

令和元年6月25日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05365

研究課題名(和文) 新たな視点からのハドロン構造の考察・研究

研究課題名(英文) Study of hadron structures from a new viewpoint

研究代表者

高橋 徹 (Takahashi, Toru)

群馬工業高等専門学校・一般教科(自然)・准教授

研究者番号：70467405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 格子QCD計算を用いたハドロン内部構造の研究を行った。ストレンジクォークとチャームクォークの間で質量を変化させフレーバー構造を解析することにより、粒子の内部構造の同定に成功した。これに加え、様々なチャームハドロンについて電磁形状因子を計算し、各種チャームハドロン内部構造を解析した。(2) 量子系におけるエントロピーとしてHusimi-Wehrlエントロピーを採用し、ヤンミルズ理論の熱平衡化の研究を行った。(3) カラー空間における密度演算子からエントロピーを構成し、クォーク間相関を解析した。エントロピーのクォーク・反クォーク間距離依存性を解析し、その振る舞いを解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、それまでとは異なる観点・手法を用いてハドロン・クォークの性質の研究を行った。異なる対称性に着目した粒子の解析では、不定性が大きく解析が困難だった粒子の内部構造を同定するなど一定の成果を得た。また、カラー自由度に着目したクォーク相関の研究においても、事前の期待通りの結果を得ている。これらの手法は応用が可能であり、今後の研究につながる事が期待される。

研究成果の概要(英文)：(1) We performed lattice QCD study of the internal structures of charmed hadrons. We evaluated the flavor structures of the Lambda baryons with various (fictitious) valence quark masses. As a result, we succeeded in determining the internal structure of the Lambda baryons. We also computed the electromagnetic form factors of various charmed baryons and investigated their properties. (2) We studied the thermalization process of the Yang-Mills theory based on the Husimi-Wehrl(HW) entropy, and we confirmed the entropy growth in the early stage of the thermalization process. We also found that the saturation time of the HW entropy is comparable with that of pressure isotropization. (3) We evaluated the correlations among quarks by means of the entropy defined from the density matrix in the color space, and found that the interquark correlations are reflected in thus defined entropy.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：格子QCD QCD ハドロン物理 フレーバー ヘビークォーク エントロピー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核・ハドロンの系は、より基礎的な理論である量子色力学 (QCD) によって支配されており、QCD に基づく研究が精力的になされている。中でも、チャームクォークを含むヘビーハドロン (チャームハドロン) の研究が注目を集めている。J-PARC などの施設においてチャームハドロンの生成が行われるようになり、重いクォークを含むハドロンの諸性質や、ヘビーハドロン内部におけるクォーク閉じ込めの性質、ひいては QCD のダイナミクスを知ることが喫緊の課題だからである。そこで、本研究では、ハドロンの動的な性質に重要な役割を果たすハドロンの内部構造の研究を、有力な非摂動計算手法の一つである格子 QCD 計算を用いて遂行することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究では、非摂動的解析手法の一つである格子 QCD を用いてハドロンの非摂動ダイナミクスを解明することを目的とした。特にハドロンの内部構造の解明やハドロン内部におけるクォーク相関の考察に主眼を置いた。具体的には以下の観点に注目して研究を開始した。

- (1) 対称性の視点に基づくハドロンの内部構造の研究
- (2) エントロピーに基づくハドロン内部におけるクォーク相関の解明

3. 研究の方法

(1) ハドロンの内部構造の研究

バリオンはクォーク 3 体からなる粒子であるが、実態はそれほど単純な構造ではなく、多彩な構造を示す。up, down, strange (uds-)クォークからなるバリオンは、フレーバー SU(3) 対称性が良く、(1405) 粒子などはクォークの対生成を通じ、メソン (中間子) とバリオンの束縛・共鳴状態として存在すると考えられるなど、興味深い。一方で、up, down charm (udc-)クォークからなるヘビーバリオンは一つのクォークが重いことに起因し、ヘビークォーク対称性が良い。特に、ダイクォーク自由度 (クォーク 2 つがペアを形成する自由度) が分離し、ヘビーバリオンの性質に直結すると予想される。これらの知見をもとにハドロンの性質を決定することは、今後予定される J-PARC 実験に向けた定量的予言に重要な役割を果たす。

ハドロンに発現する対称性は、内部クォークの質量に依存する。内部クォーク質量を連続的に変化させ、SU(3) 対称性が良い状態とヘビークォーク対称性が良い状態の間を内挿し、ハドロンの性質変化を調べることにより内部構造をより詳細に研究することが可能になる。物理量としては、内部フレーバー構造・質量スペクトル・電磁形状因子を計算する。

(2) エントロピーに基づくクォーク相関の研究

バリオンはバレンスクォーク 3 体で構成されるが、現実には真空のクォーク対生成により、マルチクォーク状態として存在するケースもある ((1405) など)。通常、格子 QCD で用いる演算子はバレンスクォークに対応する生成消滅演算子 (合計 3 つ) であり、真空のクォーク対生成によるクォークの寄与まで含めて調べることは容易ではない。使用する演算子の数を増やし、マルチクォーク演算子を用い、対生成されたクォークの分布まで計測すれば構造を調べることはできるが、計算量が増大し、やや現実的ではない。

そこで、エンタングルメントエントロピーに着目する。エンタングルメントエントロピーは、密度行列において、着目する粒子以外の自由度を trace out して構成したエントロピーであり、他粒子とのエンタングルメント相関を測る量である。ハドロン内部のクォークのエンタングルメントエントロピーを計測することにより、ハドロン内部におけるクォークの空間的相関を測ることができると期待される。

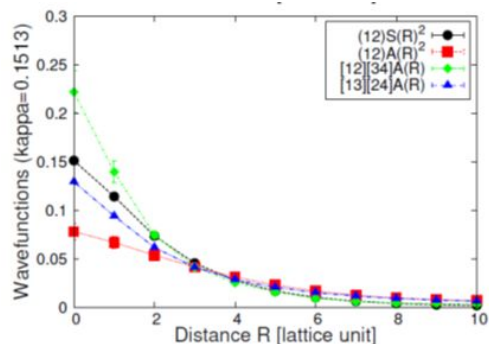
実際の計算においては、ハドロン内部のクォークのカラー (色荷) 自由度に着目し、カラー空間での相関量を計算する。クォークの密度演算子をハドロン状態に作用させることにより、クォークの空間的カラー分布・空間的カラー相関を計算する。

4. 研究成果

- (1) ハドロン内部におけるカラー励起の研究
[Physical Review D94 (2016) no.9, 094011 に掲載]

カラー SU(2) QCD を用いて、ハドロン散乱におけるカラー励起状態を研究した。Color-single の

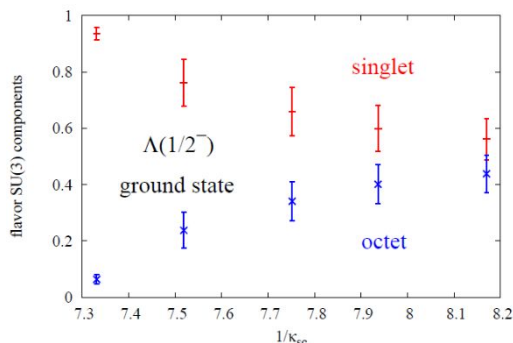
ハドロン (SU(2)QCD では color-single diquark) 2 体の散乱状態を生成し、ハドロン散乱におけるカラー励起状態 (color-triplet diquark) の空間的分布を計算した。その結果、color-single のハドロンが接近すると、単なる color-singlet ハドロン 2 体の状態ではなく、カラーを持つハドロンの自由度が発現することを確かめた。特に、ハドロン間距離が 0.2fm 程度になると、カラー励起状態の寄与が増大することを確かめた。これまでは color-singlet 状態のハドロン自由度のみに着目され、カラー励起状態については深く議論されていなかったが、本研究により、ハドロン同士が接近した時にカラー励起状態が確かに発現することが確かめられた。



【図 1】横軸はハドロン間距離、縦軸は
 黒：基底状態 color-singlet ハドロン(S)の寄与
 赤：励起状態 color-singlet ハドロン(A)の寄与
 青：カラー励起状態ハドロン(1)の寄与
 緑：カラー励起状態ハドロン(2)の寄与
 を示している。ハドロン(S)は scalar diquark、ハドロン(A)は axialvector diquark、カラー励起状態ハドロン(1)、カラー励起状態ハドロン(2)はカラーの組み方が異なるカラー励起状態ハドロンを示す。

(2) (1405)の内部フレーバー構造の決定
 [Phys.Rev. D94 (2016) no.11, 114518 に掲載]

アップ、ダウン、ストレンジクォーク(u,d,s)から構成される Λ 粒子と、アップ、ダウン、チャームクォーク(u,d,c)から構成される Λ_c 粒子の性質を研究した。複数の演算子を用いて、相関行列を計算・対角化することにより、低励起状態の質量スペクトル、および、内部フレーバー構造を調べた。実際の計算においては、筑波大学 PACS-CS グループの生成した、ダイナミカルクォークの寄与を取り入れたゲージ配位を利用した。空間格子サイズは 3.2fm 時間方向サイズは 6.4fm (格子間隔は 0.1 fm)であり、u, d クォーク質量は 中間子質量に換算しておよそ 290MeV ~ 700MeV に対応する。また、ストレンジクォークの質量とチャームクォークの質量の中間の質量値を持つ仮想的なクォークを導入して計算し、SU(3)対称性が良い状態からヘビークォーク対称性が発現する状態まで連続的に変化させ、内部構造の変化を追った。これにより、質量スペクトルの情報のみでは不可能な、内部構造の同定が可能になる。特にスピン 1/2 負パリティの基底状態の Λ 粒子は、uds 状態((1405))ではフレーバー-1 重項状態であり、udc 状態(Λ_c)に移行するに従って、フレーバー-1 重項状態とフレーバー-8 重項状態が等しく混合することを突き止めた。これはフレーバーSU(3)対称性が良い状態から、ダイクォーク自由度が重要となる状態へ移行していることを示唆している。他の励起状態についても同様の解析を行い、低励起状態 Λ_c 粒子の内部構造を順次同定することに成功した。フレーバー構造のクォーク質量依存性を利用した、内部構造の格子 QCD 計算はこれが初めてである。



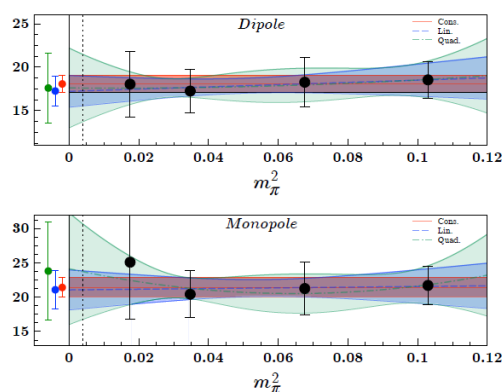
【図 2】図の縦軸は基底状態 Λ 粒子における、フレーバー-1 重項成分 (赤色) とフレーバー-8 重

項成分 (青色) の大きさを示す。横軸はアップ、ダウンクォーク以外の3番目のクォークの質量に対応する。左端が通常のストレンジクォーク質量 (フレーバーSU(3)対称性が良い状態) で、右端が通常のチャームクォーク質量 (ヘビークォーク対称性が良い状態) である。3番目のクォーク質量がストレンジクォーク質量からチャームクォーク質量に移行するに従い、内部フレーバー構造が連続的に変化していることわかる。

(3) $c\bar{c}$ 結合定数の研究

[Physics Letters B768 (2017) 309-316 に掲載]

$c\bar{c}$ 結合定数を格子QCD計算により決定し、 $c\bar{c}$ の崩壊幅を計算した。計算においては、筑波大学 PACS-CS グループの生成した、ダイナミカルクォークの寄与を取り入れたゲージ配位を利用した。空間格子サイズは 3.2fm 時間方向サイズは 6.4fm (格子間隔は 0.1 fm) であり、u, d クォーク質量は 中間子質量に換算しておよそ 290MeV ~ 700MeV に対応する。これらの結果は実験やモデル計算に対する有用な示唆となると考えられる。



【図3】計算された $c\bar{c}$ 結合定数の 中間子質量依存性。上図は電磁形状因子をモノポール関数でフィットし結合定数を算出した場合の値。下図は電磁形状因子をダイポール関数でフィットし結合定数を算出した場合の値。左端が現実世界の値 (中間子質量 0) に対応する。

(4) $c\bar{c}$ 遷移の研究

[Physics Letters B772 (2017) 121-126 に掲載]

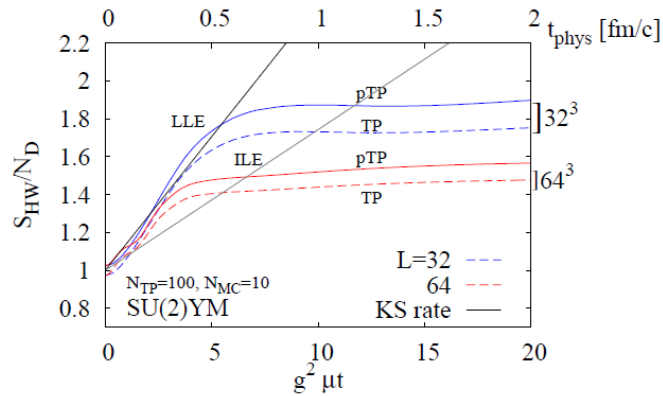
$c\bar{c}$ 遷移を格子QCD計算を用いて研究した。本研究では、筑波大学 PACS-CS グループの生成した、ダイナミカルクォークの寄与を取り入れたゲージ配位を利用した。空間格子サイズは 3.2fm 時間方向サイズは 6.4fm (格子間隔は 0.1 fm) であり、u, d クォーク質量は 中間子質量に換算しておよそ 156MeV に対応する。実際の計算においては、 $c\bar{c}$ 遷移の磁気モーメントを計算し、それぞれのクォーク (アップ, ダウン, チャーム) の寄与を独立に見積った。その結果、 $c\bar{c}$ パリオンにおいてはチャームクォークの寄与は非常に小さく、 $c\bar{c}$ パリオンの場合はチャームクォークの寄与が支配的になっていることを突き止めた。

(5) 伏見関数を用いた、ヤンミルズ理論におけるエントロピー生成の研究

[PTEP 2018 (2018) no.1, 013D02 に掲載]

ヤンミルズ理論の熱化過程を、Husimi-Wehrl (HW) エントロピーの観点から研究した。量子系における密度行列を ρ とすると、von Neumann エントロピー S は $S = -\text{Tr}[\rho \log \rho]$ と表現できるが、量子系でこのように定義されるエントロピーは時間的に一定となってしまうことがわかっている。そこで HW エントロピーを用いて量子系におけるエントロピーを計算することを考える。HW エントロピーは、量子系における分布関数として伏見関数を用いて計算されるエントロピーである。

本研究では、McLerran-Venugopalan model に基づく初期条件から出発し、HW エントロピーの時間発展を半古典的に計算し、系の熱化過程を調べた。その結果、HW エントロピーが一定値に近づく時間と系の圧力が等方化する時間は同じオーダーであることが示され、HW エントロピーは系の熱化過程をよく記述していることが示唆される。



【図4】

横軸は経過時間、縦軸はHW エントロピーの値。

複数の線は、様々な計算法で算出したHW エントロピーの値に対応する。系が時間発展するにつれて、HW エントロピーの値はほぼ単調に増加していき、あるところでほぼ一定値に落ち着く。この一定値に落ち着くタイムスケールと、系の物理量が等方化するタイムスケールはほぼ同じであることがわかった。

(6) ダブルチャームバリオンの電磁遷移の研究

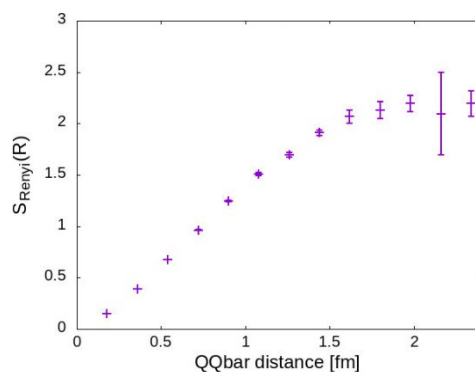
[Physical Review D98 (2018) no.11, 114505 に掲載]

チャームクォークを2つ含むダブルチャームバリオンのスピン $3/2$ $1/2$ 電磁遷移の研究を行った。計算では、筑波大学 PACS-CS グループの生成した、ダイナミカルクォークの寄与を取り入れたゲージ配位を利用した。空間格子サイズは 3.2fm 時間方向サイズは 6.4fm (格子間隔は 0.1fm) であり、 u, d クォーク質量は 中間子質量に換算しておよそ 156MeV に対応する。電磁形状因子の計算においては、正確に物理量を算出するために励起状態の寄与も考慮に入れた計算を行った。特に磁気ダイポール形状因子(M1 form factor)と電気四重極形状因子(E2 form factor)に着目して計算を行った。その結果、M1 form factor は軽いクォークの寄与が支配的であること、E2 form factor の寄与は非常に小さいことを突き止めた。これらはQCDに基づいた予言であり、将来の実験に対し有用な示唆となることが期待される。

(7) エンタングルメントエントロピーを用いたクォーク相関の研究

[論文執筆中]

静的クォーク・反クォーク系において、カラー空間におけるクォークの密度行列を構成し、その密度行列を用いてエントロピーを計算した。その結果、クォーク・反クォーク間距離 R が増大するにつれ、エントロピーの値は増大していくことがわかった。また、その R 依存性も解析した。今回の計算は静的クォーク・反クォーク系に対するものであるが、実際のハドロンに適用することにより、ハドロン内部構造の研究に応用できるのではないかと期待される。



【図5】横軸はクォーク・反クォーク間距離、縦軸はエントロピーの値。クォーク・反クォーク間距離 R が増大するにつれ、カラー空間の密度行列から定義されるエントロピーの値は増大していく。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Toru T. Takahashi, Yoshiko Kanada-En'yo
Colored-hadron distribution in hadron scattering in SU(2) lattice QCD
Physical Review D94 (2016) no.9, 094011, 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.094011

Philipp Gubler, Toru T. Takahashi, Makoto Oka
Flavor structure of baryons from lattice QCD: From strange to charm quarks
Physical Review D94 (2016) no.11, 114518, 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.114518

K. U. Can, G. Erkol, M. Oka, T. T. Takahashi
 $c\bar{c}$ coupling and $c\bar{c}$ decay in lattice QCD
Physics Letters B768 (2017) 309-316, 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2017.03.006

H. Bahtiyar, K. U. Can, G. Erkol, M. Oka, T. T. Takahashi
 $c\bar{c}'$ transition in lattice QCD
Physics Letters B772 (2017) 121-126, 査読有り
DOI: 10.1016/j.physletb.2017.06.022

H. Tsukiji, T. Kunihiro, A. Ohnishi, T. T. Takahashi
Entropy production and isotropization in Yang–Mills theory using a quantum distribution function
PTEP 2018 (2018) no.1, 013D02, 査読有り
DOI: 10.1093/ptep/ptx186

H. Bahtiyar, K. U. Can, G. Erkol, M. Oka, T. T. Takahashi
Radiative transitions of doubly charmed baryons in lattice QCD
Physical Review D98 (2018) no.11, 114505, 査読有り
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.114505

6 . 研究組織

(1)研究代表者

研究分担者氏名：高橋 徹

ローマ字氏名：Toru Takahashi

所属研究機関名：群馬工業高等専門学校

部局名：一般教科（自然）

職名：准教授

研究者番号（8桁）：70467405

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。