

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)

大学院学生研究

2016年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学	研究科	物理学	専攻
研究代表者 (2017年3月現在のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程2年		岩崎 啓克 印		
指導教員	所属・職名		氏名		
	理学部・物理学科・教授		内山泰伸 印		
自然・人文・社会の別	自然・人文・社会		個人・共同の別	個人・共同 3名	
研究課題	宇宙線ミュオン線のチェレンコフ放射を利用した火山内部の透視技術の開発				
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2017年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程2年		岩崎 啓克		
	共同研究者 理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程1年		勝又 慎介		
	理学研究科・物理学専攻 博士課程前期課程1年		内田 伸		
研究期間	2016年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 499,690円 / (採択金額) 500,000円				

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

火山内部の新たな透視技術として、ミュオングラフィと呼ばれる手法の研究が近年進められている。大気上空のあらゆる方向から降り注いでくる宇宙線ミュオンのうち、火山を透過してきたものを検出し、火山内部の密度分布を測定する。

新たなミュオングラフィ検出器として、アクリル中でのチェレンコフ放射を検出するミュオン検出器の開発を行ってきた。アクリル壁面での光子分布をシミュレーションし、その解析手法を開発した。それにより光子分布からミュオンの入射方向を推定可能であると確認できた。また加えて、撮像検出とは別に、細長い柱状のアクリルを用いて一方向からのミュオンを高い角度分解能で検出する手法を新たに開発した。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

{ ミュオングラフィ } { 宇宙線ミュオン } { チェレンコフ光 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)**本研究の意義と目的**

日本には 110 もの活火山が全国に分布しており、人の居住圏や観光地の近くにあるものも多く、人の生活から切り離すことはできない。そのため、噴火などの火山現象は人の生命や生活に大きな影響を及ぼしうる。噴火予報など災害軽減のためには噴火メカニズムの理解が不可欠である。しかし、噴火と関わりが深いと考えられている、地下のマグマだまりから火口までをつなぐ火道内部のマグマを精度よく観測する方法がこれまではなかった。そこで、物質を透過した宇宙線ミュオンを捉えて内部構造を透視するミュオグラフィと呼ばれる技術を発展させ、2001 年には浅間山で世界初の火山のミュオグラフィ画像が観測された (Tanaka et al. 2001)。それ以降 10m 以下という火山分野ではこれまでにない空間分解能で複数の火山の内部構造やその変化が捉えられた。ミュオグラフィは、火山透過後のミュオンを検出し、その強度分布から火山中でのミュオンの減衰を推定して、火山の密度分布を求めている。世界的にも複数のグループによって、シンチレータやガス検出器、原子核乾板、大気チェレンコフ望遠鏡などを用いたミュオグラフィの観測手法の開発が進められている (Lesparre et al. 2012、Ambrosino et al. 2013、Cârloganu et al. 2013、Tanaka et al. 2007、Catalano et al. 2016 など)。

本研究では、水やアクリルを媒質として、ミュオンが進行方向へ円錐形に放射するチェレンコフ光を、媒質壁面に映った楕円形の像として検出し、その像からミュオンの到来方向を推定するという、素粒子実験・宇宙観測実験の技術を応用した新しい手法でのミュオグラフィ技術の開発を目指す。

チェレンコフ光を用いた検出器には、既存の検出器と比べて、大型化しやすいため、有効面積を大きくして統計を向上し、時間変動の測定や観測時間の短縮に貢献できる可能性が高い。時間変動を細かく時間分割して観測することができれば、火山内のマグマの昇降を直接観測することが可能となる。これは、噴火メカニズムの理解につながるほか、マグマの上昇をいち早く検知して噴火予測に貢献できる可能性がある。

アクリル中でチェレンコフ光がなす像に関するシミュレーション

Geant4 を用いて、光電子増倍管のアクリルへの配置を検討するために、チェレンコフ光がアクリルの壁面に作る像をシミュレーションした。直方体の形状をしたアクリル中のミュオンからの放射光の広がりやシミュレーションし、楕円形に広がって壁面に到達した光子の位置の分布を得た。この光子分布から、壁面に複数個設置した光電子増倍管それぞれに入射する光子を数え上げ、画像化した。この画像を用いて、ミュオンがアクリル壁面を通過した位置や到来方向を推定する手法について検討した。

入射光子数の画像から、光子数のピーク位置や画像の重心が求められ、これらを用いてミュオンの入射方向を決定できることが確かめられた。光子分布のピーク位置は、ミュオンがアクリル壁面を抜け出した位置と精度よく一致することが分かった。したがって、画像のピークからミュオンの通過位置が決定可能である。この検出器を複数並べて位置検出器として用いればミュオンの飛跡を決定し、ミュオグラフィすることが可能である。また、画像の重心は、ミュオンが壁面に垂直に入射したときはピーク位置と一致するが、入射角が大きくなるとピーク位置からずれていくことが分かった。

また、大気チェレンコフ望遠鏡で大気シャワーから放射されるチェレンコフ光の像を楕円形として定量化する Hillas パラメータの適用を検討した。Hillas パラメータは像の重心を楕円の中心として、像の傾きを楕円の長軸方向として、光子の拡がりを長軸・短軸の長さとして定量化する。粒子シャワーの像に用いる解析手法を、単一のミュオンの放射のなす像に同様に適用することはできないが、本パラメータを用いて光子分布の拡がりや形状を定量化可能であることを確認できた。

研究成果の概要 つづき

レンズを用いて集光することで、チェレンコフ光をリングとして結像させて、リングの位置と形状からミュオンの入射位置と到来方向を推定できるのではないかと、というアイデアを輪講においていただいた。ミュオンから放射されるチェレンコフ光は、任意の動径方向についてみると平行光となる。これは、物質中でもミュオンの飛跡は直線とみなせて、かつチェレンコフ放射の放射される角度もほぼ一定であるためである。平行光はレンズで一つの焦点に集められるため、ミュオンの各動径方向のチェレンコフ放射が結像する点は円状に分布し、リング状の像が得られると考えられる。この点について、Geant4を用いてシミュレーションを行って検証した。アクリルを媒質として、入射したミュオンからチェレンコフ光を放射させた。放射をレンズで屈折させて、レンズの光軸に垂直なスクリーン上での光子の位置の分布を得た。その結果、予想通りチェレンコフ光がリング状に結像されることがわかった。また、ミュオンの入射角によって、スクリーン上でのリングの位置が変化することも確かめられた。

実際の検出器では、ミュオン検出の統計をできるだけ向上させたいため、有感面積を大きくとることが求められる。口径の大きなレンズは高価である上に、焦点距離が長大になりがちである。そのため、小口径のレンズを用いて検出器の奥行方向のサイズやコストを抑えることが考えられる。小口径のレンズではチェレンコフ放射の一部を集光し、リングの一部のみが撮像される。リングの一部から円全体を推定して、ミュオンの入射方向等を推定することになる。リングの一部を含んだ画像から入射方向を推定する解析手法の開発は今後の課題である。

細長いアクリル角柱を用いた検出器の開発

アクリル中でのチェレンコフ放射を用いたミュオン検出の別の手法として、細長い棒状のアクリルを用いて、放射光子数の違いから棒の長辺方向から入射したミュオンのみを選択する方法について検討した。チェレンコフ光の光子数は、媒質の屈折率、粒子の速度、粒子の飛距離に依存する。ミュオンの速度が光速に近いときアクリル中で放射されるチェレンコフ光の光子数は粒子の飛距離のみによって決まる。この性質を利用すると、光量から媒質中での粒子の飛距離を推定できる。細長いアクリル棒では、光量の大きくなる経路が、棒の長辺方向に限定される。この性質を用いれば、棒を向けた方向から到来し、棒の長辺に沿って通り抜けた粒子のみを選択的に検出できると期待される。本検出器は光量からミュオンの到来方向を決定するため、少数の光電子増倍管などの光検出器とその読み出し系で検出器を構成可能である。棒を向けた限られた方向からのミュオンしか用いることができないというデメリットがあるが、少数の光検出器および読み出し系で角度分解能の高い検出器を構成できるというメリットがある。

この原理に基づき、長さ 50 cm のアクリル棒を用いて検出器を製作し、測定を行った。宇宙線ミュオンは天頂角によって到来数が変化する。本検出器を天頂角 0° (天頂方向)、 45° 、 90° (水平方向) の 3 方向に向けて測定し、それぞれの光量分布に有意な差が生じ、角度分解能を有する検出器を実現可能であると確認できた。

今後は、本研究に基づいて雑誌論文を作成する。また、2017 年度日本物理学会秋季大会で本研究に関して発表を行う予定である。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① 雑誌論文

なし

② 図書

なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催

なし

④ その他

なし