

## 海面位での低運動量大気ミューオン測定計画

(運動量領域 1 GeV/c 以上)

川崎医科大学 情報科学1教室

辻 修平

(平成11年9月20日受理)

The Scheme of the Atmospheric Muon Measurements in Low Momentum  
Region at Sea Level  
(Muon Momentum Region More than 1 GeV/c)

Shuhei TSUJI

*Department of Information Sciences, Kawasaki Medical School,  
Kurashiki, 701-0192, Japan*

*(Received on September, 20, 1999)*

### 概 要

大気ニュートリノ・フラックスの理論的計算を確かめるために大気ミューオンの運動量スペクトルが極めて重要な指標となっている。岡山グループでは、これまで海面位で大気ミューオン強度を測り報告してきた。大気ミューオンの方位角依存性の関する報告では、運動量領域2.5 GeV/c から3.5 GeV/c, 3.5 GeV/c から100 GeV/c, 天頂角領域5°, 20°, 40°において、8方位方向の大気ミューオン・フラックスを示した。1 GeV/c 以下の大気ミューオン・フラックスを方位角別に調べることは、地磁気に影響したミューオンの崩壊過程の違いによるフラックスの有意な差も現れ、大気ニュートリノ・フラックスの理論計算に重要な情報を与えることとなる。現在の岡山粒子望遠鏡では、主に物質層の影響のため、大気ミューオンの方位角測定に関しては、2.5 GeV/c 以上しか測定することができない。次期観測計画では、物質層を減らし、低運動量ミューオン (1 GeV/c 以下) の測定を可能にする新岡山粒子望遠鏡の設計、建設、観測を予定している。

### Abstract

The atmospheric neutrino calculations can be investigated by atmospheric muon momentum spectrum. Our Okayama group has measured and reported atmospheric muon fluxes at sea level. In azimuthal angular dependence of muon measurements, we have shown 8 azimuthal directions, in 2 momentum range 2.5 GeV/c to 3.5 GeV/c and 3.5 GeV/c to 100 GeV/c, in the zenith angles 5°, 20° and 40°. The atmospheric muon fluxes with the momentum lower than 1 GeV/c will give the neutrino flux calculations the important information for the difference of the muon decay process affected by geomagnetic field effects. As for the azimuthal angular dependence of muon measurements, we can only measure the muon with the momentum more than 2.5 GeV/c

due to the materials which muons go through. I will redesign and reconstruct the new OKAYAMA cosmic-ray telescope to be able to measure muons with the momentum lower than 1 GeV/c and plan to measure the muons in the next observation scheme.

## 1. 序論

ニュートリノ・フラックスについて、いくつかの地下実験の結果と計算値において、有意な差が見られる<sup>1-8)</sup>。そしてこの差は、ニュートリノ振動の可能性があると考えられている。この意味において、より詳細なニュートリノ・フラックスの計算値が要求されている。低エネルギーニュートリノ・フラックスの算出の困難の1つは、地磁気の影響である。また、これらの計算値の妥当性は、地表において詳細にミューオン・フラックスを調べることで確かめることができる。なぜなら、大気ニュートリノの主な生成過程は、以下の式での崩壊過程から生ずるものであるからである。

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad (1)$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}) \quad (2)$$

また (1) 式のパイオンは、おもに以下の反応式によって生成される。

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^{\pm} \quad (3)$$

$$p + n \rightarrow p + p + \pi^{-} \quad (4)$$

低エネルギー領域のミューオンは地磁気によりパス・レングスが異なる。(2)式より、ミューオンのパス・レングスの違いから、崩壊過程が異なり、結果として大気ニュートリノ・フラックスにも差が出ることとなる。また上記反応式から低エネルギー・ニュートリノの比  $\nu_{\mu}/\nu_e(\bar{\nu}_{\mu}/\bar{\nu}_e)$  は、およそ2という値を取る。これらは、図1に示すように Honda et al.<sup>1)</sup>, Barr et al.<sup>3)</sup>, Bugaev et al.<sup>4)</sup>, Lee et al.<sup>5)</sup>らの理論的計算により確認されている。また、ニュートリノのエネルギーは、(2)式より、3体崩壊するので、ミューオンのエネルギーの1/3となる。各ニュートリノは、パイオンとミューオンの崩壊の運動学から、ざっと等しいエネルギーを運ぶ。ゆえに

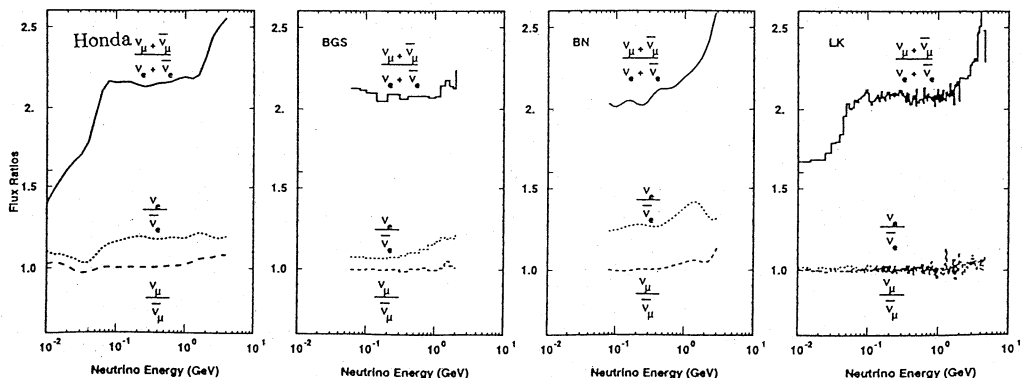


図1：理論計算によるニュートリノエネルギーに対しての大気ニュートリノ・フラックス比。

左から、文献<sup>1,3,4,5)</sup>からのものである。

あるエネルギーのニュートリノは、そのエネルギーの3倍のミュオンと強い相関がある。図1より、 $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$  は、ニュートリノ・エネルギーでおよそ0.1~1.3 GeV でフラットな値を示している。これは、ミュオン・エネルギーで0.3~3.9 GeV に相当する。現在までの海面位のミュオン・フラックスは、エネルギーで高々2.5 GeV 以上しか測定しておらず、これは、図1のフラットな部分のごく1部に過ぎない。この低エネルギー領域からの大気ニュートリノ・フラックスを解明するため、現在の検出器 岡山粒子望遠鏡<sup>9,10</sup>を改良し、より低エネルギー領域（1 GeV 近辺以上）までミュオンの観測領域を増やし、大天頂角まで測定できるようにしていく。天頂角毎に低エネルギーミュオン・フラックスの方位角依存性を測定することは、地磁気の小さいところでは1次宇宙線に直接的起因した大気ニュートリノ・フラックスを解明することができ、地磁気の大きいところでは、大気ミュオンの崩壊過程の違いから来るニュートリノ生成も解明できる。また(2)式より、大気ミュオンを電荷別に観測すれば、粒子、反粒子別に大気ニュートリノを区別しそのフラックスを求めることができる。従来の測定も電荷別の測定を行っており、今後の測定でも引き続き行う。これらの観測結果はニュートリノ・フラックス計算に大きく跳ね返ることが期待できる。

2. これまでの方位角別ミュオン・フラックスの結果

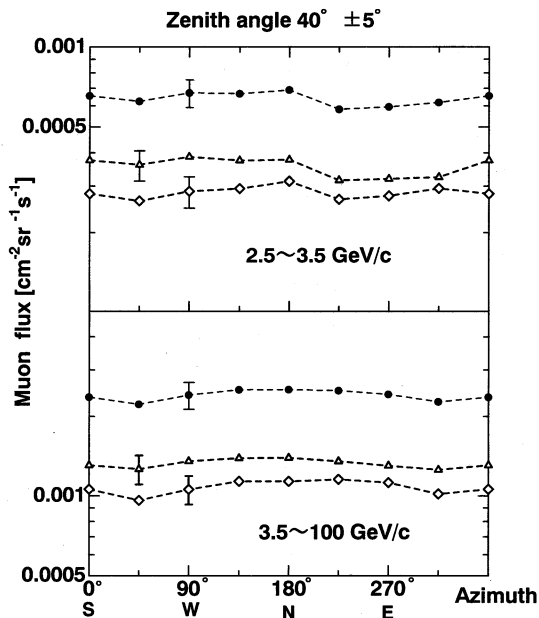


図2：天頂角 $40^\circ \pm 5^\circ$ での方位角別ミュオン・フラックス。運動量領域は、2.5 GeV/c~3.5 GeV/cと3.5 GeV/c~100 GeV/cである。●：全ミュオン・フラックス、△：正ミュオン・フラックス、◇：負ミュオン・フラックス。

岡山グループは、これまで、天頂角  $5^\circ \pm 5^\circ$ ,  $20^\circ \pm 5^\circ$ ,  $40^\circ \pm 5^\circ$  において、8方位角毎 ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ \dots$ ) の大気ミュオン・フラックスを観測し報告した<sup>11)</sup>。天頂角  $40^\circ \pm 5^\circ$  の結果を図2に示す。図2より、低運動量領域 (2.5 GeV/c~3.5 GeV/c) では、全体として東方向のフラックスが減少している。これは、(3)式の1次宇宙線 (プロトン) が地磁気の影響を受け東方向では、入射しにくい傾向があることに起因する。負ミュオン・フラックスは、東方向同様、西方向にも減少している傾向が見られる。これは、1次宇宙線の地磁気効果ばかりではなく崩壊後のミュオンも地磁気を受けたと考えられる。つまり、地磁気を受けたことで、ミュオンのパス・レングスが伸び、ミュオンが崩壊しやすくなっている。(2)式より、ミュオンの崩壊は反電子ニ

ニュートリノの増加を示している。より地磁気の影響を大きく受けるミュオンを調べることは、そのパス・レングスの違いによる崩壊過程を調べることに等価である。これは、大気ニュートリノ・フラックス生成に大きく関与する。

### 3. 岡山粒子望遠鏡の改良

地磁気の影響の大きいミュオンを調べるためには、

1. 天頂角の大きいところを測定する。
2. 運動量の低いミュオンを測定する。

の2つがあげられる。条件1に関しては、現在望遠鏡の導入された配置条件により、現在天頂角 $40^\circ$ までしか全方位角に向けることができない。改良型では、大天頂角まで全方位角に向けられるよう導入は位置を考慮する必要がある。条件2を満たすためには、鉄芯マグネットを小さくする必要がある。現在および改良案の岡山粒子望遠鏡の X-Z, Y-Z 投影図を図3に示す。改良型望遠鏡は、磁石を中心に対称的にポジション・チェンバーを設ける。また、検出器のたわみが運動量測定に影響を及ぼさないようにするため、磁場のかけ方を変える予定である。最大の特徴は、鉄材（主にマグネット）によるエネルギー損失を押しさえ低運動量ミュオンまで観測するため、従来 $32\text{cm}$  ( $251.5\text{g}/\text{cm}^2$ ) あった厚みを $18\text{cm}$  ( $141.5\text{g}/\text{cm}^2$ ) 程度に押しさえることである。従来、高度角制御基準盤と鉄芯マグネットを分離していたが、改良型では一緒にする。これまでの望遠鏡の鉄材による損失と改良型望遠鏡に適用候補の厚み $18\text{cm}$ の時の損失の計算結果を図4に示す。なお、エネルギー損失には、ベータ・プロットに準じた公式を使った<sup>12)</sup>。入射運動量とは、鉄材に入る前の運動量を表し、鉄芯マグネットによる運動量損失分とは、最初の入

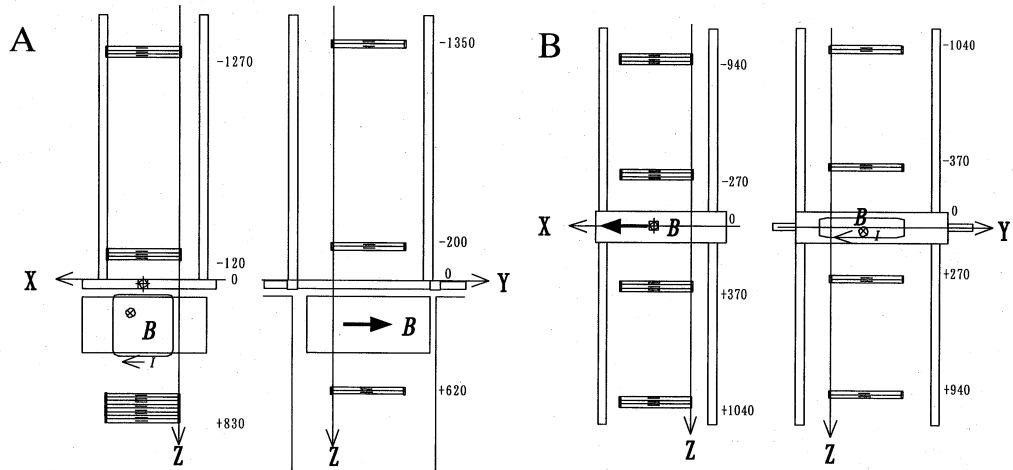


図3 : A : 従来型岡山粒子望遠鏡 B : 改良型岡山粒子望遠鏡の1案 X-Z 投影の数値は、それぞれのポジション・チェンバーの最下部層の芯線位置、Y-Z 投影の数値は、それぞれのポジション・チェンバーの最上部層の芯線位置を示す。

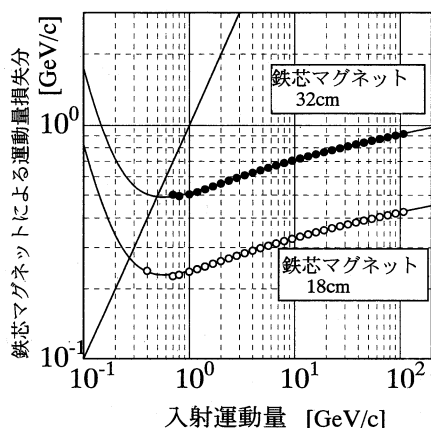


図 4：鉄芯マグネットによる運動量損失分。

●：従来型岡山粒子望遠鏡。マグネット 32cm (251.5g/cm<sup>2</sup>) の他に 6.9cm (54.2g/cm<sup>2</sup>) の鉄材も含む。○：改良型岡山粒子望遠鏡 マグネット 18cm (141.5g/cm<sup>2</sup>) のみ。曲線は計算プロットをある関数でフィットしている。

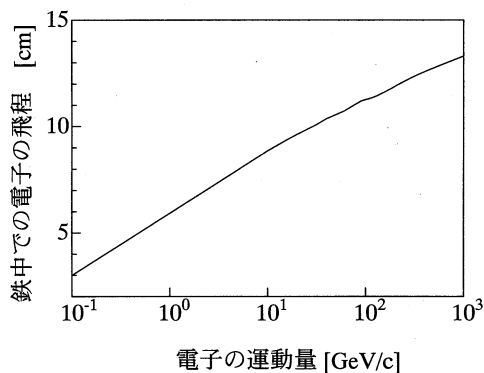


図 5：鉄中の電子の飛程

電子の飛程の関係を計算したところ、図 5 より、鉄芯マグネット 18cm では、10<sup>3</sup>GeV/c の運動量まで十分通過できないことを示しており、ミューオン・データに電子が入り込むことはない。

射運動量から物質通過後の運動量を引いた値である。図 4 より、直線と曲線の交わるところが物質層での最小の検出できる運動量である。従来型の望遠鏡では、最小検出運動量は、約 0.5GeV/c であるのに対し、改良型は、約 0.25GeV/c まで下げることができる。マグネットに関する物質層のほかに望遠鏡を導入している建造物の壁の効果もエネルギー損失として考慮する必要がある。現在の配置では、3階校舎の 1階に配置されており、天頂角 40°を測定する場合、校舎の梁で最大 750g/cm<sup>2</sup> の厚みをミューオンが通過することになる。この場合、最低の運動量を見積もると、2.1GeV/c である。しかも 1階に配置されているため、2階 3階に配置されている見積もることのできない物質（例えば本棚、スチール机）の影響が存在している。改良型は、校舎の最上階に配置する予定である。この場合、物質層は、望遠鏡をどの方向に向けても約 48g/cm<sup>2</sup> である。また最上階であるため、従来の不確定な影響（本棚とかスチール机）が存在しないことになる。この場合の校舎と 18cm (141.5g/cm<sup>2</sup>) の鉄新マグネットの物質層両方から、0.4 GeV/c 以上の運動量がエネルギー損失の計算値から測定可能となる。

マグネットを薄くするとエネルギー損失の影響は、小さくなるが、他の影響を考慮する必要がある。その 1つは電子（宇宙線電子、ノックオン電子）の入り込みである。電子の運動量と鉄中での電子

### 参考文献

- 1) Honda M et al.: Calculation of the flux of atmospheric neutrino. Phys Rev D 52: 4985-5005, 1995
- 2) Gaisser TK, Stanev T and Barr G: Cosmic-ray neutrinos in the atmosphere. Phys Rev D 38: 85-95, 1988
- 3) Barr G, Gaisser TK, Stanev T: Flux of atmospheric neutrinos. Phys Rev D 39: 3532-3534,

1989

- 4) Bugaev EV, Naumov VA: Phys Lett B 232: 391-, 1989
- 5) Lee H, Koh Y: A new calculation of atmospheric neutrino flux. Nuovo Cimento B 105: 883-887, 1990
- 6) Hirta KS et. al.: Experimental study of the atmospheric neutrino flux. Phys Lett B 205: 416-420, 1988
- 7) Fukuda Y et al.: Evidence for oscillation of atmospheric neutrino. Phys Rev Lett 81: 1562-1567, 1998
- 8) Casper D et al.: Measurement of atmospheric neutrino composition with the IMB-3 detector. Phys Rev Lett 66: 2561-2564, 1991
- 9) Yamashita Y et al.: An altazimuthal counter telescope with a magnet spectrometer tracing Cygnus X-3. Nucl Instrum Methods A 374: 245-253, 1996
- 10) Tsuji S et al.: An altazimuthal counter telescope with a magnet spectrometer II: Measurements of muons at sea level. Nucl Instrum Methods A 413: 43-49, 1998
- 11) Tsuji S et al.: Measurements of muons at sea level. J Phys G: Nucl Phys 24: 1805-1822, 1998
- 12) ニコラス ツルファニティス, 阪井英次訳: 放射線計測の理論と演習. 現代工学社 第4章: 125, 1986