

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340064

研究課題名(和文) 超高エネルギー宇宙線と地球大気相互作用の量子色力学に基づく定量的解析

研究課題名(英文) Analysis of Interaction between UHECRs and nuclei in atmosphere based on QCD

研究代表者

板倉 数記 (Itakura, Kazunori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：30415046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙から飛来する高エネルギー粒子である宇宙線は、地上での加速器実験で生成できない程の膨大なエネルギーを持つものまで存在し、主に陽子や原子核と考えられている。それらは地球大気と衝突する「高エネルギーハドロン散乱」を端緒として「空気シャワー」という多重粒子生成現象を引き起こす。本研究では、2000年以降急速に発展した、高エネルギーハドロン散乱に於ける新しい視点である「カラーグラス凝縮(CGC)」と呼ばれる状態を取り込んだ新しいシミュレーションコードの作成を目指し、その第一歩として最初の衝突部分を記述する「CGC+HIJING模型」というイベント・ジェネレータを作成した。

研究成果の概要(英文)：Cosmic rays are high energy particles coming from outside of the earth, and their energies can be higher than those realized by accelerators on the earth. They are thought to be protons or nuclei, and induce "air showers" through collisions with nuclei in the atmosphere. In this project, we aimed to make a new simulation code for air showers based on new theoretical development on high energy hadron scattering. The new theory is called "Color Glass Condensate", and we have constructed an event generator or "CGC+HIJING model" which describes the first collision event for the development of air showers.

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：高エネルギーハドロン散乱 宇宙線空気シャワー ハドロン相互作用模型 カラーグラス凝縮

1. 研究開始当初の背景

宇宙から飛来する高エネルギー粒子である宇宙線の観測は、装置の大型化に伴って、最高 10^{20} eV ほどの膨大なエネルギーを持つ稀なイベントまでも測定できるようになっている。そのような観測では、高エネルギー宇宙線が地球大気に衝突して引き起こす「空気シャワー」という多重粒子生成現象の測定に基づいて元の宇宙線エネルギーの同定を行っており、空気シャワー現象の正確な理解が必要である。高エネルギーの宇宙線は主に陽子や原子核であると考えられ、従って空気シャワー生成の端緒は、宇宙線と大気中の原子核との「高エネルギーハドロン散乱」に他ならない。しかしながら、このように巨大なエネルギーのハドロン散乱は地上の加速器では実現することが不可能であるので、そのような反応を記述するためには、現存する最高エネルギーの加速器実験の結果をよく記述する理論的枠組みを外挿することが最も望ましいだろう。本研究開始当時、空気シャワーを記述するシミュレーションコードは幾つか存在したものの、それらはどれも最近の理論の発展を反映したものではなかった。特に、2000年以降急速に発展した、高エネルギーハドロン散乱に於ける新しい視点である「カラーガラス凝縮(Color Glass Condensate, CGC)」と呼ばれる状態に関する理論的記述を取り込んだシミュレーションコードは存在しなかった。

2. 研究の目的

上記のような状況に鑑みて、本研究は高エネルギーハドロン反応の最新の理論的枠組みであるCGCを積極的に取り込んだ新しい空気シャワーシミュレーションコードを作成し、高エネルギー宇宙線の起源、組成、到来方向などの性質を議論する基盤を与えることを目的とする。それにより、宇宙線が関係する宇宙・素粒子物理の諸問題解決の契機となるだけでなく、地上実験では到達できない程の高エネルギーにおけるハドロン物理に対する新しい知見獲得も目指す。

3. 研究の方法

新しいシミュレーションコード作成の過程は以下に挙げる3つの段階にわけられる。

(1) 高エネルギーハドロン散乱の最新の理論的枠組みであるCGCに基づいて、RHICやLHCなどの実験結果を良く記述する方法を見出す。CGCとは、高エネルギーで衝突するハドロンが示す状態の事で、量子色力学(QCD)に基づいて記述される。ハドロンの内部自由度であるグルーオン(SU(3)対称性のゲージ粒子)は三点相互作用をもち、ハドロンを高エネルギーに加速していくと、その三点相互作用により分裂($g \rightarrow gg$)することでグルーオンの多重生成が起こる。一方、グルーオンの数が増加し密度が高くなると、逆過程である融合($gg \rightarrow g$)が効き始め、グルーオンが高密度で飽和した状態が出現する。これがCGC状態である。高エネルギーのハドロン・ハドロン散乱はこのように多くのグルーオンをま

た状態同士の衝突として記述される(陽子や中性子が3つのクォークから成るとする描像とは劇的に異なることに注意。3つのクォークがグルーオン生成の種になり、高エネルギーではグルーオンで覆い尽くされた状態が出現する)。CGC状態が実現した時の特徴的なグルーオンの「サイズ」はQCDの非摂動効果が発現する距離に比べて十分に小さく、(漸近的自由性により)CGCは結合定数が十分小さいとして扱える。このCGCの理論を用いて、陽子・陽子衝突、陽子(重陽子)・原子核衝突における前方方向の断面積を記述する枠組みを構築する。ここで特に前方方向に注目するのは、CGCの効果最も顕著に現れることが期待されるからである。

(2) 空気シャワーのシミュレーションを行うためには、高エネルギーハドロン散乱イベントの全体像を記述する必要があり、前方方向の包含的な断面積以外にも必要な情報が存在する。例えば、CGCで記述される部分以外の効果として、通常の摂動的QCDで記述されるようなパートン間のハードな散乱も考慮する必要がある。また、ハードな散乱に関与しなかった残りの粒子群のソフトな反応や、散乱されたパートン間を繋ぐグルーオン・ストリングの崩壊に伴う粒子生成は重要な非摂動的効果である。これらの効果を記述する為には、HIJING (Heavy Ion Jet Interaction Generator)と呼ばれるイベントジェネレータを利用することができる[X.N.Wang and M.Gyulassy, Phys. Rev. D44 (1991) 3501]。HIJINGは高エネルギー重イオン衝突を微視的な自由度から記述するために作られたシミュレーションコードであり、RHICやLHCにおける重イオン衝突イベントを記述するのに一定の成功を収めており、広く受け入れられている。しかし、HIJINGが作成された90年代当時はまだCGCに関する理論的研究は進んでおらず、その後アップデートされた際にもその効果は取り入れられていなかった。そこで、LHCで行われている高エネルギー重イオン衝突をより正確に記述する為にも、LHCを超えた散乱エネルギーの宇宙線空気シャワーイベントに応用する為にも、従来のHIJINGにCGCの効果を取り込むことが必要になる。

(3) CGCの効果を取り入れたHIJINGを新しいイベントジェネレータ「CGC+HIJING 模型」として構成すると、それは高エネルギーハドロン散乱、例えば陽子・原子核衝突イベントの全体を記述することができるようになる。空気シャワーでは、この反応が契機になり、生成した粒子群の粒子それぞれが再び空気中の原子核と反応を起こし、さらに多くの粒子を生成する。これが繰り返されることで空気シャワーが生成すると考えられる。CGC+HIJING模型のような「ハドロン相互作用模型」をインプットとして、空気中での多重散乱過程を構成して空気シャワーをシミュレートする数値コードとして、COSMOSが知られている[例えば K.Kasahara, et al. Astropart. Phys. 44 (2013) 1]。このコードにCGC+HIJING模型を組み込むことによって、新しい空気シャワーコード

が完成する。(但し後述するように、本研究ではこの段階までは進めることができなかったので、次のプロジェクトとして申請する予定である)

4. 研究成果

(1) 衝突エネルギーの増加に伴うハドロンの状態変化は Balitsky-Kovchegov (BK) 方程式と呼ばれる散乱振幅に関する非線形微分・積分方程式(散乱エネルギーに関する微分方程式。横運動量については積分される)で記述される。本研究では、元の BK 方程式ではなく、結合定数がエネルギースケールによって変化する効果を取り入れて改善された「rcBK 方程式」($rc = \text{running coupling}$)と呼ばれる方程式を用いる。この方程式は、電子による陽子の深非弾性散乱実験において CGC による記述が有効と考えられる運動学的領域($\text{small-}x$ 領域)の結果を実際に良く記述し、幾つかある(主に非摂動効果に関係する)パラメータが決定されている (AAMQS parametrization, J.L.Albacete, et al. Eur. Phys. J.C71 (2011) 1705)。そこで、我々はこの手法を用いて、RHIC や LHC における陽子・陽子衝突、陽子(重陽子)・原子核衝突の前方方向の断面積などを良く再現する枠組みを構築した。

より具体的に説明すると、前方方向のハロン散乱の断面積の計算には "DHJ (Dumitru, Hayashigaki, Jalilian-Marian)" と呼ばれる、前方方向の運動学的変数の特徴を反映させた枠組みを用いた。DHJ では、標的をグルーオンに満ちた CGC、入射粒子を価クォークの集まりと扱う。断面積の計算に必要な入射粒子の情報は、いわゆる DGLAP 方程式を満たす通常のパートン(クォークとグルーオン)分布関数で記述する。一方、標的である CGC のグルーオン分布関数は、AAMQS で決定されたパラメータを初期条件として採用し、rcBK 方程式を数値的に解いて得たものを利用する。但し正確には、AAMQS の論文で使われていたグルーオン分布関数は高運動量領域への外挿に問題があることがわかったため、我々自身で rcBK 方程式を数値的に解き、もう一度パラメータを決定し直している(これらの数値計算は従来のものに比べると100倍程度速くなっている)。実験データとの比較によって、DHJ の枠組は RHIC(重心系エネルギー 200GeV)での陽子・陽子衝突の前方方向の断面積をよく記述することがわかったので、それを LHC (900GeV, 7TeV)のエネルギーまで外挿した。この初期段階での作業は、科研費雇用研究員として採用した北殿義雄氏と共に行った。

さらに、標的が原子核の場合には、原子核中の核子の位置の揺らぎを取り込む必要がある。原子核の Woods-Saxon ポテンシャルを確率密度としてランダムに核子を発生させ、揺らぎを含む原子核のモデルを構成し、それを用いて DHJ の枠組みで陽子・原子核散乱の前方方向での断面積を計算した。なお、この計算方法では rcBK 方程式を解いて得られたグルーオン分布関数の持つパラメータは既に決定されており、新たに利用できるパラメータは存在しない。この

ように、新たなパラメータがないにもかかわらず、RHIC の重陽子・金衝突の前方方向断面積の実験結果を良く再現することが分った。(雑誌論文 [5], [6]を参照)

また、同様の枠組みで、陽子・陽子衝突における生成粒子数の示す揺らぎとして negative binomial distribution を取り入れると、近似的に Koba-Nielsen-Olesen (KNO) スケーリングが成立することを示し、それが陽子・原子核衝突や原子核・原子核衝突でも重要であることを説いた。(雑誌論文[4]) DHJ の枠組みは前方方向にしか適用できないが、LHC のように散乱エネルギーが増加すると、前方方向(forward rapidity)だけでなく中心部分(mid-rapidity)でも CGC の効果が重要になる。そのような粒子生成は kt 因子化法という計算手法によって与えられる。その効果も取り入れて、LHC での陽子・鉛衝突の様々な物理量の計算を行った。(雑誌論文[3])

(2) CGC の関与する部分の理論的記述方法の整備が済み、それを HIJING に組み込むという作業に取り掛かった。3年目から、HIJING のアップデートに携わった Weitian Deng (鄧維天) 氏を科研費雇用研究員として採用し、作業を行った。HIJING はソフトな散乱(非摂動的)とハードな散乱(摂動的)を含むが、その両者は関与するパートンの横運動量の値によって区別されている。その区別では、CGC が記述する運動学的領域はソフトとハードの間にある「セミハードな散乱」に相当し、それを含めて全体を首尾一貫したものにすることが必要がある。本研究課題では衝突イベントの全体を記述することを目指すので、CGC としては DHJ に加えて kt 因子化法も加えて評価する。また、HIJING では、ソフトとハードの横運動量の境界が散乱エネルギーに依存しており、エネルギーの増加に伴って増加するように指定されている。このエネルギー依存性は陽子・陽子散乱の全断面積などのエネルギー依存性を再現するように現象論的に導入されていた。しかし、CGC を含む枠組みでは純粋に摂動的な「ハード領域」と CGC の「セミハード領域」は、CGC を特徴づける「飽和運動量」という量で自然に区別される。このように、新たに CGC の寄与が加わることによって、理論的にはより物理に根差した描像を採用し、仮定(パラメータ)の少ない枠組みになった。しかし、既にある程度重イオン衝突の実験結果を説明するように決められていた元の HIJING のパラメータを全て新たに決め直す必要があった。まだ最終的な段階ではないものの、プロジェクトの進捗状況を既に発表している(学会発表[4]など)。実際のコード作成作業では、HIJING に CGC を組み込むことを想定してオリジナルの HIJING の改善に取り掛かった。様々な改良を行った後、HIJING に CGC を組み込む作業が進んでいる。まだ作業は続いているが、近いうちに新しいハロン相互作用模型「CGC+HIJING 模型」の結果を論文にまとめ、公開する予定である。

また、本研究で生成した rcBK 方程式の数値解を利用し、CGC の kt 因子化法と同様の枠組

みを用いて陽子・原子核衝突における前方方向での重いクォーク対生成の断面積などを計算した。RHIC エネルギーでは J/psi 生成量の実験結果を良く記述するのに対して、LHC ではずれが生じ、新たな効果の可能性があると注目されている。(雑誌論文[1],[2])

(3) 「CGC+HIJING 模型」を完成させたのち、それを COSMOS に組み込み、空気シャワーシミュレーションコードを完成させることを目指す。完成すれば、世界で初めて高エネルギー散乱の最新理論を反映させた空気シャワーコードになる。

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 6 件) 全て査読有

[1] "Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Open heavy flavors", H. Fujii, K. Watanabe, Nucl. Phys. A920 (2013) 78-93.

[2] "Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Quarkonium", H. Fujii, K. Watanabe, Nucl. Phys. A915 (2013) 1-23.

[3] "CGC predictions for p+Pb collisions at the LHC" J.L. Albacete, A. Dumitru, H. Fujii, Y. Nara, Nucl. Phys. A897 (2013) 1-27.

[4] "Scaling of fluctuations in pp and pA collisions, and eccentricities in relativistic heavy-ion collisions", A. Dumitru and Y. Nara, Phys. Rev. C 85 (2012) 034907.

[5] "Forward hadron productions at collider energies in CGC framework" H. Fujii, K. Itakura, Y. Nara, Prog. Theor. Phys. Suppl. 193 (2012) 216-219.

[6] "Forward particle productions at RHIC and the LHC from CGC within local rcBK evolution" H. Fujii, K. Itakura, Y. Kitadono, Y. Nara, J. Phys. G38 (2011) 124125.

[学会発表](計 11 件)

[1] K. Itakura, "CGC, Glasma, and Strong Fields", ALICE physics analysis workshop (招待講演)2014 年 03 月 03 日 筑波大学

[2] Y. Nara, "Gluon distribution from CGC" Initial State Fluctuation and Final State Correlation (招待講演)2013 年 08 月 11 日 Chengdu, China

[3] H. Fujii, "Heavy quarks from CGC in pA collisions" New Frontier in QCD 2013 (招待講演)2013 年 12 月 06 日 京大基礎物理学研究所

[4] W. Deng(発表者), H. Fujii, K. Itakura, and Y. Nara, "CGC interaction within HIJING model at forward rapidity", High-Energy Scattering at Zero Degree(招待講演) 2013 年 03 月 02 日 ~ 2013 年 03 月 04 日 名古屋大学

[5] 奈良寧(発表者), J.L. Albacete, A. Dumitru, 藤井宏次 「LHC における p+Pb 衝突のカラーガラス凝縮に基づいたモデルによる解析」日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年 03 月 29 日 広島大学

[6] H. Fujii, "Forward particle production in proton-nucleus collisions at the LHC", International Conference on Heavy Ion Collisions in the LHC Era(招待講演) 2012 年 07 月 15 日 ~ 2012 年 07 月 21 日 Quy Nhon, Vietnam

[7] 藤井宏次(発表者), 板倉数記, 奈良寧 「カラーガラス凝縮に基づく前方領域ハドロン生成の理解 II」日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 03 月 24 日 関西学院大学

[8] H. Fujii, "Forward particle productions at RHIC and the LHC from CGC within local rcBK evolution" 22nd International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2011) 2011 年 05 月 23 日 ~ 2011 年 05 月 28 日 Annecy, France

[9] H. Fujii, "Forward hadron productions at collider energies in CGC framework" 41th International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2011) (招待講演) 2011 年 09 月 26 日 ~ 2011 年 09 月 30 日 広島、宮島

[10] 藤井宏次(発表者), 板倉数記, 北殿義雄, 奈良寧 「カラーガラス凝縮に基づく前方領域ハドロン生成の理解」日本物理学会 2011 年度秋季大会 2011 年 09 月 16 日 弘前大学

[11] 北殿義雄(発表者), 板倉数記, 藤井宏次, 奈良寧 「カラーガラス凝縮に基づく LHC 実験の理論的解析」日本物理学会 第 66 回年次大会 2011 年 03 月 26 日 新潟大学(地震の影響で中止となったが、発表資料が公開された)

[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
<http://www-conf.kek.jp/past/hadron/QCDCR/>

5. 研究組織
職は現在のを記入した。

(1)研究代表者
板倉 数記(Kazunori Itakura)
平成 22 年度～25 年度
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師
研究者番号: 30415046

(2)研究分担者
奈良 寧(Yasushi Nara)
平成 22 年度～24 年度
(25 年度は分担金が無かったために連携に)
国際教養大学・国際教養学部・教授
研究者番号: 70453008

(3)連携研究者
藤井 宏次(Hirotsugu Fujii)
平成 22 年度～25 年度
東京大学大学院・総合文化研究科・助教
研究者番号: 10313173

笠原克昌(Katsuaki Kasahara)
平成 22 年度～25 年度
早稲田大学理工学術院・理工学研究所・招聘
研究員
研究者番号: 00013425

堀田直己(Naoki Hotta)
平成 22 年度～25 年度
宇都宮大学・教育学部・教授
研究者番号: 60157039

毛受弘彰 (Hiroaki Menjou)
平成 24 年度～25 年度
名古屋大学・太陽地球環境研究所・特任助教
研究者番号: 10447849

熊野俊三(Shunzo Kumano)
平成 22 年度～23 年度
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号: 10253577

齋藤晃一 (Koichi Saito)
平成 22 年度～23 年度
東京理科大・理工学部・教授
研究者番号: 40170500

平井正紀 (Masanori Hirai)
平成 22 年度～23 年度
日本工業大学・機械工学科・非常勤講師
研究者番号: 10360629

奈良 寧(Yasushi Nara)
平成 25 年度
国際教養大学・国際教養学部・教授
研究者番号: 70453008