

令和元年6月21日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05108

研究課題名（和文）水チェレンコフ光検出器を用いた空気シャワー観測装置性能向上手法の研究

研究課題名（英文）Study of Performance Improvement for Air Shower Array with Surface Water Cherenkov Detectors

研究代表者

塩見 昌司（SHIOMI, Atsushi）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：60401288

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：401台のシンチレーション検出器からなる空気シャワー観測装置（AS）に、36台の直径8mの円柱型地表水チェレンコフ光検出器群（WCDs）を連動させた場合の高エネルギーガンマ線に対する観測性能を、フルモンテカルロシミュレーションにより見積もった。結果、到来方向決定精度はAS単独の時と比べ、10 TeVガンマ線においては約1.6倍向上することがわかった。

又、実証実験として直径3mのプロトタイプ水槽を大学内に設置し、水漏れ・光漏れの無い事を確認した。これにより価格・問題点が理解できた。直径8mのWCDにPMT13本設置した場合、WCD36台で4億円以下で作成可能であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シンチレーション検出器を用いた空気シャワー観測装置は、ミュオン検出器の付加により人類に100TeV領域ガンマ線の扉を開いた。昼夜問わず広視野で常時ガンマ線を観測可能でそのエネルギースペクトルを系統誤差少なく観測できる装置であるが、課題として広がったガンマ線天体の詳細な構造情報を得るための到来方向決定精度の向上があった。

単純に装置の稠密化や規模拡張で向上が可能であるが、他の方法として地表水チェレンコフ光検出器との連動が考えられ、それぞれの利点を活かしつつ角度決定精度が向上することが示せた。水チェレンコフ光検出器の優位性を示すには更なる改良と現地実証実験が必要である。

研究成果の概要（英文）：The observation performance for high energy gamma rays was estimated by full Monte Carlo simulation for when an 8-meter diameter cylindrical surface water Cherenkov detectors (WCDs) are used with an extended air shower (AS) array consisting of 401 scintillation detectors. As a result, it was understood that the determination accuracy of arrival direction is improved about 1.6 times for 10 TeV gamma rays as compared with using AS alone.

In addition, a prototype water tank with 3-meter diameter was installed at an university as a demonstration experiment, and it was confirmed that there was no water or light leakage. This helped us understand cost and problems for this experiment; we found that when 13 PMTs were placed in a WCD of 8-meter diameter, 36 WCDs could be constructed for less than 400 million yen.

研究分野：宇宙線

キーワード：高エネルギーガンマ線 水チェレンコフ光検出器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

$10^8 \sim 10^{20}$ eV と何桁にもわたり冪状のエネルギースペクトルを持つ宇宙線（原子核宇宙線）は、Knee と呼ばれる $10^{15} \sim 10^{16}$ eV の領域において冪指数が -2.7 から -3.1 へと折れ曲がるという特徴を持っている。宇宙線の起源・加速機構としては、Knee 領域以上は銀河系外、以下（銀河宇宙線）は銀河系内の超新星残骸由来の宇宙線の加速限界と化学組成（軽核から重核）の変化に起因すると考えられているが、未だその確たる証拠は得られていない。この特徴に関わっている knee 領域以下の宇宙線（銀河宇宙線）は、宇宙線の起源に関する重要な情報を持っていると考えられるが、電荷を持つため銀河磁場によって曲げられ、到来方向の情報を失い、地球にはほぼ一様に降り注ぐ。このため、地球で観測された knee 領域宇宙線の到来方向がすなわち加速現場方向を示すことにはならない。そこで、銀河宇宙線の起源・加速機構の解明のために、銀河宇宙線が加速現場付近で星間物質と相互作用し生まれる π^0 中間子起源の高エネルギーガンマ線の探索が複数のグループによってなされている。特に knee 領域の宇宙線が親となっている高エネルギーガンマ線は、 100TeV ($1\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$) 以上に達すると考えられ、その領域の高エネルギー宇宙線を観測できれば、宇宙線の起源に迫れることになる。しかしながら、 100TeV を超える高エネルギー宇宙線の観測例はまだ無い。

TeV ガンマ線天体は、主に地上の解像型空気チェレンコフ望遠鏡を用いた観測により、約 200 個ほど発見されるまでになり、又、大型化・高解像度化等により、宇宙線の到来方向決定精度（角度分解能）は 0.1 度を切るようになってきた。電波から可視光、X線、ガンマ線、TeV ガンマ線と、多波長観測によるエネルギースペクトルの結果だけではなく、その空間分布、星間ガスとの関連も議論できるようになってきた。しかしながら、観測されたスペクトルのほとんどが、高エネルギー電子が周辺光子を逆コンプトン散乱させて作られる高エネルギーガンマ線として説明でき、knee 領域宇宙線の起源のガンマ線の証拠となるまでには至っていない。高エネルギー電子は周辺の磁場や光子によりエネルギーを失うこともあり、結果として 100TeV を超える高エネルギーガンマ線を作り出すことが難しい。そのため、宇宙線の加速機構を判定する上で 100TeV 領域ガンマ線の観測は重要であるとして、いくつかの観測プロジェクトが計画されている。

チベット空気シャワー観測装置は、標高 $4,300\text{m}$ の羊八井高原に約 800 台のシンチレーション検出器を 7.5m 間隔の碁盤目状に配置した有効面積約 $40,000\text{m}^2$ の、このタイプでは唯一 TeV のガンマ線を検出している空気シャワー観測装置 (AS) である。昼夜天候に左右されず常時広視野で観測できる空気シャワー観測装置は、低頻度な 100TeV 領域の宇宙線の観測に適していると考えられる。 100TeV の宇宙線に対してはエネルギー分解能 $7\sim 150\text{TeV}$ 、角度分解能 0.2 度の性能を有する。この装置の内側に土洩 2m 、水深 1.5m の水チェレンコフ光観測型ミューオン検出器群を有効面積 $3,200\text{m}^2$ 新たに建設し、両装置を連動させる計画が進んでいた。ミューオン検出器群の設置により得られる空気シャワー中ミューオン数情報により、本装置は高エネルギーガンマ線観測のノイズとなる原子核宇宙線を 99% 以上除去可能となり、数 10TeV 領域以上のガンマ線感度が 1 桁以上向上する。これにより人類は、未知の数 100TeV ガンマ線の観測窓を手に入れられ、宇宙線の起源・加速機構の謎に迫れるであろう。

天体からの 100TeV ガンマ線が観測可能となれば、次に重要となるのはそのガンマ線の詳細なエネルギースペクトルの観測であるが、特に広がった天体においてはその空間分布情報とその局地的エネルギースペクトルの観測ができれば、そのガンマ線の起源・加速機構の解明の鍵となりうる。 100TeV 領域ガンマ線の観測に最適な装置の一つといえるシンチレーション検出器を用いた空気シャワー観測装置実験の角度分解能の向上が望まれるところである。

2. 研究の目的

空気シャワー観測装置は低頻度な 100TeV 領域ガンマ線の観測に適していると考えられが、角度分解能に関しては解像型空気チェレンコフ望遠鏡に比べ低く、到来方向を決めている空気シャワー観測装置の検出面積率を増やす等しない限り向上は期待できない。空気シャワー観測装置による実験の更なる飛躍のためには角度分解能を向上させることである。

角度分解能を倍向上させるためには単純には現行装置密度を 4 倍にすれば 2 倍の向上が期待できるが、それには膨大な費用がかかる。そこで新たなアイデアによる、より安価な装置の可能性を探るのが本研究の目的である。具体的な手法として地表上に水チェレンコフ光検出器(WCD)を空気シャワー観測装置の内外に置く方法を検討した。

3. 研究の方法

(1) 理想的な地表 2 次粒子観測装置として、シンチレーション検出器が 100%の検出面積率で敷き詰められていた場合、どこまで角度分解能が向上可能かをフルモンテカルロシミュレーションにより調べた。空気シャワー生成シミュレーションコードとして CORSIKA を用い、検出器シミュレーションはチベット実験で使用していたコードを用い、見込まれる角度分解能の限界値を求めた。

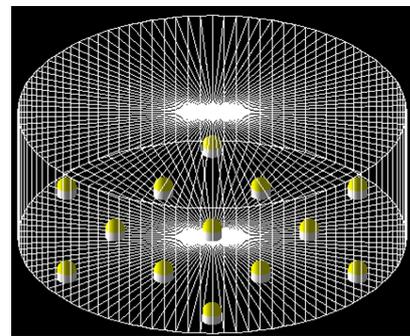


図 1. WCD 形状と PMT 配置

(2) WCD の駆体としてどのような形状・材質が良いか再検討した。

(3) (2) を踏まえつつ、WCD の形状として空気シャワー観測装置内に設置可能な直径 8m の円筒型水槽(図 1)と仮定し、GEANT4 コードを用い、深さを可変にした検出器シミュレーションを作成した。光検出素子としては、安価で扱いやすい 8 インチ光電子増倍管(PMT)と仮定した。CORSIKA を用い、入射空気シャワーに対する PMT の応答を調べ、水深と光量の関係を調べた。

(4) 南天には銀河中心があり、多くの TeV ガンマ線天体が存在しているため、100TeV ガンマ線候補天体も多い。そこで、南米ボリビアの標高 4750m の高地で計画されている空気シャワー観測装置を主装置とする ALPACA 実験に、WCD 群を設置した場合の装置性能を評価することにした。まず空気シャワー観測装置の性能を評価した。その後、空気シャワー観測装置で用いた解析コード内のパラメーターを、WCD 用に変更し、WCD 群でも到来方向が決定可能かどうかを確かめた。初期調査として WCD 群を碁盤目状に 45m 間隔で 36 台設置した場合について調査した(図 2)。内部に設置する光電子増倍管の本数は確認用に 13 本とし、CORSIKA で生成した空気シャワーイベントを用い、性能評価をした。

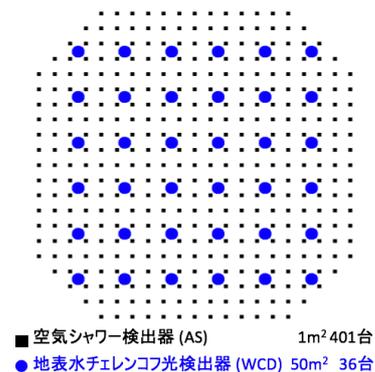


図 2. AS と WCD の配置

(5) 日本大学校内に小規模の地表水チェレンコフ光検出器を作成し、水漏れ・光漏れなく作成可能か、装置価格がいくらになるかの実証実験をした。別途直径 1.0m 高さ 0.6m の水タンクで PMT の出力信号の確認をした。

4. 研究成果

(1) 理想的な地表 2 次粒子観測装置として、実際の装置特性を入れた 1 m^2 シンチレーション検出器が 100%の検出面積率で敷き詰められている場合をフルモンテカルロシミュレーションした結果、使用したアルゴリズムでは角度分解能は、次世代解像型空気チェレンコフ望遠鏡の CTA のシミュレーションの精度限界と同様の 0.03 度まで達することが分かった。莫大な金額になるが、現在の技術の拡張で 0.03 度の角度分解能の装置が作りうるということが分かった。

(2) WCD の駆体として凍結の可能性を意識し、土中に穴を掘りコンクリートで基礎を作る形状を検討していたが、作業効率や価格を優先し、一般的なコルゲート水槽に PVC の防水シートを覆うタイプに変更した。凍結予防に関しては将来現地で同型装置による実証実験で対応を検討することとした。

(3) WCD シミュレーションにより入射空気シャワーに対する PMT の光量と水深の関係を調べたところ、水深 1.9m (光電面から 1.6m) の時が最も光量が多くなった。この高さを仮の基準とし、以後シミュレーションを行うこととした。他に PMT 本数とトリガー頻度の関係を得た (学会発表②、雑誌論文①)。

(4) ALPACA 実験相当の空気シャワー観測装置用と WCD 群用に作成した解析プログラムによりガンマ線到来方向がそれぞれ決定でき、各装置の角度分解能を確認できた。WCD 群では空気シャワーのフロントの解析に使用する関数が、空気シャワー観測装置で使用していた 1 次方程式では無く 2 次方程式に変更すると角度分解能が良くなるということが分かった (図 3)。

観測装置中心から半径 200m 以内に降らした -2 の冪状スペクトルのガンマ線 (入射一次エネルギー $1 \sim 500 \text{ TeV}$) に対し、空気シャワー観測装置と WCD 群が求めた到来方向を用い角度分解能を求めた所、空気シャワー観測装置単独で求めた場合と比べ、1.6 倍ほど角度分解能が向上することが分かった (図 4) (学会発表①)。中心付近に入射したと判定された空気シャワーイベントに対してはその比が 2.0 倍近くに向上することから、外回りにも WCD を置けば、2.0 倍の向上が見込めると予想する。

(5) 実際に校内に直径 3m、高さ 2.5m のコルゲート水槽を設置した (図 5)。水槽は 1 日で製作可能であり、コルゲート水槽内の防水シートの水バグは水漏れ、光漏れ無く、チェレンコフ光を検出し、装置として使用可能であることが確認できた。また、(4) にて仮定した 36 台の WCD 群の装置は 4 億円以下で作成可能であることがわかった。チェレンコフ光による PMT 信号のチェックによりシミュレーションに用いるパラメータの確認ができた。

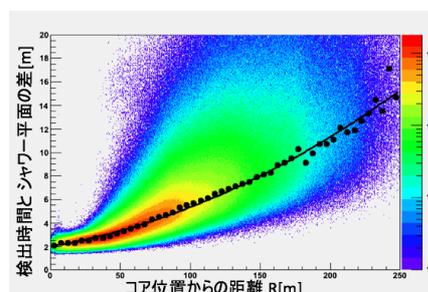


図 3. 二次粒子検出時間分布

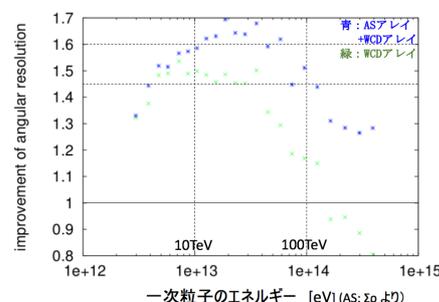


図 4. ガンマ線入射天頂角 15 度における角度分解能向上割合



図 5. $\phi 3 \text{ m}$ 水槽と入口 ($\phi 0.8 \text{ m}$)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① A. Shiomi, K. Hibino, T. K. Sako, T. Asaba, Y. Katayose and M. Ohnishi, Study of Performance Improvement for Air Shower Array with Surface Water Cherenkov Detectors, 35th International Cosmic Ray Conference (Busan, Korea 2017), 査読無、PoS(ICRC2017)380. 2017

[学会発表] (計 2 件)

① 塩見昌司、浅羽孝典、他、水チェレンコフ光検出器を用いた空気シャワー観測装置性能向上手法の研究 2 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019)

② 浅羽孝典、塩見昌司、他、水チェレンコフ光検出器を用いた空気シャワー観測装置性能向上手法の研究、日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。