

宇宙線と素粒子の実験(ミュー粒子実験)

担当: 藏重 久弥 自然科学研究棟 3号館東 3階 318号室、内線 5638

kurasige@phys.sci.kobe-u.ac.jp

TA: 水引 龍吾 (M2)

1. 実験の目的

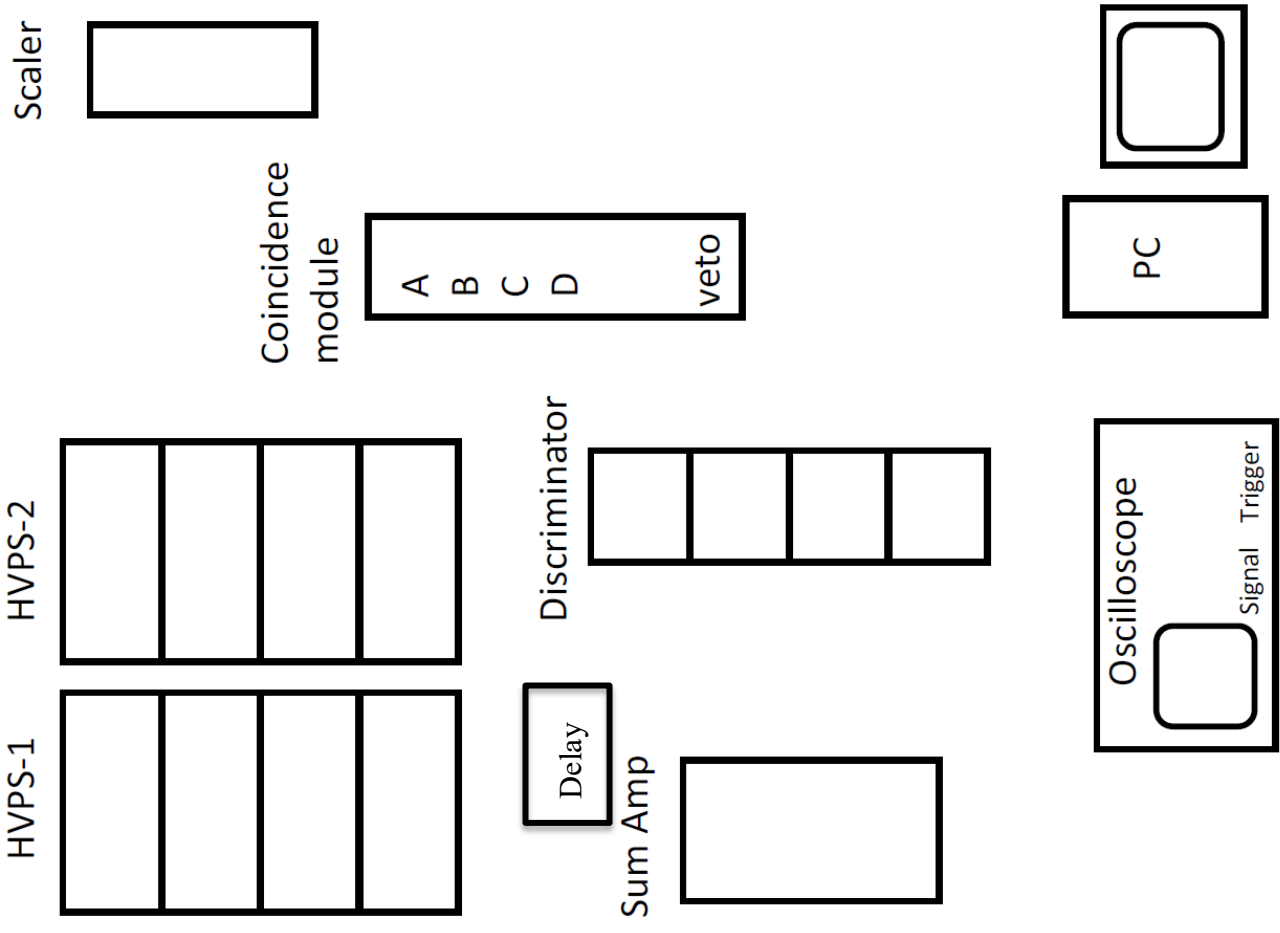
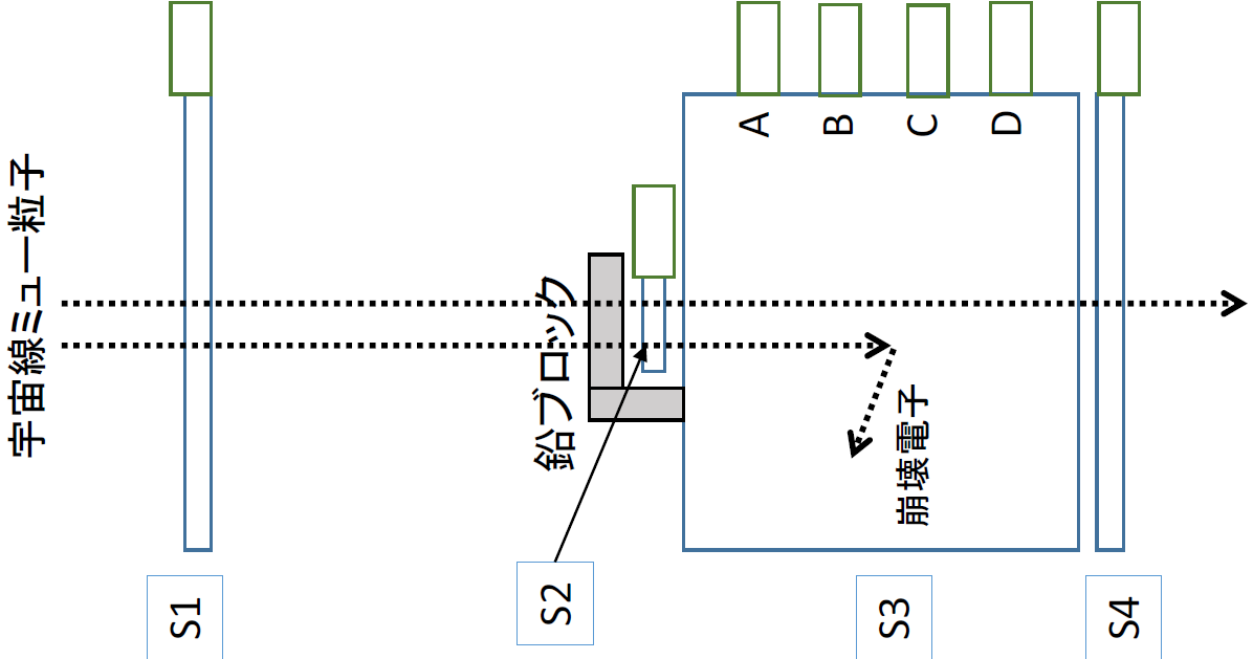
μ 粒子の崩壊は電子とニュートリノのみが関与する現象である。この崩壊は弱い相互作用のみが介在するため、弱い相互作用の研究の格好の題材である。この実験では宇宙線中の μ 粒子を大型のプラスチックシンチレーターで捉えてその崩壊現象を調べることにより、 μ 粒子の崩壊と素粒子の弱い相互作用の基礎について学ぶ。実験の目的は以下の通りである。

1. μ 粒子の寿命を測定する。
2. 宇宙線 μ 粒子のフラックスを測定する。
3. μ 粒子の最小電離作用を利用してプラスチックシンチレーター検出器のエネルギー較正を行う。また、エネルギー分解能を求める。
4. μ 粒子崩壊での放出電子(放出陽電子)のエネルギー分布を測定し、理論計算と比較する。

2. 実験装置

本実験で用いる主な装置を以下に挙げる。まずは、それぞれの装置の役割やはたらきについて復習しよう。

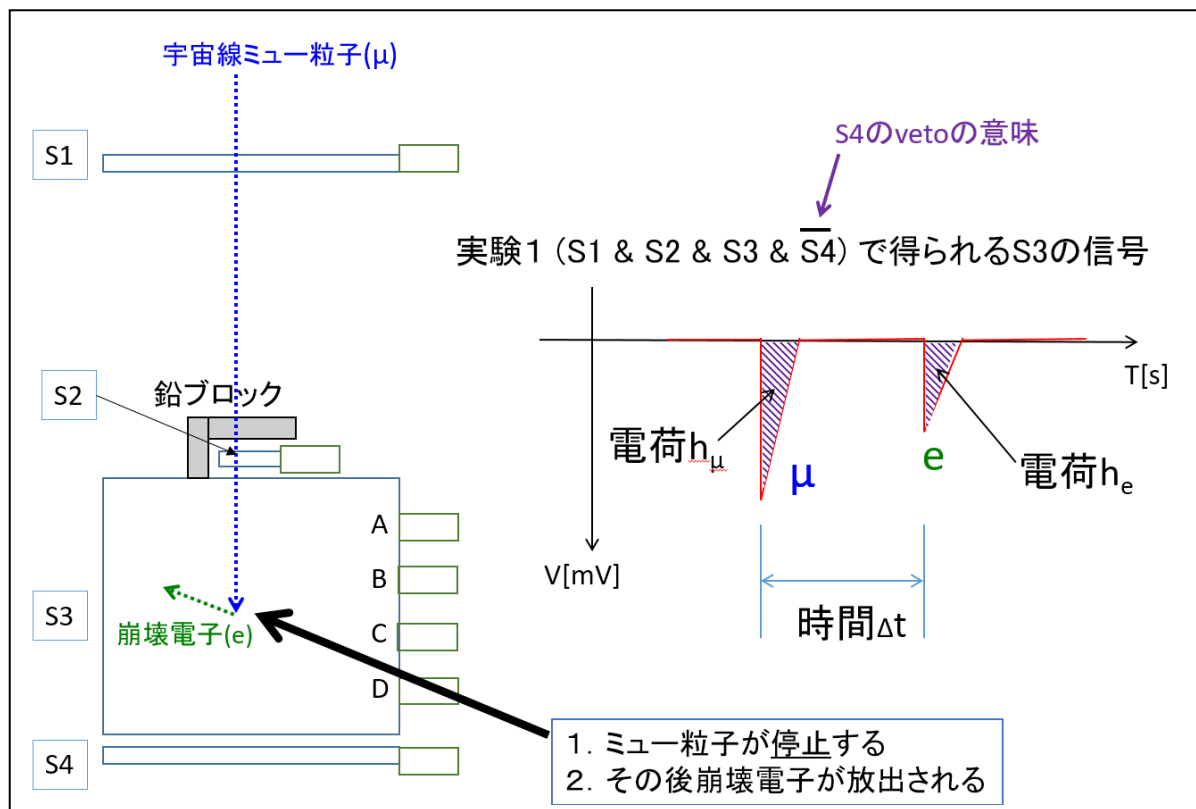
1. シンチレーター (S1, S2, S3, S4)
2. 光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT)
3. ディスクリミネーター (ディスクリ)
4. コインシデンス
5. スケーラー
6. サムアンプ
7. オシロスコープ
8. 高電圧電源(High Voltage Power Supply, HVPS)



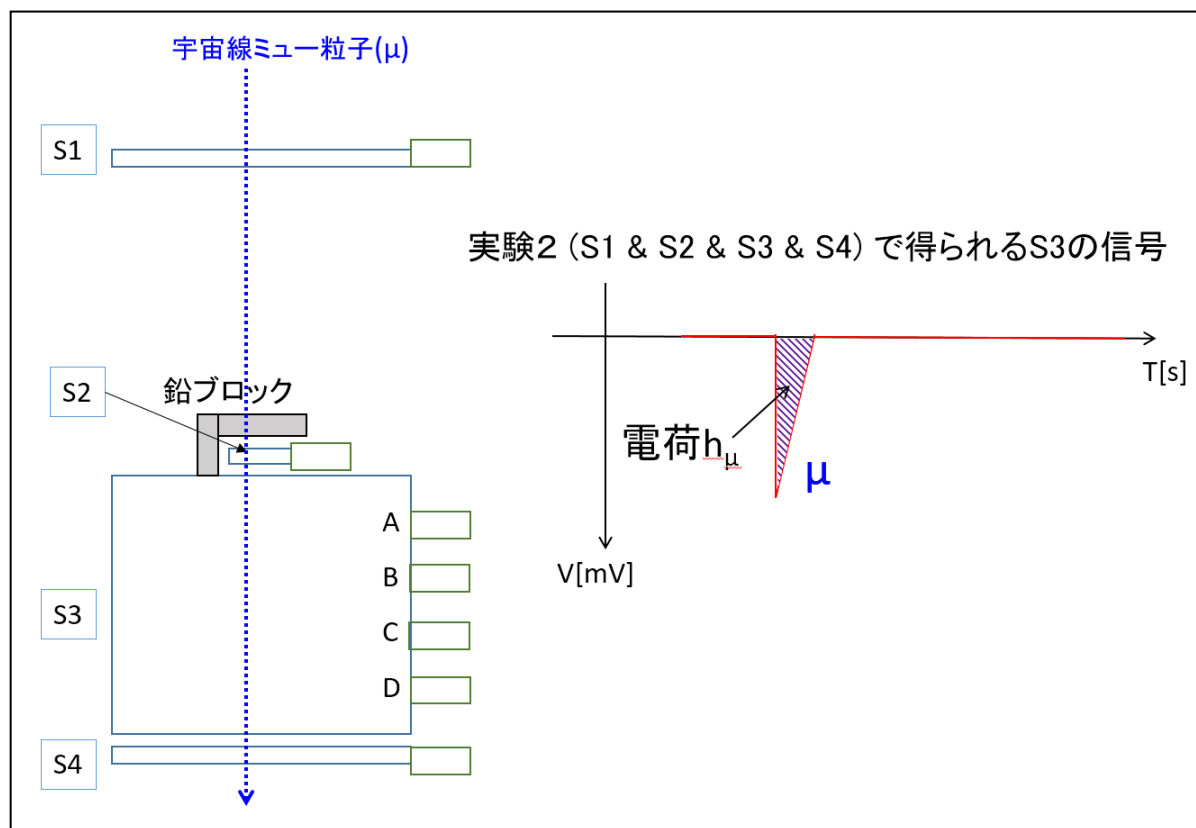
配線、電圧設定値等、記入しなさい。

3. 実験の概要

実験 1 : ミュー粒子が S3 の中で停止する。その後崩壊して、崩壊電子を放出する。



実験 2 : ミュー粒子が S1 から S4 まで全て通過する。



4. 宇宙線ミュー粒子実験の基礎知識

(ア) ミュー粒子(μ 粒子)って何ですか？

ミュー粒子は素粒子の1つです。素粒子には「クォーク」と「レプトン」という種類があり、ミュー粒子はそのうちのレプトンに含まれます。(ちなみに電子もレプトンです。)

ミュー粒子の特長としては、性質は電子と同じで、質量のみ電子の約 207 倍($m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$, $m_\mu = 105.7 \text{ MeV}/c^2$)と異なる事です。ミュー粒子は固有の寿命 τ で、次のように崩壊(decay)します。

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad \text{or} \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

ミュー粒子崩壊での、電子の理論的最大エネルギー(E_{max})は、電子が一方に放出され、2つのニュートリノ(ν)がその反対方向に放出される場合であるので、ニュートリノの質量を無視すると、 $E_{max} = 52.8 \text{ MeV}$ となります。

(イ) 寿命って何ですか？

まず誤解していけないのは、素粒子でいう寿命(Life time) というのは「粒子が生まれてから死ぬ(崩壊する)までの時間ではないことです。素粒子物理学では、崩壊によってもとの粒子数の $1/e$ になる時間のことを寿命と呼びます。つまり、もとの粒子数を N_0 、時間 t だけ経過したときの粒子数を N とすると、次のような関係式が成り立ちます。

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

この式の両辺の対数をとってみると、

$$\ln N = \ln N_0 - \frac{t}{\tau}$$

となるので、片対数グラフの横軸に時間、縦軸に事象数をとると直線となり、その傾きの逆数が寿命となります。この寿命を求める時には、最小二乗法を使ってグラフに直線をひいてください。

(ウ) エラーバーを忘れずに

宇宙線の事象数はポアソン分布 (Poisson distribution) に従います。これは、

$$f(n; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$$

と表され、平均値 μ のとき、分散も μ となります。ポアソン分布は、 $n \geq 10$ のとき、平均値 μ で分散 $\sigma^2 (= \mu)$ のガウス分布 (Gaussian distribution) に近似できます。

$$f(n; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

つまり、この実験で事象数が N のとき、 $N \pm \sqrt{N}$ の区間に 68% の確率で真の値があることとなります。グラフにプロットするときは、 N の位置に点を打つだけでなく、 $-\sqrt{N}$ から $+\sqrt{N}$ まで

エラーバー (error bar、誤差棒)をひきます。

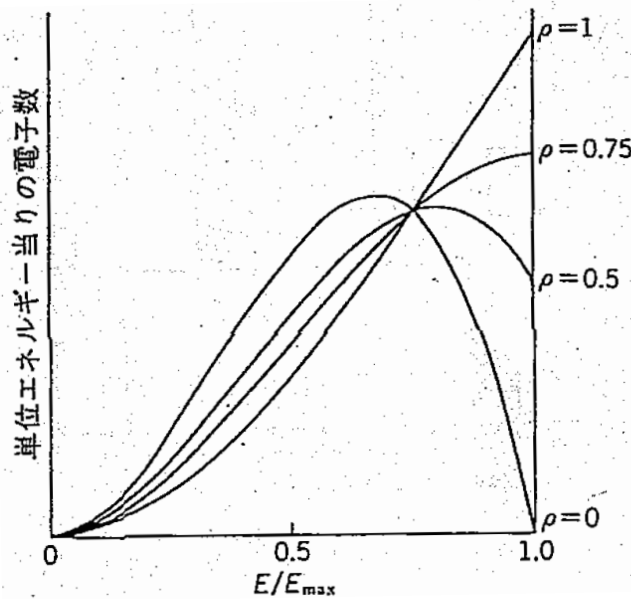
(エ) ミッシェルパラメータとは？

μ^- 粒子の崩壊における電子のエネルギー分布を表す際用いられるパラメーターで、崩壊の相互作用に依存する係数。 μ^- 粒子は電子と 2 つのニュートリノ(ν) に崩壊する。この崩壊における電子のエネルギー分布は、電子の質量を 0 と近似して、次のように表すことができる。

$$N(x)dx = 4x^2 \left\{ 3(1-x) + \frac{2}{3}\rho(4x-3) \right\} dx$$

ここで、 $x = \frac{E}{E_{max}}$ (E は電子のエネルギー、 E_{max} は電子の理論的最大エネルギー)である。上式の

中 で、 ρ は、ミッシェルパラメータと呼ばれ、この崩壊の相互作用における種々の結合定数を含んだものである。もし μ 粒子の崩壊において電子とともに放出される粒子が 2 つのニュートリノ(ν)または 2 つの反ニュートリノ($\bar{\nu}$)と仮定すると、 $\rho = 0$ となる。もし放出される粒子が 1 つのニュートリノと 1 つの反ニュートリノであるなら、 $\rho = 3/4$ となる。図は $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 崩壊における種々の ρ の値に対応する電子のエネルギー分布を示す。



現在までの実験の結果は $\rho \approx 0.75$ という値を与えており、 μ 粒子の崩壊においては、電子とニュートリノおよび反ニュートリノが放出されることが確かめられている。このことはまた、 μ^- は電子と同符号のレプトン数をもつ粒子であることも示している。

(オ) 物質中でのエネルギー損失

平均的なエネルギー損失割合(mean energy loss rate = stopping power)を、 $\frac{dE}{dx}$ [MeV cm² / g] =

$\frac{dE}{dx}$ [MeV / (g/cm³) / cm]、媒質の密度を ρ [g/cm³]、ミュー粒子が物質中を通過する長さを

L [cm]、とすると、媒質中でのミュー粒子のエネルギー損失[MeV]は、 $\frac{dE}{dx} \cdot \rho \cdot L$ と書ける。こ

の実験では、プラスチックシンチレーターの密度は、 $\rho = 1.0$ [g/cm³]、とする。また、PDG (<http://pdg.lbl.gov/2014/reviews/rpp2014-rev-passage-particles-matter.pdf>)より、銅を通過する時のミュー粒子に対する stopping power は以下のグラフのようになる。

本実験では、最小電離(minimum ionization)と仮定して、 $\frac{dE}{dx} = 2.0$ [MeV cm² / g]を使う。

4 32. Passage of particles through matter

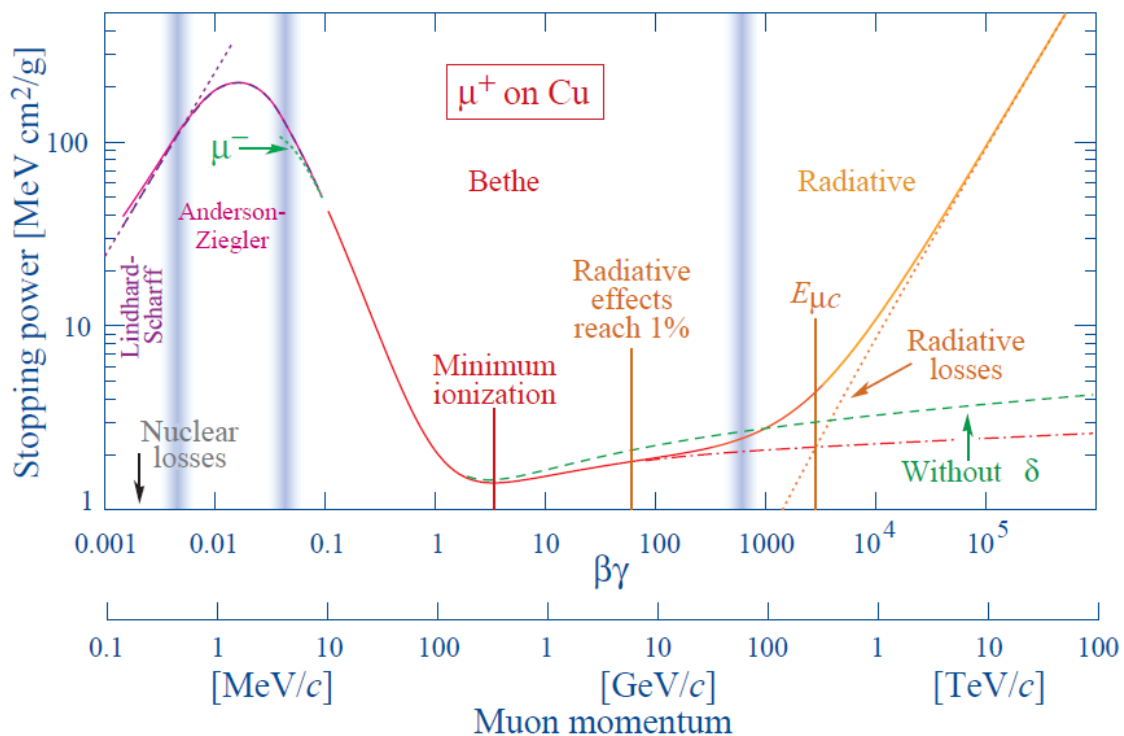


Fig. 32.1: Stopping power ($= \langle -dE/dx \rangle$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ μ^- ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6]. dE/dx in the radiative region is not simply a function of β .

(カ) 検出器の較正とは？

本実験の検出器は、シンチレータに粒子が与えたエネルギー(粒子のエネルギー損失)を光から電流に変換して読み出す。信号の電荷(h_μ) (単位 pc) はエネルギー(E_μ)に比例する。

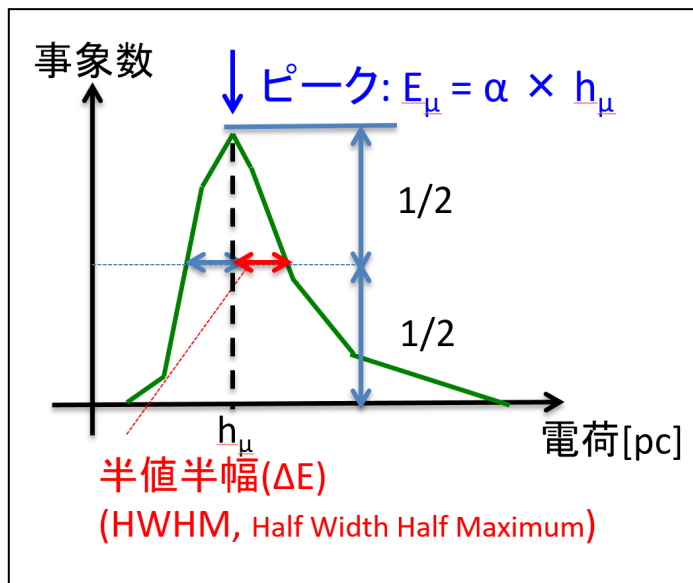
$$E_\mu = \alpha h_\mu$$

この式の係数(α)を求めることを「較正」という。検出器の較正を行った後は、得られた電荷情報から粒子のエネルギーの値を求めることができる。本実験では、ミュー粒子と電子で、 α は同じ値であると仮定する。

すべての検出器では、測定するエネルギーの精度に限界がある。エネルギーの測定精度を「分解能」と呼ぶ。本実験では、3日目に典型的なエネルギー分解能として

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{h_{HWHM}}{h_\mu}$$

を求める。



色々な検出器

粒子の検出器には、本実験で用いるプラスチックシンチレータ以外にも

- 半導体検出器
- 無機シンチレータ検出器
- ガス飛跡検出器
- 水チェレンコフ検出器等がある。

いずれも粒子のエネルギーを電氣的に読み出すことのできる“**別の量**”に変換し、測定する。

$$\text{“読み出す量”} = \text{“係数”} \times \text{“エネルギー”}$$

(キ) フラックスって何ですか？

フラックス(**flux**)とは、単位時間・単位面積・単位立体角あたりの粒子数のことです。

おおざっぱに言えば、地表にどれくらいの粒子が降ってきているかを示す量です。

事象数、観測時間は観測データをそのまま用いますが、検出面積×立体角は、計測と計算で求めなければなりません。

(ク) (有効面積 S)×(立体角 Ω)の計算

右図より、以下の関係式が得られる。

$$dS \cdot d\Omega = \frac{dS_1 \cos\vartheta \cdot dS_2 \cos\vartheta}{r^2}$$

$$r^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + z_0^2$$

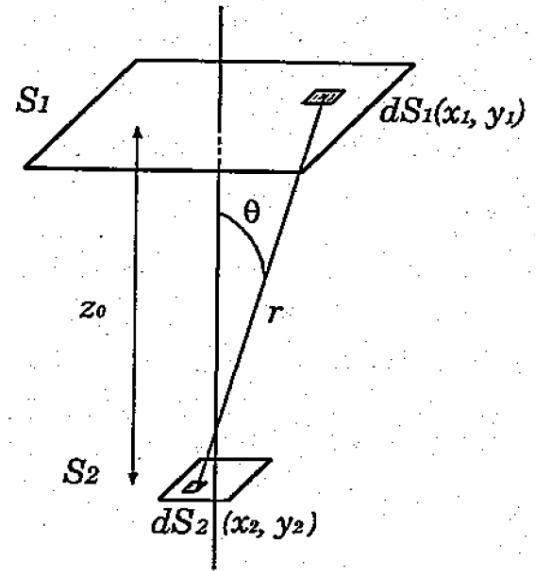
$$S \cdot \Omega = \int_S \int_{\Omega} f(\cos\vartheta) \cdot dS \cdot d\Omega$$

$$\cos\vartheta = \frac{z_0}{r}$$

ここで、 ϑ : 入射粒子の天頂角、である。また、地表におけるミュー粒子の天頂角分布 $f(\cos\vartheta) = \cos^2\vartheta$ とする。

よって、実際の計算は以下になる。

$$\begin{aligned} S \cdot \Omega &= dS_1 \cdot dS_2 \cdot \sum_{x_1} \sum_{x_2} \sum_{y_1} \sum_{y_2} \frac{z_0^4}{r^6} \\ &= dS_1 \cdot dS_2 \cdot \sum_{x_1} \sum_{x_2} \sum_{y_1} \sum_{y_2} \frac{z_0^4}{\{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + z_0^2\}^3} \end{aligned}$$



本実験では、2日目に、1.分割無し、2.四分割で、計算を行う。(さらに九分割、十六分割など、四分割を超える計算を行って精度に関する議論を行った場合には加点をします。)

1.分割無し

$$dS_1 \text{の面積} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \times \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$dS_2 \text{の面積} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} \times \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2$$

$$S_1 \text{と} S_2 \text{の間の距離 } r = z_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$$

$$\text{よって、} S \cdot \Omega = dS_1 \cdot dS_2 \cdot \frac{z_0^4}{r^6} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

2.四分割

S_1 、 S_2 をそれぞれ4つに分割して、各自で工夫して計算して下さい。

ここで得られた $S \cdot \Omega$ 及び、実験2 (S_1 & S_2 & S_3 & S_4) の測定時間 T 、その時得られた事象数 N を用いて、ミュー粒子のフラックス Φ を求めると、

$$\Phi = \frac{N \pm \sqrt{N}}{S \cdot \Omega \cdot T} = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ /cm}^2\text{/sec/sr}$$

となる。

(精度の高い $S \cdot \Omega$ を使う。レポートには精度が良い理由も明記して下さい。)

5. 授業の流れ

(1日目)

1. 素粒子実験とは？ (素粒子と宇宙の概観、素粒子標準模型とは?)
2. ミュー粒子とは？ 宇宙線ミュー粒子とミュー粒子の性質
(ア)生成のしくみ、崩壊モード
3. 装置の説明
(ア)シンチレータ、PMT、ディスクリ、コインシデンス、スケーラー、オシロの働き
(イ)装置全体の構成、どのようなデータを収集するか?
4. 実験操作
(ア)装置と配線の確認(HV, ディスクリ, コインシデンスのどこに何がつながっているか記録する)
(イ)検出器のサイズを測定
(ウ)ディスクリのしきい値の確認
(エ)シグナルの確認
 - ① PMT シグナル (出力波形 S1, S2, S3A, S3B, S3C, S3D, S3sum, S4、プローブ x10 になっていないかどうか確認する) (波形の概形を1つ記録)
 - ② ディスクリ (出力波形 S1, S2, S3sum, S4) (波形の概形を1つ記録)
 1. ディスクリ幅の変更を試みる
 - ③ コインシデンス (出力波形、入力タイミングの確認と調整)
(オ)データ収集プログラムの操作練習、チェックシートの記入内容
(カ)「実験1」(S1 & S2 & S3 & not S4)の開始
 - ① μ -e 崩壊の例の観察
 - ② しばらく待機して、データがとれているかどうかを確認する。
(キ)「実験2」(S1 & S2 & S3 & S4)の開始

(2日目) ノート PC を持参しても良い。

1. 実験2の停止
2. コインシデンスを利用した測定
(ア)シングルレートの測定 (S1, S2, S3, S4) 各 10 秒間程度
(イ)コインシデンスレートの測定(S1&S3, S1&S4, S1&S3&S4, S1&S2&S3&S4, S1& not S3 & S4) 各 30 秒間程度、0 count/30 秒に近い場合には、15 分程度測定する。
3. 実験1 (S1 & S2 & S3 & not S4)の設定、データ収集開始
4. 寿命とは?
5. つき抜け事象の説明
6. つき抜け事象を用いたエネルギー較正、「分解能」とは?

7. 実験操作

(ア)解析プログラムの説明 (Δt , h_e , h_μ)

(イ)解析プログラムの実行

① 実験2をすべて選んで解析をして、ファイルをコピーする

(ウ)各自のPC(個人のノート)に、測定データのコピー (by USB メモリ)

① 別マニュアルを参照する。

8. 測定データの読み方の説明

9. 測定データ解析 1

(ア)測定 (実験2 : MuonEnergy.txt)

① 「実験2」の電荷(h_μ)分布のグラフをPCの表計算ソフトで作成する。エラーバー不要。

② エネルギー(E)の較正定数(α)を求める (測定値 \rightarrow MeVに変換する係数、 $E_\mu = \alpha h_\mu$)

③ 半値半幅を用いた、エネルギー分解能を求める (単位:%)

10. 立体角、フラックスの説明、つき抜け事象を用いたフラックス測定

11. データ解析 2

(ア)有効面積 (S) \times 立体角 (Ω) の計算 (テキスト 4(ク))

① 分割なしと四分分割で計算する。表計算ソフト使用しても良い。必要な長さは測定。(S3の高さ含む) 四分分割より大きな分割計算を行って、分割数と精度に関する議論がなされた場合、加点する。

(イ)ミュー粒子のフラックス (実験2のスケーラー値、live time 値)

① 「実験2」のスケーラー値を用いて、ミュー粒子のフラックスを求める

(3日目) **ノートPCを持参しても良い。**

1. 解析プログラムの説明 (Δt , h_e , h_μ)

2. 実験操作

(ア)「実験1」の停止

(イ)解析プログラムの実行

① 実験1を全て選んで解析をして、ファイルをコピーする

(ウ)各自のPC(デスクトップまたは個人のノート)に、測定データのコピー (by USB メモリ)

① 別マニュアルを参照する。

3. 測定データの読み方の説明

4. 測定データ解析 (実験 1 : MuonDecayTime.txt)

(ア) ミュー粒子の寿命 #片対数グラフに慣れるために、手書きでプロットしてください。

- ① 片対数用紙に「実験 1」の $0.1 \mu \text{ sec}$ 区切りのデータをプロットする。エラーバーをつける。横軸は、 $0 \sim 10 \mu \text{ sec}$ にする。
 1. グラフには事象数=0 以外の全ての点をプロットする。(0.5 μ 秒付近は、ノイズ除去のためデータを人為的に削除している)
- ② 片対数用紙に目で見えた近似直線を引いて、傾きから寿命の計算を行う。
 1. 直線を引く際には $1 \sim 5 \mu \text{ sec}$ の範囲で行う。有効数字 2 桁。
- ③ エラーバーを考慮して、近似直線の変化しうる範囲を見積り、寿命の誤差を見積もる。有効数字 2 桁。

(イ) E_e 分布の作成 (実験 1 : ElectronEnergy.txt)

- ① 「実験 1」の電荷(h_e)分布から、縦軸を規格化した事象数、横軸を規格化したエネルギーのグラフを PC の表計算ソフトで作成する。規格化は、テキスト p.5 のグラフとあわせること。エラーバーつける。
- ② 横軸の規格化は、崩壊電子の理論的最大エネルギーが 1 になるようにする。横軸の範囲は、 $0 \sim 1.5$ までとすること。
- ③ 縦軸の規格化(全データの積分で、面積が 1 になるようにする) : $\frac{1}{N} \frac{dn}{dx}$
 dn : ある区間の事象数
 dx : 区間幅、崩壊電子の理論的最大エネルギーから求めた電荷の最大値(h_{max})
を 1 にした場合 $dx = \frac{Bin_width}{h_{max}}$
 N : 全事象数
 Bin_width : 横軸の 1 区間の幅。
- ④ さらに、理論値のグラフも同じ図に線で書き込む。p.5 の「ミシェルパラメータ」内の式を参考にすること。範囲は横軸の $0 \sim 1$ の間のみ。

(4 日目)

1. レポートを実験室で提出する。提出の際には内容の説明を行う。
2. 不十分な箇所がある場合、4 日目終了(18:30)までに修正すること。

6. μ 粒子実験のレポートのかき方

物理学実験 III~VI では、課題としてレポートの提出が必要です。ここではレポートに記入が必要な内容を伝えます。

1. 目的

本実験の目的について述べる。(3~10 行程度)

2. 物理的背景

本実験の物理的背景について述べる。

(ア) 宇宙線 μ 粒子はどこで生成されるか (3~10 行程度)

(イ) μ 粒子がどのような反応で崩壊するか (2~10 行程度)

3. 実験装置

(ア) 実験装置全体のセットアップ

(イ) 各実験装置 (シンチレーター・光電子増倍管・ディスクリ・コインシデンス・サムアン
プ・スケーラーなど)の“この実験における”はたらき (スケーラー1 行以上、他は各 3
行程度以上)

(ウ) 実験の手順

① 信号チェック (波形(PMT とディスクリの概形を 1 つ書く)、タイミングの図(使ったもの
の全て)、シングルレートの値、コインシデンスレートの値、ホワイトボードの表)

② 実験 1(ミューオンの寿命・エネルギー測定)

③ 実験 2(つきぬけミューオン測定、検出器のエネルギー較正・分解能)

(実験 1 と 2 の手順の説明は簡単で良い (違いを明確に))

4. 実験結果

(ア) 結果 1 “ミューオンのフラックスの測定”：本実験で用いた検出器の $S\Omega$ の計算結果を示す。分割せずに計算した場合と、四分割して計算した場合での差について、精度の観点から論じる。四分割より大きな分割計算を行い論じてある場合には加点する。実験で得られたつきぬけ事象数とかかった時間を示し、ミューオンフラックスを計算する。この際値が $10^{-3}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ のオーダーであれば妥当として良い。また、物理学実験 I~II の結果が残っていれば今回の結果と比較すること。

(イ) 結果 2 “検出器のエネルギー較正とエネルギー分解能”: つきぬけミュオン事象の電荷分布を示す。これを用いて、検出器較正の定数(α)、エネルギー測定 of 誤差 $\Delta E/E$ を求める (単位%)。E (検出器内に落としたエネルギー) = α (定数) \times h(電荷) とみなす。 $\Delta E/E = \Delta h$ (ピークの半値半幅)/h(ピーク値)であることに留意すること。計算に用いた各種測定値を明記すること。

(ア) 結果 3 “ミュオンの寿命測定”: 横軸が μ 信号 - e 信号の時間差、縦が μ の崩壊数のグラフを片対数グラフで作成、寿命 τ の誤差付きの値を求める。(エクセルのソルバーや root などを使用してもよいが、各点の誤差が反映される解析を行うこと。とくにエクセルの指数関数フィットは標準では間違いなので注意すること)。解析途中で対数をとって計算することは構わないが、最終プロットは片対数グラフとすること。誤差を評価した手法 (重み付き最小二乗法など) の説明も行う (A4 半ページ程度。この実験でどのように適用したかも含む)。

(イ) 結果 4 “ μ 崩壊電子のエネルギー分布 E_e 分布の測定”: 結果 3 で求められた α を用いて、崩壊電子のエネルギー分布 E_e をグラフで示す。このとき、理論から求められる分布を同時に示す。縦軸・横軸の取り方に注意すること。また、縦軸・横軸をどのように得たか述べよ。

5. 議論・考察

(ア) 実験に関わる課題について議論・考察せよ。

① [考察] 結果 1 で得られたミュオンの寿命 τ の誤差を評価せよ。また、文献値と比べて、この実験で得られた値との差が測定誤差に収まるかどうかで行うこと。収まらない場合はその理由を考察せよ。文献値は以下を使う。

$$\text{Mean life } \tau = (2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6} \text{ s (PDG2022)}$$

またプロットした最初の 1 点は寿命の計算からは除くべきであるが、その理由を考察しなさい。

② ランダウ分布とは何か調べて説明しなさい。(どのような状況で発生するか、分布の概形、今回の実験で出てきたか、等)

③ [考察] 結果 4 で得られた E_e 分布は理論計算からずれている。この理由を考察せよ。(原因、及び改善可能であればその対策)。

④ 結果 4 において、エネルギー保存則と運動量保存則を用いて、 E_e の最大値 = $m_\mu c^2/2$ であることを示せ。ここで m_μ はミュオン粒子の静止質量である。

⑤ S1 & S4 が偶発事象で理解できるかどうか定量的に考察しなさい。そして、S1 & S3 & S4 と S1 & $\overline{S3}$ & S4 のレートを比べて、S1 & $\overline{S3}$ & S4 で記録されるのはどのような事象か

考察しなさい。なお、S1 & $\overline{S3}$ & S4 で記録される事象に関しても、偶発事象で理解できるかどうか定量的に正しく考察した場合加点する。

6. 参考文献

(ア) レポート執筆において参考にした文献を、番号をつけて並べる。レポート中でその文献を使用した箇所に対応する番号を記入する

7. 感想

実験の感想を記入すること。(1行でも ok です。)