

宇宙班 レポート

班長 多田祐一郎

平成 23 年 6 月 6 日

1 はじめに

このレポートは 2011 年度東京大学五月祭企画 Physics Lab. の宇宙班の活動をまとめたものです。読者として様々な層の方々を想定しているため、次のように 各セクション毎にレベルが設定されており、一つ

*	一般の方向け。数式はでない。
**	少し数式が出て来たり、専門知識が必要になってきたりする。物理選択の高校生から理系大学生向け。
***	ある程度専門的な宇宙、素粒子の知識が前提とされる。物理専攻の大学生向け。

の目安となっております。読む際の参考にして頂けると幸いです。

2 宇宙線物理学

2.1 宇宙線とは*

宇宙線とは宇宙から降り注ぐ様々な目に見えない粒子の総称です。宇宙線は大きく分けると一次宇宙線と二次宇宙線の二つに分けることができます。一次宇宙線とは宇宙から地球にぶつかってくる最初の粒子の総称であり、主に陽子という粒子で構成されています。これらはいわゆる放射線であり非常にエネルギーも高いので、そのまま人体に浴びるととても危険です。ところが、地球の地磁気や大気層によって直接地表に降り注がれるのは防がれています。もちろん宇宙空間に出ればそのような防御機構がないので、地表で暮らす人々が 1 年間に約 2.4mSv 被爆するのに対し、宇宙飛行士は 1 日あたりに 1mSv ほど被爆してしまいます。

一方一次宇宙線が大気層に降り注いだ時に大気分子とぶつかって出来る大量の粒子を二次宇宙線と呼びます。二次宇宙線が再び大気分子とぶつかって出来る粒子もまた二次宇宙線に含めます。二次宇宙線には非常に多くの種類の粒子が含まれますが、ほとんどは大気分子とぶつかりながら消えていってしまい、実際に地表まで届く粒子の多くはミューオンという粒子になります。よって私達宇宙班が観測したのはこのミューオンです。

2.2 荷電粒子の物質との相互作用**

宇宙線は目に見えない小さな粒子であるため検出はさほど簡単ではないのですが、電気を帯びた粒子(荷電粒子といいます)の場合は比較的検出しやすくなります。それは電氣的な力により他の物質と相互作用しやすくなるからです。電氣的な力とは、プラスとプラス、マイナスとマイナスは反発し合い、プラスと

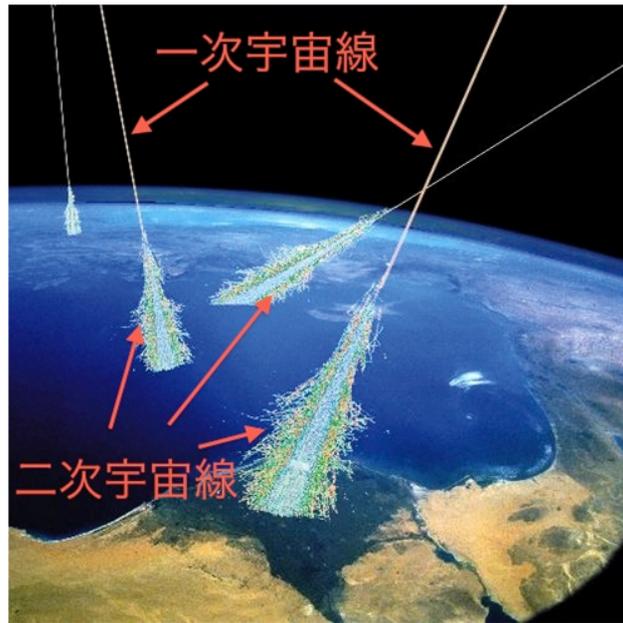


図 1: 宇宙線が宇宙から地球に降り注ぐ様子。

マイナスは引き付け合う力のことで、これをクーロン力と呼びます。宇宙線の中でも荷電粒子が物質の中(もちろん空気中なども含む)を通ると、物質中の原子核や電子とこのクーロン相互作用をします。一般に宇宙線の中の粒子は原子核より遥かに軽いので、原子核とのクーロン相互作用ではあちこちに弾かれて方向は変わるが、エネルギーはほとんど変わりません。これが多数回繰り返され粒子の方向が変化する過程をクーロン多重散乱と呼びます。

一方電子とクーロン相互作用する場合、電子は宇宙線粒子よりも遥かに軽いので今度は宇宙線粒子は方向を変えず、ただ電子を弾き飛ばすことになります。このとき電子を弾き飛ばすことにエネルギーを奪われるので、粒子は方向を変えずに減速していくことになります。つまりこの過程で宇宙線粒子は物質にエネルギーを落とし、これが宇宙線検出の鍵になってくるのです。

2.3 素粒子物理学***

宇宙線はその存在が発見されてからさかんに研究されてきました。もちろん宇宙について調査する目的もさることながら、宇宙線は非常に高いエネルギーの素粒子であり、しかもそれがタダで常に手に入ることから、素粒子物理学の研究に重宝されました。ここで素粒子物理学について少し書いておきましょう。素粒子とは物質を構成する最小単位のことを言います。例えば目の前にリンゴがあったとして、それをひたすら細かく切り刻んでいくとそのうち分子になり、さらに分子を引き離していけば原子が現れ、その原子は原子核と電子で構成され、さらに原子核は陽子と中性子、そして陽子と中性子はクォークという粒子で作られ、現在クォークをさらに細かく切り刻むことは不可能だと考えられています。つまりクォークは素粒子であるというわけです。

さて、素粒子は大きく分けると2種類に分けることができ、物質を作るものをフェルミオン、後述しますが力を伝えるものをボソンと呼びます。光の粒子、光子はボソンです。ここではさらにフェルミオンに注目していきますが、フェルミオンはさらにクォークとレプトンの2種類に分けられます。クォークは表(1)にあるように、アップ u 、ダウン d 、チャーム c 、ストレンジ s 、トップ t 、ボトム b の6種類があり、レプ

1	2	3
u	c	t
d	s	b

表 1: 6 種類のクォーク分類表。それぞれ赤、青、緑の「色」を持ち、さらにそれぞれ反粒子を持つので、実際は 36 種類である。

1	2	3
e^-	μ^-	τ^-
ν_e	ν_μ	ν_τ

表 2: 6 種類のレプトン分類表。それぞれ反粒子を持つので実際は 12 種類である。

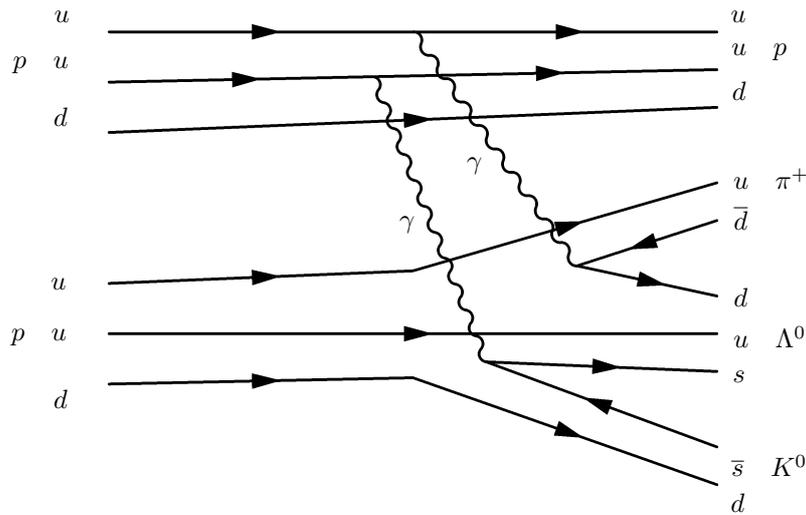


図 2: $pp \rightarrow p\Lambda^0 K^0 \pi^+$ の反応を表す図。左側の 2 つの uud が反応前の陽子、そして右側に反応後の粒子が描かれている。これはあくまでもこの反応の一例である。

トンは表 (2) にある通り、電子 e^- 、電子ニュートリノ ν_e 、ミューオン μ^- 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウオン τ^- 、タウニュートリノ ν_τ の 6 種類があります。レプトンは基本的に単独で存在しますが、クォークは組みを作って存在します。例えば陽子はアップクォーク 2 つとダウルクォーク 1 つ (uud)、反パイ中間子 π^+ (レプトンの反粒子はマイナスをプラスに変えて表される) はアップクォーク 1 つと反ダウルクォーク 1 つ ($u\bar{d}$) で構成されています。

ここで一次宇宙線として陽子 ($p = uud$) が入射し、それが大気分子の陽子とぶつかったときの反応を考えてみましょう。例えば次のような反応が起こります。

$$p(uud) + p(uud) \rightarrow p(uud) + \Lambda^0(uds) + K^0(d\bar{s}) + \pi^+(u\bar{d}) \quad (1)$$

かっこの中はクォーク表示を表しています。この変化は例えば図 (2) で表されるような反応で書けます。このような図では反粒子は実際の運動方向と矢印を逆に描くという決まりがあることに注意してください。途中クォークから光子 (γ) が飛び出したり、光子がクォークと反クォーク (上にバーをつけて表す) に変化したりしていますが、これは後述する電磁相互作用というものです。重要なのはパイ中間子が出来ているところです。これはあくまでも陽子と陽子の衝突で起こる反応の 1 つの例にすぎませんが、他にも様々な方法で一次宇宙線からパイ中間子が生成されます。このパイ中間子からミューオンが生れるのです。

ということで次はパイ中間子からミューオンが出来る過程を見てみましょう。反パイ中間子から反ミュー

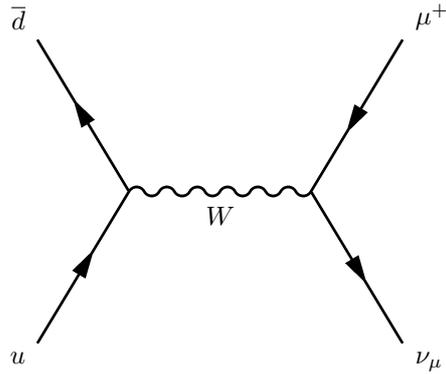


図 3: 反パイ中間子から反ミューオンとミューニュートリノが出来る様子。

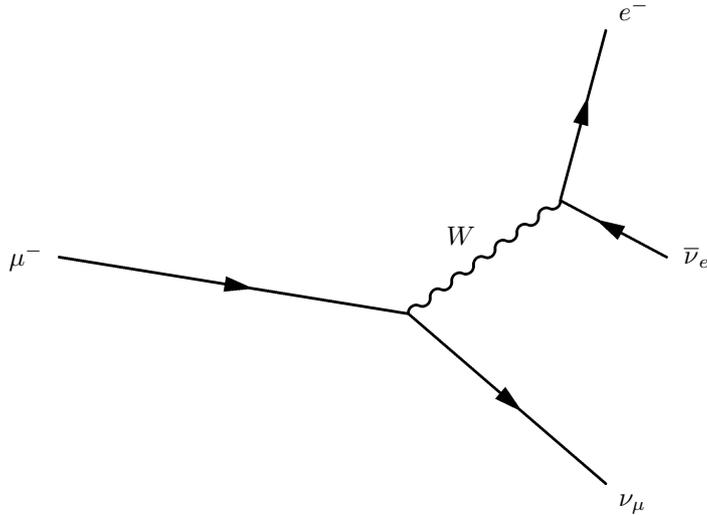


図 4: ミューオンが崩壊し電子、ミューニュートリノ、反電子ニュートリノを放出する様子。

オンができる反応は式を使えば以下の様に表され

$$u + \bar{d} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2)$$

図で描けば図 (3) の様になります。今度は波線が W になっていますが、これはウィークボソンという粒子を表し、後述するようにこれは弱い相互作用とよばれる反応です。反ではなくパイ中間子からミューオンが出来る反応もほぼ同じ反応となります。ところでこの反応はパイ中間子が何の粒子ともぶつかっていないのに起こっています。何か変な感じがしますが、むしろ粒子の多くはこのように勝手に反応し崩壊していってしまうものばかりで、崩壊せずに安定に存在するものは電子などのごく一部の粒子のみなのです。ちなみにパイ中間子は生成してから約 26ns という非常に短い時間で勝手にこの反応を起こし崩壊してしまいます。

さて、こうしてミューオンは生成され地表に届くわけなのですが、実はミューオンもだいたい $2\mu s$ 程度で崩壊してしまいます。崩壊を表す式は以下の様です。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (3)$$

後にでてくるパリティの破れの実験はここで生じる電子を観測することになります。

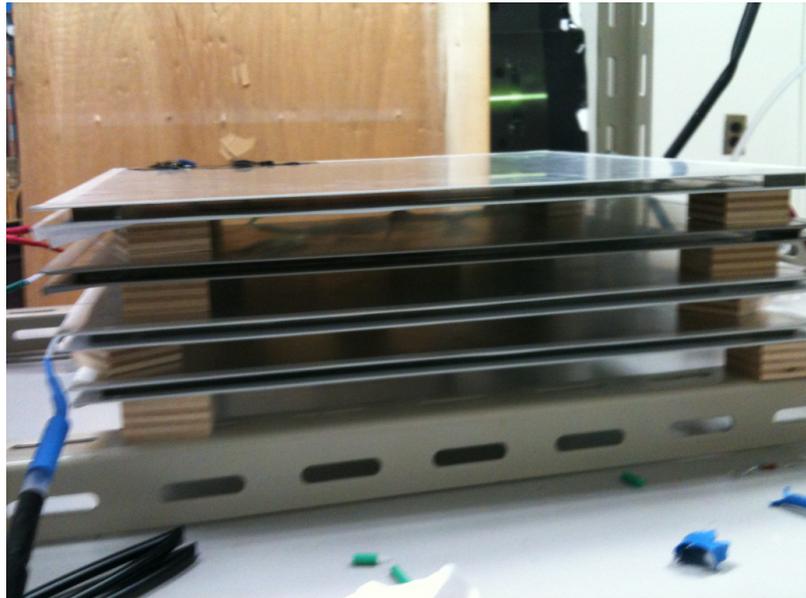


図 5: 私達が作製したスパークチェンバー。

3 スパークチェンバー

3.1 スパークチェンバーとは*

では私達が作製したスパークチェンバーについて説明しましょう。スパークチェンバーとは宇宙線の中でもプラスかマイナスの電気を持った粒子 (荷電粒子と呼びますが) が通った跡に沿って放電し、粒子の軌跡を目に見えるようにする装置です。図 (5) のような形をしています。要するに薄いアルミ板を積み重ねたものです。

各アルミ板は 2 枚ずつペアになっていて、アクリル棒を挟んで接着されています。こうするとペアのアルミ板の間はアクリル棒によって囲われ密閉されますが、この中には横に開けられた穴からチューブを通してネオンやヘリウムといった希ガスとよばれる気体が封入されています。さて、このアルミ板を上から荷電粒子が突き抜けると前述したクーロン多重散乱によって封入された気体原子から電子が弾き飛ばされます。このとき、アルミ板間に高電圧がかかっているとそれに引かれて電子が加速されます。十分に電圧が高く加速が大きければ今度はこの電子が別の原子の電子を弾き飛ばします。こうして弾き飛ばされた電子がどんどん増えるとそれが放電線として目に見えるようになり、この状態を電子なだれと呼びます。一連の流れを図示したのが図 (6) です。

スパークチェンバーとはこのような仕組みで宇宙線が通った部分に放電をおこす装置なのです。

3.2 シンチレーションカウンターと光電子増倍管**

前セクションの荷電粒子の相互作用のところで荷電粒子が物質にエネルギーを落とす仕組みを説明しました。ここでは具体的に落としたエネルギーをどのように宇宙線検出に利用しているかを説明します。この落としたエネルギーを用いて荷電粒子を検出する機械として有名なのがシンチレーションカウンターです。日本語で言えば蛍光計数器といったところでしょうか。一般にシンチレーションカウンターは暗幕に包まれた形をしており、中には蛍光物質が入っています。この蛍光物質の中に荷電粒子が入射すると多数の

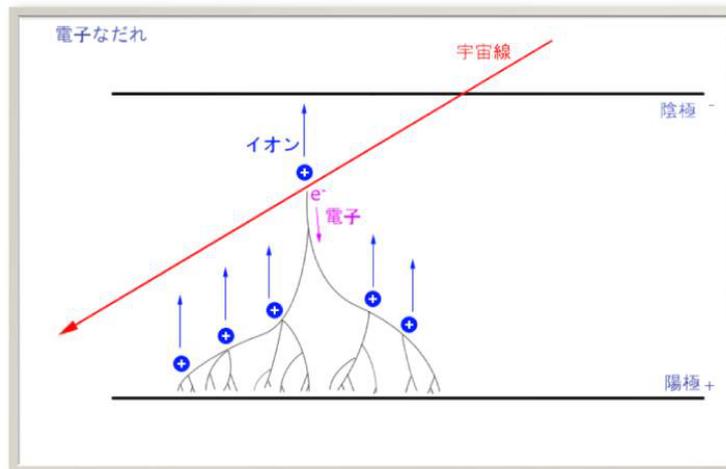


図 6: 宇宙線が通過する時に生じた電子によって電子なだれが発達する様子。



図 7: 実際に作製したスパークチェンバーが宇宙線を捉えている様子。

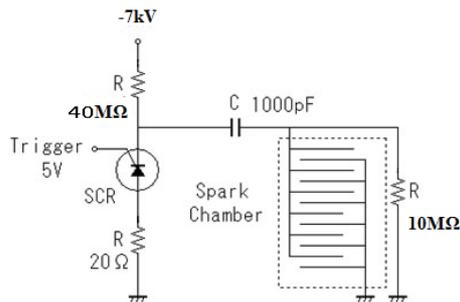


図 8: 極板に瞬間的に高電圧を加えるために、私達が実際に作製使用した高電圧印加回路。

電子が弾き飛ばされます。そしてこれら電子が再び原子核に捕えられ落ち着くときに、差分のエネルギーを光として放出します。こうして蛍光物質は中に荷電粒子が入ると仄かに光るのです。私達の身の周りにある光をあてておくと、その後しばらくぼんやりと光る蛍光性の物質も原理はほぼ同じです。ただし身の周りにある蛍光物質は電子が落ち着き光が放出されきるまでに長い時間がかかり、しばらく光りっぱなしになるのに対し、宇宙線検出に使われるシンチレータは荷電粒子が通ってから数 ns で光を放出しきるとい違いがありますが。

そしてこのシンチレーションカウンタから出た光を検出するのが光センサーである光電子増倍管、英語ではフォトマルチプライア、略してフォトマルという装置です。これは金属に光を当てると電子が飛び出すという光電効果というものを利用し光信号を電気信号に変え、さらに生じた電子を約 2kV の電圧で加速させながら何度も極板に衝突させ中の電子を弾き飛ばさせることで、電気信号を大幅に増幅するという仕組みで出来ています。これをシンチレーションカウンタと接合することで宇宙線が通ると電気信号を出す検出器が完成します。

私達はこのシンチレーションカウンタをスパークチェンバーの上下におきました。こうすることで上下のシンチレーションカウンタがほぼ同時に信号を出したとき、確実にスパークチェンバーを宇宙線が通過したことがわかります。なぜ宇宙線が通過したことがわからないといけないかというと、実は極板にかかる電圧は宇宙線が来ていないときでも十分放電できる程の大きさでなければならず、確かに宇宙線が通ったときだけ電圧をかけないと常に勝手に放電がおきてしまうという事情があるためです。

3.3 高電圧印加回路**

宇宙線が来たかどうかの判定方法はわかりましたが、ではシンチレーションカウンタからの信号を引き金として実際に極板に高電圧を加える仕組みはどうなっているのでしょうか。ここでは私達が使用した高電圧印加回路、図 (8) をもとに説明していきます。

この回路の肝となるのがサイリスタという部品です。これは普段は電流を流さないのですが、Trigger と書かれた部分に 5V の電圧がかかった瞬間矢印の方向に電流を流すという性質を持っています。つまり、宇宙線が来た時に出るシンチレーションカウンタの信号を 5V 電圧信号に変換し、サイリスタに入力するので、半導体素子をご存知の方は、何だただのトランジスタか、と思われるかも知れませんが、このサイリスタの特徴は数千 V、数千 A の大電圧大電流をわずか 5V の引き金で、しかも 500ns 程度のわずかな時間で駆動できるという所にあります。実際スパークチェンバーは宇宙線が通過してから $1\mu\text{s}$ 以内に 7kV をかける必要があり、このサイリスタは必須なアイテムとなります。私達はこのサイリスタを首都大学東京の汲田先生からお借りしましたが、まともに買えば 20 万円近くする大変高価なものです。

さて、宇宙線が来ておらずサイリスタが駆動していないとき、40MΩ、10MΩ の抵抗を介し、-7kV の電源が

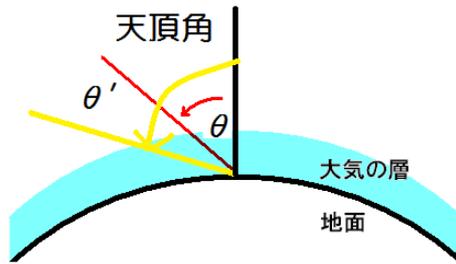


図 9: 宇宙線の天頂角を表した図。

1000pF のコンデンサを充電します。宇宙線が来てサイリスタが駆動すると今度は極板、グラウンド、 20Ω の抵抗を通して電流が流れコンデンサが放電仕切ります。こうして極板で放電が起こります。各抵抗の役割としては、 $40M\Omega$ はコンデンサ充電時に電源に電流が流れすぎのを防ぐために、 $10M\Omega$ はコンデンサが充電するときは極板に電荷がたまるのを防ぎ、コンデンサが放電するときは電流を通さず極板にのみ電流が流れるようにするために、そして 20Ω はサイリスタに電流が流れすぎずかつ極板には十分に電流が流れるようにそれぞれ適切な抵抗値が選ばれています。

とにかくこのような回路で極板に電圧をかけているのですが、この回路の特性からスパークチェンバーの不感時間も求まります。それはコンデンサが一度放電した後再び充電されるのにかかる時間のことですが、どれくらいかというと

$$RC = (40M\Omega 10M\Omega) \times 1000pF$$

$$\sim 50ms \quad (4)$$

となり、一度宇宙線が来てからだいたい 50ms は宇宙線が来てもスパークチェンバーは不発に終わります。とはいってもそこまで気にするほどの長さではないので無視しますが。

4 天頂角分布

4.1 天頂角とは*

宇宙線の天頂角とは、図 (9) のように、宇宙線が真上からどれくらいの角度をつけて飛来したかを表すものです。つまり宇宙線の天頂角分布を測定するとは、宇宙線が来るたびにその天頂角を測り、各天頂角からどのくらいの数字宇宙線が来たかを数えることを意味しています。

では天頂角分布を測定して一体どんなことがわかるのでしょうか。そもそもとして宇宙線は真上、すなわち天頂角 0° から来る数が最も多く、天頂角が大きくなるにつれてその数は減ると予想されます。なぜならさきほどの図 (9) に示しましたように、天頂角が大きくなればなるほど、宇宙線は地表に届くまでに長い距離を走らなければならない、その分時間もかかり、さらに空気中の分子と衝突するリスクも高まるからです。この関係から逆に、宇宙線の中でも比較的天頂角が大きい成分が多い粒子は物質を透過する能力が高いと言えます。地表で観測出来る宇宙線はほとんどがミュオンですので、宇宙線の天頂角分布を調べることでよりミュオンがどれくらいの透過力を持っているか、あるいはミュオンの透過力がわかっている場合は逆に測定した宇宙線が確かにミュオンであることを確かめることができます。

4.2 ミューオンの天頂角分布**

一般に宇宙線がどのような天頂角分布を示すか考えてみましょう。仮定として、ある宇宙線は常に地表から高度 X で生成するとします。実際ミューオンが生成される高度はほぼ 10km で一定です。さて、ここで高度 X で生成された粒子が天頂角 θ から来る個数を $J(X, \theta)$ としますと、この粒子が実際に走った距離は $X/\cos\theta$ ですので以下の等式が成り立ちます。

$$\begin{aligned} J(X, \theta) &= J(X/\cos\theta, \theta = 0) \\ &= J(X, \theta = 0) \frac{J(X/\cos\theta, \theta = 0)}{J(X, \theta = 0)} \end{aligned} \quad (5)$$

この粒子が平均的に飛ぶ距離、平均自由行程を λ とし、 $J(X, \theta = 0)$ は平均自由行程について指数関数的な減少を示すとして

$$J(X, \theta = 0) = J_0 \exp\left(-\frac{X}{\lambda}\right) \quad (6)$$

などおきます。これを式 (5) に代入すれば

$$J(X, \theta) = J(X, \theta = 0) \exp\left[-\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) \frac{X}{\lambda}\right] \quad (7)$$

今 $\theta \ll 1$ とすると $1/\cos\theta - 1 \ll 1$ であり、 $x \ll 1$ に対する近似式

$$\exp(x) \simeq 1 + x \quad (8)$$

$$(1 + x)^\alpha \simeq 1 + \alpha x \quad (9)$$

を用いて

$$\begin{aligned} J(X, \theta) &\simeq J(X, \theta = 0) \left[1 - \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) \frac{X}{\lambda}\right] \\ &\simeq J(X, \theta = 0) \left(1 + \frac{1}{\cos\theta} - 1\right)^{-X/\lambda} \\ &= J(X, \theta = 0) (\cos\theta)^{X/\lambda} \end{aligned} \quad (10)$$

となり、粒子の個数は $\cos^n\theta$ に比例することがわかります。実験的に n はミューオンで約 2、電子で約 3、陽子で約 8 などの値が求められています。

4.3 天頂角分布の測定***

天頂角分布の測定自体はスパークチェンバーを正面と横から 2 台のビデオで撮影するだけという簡単なものですが、データの解析はそこまで自明なものではありません。

まず、方位角の寄与を考える必要があります。方位角と東西南北の角度のことであり、ここでは ϕ で表します。方位角の寄与とはどのようなものなのでしょう。簡単に考えると天頂角 $\theta = 0$ の成分は東西南北の区別がないのに対し、 θ がある程度大きい成分は東西南北それぞれから来るのが出来るので、これを単純に同じ θ であるとして全ての個数を数えあげてしまうと、大幅な数え過ぎになってしまうのです。これが方位角の寄与です。これを正しく処理するためには個数ではなく強度 (フラックス) という量を扱わなければならないこととなります。フラックスの説明に入るまえに立体角の説明をしておきましょう。

半径 1 の球 (単位球) を考えます。球の中心から適当な錐を放射させると単位球表面が切り取られることに

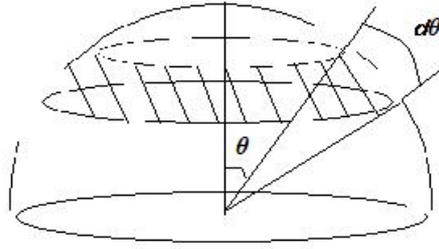


図 10: 天頂角が θ から $\theta + d\theta$ の間の立体角。長方形で近似すれば幅は $d\theta$ 、長さは $2\pi \sin \theta$ より面積は $2\pi \sin \theta d\theta$ となる。

なりますが、この時切り取られた単位球表面の面積をこの錐の持つ立体角として定義します。全立体角は単位球の全表面積 4π です。

フラックスとは単位立体角あたりの入射粒子の個数として定義されます。微小角度 $d\theta$ に対し θ から $\theta + d\theta$ の間の立体角は図 (10) に示されるように $2\pi \sin \theta d\theta$ であるので、フラックスは測定された全粒子数をこの値で割って求められます。

こうして得られたフラックスはあくまで宇宙線がある 1 点を通る時のみの話です。実際はスパークチェンバーのサイズをさらに考慮しなければなりません。現在シンチレーションカウンタは $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の正方形の形をしていて、それを上下 15cm 離してセットしています。このとき天頂角 θ 、方位角 ϕ の宇宙線が両方のシンチレーションカウンタを通過するには、上のシンチレーションカウンタの影と下のシンチレーションカウンタの重なった部分を通ればよいことがわかります。この部分の面積は

$$(0.2 - |0.15 \tan \theta \sin \phi|) \times (0.2 - |0.15 \tan \theta \cos \phi|) [\text{m}^2] \quad (11)$$

となります。天頂角 θ から $\theta + d\theta$ 、方位角 $\phi + d\phi$ までの宇宙線をひとまとめに計測したとすると、1 点がこの方向に見込む立体角は $\sin \theta d\theta d\phi$ であり、これが先程の面積全体に言えることになるので全立体角は

$$(0.2 - |0.15 \tan \theta \sin \phi|) \times (0.2 - |0.15 \tan \theta \cos \phi|) \sin \theta d\theta d\phi \quad (12)$$

となります。最後に私達は天頂角のみの分布を調べたいので、方位角については全方位角 2π で積分することで、総立体角

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} d\phi (0.2 - |0.15 \tan \theta \sin \phi|) (0.2 - |0.15 \tan \theta \cos \phi|) \sin \theta d\theta \\ & = (0.08\pi - 12 \tan \theta + 4.5 \tan^2 \theta) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

が得られ、実際に得られたカウント数をこの値で割ってフラックスを出すこととなります。

さて、実際にミュオンの天頂角を測定し得られた結果を図 (11) に載せました。棒グラフは実際の測定量を、曲線はフィッティングした $\cos^2 \theta$ のグラフになっています。40 度以上の部分では少しズレているが、これはスパークチェンバーでの高角度測定はその形状の制限から誤差が大きくなってしまふことを考慮すれば許される範囲であることに気をつければ、非常によくあっているとと言えます。こうして確かに宇宙線として地表に降り注いでいるもののほとんどがミュオンであることが確かめられます。

4.4 東西効果**

天頂角分布を測定した際に得られたデータを、天頂角ではなく方位角、つまり東西南北でプロットし直してみると面白い結果が現れてきます。実際にそのプロットを図 (12) に示しました。これを見るとミュ-

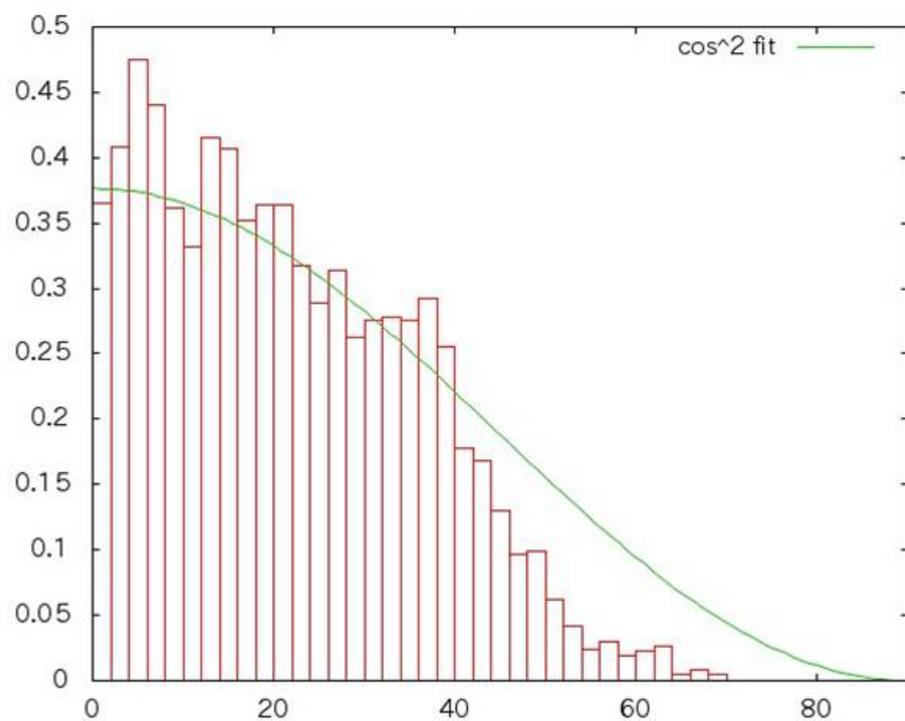


図 11: ミューオンの天頂角分布の実験結果。総立体角で割る際に規格化しなかったため縦軸は物理量ではなく、ただの比であることに注意。

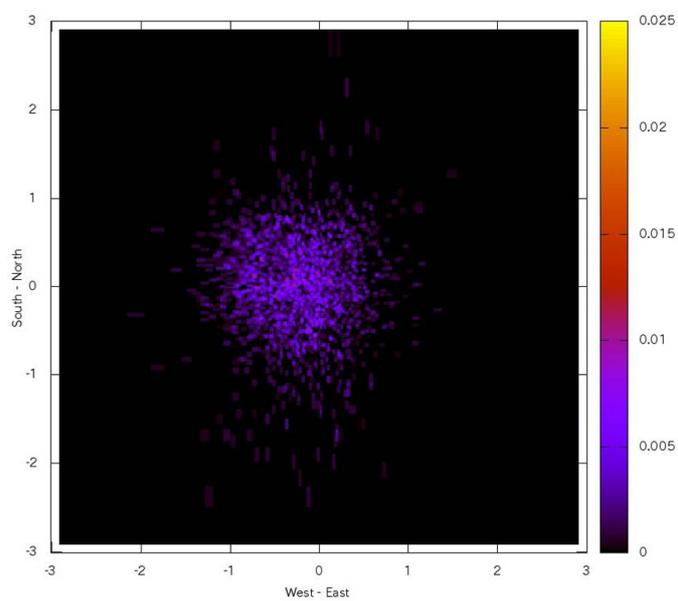


図 12: 天頂角分布を測定した際に得られたデータを、東西南北でプロットし直したもの。南北方向にはほとんど偏りはないが、東西では西から来る量が多くなっていることがわかる。

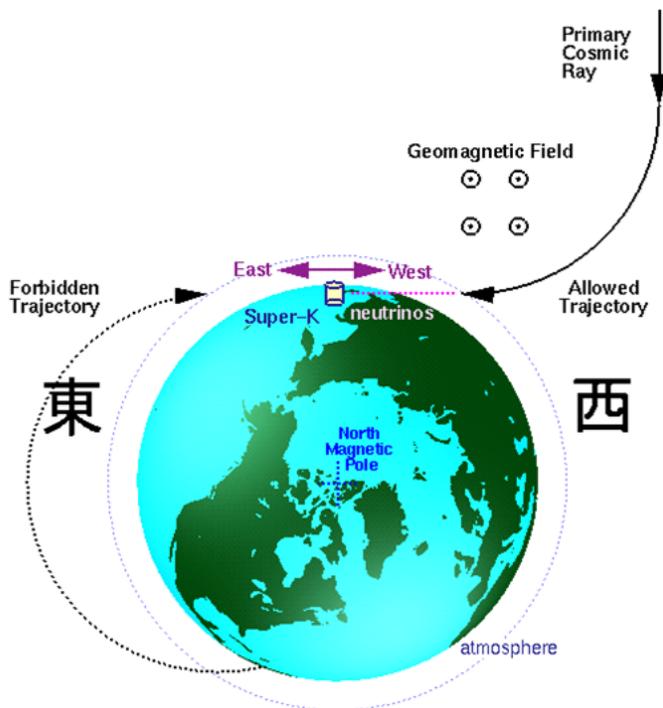


図 13: 一次宇宙線がプラスの電荷を持つとした場合の軌跡。

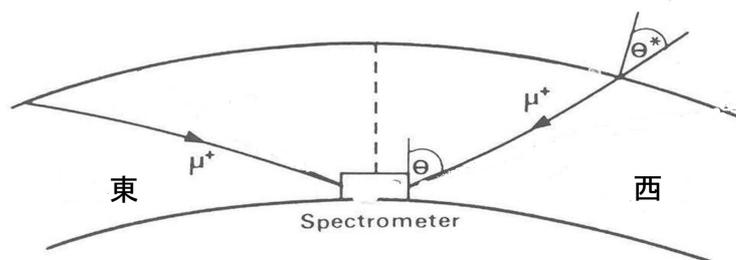


図 14: 一次宇宙線が大気分子と衝突して生じたミュープラスの軌跡。

オンは西から来やすいということがわかりますが、これを東西効果と呼びます。なぜこのようなことが起こるのか考えてみましょう。

まず一次宇宙線のことを考えましょう。前述した通り一次宇宙線は主に陽子で構成されており、これはプラスの電荷をもっているため、地球の磁場からローレンツ力を受け図 (13) の曲線のように軌跡を曲げられます。ということで西から来る場合と異なり東から来る一次宇宙線は地球を大きく迂回して入ってこなければなりません。このような軌跡をとるためには宇宙線は十分に高速、つまり高エネルギーである必要があります。必然的に東から入射する宇宙線の数は減ります。同じように二次宇宙線についても考えてみましょう。一次宇宙線は大気圏に突入するとすぐに大気分子と衝突し二次宇宙線となり、生じた粒子はすぐにミュオンに変化します。ここでミュオンは実はミュープラスとミューマイナスという、プラスの電荷を持つ種類とマイナスの電荷を持つ種類の 2 種類あることに注意してください。まずミュープラスの軌跡を考えましょう。ミュープラスはプラスの電荷をもっているため図 (14) に示したように時計回りの軌跡を描きます。するとこの図から東から来るより西から来る方が、地表に届くまでの距離が短いことがわかります。当然大気の層を通らなければならない距離が短いことから大気分子と反応せずすむ粒子が多いということ、また短い時間で地表に届くので寿命による崩壊の数も少ないということが言え、東よりも西から来る粒子

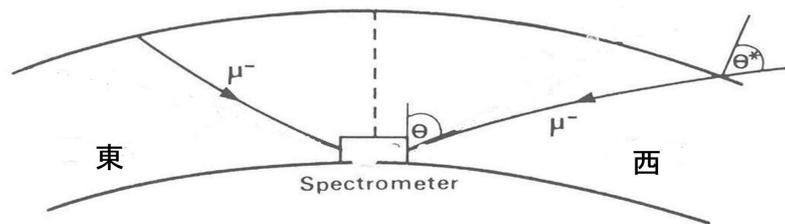


図 15: ミューマイナスの軌跡。

の方が多くことがわかります。一方ミューマイナスの方は図 (15) にあるようにミュープラスとは軌跡が逆になり、結果東からくる粒子の方が多くなります。ところがもとの一次宇宙線が主に陽子、プラスの電荷をもつ粒子で構成されていることから、二次宇宙線のミューオンもミュープラスの方がマイナスより若干多くなっていることが実際に測定されています。そのため二次宇宙線の段階でもトータルで西からくる粒子の数が多くなり、ゆえに西からくる宇宙線は東からくるよりも多くなる、というわけなのです。

5 弱い相互作用のパリティ対称性の破れ

5.1 4つの相互作用**

よく自然界には4つの力があると言われます。電磁気力、重力、弱い力、強い力の4つがそれです。この中ではおそらく重力がもっとも馴染深いものでしょう。ご存知の通り重力は互いに質量を持った物質がそれぞれの質量に比例し、距離の2乗に反比例した大きさで引っ張り合う力のことです。ところが重力は他3つの力に比べると桁違いに弱いので、素粒子などの非常に小さな世界のことを考えるときは大抵無視されてしまいます。

次に電磁気力。電磁気力とはプラスとマイナスの電気を持つものが引っ張り合ったり、磁石のS極とN極が引き合う力のことで、確かに何度も経験したことはあるけど、そこまで身近ではないと感じる人が多いでしょう。しかし、実は私達が一般に力と呼ぶ、手で触れて押したり引いたりする力は全て、触れた部分の分子の電氣的反発、すなわち電磁気力に由来するものなのです。他にも固体や液体など多数の分子が近くにとどまっているのも電磁気力によるものですし、実は電磁気力は最も身近な力といって過言ではないのです。またここから如何に重力が弱いかということもわかります。もし重力がもう少し強かったら、私達の体や身の回りの物体は全てばらばらに引き裂かれて地球内部に落ちていってしまうでしょう。

さて、以上2つの力は比較的理解がしやすいですが弱い力と強い力はそうはいきません。そこでもっと正しく理解するために、素粒子論の立場における力の解釈に移っていきましょう。素粒子論において力はボソンと総称されるある種の粒子を媒介としてエネルギー等をやりとりすることと考えられます。媒介粒子はそれぞれ電磁気力なら光子、弱い力ならウィークボソン、強い力ならグルーオン、そして実験的にはまだみつかっていませんが重力ならグラビドンとなっています。これらボソンはエネルギーだけでなく電荷や「色」という物理量 (実際に粒子が色付いているわけではないのですが) なども運ぶので、ボソンの授受は粒子に力を働かせるだけでなく、粒子そのものを変えてしまったり、粒子がペアで生成したり消滅したりというようなことも起こし得ます。そのため物理界では「力」ではなく「相互作用」という言葉を使うことが多く、自然には電磁相互作用、重力相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の4つの相互作用があることとなります。

5.2 弱い相互作用のパリティの破れ***

ここでは弱い相互作用についてさらに詳しく見ていきましょう。図(3)を再び見てください。弱い相互作用はこのようにクォーク、レプトンを世代(分類表の縦の列)の中で変換するという性質を持っています。そしてこの変換には一つ制限がありカイラリティの同じ状態同士でしか変換しないというものです。カイラリティとは粒子が左手型か右手型かを示す物理量のこと。実は素粒子は二つの状態が重ね合わさって一つの粒子として振る舞っており、その二つの状態をそれぞれ左手型右手型と呼ぶのです。なぜ左手と右手と呼ぶのでしょうか。それを説明するためにまず右手の親指、人差し指、中指を出し、まさにフレミングの左手の法則のような形にしてみてください。このとき親指を x 軸、人差し指を y 軸、中指を z 軸の方向として3次元座標を決めると、この座標を「右手型の座標」と呼びます。さて次にこの右手型の座標の x 軸 y 軸 z 軸を全て反転させてみてください。こうして出来た座標は先程の右手をどのように回転させても実現することはできず、これを表すには左手で似たような形を作らねばなりません。ということでこの座標系を「左手型の座標」と呼び、そして先程の x 軸 y 軸 z 軸全てを反転させることをパリティ変換と呼びます。粒子のカイラリティはこのパリティ変換によって互いに入れ替わることがわかっています。そのため二つのカイラリティを左手型右手型と表現するのです。これらは慣性系をつなぐローレンツ変換に対して異なった変換則を示します。そのため「物理法則は任意の慣性系で同じ形をとる」という相対性原理のために、カイラリティの異なる状態はカップリング出来ず、弱い相互作用で移るのは同じカイラリティの粒子だけとなるのです。

さて、ここで重要な実験事実があります。現在ニュートリノは左手型しか、反ニュートリノは右手型しか見付かっていないのです。そのため素粒子の標準模型ではニュートリノは左手型の、反ニュートリノは右手型のカイラリティしか持たないことが仮定されています。そして先程の同カイラリティの縛りよりレプトンは左手型の状態しか弱い相互作用しないという非常に奇妙な性質が導かれます。こうして弱い相互作用のラグランジアンはパリティ変換で不変ではなくこれら弱い相互作用のパリティ対称性の破れと呼ばれます。

ではこれはどのように観測可能な形として現れるのでしょうか。これにはヘリシティという物理量が重要になってきます。ヘリシティとは運動量の方向に量子化軸をとったときのスピンの大きさのことをいい、クォークやレプトンはスピン $1/2$ の粒子であることからヘリシティは $+1/2$ か $-1/2$ しかありません。ヘリシティが正の時、粒子は右ねじの方向に回転しているので右巻きと呼び、負の時は左巻きと呼びます。カイラリティの右手型左手型と呼び名が似ていますが、実際相関があり、カイラリティとヘリシティが一致する確率は $(1 + v/c)/2$ であり、異なる確率は $(1 - v/c)/2$ となります。ここで粒子の速度を v 、光速を c としています。これをもとにまずはパイ中間子の崩壊を考えましょう。パイ中間子はスピンゼロの複合粒子ですが、この静止系では運動量の保存よりミュオンと反ミュオンニュートリノは正反対の方向に放出されます。ここでニュートリノは質量が非常に小さく、素粒子の標準模型ではゼロとして扱われるということに注意せねばなりません。質量がゼロということが何を意味しているかということ、速度が常に光速に等しいということです。つまり先程のカイラリティとヘリシティの一致不一致の確率の v に c を代入すると、不一致の確率がゼロとなり、さらにニュートリノのカイラリティの偏りの仮定より、ニュートリノは左巻き、反ニュートリノは右巻きのヘリシティしか持ちえないこととなります。ということで放出された反ニュートリノは右巻きであることが確定し、スピンゼロのパイ中間子からスピンを持つ粒子が放出されたので、角運動量保存の法則よりミュオンは反ニュートリノとは反対のスピンを持たねばなりません。ところがミュオンは反ニュートリノと運動方向も反対なので結局ヘリシティは反ニュートリノと同じの右巻きとなります。

こうして宇宙線として降り注ぐミュオンは下向きに右回りのスピンを持ちやすくなり、この状態を偏極しているといいます。文献によれば14%ほど右回りに偏極しているそうです。さてさらに降り注いだミュオンが電子、ミュオンニュートリノ、反電子ニュートリノに崩壊する場合を考えましょう。弱い相互作用が

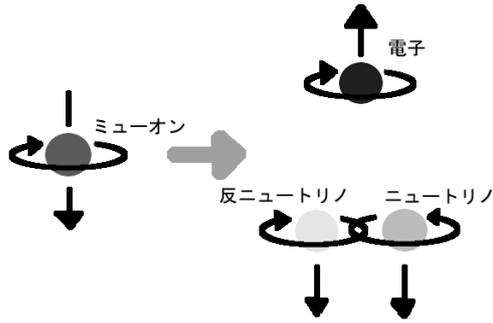


図 16: 右巻きのヘリシティを持つミューオンが崩壊する様子。弱い相互作用のバリティ対称性の破れ、カイラリティとヘリシティの一致不一致の確率、角運動量保存の法則を考慮するとこのように飛び出る確率が高くなる。

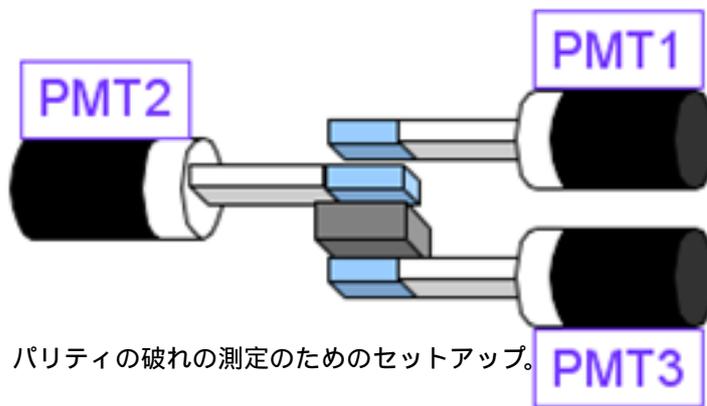


図 17: パリティの破れの測定のためのセットアップ。

左手型の粒子と右手型の反粒子しか作らないこと、カイラリティとヘリシティは一致しやすいこと、そして角運動量保存の法則よりトータルのスピン量は崩壊の前後で変化しないことを考慮すると、ちょうど図(16)のような崩壊がこれら全てをうまく満たしていることがわかります。そしてこのとき2つのニュートリノが電子と反対に飛び出していることから、電子は反動でもっとも勢い良く飛び出ることがわかります。こうしてニュートリノが片方のカイラリティしか持たないという測定しづらい事実から、電子が上に飛び出しやすいという非常に測定しづらい事実が導かれました。定量的な話をすると、ミューオンの偏極率を P とすると電子が上に飛び出す確率は $1 + P/6$ 、下に飛び出す確率は $1 - P/6$ となることが計算でき、故に上に飛び出した数と下に飛び出した数を実際に計測しそれぞれ N_+ 、 N_- とすれば、偏極率は

$$\begin{cases} 1 + \frac{1}{6}P = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \\ 1 - \frac{1}{6}P = \frac{N_-}{N_+ + N_-} \end{cases} \Leftrightarrow P = 3 \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad (14)$$

と求められます。

5.3 パリティの破れの測定*

この章では実際にどのようにパリティの破れを測定するかを見て行きましょう。実験のセットアップは図(17)の様です。ポイントはシンチレーションカウンタで厚さ 3cm 程の厚いアルミ板を挟んでいることです。このとき、もし1番と2番のシンチレーションカウンタのみがほぼ同時に信号を出し3番は信号を出さなかったとするとそれはミューオンがアルミ板に阻まれて静止したことを意味します。よってこの後約 $2\mu\text{s}$ 程で2番、あるいは3番のシンチレーションカウンタが反応したとするとそれは崩壊して出て来た電

測定時間	上に出た数	下に出た数
250 時間 18 分 41.7 秒	61	13

表 3: パリティの破れの測定結果。

子であると考えられ、前者は上に、後者は下に飛び出していることとなります。あとはこの数を数えれば実際に弱い相互作用のパリティの破れを観測できます。実際に測定した結果を表 (3) に示しました。確かに上に出た電子の数が下に出た数より多くなっていますが、実はこれは実験としては失敗なのです。なぜかというところこの実験で得られる上下の違いは理論的には数%であることが計算でき、この結果はあきらかに上が数えすぎであります。ミュオン以外の事象でカウントしてしまう理由として考えられるものは 2 つ挙げられます。1 つ目は、ミュオンが入射しアルミ板で止まってちょうど $2\mu\text{s}$ 程度たった後に再び別のミュオンが来てしまった場合です。この時電子が上下どちらに出たかにかかわらず上のシンチレータが反応してしまいます。2 つ目はシンチレータのアフターパルスというものです。シンチレータは不順物が混ざっていると、高エネルギーの粒子が通過した時、通過後数 μs で 2 発目の信号を誤ってだしてしまうという性質を持っており、これをアフターパルスと呼びます。このアフターパルスが出てしまった場合もやはり上のシンチレータはカウントしてしまいます。これらノイズを落とす方法として、ミュオンを止める用のアルミ板をはずして再び実験をするという方法が考えられます。このときアルミ板がないためミュオンが崩壊して電子が出て来ることはなく、それでも上のシンチレータがカウントをしたのであれば、それは上述した 2 つの理由によるノイズであると言えます。こうしてノイズのみを計数し、その時間あたりの割合を求めて先程の実験結果から引けば、かなりノイズの減ったデータを得ることができます。出来るのですが、今回時間の都合上このような実験を執り行うことが出来ず、中途半端な結果のまま終わってしまいました。これは私達としても大変悔まれることで、ここに謝罪いたします。

6 終わりに

今回宇宙班は実験を行うにあたり、東京大学理学部物理学科小沢研、横山研、首都大学東京汲田研から全面的な協力を頂き、また東京大学理学部から資金面の援助、実験部屋の提供をして頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。