

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17630

研究課題名(和文) 高エネルギー重イオン衝突を用いた新手法によるダイクォーク構造の探索

研究課題名(英文) Search for the diquark structure using high-energy heavy-ion collisions

研究代表者

渡辺 陽介 (Watanabe, Yosuke)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：30733597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー重イオン衝突を用いて、チャームバリオン測定を通じたダイクォーク構造の探索を行った。新しいデータの取得、および新旧データの解析の二つの軸をもって研究をすすめた。データの取得に関しては、タイムプロジェクションチェンバーの運用を行った。解析に関しては、Run-1の陽子陽子衝突データ、Run-2の鉛鉛衝突データの解析を行った。陽子陽子衝突では、既存の理論モデルはチャームバリオンの収量を過小評価することを見出した。鉛鉛衝突では、ハドロン崩壊モードを用いて解析し、その解析が十分に可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the search of the diquark structure in the quark-gluon plasma (QGP) created in heavy ion collisions. The existence of diquarks inside the QGP can be probed by studying the production of charmed baryons. This research project consists of two parts: acquisition of new data and analyses of old and new data. Concerning the new data acquisition, I was involved in an operation of the time projection chamber in 2015 and 2016 data-taking period. Concerning the analysis part, I analyzed two data sets, Run-1 pp data and Run-2 Pb-Pb data. In the pp collision data analysis, the obtained results were compared to theoretical model calculations and the models were found to underestimate the measured cross section. Using Run-2 Pb-Pb data, a peak structure corresponding to charmed lambda baryon was observed in the invariant mass spectrum of daughter particles. Thus, the feasibility of charmed lambda baryon analysis was demonstrated.

研究分野：高エネルギー原子核実験

キーワード：クォークグルーオンプラズマ チャームバリオン ダイクォーク

1. 研究開始当初の背景

近年次々と発見されている新しいタイプのハドロンを理解するうえで、ダイクォーク構造の重要さが再検討されていた。しかし、その存在を決定づける実験的な証拠はなかった。そのような中、ダイクォークが高エネルギー重イオン衝突でできる高温環境下にも存在することを予想する理論が現れた。それをいかして、私は、高エネルギー重イオン衝突を用いてダイクォークの存在に迫る本研究を提案した。実験的にも、高エネルギー重イオン衝突に特化した ALICE 実験が順調に稼働するなど、本研究を推進するうえで好条件がそろっていた。

2. 研究の目的

(1) ハドロン相とクォークグルーオンプラズマ相の間の変化は、一般的な相転移でなく、クロスオーバーであることが理論的に言われている。しかし、そのクロスオーバー領域の自由度がどのようになっているのが実験的にアプローチすることはまだほとんどなされていない。本研究は、軽いクォークが二つ組み合わさったもっとも基本的な自由度であるダイクォーク自由度の存在にアプローチする。本研究を足掛かりに、クロスオーバー領域の理解を深めていくことを目指す。

(2) クォークグルーオンプラズマ中にダイクォークが存在するかどうかはチャームバリオンの収量を測定することでわかる。理論モデルによっては、ダイクォークが存在する場合は存在しない場合に比べて、収量が 4-8 倍程度増加するという予想している。重イオン衝突データから高温環境の情報を抜き出すために、陽子陽子衝突や陽子重イオン衝突といった高温環境が実現しないと考えられる系と比較することが重要である。つまり、本研究の具体的な目的は、チャームバリオンの収量を陽子陽子、陽子鉛、鉛鉛衝突と系統的に測定することである。

3. 研究の方法

(1) 前章で述べた通り、本研究では、チャームバリオンの収量を陽子陽子、重イオン衝突で系統的に測定する。そのような研究を遂行する上で、LHC-ALICE 実験は非常に適している。主な利点としては、最高エネルギーである LHC ではチャームの衝突断面積が大きいこと、広い運動領域での飛跡検出、粒子同定能力を有していること、チャームバリオンの崩壊点を測定しうるバーテックス検出器を有していることがあげられる。チャームバリオンの崩壊生成物を ALICE 検出器で測定し、その不変質量分布を用いて、チャームバリオンの測定を行う。

(2) 私は、本研究を二つの軸を持って進めた。一つは新しいデータの取得であり、もう一つはすでにあるデータおよび取得した新しいデータの解析である。

4. 研究成果

(1) タイムプロジェクションチェンバーの運用

新しいデータの取得には、タイムプロジェクションチェンバーの実験中の運用という形で貢献した。タイムプロジェクションチェンバーは ALICE の最重要検出器のひとつであり、チャームバリオンの解析を行う本研究においても必要不可欠な存在である。特に読み出し系のトラブルに対処した。例えば、読み出しの異常停止、温度異常、レーザーキャリブレーションデータの未取得などのトラブルに対処した。

結果として、2013 まで行われた Run-1 と比較して多くのデータを取得することができた。2015 年に取得した鉛鉛衝突 (ミニマムバイアスイベント)、2016 年に取得した陽子鉛衝突データの統計は、Run-1 に比べると 5 倍以上である。

(2) Run-1 の陽子陽子衝突解析

陽子陽子衝突の解析は本研究の基礎データとして必要不可欠であると同時に、それ自体にも面白さがある。というのは、チャームバリオンは LHC エネルギーでまだほとんど測定されておらず、陽子陽子衝突におけるハドロン化機構に関して新しい知見を与えることができるからである。

特に Λ_c^+ と Ξ_c^0 というチャームバリオンに着目して研究を行った。 Λ_c^+ は $pK\pi$, pK_s^0 , $e\Lambda\nu$ という 3 つの崩壊モードで研究することが可能であるが、私は特に $e\Lambda\nu$ というセミレプトニック崩壊に着目して研究を行った。 Ξ_c^0 についても同様に $e\Sigma\nu$ というセミレプトニック崩壊モードを用いて研究を行った。これらのセミレプトニック崩壊を用いた解析は、私が ALICE 内で考案した新しい解析手法である。

セミレプトニック崩壊はほかのハドロン崩壊に比べていくつか利点と欠点がある。まず、利点はバックグラウンドが少ないということである。チャームバリオン解析で問題となってくるのは不変質量分布における多大な無相関バックグラウンドである。その点、電子はそもそも数が少ないので、無相関バックグラウンドの量を軽減することができる。また、崩壊分岐比もそのほかの崩壊と同程度の大きさがある。そのためシグナルバックグラウンド比は、ハドロン崩壊解析に比べて 5-10 倍程度よくなっている。

次に、欠点は、ニュートリノが検出できないということである。これによる帰結が二つあり、 Λ_c^+ を例に説明する。まず、 $e\Lambda$ 不変質量分布にピークが立たないため通常行うようなフィットによるバックグラウンドの寄

与の見積もりが行えないという問題である。これは、 Λ_c^+ は $e^+\Lambda$ には崩壊するが $e^+\Lambda$ には崩壊しないという特性をつかってバックグラウンドを見積もることで克服した。もう一つが、測定するものが $e\Lambda$ のペア運動量であり、 Λ_c^+ の運動量ではないということである。これは、モンテカルロシミュレーションで Λ_c^+ の運動量と、 $e\Lambda$ のペア運動量の相関を調べ、アンフォールディングの手法を用いて補正することで克服した。

セミレプトニック崩壊を用いて求めた Λ_c^+ の衝突断面積を、ほかのハドロン崩壊解析結果と比較したものを図1に示す。このように、無矛盾な結果を得ることに成功した。また図2は同様に、 Ξ_c^0 の結果を示している。 Ξ_c^0 のセミレプトニック崩壊への分岐比が知られていないため、衝突断面積に崩壊分岐比がかかった結果をここでは示している。なお、この結果は、LHCの陽子陽子衝突で Ξ_c^0 の生成を測定した最初の結果である。

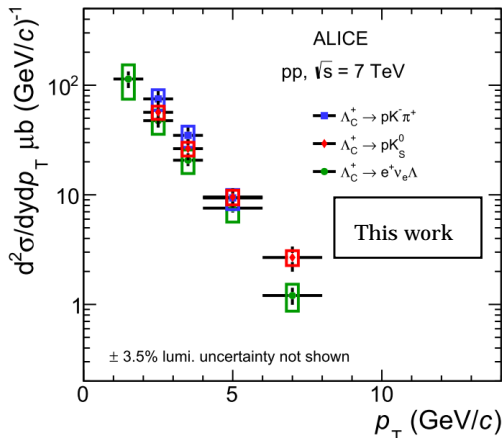


図1：異なる崩壊モードを用いて求めた Λ_c^+ の衝突断面積

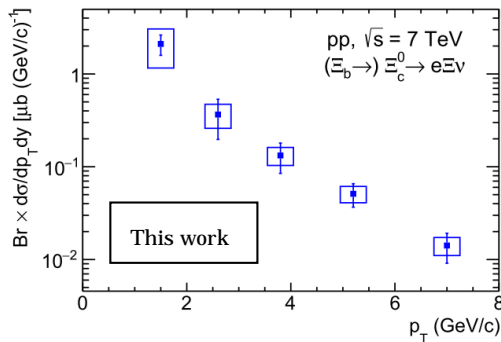


図2： Ξ_c^0 の衝突断面積にセミレプトニック崩壊への分岐比をかけた横運動量分布

さらに、これらの結果を陽子陽子衝突の理論モデルと比較した結果、現存するモデルではその収量を再現できないことが分かった。これは、陽子陽子衝突のハドロン化機構にも未知な部分があることを示す重要な結果で

ある。

以上の結果を現在投稿論文にまとめている。

(3) Run-2 の鉛鉛衝突解析

2015年に取得した鉛鉛衝突データの解析を開始した。特に Λ_c^+ の pK_s^0 への崩壊モードを用いて解析を行っている。ミニマムバイアスデータにおける不変質量分布を図3に示す。有意なピークが見えていることがわかる。ALICEは鉛鉛衝突で、チャームバリオン解析を行う上で十分な性能を持っていることを示した。

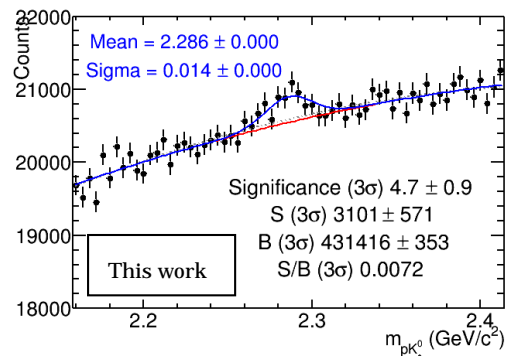


図3：鉛鉛衝突における $\Lambda_c^+ \rightarrow pK_s^0$ 解析での不変質量分布

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 5 件)(すべて査読有)

[1] Y. Watanabe, “Experimental overview on hadronic resonance production in high-energy nuclear collisions,” J. Phys. Conf. Ser. 779 no. 1, (2017) 012018.

[2] ALICE Collaboration (J. Adam, Y. Watanabe et al.), “D-meson production in p-Pb collisions at sNN = 5.02 TeV and in pp collisions at s = 7 TeV,” Phys. Rev. C94 no. 5, (2016) 054908.

[3] ALICE Collaboration (J. Adam, Y. Watanabe et al.), “Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at sNN = 5.02 TeV,” Phys. Lett. B754 (2016) 81-93

[4] ALICE Collaboration (J. Adam, Y. Watanabe et al.), “Measurement of D_s^+ production and nuclear modification factor in Pb-Pb collisions at sNN = 2.76 TeV,” JHEP 03 (2016) 082

[5] ALICE Collaboration (J. Adam, Y.

Watanabe et al.), “ Transverse momentum dependence of D-meson production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ” JHEP 03 (2016) 081

〔学会発表〕(計 3 件)

[1] Yosuke Watanabe for the ALICE collaboration, “ ALICE overview ”, 33rd Winter Workshop on Nuclear Dynamics, Salt Lake City (USA), 2017/1/8-2017/1/14

[2] Yosuke Watanabe, “ Experimental overview on hadronic resonance production in high-energy nuclear collisions ”, Strangeness in Quark Matter 2016, Berkeley (USA), 2016/06/27-2016/7/1 (invited)

[3] Yosuke Watanabe for the ALICE collaboration, “ Charmed and exotic hadron measurements with ALICE at the LHC ”, ExHIC2016, 2016/3/23-2016/3/25, 京都大学 (京都府京都市) (invited)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺陽介 (Watanabe Yosuke)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号 : 30733597