

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2008 ~ 2009
 課題番号： 20740130
 研究課題名(和文) LHC 原子核衝突を利用した宇宙線と地球大気相互作用の解明
 研究課題名(英文) Study for the cosmic-ray interaction with Earth's atmosphere using LHC nuclear collisions

 研究代表者
 さこ 隆志 (SAKO TAKASHI)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
 研究者番号：90324368

研究成果の概要(和文):

欧州合同原子核研究機関(CERN)・LHC 加速器における将来の原子核衝突を用いた相互作用検証実験の可能性を探った。現在の LHCf 実験装置の利用を仮定した時、既存モデルの弁別・粒子多重度・放射線損傷の観点から、窒素衝突に対して重要な実験が可能であるが、鉛衝突では装置設計の変更が必要であることが明らかになった。また、放射線損傷を抑えるために、無機結晶シンチレータ GSO の基礎特性を測定し、現在用いているプラスチックシンチレータと同じ性能で高い耐性が得られることが明らかになった。

研究成果の概要(英文):

We investigated future experiments to test interaction models using nuclear collisions at the CERN LHC accelerator. In point of view of the model discrimination, particle multiplicity and radiation dose, we concluded that we can perform a crucial experiment at Nitrogen collisions, but not at the Lead collisions assuming to use the current LHCf detector. We also studied the basic properties of GSO crystal scintillator to reduce the radiation damage. We concluded that the GSO scintillators are radiation hard enough and have satisfactory properties compared with the plastic scintillators used in the current detector.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超高エネルギー宇宙線、相互作用モデル、シンチレータ、LHC 原子核衝突

1. 研究開始当初の背景
 超高エネルギー宇宙線の起源を探るため、世

界で空気シャワーを用いた巨大宇宙線観測
 実験がすすんでいた。世界最大の宇宙線観測

実験 Auger が最高の統計精度の結果を、また、長年データを蓄積してきた HiRes 実験が最終結果をまとめていた。どちらも 10^{20}eV 近くのカットオフを確認したが、同エネルギーでの粒子種については異なる結論を得た。この矛盾は現在も続いており、当分野の最重要課題である。さらに、宇宙線到来方向分布を含めたすべての観測結果を矛盾なく説明する理論は見つかっていない。独立の測定をすべく、日米を中心とする Telescope Array 実験が観測を開始していた。TA は間もなく二つの実験と比較すべき結果を発表できる状態である。

今後 Auger と TA の結果を比較しながら、実験の系統誤差の理解が深まるはずである。しかし、実験に起因しない重要な誤差源、ハドロン相互作用モデルの不定性を独立の加速器実験によって抑える必要がある。超高エネルギー宇宙線の観測は空気シャワー現象を利用しているため、空気シャワーの発達を理解するためには、ハドロン相互作用モデルの仮定が不可欠である。Auger, HiRes の観測結果がそろった今、この必要性がさらに高まってきた。

LHCf 実験は CERN LHC 加速器の陽子衝突によって前方に放出される二次粒子を測定することで、宇宙線観測の解釈に用いられるハドロン相互作用モデルを検証する実験である。LHCf 実験は 2008 年には装置の準備を終え、LHC の運転を待つばかりであった。2008 年の LHC の事故によって開始が遅れたが、2009 年末、無事にデータ収集を開始、2010 年には重心系エネルギー 7TeV でのデータ収集を続けている。

研究開始当初、LHC は運転開始間近であった。重心系エネルギー 14TeV での陽子衝突実験を進めたのち、すぐに鉛衝突をする予定であった。本研究の目的であるその先の提案をするためには、少しでも早く提案書を作成する必要があった。しかし、2008 年の事故によって運転開始が遅れ、またエネルギーも段階的に最高エネルギーを達成することになった。現時点で、14TeV の達成は早くても 2013 年である。

2. 研究の目的

(1) 準備が完了した LHCf 実験の次の段階、LHC 原子核衝突におけるモデル検証の将来実験提案準備をする。現在の LHC での衝突が陽子同士の衝突であるのに対し、宇宙線と地球大気の衝突は陽子から鉄に至るさまざまな原子核と主に窒素との衝突である。LHC は陽子のみでなく、さまざまな種類の原子核を加速することが可能である。宇宙線と地球大気の衝突をより直接的に検証するためには、LHC の原子核衝突を用いた実験が有効である。陽子衝突に対する LHCf 実験の準備

が整った今、次の原子核衝突に対する準備を始める必要がある。

(2) 現在の LHCf 検出器はエネルギー測定のためにプラスチックシンチレータを用いている。しかし、LHC の高い放射線環境下で必要な測定をするために余裕のある耐性があるとは言えない。原子核衝突で予想される高い粒子多重度・放射線環境に対する新しい装置の基礎試験を行う。

3. 研究の方法

(1) モンテカルロシミュレーションを用いて、原子核衝突におけるモデルの違いをしめす。一般に宇宙線実験で用いられる複数のモデルを用いて比較する。さらに、この違いを現実的な装置（現在の LHCf 検出器）によって検証可能かどうかを明らかにする。このとき、粒子多重度が高すぎないこと、十分な測定をするまでの放射線被ばく量がシンチレータ耐性の範囲内であること、が重要である。実際には、原子核衝突で想定される LHC の衝突輝度を含めて被曝量を予想する。

(2) 耐放射線強度が強いことで知られる GSO シンチレータの基礎試験を行い、将来の実験における利用可能性を検討する。試験内容は、放射線耐性以外に、GSO シンチレータと PMT の出力波形が、期待される衝突事象頻度よりも長いテールをもたないか、実験室における各種較正に有効な紫外レーザーに対する反応、等である。

4. 研究成果

(1) QGSJET2 および、DPMJET3 モデルを用いて、LHC 窒素衝突、鉛衝突における、超前方の二次粒子エネルギースペクトルをもとめたところ、強いモデル依存があることが明らかになった（図 1）。鉛衝突の計算は宇宙線

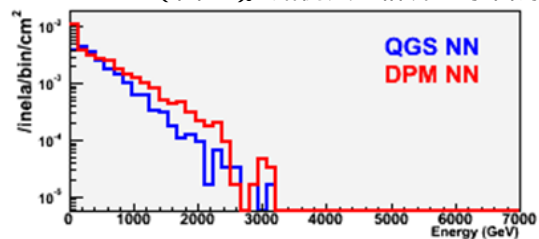


図 1 .LHC 窒素衝突における最前方ガンマ線エネルギースペクトルのモデルによる違い

実験にとっては重要ではないが、LHC で予定されている衝突であるため、参考のために計算した。同時に、二次粒子の擬ラピディティ () に対するエネルギー流量分布を示したところ（図 2）陽子衝突と同様に非常に高い前方集中をしており、前方 (>8) での測定が宇宙線研究にとって重要であることが確認できた。

次に、現在の LHCf 検出器を仮定した時の粒子多重度を求めた。窒素衝突は多重度 1 程度

で測定可能(図3)、鉛衝突は多重度が15まで伸びており測定不可能であることがわかった(図4)。

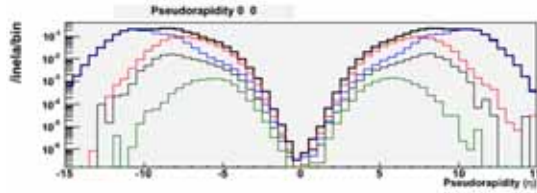


図2：LHC 窒素衝突における二次中性粒子の擬ラピディティー分布。太い黒：全中性粒子、青：中性子、赤：ガンマ線、緑：ニュートリノ、細い黒：その他

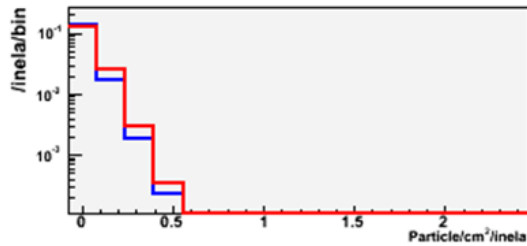


図3 .LHC 窒素衝突における最前方二次粒子多重度分布

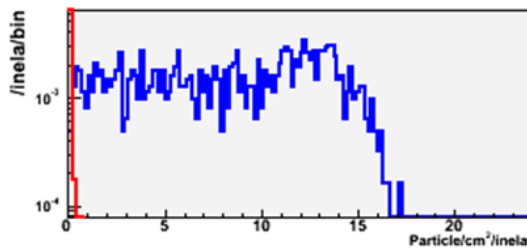


図4：LHC 鉛衝突における最前方二次粒子多重度分布

放射線被曝量は、検出器に入射する粒子のエネルギー流量と想定される衝突輝度から計算した。陽子衝突では衝突一回あたりのエネルギー流量が $36\text{GeV}/\text{cm}^2$ に対して、窒素、鉛衝突ではそれぞれ $1000, 20000\text{GeV}/\text{cm}^2$ であることがわかった。LHCの最大衝突輝度は、陽子、鉛衝突に対してそれぞれ $10^{34}\text{Hz}/\text{cm}^2, 10^{27}\text{Hz}/\text{cm}^2$ である。窒素衝突に対する設計値はないためその中間を想定すると、最終的な被曝量は陽子衝突に対して窒素衝突で10%、鉛衝突で1%となった。実際にはLHCの運転は最大輝度に至るまでに長い時間がかかる。陽子衝突は 10^{26} 台から開始しており、8桁の不定性を考えると、上記の差はないに等しい。従って、装置の放射線対策は必須事項であることが明らかになった。

(2) GSOシンチレータに337nmの紫外パルスレーザー(0.3ns)を照射し、発光を光電子増倍管R7400Uで測定した。半値幅30nsの波形

が観察され、GSOがレーザーによって励起、発光していることが確認できた(図5)。発光ピークから2μ秒後までの信号量を測定し、ピークの0.3%以内でテール成分がないことがわかった。

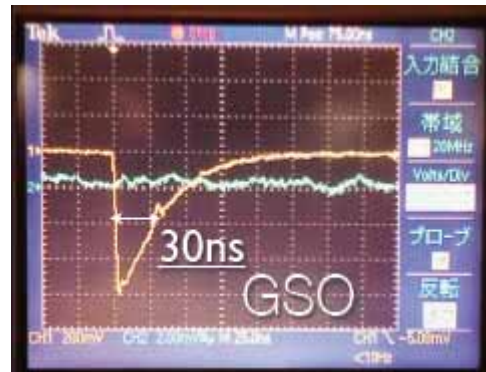


図5：紫外レーザーによって励起発光したGSOシンチレータの出力波形

放射線医学総合研究所HIMACにおいて炭素イオンビームを照射し、被曝耐性を測定した(図6)。プラスチックシンチレータでは、10kGyの被曝から出力光量の減少が見られたが、GSOでは最大照射量である400kGyの被曝に対して有意な劣化は見られなかった。これらの特性は将来の実験に十分な性能である。

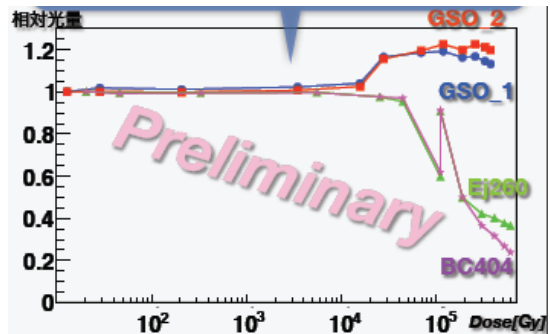


図6：放射線被曝量に対するプラスチックシンチレータ(EJ260, BC404)とGSOシンチレータの出力信号量の変化。100kGyでの急激な上昇は時間をあけたことによるシンチレータの回復効果。

LHCにおける原子核衝突実験はまだ具体的な議論は始まっていない。また、衝突は鉛から実施されることが決まっている。LHCが陽子の最高エネルギーを達成するのが2013年以降であり、軽イオン衝突の実現は早くても5-10年後と思われる。2010年3月にCERNでおこなわれた原子核衝突ワーキンググループ会議に、本研究結果をもってLHCf実験グループメンバーが参加し、将来の軽イオン衝突実験への興味を表明した。2009年の宇宙線

国際会議においても、イオン衝突実験の重要性に関する質問に対し口頭で本研究の経過を説明した。

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)

[学会発表](計 2件)

さこ隆志、他 LHCf Collaboration、LHC 原子核衝突におけるハドロン相互作用モデルの検証、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学

川出健太郎、さこ隆志、他 LHCf Collaboration、LHCf 実験のための GSO シンチレータの性能評価試験、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/LHCf/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

さこ 隆志 (SAKO TAKASHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：90324368

(2) 研究協力者

川出 健太郎 (KAWADE KENTARO)

名古屋大学大学院・理学研究科・大学院生