

令和元年6月18日現在

機関番号：32620

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05061

研究課題名(和文) QCDに基づくB中間子の稀崩壊の計算：摂動・非摂動QCDのインターフェイス

研究課題名(英文) Perturbative and nonperturbative aspects of the rare B meson decays

研究代表者

川村 浩之 (Kawamura, hiroyuki)

順天堂大学・医学部・准教授

研究者番号：30415137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：B中間子の稀崩壊に対するQCD因子化公式に現れる非摂動関数である光円錐波動関数の性質を調べた。重クォーク有効理論で定義されるB中間子の光円錐波動関数と対応する静的波動関数の高運動量極限の関係を明らかにし、両者のマッチング係数をQCDのツリー近似と1ループ近似で求めた。これらを用いてB中間子の光円錐波動関数を格子シミュレーションによって第一原理から計算する可能性を議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

B中間子のエクスクルーシブ崩壊率を理論的に計算し、Bファクトリーなどで観測されるデータと比較することが新物理の発見に有効と考えられている。そこで現れるB中間子の光円錐波動関数はこれまでのモデルによる評価しかなされておらず不定性が大きい。本研究はこの波動関数を求める新しいアプローチの可能性を探索するものである。

研究成果の概要(英文)：We investigated the general features of the B-meson light-cone distribution amplitude which appears in the QCD factorization formula for the exclusive decay rates of B-mesons. We clarified the relation between the B-meson light-cone distribution amplitude defined in the heavy quark effective theory and the static distribution amplitude in the large momentum limit. Then we calculated the matching coefficient between the light-cone and static distributions at the tree and one-loop level of QCD perturbation theory, and discussed the possibility of lattice calculation using those results.

研究分野：数物系科学

キーワード：摂動論的QCD B中間子 QCD因子化 光円錐波動関数 Bファクトリー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型を超える新しい物理を探索するためのアプローチの一つとして、B 中間子の崩壊過程の精密測定による標準模型からの“ずれ”の探索がある。これまで茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構における BELLE 実験や米国 SLAC 国立加速器研究所での Babar 実験などで B 中間子の生成・崩壊が観測されてきた。これら B ファクトリーと呼ばれる加速器施設では B 中間子を大量に生成して崩壊過程を観測するという実験を行い、CP 対称性の破れの検出や小林・益川理論の検証などの成功を収めてきた。しかしながら標準理論で説明がつかないような種類の“ずれ”を確定的に観測するには未だ至っていない。B ファクトリーを従来の 50 倍の強度を持つ電子・陽電子ビームを用いることで未曾有の高精度測定を行うという BELLEII 実験が準備中であったのが本研究開始当初の状況であった。

近年の理論的發展により重クォーク極限での B 中間子の崩壊振幅が摂動部 (計算可能) と非摂動部 (形状因子、波動関数など過程によらない普遍的な関数) に因子化できることが多くの場合で示され、非レプトン崩壊等への QCD 補正の系統的な取扱いが可能となった。この枠組みを用いて BELLE 実験や BaBar 実験などのデータを包括的に解析するという試みもなされたが、そこで問題となるのが非摂動部分の不定性であった (文献[1])。特に B 中間子の光円錐波動関数という非摂動関数の振る舞いについては筆者も含めて様々なアプローチから評価が行われてきたが、その不定性を十分にコントロールするには至っていない (文献[2,3])。

一般に摂動論的 QCD における非摂動関数は過程によらずユニバーサルであるという性質があり、これは非摂動関数がそれぞれ特定の (非局所) 演算子の行列要素で表されるということを示される。そのために原理的には十分に多くの観測データがあれば、それに合わせて非摂動関数を数値的に決め、他の観測データの理論予測に用いることができる。しかしながら実際に十分な精度で決定されているのは陽子・中性子のパートン分布関数のみであり、中間子の破碎関数、波動関数、陽子の一般化パートン分布関数などは限られた精度でしか決められていない。これらを精度よく決めてゆくことはハドロンを伴う過程を理解する上で重要な課題であり、様々なアプローチで進められつつある。また、エクスクルーシブ過程における非摂動部には構成クォークの数を反映した波動関数が現れるため、これによるカウンティング則を用いることでハドロンの構成クォークの数がわかるという側面も知られている。

上記のように非摂動関数はその名が示す通り摂動計算によって求めることは出来ない。また、一般に非摂動関数を定義する演算子は光円錐方向に広がった非局所演算子のハドロン行列要素で与えられるため、非摂動計算の居力な手法である格子 QCD によるシミュレーションを直接適用することはできない。従来は非局所演算子を局所演算子に分解し、次元の低い局所演算子のハドロン行列要素のみが計算されるといったかたちで格子 QCD は限定的に用いられてきた。これに対し、静的な広がりを持つ非局所演算子の行列要素を格子 QCD で計算することによって光円錐方向に広がった非局所演算子の行列要素を直接求めるといった新しいアプローチが Ji により提案された (文献[4])。この提案はこれまでと全く異なる方法で第一原理から非摂動関数を求める可能性を示唆するものである。

[1] M. Beneke, S. Jager, Nucl. Phys. B751 (2006) 160.

[2] H. Kawamura, J. Kodaira, K. Tanaka, C-F Qiao, Phys. Lett. B523 (2001) 111;

H. Kawamura, J. Kodaira, K. Tanaka, C-F Qiao, Mod. Phys. Lett. A18 (2002) 799.

[3] H. Kawamura, K. Tanaka, Phys. Lett. B673 (2008) 201.

[4] X. Ji, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 262002.

2. 研究の目的

B 中間子のエクスクルーシブ崩壊を包括的に解析する際に用いられる理論的枠組みが QCD 因子化である。そこで問題となるのが因子化で現れる非摂動部の評価である。なかでも非レプトン崩壊のスペクテーター散乱振幅 (図 1) などに現れる非摂動関数として B 中間子の光円錐波動関数の不定性は CP 位相を実験から抽出する際に大きな不定性をもたらすことがわかっている (例えば光円錐波動関数を 2 倍にするとカラー抑制振幅が 2 倍になる (文献[1]))。

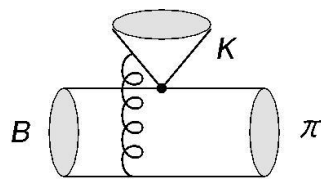


図 1: B 中間子の非レプトン崩壊

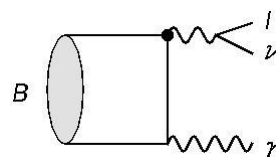


図 2: B 中間子の輻射レプトン崩壊

また、クォーク間の混合を表す CKM 行列要素の決定などで重要となる B 中間子の輻射レプトン崩壊の QCD 因子化でも同じ光円錐波動関数が現れることが知られており、この関数についての不定性を減らすことは非常に重要である。本研究では、以下のようにこれらに関連する研究を行った。

(1) B 中間子の静的波動関数の性質

Ji の方法は陽子やパイ中間子などの軽いクォーク場で表される非摂動関数を求めるための提案であった。一方で B 中間子の光円錐波動関数は重クォーク有効理論 (HQET) における重クォーク場が含まれる。HQET における重クォーク有効場は重クォークが持つ質量に由来する運動量を差し引いたものとして定義されており、重クォーク極限をとったのちに残る自由度を表す。Ji の方法では静的な演算子を用いて行列要素をとるハドロンの運動量を大きくとる極限を考えており、このアプローチを B 中間子の光円錐波動関数に適用するにはこれらの極限がどのような関係になっているかを明らかにする必要がある。

(2) 光円錐波動関数と静的波動関数のマッチング

B 中間子の場合に光円錐波動関数と静的波動関数との関係を明らかにし、QCD 摂動の最低次であるツリー近似、および 1 ループ近似でそれらのマッチング係数を明らかにすることで、将来の高性能コンピュータを利用して格子シミュレーションによる計算が可能となった場合に必要となるマッチング係数や格子シミュレーションから期待される精度が明らかとなる。

また、B ファクトリーにおける実験の第一の目的は B 中間子の崩壊の精密測定を通して行われる新物理の探究であるが、その他のハドロン物理に対しても大きな寄与が期待される。それらに関連して以下の課題にも取り組んだ。

(3) Belle 実験データを用いた破砕関数の決定

ハドロンのインクルーシブ生成を QCD 因子化の枠組みで記述する際に現れる非摂動関数は破砕関数と呼ばれる。これまで π 、K 中間子などの軽いハドロン生成に関してこれらの破砕関数が求められてきたが、主に CERN の LEP や SLAC の SLD などの Z 粒子の崩壊を通しての生成をインプットとして用いられてきた。一方で Belle 実験では 10GeV という低エネルギーでハドロン生成が観測されている。これらのデータを従来のデータを合わせることで異なるエネルギー・スケール間の QCD 発展を通してのクォーク成分とグルーオン成分の混合が解けることが期待できる。

(4) エキゾチック・ハドロンの構造

Belle 実験では多くのエキゾチック・ハドロンと呼ばれる粒子が観測されている。特に $\Lambda(1405)$ 粒子は比較的軽いハドロンで従来の 3 クォークからなるバリオンとは異なる構成クォークからなる可能性が示唆されている。この粒子の生成過程について高エネルギー QCD の枠組みでどういった特徴を持つかについてはこれまで議論されたことがなく、クォーク模型などのエキゾチック・ハドロンの物理に対するこれまでのアプローチとは異なるものである。

3. 研究の方法

上記の研究課題に対し、それぞれ以下のような方法で研究を行った。

(1) B 中間子の静的波動関数の性質

B 中間子の光円錐波動関数は重クォーク有効理論 (HQET) の枠組みで与えられ、重クォークを含む QCD において重クォーク極限をとったことに相当する。この有効理論に移る前の通常のクォーク場で定義された静的波動関数について、B 中間子の高運動量極限と重クォーク極限の関係を解析的に調べた。また、静的波動関数を局所演算子で表示することによって HQET の枠組みの中での高運動量極限を解析的に調べた。

(2) 光円錐波動関数と静的波動関数のマッチング

上の結果を踏まえ、軽い反クォーク場と重いクォーク場が光円錐方向に広がる Wilson line で結ばれた光円錐波動関数と空間方向に広がる Wilson line で結ばれた静的波動関数のマッチングをツリー近似で行った。さらに配位空間での背景場の方法を用いてゲージ不変性をあらわに保った計算方法で QCD の 1 ループ近似でのマッチング係数を求めた。

(3) Belle 実験データを用いた破砕関数の決定

従来用いられていた CERN の LEP 実験、SLAC の SLD 実験などで得られた π 中間子、K 中間子の生成断面積に加えて Belle 実験が観測した 10GeV でのデータも含めた π 、K 中間子の破砕関数の包括的解析を行った。特に QCD 発展を次主要対数近似まで含めることで Z 粒子質量の 91.4GeV と Belle 実験の 10.5GeV の間のクォーク・反クォーク・グルーオンの QCD 混合の効果を取り入れた。得られた結果の不定性はこの分野で標準とされるヘシアン法を用いて得られた。

(4) エキゾチック・ハドロンの構造

エキスクルーシブなハドロン反応では何個の構成クォークがハードな散乱に参加するかによって断面積の運動量依存性が決まり、カウンティング則と呼ばれる。ただし、現実にはピンチ特異性やスタコフ抑制などの複雑なダイナミクスを伴うために慎重な取り扱いが必要である。

この研究ではスタコフ抑制が十分に働くという経験則が Λ 粒子やエキゾチック・ハドロンの候補とされる $\Lambda(1405)$ 粒子の生成過程でも成り立つとし、共鳴領域での実験データとカウンティング則を組み合わせて断面積の振る舞いを求めた。

4. 研究成果

これらの研究を通して以下のような研究成果を得た。

(1) B 中間子の静的波動関数の性質

B 中間子の静的波動関数は HQET における重クォーク場と軽いクォーク場を静的な方向にのびる Wilson line で結んでできる非局所演算子の行列要素で定義される。この行列要素と重クォーク極限をとる前の QCD において対応する行列要素を比較することにより、重クォーク極限と高運動量極限が矛盾なくとれることがわかった。

(2) 光円錐波動関数と静的波動関数のマッチング

輻射補正を無視するツリー近似で 2 つの波動関数を局所演算子に展開し、比較することで両者のツリー近似でのマッチングが得られた。その結果、重クォークの場合には運動量ではなく 4 次元速度の大きい極限で両者が対応することがわかった。このことは 4 次元速度の大きな重クォーク有効理論を用いた格子シミュレーションが必要であることを明らかにするものである。続いて 2 つの波動関数に対する 1 ループ補正を計算することにより、両者の 1 ループ近似でのマッチング係数の解析的な表式を得た。これらの成果をオーストリアで開かれた国際学会 RADOCOR2017 にて口頭発表し、論文として出版した (雑誌論文③)。また、(1) の結果と合わせてより詳しい論文として発表する予定である。

(3) Belle 実験データを用いた破碎関数の決定

パイ中間子、K 中間子の破碎関数を従来用いられていた LEP、SLD などのデータに Belle 実験データを加えることで特にグルーオン、sea クォーク成分の不定性が大幅に減少することを見た (図 3)。この解析から今後の BELLEII におけるハドロン生成断面積の精密データが破碎関数の決定に重要な役割と果すことが示唆される。この結果を論文として発表した (雑誌論文①)。

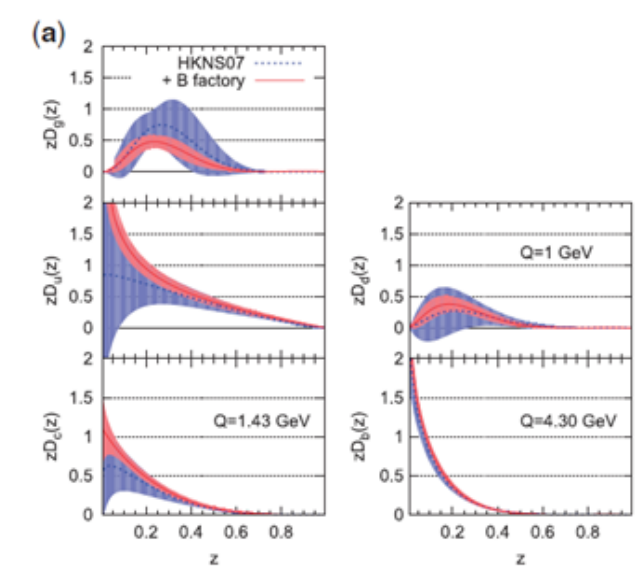


図 3 : パイ中間子の破碎関数

(4) エキゾチック・ハドロンの構造

π 中間子の衝突によって引き起こされるエクスクルーシブ過程である $\pi^- + p \rightarrow K^0 + Y$ ($Y = \Lambda, \Lambda(1405)$) の共鳴領域での実験データとカウンティング則を組み合わせることによって高エネルギー領域での生成断面積を求めた。特に $\Lambda(1405)$ が 3 つのクォークからなるか 5 つのクォークからなるかによって高エネルギー領域での断面積の振る舞いが大きく異なることを示した (図 4)。

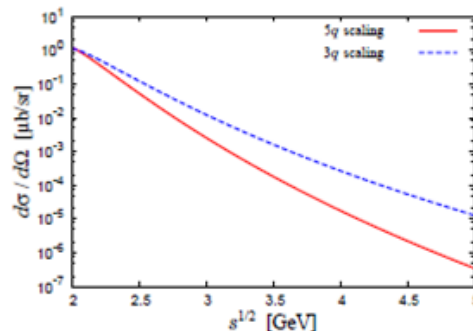


図 4 : $\Lambda(1405)$ の生成断面積

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① M. Hirai, H. Kawamura, S. Kumano and K. Saito, Impact of B-factory measurements on determination of fragmentation functions from electron-positron annihilation data, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Vol.11, 2016 113B04. DOI:10.1093/ptep/ptw154.
- ② W. C. Chang, H. Kawamura, S. Kumano and T. Sekihara, Exotic-Hadron Signature by Constituent-Counting Rule in Perturbative QCD, JPS Conference Proceedings, 査読有, Vol.13, 2017 20047. DOI:10.7566/JPSCP.13.020047.
- ③ H. Kawamura, K. Tanaka, Coordinate-space calculation of radiative corrections to the B-meson distribution amplitude: light-cone vs. static distributions, PoS RADCOR2017, 査読有, 02018 076. DOI:10.22323/1.290.0076.

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① 川村浩之、田中和廣、重クォーク有効理論における光円錐波動関数と静的相関関数のマッチングについて、日本物理学会、2015
- ② 川村浩之、田中和廣、重クォーク有効理論における光円錐波動関数と静的相関関数の 1 ループ・マッチング係数、日本物理学会、2016
- ③ 川村浩之、田中和廣、重クォーク有効理論における光 B 中間子の光円錐波動関数の非摂動計算に向けて円錐波動関数と静的相関関数の 1 ループ・マッチング係数、日本物理学会、2017
- ④ H. Kawamura, Coordinate-space calculation of radiative corrections to the B-meson distribution amplitude: light-cone vs. static distributions, RADCOR2017, St. Gilgen, Austria, 2017

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。