

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03632

研究課題名（和文）チャームバリオンの三体崩壊を介したマルチストレンジバリオンの研究

研究課題名（英文）Study of multistrange baryons via three-body decays of charmed baryons

研究代表者

鎌野 寛之（Kamano, Hiroyuki）

大阪大学・核物理研究センター・技術専門職員

研究者番号：00625361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：チャームバリオンの非レプトン三体弱崩壊は、崩壊後に生成される三粒子の二体部分系で形成されるマルチストレンジバリオンの存在や質量スペクトルの解明に有益な情報を提供するものとして着目され、様々な理論的アプローチに基づくデータ解析が進められている。本研究では、取扱いの困難さのために従来の理論解析では十分な根拠なく無視されてきた、崩壊後に生成される三粒子全てが関わる再散乱過程（三体終状態相互作用）に起因する効果を完全に取り込んだ微視的反応モデルを構築した。三体終状態相互作用を考慮する場合としない場合では崩壊の観測量の計算結果に大きな差異が発生する可能性があり、三体終状態相互作用の重要性を初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示されたチャームバリオンの非レプトン三体弱崩壊過程における三体終状態相互作用の重要性は、三体終状態相互作用の効果を無視する従来の実験データの解析手法では、崩壊後の二体部分系として現れるマルチストレンジバリオンの情報を正しく抽出することができない可能性を強く示唆する。本研究で開発した微視的反応モデルをさらに発展させ、当該モデルをベースにした信頼性の高い理論解析を通じてマルチストレンジバリオンの質量スペクトルを確立することにより、クォークからハドロンが生成される初期宇宙の歴史の解明への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Non-leptonic three-body weak decays of charmed baryons have been considered to provide vital information for establishing the mass spectrum of mysterious multistrange baryons. Because of this, various theoretical approaches have been applied to analyze the data for such decays and explore the multistrange baryons. However, so far the so-called three-body final-state interactions (FSIs) in the decay processes have been neglected in the theoretical analyses because the inclusion of such interactions requires highly complicated numerical treatments. In this study, we have developed a new microscopic model for the three-body decays of charmed baryons, in which the three-body FSIs are fully taken into account. With this new model, we have shown that the three-body FSIs can significantly affect the shape and magnitude of the decay quantities, indicating that incorporation of the three-body FSIs is crucial for a reliable extraction of the multistrange baryon properties from the decay data.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：ハドロン分光 マルチストレンジバリオン 部分波解析 三体崩壊

1. 研究開始当初の背景

(1) 「ストレンジネス量子数 (S) をもつバリオン (ストレンジバリオン) は宇宙にいくつ存在するか?」- この問いへの答えが、超高温ハドロン物質の熱力学的性質、ひいてはクォークからハドロンが形成される宇宙の歴史を紐解く鍵になるという報告がなされた[文献1]。これに動機づけられ、未発見のストレンジバリオンを探索する大規模実験プロジェクトが Jefferson Lab(米国) で新たに計画される[文献2] など、ストレンジバリオンの存在および質量スペクトルの確立が喫緊の課題となっている。特に、 $S=-2$ 、 $S=-3$ をもつマルチストレンジバリオンの共鳴状態 (Ξ^* 、 Ω^*) については、現時点で存在、質量、スピン-パリティの全てが確定したと言えるのは $\Xi^*(1530)$ ただ1つである[文献3]。アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s) フレーバーセクターにおける他のバリオン系列 (N 、 Δ 、 Λ 、 Σ) に比べると数が圧倒的に少なく、未発見の状態が多く存在すると予想される。

(2) マルチストレンジバリオンを探索する有効な手段として、チャームバリオン ($B_c = \Lambda_c$ 、 Ξ_c 、 Ω_c) の非レプトン三体弱崩壊 [$B_c \rightarrow M'MB$ (図1)] が近年脚光を浴びている。例えば、BABAR 実験による $\Lambda_c^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊の測定により、 $\pi^+ \Xi^-$ 二体部分系に生成される $\Xi^*(1530)$ のスピン-パリティが $3/2^+$ と初めて確定された[文献4]。今後も、世界の高エネルギー加速器実験施設から様々な $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊に関する高統計データの報告が予想され、マルチストレンジバリオンの分光学的研究において中心的な役割を担うものと期待される。

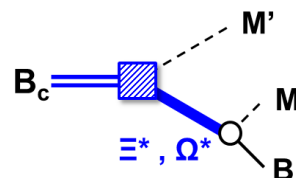


図1: $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊。 M' 、 B はそれぞれ u、d、s フレーバーセクターのメソンとバリオン。 Ξ^* 、 Ω^* は二体部分系 MB の共鳴状態として現れる。

(3) ハドロン三体崩壊の理論研究やデータ解析には、ほとんどの場合アイソバー近似が用いられる。これは、終状態の $M'MB$ 三体系を、興味の対象となるハドロン共鳴が生成される二体部分系とそれ以外に分け、後者を二体部分系と全く相互作用しないスペクテータとして取り扱うものである。この近似のもとでは、終状態の三粒子全てが再散乱に参与する「三体終状態相互作用(図2)」の効果は完全に無視される。

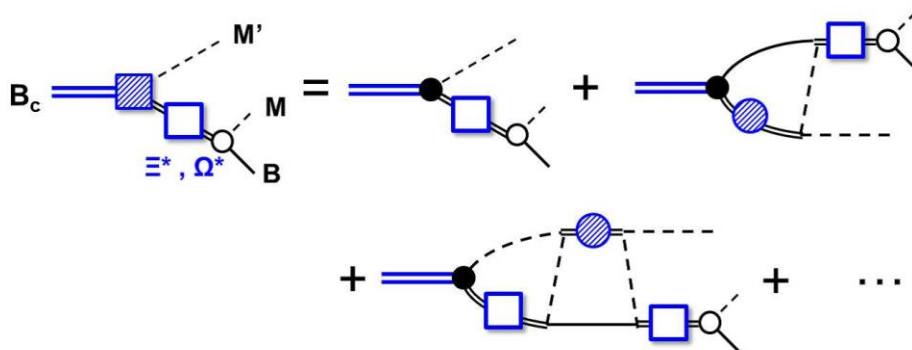


図2: $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊過程と三体終状態相互作用。弱い相互作用 (小黒丸) によりチャームバリオンが崩壊し、崩壊後に現れるハドロンが強い相互作用により多重散乱を起こす。右辺1項目がアイソバー近似に相当し、2項目以降が三体終状態相互作用を表す。 Ξ^* 、 Ω^* (白抜四角) やその他のハドロン励起状態 (斜線丸) が二体部分系において共鳴状態として生成される。

この状況のなか、研究代表者らは先行研究において、二体・三体チャンネル結合系のユニタリー性を厳密に満たすハドロン反応モデルを開発し、重い中間子の三体崩壊における三体終状態相互作用をフルオーダーで取り込むことに成功した[文献5]。重い中間子の 3π 崩壊 ($D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 等) の不変質量分布の解析を通じて、三体終状態相互作用から生じる反応の動的効果が分布の形や大きさに顕著な影響を与えることを初めて定量的に示した。これは、仮に同じ崩壊データを解析したとしても、三体終状態相互作用を考慮した場合としなかった場合では、結果として得られる二体部分系のハドロン共鳴の質量や崩壊幅の値に大きな違いが生じる可能性を示唆する。このことは、 $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊を介したマルチストレンジバリオンに関する従来の研究のほとんどにも当てはまる問題点である。

2. 研究の目的

本研究では、三体系に含まれるハドロン粒子のスピンが 0 の場合に限定されていた重い中間子の三体崩壊模型[文献5]をさらに発展させ、三体終状態相互作用の効果を完全に取り込んだ $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊の微視的反応モデルを構築する。崩壊過程における三体終状態相互作用の効果を検証するとともに、今後世界の衝突型加速器実験から報告される詳細な $B_c \rightarrow M'MB$ 崩壊データ

の包括的な部分波解析を通じて、マルチストレンジバリオン共鳴 (Ξ^* , Ω^*) のスピン-パリティや質量スペクトルの精密決定を実現する新たな手法の開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 【 $B_c \rightarrow M^*MB$ 崩壊模型の構築と数値解析コードの開発】本研究全体の土台となる、チャームバリオンの非レプトン三体弱崩壊 ($B_c \rightarrow M^*MB$ 崩壊、図 2) を記述する微視的反応模型の定式化と、実験データから Ξ^* や Ω^* 共鳴の情報抽出するために必要な数値解析コードの開発を行う。定式化にあたり、 Ξ^* や Ω^* 共鳴を含まない二体部分系 (図 2 斜線丸) については、ストレンジネス $S = 0$ セクターの γN , πN , $\pi\pi$ 反応 [文献 5, 6] および $S = -1$ セクターの $\bar{K}N$, $\pi\bar{K}$ 反応 [文献 5, 7] の精密理論解析を通じて研究代表者らがこれまでに得た (off-shell) 散乱振幅を適用する。これにより、 Ξ^* や Ω^* 共鳴を含まない二体部分系についてはパラメータフリーで決定される。一方、 Ξ^* や Ω^* 共鳴を含む二体部分系 (図 2 白抜四角) の相互作用は、本研究では分離型ポテンシャルに基づく現象論的なパラメトリゼーションを用い、相互作用に含まれるパラメータは実験データの χ^2 乗フィットにより決定する。数値解析コード開発については、重い中間子の三体崩壊の研究 [文献 5] に用いたコードを変更・改良する形で進め、コード開発にかかる時間の短縮を図る。また、三体系の散乱積分方程式を数値的に解く際に、積分核に含まれる特異点を適切に取り扱う必要がある。本研究では、まず特異点を適切に避けた散乱積分の実行が容易な複素散乱エネルギーに対する解を有限個求め、それらの解に point method [文献 8] を適用して外挿することにより、求めたい実散乱エネルギーに対する解を得る方法を採用する。

(2) 【 $\Xi_c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊への適用と三体終状態相互作用の効果の検証】上記 3. (1) で開発した新しい微視的反応模型をチャームバリオンの非レプトン三体弱崩壊 ($B_c \rightarrow M^*MB$) に適用し、従来の研究では考慮されてこなかった三体終状態相互作用に起因する反応の動的効果が、質量分布などに与える影響について検証する。本研究では、具体的な崩壊過程として、 Ξ_c^+ チャームバリオン (Ξ_c) の非レプトン三体弱崩壊である $\Xi_c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ を取り上げる。 $\Xi_c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊は、 $\Lambda_c \rightarrow KMB$ ($MB = \bar{K}\Lambda, \bar{K}\Sigma, \pi\Xi$) といった他のチャームバリオン非レプトン三体弱崩壊に比べると量子数的に許される中間状態が少ないため理論的に取り扱いやすく、三体終状態相互作用の効果をはじめとする反応模型の検証に適している。また、 $\Xi_c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊については Belle グループにより実験データが報告され始めており [文献 9]、未発見の Ξ^* 共鳴の探索に最も適した崩壊過程の一つといえる。

4. 研究成果

(1) 本研究で構築した微視的反応模型では、 $B_c \rightarrow M^*MB$ 崩壊における三体終状態相互作用は準二体チャンネル間の動的なチャンネル結合過程として記述される。当該模型を $\Xi_c \rightarrow \pi\pi\Xi$ 崩壊へ適用する最初のステップとして、本研究では準二体チャンネルとして「 $\pi^+ \Xi^*(3/2^+)$ 」、「 $\rho^+ \Xi$ 」、「 $\sigma \Xi$ 」の 3 つを考慮した。ここで、「 $\Xi^*(3/2^+)$ 」はアイソスピン $I=1/2$ 、スピン-パリティ $J^P=3/2^+$ をもつ $\pi\Xi$ 二体部分系の強い相間によって生成される状態を表し、「 ρ 」及び「 σ 」はそれぞれ $I=1, J^P=1^-$ 及び $I=0, J^P=0^+$ をもつ $\pi\pi$ 二体部分系の強い相間によって生成される状態を表す。 Ξ^* バリオンは、「 $\Xi^*(3/2^+)$ 」のような二体部分系内の共鳴状態として現れる。従来の研究では、 $\Xi_c \rightarrow \pi^+ \Xi^*(3/2^+) \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ のような準二体チャンネルが中間過程に 1 度現れる過程のみが考慮 (=アイソバー近似) されていたが、本研究で構築した微視的模型では、さらに $\Xi_c \rightarrow \pi^+ \Xi^*(3/2^+) \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^- \rightarrow \rho^+ \Xi^- \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^- \rightarrow \dots$ のような、三体及び準二体チャンネル間の遷移による再散乱過程も完全に取り込まれる。

図 3 は、 Ξ_c から $\pi^+ \Xi^*(3/2^+)$ 準二体チャンネルへの遷移の強さを特徴づける分岐関数の運動量依存性を示したものである。今回行う三体終状態相互作用の効果の検証では、弱い相互作用により Ξ_c が準二体チャンネルに遷移する最初の部分 (図 2 小黒丸部分) の形状因子に含まれるパラメータ (結合定数と運動量カットオフ) は準二体チャンネルによらず

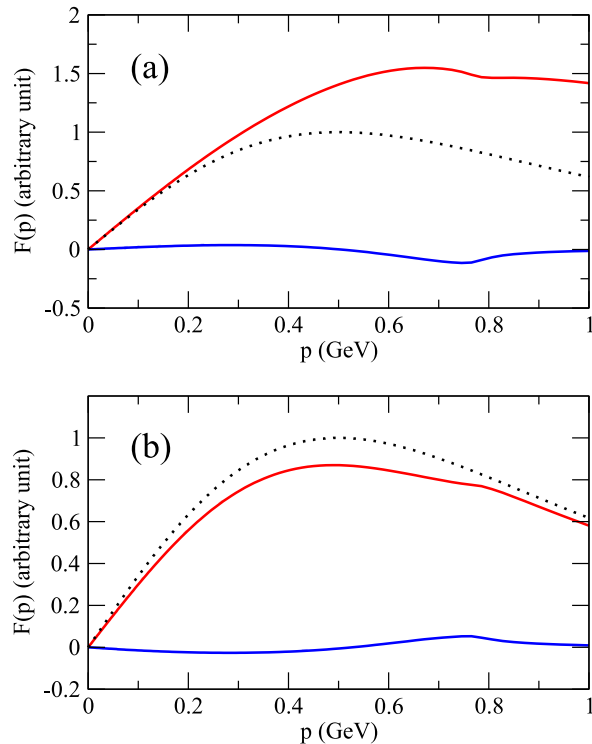


図 3: $\Xi_c \rightarrow \pi^+ \Xi^*(3/2^+)$ 遷移分岐関数 $F(p)$ の運動量依存性。 p は Ξ_c 静止系での π^+ と $\Xi^*(3/2^+)$ の相対運動量の大きさ。(赤線): 三体終状態相互作用の効果を取り込んだ遷移分岐関数の実数部の値。(青線): 同虚数部の値。(黒点線): 三体終状態相互作用の効果を見捨てたアイソバー近似による遷移分岐関数(実数値)。(a) は $\pi^+ \Xi^*(3/2^+)$ が $I=1/2, J^P=1/2^+$ をもつ場合の結果で、(b) は $I=3/2, J^P=1/2^+$ をもつ場合の結果。

全て同じ値とした。従来のアイソバー近似の結果と、三体終状態相互作用の効果を完全に取り入れたフル計算の結果との比較を通じて、以下を発見した：(a)アイソバー近似では分岐関数は実数値となることに対し、フルの計算結果では三体終状態相互作用の効果によって分岐関数は複素数値をとる。(b)運動量領域や準二体チャンネルのもつスピン-パリティ等の量子数によっては、アイソバー近似の結果とフル計算結果の実部との大きさの比が倍程度に異なる場合もありうる。(c)フル計算では、運動量 p が 0.75-0.8GeV において、三体 $\pi\pi\Xi$ チャンネルのしきいが開くことに起因する分岐関数の振る舞いの急激な変化が確認される。この振る舞いは三体終状態相互作用を考慮しないアイソバー近似では見られない。

以上の結果は、三体終状態相互作用の効果を考慮する場合と、その効果を完全に無視する従来のアプローチとでは、結果に大きな差異が生じる可能性があることを強く示唆しており、チャームバリオン の三体崩壊における三体終状態相互作用の重要性を初めて示すものである。チャームバリオン の三体崩壊データの理論解析を介して、その二体部分系に現れるマルチストレンジバリオン についての信頼できる情報を引き出すためには、三体終状態相互作用の効果を適切に取り入れた解析手法の確立が必須であると考えられる。

(2) 図 4 に、上記 4. (1) と同じ模型のセットアップを用いて計算された $\Xi c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊の $\pi^+ \Xi^-$ 不変質量分布の結果を示す。終状態の全アイソスピンは $3/2$ か $5/2$ をとるので、“ σ ” Ξ 準二体チャンネルはこの崩壊の三体終状態相互作用に寄与しない。 $\pi^+ \Xi^-$ 不変質量が 1.54GeV 付近に見られる鋭いピークは、“ $\Xi c^+ \rightarrow (\text{三体終状態相互作用}) \rightarrow \pi^+ \Xi^*(3/2^+) \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ ” において、最後の“ $\Xi^*(3/2^+)$ ”二体部分系における $\pi\Xi$ 間の再散乱の強い相関によって生成された $\Xi^*(1530)$ 共鳴によるものである。今回の模型セットアップでの計算においては、三体終状態相互作用を考慮することにより、考慮しない場合に比べてピーク付近で約 7% 程度の質量分布の減少が見られた。

本研究では、三体終状態相互作用の効果の検証に焦点を当てるため、開発したチャームバリオン の三体崩壊模型における最初の模型セットアップとして、準二体チャンネルとして $\pi\Xi^*(3/2^+)$ 、“ ρ ” Ξ 、“ σ ” Ξ の 3 つ、三体チャンネルとして $\pi\pi\Xi$ のみを考慮した。しかしながら、 $\Xi c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ をはじめとする $B_c \rightarrow M^* MB$ 崩壊のデータの理論解析を通じてその二体部分系に現れる Ξ^* 共鳴の情報を引き出すためには、 $\pi\Xi^*(1/2^+)$ 、“ $\pi\Xi^*(3/2^-)$ ”、といった他のスピン-パリティ (J^P) 状態をもつ“ $\Xi^*(J^P)$ ”二体部分系を含む準二体チャンネルをさらに考慮する必要がある。また、高励起の Ξ^* 共鳴を探索するために必要な、より高い不変質量領域の分布を調べるには、“ f_2 ” Ξ 、“ $\bar{K}^* \Lambda$ ”、“ $\bar{K}^* \Sigma$ ”といった準二体チャンネルや、 $\pi\bar{K}\Lambda$ 、“ $\pi\bar{K}\Sigma$ ”、“ $K\bar{K}\Xi$ ”といった三体チャンネルも考慮する必要がある。さらに、 $\pi\Xi^* \rightarrow \pi\Xi \rightarrow \pi\Xi^*$ のような、(強い相互作用に対して) 安定な二体チャンネルを経由する過程も存在する。今後はこれらのチャンネルや過程に起因する効果を順次取り入れていき、Belle グループ等で報告されている $\Xi c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊の詳細な理論解析を実行し Ξ^* 共鳴の質量スペクトルの確立等を目指す。

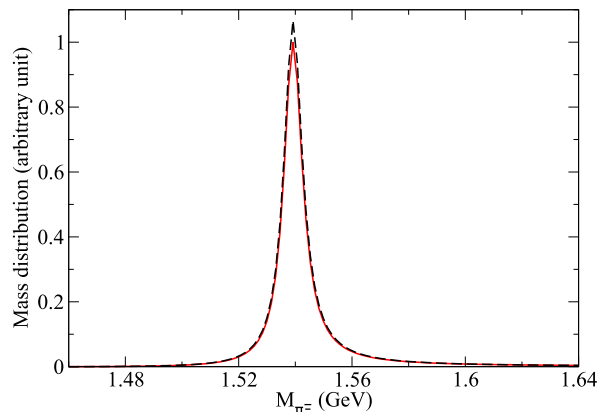


図 4: $\Xi c^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \Xi^-$ 崩壊の $\pi^+ \Xi^-$ 不変質量分布。 $M_{\pi\Xi}$ は $\pi^+ \Xi^-$ 不変質量。(赤線)：三体終状態相互作用の効果を取り込んだ場合の結果。(黒点線)：三体終状態相互作用の効果は無視したアイソバー近似による計算結果。

<引用文献>

- [文献 1] A. Bazavov et al., Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 072001.
- [文献 2] GlueX Collaboration, arXiv:1707.05284.
- [文献 3] The Review of Particle Physics (Particle Data Group), <http://pdg.lbl.gov>.
- [文献 4] B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), Phys. Rev. D 78, 034008 (2008).
- [文献 5] H. Kamano et al., Phys. Rev. D 84, 114019 (2011).
- [文献 6] H. Kamano et al., Phys. Rev. C 88, 035209 (2013).
- [文献 7] H. Kamano et al., Phys. Rev. C 90, 065204 (2014).
- [文献 8] L. Schlessinger, Phys. Rev. 167, 1411(1968).
- [文献 9] M. Sumihama et al. (Belle Collaboration) Phys. Rev. Lett. 122, 072501 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S.X. Nakamura, H. Kamano, T. Ishikawa	4. 巻 26
2. 論文標題 eta photoproduction off the deuteron and low-energy eta-nucleon interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 023001 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.26.023001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura S.X., Kamano H., Sato T.	4. 巻 99
2. 論文標題 Impact of final state interactions on neutrino-nucleon pion production cross sections extracted from neutrino-deuteron reaction data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 031301 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.031301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------