

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740141

研究課題名（和文）超高エネルギー宇宙由来ニュートリノに対する大型チェレンコフ光検出器の感度増大

研究課題名（英文）The sensitivity increase of a large Cherenkov photon detector for extremely high energy cosmogenic neutrinos

研究代表者 間瀬 圭一（MASE KEIICHI）

千葉大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80400810

研究成果の概要（和文）： 10^{20}eV を超える超高エネルギー宇宙線の起源を明らかにするためにその宇宙線由来の超高エネルギーニュートリノを捕らえることが有効である。このニュートリノに対する大型チェレンコフ光検出器の感度を上げる手法を開発した。バックグラウンドである大気ミュオン束とニュートリノ信号からの単一ミュオンは一見似たように見えるが、粒子軌跡の進行方向のチェレンコフ光の分布に違いが見られることが分かった。この違いを利用することでより多くのニュートリノ信号を得ることができる。

研究成果の概要（英文）：In order to reveal the origin of the extremely high energy cosmic rays (EHECRs) with the energies above 10^{20} eV, it is effective to detect extremely high energy neutrinos derived from those EHECRs. I developed a method to increase the sensitivity of a large Cherenkov photon detector for those neutrinos. Events between background atmospheric muon bundles and single muons derived from those neutrinos apparently look similar, however, I found that there is a difference of the Cherenkov photon distribution in the moving direction. More neutrino signals can be obtained by using the difference.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線（実験）

1. 研究開始当初の背景

現在までに 10^{20}eV を超える超高エネルギー宇宙線 (EHECRs) が AGASA, HiRes(I, II), Auger, TA 等の検出器により検出されている。このような非常にエネルギーの高い粒子が生成される機構は未だ謎に包まれており、

様々なモデルが乱立するのが現状である。このモデルとしてはコズミックストリングの崩壊等、少しエキゾチックなものや、活動銀河核やガンマ線バースト等の高エネルギー天体中で加速するモデルなどがある。

IceCube 実験は南極氷河中に約 5,000 本もの光電子増倍管 (PMT) を埋め、高エネルギー

一ニュートリノからの信号を捕らえる非常にユニークな実験である。この検出器の有効体積は約 1km^3 であり、ノーベル賞を受賞したカミオカンデ実験の後継機であるスーパーカミオカンデタンクの約2万倍の大きさを誇る。このような巨大な検出器を用いる事で超高エネルギー宇宙ニュートリノ ($E > 10^8 \text{GeV}$) の観測が可能となる。当時 IceCube は全体の約70%が完成し、世界最大の高エネルギーニュートリノ検出器として順調に稼働中であった。

私は平成19年度に当時約4分の1の検出器として取得されたデータを用いて、この超高エネルギーニュートリノ探索を行った。残念ながら、データ中からは超高エネルギーニュートリノ信号は見つからなかったが、当時世界で最も良い水準の上限値を設けることができた[1]。

[1] The IceCube collaboration, PRD82, 072003 (2010)

超高エネルギー宇宙線から期待されるニュートリノフラックスにはまだ約20倍程度感度は足りないが、IceCube が完成し、5年程度観測すれば、そのフラックスに到達する。

2. 研究の目的

本研究では現在世界最高の検出器体積を誇る IceCube 検出器を用いて、 10^{20}eV を超える超高エネルギー宇宙線からの超高エネルギーニュートリノを世界に先駆けて捕らえることで、未だ謎に包まれたままの超高エネルギー宇宙線の起源の解明に迫ることである。

超高エネルギーニュートリノ信号を検出する上でバックグラウンドとなるのは宇宙線と大気との相互作用により生成される大気ミューオン束である。大気ミューオンは低エネルギー側 ($< \sim 10^8 \text{GeV}$) ではその数でシグナルを凌駕するが、その数をエネルギーとともに急激に下げるので、高エネルギー側 ($> \sim 10^8 \text{GeV}$) においてはニュートリノ信号が優勢になる。またニュートリノ信号は主に水平方向から来るが、ミューオンバックグラウンドは主に天頂付近から多く来る。この信号とバックグラウンドの違いを利用して超高エネルギーニュートリノ信号を検出する。ここで重要となるのは信号とバックグラウンドをより良く選別することであり、本研究ではこの選別方法等を改善することで、超高エネルギーニュートリノに対する感度を上げ、一早いニュートリノ信号の検出を狙う。

3. 研究の方法

上記の目的のために、今まであまり活かされていなかった波形データ情報を用いた高精度のニュートリノ事象再構築を行ったり、現在の超高エネルギーニュートリノ探索において最も大きな系統誤差である氷の不定性を取り除く事等で、超高エネルギーニュートリノに対する感度を上げる。

現況、南極の氷の性質はあまり良く理解されておらず、現解析に於いて最も大きな系統誤差を与えている。氷の性質（散乱・吸収長）をより良く理解し、系統誤差を無くすことで、信号とバックグラウンドの選別の不定性を無くし、感度を上げる。現況の30%の系統誤差を10%程度までに減らすことができれば約2割感度の増大ができる。また詳細な氷の性質の理解は詳細な波形情報を用いる際にも肝要となる。

このために、各光検出器に装着されているLEDからの光を用いて実験的に決められた、より良いと思われる新しい氷モデルを用いてシミュレーションデータを作成し、観測データと比較することで、実際に氷の不定性が改善されていることを確認する。その後、改善されたシミュレーションを用いて波形データを用いた事象の再構築を行い、エネルギー、角度分解能を上げ、超高エネルギーニュートリノに対する感度を上げる。

4. 研究成果

より良いと思われる新しい氷モデルを用いたシミュレーションデータを製作した。

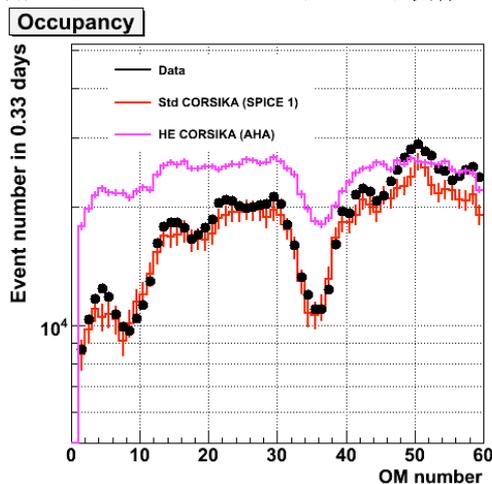


図1：0.33日観測した際にバックグラウンドから期待される各検出器 (OM) のトリガー数。OMの番号は検出器の深さ方向に対応。黒：観測データ、ピンク：古い氷モデルを使ったシミュレーション（組成：鉄）、赤：新しい氷モデルを使ったシミュレーション（組成：polygonateモデル）

図1に0.33日観測した際に期待されるバックグラウンドからの各検出器のトリガー数をプロットした。明らかに新しい氷のモデルを使ったシミュレーション（赤）の方が観測データ（黒）を良く再現することが分かる。

また、波形データを活かすためには、より正確なバックグラウンドモデルの構築が必要となる。このために当初計画していた経験的なモデル構築をやめ、より詳細なシミュレーションデータ（CORSIKA）を用いることにした。このCORSIKAデータの問題は超高エネルギーの宇宙線バックグラウンドでは生成されるミュオン多重度が大きくなり、シミュレーション生成に莫大な時間がかかる。この問題を回避するために、幾つかのミュオンを束ねるシンニング法を開発した。これにより詳細なシミュレーションを解析に用いることができるようになった。

このようにして生成したシミュレーションを用いて、波形情報を用いた事象再構築に取り組んだ。従来の平面波を仮定する事象再構築の角度分解能は 1.4° であるが、波形情報を用いた再構築では分解能が 0.6° まで上がることが分かった。また、エネルギー分解能も約100%であり、比較的良いことも分かった。しかしながら、エネルギー推定においては、まれにはあるがエネルギーを間違えて高く推定してしまうことが分かった。このため、バックグラウンドがエネルギーの高いニュートリノ信号領域に入ってしまう。これは期待されるニュートリノ信号が非常に少ない（1事象/年）本解析においては致命的である。エネルギー推定は従来から用いられている全検出器により得られる総光電子数をパラメータとして用いる方が良い結果が得られることが分かった。

更にニュートリノ信号に対する感度を上げるために、バックグラウンドである大気ミュオン束とニュートリノ信号からの単一ミュオンの形状に違いがないかを調べた。もし、違いがあるのならば、その違いを利用して、更にバックグラウンドを除去することができる。

図3に同じ明るさ、同じ方向を持つバックグラウンドのミュオン束と信号の単一ミュオンの各軌跡軸上の場所における光電子数をプロットした。僅かながら、単一ミュオンの方がふらつきが大きい事が見て取れる。

図4にそれぞれの光電子数の平均的な振る舞いからのずれの総和を示した。約半数のニュートリノ信号からの単一ミュオンは明らかにバックグラウンドのミュオン束と分布が違うことが分かる。この違いを利用

することで更なるバックグラウンドと信号の区別を行うことができる。

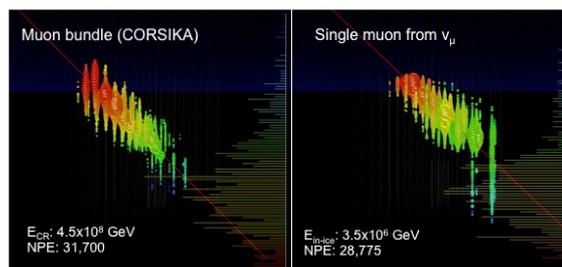


図2：バックグラウンド大気ミュオン束（左）、ニュートリノ信号からの単一ミュオン（右）

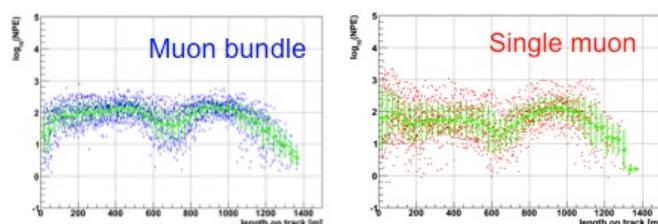


図3：同じ明るさ、同じ方向（垂直方向）を持つ各軌跡軸上の場所に対する観測される光電子数。左：バックグラウンドミュオン束、右：ニュートリノ信号からの単一ミュオン

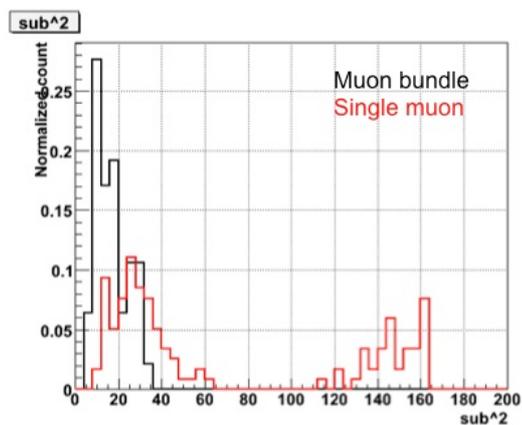


図4：ミュオン束と単一ミュオンの光電子数の平均的な振る舞いからのずれの和。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計5件）

① 間瀬圭一、IceCube 実験 54: 2010年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索 II、日本物理学会、2012年3月

27 日、 関西大学

② 間瀬圭一、 The IceCube experiment and extremely high energy neutrinos、 GCOE 若手分野横断セミナー（招待講演）、 2012 年 3 月 2 日、 名古屋大学

③ 間瀬圭一、 A Search for the Extremely High Energy Cosmogenic Neutrinos with the 90% Complete IceCube Detector、 CA2012、 2012 年 2 月 21 日、 千葉大学

④ 間瀬圭一、 IceCube 実験 53 : 2010 年度データを用いた超高エネルギーニュートリノ探索 I、 日本物理学会、 2011 年 9 月 16 日、 新潟大学

⑤ 間瀬圭一、 New Background Rejection Methods for the GZK Neutrino Search with IceCube、 国際宇宙線会議 2011、 2011 年 8 月 15 日、 Beijing, China

[その他]

ホームページ等

<http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/research/IceCube/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

間瀬 圭一 (MASE KEIICHI)

千葉大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 80400810