

先端理論研究グループの主な成果 チャームバリオン共鳴 $\Lambda_c(2765)$ の スピンとパリティの決定

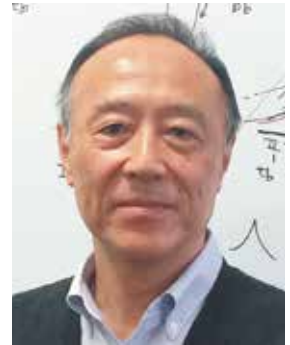
Recent achievement of Advanced Theoretical Physics Group-Determination of spin and parity of the charmed baryon resonance $\Lambda_c(2765)$

保坂 淳

先端理論研究グループ/大阪大学核物理研究センター

Atsushi HOSAKA

Research Group for Advanced Theoretical Physics/RCNP, Osaka University



概要

2019年度より新たに先端理論物理研究グループが発足した。メンバー個々に独自の研究を進めるとともに、分野横断、他グループとの連携研究が期待されている。本稿ではハドロングループの実験研究との連携による最近の成果を紹介する。チャームバリオンの共鳴状態のスピンとパリティを決定する手法の一つとして、共鳴状態が3粒子に崩壊する性質を使うことの有効性について紹介する。

1. 研究の背景・経緯

2019年度より新たに先端理論物理研究グループがハドロ物理、原子核物理、物性物理の3つの分野の理論研究者を集めて発足した [1]。メンバーは独自の研究を進めるとともに、分野横断、他グループの研究との連携研究が期待されている。このような分野横断的な研究プロジェクトの発足、成果達成は必ずしも容易ではない。まずはお互いを理解するところから始め、じっくりとお互いの興味と、問題点を探る必要がある。このような試みの一つとして、ハドロ物理の理論と実験研究者が議論を進めるなかで、最近成果が得られた。本稿はその報告である。

ハドロ物理では理論と実験研究の交流が重要であり、そのような研究スタイルは広く浸透している。本研究はそのような実験観測に触発された理論研究である。我々は当初よりハドロングループの谷田研究主幹との議論を進めてきたが、2019年の秋頃より一層の交流を深めることができ、新たな知見が得られた。そこに大きく貢献したのが、同年10月から学生実習生として半年間東海キャンパスで過ごすことになった Ahmad Jafar Arifi 君である (本籍は阪大)。

本研究の主役はチャームバリオンの励起状態である [2,3]。チャームバリオンとは、チャームクォークを含むバリオン (重粒子) であり、陽子や中性子と同様クォーク3つからできている (詳細は次の節)。クォークからなる粒子にはバリオンのほかに、クォークと反クォークによってできるメソン (中間子) がある。クォークと反クォークはフェルミオンなので、それが奇数個あるバリオンはフェルミオン、偶数のメソンはボソンである。バリオンとメソンは総称してハドロ (強い相互作用をする粒子の意味) とよばれ、その構造と相互作用などの性質を理論と実験で明らかにすることがハドロ物理である。先端研のハドロングループはその実験的研究を行なっている。

ハドロがクォークからできていることがわかっているのなら、クォークの質量やそれらの間の力がわかれば、水素原子の問題のように、シュレーディンガー方程式を解けばイオン化エネルギーや大きさがわかるかというところがわからない。クォークの世界を記述する基本法則である量子色力学 (Quantum Chromodynamics = QCD) によると、ハドロを作るクォークの力が強すぎて、元のクォークの質量や相互作用を全く変えてしまうからである。そしてその変わる様子は摂動などの簡単な方法では表現できないと考えられている。

そのQCDを直接扱う方法が格子QCDであり、近年格子

Abstract

In 2019, Advanced Theoretical Physics group was launched in ASRC. While the members perform individual researches based on their own interests, it is expected to explore interdisciplinary research and collaborations with other research groups in ASRC. Actual achievements in this direction is not very easy. We need to understand what other members are doing in comparison with our own experiences. Recently, an attempt has been made to collaborate between theorists and experimentalists. As a result, interesting results are obtained in a method to determine spin and parity of a charmed baryon by using its three-body decays.

1. Background

Advanced Theoretical Physics group was launched in 2019 [1]. While the members perform individual researches based on their own interests, there has been an attempt to explore interdisciplinary research among other research groups in ASRC and collaborate between theorists and experimentalists. This is the report about it.

In hadron physics, communication between theory and experiment has been very important. In fact, the research that we report here was motivated by newly analyzed experimental data, for which we have been discussing with Prof. Tanida in Hadron Nuclear Physics group. As a result, we have recently made an achievement with new insights both in theories and experiments. It has been realized by Mr. Ahmad Jafar Arifi who is a graduate student of Osaka University and has become an internship student at ASRC for half year from the fall 2019.

The main player of this report is a resonance of the charmed baryon, the $\Lambda_c(2765)$ [2,3]. Charmed baryons contain one or more charm quarks. Baryon is a generic name for particles such as protons and neutrons that are made from three quarks. There are other types of particles that are made from a pair of quark and anti-quark, called mesons. Baryons and mesons are called

上の場の理論、計算技術の進歩によって、数値シミュレーションによってハドロンの諸性質を説明、また予言できるようになった [4]。現在のところ陽子や中性子のようなバリオンの基底状態とそれらの相互作用の性質について予言が可能になっている。しかしながら、本研究で対象とする共鳴状態の研究は未解決の部分が多く、現象論的な有効理論によるアプローチが有効である。

ハドロンの性質を理論によって記述し予言する事が可能となった今、物質の極限の様相を予想することができる。現在、観測・測定が可能な極限状況とは、高エネルギーの重イオン衝突でできる超高温状態の物質や、中性子星やその合体に登場する超高密度物質である。超高密度物質は加速器実験でも実現できることが予想されていて、現在それが J-PARC で可能かどうか検討されている [5]。

ハドロンは現在までに、安定に存在するもののほか、短寿命で崩壊する共鳴状態まで様々なものが見つかっている。そのなかでも近年、チャームバリオンが注目されている。その理由は、陽子や中性子を構成するアップ (u)、もしくはダウン (d) クォークを重いチャーム (c) クォークに変えることによって、u, d クォークだけからなるバリオンの性質を部分から調べることができるからである。クォーク u, d, c からなるバリオンでは u, d クォークの対は強く相関したダイクォークとみなされるが、それは冒頭で述べた極限状況の物質の性質に影響すると考えられている。

原子・分子の理解が進んだきっかけが、分光による共鳴状態の発見にあり、それらがどんな自由度とどんな相互作用の下に存在しているかを解明することが理論の役割であった。ハドロンでも事情は同じで、共鳴状態を調べることによってそれらが構成される仕組みが明らかになるはずである。このような考え方の下、チャームバリオンの生成・探索が世界の大型加速器施設において行われ、計画されている。代表的なものも欧州の LHC、国内では KEK であり、J-PARC においても高エネルギーパイオンによる生成実験計画が進行している [6]。

2. 研究の内容

2.1 $\Lambda_c(2765)$

チャームバリオンのクォーク構成は u, u, c; u, d, c などであるが、その励起状態はクォークのスピンや軌道運動の組み合わせによって様々なスピンとパリティをもった共鳴状態が実現される。ハドロン物理では、それらを理論的に予言し実験で観測する、もしくはその逆に実験で観測し理論で説明する。しかしながら多くの場合定量的な予言は難しく実験先行の場合が多い。本研究では u, d, c クォークから構成されるチャームバリオンのうち、 $\Lambda_c(2765)$ とよばれる共鳴状態の一つに着目する。

$\Lambda_c(2765)$ の 2765 は MeV 単位での質量を表している。基底状態 $\Lambda_c(2286)$ から約 500 MeV 励起した共鳴状態である。そのため 2 個のパイオン (質量 $m_\pi=140$ MeV) を放出して基底状態に戻る。 $\Lambda_c^*(2765)$ は他に、寿命、電荷、スピン、パリティ、磁気能率などの特徴を持っているが、寿命と電荷以外はいずれもわかっていない。中でも重要なのが、スピンとパリティである。パリティはスピンと合わせてクォークの内部運動が S 波状態か P 波状態にあるかを区別する指標で、内部運動の情報を知る重要な手がかりとなる。そのため、素粒子の基本データを集約する PDG (Particle Data Group) [7] のデータベースには必ずスピンとパリティが記されていて、実験研究の重要な役割はそれらを決定することであり、理論研究はそれを説明することである。

クォーク u, d, c から成るバリオンの仲間には、u, u, c や d, d, c をクォーク構成とする粒子も存在し、それらは Σ_c とよばれる。数学的な分類上は、u, d クォーク 2 成分を基底とする SU(2) 対称性に基づくアイソスピン量子数で区別され、 Λ_c のアイソスピンは 0、 Σ_c のアイソスピンは 1 である。 Σ_c に関してはその基底状態のみ存在が知られ、励起状態は未発見である。またやや詳細になるが Σ_c にはスピン 1/2 と 3/2 の状態があり、後者は Σ_c^* と記される。ここで Σ_c^* について言及したのは、崩壊の計算に必要なからである。

実は実験的に断面積のピーク構造などから共鳴の存在を知ることはできて、それが Λ_c か Σ_c かを区別するのは容易ではない。最近になってアイソスピンの解析から質量 2765 の共鳴がアイソスピンゼロの Λ_c であることが確かめられた [16]。

hadrons, meaning that they interact strongly. In hadron physics their structure and interactions are studied as composite particles of quarks. The Hadron Nuclear Physics group at ASRC conducts experimental studies.

It is known that hadrons are made of quarks. However, it is not straightforward to describe their properties as we do for hydrogen atom that can be studied by solving the Schrödinger equation. According to the fundamental law of the strong interaction, quantum chromodynamics (QCD), forces among quarks are too strong such that the properties of the original quarks such as masses and interactions are significantly modified. And the way how they are modified does not seem to be written down easily by for instance the method of perturbation.

A direct method to approach hadrons from QCD is the lattice QCD. Recent developments in the field theory on the lattice and in computational methods enable to explain hadron properties by numerical simulations [4]. By now ground state properties of such as protons and neutrons, and interactions among them are derived. In particular, baryon interactions that are not possible to study in actual experiments can be predicted by the lattice QCD. However, the applicability of the method is rather limited to resonances, where empirical effective methods are useful.

By clarifying and being able to predict various properties of hadrons, it is possible to know matter properties in extreme conditions, which are realized in high energy heavy ion collisions or in stellar phenomena such as neutron stars and their mergers. The former is the place where ultra-high temperature environment is realized, while in the latter ultra-high density nuclear matter is formed. How such matter is created is now being discussed at J-PARC [5].

So far many hadrons have been found including stable ones as well as unstable and short-lived ones. Among them, charmed baryons have been attracting interest recently. A reason is that by replacing one of light u or d quarks by a heavy charm quark, part of baryon properties are expected to be studied. One of them is that of a pair of u, d quark in a u, d, c baryon that is called diquark and is expected to play important roles in the matter under extreme conditions that are discussed in the earlier section. An experimental plan is making progress at J-PARC for the production of charmed baryons [6].

2. Contents of research

2.1 $\Lambda_c(2765)$

Contents of charmed baryons are u, d, c; u, u, c, etc. Their resonances can take various spin and parity due to various combinations of spins and orbital motions of quarks. In hadron physics, their properties are predicted by theories which are verified by experiments, or vice versa. However, theoretical predictions is not easy and developments have been led by experimental observations in many cases. The $\Lambda_c(2765)$ is one such baryons.

Being expressed as $\Lambda_c(2765)$, 2765 is its mass value in units of MeV. It is about 500 MeV heavier than the ground state $\Lambda_c(2286)$. Therefore, $\Lambda_c(2765)$ can decay into the ground state $\Lambda_c(2286)$ by emitting two pions ($m_\pi=140$ MeV). The $\Lambda_c(2765)$ has other properties such as life time, electric charge, spin, parity, magnetic moments, etc. Among those, spin and parity are important. Parity carries information of orbital motion of quarks; whether they are in S-wave or P-wave orbits. Therefore, the data base of Particle Data Group (PDG) list these quantum numbers with spin and parity [7]. Experiments determine and theories explain them.

The quark content of Λ_c baryons is u, d and c for

2.2 崩壊

スピンとパリティの決定に役立つのが Λ_c (2765) 共鳴状態の崩壊現象である。具体的には Λ_c (2765) が 2 個の π 中間子を放出して基底状態の Λ_c (2286) に遷移する現象である。最終的に 3 個の粒子に崩壊するので 3 粒子崩壊という。これは原子の励起状態が 2 個の光子を放出して基底状態に遷移する崩壊に対応している。

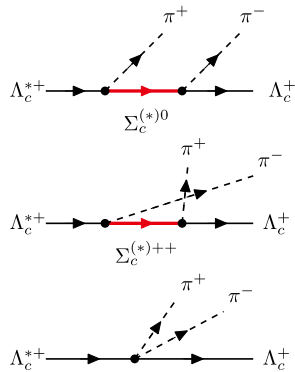


図 1 Λ_c (2765) (Λ_c^{*+} のように表記) の崩壊図。

Fig.1 Diagrams for the decay of Λ_c (2765) (denoted as Λ_c^{*+}).

このような崩壊過程は、図 1 のようなダイアグラムによって表現することができる。上の 2 つは親の Λ_c (2765) 粒子が 1 個の π 中間子を放出し、赤線で示した中間状態の $\Sigma_c^{(*)}$ バリオンを経由のち、最後にパイオンを 1 個放出して Λ_c の基底状態に遷移する 2 段階過程を示している。2 つの図が必要なのは、初めに正電荷、あるいは負電荷のパイオンのいずれかが放出されるかによって 2 通りの場合が可能になるからである。図の中で粒子を表す記号の肩につけた符号は、それぞれの場合に対応した粒子の電荷を示している。理論的にはこれらの他に、3 番目のように中間状態を経由せずに直接 1 段階で 2 個のパイオンを放出して崩壊する過程もありえる。量子力学的にはこれらの反応の振幅を重ね合わせ (重ね合わせの原理)、絶対値の 2 乗を計算することで、崩壊の強度 (寿命) を計算することができる。

2.3 理論

実際の計算に必要な相互作用は有効ラグランジアンによって記述される [8]。その形はローレンツ不変性など、強い相互作用が満たすべき対称性を要請することで比較的簡単に書き下すことができる。さらに今興味のある崩壊反応に参与するバリオンは重く非相対論近似が使えることから、相互作用の形はさらに簡単になる。例として、図 1 の上 2 つの図に示される頂点 (3 個の粒子が交わる点) に対応する相互作用ラグランジアンをいくつか示すと

$$L_{1/2^- \rightarrow 1/2^+} = g_S \psi_{1/2^-}^\dagger \psi_{1/2^+} \quad (1)$$

$$L_{3/2^- \rightarrow 1/2^+} = g_D \psi_{1/2^+}^\dagger (\vec{S}^\dagger \cdot \vec{q})(\vec{\sigma} \cdot \vec{q}) \psi_{3/2^-} \quad (2)$$

$$L_{1/2^+ \rightarrow 1/2^+} = g_S' \psi_{1/2^+}^\dagger \vec{\sigma} \cdot \vec{q} \psi_{1/2^+} \quad (3)$$

左辺のラグランジアンに示した添字は崩壊過程の始状態、終状態にあるバリオンのスピンとパリティを表す。右辺の $\psi_{1/2^-}$ などは添字に示されたスピンとパリティをもつバリオンのスピノル関数で、演算子 $\vec{\sigma}$ と \vec{S}^\dagger はバリオンのスピンを $1/2 \rightarrow 1/2$, $1/2 \rightarrow 3/2$ のように変化させるスピン遷移行列である。これらの行列要素はバリオンのスピン量子数と演算子のランク 1 を組み合わせた、Clebsch-Gordan 係数によって表現することができる。例えば馴染深い 2 行 2 列のパウリ行列の成分は規格化定数を除いてこの係数になっている。さらに \vec{q} はパイオンの持ち運ぶ運動量で、その次数は量子化された軌道角運動量の大きさに等しい。例えば (1) の第 1 項にそのような運動量が含まれないのは、崩壊先のパイオンとバリオンの相対軌道角運動量がゼロ、すなわち S 波であることを示している。同様に (2), (3) はそれが D 波および P 波にあることを示している。このように、相互作用に参与するバリオンのスピンとパリティが決まると、相互作用の形が決る。その結果放出される 2 粒子間の軌道角運動量が決まり、その角度分布も決定される。

(1)-(3) の相互作用 (頂点) を 2 回繰り返すことによって、すなわち 2 次の摂動公式を使って図 1 の 2 段階過程による

both ground and resonant states. In addition there are other similar baryons made from u,u,c or d,d,c. They are called Σ_c . Mathematically they are classified by the SU(2) symmetry of the u,d quarks, and labeled by (approximately) conserved isospin quantum number. The isospin of Λ_c is zero while that of Σ_c is one. For Σ_c , only the ground states are found. A rather detailed fact is that there two Σ_c 's, one is of spin 1/2 and the other 3/2. The latter are denoted as Σ_c^* . The reason that we mention this here is that the $\Sigma_c^{(*)}$ plays an important role for the decay of Λ_c (2765).

In fact, though the resonance that we have denoted Λ_c (2765) has been known to exist for some time, its isospin has not been known until recently. It is only recent that isospin analysis has been performed to confirm that the resonance is indeed Λ_c rather than Σ_c [16].

2.2 Decay

The three-body decay of Λ_c (2765) by emitting two pions can be efficiently used for the determination of spin and parity. The decay process resembles that of atomic resonances by emitting two photons.

Such a decay can occur by three processes as expressed by the diagrams in Fig. 1. In the upper two, the parent Λ_c (2765) emits one pion turning into a $\Sigma_c^{(*)}$ baryon, and subsequently $\Sigma_c^{(*)}$ emits another pion. Thus, we call them as sequential (two step) processes. The two diagrams are needed depending on the charges of the first and second pions. The symbols + or - of upper indices indicate their charges. In addition, it is also possible to emit two pions simultaneously which is shown in the third diagram and is called direct (one step) process. Quantum mechanics requires that these three amplitudes are added coherently and that the absolutely squared amplitude gives the strength of the decay (life time).

2.3 Theory

Actual computation is performed by using effective Lagrangians [8]. They are constructed by imposing symmetries such as Lorentz invariance and parity conservation of the strong interaction. In the present study, furthermore, by taking an approximation of heavy baryons such that they are treated in a non-relativistic formalism. Shown below are several typical Lagrangians for vertices where three particles merge as shown in the upper two diagrams of Fig. 1.

$$L_{1/2^- \rightarrow 1/2^+} = g_S \psi_{1/2^-}^\dagger \psi_{1/2^+} \quad (1)$$

$$L_{3/2^- \rightarrow 1/2^+} = g_D \psi_{1/2^+}^\dagger (\vec{S}^\dagger \cdot \vec{q})(\vec{\sigma} \cdot \vec{q}) \psi_{3/2^-} \quad (2)$$

$$L_{1/2^+ \rightarrow 1/2^+} = g_S' \psi_{1/2^+}^\dagger \vec{\sigma} \cdot \vec{q} \psi_{1/2^+} \quad (3)$$

On the left-hand side of these equations, the lower indices indicate the spin and parity of the baryons participating the transition. On the right-hand side, ψ are the spinor functions for baryons of spin and parity as indicated in the lower indices. Operators $\vec{\sigma}$ and \vec{S}^\dagger are for transitions between spin states of $1/2 \rightleftharpoons 1/2$, and of $1/2 \rightleftharpoons 3/2$, respectively. Their matrix elements are proportional to the Clebsch-Gordan coefficients formed by the two baryon spins and the rank of the operators of $\vec{\sigma}$ or \vec{S}^\dagger . For example, they are nothing but the familiar Pauli matrices for the transitions between spin 1/2 baryons. Moreover, \vec{q} is the momentum carried by the emitted pion, and its power corresponds to the quantized orbital angular momentum between the pion and the baryon. For instance, in (1) there is no q , which means that the orbital angular momentum is zero, namely S-wave

崩壊を計算することができる。中間状態には $\Sigma_c^{(*)}$ 粒子が現れる。パイオンのアイソスピンが1なので、その保存則からアイソスピン1を持った粒子が現れる。その中間状態はプロパゲータを使って表現できる。3番目の直接過程は、対応するラグランジアンが与えられれば1次の摂動公式を使って計算できる。以上これらの振幅 $A(1)$, $A(2)$, $A(3)$ を重ね合わせ全振幅 A を構成し

$$A = A(1) + A(2) + A(3),$$

これを2乗することで、3粒子が四元運動量 p_1, p_2, p_3 をもった状態に崩壊する確率を求めることができる。すなわち

$$P(M \rightarrow p_1, p_2, p_3) = |\langle p_1, p_2, p_3 | A | M \rangle|^2$$

である。実際の計算に必要な振幅は5個である。なぜなら図1の2段階過程については、中間状態として Σ_c と Σ_c^* の2通りが許されるからである。

3粒子崩壊の場合、それらの運動量 p_1, p_2, p_3 は色々な値を取り得る。そのため適当な2粒子対を選ぶと、その2粒子重心系におけるエネルギー（不変質量と呼ばれる）は様々な値をとることができる。そこでそれらの関数として強度分布を調べることができる。3粒子のうち2粒子を選ぶ場合の数は3通りあるが、全体の運動量とエネルギーの保存則から、3通りのうち2通りのエネルギーが独立な変数であることがわかる。このように2個の不変質量の関数として崩壊確率の強度分布を表したあたかも地図のようなプロットは、今日“Dalitzプロット”と呼ばれ、崩壊に関与する粒子の性質によって異なる様相を示す。それをみることによって、崩壊の親粒子のスピンとパリティを決定できるのである。

2.4 結果

本研究を始めるきっかけとなった実験はすでに KEK Belle チームによって行われ、谷田研究主幹と共同研究者によってその解析がほぼ最終段階にまで行われている。その詳細は彼らの報告を待つこととして、理論研究の具体的な内容と成果は以下の通りである。

- ・ $\Lambda_c(2765)$ のスピンとパリティはわからないものとして、 $1/2^+$, $3/2^+$, $5/2^+$ の合計6通りを想定し、それぞれの場合について崩壊率を計算した。

- ・相互作用の強さを表す結合定数 g_S などはクォーク模型による値を採用した [9]。

- ・図1のうち最後の4粒子相互作用の強さは未知である。これに関してはすでにわかっている実験による観測事実を受け入れて [10]、崩壊過程にほとんど寄与しないものとして無視した。これを説明する理論はいまのところ存在しない。

- ・3個の不変質量の中から2個を選ぶ仕方として、可能な3通りのすべてについて Dalitz プロットを作成した。その結果、すべての場合にスピンとパリティ依存して特徴的な振る舞いが見られた。その詳細は現在執筆中の論文に譲ることとする [11]。

- ・一般に崩壊の強度分布は各粒子のスピンとパリティのみに依存するような系の幾何学的な性質で決まる部分と、結合定数の強さなどの動的な性質に依存する部分に切り分けられる。前者の幾何学的な性質は対称性のみから決まる普遍的な性質である。一方後者は粒子の内部構造の詳細に依存し、個々の特徴を反映している。今回の理論解析によってこれらの関係、役割を理論的に制御することができる。その結果実験から引き出せる情報の確からしさ、すなわち模型（非）依存の性質を評価することができる。

3. 成果の意義と波及効果

Dalitz プロットはもともと理論研究者の R.H. Dalitz によって 1953 年から 1954 年にかけて考案されたものである [12]。その手法は今では素粒子実験の解析には不可欠の道具となっている。

一般に3個以上の粒子放出を伴う崩壊現象の解析で、2粒子対の不変質量を変数とする解析を行うことで、2粒子散乱の共鳴状態を探索することができる。この方法が威力を発揮するのは、散乱実験ができない、例えば標的や入射粒子いずれか一方もしくは両方としては短寿命で用意できない場合にも解析が実現できることにある。それにより様々な新粒子の発見をもたらした。その結果は少なくとも5つのノーベル賞を受賞した発見に使われていると言われている [13]。今回、このような観測量に関するデータと直接比較できる理論研究を行なった。

decay. Similarly, (2) and (3) indicate that they are D and P waves, respectively. These facts imply that once spin and parity are known, the angular dependence of the decaying particles is determined.

By repeating the interactions twice as given in (1) - (3) in the 2nd order perturbation theory, we can compute the upper two diagrams for the sequential decays. In the intermediate state, a $\Sigma_c^{(*)}$ particle appears. The third diagram is computed by the first order perturbation theory once the relevant interaction is given. Adding these amplitudes, $A(1)$, $A(2)$, $A(3)$

$$A = A(1) + A(2) + A(3),$$

and making the absolute square $|A|^2$, the probability of the decay going into three particles of momenta p_1, p_2, p_3 is obtained,

$$P(M \rightarrow p_1, p_2, p_3) = |\langle p_1, p_2, p_3 | A | M \rangle|^2$$

In reality we need five amplitudes, because each sequential process in Fig. 1 contains two intermediate states of $\Sigma_c^{(*)}$.

The probability as functions of p_1, p_2, p_3 looks complicated. However, there is a very efficient way to express them as functions of two kinematic variables. For three-particle decays, three momenta p_1, p_2, p_3 can take various values. Because of this, the total energy of a pair of two particles can take various values. There are three ways to pick up a pair of two particles among three, and so there are three possible energies corresponding to these pairs. However, only two of them are independent due to the conservation of energy and momentum. The decay probabilities are then expressed as functions of the two energy variables. The resulting two dimensional plot that looks like a map is now called the Dalitz plot. Their structure, probability distribution on the plot, depends on the properties of the decaying particles, which is the principle to determine the spin and parity.

2.4 Results

The experiments which motivated the present work have been done by Belle research group at KEK, and their data has been being analyzed by Tanida and other collaborators. The details of it should be reported elsewhere. Here we summarize the results of what we have done in the present theoretical study as explained in the previous sections.

- Because the spin and parity of $\Lambda_c(2765)$ are not known, we have investigated the six cases of $1/2^+$, $3/2^+$, $5/2^+$.

- The coupling constants such as g_S in the Lagrangians (1) - (3) are computed by the quark model [9].

- The last process of Fig. 1 is not known theoretically. However, experimental data indicate that it is not very important [10]. Therefore, accepting this fact, we focus on the first two sequential processes. Currently we do not have a good theory to explain this.

- We have generated Dalitz plot for all three choices of two pairs of momenta. All of them show characteristic features depending on the spin and parity of $\Lambda_c(2765)$. Details of the structure of the Dalitz plot will be shown elsewhere [11].

- In general, structure of the plot are determined by two factors; one is a geometric factor which is characterized by symmetry and is model independent, and the other is a dynamical factor such as interaction strengths and form factors. In particular, the former geometric one is due to heavy quark symmetry. In the present theoretical study we have been able to control them. In this way we can discuss model independent and dependent behaviors, which is important to know what theory predictions look like.

もちろん理論研究は実験データの解析ではなく、しっかりと理論的な基盤を有し、その結果をデータと直接比較できる形に持っていく必要がある。本研究によって、そのような目的の一部が達成されたと思う。前節の結果でまとめられたように、Dalitz プロットの強度分布で幾何学的に普遍的な性質に支配される部分と、系の動力学に依存する部分に切り分けができ、制御できようになった意義は大きい。

4. 展望

本研究は共鳴状態 $\Lambda_c(2765)$ のスピンとパリティを特定する方法として、Dalitz プロットが有効に使えることを紹介した。理論の定式化には有効ラグランジアンを採用することで、どこまでモデルに依存せず判定できるかについても議論できた。この手法は今後他の共鳴状態の解析にも使える。今回はパイオンを1個ずつ2回にわたって崩壊する2段階過程の解析を行なった。理論研究としては1度に2個のパイオンを放出する直接過程がなぜ少ないかを明らかにする必要がある。現在のところこのような理論はない。

今回の研究に必要なパラメータの多くはクォーク模型によるものを用いた。その結果説明できる場所とそうでない場所が見えてきた。特にクォーク模型では崩壊の全強度、すなわち寿命を説明することが困難なこともわかった。これは粒子の動力学的な性質であり、今後その解明が必要である。

$\Lambda_c(2765)$ の質量は基底状態の $\Lambda_c(2286)$ と比べ約 500 MeV 重い。このような基底状態は u,d,s クォークからなるバリオンでも多数知られていて [7,14]、陽子の場合にはその発見者にちなんで Roper 共鳴とよばれ [15]、そのスピンとパリティは $1/2^+$ であることが知られている。もし $\Lambda_c(2765)$ のスピンとパリティも同様に $1/2^+$ だったとすると、フレーバーによらず似たような共鳴状態が存在することになり、ハドロン物理に興味深い問題を提示することになる。陽子の Roper 共鳴は、クォーク模型によれば 500 MeV の2倍程度重い質量を持つと予想され、実験データと相反することから、長らく議論されていて解決されていない問題となっている。 $\Lambda_c(2765)$ の性質がより判明することで、この長年の問題解決につながるアイデアが生まれるかもしれない。

謝辞

この報告内容は、Ahmad Jafar Arifi (阪大 RCNP)、谷田聖 (ASRC)、永廣秀子 (奈良女) の各氏との共同研究に基づいている。

参考文献 References

- [1] <https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/atp/index.html>
- [2] <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-charmed-baryons.pdf>
- [3] <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-quark-model.pdf>
- [4] 青木真也、「格子 QCD によるハドロン物理」、物理学最前線、共立出版 (2017)、岡真、須藤彰三監修
- [5] <https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/hadron/jparc-hi/>
- [6] <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~noumi/puki/E50/>
- [7] <http://pdg.lbl.gov/index.html>
- [8] A.J. Arifi, H. Nagahiro and A. Hosaka, Phys.Rev. D95 (2017) no.11, 114018.
- [9] Hideko Nagahiro, Shigehiro Yasui, Atsushi Hosaka, Makoto Oka, Hiroyuki Noumi, Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 014023.
- [10] K. Tanida, Private communications.
- [11] A.J. Arifi, H. Nagahiro, K. Tanida and A. Hosaka, in preparation.
- [12] R. H. Dalitz (1953), Philosophical Magazine. 44 (357): 1068-1080, doi:10.1080/14786441008520365
- [13] <https://www.theguardian.com/science/2006/jan/24/obituaries.highereducation>
- [14] M. Takayama, H. Toki, A. Hosaka., Prog. Theor. Phys. 101 (1999) 1271-1283.
- [15] L.D. Roper, Phys. Rev. Lett. 12 (1964) 340-342.
- [16] "Experimental determination of the isospin of $\Lambda_c(2765)^+ / \Sigma_c(2765)^+$ ", By Belle Collaboration (A. Abdesselam et al.) arXiv:1908.06235 [hep-ex].

3. Significance and impact of research results

Dalitz plot was originally invented by a theoretical physicist R.H. Dalitz around 1953-1954 [12]. The method is now indispensable for the analysis of particle physics experiments.

In reactions of decays involving three or more particles, the analysis in terms of an invariant mass of a two particle pair enables to search resonances in the two particle scattering. The advantage of this method is that even scatterings that are not possible in laboratories are realized. Examples of such scatterings contain one or two unstable particles. Because of this, three or more particle decays and their analyses using the Dalitz's method have led to the achievements of at least five Nobel prize awarded researches [13]. The analyses of Dalitz plots are useful also for theory works which need experimental data. This motivated the present work.

Of course, theoretical studies are not just analyses of experimental data. Their results must have a firm basis of theories, which can then be compared with experimental data. In the present study the purpose has been achieved to significant extent. As summarized in the previous section, it is an important achievement that we can now differentiate and control what are model independent and what are dependent.

4. Perspectives

In this report, we have discussed the advantage of using the Dalitz plot to identify the spin and parity of $\Lambda_c(2765)$. In theoretical analysis, effective Lagrangians are employed. By this it has become possible to see the extent that we can determine the unknown spin and parity in a model independent/dependent manner. This method can be applied to various resonances when their decays are measured. In this work, we have investigated theoretically the sequential process, by accepting an empirical fact that the direct contribution is small. The reason for that is not known.

In comparison with quark model calculations, we have verified that the shape of the Dalitz plot is determined when spins and parities of the participating particles are known. Contrary the decay strength, namely the life time, is not explained by the quark model. The life time is a dynamical property and should be explained in the future.

The mass of $\Lambda_c(2765)$ is about 500 MeV heavier than the ground state $\Lambda_c(2286)$. Many such ground states are known in baryons consisting of u, d, s quarks [7,14]. For the proton resonance, it is called Roper resonance after the discoverer [15] and known for various combinations of flavors with spin and parity $1/2^+$. If the spin and parity of $\Lambda_c(2765)$ were the same as those, we have added another similar particle with different flavors including heavy flavors, which will provide an interesting problem in hadron physics to be understood. In fact, the quark model predicts the Roper resonance of spin and parity $1/2^+$ at about twice heavier than the proton, which has been an unresolved problem. By confirming the properties of $\Lambda_c(2765)$, we expect new ideas to solve the relevant problems.

Acknowledgements

This report is based on the collaboration with Jafar Ahmad Arifi (RCNP, Osaka University), Kiyoshi Tanida (ASRC) and Hideko Nagahiro (Nara Women's University).