

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287056

研究課題名(和文) LHC軽原子核衝突超前方測定にむけたシリコンピクセルカロリメータの開発

研究課題名(英文) Development of silicon pixel calorimeter for future light ion collision experiment at LHC

研究代表者

さこ 隆志 (Sako, Takashi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師

研究者番号：90324368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー宇宙線は空気シャワー現象を通して観測される。空気シャワー発達の素過程を理解するために加速器陽子陽子衝突データが利用されているが、本研究は将来の軽原子核衝突のための検出器の基礎開発である。既存のシリコンピクセル検出器とタングステン板を利用したカロリメータを製作し、シャワー中の複数粒子の測定に成功した。またシミュレーション計算によって、LHC 酸素酸素衝突を実現した場合、ピクセルサイズ 2mm程度が最適であることを明らかにした。新しい検出器の必要性は、LHC forward physics working groupが編纂したレポートにまとめ公表された。

研究成果の概要(英文)：High-energy cosmic rays are observed through atmospheric air showers. To understand the fundamental processes in air showers, collider data at proton-proton collisions are widely used. This research is to prepare future experiment to measure particle production in light ion collisions at LHC. Silicon pixel sensor was combined with tungsten plates to compose a simple shower calorimeter. Showers developed in the calorimeter was successfully observed. A MC study of LHC oxygen-oxygen collisions was performed and an optimal pixel size was determined to be 2mm. Importance of this kind of detector for future experiments was explained in the report summarized by the LHC forward physics working group.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：高エネルギー宇宙線 衝突型加速器 カロリメータ 原子核衝突実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙には、人類が人工的に生成できるエネルギーをはるかに超えたエネルギーを持つ粒子、宇宙線が飛び交っている。これらの起源は発見から 100 年を超える現在も謎のままである。 10^{14} から 10^{20} eV にいたる高エネルギー宇宙線は到来頻度が低いため、空気シャワー現象を通じて観測される。空気シャワーは宇宙線が地球大気と高エネルギー素粒子反応を繰り返し地上に大量の粒子が降り注ぐ現象である。観測された空気シャワーから元の宇宙線のエネルギーや粒子種を決定するためには、空気シャワー中の反応素過程の理解が不可欠である。反応の中でも特にハドロン反応は理論的予測が困難で、仮定する反応モデルによって特に粒子種が決定できないことが問題である。

2009 年の CERN LHC 加速器の登場で陽子陽子衝突素過程の実験的研究が飛躍的に進んでいる。LHC が達成した重心系 13TeV 陽子衝突は、宇宙線のエネルギーにして 10^{17} eV に相当する。陽子衝突データを用いてハドロン反応モデルが改良され、モデルの不定性は大幅に減少した。一方、空気シャワー現象では、地球大気は窒素や酸素といった軽い原子核である。宇宙線にも原子核成分が含まれているため、本質的に軽原子核衝突の検証が必要である。これまでに加速器による軽原子核衝突実験は例がなく、将来の LHC での軽原子核実験の必要性が議論されている。また、技術的には酸素衝突が最も現実的であることも判明している。

2. 研究の目的

空気シャワー素過程の理解のためには衝突超前方への粒子生成の測定が必要である。原子核衝突では陽子衝突に比べて前方に多数の粒子が生成されるために、同時に複数の粒子の測定が可能な検出器の開発が不可欠である。これまでに LHC で前方粒子の測定を行った LHCf 検出器は複数粒子入射事象に対する解析が基本的に不可能なものであった。

本研究では、LHC の測定条件での検出器への要求を明らかにすること、検出器の基礎測定を行い将来の実験提案を行うこと、を目的とする。また、現在のハドロン反応モデルにおける、原子核衝突モデル化の不定性を明らかにすることも目的とする。

3. 研究の方法

問題回避にあたって二次元位置検出機能を持つシリコンピクセル検出器を利用した装置を検討した。まず、LHC で実現可能な 10TeV の酸素原子核衝突をシミュレーション計算し、前方に生成される粒子数密度と距離分布を調

べた。また、既存の複数の反応モデルで陽子陽子衝突と酸素酸素衝突を計算し、モデルで取り扱われる原子核効果の違いを示した。粒子生成には複数の反応モデルが利用可能な CRMC パッケージを、検出器のシミュレーションには GEANT4 を利用した。

宇宙 X 線観測のために開発されたシリコンピクセルセンサとタングステン板を組み合わせた簡易検出器を製作し、大気宇宙線によるシャワー現象を観測した。また、シリコンストリップ検出器とタングステンを利用したカロリメータに CERN SPS 加速器からの $100\text{--}250\text{GeV}$ の電子ビームを照射し、タングステン中でのシャワー発達を測定した。

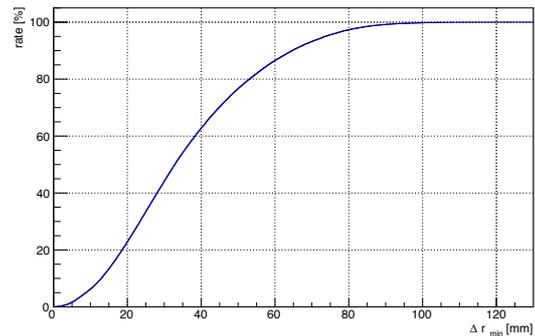


図 1 LHC 酸素衝突シミュレーションにおける前方での光子間距離分布

4. 研究成果

シミュレーションでは、光子間距離の分布を調べ、最近接距離が約 10mm であることを明らかにした (図 1)。これは高エネルギー中性パイ中間子の崩壊によって決まる距離であり、反応モデルによらない確かな結論である。 10mm 以下に近接する事象は偶然事象であり、全体の 5% であった。さらに、シリコンピクセルセンサとタングステンを交互に重ね合わせた検出器を仮定し GEANT4 で検出器内の反応を計算した。仮想データの解析を行ない、これらの光子の入射位置とエネルギーを正しく決定できるようなピクセルサイズの検討を行ったところ、 2mm 以下で十分な性能が得られることがわかった。シャワー自身の広がりやばらつきがあるため、 2mm 以下のピクセルサイズにしても有意な性能向上は見られない。ピクセルサイズが小さいことは、読み出しチャンネル数の増大、つまりコストの増大につながるため、 2mm のピクセルサイズが最適であるという結論を得た。

シミュレーションによる陽子陽子衝突と酸素酸素衝突における中性パイ中間子エネルギースペクトルを求め (図 2 上) これらの比 (図 2 下) をモデルごとにとることで、各モデルの原子核効果の違いを抽出した。その結果、原子核効果によってパイ中間子生成数に 2 倍の違いがあることがわかった。

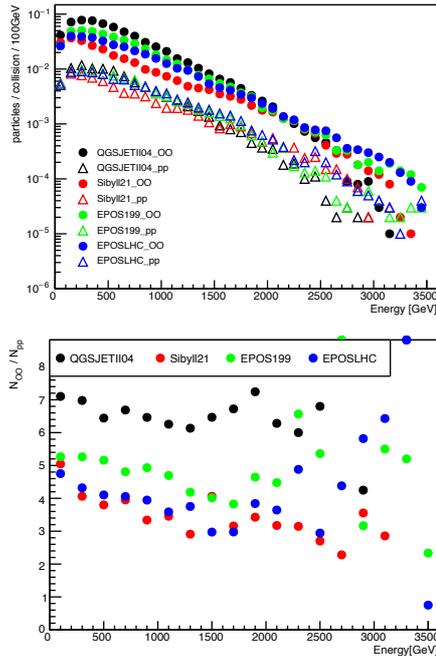


図 2 LHC 陽子陽子衝突と酸素酸素衝突における中性パイ中間子の生成エネルギースペクトル

シリコンピクセルセンサとタンゲステンによる簡易検出器を製作し (図 3)、大気宇宙線によるシャワー観測を行った。正しく高エネルギーのシャワーを抽出できるように、独立に挿入したシンチレータと光電子増倍管による同時測定も行った。シンチレータで大きな信号が観測された事象についてシリコンピクセルのデータを解析したところ、10 粒子以上が同時に広がって分布するシャワー事象の検出に成功した (図 4)。今回利用した読み出し回路では、ピクセルあたり 3 粒子までしか測定できなかったため、今後の発展に向けて、測定可能範囲の広い読み出し回路の選定を開始した。

SPS 加速器ではエネルギーが既知の電磁シャワーを測定し、シミュレーションと比較することで、シャワーの広がりが正しく再現できていることを確認した。カロリメータに

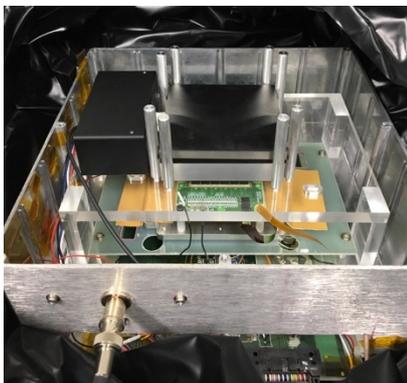


図 3 シリコンピクセルセンサとタンゲステン板による簡易検出器

はシリコンピクセルセンサではなく、シリコ

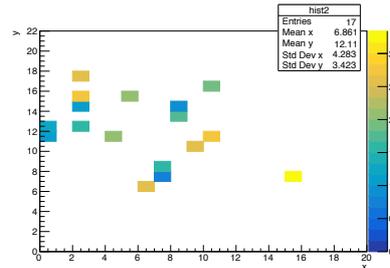


図 4 簡易検出器のシリコンセンサで観測されたシャワーイベントの一例

ンストリップ検出器を利用した。特に、イタリアの連携研究者による大きな貢献があった。この実験はシミュレーションによる装置設計の信頼性を補強するものである。

本研究の一部の内容は、LHC forward physics working group のレポートの中に、宇宙線研究のために LHC で将来必要な実験の一つとして紹介した。また、LHC Science Policy Committee でも同内容を報告した。LHC への実験提案には至っていないが、LHC の将来の利用の可能性として認知を得ることができた。

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 2 件)

- K. Akiba et al. (The LHC forward physics working group) (T. Sako 187 人中 146 番目), “LHC Forward Physics,” Journal of Physics G, 43 (2016) 110201
- T. Sako et al. (The LHCf collaboration) (Y. Itow, K. Masuda, H. Menjo), “Results of the LHCf experiment and the forward measurements at the LHC,” European Physics Journal (2017) 印刷中

[学会発表] (計 8 件)

- T. Sako, “Results of the LHCf experiment and the forward measurements at the LHC,” International Symposium on Very-High-Energy Cosmic Ray Interaction, Aug 2017, モスクワ
- T. Sako, “LHCf and RHICf, collider experiments to reveal the nature of high-energy cosmic rays,” KMI2017, Jan 2017, 名古屋
- T. Sako, “LHCf: Results and plan for RUNII,” the LHC working group on forward physics and diffraction, Apr

- 2015, マドリード
- T.Sako, “LHCf experiment: astrophysics connection of high-energy nucleus collisions,” Quark Matter 2015, Sep-Oct 2015, 神戸
 - Y. Itow, “LHCf physics, status and future,” CERN Science Policy Committee, Jun 2014, ジュネーブ
 - T.Sako, “Recent LHCf results and possible future plan at RHIC for p-A and A-A runs,” LHC forward physics and diffraction WG meeting, Sep 2014, カンザス
 - 奥野友貴、さこ隆志、他 “LHC 酸素衝突による空気シャワー検証実験用シリコンパッドカロリメータの設計”、日本物理学会年次大会、2016年3月、仙台
 - さこ隆志、” LHCfZ (RHICf, LHC 軽原子核衝突”、宇宙線将来計画タウンミーティング、2014年3月、柏

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

さこ 隆志 (SAKO, Takashi)
 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師
 研究者番号：90324368

(2) 研究分担者

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)
 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
 研究者番号：50272521

増田 公明 (MASUDA, Kimiaki)
 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授
 研究者番号：40173744

毛受 弘彰 (MENJO, Hiroaki)
 名古屋大学・理学研究科・助教
 研究者番号：10447849

(3) 連携研究者

田島 宏康 (TAJIMA, Hiroyasu)
 名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
 研究者番号：80222107

(4) 研究協力者

Adriani, Oscar
 イタリア INFN Firenze, 教授