## 高エネルギーガンマ線天文学

小川さくら、川崎恒実、高井ゆり、堀田陽生、森下真海波 Supervisor 助教野崎誠也先生

宇宙線…宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの原子核

- →なぜこんなにエネルギーが高いのか?
- →どこから来たのか?
- →どうやって加速されたのか?

(CTAは) ガンマ線を使った観測

電荷を持たない =磁場に曲げられず直進する →<u>到来方向が測定可能</u>



・高エネルギー天体の起源や 進化を明らかにする

 ・天体における物理素過程の 研究

イントロダクション

ガンマ線は大気と反応して地表まで届かないので、<u>間接検出</u>が必要。 →空気シャワーを利用



<u>核カスケードシャワー</u> 大気中の原子核と反応 して、π粒子を生成 →π粒子は**ミューオン** を生成する

**ミューオン**(µ<sup>±</sup>)に注目したい

→ 到来頻度が高い(100 cm<sup>2</sup>あたり1秒に1個ほど)

- →制動放射せず、エネルギーを保ったまま地表に到着する
- →寿命は2.2×10<sup>-6</sup>sと短命

しかし、相対論的な速度で運動する粒子は、静止系から見たとき γ倍寿命が延びる(その分崩壊前に進む距離も延びる)

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \ \beta = \frac{\nu}{c} \quad E = m_0 \gamma c^2$$

# チェレンコフ光 荷電粒子が媒質中での光速を超えたときに放出される青い光 →荷電粒子(ミューオン)が通ったというシグナル







#### 大気ミューオンが水中を通過したときに放射される チェレンコフ光を検出



#### 地表に到達するミューオンの速度βを実験で確認したい

ミューオンの速度や到来頻度に対する見積もりの確認 (ミューオンの発生プロセスがまだ明確に理解されていない)











## データのフィッティング



## チェレンコフリングの半径、幅、光量をフィッティングにより求めた。

Cherenkov Ring (Center=(1.44, -0.62), Radius=2.64)



## 測定結果を用いたβの決定

- ・測定したチェレンコフ光の光量から、 ミュオンの速度βを決定したい。
- ・理論的に、速度βとチェレンコフ光量の関係を求めておき、測定した
   光量をβに変換する。

理論的計算 Photon数 測定値 В βを推定



① βに対するチェレンコフ光の発光量 ② PMTの光子→電子変換の 量子効率(QE) ③ PMT arrayの有感領域 ④水、ガラス、空気の境界面での チェレンコフ光の反射 ⑤水中でのチェレンコフ光の減衰



① β に対するチェレンコフ光量の計算  
Frank-Tammの公式  

$$\frac{\partial^{2}E}{\partial x \partial \omega} = \frac{q^{2}}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^{2}n^{2}(\omega)}\right)$$

$$\frac{\partial^{2}E}{\partial x \partial \omega} = \frac{q^{2}}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^{2}n^{2}(\omega)}\right)$$

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n(\omega)}$$

$$x + \mu z + E \ge B i z \exists \omega \delta w \delta \varepsilon \varepsilon \delta B N \ge i z \in \lambda$$

$$x = E/\hbar \omega \quad \lambda = 2\pi c/\omega$$

$$\xi = a = 0$$

$$\lambda = \int d\lambda \int dx \quad \frac{q^{2}}{4\pi\hbar} \mu(\omega) \left(1 - \frac{1}{\beta^{2}n^{2}(\omega)}\right) \frac{c}{2\pi} \frac{1}{\lambda^{2}} \times QE(\lambda)$$



- ・PMTの光電面において、 光子→電子への変換効率を、 量子効率と呼ぶ。
- ・実験で用いたPMTの
   量子効率は最大40%
   (右図橙色)。





 チェレンコフ光が入射する 面において、
 PMTの光電面が占める面積 の割合は0.407。



## ④境界面でのチェレンコフ光の反射





砂川「理論電磁気学」より

#### 境界面では屈折とともに反射も起こる→光子が減少



水量を変化させ、水による減衰を測定。



水量と光量の比例関係からのずれより、水による減衰が求められる。

⑤水中でのチェレンコフ光の減衰

推定結果



## 速度Bとチェレンコフ光の光子数の関係

#### 典型的なオーダー

- 放出される光子数:600
- そのうちPMTに入る割合

境界面の透過 0.9 水中の透過 1 PMTの量子効率 0.4 PMT arrayの有効面積 0.4



## 天頂角付近からのミューオンの速度分布



考察:ミューオンの速度Bは適正だろうか?

4つの事実を仮定:

①ミューオンの寿命は、2.2×10<sup>-6</sup> (s) 程度

②相対論的な運動をしている粒子は(静止系からみると) γ倍寿命がのびる

③ミューオンの静止質量は、106 (MeV) 程度

④宇宙線陽子と大気中の原子核の相互作用は、高度20km-30km 程度から始まる









ローレンツ因子:**γ=2.294** 寿命:t=5.047 µs 距離:L=1.514 km <u>エネルギー:E=243.1 MeV</u>



考察:ミューオンの速度Bは適正だろうか?

#### <u>ミューオンが持つエネルギー領域はどこ?</u>

#### 事実④:宇宙線陽子と大気中の原子核の相互作用は、 高度20km-30km程度から始まる。



仮に高度20km付近で生成されたミューオンが地表に届いたとすると、

ミューオンはGeV領域のエネルギーを持つ!

考察:ミューオンの速度Bは適正だろうか?

事実④より、ミューオンがGeV領域のエネルギーを持つことから、

**β=0.8**のとき **β=1.0**のとき

エネルギー: E = 176.5 MeV E = 243.1 MeV

という計算結果は、

ミューオンの速度βを過小評価していることを意味する!

## 考察:速度βを過小評価してしまった原因

ミューオンの速度βを過小評価してしまった原因として、 次のようなものが考えられる。

- ・ミューオンの電離損失
- ・水チェレンコフ光の減衰の厳密性
- ・波長による水槽の透過能力の差
- ・リングのフィッティングの誤差…etc

→考えられる原因は多く、原因を突き止めることはできなかった。



実験装置の改善・変更によって、 誤差を低減できるだろうか?



装置をスーパーカミオカンデサイズまで拡大したとき、速度βの誤差 はどの程度抑えられるかを見積もった。



光量(光子数)は、水中を走る距離に比例するので100倍に増える。 それに伴い、誤差は1/√100 = 1/10倍に低減。



#### 装置のサイズをスーパーカミオカンデレベルまで拡大しても、 誤差は1/10程度にしか抑えることができない。 →装置の拡大による、さらなる誤差低減は現実的ではない。





#### 空気の屈折率:n=1.0003>1 →β>1/n=0.9997のミューオンは空気中でチェレンコフ光を出す。



シンチレーターを通過し、トリガーに かかったミューオンのうち、空気中で チェレンコフ光を出すものの割合を調 べれば、β>0.9997のミューオンの割 合が分かる。

 $\mathbf{\Lambda}$ 

空気の屈折率を少しずつ変えると、 βの分布が分かる!



実験装置の提案



- 空気の圧力を変えることで、
   屈折率を変更する。
- 大気圧付近で圧力が1hPa変化 すると、屈折率は0.27ppm変 化する。
- 容器の高さは、光子数が十分に(10個程度のオーダー)出るように、30cm程度必要。

来年のスプリングスクール で実現できる規模かも!!

まとめ

- ・PMTとシンチレーターを用いた実験装置で、ミューオンを観測する ためのトリガー回路を組み、threshold決定を行った。
- ・ミューオンの出す水チェレンコフ光を観測することができた。
- ・観測データと理論的計算から、ミューオンの速度βの分布を求めたが、 βを過小評価していることが分かった。
- ・さらにβの分解能を上げるために、空気チェレンコフ光を利用する ことを提案した。

謝辞

5日間を通して、助教 野崎誠也先生には、非常に熱心かつ丁寧に ご指導いただきました。

またTAの阿部正太郎さん、Joshua Baxterさんをはじめ、講義を担当 していただいた大石理子先生、Daniela Hadasch先生、その他大勢 の先生方にお世話になりました。

心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

#### backup



[1] T. Saito et al., Development and quality control of PMT modules for the large-sized telescopes of the Cherenkov Telescope Array Observatory, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1073, 2025, 170229.

<u>リングのフィッティング(2)</u>

