

原子核の崩壊におけるβ線測定 ～ニュートリノの存在に迫る～

KEK第12回サマーチャレンジ演習04班

緒言

ニュートリノは、宇宙を構成する重要な要素を占め、初期宇宙や暗黒物質についての鍵を握っている可能性が高く、ニュートリノ天文学は、宇宙における多くの謎を紐解くといわれている。

近年、ニュートリノ振動現象の確立によって、ニュートリノに質量があることが広く認められるようになった。

私たちは、ニュートリノの存在が考え出されるきっかけとなった、放射性核種のβ崩壊についての実験から、電氣的に中性で、反応性が極めて乏しい粒子-ニュートリノの存在について考察する。

実験概要

90Srのβ崩壊によって放出される電子のエネルギースペクトルを実験から求めることで、電子でも崩壊先の核でもないエネルギーを持ち去る存在と、そのエネルギースペクトルも知ることができる。このスペクトルを先行研究と比較することによって、これが、様々な宇宙の謎を解き明かす可能性を持つと言われているニュートリノであることを示す。

エネルギースペクトルを調べるためには、磁気スペクトログラフという装置を用いた。

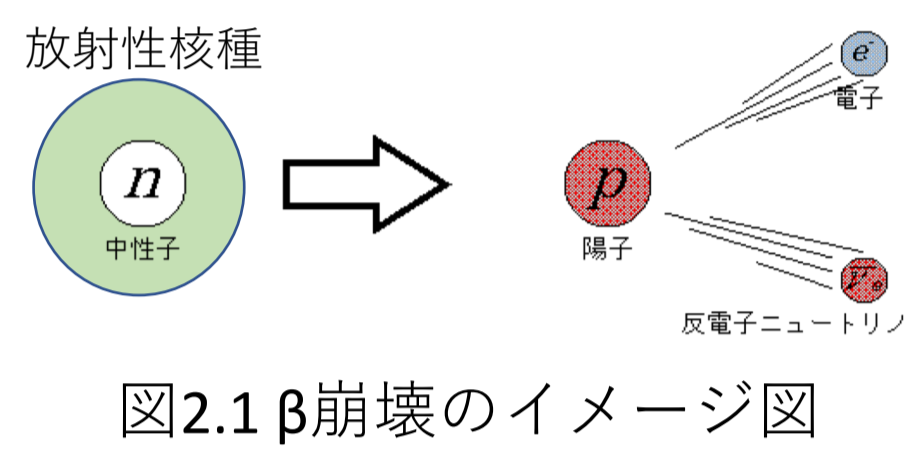


図2.1 β崩壊のイメージ図

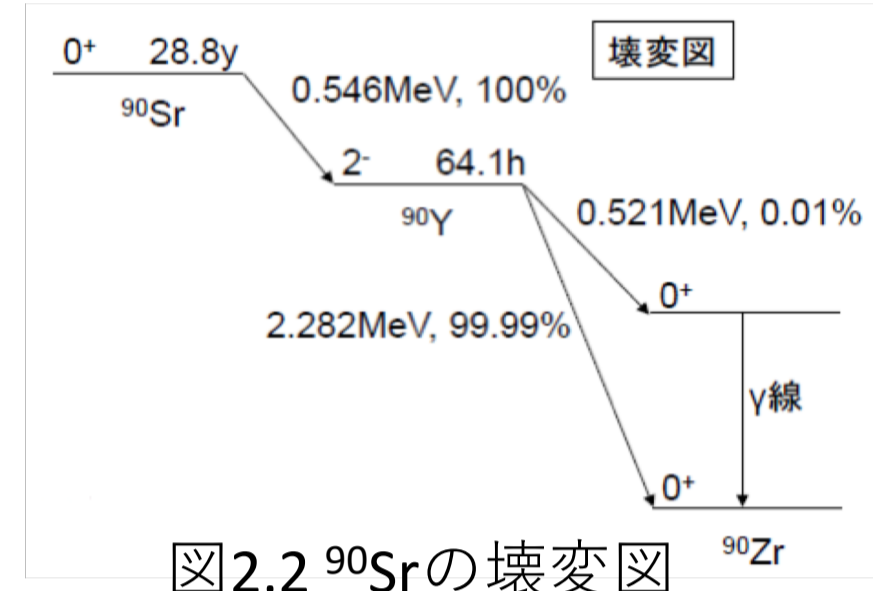


図2.2 90Srの壊変図

Browne-Buechnerのスペクトログラフについて

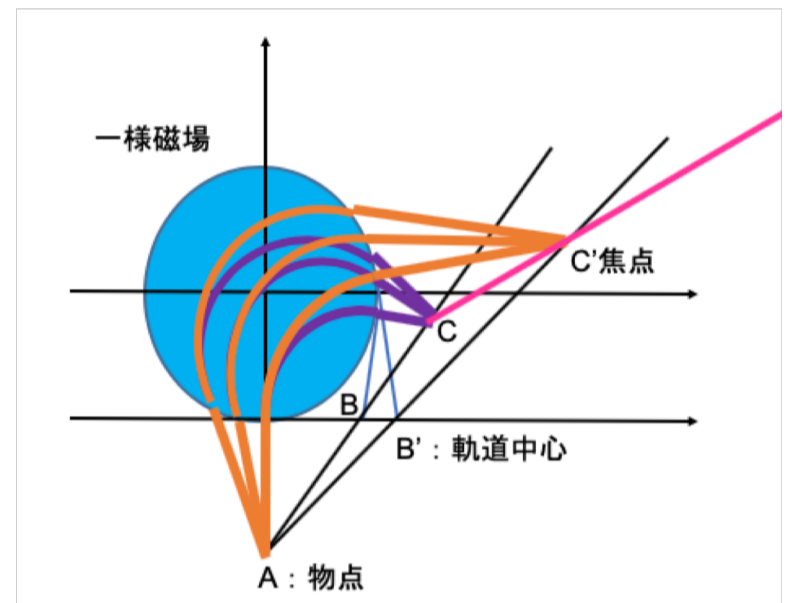


図2.3 Browne-Buechnerのスペクトログラフ概念図

一様磁場中で荷電粒子は円運動し、その運動量は磁場の強さと軌道半径の積に比例する。円形磁場を用意すると、β線源の位置 (A) に対して、β線の軌道が運動量ごとにある一点 (焦点) を必ず通る配置が存在する。今回の実験では幾つかの焦点の位置に検出器をおき、磁場を変えて運動量を分析しながら電子数を測定する。

実験方法

電磁石の中心からの距離に対する磁場強度の関係を測定した。測定点は図3.1のようにとった。測定結果は図3.2に示す。ただし電磁石にかかる電圧は $v=0.5V$ と $v=0.353V$ とした。円形磁場の境界は滑らかに変化しているが、これを図3.3に示す一様な磁場であると近似する。このとき、台形法での積分値、磁場強度のピーク値が等しくなるようにする。近似した一様な円形磁場の半径(有効磁場半径)は $v=0.5V$ では $218.0mm$ 、 $v=0.353V$ では $219.2mm$ であった。電磁石の電圧の変化による有効磁場半径の変化は小さく、2つのデータの平均をとって、有効磁場半径は $218.6mm$ とした。

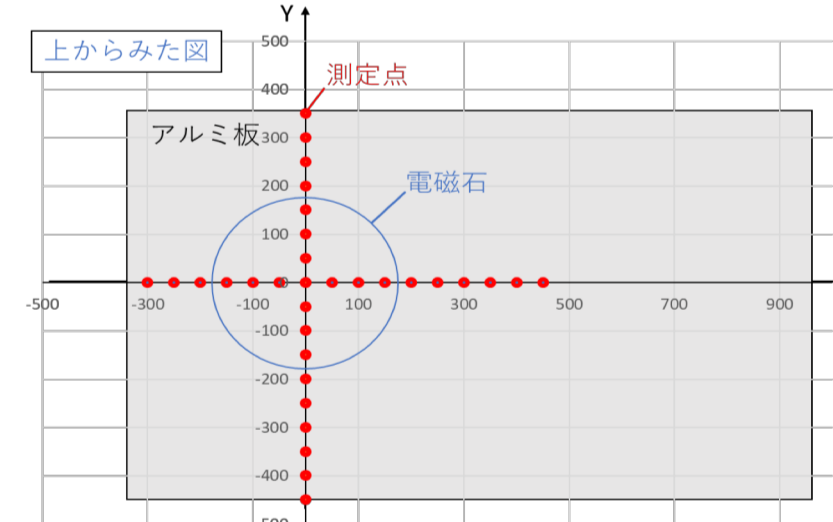


図3.1 導入した座標の対応関係を示す配置図

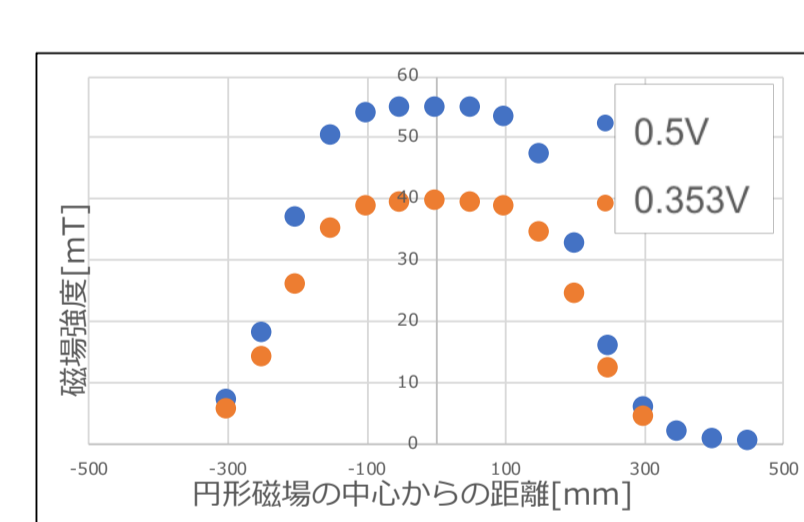


図3.2 電磁石の作る磁場分布

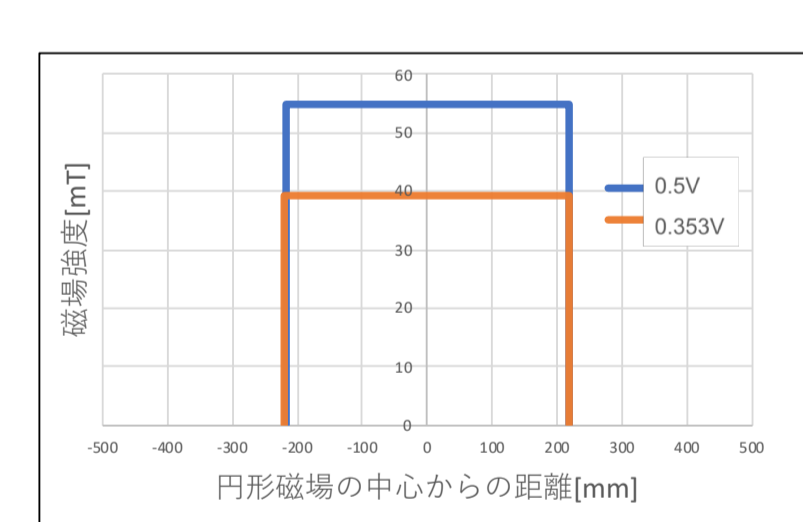


図3.3 近似した一様な磁場における磁場分布

次に本実験の実験方法に移る。

予備実験で求めた有効磁場半径に従い、線源の位置と6種類の運動量の焦点位置を求めた。焦点位置にプラスチックシンチレータを置き、β線を検出した。磁場を変化させることで運動量分布を求めた。この時、β線の通り道は真空槽を用いて真空にした。

セットアップ写真を図3.5と3.6に、電子回路を図3.7に示す。

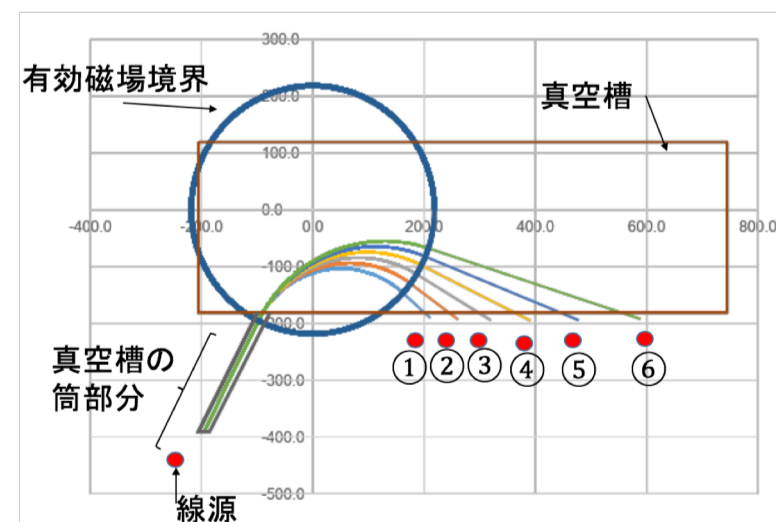


図3.4 磁場、焦点、線源の位置関係の配置図



図3.5 セットアップ写真①



図3.6 セットアップ写真②

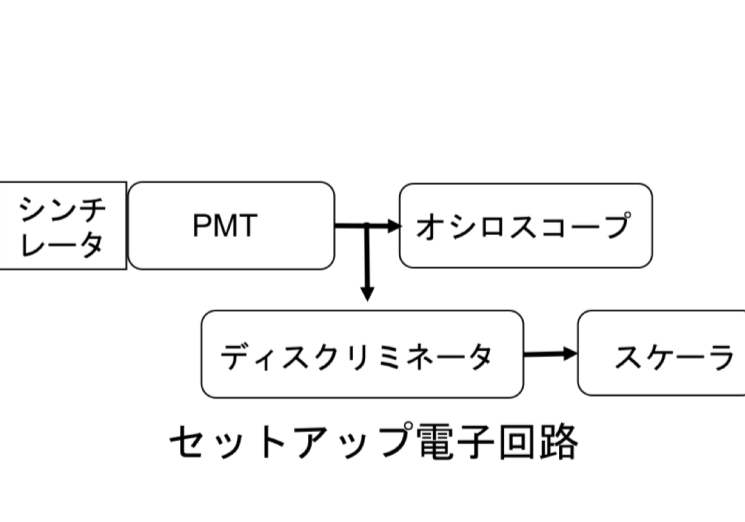


図3.7 電子回路のセットアップ図

実験結果

実験で得られたデータから、β線源以外の放射線による計数をバックグラウンド事象として差し引いた後の分布を図4.1に示す。単位時間当たりのカウント数で表されるβ線スペクトルを運動エネルギーの関数として求めるために、補正することが必要である。以下に解析方法を記す。

図4.2に示すように、運動量 p から運動エネルギー T へ変換する際に、エネルギー幅が均一でなくなってしまうので、運動学的補正因子 (E/p) をかけて補正した。ここで、 E は電子の全エネルギー ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, m : 電子の質量、 c : 光速度) を表す。

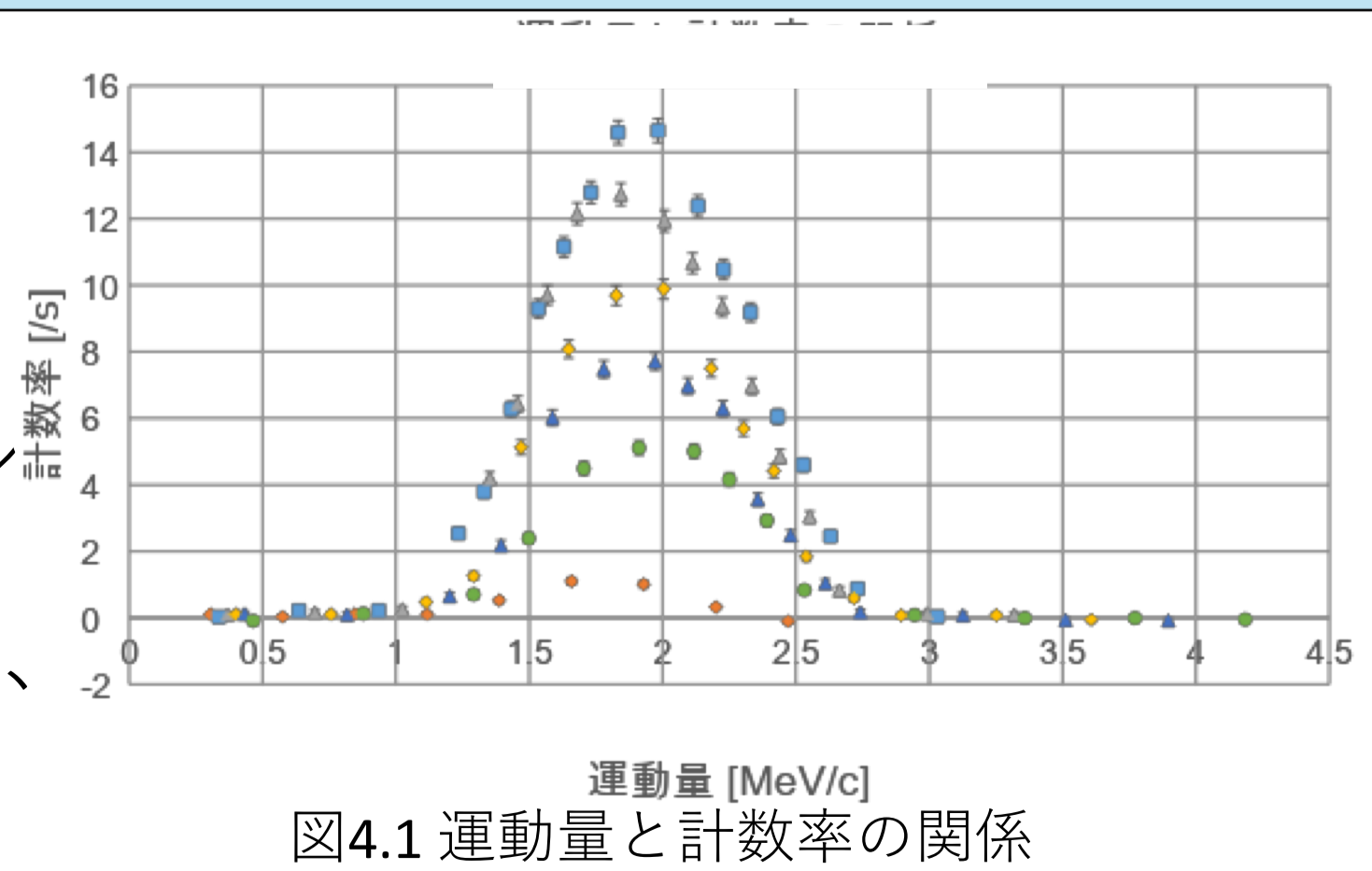


図4.1 運動量と計数率の関係

次に、図4.3に示すような立体角補正を行った。β線は線源から全方向に放射しているが、実験装置の特性上、その一部が検出器まで届く。焦点ごとにその割合を幾何学的に計算し、線源から放出されるβ線強度を求めた。更に、図4.4に示すような運動量アクセプタンスの補正を行った。検出器には幅があるため、検出されるβ線の運動量は一定の幅をもつ。この幅は焦点ごとに異なるので補正した。

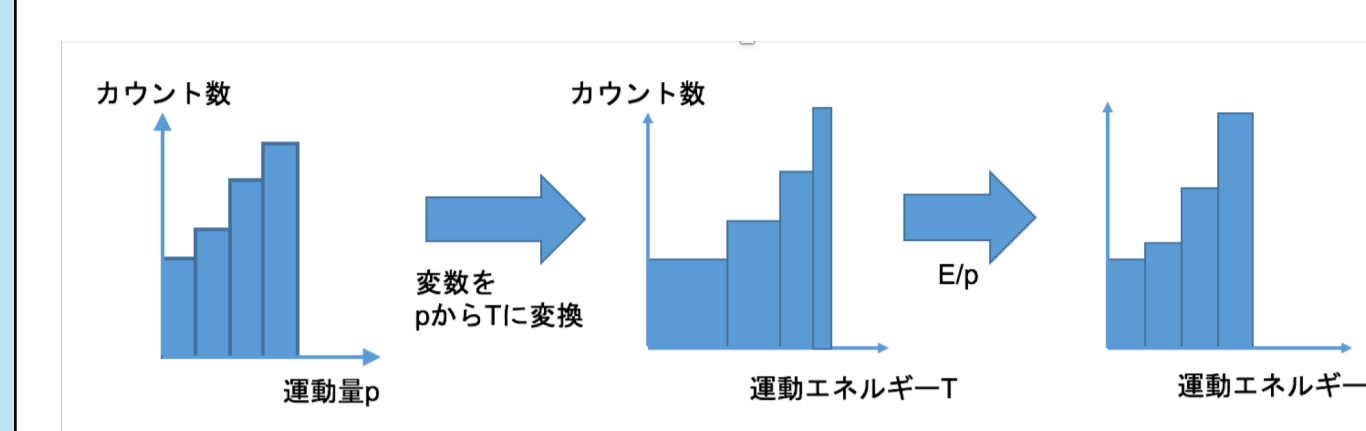


図4.2 運動量の運動エネルギーへの変換

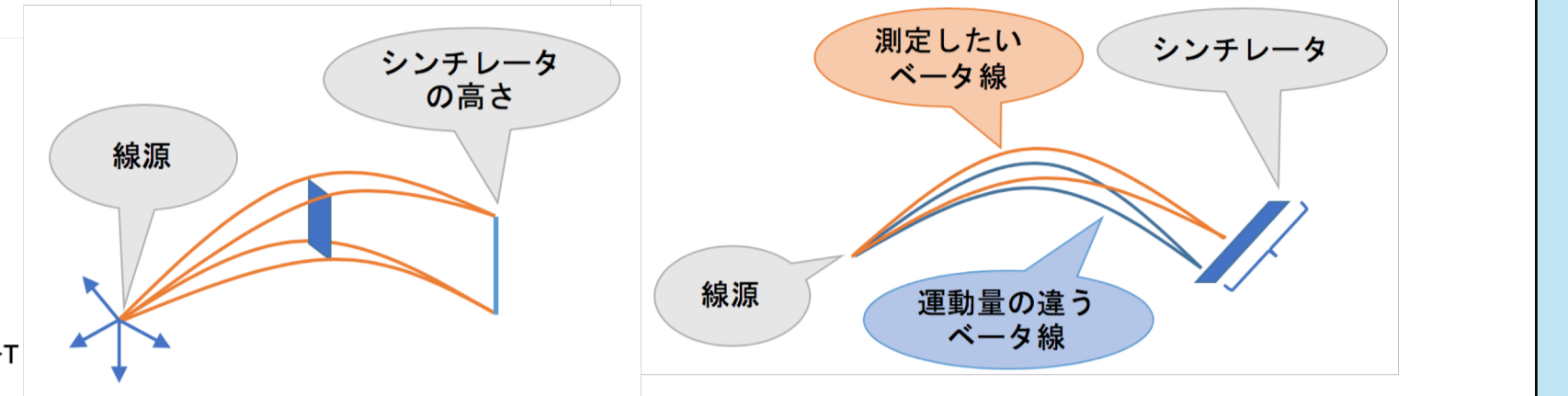


図4.3 立体角補正

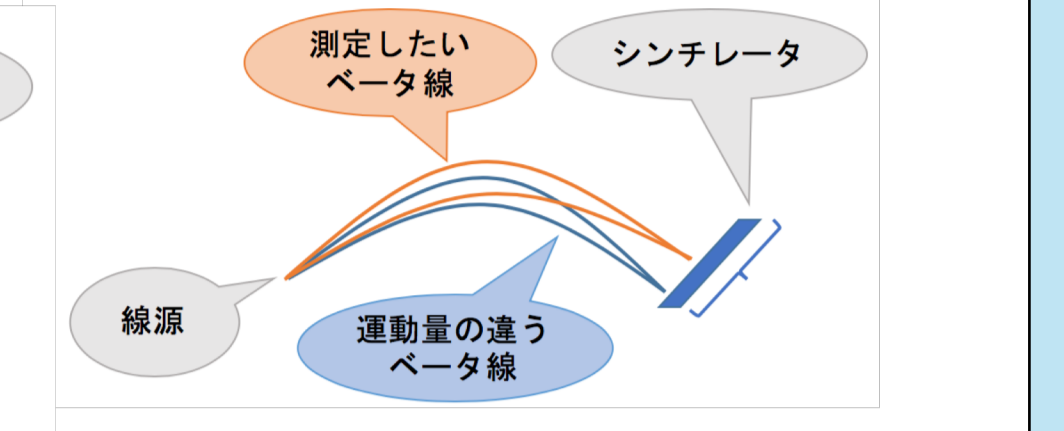


図4.4 運動量アクセプタンス補正

以上の補正により、得られた運動エネルギーと単位時間当たりのカウント数の関係を図4.5に示す。図から読み取れるように、どこの焦点位置で測ったβ線も概ね同じようなカーブを描いていることがわかる。

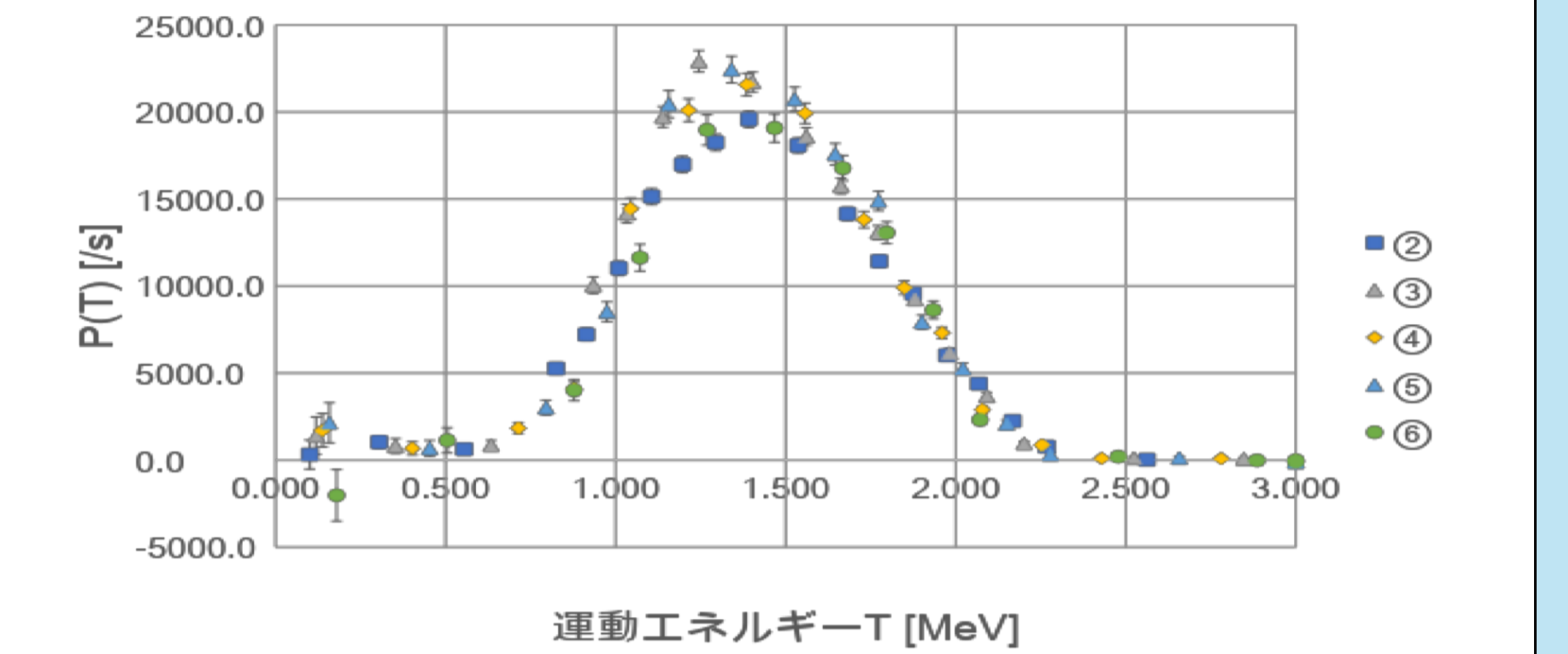


図4.5 運動エネルギーと単位時間当たりのカウント数の関係

考察

- 観測された電子のエネルギーはすべて $2.28MeV$ 以下であった。(90Yが90Zrになる際に解放されるエネルギー(Q値)が $2.28MeV$ 。(図2.2 壊変図参照))
- $1\sim 1.5MeV$ 付近を最大値に持つ山なりの連続分布(ピーク)が見られた。以上の結果より、次の事が帰結される。

- 1) 電子以外の何か(第3体)が、エネルギーを持ち去っている。
- 2) 第3体の持っているエネルギーは $2.28MeV$ 以下である。
- 3) 第3体は電磁気力の影響を受けない

| 第3体候補 | 電磁気力の影響 | 静止質量エネルギー [MeV] |
|---------------------|---------|---|
| 中性子 | なし | 940 |
| π^0 中間子 | なし | 135 |
| 電子ニュートリノ | なし | $< 2.0 \times 10^{-6}$ |
| μ ニュートリノ | なし | < 0.19 |
| τ ニュートリノ | なし | < 18 |
| 光子 | あり | 0 |
| W^0 および Z^0 ボソン | あり | 8.0×10^4 および 9.1×10^4 |

参考文献: M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018)

<http://pdg.lbl.gov/>

展望

電子のエネルギーのエンドポイントを見積もるための手法に、カーブプロットというものがある。(図5.1)
β崩壊理論の計算式に基づき、運動エネルギーの一次関数になるように電子のエネルギースペクトルを変形すると、この直線と、横軸との交点は電子の最大エネルギーとなる。この点をエンドポイントと呼び、もしも、ニュートリノの質量が0であるならば、エンドポイントの値はβ崩壊で解放されるエネルギーである(Q値- $2.28MeV$)になるはずである。

しかし、我々が求めたエンドポイントの値は、 $2.42 \pm 0.03MeV$ であった。これは、 $2.28MeV$ に対して約 3σ 高い値となった。ニュートリノの質量に感度を持たせるには更なる精度の向上が必要である。(図5.2)

よって、測定位置や有効磁場半径の予備実験の時点で、より良い精度で実験し、ニュートリノの質量を求めることが我々の今後の展望である。

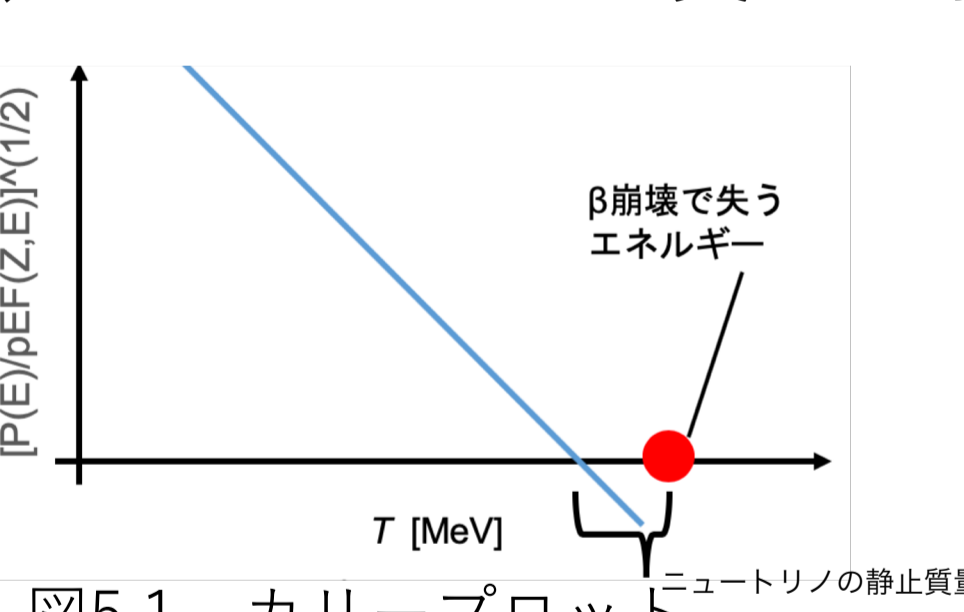


図5.1 カーブプロット

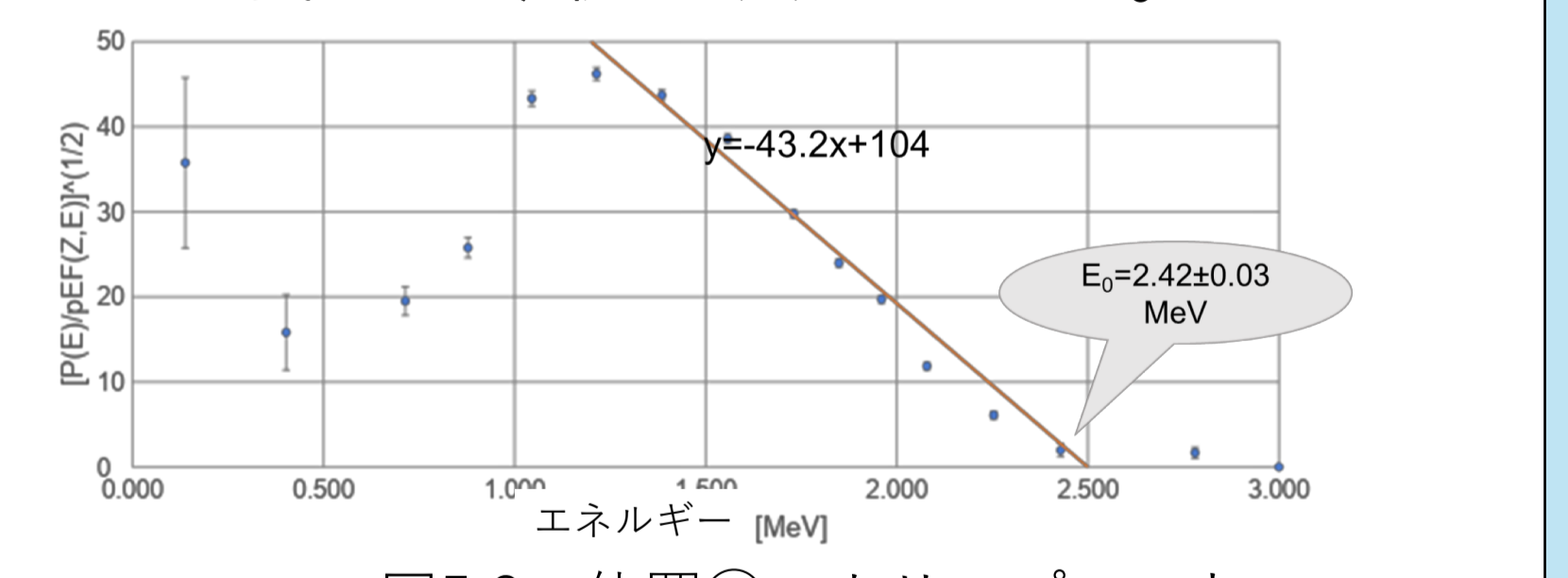


図5.2 位置④のカーブプロット

まとめ

- 90Sr(90Y)のβ崩壊によって得られる電子のエネルギー分布(スペクトル)を測定した。
- 実験の結果、特定のエネルギーを持つ電子のみが観測される予想と異なり、電子のエネルギーは、最大エネルギーとしている $2.28MeV$ より低い、 $1\sim 1.5MeV$ の間に計数率の最大値を持つような連続スペクトルが得られた。
- β崩壊に伴って、電子とともに第三体目の粒子が放出されており、それはニュートリノだと考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、「KEKサマーチャレンジ」で、指導教官の大阪大学野海教授をはじめとするKEK指導教員の皆様に多大なるご協力をして戴いたことを深く感謝申し上げます。また、大阪大学大学院、中田氏、赤石氏、森田氏にはTAとして有益なご助言をいただいたことに感謝の意を表します。また共同研究者の九州大学、井口氏、弘前大学、遠島氏、宇都宮大学、藤崎氏、広島大学、望月氏は、10日間ともに実験、議論を重ね、互いに向上しあえたことを感謝する次第です。

また、KEK第12回サマーチャレンジでは、豊富な実験プログラムを通じ、ここでしか出会えないかけがえのない仲間たちと、「研究」の一連の流れを体験することができました。このような機会を与えてくださったことをここに深く感謝いたします。(https://www2.kek.jp/ksc/)

そして、宇宙の広場に出展する機会を与えてくださった、宇宙の広場の運営主体の皆様、また、スタッフの皆様へ深く感謝いたします。