

氏 名	宮澤 克英
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記号番号	博理工甲第 826 号
学位授与年月日	平成 23 年 3 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	超高エネルギーニュートリノ起源空気シャワー特性と衛星軌道からの観測可能性
論文審査委員	委員長 教授 井上 直也 委員 教授 鈴木 健 委員 教授 田代 信 委員 准教授 寺田 幸功

論文の内容の要旨

宇宙からは極めて広いエネルギー範囲にわたる宇宙線が到来しており、山梨県明野村・東大宇宙線観測所で行われていた宇宙線広域空気シャワー観測装置 AGASA により、理論予想値を越える 10^{20} eV という非常に高いエネルギーを持つ宇宙線の存在が明らかになった。このような 6×10^{19} eV を越えるエネルギーを持つ宇宙線は、ビッグバンの名残りである 2.7K 宇宙背景放射と相互作用するため、エネルギーを失わずに地球まで到達できる頻度は極めて低いとされている (GZK カットオフ)。それにもかかわらず、AGASA の結果はこの予想の範疇に収まらず、2004 年までの 11 年間に渡る観測において 10^{20} eV を越えるエネルギーを持つ宇宙線を 11 例とらえた。一方で、HiRes 実験や Auger 実験の最新のエネルギースペクトラムの観測結果は理論予想と大きな矛盾が無く、AGASA と相反する結果を示している。このような超高エネルギー (UHE) 宇宙線の化学組成、発生起源、加速メカニズム等は現在もわかっておらず、天体・宇宙物理学上での課題となっており、その研究を通してビッグバン理論や相対性原理の検証といった興味深い知見がもたらされることも期待されている。

また、2007 年に Auger 実験は、UHE 宇宙線の到来方向分布と活動銀河核 (AGN) 分布に相関があると報告した。AGN は以前から UHE 宇宙線起源天体候補として指摘されていたが、初めて実験によって相関が示されたものとして注目されている。UHE 宇宙線起源に関しては、このように AGN などの高エネルギー天体によるボトムアップ過程が考えられているが、一方でモノポールや未知の超重粒子などが崩壊して生成されるトップダウン過程による生成の可能性も残っている。両者の識別は UHE ニュートリノ、ガンマ線量から行うことが可能であると考えられており、ニュートリノの発見は宇宙物理学領域において大きなインパクトを持つ。この観測のためには、従来以上に広大な有効観測領域を持つ次世代観測装置が必要であり、UHE 宇宙線観測を衛星軌道上から行う TUS 実験が計画中である。これはロシアのモスクワ大学が中心に計画している実験で、高度 550km の衛星軌道からレンズ径 1.8m のフレネルレンズ反射望遠鏡で地球大気を見下ろし、Auger 実験の約 6 倍という観測領域により UHE 宇宙線を観測するもので、2011 年 11 月に打ち上げが予定されている。

本論文では、UHE 電子ニュートリノが地球大気中の原子核と相互作用を起こし生成する空気 (電磁カスケード) シャワー現象を再現するシミュレーションプログラムを作成し、そのシャワー特性や TUS 実験の

ような衛星軌道からのニュートリノ観測の可能性について研究を行った。観測対象であるニュートリノ起源空気シャワーは、ニュートリノが相互作用して生成した電子起源のシャワーであり、シミュレーションでは非弾性度として平均値 80%を与えて電磁シャワーを発達させる。この電磁カスケードシャワーは制動輻射と対生成を基礎過程として、 $<10^{16}$ eV 領域においては Bethe-Heitler 微分断面積を用いてシミュレートしている。しかし 10^{19} eV を超える高エネルギー領域では LPM 効果とその電磁シャワー発達中に現れてくる。シミュレーションでは密度が変化する大気中における LPM 効果を含めた空気シャワーを生成し、そのシャワー特性を調べた。その結果、同じ密度中で高エネルギーになるほど、またはエネルギーが同じでも密度が高い大気を通過するほど LPM 効果によって平均シャワー発達が抑制され、長く伸びる傾向が見られ、また個々の事例においてはその発達曲線に複雑な multi-peak 構造が現れることを示した。

一方、ニュートリノはエネルギーが 10^{20} eV で 3.0×10^7 g/cm² 程度の平均相互作用長を持つため、大気入射後の大気原子核との相互作用点は大気中の幅広い場所で相互作用する。また、TUS 実験における視野内での相互作用確率を求めたところ、 10^{20} eV については 0.0030%を得た。

TUS 実験におけるニュートリノシャワーの観測期待値を評価するため、UHE ニュートリノのベキ型エネルギースペクトルとしてベキ値、ニュートリノ強度を変えた3種類のスペクトルを仮定した。そのエネルギースペクトルに従うエネルギー分布を持つニュートリノ事例を生成し、TUS 実験の視野領域に入射するニュートリノの年間総数を求め（観測効率 20%と仮定）、視野内におけるニュートリノシャワー生成数を評価した。陽子シャワー事例とニュートリノシャワー事例との識別のため、相互作用点とシャワー最大発達深さ (Xmax) の両方が視野内にあり、かつ Xmax が 1400 g/cm² 以上である事例を観測可能事例とし、検出器のトリガー効率を仮定して観測期待値を求めた。その結果、 $10^{19.9}$ eV 以上のエネルギーのニュートリノについて5年間における観測での期待値として $7.0 \times 10^{-3} - 2.8 \times 10^{-2}$ 事例を得た。

TUS 実験における観測期待数は、用いたエネルギースペクトルの元で十分ではないが、より大きなエネルギースペクトル強度の可能性を否定してはならず、実験開始後のニュートリノ事例の探索研究の中からシャワー profile 特性を用いた信頼度の高い超高エネルギーニュートリノ事例の検出に期待している。

論文の審査結果の要旨

本論文では 10^{19} eV を超えるエネルギー領域での超高エネルギー宇宙ニュートリノが引き起こす、大気空気シャワーを再現するシミュレーションコードの作成とその解析結果、くわえて衛星軌道上からの宇宙線実験によるニュートリノシャワーの観測可能性について纏めている。

超高エネルギー宇宙線（一般には陽子を含む原子核組成）の起源と加速メカニズムについては未だ多くの謎が含まれており、多様な理論予測の中で、宇宙線粒子化学組成を含め実験的な解明が求められている。パイオニア的な実験は 2004 年まで 11 年間稼働した超高エネルギー宇宙線実験（AGASA）であり、 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つ事例を 11 例観測し、これは理論予測として確立している GZK cutoff（超高エネルギー陽子と宇宙背景輻射光子との相互作用により 5×10^{19} eV にてエネルギースペクトラムに遮断が生じる）と矛盾した観測結果を得た。近年、南アメリカでの AUGER 実験、米国ユタ州でのテレスコープアレイ実験が従来の観測能力を超える規模と精度で観測を始めており、この GZK cutoff については肯定的な結果が出てきている。いまだ、限定的な事例統計量での評価ではあるが、超高エネルギー宇宙線到来方向分布の結果と合わせて、加速天体候補、高エネルギー粒子相互作用、宇宙線化学組成などに関連した新たな知見が得られてきており、注目を浴びてきている。特に AUGER 実験で指摘された、超高エネルギー宇宙線起源天体候補としての CEN-A 活動銀河核は、そこでの荷電粒子加速に伴い、ガンマ線、ニュートリノ生成が起こっていることを予測させる点で重要である。このような起源天体での宇宙線粒子加速は磁場を含むショック波により、段階的に加速されるボトムアップ過程と考えられているが、一方で、モノポールや未知の超重粒子などの崩壊による加速メカニズムであるトップダウン過程も指摘されている。この場合、多量のニュートリノの生成が予測され、加速メカニズムの解明のためにもこのようなニュートリノ、ガンマ線を含めた宇宙線化学組成の実験的検証が求められている。これらの背景の元、さらに大きな統計量を実現する観測計画として衛星軌道から地球大気を眺め、宇宙線空気シャワー粒子から発せられる大気蛍光を観測する JEM-EUSO 実験、TUS 実験が計画されている。これはニュートリノ観測においてはその相互作用断面積の小ささを補う、大きな観測視野領域、巨大な target mass を確保できる観測として重要である。

このような背景のもと、本研究の主題であるニュートリノ起源シャワーの生成と観測可能性について、その内容は以下のように 3 つにとりまとめることができる。

(1) ニュートリノ-大気原子核相互作用

ニュートリノと大気原子核との相互作用断面積（エネルギー依存）を仮定し、大気入射後の相互作用するまでの大気 slant depth (g/cm^2) を個々の事例ごとに計算し、大気内での相互作用事例についてその slant depth 分布を求めた。その分布はほぼ一様であり、このことは陽子起源シャワーの場合、ほぼ大気入射後 $500 \text{g}/\text{cm}^2$ までで第一相互作用は完了することから、ニュートリノ事例の陽子シャワー事例からの識別において、シャワー発達最大深さ X_{max} (g/cm^2) を用いることが有効であることを確認した。また、衛星軌道からの JEM-EUSO 実験、TUS 実験の観測高度、受光面積、視野面積、空間・時間分解度などをシミュレーションに組み込み、それらの観測視野のなかでニュートリノシャワーが生成する確率を評価した。シャワー事例としてその視野内で X_{max} を含むシャワー発達を観測可能条件として、シャワー生成確率を求め、 10^{20} eV ニュートリノの場合、JEM-EUSO と TUS 実験の場合でそれぞれ、0.006% と 0.0012% であることを示した。加えて、その相互作用大気深さ (g/cm^2) と天頂角との関係では、60 度を超える大天頂角ではニュートリノが通過する大気コラム密度が大きくなることから相互作用確率が増大し、逆に垂直方向入射の事例では十分な大気厚さが確保できずに、ニュートリノシャワー生成が視野内でできないことを定量的にあきらかにした。

さらに、90度を超える水平方向入射事例については、地球外殻をかすめて地表に飛び出した後に大気で相互作用する skimming 事例の存在割合を得ることができた。

(2) ニュートリノ起源空気シャワー生成

大気中でニュートリノが大気原子核と相互作用を起こすと、電子とその他の二次粒子が生成する。この電子は相互作用エネルギーの約80%を得、大気中で電磁カスケードシャワーを形成する。本研究では、各ニュートリノ事例において、その電子に渡るエネルギー分配率を与え、電磁シャワーを生成する。この電磁カスケード過程は、一般に低エネルギー領域では2つの主要な相互作用である制動輻射と電子対生成について、Bethe-Heitler 微分断面積を用いてシミュレーションにより生成する。 10^{19} eV を超える高エネルギーにおいては、くわえてLPM効果を組み込む必要があり、本研究ではその結果生じる電磁シャワーの特性を評価している。LPM効果は物質密度と相互作用エネルギーに依存してその効果が現れる。薄い大気中(大気トップから 1g/cm^2)でのLPM効果は 10^{21} eVの電磁シャワーあってもほとんどその寄与が見えないが、大気低層($800\text{-}1000\text{g/cm}^2$)では 10^{20} eVを超える相互作用エネルギーからその効果は顕著になり、電磁シャワー profile において平均的にはその発達が抑制され、長く伸びる傾向を持つようになる。また、個々の事例についてはLPM効果はそのシャワー profile の多様性に現れ、multi-peak を有する、陽子シャワーではあり得ない構造を普通に見ることができることをシミュレーション結果から確認した。この特徴は超高エネルギーニュートリノシャワー識別における、シャワー profile 上での重要な特徴であることを明らかにしたもので意義深い。

(3) 衛星軌道上からの宇宙線実験における観測可能性

本研究では、超高エネルギーニュートリノのエネルギースペクトラムをGZK過程を元としたモデルとして仮定した。べき関数で表されるスペクトラムについてそのべき値、ニュートリノ強度を3種類仮定し、そのスペクトラムに従ったエネルギー分布を持つニュートリノ事例ライブラリーを作成した。それに基づきTUS実験の視野領域を考慮してその中に入射するニュートリノの年間総数を求め(観測効率を20%と仮定)、視野内でのニュートリノシャワー生成数を評価した。ニュートリノシャワー事例の陽子シャワーとの識別のため X_{max} が視野内にある事例を観測可能事例とし、かつ観測装置のシャワーエネルギーに対する事例トリガー効率を仮定して、実観測期間5年のなかで測定が期待されるニュートリノ事例数($>10^{19.9}$ eV)として $7.0 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-2}$ を得た。

以上の研究は2011年11月打ち上げ予定の衛星軌道からの超高エネルギー宇宙線TUS実験を前提とした、シミュレーションによる宇宙線ニュートリノシャワー研究であり、世界初の超高エネルギーニュートリノ観測を目的として、ニュートリノシャワー profile 特性と候補事例識別方法、期待される事例数評価までをカバーするものである。本研究によるTUS実験での期待事例数予測からはその観測可能性はきびしいが、用いたニュートリノエネルギースペクトラムは作業仮説であり、まだ未発見のニュートリノ事例は、より大きなエネルギースペクトラム強度の可能性が否定されているものでなく、その実験開始後も常にニュートリノ候補事例の探索が求められる。その点からも本研究で行った、ニュートリノシャワー特性研究と観測可能性評価は、実験に先行して得た多くの知見として意義深いものといえる。

この研究にかかわる成果は、査読付き論文2編(学術雑誌 1編、学術雑誌(Proceedings) 1編)にまとめられており、加えて研究分野に関連した学術論文3編が発表済みである。

よって本審査委員会は本論文が博士(理学)の学位論文として十分価値あるものであると認め、合格と判定した。