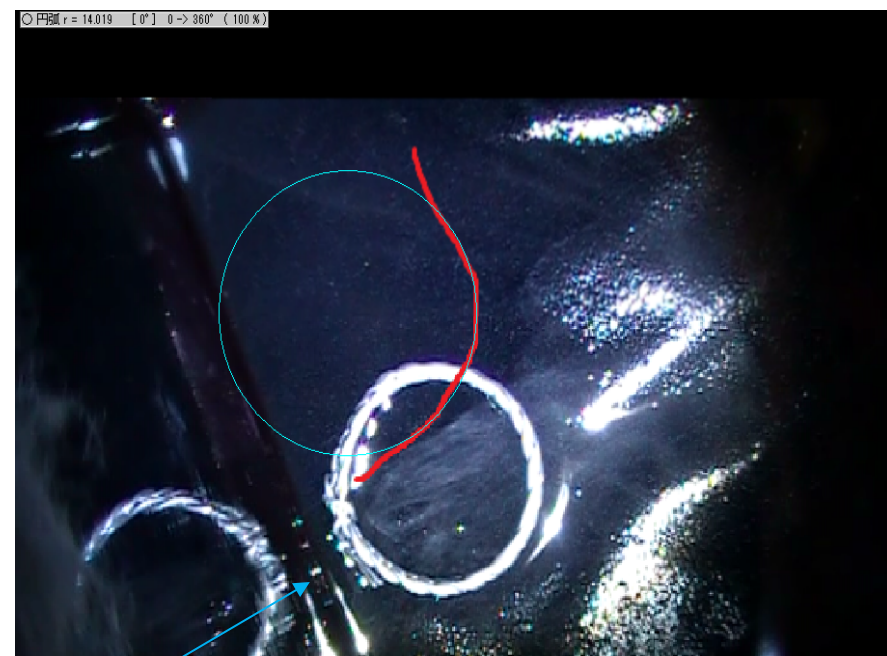
$$pc = 300rB$$

から運動量を求める

(ここでは一様磁場を仮定して平均90mTを使う)

これを線源由来でかつ曲がっていると識別できる飛跡に対して適用し、そこからエネルギー分布を求める

使用した画像の一例

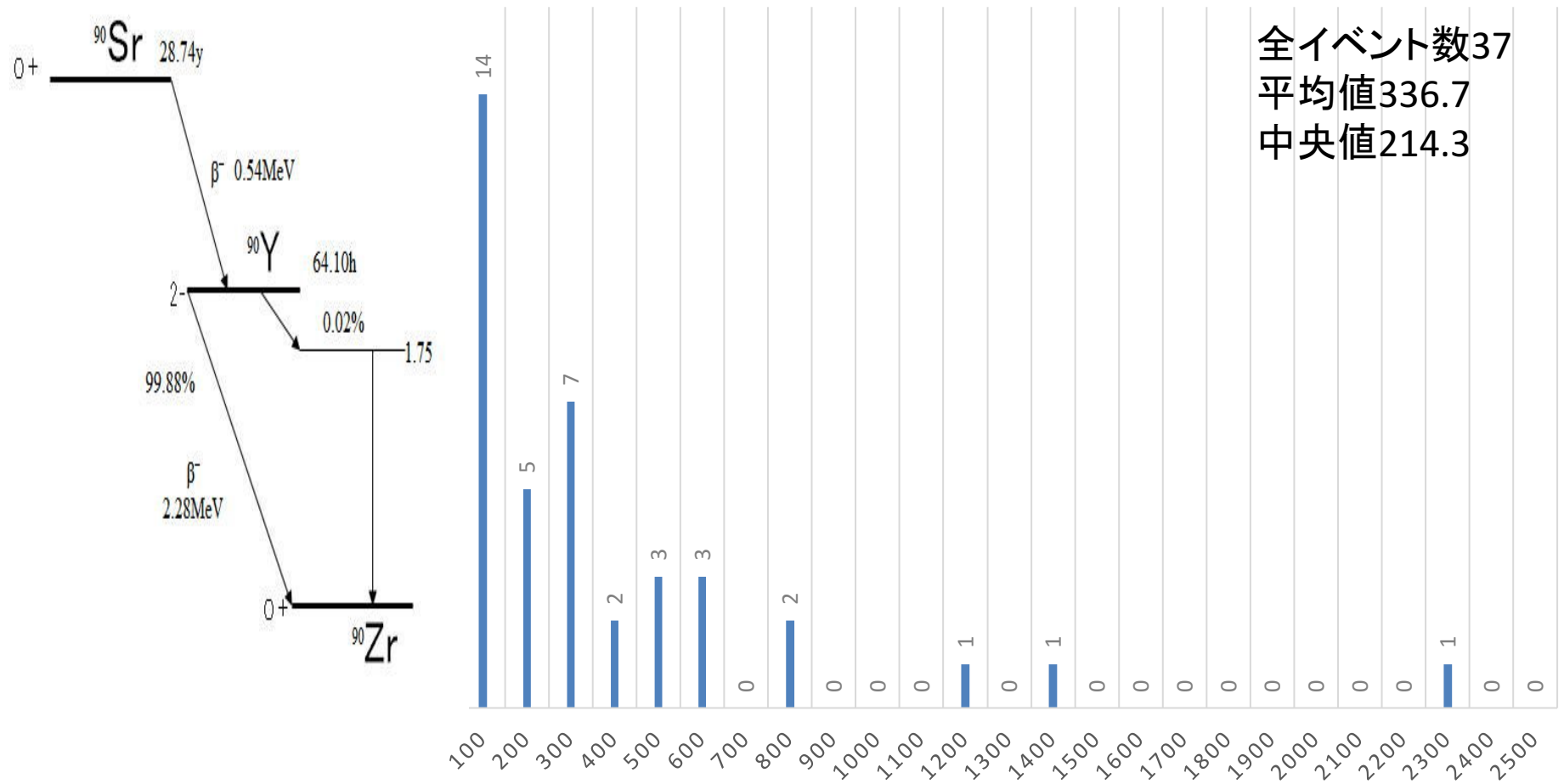


曲率半径18.3mm



曲率半径28.5mm

^{90}Sr のエネルギー分布



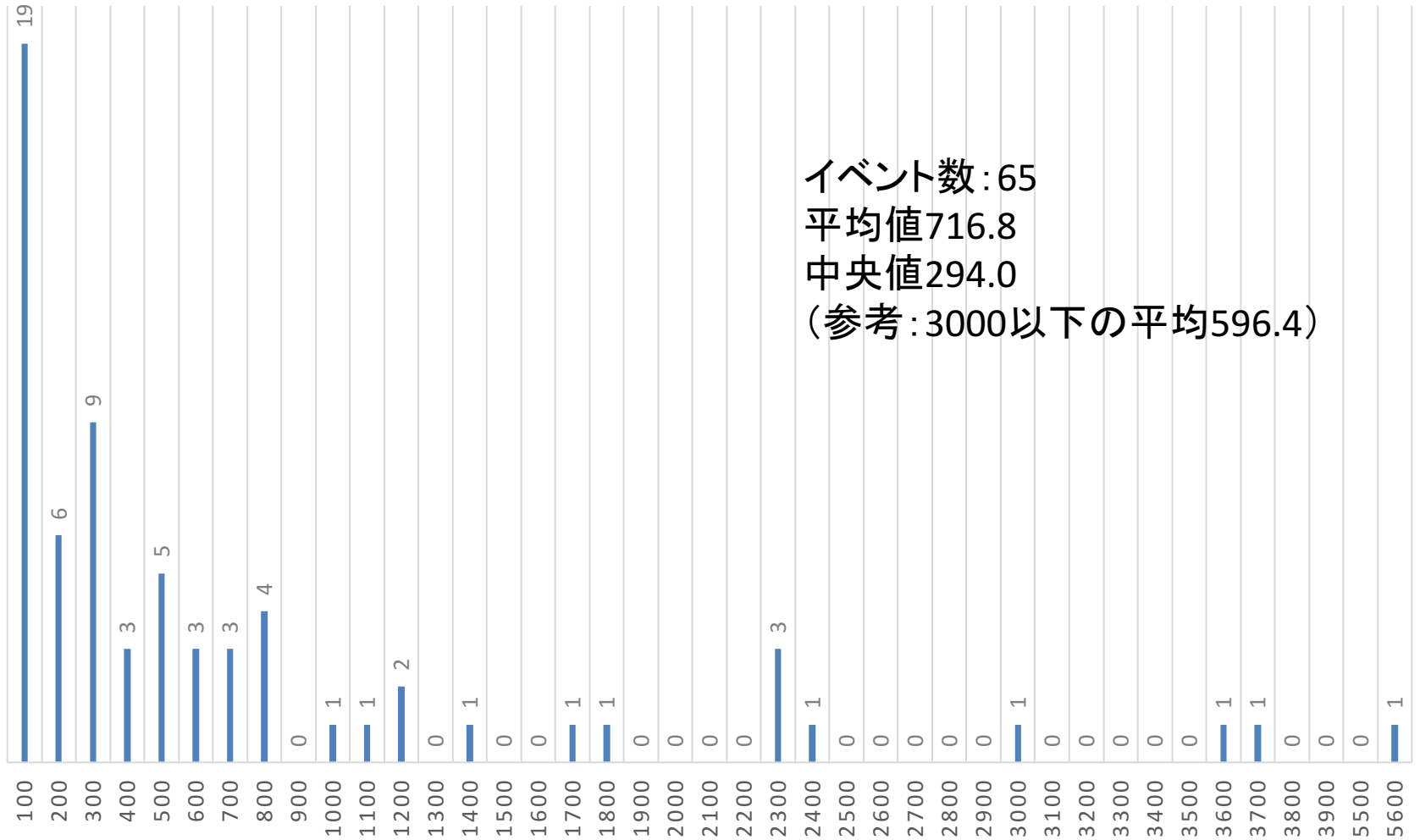
・明確な飛跡で時計回りに曲がっているもののみを抜き出したため、数が少なかった
(30分の動画で38個)

・曲がっていると判別しやすいものを抽出したためか、曲率半径が小さくエネルギーが低いものに偏ったかもしれない

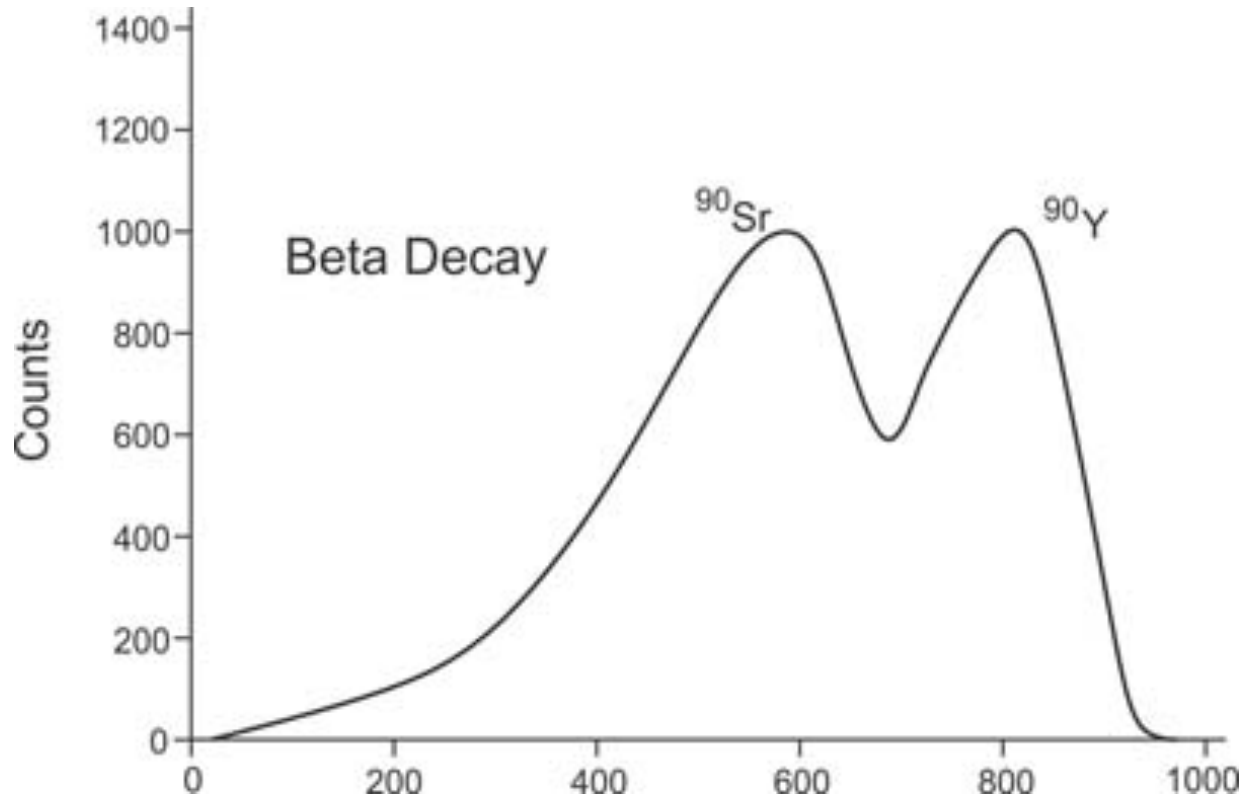
⇒再度動画を見直し、見落としていた飛跡や

多少見えづらかった飛跡(28個)を新たに解析の対象に加えて解析してみた

^{90}Sr のエネルギー分布

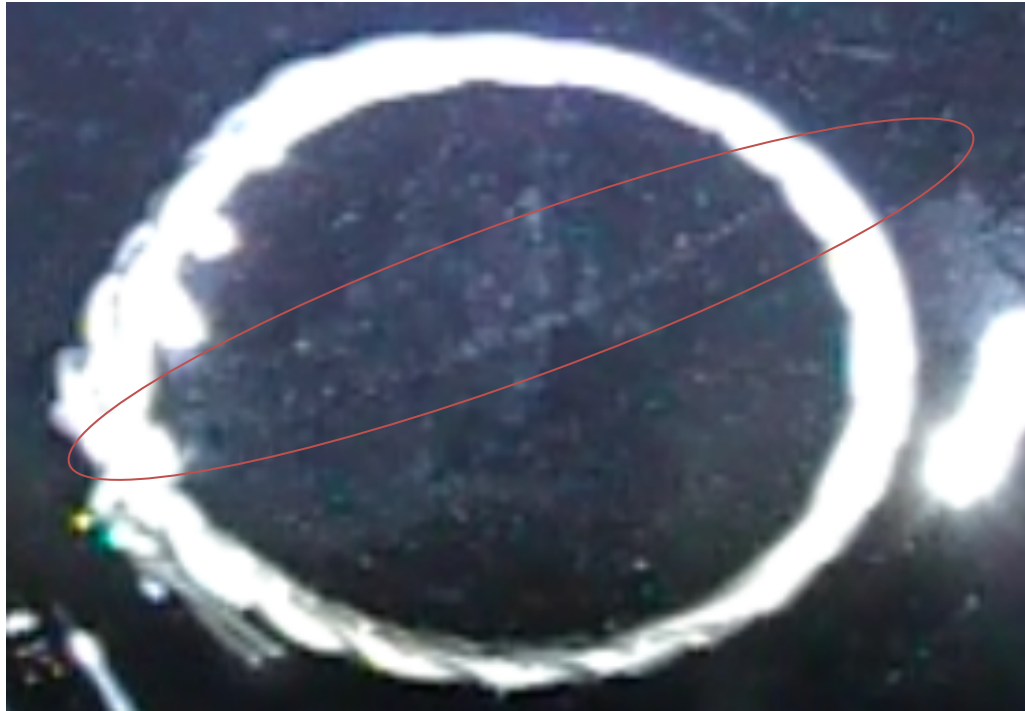


参考



考察

低エネルギーの飛跡

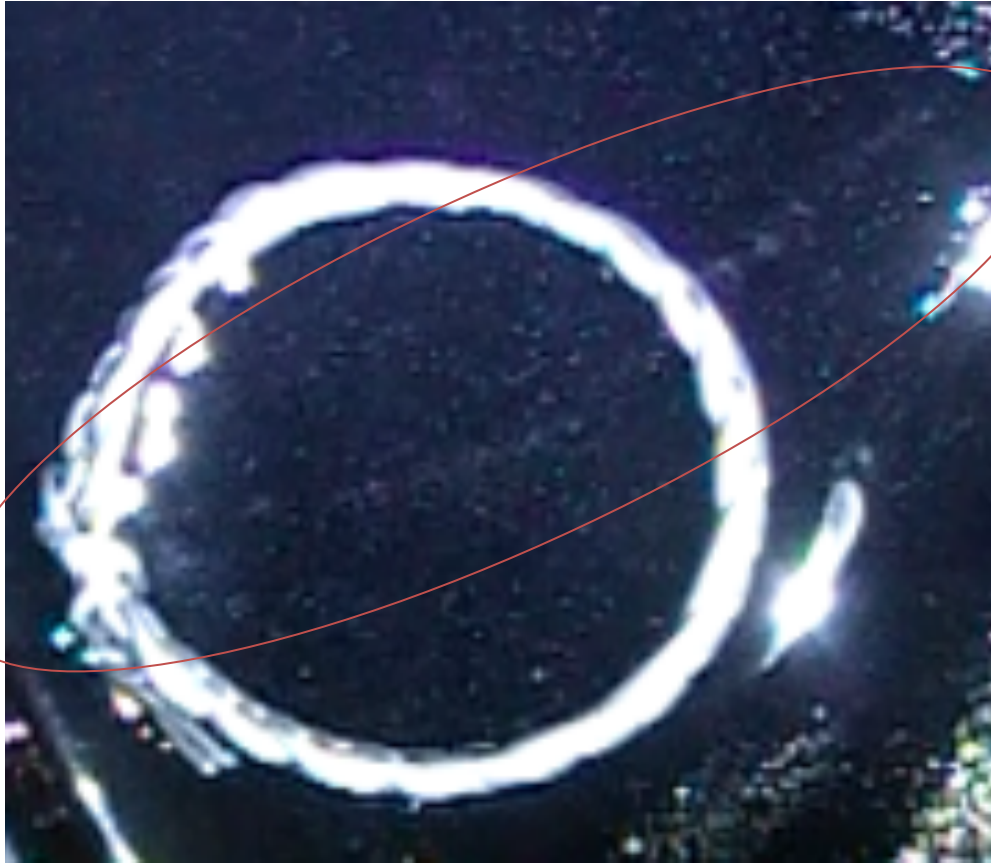


717KeV

綺麗で曲がっていることが明確だったため、解析しやすかった

数100KeV程度のエネルギーの飛跡はある程度正確な数値が期待できると思われる

高エネルギーの飛跡



2215KeV

エネルギー2215KeVの飛跡

見えづらいが若干曲がっていることが分かる
(動画では確認できた)

エネルギー2000KeV程度までの飛跡ならこの方法でおおよその解析が可能かもしれない

高エネルギーの飛跡



計算上5580KeVの飛跡

飛跡もかすれていて画像でははっきり分
からない
(動画では一応見えている)

微妙に曲がっているようにも見えるが、無
理に計算しても正しい曲率を計算するの
は困難だと思われる

考察

- 全体として、解析対象になる綺麗な飛跡自体が少なかった。飛跡は見えてはいても、かすれていたり、ぼやけていたり、もやがかかっているようなものが基本的に多かった(dE/dx が小さいのももちろん見えづらいのだが)
- 曲がってるかの判断よりも見えているかどうかの判断の方が難しかった(その傾向は直線的な飛跡ほどあった)

考察

- 1回目の解析では見えやすい飛跡で曲がっていると識別できた飛跡を抽出したため、低エネルギー側に偏った分布になったのかもしれない
- 2回目解析では視認しづらい飛跡も加えたためか、高いエネルギーの飛跡も多少検出できた（霧箱の感度の問題で高エネルギーが見えづらいついのかかもしれない）
- より強い磁場を用意すれば高エネルギー領域の正確な解析が出来たかもしれないが、霧箱の感度の問題で難しいかもしれない

考察

- ^{90}Sr が線源から霧箱に到達するまでに通るのは、線源に貼られたテープ2枚、空気、アクリル板、空気、と多くの物質中を通過しているので霧箱に到達するころにはエネルギーの低下が起きていると考えられる。
- 線源と霧箱を近づけることができればもう少しエネルギーの低下を防ぐことはできるが、そうするとシャワーのような現象が起こってしまい、観測が難しくなる。

考察

- シャワーについて、考えられる理由として、線源からの β 線の量が多いので過飽和区間に存在する気体のエタノールがすべてイオン化してしまい、その後しばらくは過飽和区間が存在しなくなってしまうからだと考えられる。
 - 実際に一度シャワーが起きた後に1分ほど時間を空け、また近づけるとシャワーが見えた。間をあけることで過飽和区間が再生成されると考えられる。

考察

- 散乱についての考察が甘く、散乱によって曲がったものと、磁場によって曲がったものの判断が困難であった。まず一度、同じセットアップでどれほどの散乱が起こるか基準を設定すればもう少し散乱による影響を考えることができたのではないかと思われる。

結論

- α 線と β 線を霧箱を使って観測できた
- 磁場中の陽電子と電子を軌跡の向きから識別することができた
- β 線のおおよそのエネルギー分布を確認することができた

謝辞

- 本実験を行うに当たり、多くのサポートをしてくださった隅田さん、多くの助言をしてくださった中家さん、ありがとうございました。
- 理論の方では畑さんにお世話になりました。
- またTAの篠原さん、中村さんには実験のいたるところで助けていただきありがとうございました。