

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610063

研究課題名(和文)音響波を用いた超高エネルギー宇宙線観測法の研究

研究課題名(英文)Study for observation method of ultra-high energy cosmic ray using acoustic wave of air-shower particles

研究代表者

片寄 祐作(KATAYOSE, Yusaku)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90323930

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文):エネルギーが 10^{16} 乗電子ボルトを越える超高エネルギー領域の銀河系外宇宙線がどのような原子核であるのかを調べるため、新しい宇宙線測定手法の研究を行った。宇宙線が大気と衝突すると多数の2次粒子を発生させる、地上まで到達した粒子群が水中に入射すると急速にエネルギーを失い音波を発生させると考えられる。この音波強度はどの程度であるか、また音波測定からエネルギー分布を計測し核種弁別等が可能であるかどうかをレーザーを用いた音波測定実験とシミュレーション計算から調査した。この結果、標高4000m程度にある湖に 10^{17} 電子ボルト程度の宇宙線が入射した場合、音響波による測定の可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文):For the purpose of measuring extragalactic cosmic ray composition in an energy region larger than 10PeV , a new measurement technique using a sound wave was studied. High-energy cosmic rays collide with the nucleus of the atmosphere and produce air-shower particles. When the air-shower particles that arrived at the water pool lose their energy underwater, an acoustic wave is produced in the water. The thermo-acoustic mechanism of sound generation by air-shower particles was studied by both a Monte-Carlo simulation and a measurement experiment with a YAG laser. There is a possibility of measuring cosmic rays with an energy greater than 100PeV using the acoustic wave detection method. The results also showed that the acoustic pulse has a bipolar waveform that depends on a primary particle. It was found that separation of a proton event and an iron event is possible using the rise time of an air-shower acoustic wave.

研究分野：数物系科学

キーワード：銀河系外宇宙線 空気シャワー 音響波測定

1. 研究開始当初の背景

宇宙線は宇宙空間、天体での高エネルギー活動により作られる粒子であり、また宇宙空間に存在する物質や電磁場との相互作用によって拡散ガンマ線、X線、電波等の親粒子ともなっている。従って、宇宙線がどこで発生して地球までどのように伝播してきたのかを明らかにすることは宇宙の理解に大きな意味がある。

宇宙線起源については、「地球で観測された強度スペクトルの形がエネルギーの冪で表され、“knee”と呼ばれる特徴的な折れ曲がりの存在」などの観測事実から、エネルギーが約10の16乗電子ボルト以下の領域では、銀河系内にある超新星残骸での衝撃波加速モデルで説明可能であると長い間考えられてきた。近年になり、衛星でのX線、ガンマ線観測と地上での空気シャワーチェレンコフ測定によるテラ電子ボルト領域ガンマ線の高精度観測の成功により、電子起源は確かめられ、大部分を占める陽子についても原子核相互作用によって生じたパイ中間子からのガンマ線スペクトル形状から、超新星残骸起源説は高精度で確認されつつある。現在は宇宙線の加速エネルギー限界や原子核の種類、加速源分布と銀河内での宇宙線伝播の様子など、物理モデルの詳細化を目指した観測研究が続けられている。

一方、より高エネルギーの宇宙線は、銀河系外から到来していると思われるが、加速源についての標準モデルはなく、天体候補や加速メカニズムには多くの議論がある。粒子加速メカニズムと加速源の空間分布は、地球で観測される宇宙線の組成やその強度分布に反映されるため、これらの精密測定は宇宙線の起源の謎を解く鍵と考えられている。

2. 研究の目的

本研究では、10の16乗電子ボルト以上の領域での宇宙線核種測定から宇宙線起源の研究を目指した。

エネルギーの大きな宇宙線の到来頻度は極めて少なく、衛星等に搭載された小型測定器による直接観測は困難であるが、10の16乗電子ボルトを超えるような宇宙線粒子は、大気原子核と衝突し、2次粒子群(空気シャワー)を発生させる。この空気シャワー特徴から親粒子の情報を探ることが可能となる。

粒子種を選別する方法には、シャワー粒子成分である電子やミュオン粒子分布の違いを利用した方法やシャワー発生位置や発達の違いを用いる方法がある。後者の観測方法には、シャワー蛍光やチェレンコフ光によって立体的にみる方法や空気シャワー中心の高エネルギー電磁成分密度から間接的にシャワー発達の様子を調べる方法などがある。例えば、チベット高原で行われている日中共同実験では、約3万7千平米に展開した空気シャワー装置群の中にシャワー中心の電磁成分を測定するための高密度アレイを設置した観測実験から銀河宇宙線の陽子、ヘリウム成分強度を明らかにした。更にエネルギーが大きくなるとより広大な規模での観測が必要となる。例えば10の19乗電子ボルトを超える最高エネルギー宇宙線観測では、数キロメートル以上の範囲に大気蛍光検出器や粒子検出器アレイ、電波測定器などを設置した大規模実験が行われている。

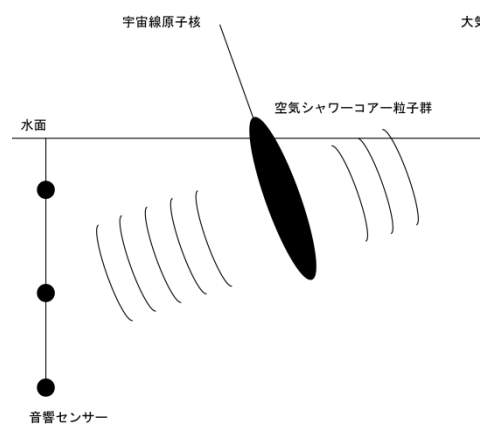


図1: 音波による空気シャワーコア観測の概念図。

音波によるシャワー観測：本研究は、これらと相補的な観測であるが空気シャワーの音響観測というまったく異なるアプローチから超高エネルギー領域での化学組成測定の可能性を追求した。音響による粒子検出は、高エネルギー宇宙線ニュートリノ観測分野で行われており、海や南極の氷中でニュートリノから生じる二次高エネルギー荷電粒子の音波観測が試みられている。本観測研究の特色は、「水中に入射した空気シャワーコア粒子のエネルギー密度分布を利用した粒子選別」と「水中でのエネルギー損失分布の音波計測」であり、この2つを融合した方法から化学組成を測定する（図1）。

観測対象エネルギーで宇宙線頻度は極めて稀で広大な面積の測定器が必要となるがチベットや南米などには標高4000m以上の場所に湖があり、これを検出器の一部とすることによって大有効面積での測定が可能となる。センサーにはハイドロフォンを用いるが、この感度がエネルギー測定の下限值を決める。本課題では音響波測定実験から測定精度を調べ、シミュレーション計算と合わせて音波による宇宙線観測の可能性を調べた。

3. 研究の方法

熱音響モデル：空気シャワー中の高エネルギー二次粒子が水中に入射すると、エネルギー損失による熱平衡の乱れによって音波が発生する。Askaryanによるモデル(G.A. Askaryan et al., Nucl. Instr. And Meth. 164(1979)267)では水中での音の発生と伝播は以下の波動方程式で表される。

$$\Delta p(\vec{r}, t) - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial^2 q(\vec{r}, t)}{\partial t^2}$$

但し、 \vec{r} ：観測位置、 t ：時間、 p ：圧力、 v_s ：音速、 β ：体積膨張係数、 C_p ：定圧比熱容量、 q ：エネルギー密度である。粒子によるエネルギー付与が瞬間的だとすると音波は次式で表される。

$$p(\vec{r}, t) = \frac{\beta}{4\pi C_p} v_s^2 \frac{\partial}{\partial R} \int_{S_R} \frac{q(\vec{r}')}{R} d\sigma$$

ここで r ：音源の位置、 $R = |r - r'|$ ：観測地点から音源までの距離である。

本研究では、空気シャワー現象により生じた荷電粒子の水中でのエネルギー損失 $q(\vec{r})$ を粒子相互作用モンテカルロシミュレーションから計算し、上式を用いてある場所での音圧とその時間変化を求めた。

はじめに先行研究の方法を参考にし、音波計測の基礎研究のため以下を実施した。

市販のハイドロフォンを用い、10の15乗電子ボルト以上のエネルギー損失が得られるレーザー照射実験から音波測定方法を調査した。空気シャワー、水中での二次粒子相互作用シミュレーションと音波発生と伝播の数値計算を行い、音波測定実験と合わせて音波測定による空気シャワーの観測の可能性を評価した。

[YAG レーザーによる疑似宇宙線の水照射実験]

熱音響モデルによると、その特徴は、バイポーラ型のパルス波形であり、周波数主成分は音波発生源の空間分布と観測点の位置関係により決まる。これらの性質を実験的に実証するため、水とその中に入れた音響センサーによる試験器を製作した。音響センサーとして数十キロ Hz までの感度をもつハイドロフォンを使用した。疑似宇宙線の水照射実験をして、音響信号波形、周波数特性、強度等を調査し、同時に音波測定システム感度性能について調べた。数百ミリジュール程度の出力を有するYAGレーザーを使用することによって 10^{18} eV相当のエネルギー損失を得ることができる。

[モンテカルロシミュレーション計算による検証]：レーザー照射実験について、“Thermo acoustic model”に基づいて数値計算し実験結果を検証した。これからモデルの有効性が確認でき、より現実的な現象を詳細に調べる

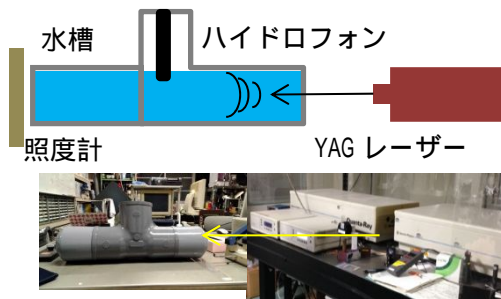


図2：レーザー照射実験の構成。
右からYAGレーザー、水槽、照度計。水槽にはハイドロフォンを設置し、後部において透過レーザー強度を測定した。

ことが可能になる。

[空気シャワー、音波伝播の計算]

陽子のような軽い原子核は大気との相互作用断面積が小さく、大気深くまで侵入し空気シャワーを発生させる。つまりシャワー二次粒子の広がりを測定することにより粒子選別が可能となる。特にシャワー中心は高エネルギー二次粒子が集中しており、標高4000m以上の湖面まで到達した空気シャワー電子やガンマ線成分は水中で急速のエネルギーを失い、エネルギーに比例した音波が発生する。この数値計算には、空気シャワー計算コードと粒子相互作用、伝播計算が可能なシミュレータを使い水中でのエネルギー損失を求め、発生音波を計算した。

4. 研究成果

[YAG レーザーによる疑似宇宙線の水照射実験]今回、図2のように半径6cm 長さ50cmの円筒管に水を入れたパイプを用意し、両端に紫外線透過型アクリル板を取り付けた。音波測定のため、感度170dB re 1V/ μ Paのハイドロフォンをレーザーの入射位置から30cmのところに設置した。レーザー波長は355nmであり、水にはレーザーエネルギー吸収を大きくするため紫外線吸収剤を添付した。エネルギーの吸収長は約8.4cmと見積もられ、ハイドロフォンの手前で音波が発生すると考えられた。レーザーの水中でのエネルギー損

失は 5×10^{17} 電子ボルト程度である。実験では音波波形の特徴であるバイポーラの形が測定され、パルス波形の幅は約10マイクロ秒程度であった(図3)。更に実験結果を詳しく理解するために数値計算によって再現実験を試みた。レーザー吸収率を調整することによって、実験結果と近い形状のパルスは再現できた。これらの結果から水中でのエネルギー損失によって、「熱音響モデル」から予想される音波が発生していることが確認でき、その強度は市販のハイドロフォンを用いても測定可能であることが分かった。一方、水に混ぜた紫外線吸収剤による吸収率の見積もりが不十分であったため、実験とシミュレーション結果で得られた波形を比較すると理解が不十分な点も幾つか見つかった。使用したハイドロフォンの周波数感度や、紫外線吸収剤での減衰効果、壁による音の反響の考慮など今後の課題も明らかになった。

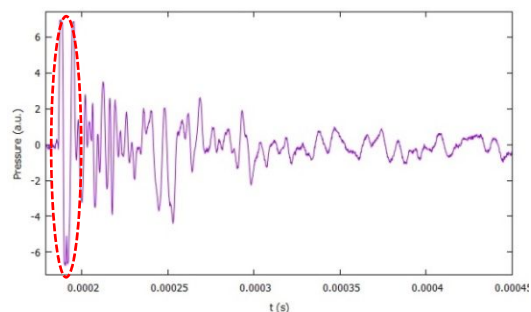


図3：レーザーを水中に照射したときの音波波形。点線で囲まれた部分にバイポーラ波形が観測され、周期的な反射波が見られた。

[空気シャワー、音波伝播の計算]

10の16乗から10の17乗電子ボルトのエネルギーを持った陽子と鉄の一次宇宙線の測定のため、標高4500メートル程度に位置する湖を水プール検出器と想定した数値計算を行った。このため、空気シャワーモンテカルロシミュレーションコード(“COSMOSコード”)と、粒子相互作用計算コード(“EPICSコード”)を用いて、空気シャワー二次粒子の水中での

エネルギー損失を計算した。

その結果、高エネルギーの二次粒子は、空気シャワーコア領域に集中していた。例えば、10の17乗電子ボルトの陽子宇宙線では、空気シャワー中心の半径5メートル以内に 24×10 の15乗電子ボルトのエネルギー束があり、鉄のそれとは約2 倍の差があった。

また、水中に吸収されるエネルギーにより十分大きな音波が発生した。図4は、エネルギー10の16乗電子ボルトの陽子によって発生した音波をシャワー軸から10m離れた場所で測定したときの音圧波形である。波形形状は水中でのエネルギー損失分布の広がりやに反映され、陽子と鉄を比較すると信号の立上り時間に差異があることが分かった。これらのことから、音波を用いたエネルギー測定や陽子と鉄等の核種判別の可能性が示唆された。

今後、水中での音波減衰の程度や温度変化の影響、自然に存在するノイズの大きさの実測など、より現実的な状況を考慮した実験と数値計算による調査を継続する予定である。これらにより、超高エネルギー領域宇宙線の新たな測定方法を確立することができると期待される。

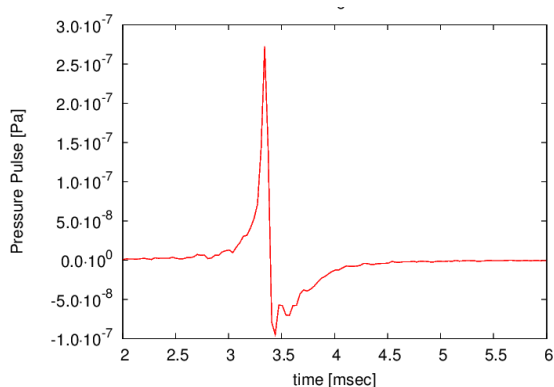


図4：10の16乗電子ボルトの陽子イベントによって得られた音波波形

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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔その他〕

横浜国立大学・理工学部

学士論文2件

平成27年度

「空気シャワーコア検出による銀河系外宇宙線組成測定法の研究」

平成26年度

「音波による高エネルギー放射線測定法の確立のためのレーザーを用いた検証実験」

6．研究組織

(1)研究代表者

片寄 祐作 (KATAYOSE YUSAKU)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90323930