

氏名(本籍)	関谷 絢子 (神奈川県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博課第354号
学位授与年月日	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 人間文化研究科
論文題目	Measurements of branching fraction and di-pion mass spectrum in $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ decays ($B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 過程における崩壊分岐比と π 中間子対質量スペクトルの測定)
論文審査委員	(委員長) 助教授 宮林 謙吉 教授 野口 誠之 教授 林井 久樹 教授 見目 正克 助教授 村松 加奈子

論文内容の要旨

本論文は、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市:略称KEK)にあるKEKB電子・陽電子加速器で生成、Belle測定器で記録した大量のB中間子崩壊事象の中から、稀に現れる特定の崩壊事象 $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ を選別し、その崩壊分岐比を測定するとともに、 π 中間子対の質量スペクトラムを詳しく調べてこの崩壊事象中の $\pi^+ \pi^-$ が主として ρ^0 中間子を経ていることを示した研究をまとめたものである。

まず、序論である第1章において、ほとんど全ての物理法則は粒子と反粒子の間で対称であるにも関わらず、現在の宇宙には粒子のみが残り、反粒子が残っていないという矛盾(matter-antimatter asymmetryの問題)に密接な関連を持つCP非保存に関連して、B中間子崩壊、特に B^0 および \bar{B}^0 の両方が崩壊できる終状態の研究が重要であるという観点から、 $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 過程の研究を行う動機が述べられている。

第2章は、この研究を行うにあたっての実験装置の詳細な記述である。上述のKEKB加速器は周長3kmのリング状の電子・陽電子衝突型加速器であり、そのビーム衝突点近傍に衝突反応の結果生じた粒子を捉える大型汎用スペクトロメーターであるBelle測定器が設置されている。どちらも建設に5年を要した大型設備である。特にKEKB加速器はB中間子の稀な崩壊現象の観測を可能にするた

めに大量のB中間子対生成を実現する必要があり、関係者の多大なたゆまぬ努力によって世界最高輝度の電子・陽電子衝突を達成している。また、Belle測定器は荷電粒子の運動量を高精度で測定するとともにその種類を高い検出効率と純度で識別する性能を有している。その性能は、精密な半導体検出器、大容積飛跡検出器、チェレンコフ検出器、高分解能カロリメーター等の様々な役割に応じた検出器を有機的に組み合わせたシステムを構築することによって実現しており、そのそれぞれについて詳しく述べている。

第3章では大量の生データから、目的とする $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 崩壊事象をいかに効率よく選別し、かつバックグラウンドを低減するかの手順についての記述である。この章は筆者が特に工夫した以下に述べる三点について、詳しく記述している。すなわち、第一にBelle測定器の高い粒子識別能力を生かして荷電K中間子を可能な限り排除したこと、第二に J/ψ 中間子の崩壊で生じる荷電レプトン対の崩壊点と π 中間子対の生成点が3mm以内の近距離にあることを要求して K_S^0 中間子のように比較的長寿命な粒子から生じた π 中間子対やランダムな組み合わせによるバックグラウンドの低減を図ったこと、その上で第三に大量のモンテカルロシミュレーションデータを用いてバックグラウンドになり得る過程の種類と量を詳細に調べて、B中間子崩壊事象の再構成で鍵になる ΔE と呼ばれる量の分布を用いれば信号とバックグラウンドを効果的に分離でき、信号事象数の抽出が信頼に足るものになることを示したこと、の三点である。

第4章では、選別した1098個の候補事象について、バックグラウンドを、中間子対の不変質量($M_{\pi^+\pi^-}$)の関数として求めた上で、 $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 過程の、中間子対をつくる中間状態にどのようなものが寄与しているか明らかにするために、 ρ^0 、 f_2 という二つの共鳴状態と、特定の共鳴を経ない非共鳴過程を取り入れ、これらの間の量子力学的干渉効果までも考慮した確率密度関数を作成し、これを用いたフィットを実行して、崩壊分岐比を得ている。その結果、

$$\begin{aligned} B(B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) &= (2.2 \pm 0.3 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.)}) \times 10^{-5} \\ B(B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0) &= (1.9 \pm 0.2 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.)}) \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (1)$$

を得て、この崩壊過程には $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ の寄与が支配的であることを示した。

最終章では、上記の測定値について意義を論じている。これまでに他の実験により出版された測定と比較して2倍以上の精度向上を達成したこと、また、将来 $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ 崩壊におけるCP非保存測定に進む際に非共鳴過程の寄与が小さいので、それに起因する不定性もまた小さく、更なる研究発展の基盤を築いたことを示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市：略称 KEK）にある KEKB 電子・陽電子加速器で生成、Belle 測定器で記録した大量の B 中間子崩壊事象の中から、稀に現れる特定の崩壊事象 $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ を選別し、その崩壊分岐比を測定するとともに、 π 中間子対の質量スペクトラムを詳しく調べてこの崩壊事象中の $\pi^+ \pi^-$ が主として ρ^0 中間子を経ていることを示した研究をまとめたものである。B 中間子の種々の崩壊過程に関する研究は、CP 非保存つまり粒子・反粒子間の物理法則の違いに密接に関連しており、現在の宇宙の状態を理解する上で最も基本的な課題を解く鍵となる知見をもたらすものである。

1973年、小林・益川は物質の最も基本的構成要素であるクォークが6種類以上存在すれば、CP 非保存が自然に導き出せることを見いだした。その後、予言通りに6種類のクォークの存在が実験的に確認された。さらに三田・ビギ・カーターは稀に現れる B 中間子の崩壊モードのうち、 B^0 と \bar{B}^0 の両方が崩壊できる $J/\psi K_S^0$ なる終状態を選んで両者の崩壊時刻分布を比べれば、そこに大きな差、すなわち CP 非保存が現れる可能性を指摘した。これを契機として、大量の B 中間子を生成し、その崩壊過程を詳しく調べる実験が提案され、日本の研究者たちを中心にした国際共同実験グループ（Belle 実験グループ）が組織され、KEK に KEKB 加速器と Belle 測定器を5年の歳月をかけて建設するに至った。

Belle 実験は、1999年に最初の電子・陽電子衝突反応を記録した後、KEKB 加速器の輝度向上の恩恵にあずかって順調にデータの蓄積量をのばし、2001年に予言通り $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊における CP 非保存を確定した。そこで、B 中間子の他の崩壊モードについても研究を展開し、小林・益川理論がクォークの世代間混合と CP 非保存の問題を全て説明できるのか、あるいは実験的測定値と小林・益川理論の間の差異という形で新しい物理の兆候を見いだすことができるのか、という課題に対する知見を集めることが近年非常に重要になってきた。

この観点から、著者が選択した $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 過程は重要な役割を果たすものである。この崩壊過程はクォークレベルで言えば $b \rightarrow c\bar{c}d$ という遷移で生じるものであり、すでに確定した $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊よりも複雑である。理論的には標準的な素過程（ツリー過程）以外に1ループの高次過程（ペンギン過程）が寄与し得るが、後者の大きさに関して予言が存在しないことが挙げられる。一方、実験的には二つの困難を克服する必要がある。第一に標準的な素過程（ツリー過程）がカビボ抑制なるメカニズムの影響を受けるので、この抑制を受けず約20倍の崩壊分岐比を持つ $B^0 \rightarrow J/\psi K^{(*)}$ 崩壊によるバックグラウンドを慎重に理解・低減しなくてはならない。第二に荷電 π 中間子対が

ρ^0 共鳴を中間状態として経て生じるものは既知であるが、他の共鳴や非共鳴生成の寄与の大きさについては確定していないので、それらを明らかにしないかぎり複数の寄与の混ざり合いを評価できず、CP 非保存測定を目指す上で障害となる可能性がある。著者はこの二点を注意深くかつねばり強く解決した。第一の困難は、まず2005年夏までに蓄積した4億5千万という大量のB中間子対生成事象データを使用し、Belle 測定器のすぐれた荷電粒子識別能力を生かして荷電K中間子を排除することによってバックグラウンドの低減を図った。その上で、それでも残存するバックグラウンドに対して大量のモンテカルロシミュレーションデータと詳細な比較を行った結果、 ΔE なる運動学的変数の分布を用いれば信頼に足る信号事象数の抽出が出来ることを示して解決した。第二の困難は、 ρ^0 以外の共鳴状態として f_2 、さらに非共鳴 π 中間子対生成の寄与について、これらの間の量子力学的干渉効果まで取り入れた確率密度関数を作成し、 π 中間子対の不変質量 ($M_{\pi^+\pi^-}$) の分布に対して最尤度法 (maximum likelihood method) を実行することにより π 中間子対を生じる中間状態を精密に分解することによって解決した。その結果、

$$\begin{aligned} B(B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) &= (2.2 \pm 0.3 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.)}) \times 10^{-5} \\ B(B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0) &= (1.9 \pm 0.2 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.)}) \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (1)$$

を得て、この崩壊過程には $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ の寄与が支配的であることを示した。この結果は、これまでに他の実験により出版された測定と比較して2倍以上の精度向上を達成したこと、また、将来 $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ 崩壊におけるCP非保存測定に進む際に非共鳴過程の寄与が小さいので、それに起因する不定性もまた小さく、更なる研究発展の基盤を築いたことを意味している。

以上述べたように、著者はいくつかの実験的困難を克服して上記の結果を得ることによって、将来の発展的研究に道を開いた。この成果は2006年にハワイで開催された日米合同物理学会で報告されており、当該分野で十分に評価されている。よって本論文は奈良女子大学博士(理学)の学位を授与するに十分な内容と水準を備えているものと判断した。