

氏名	和田 吉満
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 666 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 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	超高エネルギー宇宙線観測のためのシミュレーション開発と JEM-EUSO 望遠鏡の性能評価
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 委員 教授 谷井 義彰

論文の内容の要旨

山梨県明野村で 2004 年まで 11 年間稼動した超高エネルギー（UHE）宇宙線観測装置 AGASA は、 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線を 11 例観測した。これは理論により予測されていた統計量を 4σ 上回る数であり、従来の宇宙物理学の枠組の拡張を迫る結果として注目を浴びた。近年、AGASA の後継観測装置である HiRes や Auger の観測結果が発表されてきているが、そのエネルギースペクトラムは理論予想と大きな矛盾なく、AGASA の結果と食い違いを示している。また、Auger は 2007 年に UHE 宇宙線の到来方向分布と活動銀河核（AGN）との強い相関を指摘している。一方で、UHE 宇宙線の起源に関しては、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シナリオと、AGN などの天体によるショック加速シナリオが考えられてきた。Auger の報告によりショック加速の可能性が高まったが、両者の識別は UHE ガンマ線量から行うことも重要であり、加速シナリオで考えられる UHE ガンマ線量と矛盾がないことを実験的に検証する必要がある。一方で、UHE 宇宙線を用いた荷電粒子天文学として発展するためには多くの統計量が必要であるということも同時に指摘されており、より大きな有効観測露出を持つ次世代観測装置が求められてきている。

JEM-EUSO 計画はそのような次世代観測計画のうちの一つで口径 2.5m の望遠鏡により衛星軌道から地球大気を見下ろし、UHE 宇宙線を観測するものであり、2007 年 5 月には国際宇宙ステーションに搭載される候補ミッションの一つに選定された。Auger の 50 倍以上という巨大な観測面積により、従来の観測装置に比べ圧倒的に大きな統計量で UHE 宇宙線観測が行える。さらに傾斜モード観測の採用により観測事例数は数倍に増える。それにより荷電粒子天文学として発展することを目指すものである。

本論文では超高エネルギー宇宙線が地球大気と相互作用を起こし生成する空気シャワー現象を再現するシミュレーターを作成し、成層圏空気シャワー特性についての研究、UHE 宇宙ガンマ線起源シャワーの世界初の検出に向けた検出可能性評価、次世代観測装置である JEM-EUSO 望遠鏡の性能評価を行った。成層

圏内で最大発達を迎える成層圏シャワーは、大気物質密度の小さな領域において長距離に渡って発達するシャワーとなり、また大気中での大気蛍光生成率が荷電粒子単位飛距離に対して一定であることにより、同じエネルギーを持つシャワー事例でも高度 0km を水平に通過する事例に比べて 20km の事例は 19 倍もの光子生成が発達過程において起きることを明らかにした。成層圏シャワーは JEM-EUSO のような広視野を持つ実験装置が観測に適しており、70 度の天頂角を持つ成層圏シャワーは 45 度の事例と比較して観測エネルギー閾値 (50%効率) を 35%程度下 ($1.12 \times 10^{19} \text{eV}$) にのばせることを見積もった。

一方、UHE ガンマ線成分においては LPM 効果と地球磁場との相互作用による物理的過程が働くため、シャワー発達曲線において通常の陽子起源シャワーとの差異は顕著となり、特にシャワー最大発達深さ (X_{max}) 平均値が 120g/cm^2 以上の差異が現れるとともに、シャワー横方向分布はより steep な傾きを持つようになる。ニューラルネットワークを用いて陽子成分とガンマ線成分との分離を行い、ガンマ線候補事例の誤判定確率として天頂角 45 度、エネルギー $10^{19.5} \text{eV}$ 以上で 5%以下を得て、ガンマ線含有量が全体 (1000 観測事例を仮定) の 10%を仮定した場合、 $10^{19.5} \text{eV}$ でガンマ線検出信頼度は 8σ レベルに達することを明らかにした。

また、ここで作成したシミュレーションコードと JEM-EUSO 望遠鏡の光学系・焦点面シミュレーションとを用いて、JEM-EUSO 望遠鏡の性能評価を行った。トラックトリガーアルゴリズムを用いることにより、鉛直モード、傾斜モード時それぞれの期待される観測事例数評価を行い、 $7 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上のエネルギーを持つ宇宙線事例を 1,000 個以上観測するという JEM-EUSO の観測目標は鉛直モード 2 年 + 傾斜モード 3 年の観測で達成可能であり、Auger の示した荷電粒子天文学へ発展することが出来るということを示した。また、焦点面検出器による光電子数データより一次宇宙線を再構成するアルゴリズムを開発し、それらを用いて JEM-EUSO 望遠鏡の観測性能評価を行い、一次宇宙線のエネルギー、到来方向、 X_{max} の各観測量の決定精度を評価し、到来方向決定精度については荷電粒子天文学を行うために要求されている 2.5 度を下回り、 10^{20}eV の事例において、天頂角 45 度、60 度の場合にそれぞれ 1.8 度、1.1 度という精度を持ち、エネルギー決定精度は 25%以下であることを明らかにした。また、JEM-EUSO を用いて陽子成分とガンマ線成分を識別するには 120g/cm^2 程度の X_{max} 決定精度を持つ必要があるが、 10^{20}eV で天頂角 45 度、60 度の場合にそれぞれ 110g/cm^2 、 130g/cm^2 という値を得た。

論文の審査結果の要旨

本論文は 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線が引き起こす、大気空気シャワー生成シミュレーションコードの作成とその実行を通して、実施・計画段階にあるテレスコープアレイ (TA) 実験、JEM-EUSO 実験と連動した解析により、成層圏水平空気シャワー、宇宙ガンマ線の検出可能性、JEM-EUSO 実験における望遠鏡性能評価に関わる研究成果を纏めたものである。

超高エネルギー宇宙線の起源と加速メカニズム、その化学組成については未だ謎であり、多様な理論予測の元、その解明が求められている。2004 年まで 11 年間稼働した超高エネルギー宇宙線実験 (AGASA) では、 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線を 11 例観測し、これは理論予測としての GZK-cut-off と矛盾した観測事例数として、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を導く成果として注目を浴びた。最近の研究結果では特に、超高エネルギー宇宙線の到来方向分布と活動銀河核 (AGN) との相関が指摘されており、宇宙線起源天体としてそこでの陽子加速とともにガンマ線・ニュートリノ生成についての可能性が指摘されている。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モデルでも、多量のガンマ線生成が予測され、加速メカニズムの解明のためにも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、高精度・統計量観測の実施と計画が図られてきており、現在までに地上観測として HiRes 実験、TA 実験、AUGER 実験が実験を開始し、また、衛星軌道からの宇宙線観測として JEM-EUSO 実験が計画されている。

本研究では、まず超高エネルギー宇宙線空気シャワー生成コードの作成を、

- エネルギー領域： 10^{19} eV ～ 10^{21} eV
- 化学組成：陽子から鉄・各種、ガンマ線
- 到来方向：天頂角 0-90 度、全方位角

の仮定のもとで行い、そのシャワーを構成する数十億個にも及ぶ荷電粒子成分の縦方向・横方向発達構造を与える構造関数を個々のシャワーについて決定し、宇宙線シャワーデータベースの作成を行った。その過程では原子核シャワーについては汎用ライブラリー AIRES と独自のコードを併用し、また、ガンマ線シャワー生成については、ブルガリア原子核・原子エネルギー研究所研究者との共同研究として、その開発を行い、オリジナルコードを完成し、ガンマ線事例データベース作成を行った。

論文ではこのシャワー生成データベースを用いて、まず成層圏水平シャワー特性についての研究を扱っている。シャワー荷電粒子からは大気蛍光成分が等方的に放射され、それを実験観測量としてきている。その大気中での生成率が荷電粒子単位飛距離に対してほぼ一定であり、かつその生成率が大気高度 (大気密度) に強く依らない点に着目し、特に成層圏で発達する大天頂角シャワー事例においては大気密度の小さい領域を長い実距離にわたり荷電粒子が移動することから、同じエネルギーを持つシャワー事例でも高度 0km を通過する事例に比べて 10km、20km を通過する事例についてはそれぞれ 5 倍、19 倍の光子生成が発達過程で起こる事を明らかにした。さらにこの光子数を JEM-EUSO 望遠鏡への入射光量として再評価し、同実験において、天頂角 70 度のシャワー観測により、その望遠鏡観測エネルギー敷居値 (50%効率) を 45 度の場合と比べて 0.35 倍のエネルギー値 (1.12×10^{19} eV) にまで下げられることを指摘した。

次に論文では超高エネルギーガンマ線起源シャワーの検出可能性について、そのシャワー構造特性評価を用いた議論を行っている。超高エネルギーガンマ線シャワーはそのシャワー発達において通常の陽子起源シャワーとの差異が顕著であり、 10^{19} eV においてはシャワー最大発達深さ (X_{max}) に $100\text{g}/\text{cm}^2$ 程度の差が現れるとともに、シャワー横方向分布 (その傾きを表すべき値 η) はより steep になる傾向がある。ガン

マ線によるシャワー生成コードは、LPM 効果と地磁気による大気圏外カスケード効果を含んでおり、その結果、 $3 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上では LPM 効果が効き始め、 X_{max} の差を更に強調する。一方で地磁気効果は同じく 10^{19}eV 中頃から逆にその差をうち消す方向に働くことから、陽子シャワーとのシャワー構造差異はガンマ線エネルギーと到来方向に関連して複雑な変化を持つ。本研究では従来の X_{max} 、 η による陽子／ガンマ線成分の識別を更に発展させ、ニューラルネット解析法を用いて、シャワー構造パラメーターに加えて、エネルギー、到来方向データも入力値に組み込み、多変量解析により個別事例についてガンマ線と陽子との判別を行なった。この結果、陽子シャワーがガンマ線候補シャワーとして誤判定される割合は天頂角 45 度、エネルギー $10^{19.5} \text{eV}$ 以上で 5% 以下であり、ガンマ線含有量が全体 (1000 観測事例を仮定) の 10% を仮定した場合、 $10^{19.5} \text{eV}$ でガンマ線検出信頼度は 8σ レベルに達することを示した。また、地磁気効果の影響に比べて LPM 効果が強い南方向からのガンマ線事例については、特に大きな X_{max} 値として観測される可能性があり、個別事例としてのガンマ線候補判定の標準的な解析法としての意義は大きい。

最後に論文ではこのシャワー生成コードを元に、更に JEM-EUSO 望遠鏡ハードウェア特性をコード化し、それを組み合わせて、疑似シャワー事例について実験測定値をもとめ、その出力値からシャワー事例再構成を行い、望遠鏡総体としての宇宙線エネルギー、 X_{max} 、到来方向決定精度を評価している。研究は理化学研究所計算宇宙物理研究室との連携の元 (望遠鏡光学系、焦点面検出器部分担当)、実施し、望遠鏡ハードウェアコードと事例再構成プログラムコードの作成を行った。JEM-EUSO 実験は国際宇宙ステーションに設置した口径 2.5m の望遠鏡により地球大気中のシャワー発達に伴う大気蛍光成分を測定し (鉛直方向観測、傾斜方向観測)、現存する最大の宇宙線観測装置 (Auger) の 50 倍に及ぶ観測面積を有し、高統計量のもと超高エネルギー粒子天文学を拓くことを目的としている。本研究では事例選別にトラクトリガーアルゴリズムを採用し、鉛直モード、傾斜モード時にて、観測下限エネルギー (50% 検出率) として $10^{19.7} \text{eV}$ 、 $10^{20.3} \text{eV}$ を得ている。また、期待される観測事例数の評価を行い、 $7 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上の宇宙線事例数としてそれぞれ 360、610 個 (年間) を得た。また、鉛直モード 2 年 + 傾斜モード 3 年の観測から 10^{20}eV 以上の事例が 600 例観測可能であることを示し、実験要求値を満たしていることを明らかにした。また、事例再構成解析を行い、 10^{20}eV 宇宙線について一次宇宙線到来方向決定精度として、天頂角 45、60 度でそれぞれ 1.8、1.1 度を、また、 X_{max} 決定精度として 110、130 gcm^{-2} 、エネルギー決定精度 <25% を得た。いずれも実験計画現時点でのハードウェア構成でのパフォーマンス値として要求値内にあることを明らかにし、更に今後の性能向上への指針を与えるツールとしてこのシミュレーションコードの開発意義は大きい。

以上の研究は現在進行中の超高エネルギー宇宙線実験計画と連携した、シミュレーションによる宇宙線シャワー構造に関わる研究であり、世界初の超高エネルギーガンマ線観測を目的とした検出可能性と候補事例評価方法の検討は TA 実験、JEM-EUSO 実験を始め、多くの先行実験に対する寄与は大きい。また、JEM-EUSO 実験計画にかかわる END-to-END シミュレーション研究は科学目的達成に向けての精度評価、また望遠鏡ハードウェアのパフォーマンス向上に向けての R&D に対する大きな貢献として評価できる。

この研究に密接に関連した成果は査読付き論文 3 編 (英文学術雑誌 Proceedings、うち概要査読のみ 1 編) にまとめられており、加えて研究分野に関連した英文学術論文 1 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。