

2004年度前期 課題演習 A1
ミューオンの東西効果

畔柳竜生
太田洋輝
富島佑允
西尾洋祐
西辻泰典
山本新

10月4日

目次

第 1 章	序	2
第 2 章	東西効果の理論的説明	3
2.1	歴史的導入	3
2.2	ミューオンの起源	4
2.3	東西効果	5
2.3.1	入射可能な一次宇宙線のエネルギーの下限の存在	6
2.3.2	二次宇宙線内の μ^+ と μ^- の存在比と軌道の長さの差異	8
2.3.3	東西効果のまとめ	10
第 3 章	実験 1	11
3.1	実験方法	11
3.1.1	実験原理	11
3.1.2	回路の配線と説明	11
3.1.3	実験装置の配置	11
3.2	実験データ (実験 1)	13
3.3	解析	14
3.4	誤差評価	15
3.4.1	系統誤差についての考察	15
3.4.2	統計誤差についての考察	15
3.5	実験 1 の結論	17
第 4 章	補実験	18
4.1	実験データ (補実験)	18
4.2	解析	19
4.3	誤差評価	19
第 5 章	実験 2	20
5.1	実験方法	20
5.1.1	実験原理	20
5.1.2	実験装置と配置	20
5.2	実験データ (実験 2)	21
5.3	解析	22
5.4	誤差評価	22
第 6 章	結論	23
6.1	結果	23
6.2	反省	23
6.3	感想	23

第1章 序

宇宙空間では色々な粒子（宇宙線）が飛び交っている。地球にもあらゆる方向から宇宙線は飛んできており、その中のひとつにプラスの電荷を持つ陽子がある。地球には南極から北極に向かって磁場が存在するので陽子はローレンツ力により進路を曲げられる。また陽子は大気中でミュオンに崩壊し地球に到達する。実際には、地球の表面近くで観測されるミュオンの入射角度は東西南北一様に分布せず、西から東へ向かうほうが東から西へ向かうほうより多い。これがミュオンの東西効果である。また、南北効果についても以下で考察してみる。

第2章 東西効果の理論的説明

2.1 歴史的導入

有馬朗人氏が神岡の研究グループに「宇宙線は天啓である」という言葉を贈ったように、宇宙線は常に素粒子物理学の研究の上できわめて重要な役割を果たしてきた。大規模な加速器によって高エネルギーの粒子線ビームを人工的に作り出すことが可能になった今日においてもニュートリノ、ガンマ線に関連した現象をはじめとして多くの物理現象を提示してくれている。また、1900年代初頭の素粒子研究においては宇宙線の観測が中心であり、それゆえ東西効果も歴史は古い。

東西効果が紙面にはじめて登場するのは著者の知る限り T.H.Johnson らによるもので [1][2][3]、彼らによる実験結果は C.Stormer による地磁気の影響下における荷電粒子の軌道の解析 [4] に G.Lemaitre と M.S.Vallarta[5][6] が改良を加えることにより、理論的な解釈が与えられた。これにより、当時、宇宙線（正確には一次宇宙線）は正の電荷を帯びているという結果があたえられた。

その後、多くの研究者たちが理論の改良、および実験精度の向上を目指し、さまざまな工夫を凝らしていった。

そして、今日では従来、ミュオンを観測することにより検出されていた東西効果は、神岡にあるスーパーカミオカンデにおいてニュートリノを観測（正確にはニュートリノの荷電カレント反応によって生じたレプトンを観測）することによりその存在が示されている。[7]

以下この章では 20 世紀の初頭同様に宇宙線ミュオンを観測する場合に生じる東西効果の理論的説明を行う。東西効果を定量的に理解するには、モンテカルロシミュレーションといった数値シミュレーションを行う必要があるが、以下では多くの点において定性的な理解を促すにとどめる。実際にシミュレーションを用いて定量的な議論を行うことができなかつたことが著者にとって最も残念な点である。

また、今日実施されているニュートリノにおける東西効果の理論的説明については、詳しくは M.Honda らによる論文 [8] を参照されたい。¹

¹この論文よりデータを引用する必要があるが、以下で展開する理論と幾らか差異があるため、入射宇宙線について知られている事実の確認のためのデータを使用するにとどめた。差異については次の通り：(1) 地磁気を磁気双極子近似せず、観測データをそのままシミュレーションに使っている (2) 太陽活動期の効果を考慮に入れている。

2.2 ミューオンの起源

東西効果で観測されるミューオンの起源について説明する。本実験のように地上で観測されるミューオンは、いくつかの過程の後に生成されるもので宇宙から直接到達するわけではない。まず主成分を陽子とする（図 2.1）宇宙線が地球の大気内に入射する。この宇宙線は特に一次宇宙線と呼ばれ、中性子星爆発などにより銀河内で生成されたものである。

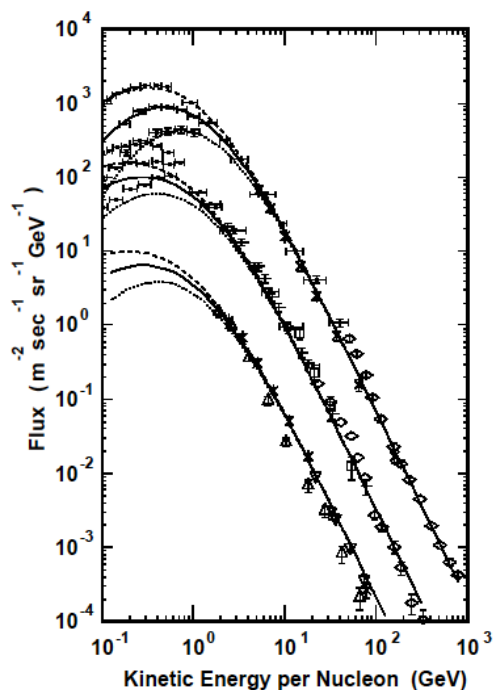


図 2.1: 一次宇宙線（陽子、ヘリウム、CNO 原子核）の核子ひとつあたりの運動エネルギーと flux の関係。破線、実線、点線はそれぞれ、最大、中間、最低の三つの太陽活動期における観測値 [8]

一次宇宙線は高度数十 km において大気を形成する酸素や窒素といった物質の核子と相互作用をし、ハドロンシャワーを形成する。このシャワーの中にはパイオンやケーオンといったメソンが含まれる。特にこのシャワーの中の荷電パイオンから

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

という過程によりミューオンが生成される。これらが地上で観測されるミューオンである。図 2.2 にほぼ鉛直方向におけるミューオンの flux とエネルギーの関係を示した。

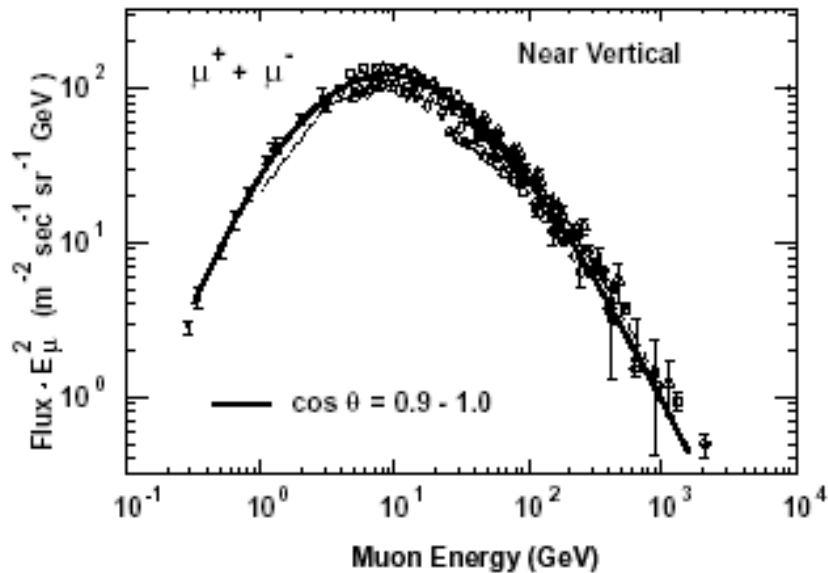


図 2.2: $\cos\theta = 0.9 - 1$ (θ は天頂角) における $\mu^+ + \mu^-$ の flux とエネルギーの関係の計算値と観測値 [8]

2.3 東西効果

議論を展開するまえに三つの仮定をおいておく。一つ目は地球(の地磁気)が存在しない場合、粒子は等方的に運動すること。二つ目は地球の地磁気は磁気双極子で近似できること。そして三つ目は一次宇宙線としては陽子のみ考慮することである。

では本題に入るが、東西効果の要因はミュオンの場合次の二つが挙げられる：

- (1) 入射可能な一次宇宙線のエネルギーの下限の存在
- (2) 二次宇宙線内の μ^+ と μ^- の存在比と軌道の長さの差異

これら二つのうち、後者は二次宇宙線において大部分を占めるミュオンが電荷を有していることに起因しているため、電気的に中性なニュートリノの場合は考慮する必要はない。本筋を外れるがここでミュオンで東西効果を検出する場合とニュートリノで同様の事をする場合の差異について軽く触れておく：

- i. 上述の通り、ニュートリノは電荷を持たないため一次宇宙線(陽子と考えればよい)の時に地磁気によって曲げられた効果(1)のみを考えればよい。
- ii. ニュートリノは物質とほとんど相互作用をしないため、建築物のようなものによって止められることはほとんどない。一方低エネルギーのミュオン(あとで述べるように(1)に起因する東西効果の場合にはこれが重要になる)は止められる。
- iii. ニュートリノを生成する過程としては上記のパイオンの崩壊に加えて

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

を考慮する必要があり、また、この過程により生成されたニュートリノの方が数 GeV 以下の大気ニュートリノ生成において支配的であること(ただし、この場合には(2)の効果をミュオンの崩壊地点までは考慮する必要がある)。

少し筋を外れたが、以下では本実験で行われるミュオンによる東西効果の要因 (1)、(2) について解説する。

2.3.1 入射可能な一次宇宙線のエネルギーの下限の存在

まず (1) の要因について言及する。一次宇宙線が地球に入射するまで²地磁気によりローレンツ力

$$\frac{dp}{dt} = qv \times B \quad (2.1)$$

を受ける。ここで p は粒子の運動量、 q は粒子の電荷、 v は粒子の速度、 B は地磁気による磁束密度である。この式より、地磁気の分布が与えられたときに粒子の軌跡を決定するのは運動量を電荷で割った量であることがわかる。この式は微分方程式であることからわかるように初期値を決定すればその後の軌道は一意的に決定される。この値は rigidity (粒子の硬さ) と呼ばれる。特に今回のように一次宇宙線を陽子に限定して議論する場合、rigidity は粒子の運動量そのものである。

地球に入射する宇宙線の理論で東西効果に関連するはじめてのものは Stomer によるものだが、彼は元々、オーロラが生じる原因が宇宙線にあるのではという動機から理論の構築をはじめた。その後、この理論により東西効果の理論的理解が与えられることになる。彼の理論によれば、ある程度より低エネルギーの宇宙線が地球に入射する場合地磁気により (2.1) のようなローレンツ力を受けるために、軌道が曲げられてしまい無限遠方からきた粒子はある程度地球に近づいた後、また無限遠方に飛んでいってしまう。そのため、地球に入射する粒子のエネルギーには下限が生じるが、宇宙線が正の電荷を帯びているとローレンツ力の効果により西からより東からのほうが入射可能な最低エネルギーが高くなり、結果として西から入射する粒子の数が増えるという結論が与えられる。

しかし、Stormer の議論では地球が固体であり、その存在によって入射粒子が影響を受けることを考慮していない。これを考慮したのが Lemaitre と Vallarta であり、以下では彼らの議論に基づいて説明する。

彼らの場合も数値シミュレーションを行うわけだが、地球の地磁気の影響が効いてくる領域 (星間磁場がおおよそ 3×10^{-8} T (テスラ) であり、だいたい地球の中心から地球半径の 10 倍以上の距離を離れば地磁気の強度はこの程度になる) の境界の各点からあらゆる運動量の粒子をシミュレーションにより走らせるのは非効率的である。それゆえ、シミュレーションを行う場合、まず観測点を決定する。そして (2.1) が $t \rightarrow -t, q \rightarrow -q$ によって不変なことから、観測点から反対の電荷を持った粒子を、観測点に着いたときの運動量 (方向含む) を初期条件として発射させるのである (図 2.3)。この結果算出される軌道としては次の 3 つが存在する [9]:

- i. 地球の表面と再度交差する
- ii. 無限遠方に向かうことのなくある有限領域の中にとどまる
- iii. 十分な時間の経過の後無限遠方にある

このうち i および ii は観測される現実の粒子 (つまり遠方から飛んでくる) には当てはまらない。それゆえこれら 2 つの軌道は禁止される。そして、残る iii の場合の軌道のみが現実の粒子の軌道のモデルとして採用されるわけである。(2.1) 式から明白なことだが、rigidity が大きいほど軌道の曲率半径は大きくなる。一方、上記の 3 つの軌道は曲率半径が大きくなるにつれて $i \rightarrow ii \rightarrow iii$ と変化していく。つまり、観測点に到達するために必要な最低限の rigidity、いいかえれば最低限のエネルギーというものが存在することになる。このときの rigidity は rigidity cutoff と呼ばれている。観測点に到達できるための最低のエネルギーが北、東、南、西のそれぞれについて [10] で算出されている (図 2.4) ただしこの理論では観測点に到達するまでの間常に正の電荷を持っている場合のみを考慮している。(つまり μ が生成されたあとの過程は無視している)

まとめると東西効果の第一の要因は rigidity cutoff よりも低いエネルギーでは観測点に到達することができず、その値の方位角による差が東西効果を生み出しているというものである。つまり、第一の要因は低エネルギーで入

²実際には二次宇宙線として飛行する期間があるので、その分の補正をする必要がある。しかし、歴史的にこのことを考慮せずに東西効果を説明できたこともあり、この補正を行っている文献は見当たらない。それゆえ、ここでの説明でもその効果は無視する。ただし、後述の (2) においては二次宇宙線における μ^+ と μ^- の割合が東西効果の本質的な要因として考慮されている。

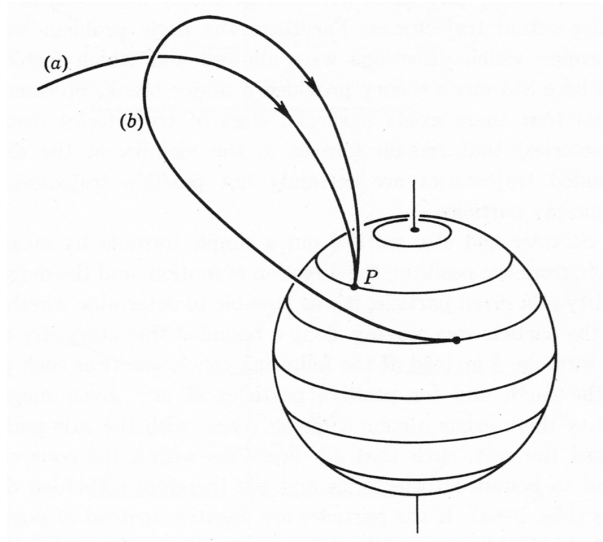


図 2.3: 正の電荷を帯びた粒子の予想される軌道。(a) は iii、(b) は i のケースに相当する ii はこの中間に相当する) [15]

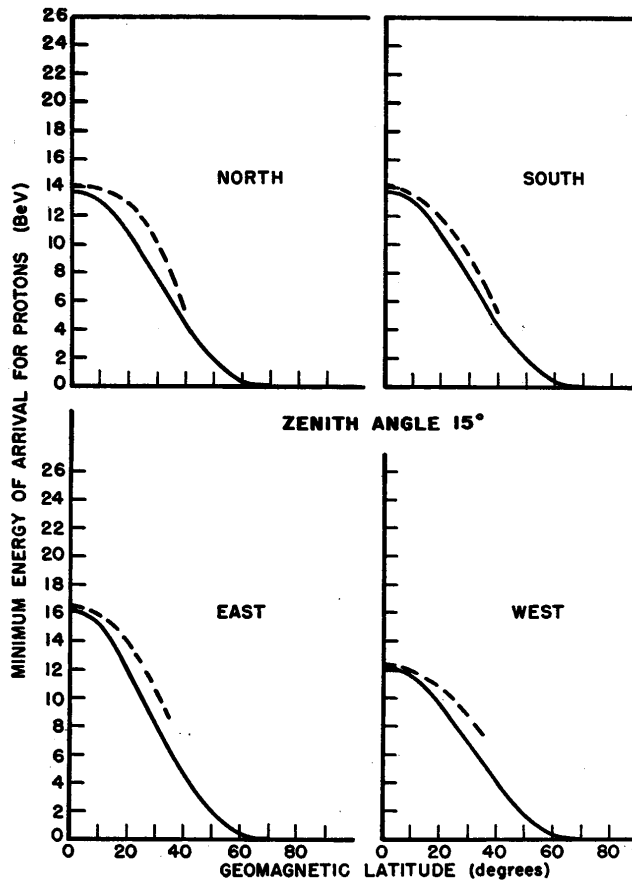


図 2.4: 天頂角 15 度における東、西、南、北それぞれから入射可能な陽子の最低エネルギーと緯度 (北緯) の関係の計算値 (点線が Storer の議論に基づく計算値で、実線が Lemaitre らの議論により改善された計算値である) [10]。geomagnetic latitude とは地磁気の近似として導入した磁気双極子の指す方向を南極とした場合の緯度で、京都は約 22 °N である。

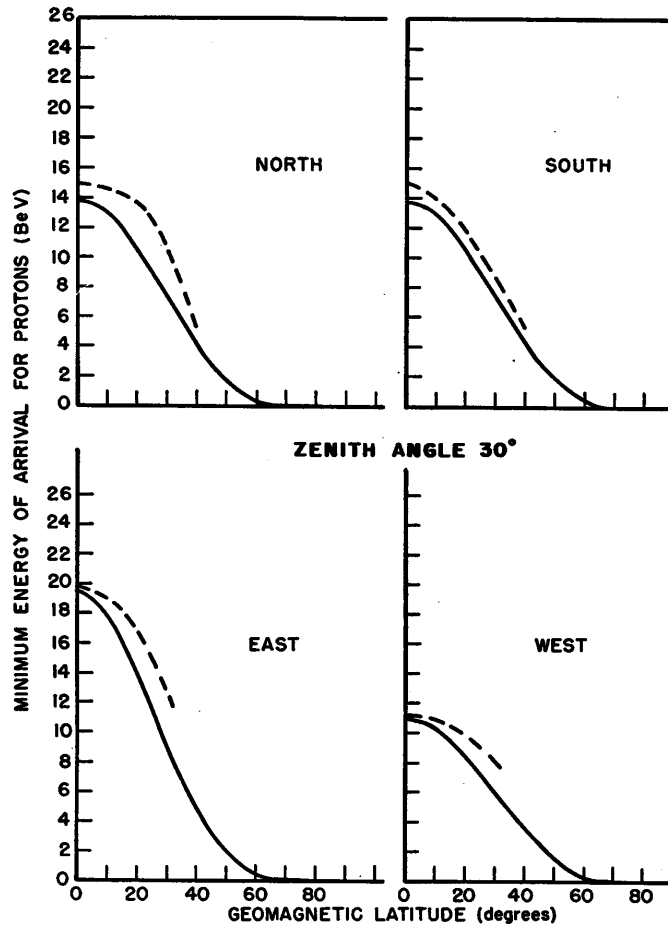


図 2.5: 天頂角 30 度における東、西、南、北それぞれから入射可能な陽子の最低エネルギーと緯度（北緯）の関係の計算値（点線、実線は上同様）[10]

射する宇宙線に対してのみ影響を及ぼし、高エネルギーではこの効果のみを考慮したのでは東西効果は生じないことになる。

補足：低エネルギーの宇宙線の東西効果を考えるには上記の rigidity cutoff を考えるだけでなく、太陽活動を考慮に入れる必要がある。もう少し詳しく説明すると、これは低エネルギーの宇宙線のうち太陽の近くを通るものは太陽風の影響を無視できなくなるためであり、この太陽風の強さは太陽活動の度合いと関連している。太陽活動は大きくわけて、最大、中間、最低のような活動期がある（図 2.1）。ここで展開している理論では一次宇宙線の等方性を仮定することによりこの議論は排除している。（ただし、図として引用している Honda らによる理論値 [8] ではこのことも考慮しており、中間期を採用している）また、一次宇宙線の flux と太陽活動の様子を特徴付ける量とされている中性子の観測数の間関係式が K.Nagashima らによって与えられている [11]。

2.3.2 二次宇宙線内の μ^+ と μ^- の存在比と軌道の長さの差異

(1) の説明の最後で少し触れたように (1) のみを仮定したのでは高エネルギーの宇宙線の場合には東西効果は生じないことになる。しかし、実際には高エネルギーの宇宙線に対しても東西効果が検出されている [12][13]³。ここでは Y.Kamiya による議論 [11] を用いて説明する。

³ただし、これらの論文では天頂角が大きい、つまり、水平線近くから飛んでくる粒子について考察している。

高エネルギーの宇宙線は一次宇宙線の間は低エネルギーの場合と違い、ほとんど曲がることはなく、rigidity cutoff が問題になることはないが、一次宇宙線の陽子が大気中の酸素や窒素と衝突し、パイオンが生じ、そのパイオンの崩壊により μ^\pm が生成されてから差異が生じる。 μ^+ についてみるとこの粒子は正に帯電しているため、ローレンツ力により軌道が観測点の東において長く、西において短くなる。つまり、東からやってきたほうが観測点に到達するまでのエネルギー損失が多く、それゆえ、観測点に到達するまでに崩壊してしまう割合が高くなる。 μ^- の場合はこの逆で、軌道は観測点の東において短く、西において長くなり西からやってきたミュオンのほうが観測点に到達するまでに崩壊する割合が高くなる。(図 2.6)

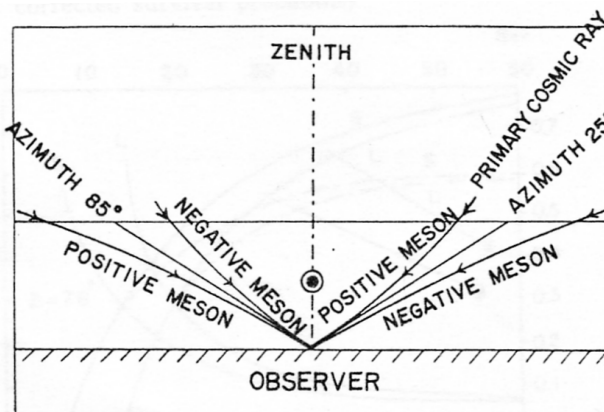


図 2.6: 二次宇宙線の軌道 (図中の meson はミュオンのこと。図の右左がそれぞれ西、東に対応。) [13]

一方、二次宇宙線として生成されるミュオンでは μ^+ の方が μ^- よりも約 20 % 多いことがわかっている (図 2.7):

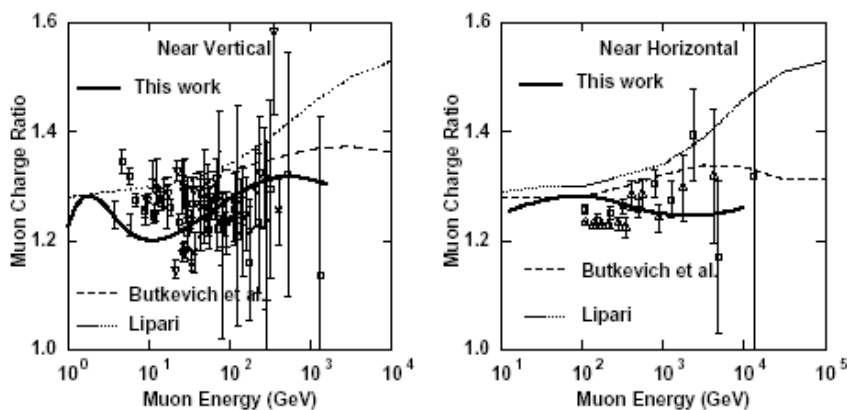


図 2.7: 二次宇宙線における μ^+ と μ^- の比 μ^+/μ^- の計算値と観測値 [8]

この二点を総合すると西でより多くのミュオンが検出されるということになる。ただし、上記の議論からわかるように、この効果は東西どちらにせよ、粒子の軌跡がある程度より長い、水平に近い方向から入射する粒子について顕著だと考えられる。

補足:この議論からすると、低エネルギーの宇宙線であっても(2)の効果を検討すべきであるが、上述のように低エネルギーでは歴史的に(1)のみを考慮することで東西効果の説明がついたため、この効果は考慮しなくてもよいと考えられる。

2.3.3 東西効果のまとめ

上では東西効果の二つの要因についてそれぞれみてきたわけだが、要約すると

- (a) 低エネルギー宇宙線では西から入射するほうが rigidity cutoff が小さいために、東からよりも西から入射するミュオンのほうがより多く観測される。
- (b) 高エネルギー宇宙線では、二次宇宙線のミュオンにおいて μ^+ の方が μ^- よりも多いことと、東西方向で軌道の長さが異なることが原因で、東からよりも西から入射するミュオンのほうがより多く観測される。

という結論が得られた。つまり、どのようなエネルギーでもミュオンを用いて東西効果を測定すれば東よりも西の方から多くのミュオンが検出されるというのがこの章の結論である。

補足：南北効果

これまでは東西効果についての説明をしてきたが、実は宇宙線ミュオンの南北方向の観測数の asymmetry — 南北効果 — の存在も理論、実験の両側から認められている [5][6][10][14]。これは上記の東西効果の(1)の理由と同様に、rigidity cutoff の差異に由来するもので、観測点の緯度により禁止される軌道が異なってくるためである⁴。

図 2.4 と図 2.5 の北と南から観測点入射可能な電荷 + 1 を帯びた粒子の最低エネルギーについての計算結果(実線)を見て頂きたい。南北の入射可能最低エネルギーにほんの少しだがずれが生じており、北からのほうが最低エネルギーが高く、入射可能な粒子数が減少することが予想される。しかし、この図からわかるようにその効果は東西効果に比べてきわめて小さい。

⁴具体的な計算をするとわかるが、北半球では南から入射するほうが、南半球では北から入射するほうが多くなり、また、赤道では南北効果は生じない。

第3章 実験1

3.1 実験方法

3.1.1 実験原理

方位磁針で東西南北を計測し、机の長辺方向を計測したい方角と垂直にあわせる。図 3.3 と図 3.4 のように、2 個の NaI シンチレーターおよび Plastic シンチレーターを配置する。

各 NaI シンチレーターと Plastic シンチレーターの coincidence をそれぞれとることによって、飛来した宇宙線の方角を特定する。ただし、NaI シンチレーターを 2 個配置する目的は、イベント数を多くためるためであり、2 個の NaI シンチレーター間での比較はしない。(事前の予備実験によって、2 個の NaI シンチレーターの感光度に差があることはわかっている。)

coincidence を経て来た信号を TDC に取り込み、両方向あわせて 25,000 カウントに達するまでのデータを取り、それぞれのカウント数を記録する。2 個の NaI シンチレーターの位置を交換して、同カウント数のデータを取る。これを南 - 北、東 - 西、北東 - 南西、北西 - 南東の 4 種類の方角について行う。東 - 西方向については東西効果が期待されるため、この計測を両方向 4 日間ずつ行い、合計 200,000 カウントのデータを取る。

各方角のカウント数を比較することによって、宇宙線の東西効果を検証する。

3.1.2 回路の配線と説明

図 3.1 の回路図に使用されている機器の説明と今回の実験での用途。

Discriminator 設定した閾値 (threshold) を越えた信号が入力されたときだけ出力パルスを出力する。閾値は 12mV に設定、出力パルス幅は 100ns。

Coincidence 入力信号が同時に入ってきたときに、出力パルスを出力する。今回は、3 ch については Divider の代わりに使用している。

Divider 入力信号を 2 つに分割する。本来は入力信号を 2 つに分割するものだが、今回は二つの入力信号を一つの入力信号にまとめるのに使用した。

Dual Gate Generator 入力信号があった時に、Gate 信号を出力する。Gate 信号の幅と入力信号が入ってからどれだけ遅らせて Gate 信号を発生するか (delay) 設定可能。出力信号の幅を 10 μ s、delay を 0s に設定。

Delay この実験では入力信号から 105ns 遅らせて出力信号を出すものを使用した。この delay は TDC に入力する Gate 信号が入った後に、それぞれのシンチレーターからの出力信号が TDC に到着させるために使用した。TDC への入力信号が Gate 信号のあとに入力されている事はオシロスコープで確認した。

TDC Gate にパルスが入力後、入力端子に信号が入るまでの時間に比例した値を出力する。0 ~ 4096 までの値を返し、1 が約 5ns に値する。Gate 信号とシンチレーターからの信号の関係は図 3.2 のようになっている。

3.1.3 実験装置の配置

図 3.3、図 3.4 の様の実験装置を配置した。実験室の二段の机の一段目に Plastic シンチレーター。二段目の両端に NaI シンチレーターを取り付けた。

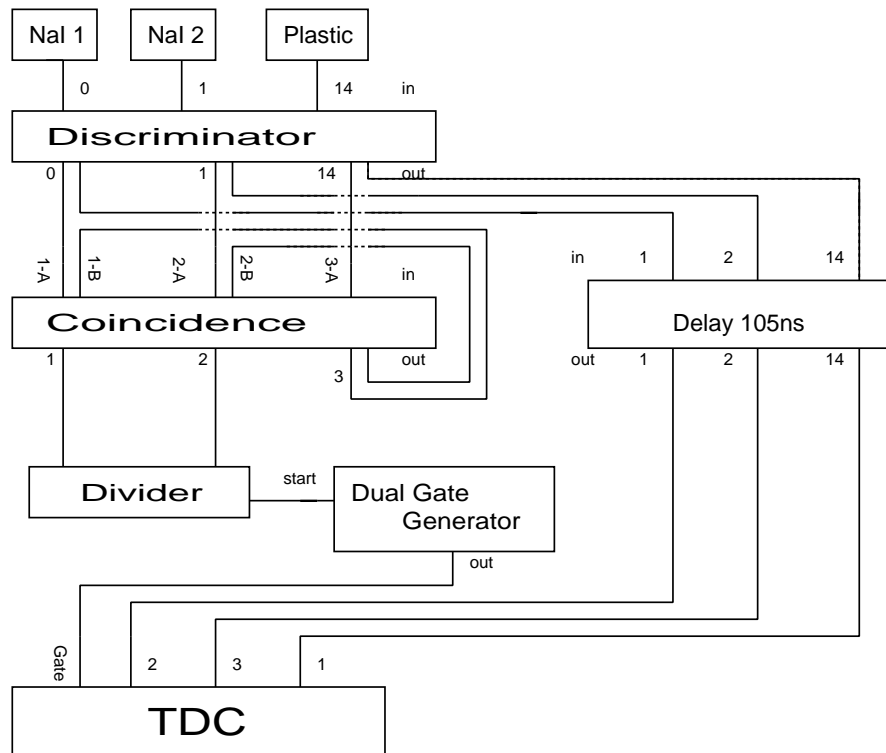


図 3.1: 回路図

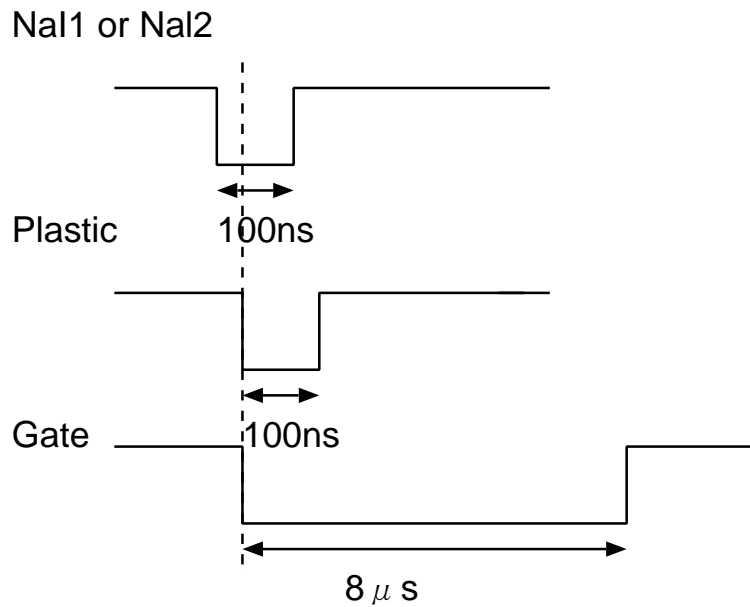


図 3.2: Gate 信号とシンチレーターからの信号の関係

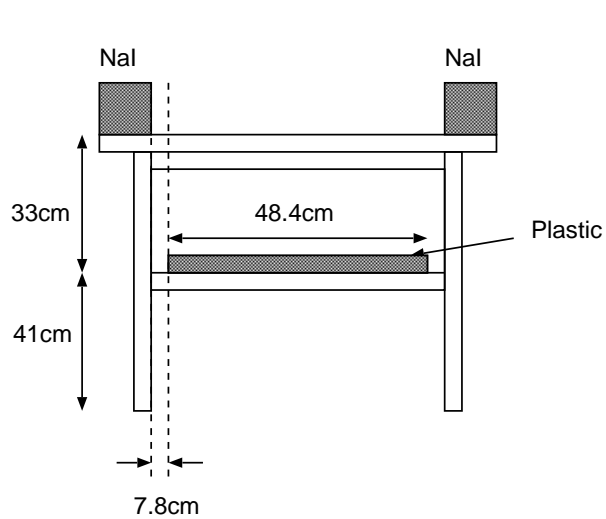


図 3.3: 装置配置図 1

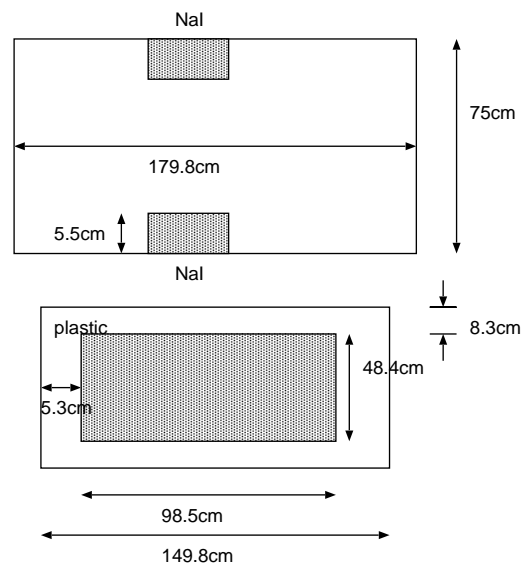


図 3.4: 装置配置図 2

3.2 実験データ (実験 1)

測定値の単位は、全て (events) である。また、Asymmetry の右の () は、どちらの方角が多かったかを示している。また、東西のデータは他のデータよりも多くとってある。

表 3.1: 南北のデータ

	Channel1	Channel2
北		
1	10745	12749
2	11056	12935
3	11019	12809
平均 (北)	10940	12831
南		
4	12213	14214
5	11964	13863
6	12124	13905
平均 (南)	12100.33	13994
Asymmetry (%)	5.0361(南)	4.3355(南)

表 3.2: 北東-南西のデータ

	Channel1	Channel2
北東		
1	11095	12871
2	11067	12759
平均 (北東)	11081	12815
南西		
3	12086	13833
4	12164	13883
平均 (南西)	12125	13858
Asymmetry(%)	4.4988(南西)	3.9103(南西)

表 3.3: 東西のデータ

	Channel1	Channel2
西		
1	11793	13696
2	11765	13614
3	11730	13711
4	11868	13530
平均 (西)	11789	13637.75
東		
5	11222	13156
6	11338	13199
7	11221	13210
8	11428	13082
平均 (東)	11302.25	13161.75
Asymmetry(%)	2.1100(西)	1.7762(西)

表 3.4: 北西-南東のデータ

	Channel1	Channel2
北西		
1	11338	13180
平均	11338	13180
南東		
2	11763	13598
平均	11763	13598
Asymmetry(%)	1.8398(南東)	1.5610(南東)

3.3 解析

実験データによると、東西効果（入射ミューオン数の東西差）は優位に検出されていて（誤差評価の項目を参照）、西が多いことが分かるが、全体としては、南北差が最も顕著に検出されている（南が多い）。

3.4 誤差評価

誤差は、系統誤差と、統計誤差に分けて考えることが出来る。

3.4.1 系統誤差についての考察

今回の実験の性質から、実験装置の構成要素の中で、系統誤差が生じる可能性があるのは NaI シンチレーターと Plastic シンチレーターのみである。つまり、それぞれのシンチレーターにおける検出効率の差が、系統誤差の原因になると考えられる。しかし、Plastic シンチレーターは、東西とも共通のものを使っているため、そこから系統誤差が生じることはない。ということは、東西の NaI シンチレーターの検出効率の差が、唯一の系統誤差の原因ということになるが、今回の実験では、東西の NaI シンチレーターを実験の途中で入れ替えることで、事実上同じ NaI シンチレーターで東西差を計っている。そのため、系統誤差は実験結果に含まれていないと考えられる。他の方位についても同様である。

3.4.2 統計誤差についての考察

今回の実験データは、Poisson 分布に従うと見なすことが出来る（則ち、測定値の平均値が x のとき、誤差は \sqrt{x} となる）。何故ならば、

「宇宙線一個が検出器の付近を通る」

ことを一回の試行として、

「宇宙線が一方の NaI シンチレーターを通過して検出され、さらに、下の Plastic シンチレーターも通過して検出される」

ことを事象とすると、一回の試行における事象の実現確率は極めて低いため、Poisson 分布が適用出来るからだ。よって、以降は、実験データが Poisson 分布に従うとして、誤差の評価を行う。

西、東からのイベント数の平均をそれぞれ x 、 y とする。また、東西の Asymmetry を、 u とおく。則ち、 $x - y = \eta$ 、 $x + y = \xi$ とおくと、

$$u = \frac{\eta}{\xi} \times 100 \quad (3.1)$$

となる。 η 、 ξ 、 u の統計誤差をそれぞれ $\delta\eta$ 、 $\delta\xi$ 、 δu とすると、

$$\frac{\delta u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\delta\eta}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{\delta\xi}{\xi}\right)^2} \quad (3.2)$$

ここで、

$$\delta\eta = \sqrt{x + y} \quad (3.3)$$

$$\delta\xi = \sqrt{x + y} \quad (3.4)$$

よって、

$$\frac{\delta u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{x + y}}{x - y}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{x + y}}{x + y}\right)^2} \quad (3.5)$$

ここで、まず、3.3 の Channel1 のデータの誤差を評価する。3.3 より、

$$x = 11789$$

$$y = 11302.25$$

よって、式 (3.5) を用いて計算すると（有効数字は五桁とする）、

$$u = 2.1100$$

$$\delta u = 6.6000 \times 10^{-1}$$

ここで、信頼度 95% の信頼区間を求める。3.5 より、信頼度 95% の信頼区間は、求めた Asymmetry の値の前後 $2\delta u$ の区間であると見なせる。

表 3.5: 測定値が Poisson 分布に従う場合の、測定値の真値からのずれと、全測定値に対する割合（例えば、真値から δu 以上離れてる測定値は、全測定値の 31.73% を占める）

割合 (%)	真値からのずれ (%)
31.73	δu 以上
4.55	$2 \delta u$ 以上
0.27	$3 \delta u$ 以上
6.3×10^{-3}	$4 \delta u$ 以上
5.7×10^{-5}	$5 \delta u$ 以上
2.0×10^{-7}	$6 \delta u$ 以上

以下、その他のデータについても、同様に処理する。誤差が 0.1 のオーダーなので、Asymmetry の値の有効数字は 1 桁であることに注意すると、誤差評価の結果は 3.6、3.7 の様になる。

表 3.6: Channel1

方角	Asymmetry(%)	誤差 (%)	信頼度 95% の信頼区間 (%)
北-南	5.0(南が多い)	0.66	3.7-6.3
北東-南西	4.5(南西が多い)	0.66	3.2-5.8
東-西	2.1(西が多い)	0.66	0.8-3.4
北西-南東	1.8(南東が多い)	0.66	0.5-3.1

表 3.7: Channel2

方角	Asymmetry(%)	誤差 (%)	信頼度 95% の信頼区間 (%)
北-南	4.3(南が多い)	0.61	3.1-5.5
北東-南西	3.9(南西が多い)	0.61	2.7-5.1
東-西	1.8(西が多い)	0.61	0.6-3.0
北西-南東	1.6(南東が多い)	0.61	0.4-2.8

3.5 実験1の結論

実験1により東西効果が検出され、西からくるミュオンの方が多くことが確認された。しかし東西の asymmetry よりも南北の asymmetry のほうが顕著であり、これは理論にそぐわない。そこで原因として次の二つが考えられた。

(1) Plastic シンチレーターの不均質性

Plastic シンチレーターが不均質性（場所によって検出効率が異なる）を持ち、それが Asymmetry に影響している可能性がある。

(2) 建物の壁による遮蔽

実験室が建物の東寄りであったため、西から来るミュオンの方が建物の中を長く通過してくる。そのために一部のミュオンがエネルギーを失ってしまう。それが Asymmetry に影響している可能性がある。

1の対策としては、測定装置自体を 360° 回して角度相関を調べる方法がある。

2の対策としては、入射ミュオンの立体角を制限することで、検出器にかかるミュオンが、建物の中を同じ距離だけ進むようにするという方法がある

第4章 補実験

Plastic シンチレーターの持つ不均質性の、Asymmetry への影響を調べるため、装置を第1回目の測定するときから180°回転して再び測定を行った(ただし、東西効果、南北効果についてのみ)。その実験を、補実験とする。その実験データを、4.1、4.2 に示す。

4.1 実験データ(補実験)

測定値の単位は、全て(events)である。また、Asymmetryの右の()は、どちらの方角が多かったかを示している。

表 4.1: 南北のデータ

	Channel1	Channel2
北	4422	5162
南	4814	5564
Asymmetry(%)	4.2442(南)	3.7479(南)

表 4.2: 東西のデータ

	Channel1	Channel2
東	4527	5302
西	4664	5469
Asymmetry(%)	1.4906(西)	1.5505(西)

4.2 解析

実験1の測定と補実験の測定で、求められたそれぞれの Asymmetry に優位に差があるならば、Plastic シンチレーターの不均質性が Asymmetry に影響を与えていると言える。

実験1、補実験の測定における Asymmetry とその差を、4.3、4.4 に示す。() 内の数値は、誤差 (統計誤差) である。なお、誤差の見積り方は、後に誤差評価の項目で説明する。

4.3、4.4 によると、第1回実験、補実験における Asymmetry の差は、全て誤差の範囲内に収まっており、優位に差が出ているとは言えない。よって、Plastic シンチレーターの持つ不均質性は、Asymmetry に影響していないと考えられる。

表 4.3: Asymmetry 比較 (南北)

	Channel1	Channel2
実験1の Asymmetry (%)	5.0(0.66)	4.3(0.61)
補実験の Asymmetry (%)	4.2(1.0)	3.7(0.97)
差 (%)	0.8(1.2)	0.6(1.1)

表 4.4: Asymmetry 比較 (東西)

	Channel1	Channel2
実験1の Asymmetry (%)	2.1(0.66)	1.8(0.61)
補実験の Asymmetry (%)	1.5(1.0)	1.6(0.96)
差 (%)	0.6(1.2)	0.2(1.1)

4.3 誤差評価

Asymmetry の持つ誤差の評価方法については、実験1の実験データの誤差評価の項目を参照。

ここでは、Asymmetry の差が持つ誤差について考察する。実験1の実験データの誤差評価の項目で述べた様に、系統誤差はゼロと見なせるので、統計誤差だけ考えればよい。

実験1で求めた Asymmetry を u_1 、補実験で求めた Asymmetry を u_2 、その差を D とすると、

$$D = u_1 - u_2 \quad (4.1)$$

このとき、 u_1 、 u_2 、 D の持つ統計誤差をそれぞれ δu_1 、 δu_2 、 δD と置くと、

$$\delta D = \sqrt{(\delta u_1)^2 + (\delta u_2)^2} \quad (4.2)$$

となる。上の式をもとに、Asymmetry の差の統計誤差を計算することが出来る。結果は、4.3、4.4 に示してある。補実験により (1) は否定された。

そこでミュオンの入射立体角を制限することで (2) の効果を解消して改めて実験をした。これを実験2とする。

第5章 実験2

5.1 実験方法

5.1.1 実験原理

原理的には先の実験と同じであるが、建物の壁の厚さの違いによる効果を排除する必要がある。

NaI シンチレーターと Plastic シンチレーターとのなす立体角を狭くし、計測範囲に建物の壁が入らないようにする。

図 5.1 と 5.2 のように 2 個の机を 2 段積み上げ、NaI シンチレーターを上段の机の上に、Plastic シンチレーターを下段の机に配置し、実験装置を建物の出来る限り内側に移動する。測定する立体角は 23.9° となり、どの方向から入射する宇宙線も同じ厚さの障害物を通る。

先の実験と同様に、北-南、東-西、北東-南西、北西-南東のそれぞれについて同カウント数の計測を行う。

5.1.2 実験装置と配置

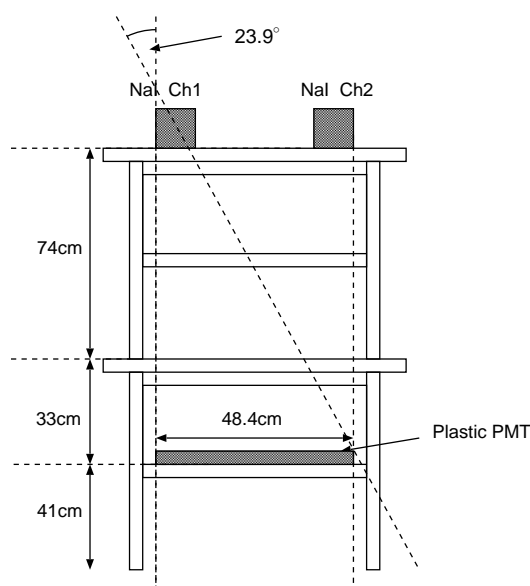


図 5.1: 変更後の装置図 1

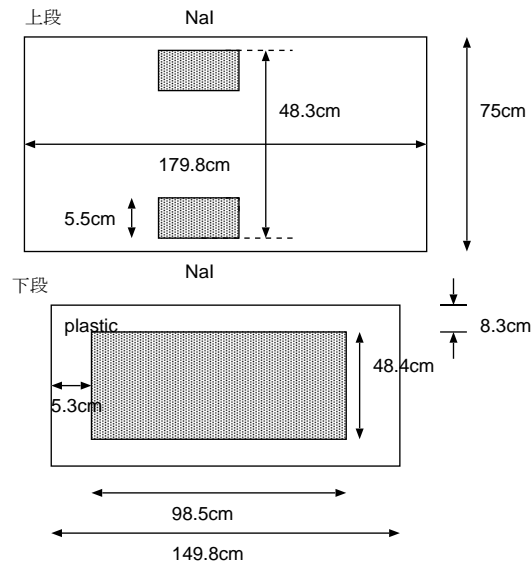


図 5.2: 変更後の装置図 2

5.2 実験データ (実験 2)

測定値の単位は全て (events) である。また、Asymmetry の右の () は、どちらの方角が多かったかを示している。

表 5.1: 南北のデータ

	Channel1	Channel2
北	9375	10394
南	9582	10608
Asymmetry(%)	1.0919(南)	1.0190(南)

表 5.2: 東西のデータ

	Channel1	Channel2
東	8972	10235
西	9751	11012
Asymmetry(%)	4.1607(西)	3.6570(西)

表 5.3: 北東-南西のデータ

	Channel1	Channel2
北東	9229	10374
南西	9615	10750
Asymmetry(%)	2.0484(南西)	1.7800(南西)

表 5.4: 北西-南東のデータ

	Channel1	Channel2
北西	9576	10631
南東	9350	10397
Asymmetry(%)	2.1250(南東)	1.1128(南東)

5.3 解析

5.1 から 5.4 の実験データより、東西差が最も顕著に検出されていて、西が多いことが分かる。また、南北の Asymmetry は 1% 程度で、誤差の大きさ (0.7 程度。誤差評価参照) から考えると、南北差は検出されてはいるが、微弱なものである。

5.4 誤差評価

誤差評価の方法は、実験 1 の時と同様である。5.5、5.6 に、実験 2 の誤差評価の結果を示す。

表 5.5: Channel1

方角	Asymmetry(%)	誤差 (%)	信頼度 95% の信頼区間 (%)
北-南	1.1(南が多い)	0.73	0.4-1.8
北東-南西	2.0(南西が多い)	0.73	1.3-2.7
東-西	4.2(西が多い)	0.73	3.5-4.9
北西-南東	2.1(南東が多い)	0.72	1.4-2.8

表 5.6: Channel2

方角	Asymmetry(%)	誤差 (%)	信頼度 95% の信頼区間 (%)
北-南	1.0(南が多い)	0.69	0.3-1.7
北東-南西	1.8(南西が多い)	0.69	1.1-2.5
東-西	3.7(西が多い)	0.69	3.0-4.4
北西-南東	1.1(南東が多い)	0.69	0.4-1.8

第6章 結論

6.1 結果

初期の実験における失敗の原因と考えられる建物の壁による遮蔽効果を抑えた実験2では南北の asymmetry より東西の asymmetry のほうが優位であった。以上より東西効果が優位であること、東からくるミュオンよりも西からくるミュオンのほうが多いことが示された。

6.2 反省

- 実験環境による誤差の改善に入射立体角を制限するという方法を用いたが理想的には屋外実験が望ましい。
- 本実験では二つの NaI シンチレーターを用いたがこの二つの性能は同等ではないのである個数カウントして実験を終了するのではなく一定の時間をもって終了するほうがよい。
(結果的には、実験2において2個のシンチレーターの位置を交換した際、計測時間の差異は1.6%以内に抑えられていることから、実験結果への影響は小さかったと考えられる。詳しくは後述の補足の参照。)
- 本実験ではある立体角にはいるミュオンをカウントしているのであるが、それを分割した部分立体角ごとにカウントすることができれば角度分布を詳しく知ることが出来る。さらにカウントしたミュオンのエネルギーまで計測することができればエネルギー分布を得ることも出来る。

6.3 感想

最初は回路を組むことやオシロスコープの操作など戸惑うことも多かったが次第にそれらにも慣れ実験を遂行できて良かった。しかしある程度の精度を得ようとする際の苦勞の片鱗を知ることが出来た。また望ましくない実験結果に対してその原因をつきとめ改善していくところに実験の楽しさを感じた。最終的には理論に合致する結果を得ることが出来て達成感があった。

補足

二つの方角に性能の異なる NaI シンチレーターを配置し、両方向合わせて一定カウント数をためるという実験方法は、二回の計測で計測時間の差が生じるため、一方の計測で必要以上のカウントを計測していると考えられる。例えば、実験 2 での東-西の場合の計測時間は、

- i. Ch1 が西、Ch2 が東の場合 913min
- ii. Ch1 が東、Ch2 が西の場合 906min

i. のときは ii. に対して 7 分間長く計測しているなのでその 7 分間でどれくらいのカウントを取ったかを簡単に計算すると、Ch1 については 74count、Ch2 については 78count。その結果、Ch1 についての Asymmetry は 3.7803 %、Ch2 については 4.0389 %となる。よって、結果には大きな影響は出ない。他のデータも同様に、結果に大きな影響は出ない。

謝辞

今回の A1 実験において的確なご指摘、ご批判をくださった指導教官の西川教授、中家助教授、T A の金井氏に深く感謝の意を表します。実験原理のゼミではテキストの表面をなぞるのではなくその内容を理解することの大切さを教わりました。また実験においては基本的なことから丁寧に指導していただくだけでなく興味深いテーマを提示していただきました。

関連図書

- [1] T.H.Johnson and J.C.Street Phys.Rev. 41, 690(1932)
- [2] T.H.Johnson Phys.Rev. 43, 307,381(1933)
- [3] T.H.Johnson Phys.Rev.48, 287(1935)
- [4] C.Stormer Astrophys. 1, 237(1930)
- [5] G.Lemaitre and M.S.Vallarta Phys.Rev.49,719(1936)
- [6] G.Lemaitre and M.S.Vallarta Phys.Rev.50,493(1936)
- [7] The Super-kamiokande Collaboration, T.Futagami et al Phys.Rev.Lett. 82,5194(1999) or astro-ph/9901139
- [8] M.Honda et al hep-ph/9503439
- [9] P.Lipari hep-ph/0003013
- [10] R.A.Alpher jour. Geophys. Res. 55, 437(1950)
- [11] K.Nagashima et al, Nuovo Cimento 12C, 173(1989)
- [12] L.I.Dorman *Cosmic rays*. (1974) North-Holland pub.
- [13] Y.Kamiya Jour. of Geomagn. and Geoelec. 14, No.4,191(1963)
- [14] T.H.Johnson Phys.Rev. 47, 91(1935)
- [15] B.Rossi *Cosmic Rays* McGraw Hill(1964)
- [16] G.F.Knoll 『放射線計測ハンドブック』(2002) 日刊工業新聞社 931p