



The Geomagnetic Latitude Effect on Atmospheric Muons at Ground Level Altitude

谷崎, 圭祐

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Date of Publication)

2012-02-06

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3155

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003155>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 296 】

氏 名・(本 籍)	谷崎 圭祐	(徳島県)
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)	
学 位 記 番 号	博い第266号	
学位授与の 要 件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の 日 付	平成16年3月31日	

【 学位論文題目 】

The Geomagnetic Latitude Effect on Atmospheric Muons
at Ground Level Altitude
(地上における大気 μ 粒子の地磁気緯度効果の研究)

審 査 委 員

主 査	教 授	野崎 光昭
	教 授	武田 廣
	教 授	山中 大学

1 背景

大気に入射した後に生成される2次宇宙線は、親粒子である1次宇宙線の情報を持って地上に到達する。地上において2次宇宙線 μ 粒子を観測するとは間接的に1次宇宙線の受けた様々な影響を知ることになる。その影響の1つに地球磁場による地磁気効果がある。地磁気の影響を最も受ける1次宇宙線は地磁気緯度の異なる地点では流束の絶対量が変化してくる。それに伴い地上における μ 粒子流束も地磁気緯度の異なる地点では1次宇宙線と同様に变化する。

宇宙線流束を用いた地磁気効果は1930年から1970年頃に数多く行われた。しかし、当時の観測データは規格化(スケール)された宇宙線流束を求めるに留まり、絶対流束を求めるまでには至っていない。また、現在用いられている測定器はその当時のそれと比べて飛躍的に測定精度が向上している。

2 目的

近年、大気ニュートリノの観測からニュートリノの振動の研究が盛んに行われているが、その測定精度と信頼性を向上させるには理論的不定性をこれまで以上に小さくする必要がある。その理論的不定性の1つが地磁気効果である。ニュートリノと μ 粒子は同じ中間子から崩壊・生成されるため、地上における μ 粒子の精密測定はこの理論的不定性を小さくすることができる。

また、地上における μ 粒子の観測データは、測定精度の向上、絶対流束の導出により基礎データとしても重要なものである。

3 測定器

超伝導ソレノイドコイルを用いた気球搭載型宇宙線測定器(BESS)によって地磁気緯度の異なる地点で μ 粒子を観測した。使用した測定器は図1に示した。

測定器の性能は、TOFカウンタの時間分解能は $1/\beta \sim 1.7\%$ 、飛跡検出器の運動量分解能は $\frac{\Delta p}{p} \sim 0.5\%$ (1.5 GeV/c)である。超伝導ソレノイドコイルのつくる磁場の強さは1T。

4 観測

2001年9月4日にアメリカ、ニューメキシコ州、Ft. Sumnerにおいて μ 粒子の観測を行った。観測地点の環境情報は表1にまとめた。

また、地磁気効果の比較をするために使用したデータの一覧も表1にまとめた。

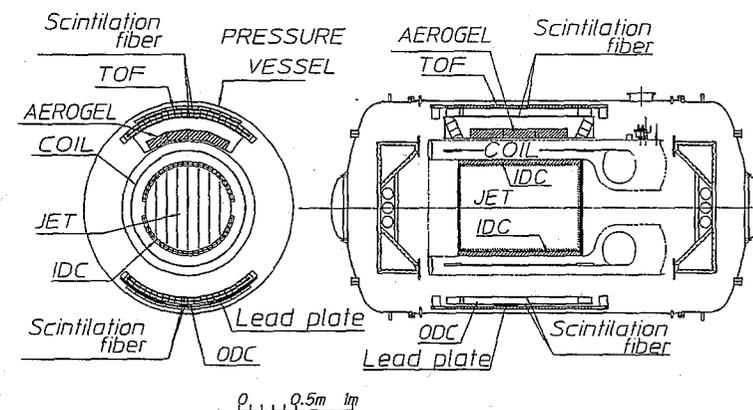


図1: BESS測定器

表1: 2001年の観測とこれまでの観測を行ってきた地点の環境情報

実験名	場所	日時 (年)	気圧 (g/cm ²)	高度 (m)	Cut-off rigidity (GV)	観測時間 (時間)
BESS-2001	Ft. Sumner(USA)	2001	892	1270	4.2	4
BESS-1997/98/99	LynnLake(Canada)	1997/98/99	998	360	0.5	6
BESS-1995	つくば	1995	1030	30	11.4	81
BESS-1999	乗鞍岳	1999	742	2770	11.2	96

5 解析

2001年、Ft. Sumnerで観測したデータの解析を行った。大気 μ 粒子流束の求めるために次の3つの順に解析をおこなった。

5.1 事象選別

地上で観測される宇宙線は主に μ 粒子である。物質とはほとんど相互作用しないため測定器中に飛跡が1本のみの事象を選び出し、飛跡が多数ある場合は除いた。また、測定器の有感領域を通過し、ほぼ真上から入射してきた粒子事象のみを選び出した。

5.2 粒子同定

BESS 測定器は上下の TOF カウンタにより β と dE/dX 、中央飛跡検出器と磁場により運動量を測定している。それにより粒子同定は質量による同定を行っている。式 1 参照。図 2 は質量分布を表したものである。

$$m = ZeR\sqrt{1/\beta^2 - 1} \quad (R = \frac{pc}{Ze}) \quad (1)$$

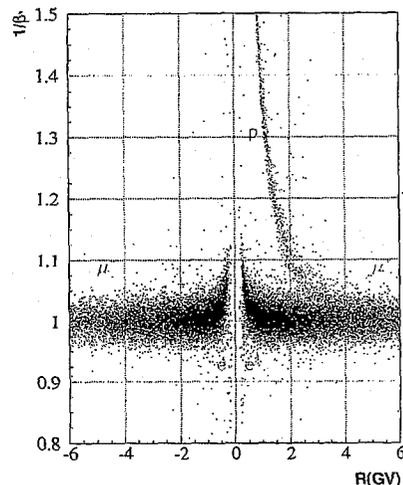


図 2: $1/\beta$ 分布 (質量分布).

5.3 バックグラウンドの見積もり

μ^+ に対しては陽子と陽電子、 μ^- に対しては電子がそれぞれバックグラウンドになる。

まず μ^+ に対するバックグラウンドである陽子の数を見積もった。3 GeV/c 以上では μ^+ の $1/\beta$ 分布に陽子が完全に混ざってしまうため、 μ^+ と陽子が完全に識別できる 1.5 GeV/c 以下で p/μ^+ 比を求め、その比を 20 GeV/c まで外挿し見積もった。 p/μ^+ 比は $0.14 \times P^{-0.98}$ 。

次に μ^\pm のバックグラウンドである電子・陽電子の見積もりを行った。BESS 測定器には鉛プレートと下 TOF カウンタを組み合わせたシャワーカウンタが搭載されている。そのため下 TOF シンチレーションカウンタのデータとモンテ・カルロ

シミュレーションのデータの比較により e^-/μ^- は 0.5 GeV/c において 1% 以下であった。

μ 粒子事象に対してこれらのバックグラウンドの差引きを行い、流束を求めた。

6 流束計算

μ 粒子流束は以下の計算により求めた。

$$F = \frac{N_{obs} - N_{BG}}{S\Omega \cdot T_{live} \cdot \epsilon \cdot dP} \quad [m^{-2}sr^{-1}s^{-1}(GeV/c)^{-1}] \quad (2)$$

ただし、

N_{obs} : 観測された事象数

N_{BG} : 見積もられたバックグラウンドの数

ϵ : 測定効率

$S\Omega$: 有効面積立体角

T_{live} : 観測時間

有効面積立体角 $S\Omega$ は 1 GeV/c で 0.15 m^2sr 。測定効率 ϵ は 0.5 GeV/c から 20 GeV/c の範囲で 98% 以上であった。

7 結果

2001 年 9 月にアメリカ、Ft. Sumner で行われた大気 μ 粒子の絶対流束の観測結果は図 3 のようになった。この結果とこれまで BESS 実験が行ってきた地磁気緯度の異なる地上での μ 粒子流束を比較し、地磁気効果について議論する。

8 議論

大気 μ 粒子流束を用いて地磁気緯度の違いを議論するために使用したデータは表 1 に載せた 3 地点である。BESS-2001、BESS-1997/98/99、BESS-1995 は、それぞれ観測時期、高度、地磁気緯度が異なる。地磁気緯度の効果だけを引き出すには観測時期、高度をそれぞれ補正する必要がある。

8.1 高度補正

μ 粒子流束の高度補正の方法を確立させるために以下の 2 つのデータを用いた。BESS-1999 と BESS-1995 は地磁気緯度がほぼ同じで、観測高度が異なる。 μ 粒子流束の高度補正で考慮しなければならない物理過程は以下の 3 つである。

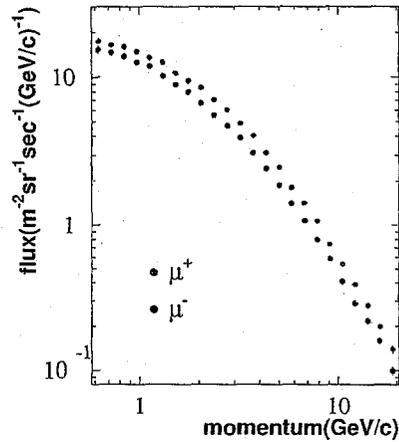


図 3: 2001 年アメリカ、Ft. Sumner における大気 μ 粒子の絶対流束。

- (1) μ 粒子崩壊
- (2) 空気中での電離損失
- (3) μ 粒子の生成

(1) と (2) は μ 粒子の崩壊と電離損失を考慮した生き残り確率 (式 3 参照) を計算した。

$$\omega_{N \rightarrow T} = \left(\frac{x_T P_N}{x_N P_N - a(x_T - x_N)} \right)^{-\frac{b}{P_N + a x_N}} \quad (3)$$

ただし、上式の変数は表 2 に示してある。

表 2: 式 3 に使用している変数の説明

変数名	定義	単位と値
x_N	乗鞍岳での気圧	742 g/cm ²
x_T	つくばでの気圧	1030 g/cm ²
P_N	乗鞍岳での μ 粒子運動量	GeV/c
a	電離損失量	GeV/c g/cm ²
b	崩壊確率	1.33 GeV/c

(3) の μ 粒子生成は 1999 年に乗鞍岳において陽子の絶対流束を観測したデータを用いて、地上で観測される μ 粒子流束をシミュレーションによって予測した。その結果、BESS-1995(つくば)の流束に対して 1% 以下であった。 μ 粒子の生成は無視できるほど小さい。

BESS-1999(乗鞍岳)をつくば高度に降ろしたときの μ 粒子流束は、BESS-1995(つくば)と比較すると 1 GeV/c 付近で 10% 程度の違いがあった。これは観測時期と大気構造の違いによるものと考えられる。

このように流束の高度補正方法が妥当であることを確認したので、地磁気緯度の比較に使用する BESS-2001(Ft. Sumner)の μ 粒子流束をつくば高度へ補正した。そのとき、 μ 粒子の崩壊と電離損失のみを考慮し、 μ 粒子の生成は無視した。

8.2 太陽活動による影響 (Solar modulation)

BESS-2001(Ft. Sumner)の高度補正を行った流束と BESS-1997/98/99(LynnLake)と BESS-1995(つくば)の流束を比較した。本来ならば、地磁気緯度が低い LynnLake での μ 粒子流束が最も高く、地磁気緯度の高いつくばでの μ 粒子流束は最も低くなるはずである。ところが 1 GeV/c 付近において高度補正された BESS-2001(Ft. Sumner)の μ 粒子流束が最も低くなった。この理由は、2001 年は太陽活動極大付近に相当し、その影響により 1 次宇宙線の地球に入射する数が減少したために 2 次宇宙線である μ 粒子も減少したからである。

そこで、BESS-2001 と CAPRICE97 の 2 つのデータを比較した。この 2 つの実験は共に Ft. Sumner の地上で行われ、観測時期だけが異なる。流束による比較では 1 GeV/c で 20% の違いがあった。ところが、電荷比 (μ^+/μ^-) による比較では ~3% の違いとなった。電荷比にすることで solar modulation の効果と系統誤差がキャンセルされたからと考えられる。また、運動量依存性が流束にしたときよりも電荷比にした時の方が小さいからである。

以上のことより地磁気緯度効果のみを見るためには流束ではなく電荷比による比較が有効な手段であることがわかった。

8.3 電荷比による地磁気緯度効果

図 4 は高度補正前後の BESS-2001 (Ft. Sumner) と BESS-1997/98/99 (LynnLake) と BESS-1995 (つくば) の電荷比を示している。BESS-2001(Ft. Sumner) はつくば高度へ高度補正するとその電荷比が 1 GeV/c 付近において BESS-1997/98/99(LynnLake) に近づいている。Ft. Sumner と LynnLake は地磁気緯度は異なるが、2 次宇宙線 μ 粒子が地上で観測されるための 1 次宇宙線の地磁気緯度効果が同じであるとえられる。

地磁気緯度の違いが現れたのは BESS-2001 (Ft. Sumner) または BESS-1997/98/99 (LynnLake) と、BESS-1995(つくば) との間であった。つくばでは地磁気緯度が他の 2 地点よりも高いために 2 次宇宙線 μ 粒子はエネルギーの高い 1 次宇宙線から生成されるために、粒子生成の多重度効果により多数の正負の中間子が生成・崩壊

壊し電荷比が1に近付いた。地磁気緯度の低いLynnLakeとFt. Sumnerはエネルギーの低い1次宇宙線が地球に入射可能となる。エネルギーの低い1次宇宙線によって生成される中間子は数が少なく正電荷 dominant となるために電荷比がつくばでの電荷比よりも高くなっている。

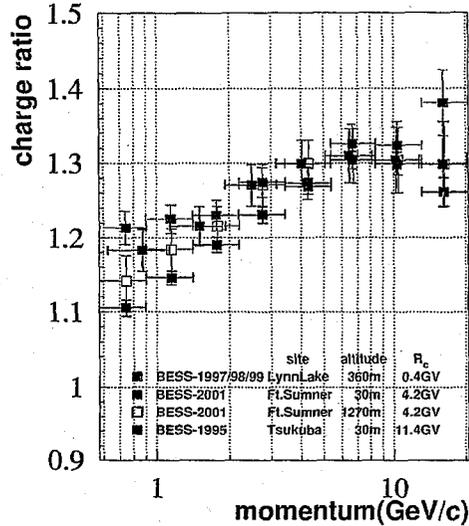


図4: 電荷比 μ^+/μ^- による地磁気緯度効果

9 まとめ

2001年9月にアメリカ Ft. Sumner の地上において μ 粒子の絶対流束、電荷比を高い精度で測定した (BESS-2001)。この観測結果と共に我々が過去に観測した地磁気緯度の異なる地点における μ 粒子の電荷比と比較し地磁気緯度効果を定性的にかつ精度良く見積もることができた。また、地磁気緯度効果を見積もるために観測地点の高度補正を定量的に評価した。

氏名	谷崎 圭祐		
論文題目	The Geomagnetic Latitude Effect on Atmospheric Muons at Ground Level Altitude (地上における大気 μ 粒子の地磁気緯度効果の研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	野崎 光昭
	副査	教授	武田 廣
	副査	教授	山中 大学
	副査		
印			
要 旨			
<p>本論文は、地上における宇宙線 μ 粒子の絶対流束の精密観測と、異なる地磁気緯度における観測を元に、地球磁場が μ 粒子の流束に与える影響を考察したものである。</p> <p>第1章では、本研究の背景と目的が述べられている。</p> <p>大気に入射した後に生成される2次宇宙線は、親粒子である1次宇宙線の情報を持って地上に到達する。従って、地上において2次宇宙線 μ 粒子を観測することは、間接的に1次宇宙線の受けた様々な影響を知るようになる。その影響の1つに地球磁場による地磁気効果がある。地磁気の影響を最も受ける1次宇宙線の流束は、地磁気緯度の異なる地点でその絶対量が変化し、それに伴って地上における μ 粒子流束も変化する。</p> <p>宇宙線流束を用いた地磁気効果の観測は、1960年から1970年代頃に数多く行われた。しかし、当時の観測データは規格化 (スケーリング) された宇宙線流束を求めるに留まり、絶対流束を求めるまでには至っていない。また、現在用いられている測定器はその当時のそれと比べて飛躍的に測定精度が向上している。</p> <p>近年、大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動の研究が盛んに行われているが、その測定精度と信頼性を向上させるには、理論的不定性をこれまで以上に小さくする必要がある。その理論的不定性の1つが地磁気効果である。ニュートリノと μ 粒子は、同じ中間子から崩壊・生成されるため、地上における μ 粒子の精密測定により、この理論的不定性を小さくすることができる。</p> <p>また、地上における μ 粒子観測は (測定精度の向上、絶対流束の導出) 宇宙線物理学における基礎データとしても重要なものである。</p> <p>第2章では、観測に用いた気球搭載型薄肉超伝導スペクトロメータ (BESS 測定器) について各検出器ごとに詳しく述べられている。</p> <p>BESS 測定器は元々気球観測用に開発されたもので、大面積・立体角をもち、高精度の運動量分解能を有しているため、地上観測においてもこれまでになく高感度、広視野での観測が可能である。薄肉超伝導ソレノイドマグネットと飛跡検出器により運動量を決定し、飛行時間測定器により粒子の速度を測定し、これらの情報より粒子同定は質量による同定を行っている。</p> <p>第3章では、観測条件について述べられている。</p> <p>本研究は、BESS 測定器を用いて2001年アメリカ・Ft.Sumner において行われた μ 粒子観測に基づいている。地磁気緯度の異なる地点での μ 粒子流束の比較として、これまで観測してきたカナダ・LynnLake とつくばのデータが用いられている。Ft.Sumner, LynnLake, つくばの cut-off rigidity はそれぞれ 4.2GV, 0.5GV, 11.4GV である。</p>			

氏名 谷崎 圭祐

第4章では、データ解析について詳述している。

Ft.Sumner での観測データの解析方法が中心となっている。解析手順としては事象選別、粒子同定を行い、バックグラウンドの見積もりを行った。測定器の性能についても観測データに基づいて解析した。またモンテカルロ・シミュレーションにより測定器の面積立体角、検出効率等を計算した。

第5章では、解析によって得られた大気 μ 粒子の絶対流束を示し、合わせて、統計誤差、系統誤差が評価されている。

第6章では、この結果を用いて、地磁気緯度の異なる3地点の観測データを比較し、地磁気緯度効果を定性的かつ定量的に評価した。その3地点はつくば(11.4GV)、LynnLake(0.5GV)と Ft.Sumner(4.2GV)である。しかし、これらの流束をそのまま比較することはできない。観測地点の高度の違いによりスペクトルの絶対量が異なるからである。そのため、Ft.Sumner、LynnLake とつくばでの流束を同じ高度で観測した場合に補正する必要がある。

これまでの BESS 実験では、1999 年に乗鞍山山頂(cut-off=11.2GV)において大気 μ 粒子と陽子の絶対流束を観測した。乗鞍山とつくばではほとんど地磁気緯度が同じため、まず最初に乗鞍山での μ 粒子流束をつくば高度に補正した場合の流束を見積もった。その際、考慮しなければならない物理過程は μ 粒子の崩壊、大気中での電離損失、乗鞍山高度とつくば高度の間で生成される μ 粒子の3つである。 μ 粒子の崩壊と電離損失は解析的に求め、乗鞍山での μ 粒子流束をつくば高度に補正した。また乗鞍山とつくばの間で生成される μ 粒子の見積もりにはモンテカルロ・シミュレーションを用いた。このシミュレーションの入力には BESS 測定器を用いて乗鞍山山頂で観測した陽子の絶対流束を使用し、つくば高度での μ 粒子流束を見積もった。その結果、乗鞍山とつくば高度の間で生成される μ 粒子流束は、1995 年につくばで観測された μ 粒子流束に対して1%以下であることがわかった。従って、高度補正するときには μ 粒子生成は無視でき、崩壊と電離損失のみを考慮すればよい。

そこで3地点で最も高度が低いつくばの高度に他の2地点 Ft.Sumner と LynnLake における流束を補正させた。補正するときの過程は μ 粒子の大気中での電離損失と崩壊を考慮し行われた。高度補正を行ったが、観測年の違いにより太陽活動の影響が流束には反映されているため、それも補正する必要があった。しかし、流束の絶対値を比較するのではなく、 μ^+/μ^- 電荷比をとることで太陽活動の影響をキャンセルすることができた。これは運動量依存性が流束よりも μ^+/μ^- 電荷比の方が小さくなるためである。

地磁気緯度効果を評価するために異なる3地点での μ^+/μ^- 電荷比を比較した。結果として Ft.Sumner と LynnLake は1GeV/c 付近で誤差の範囲内で一致したが、つくばは10%ほど低かった。また、10GeV/c 付近では3地点の電荷比は一致した。大気シミュレーションを行いこれらの実験結果を説明することができた。

第7章では、上記の結果がまとめられている。

以上のように、本論文では、大気 μ 粒子の絶対流束の測定をこれまでにない高い精度を行い、また異なる地磁気緯度での観測結果と比較することにより、初めて大気 μ 粒子に対する地磁気効果を観測から直接求めることに成功した。この結果は、宇宙線の大気伝播過程について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認められる。よって学位申請者の谷崎圭祐は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。