

課題名 (タイトル) :

格子 QCD+QED

利用者氏名 : ○出淵 卓, 石川智己, 宇野 隼平, 谷口裕介,
早川 雅司, Tohmas Blum, Ran Zhou

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 理研 BNL 研究センター理論研究グループ

本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

素粒子・原子核の様々な物理量を第一原理より系統的に計算することの出来る格子 QCD シミュレーションを行う。特にカイラル対称性を持った格子クォークであるドメインウォール法を用いることにより、格子誤差、カイラル外挿誤差など他の方法では取り除くことが難しい系統誤差を小さくできることが特色である。

用いる QCD 真空は理研 BNL コロンビア/UKQCD の共同研究に基づき、理研ブルックヘブン研究センター設置の QCDOC や米国アルゴン研究所の BlueGene を用いて作成した物を、RICC で物理量を計る。強く関係するプロジェクトとして 格子の構造 (代表者 M.Lin) と B 中間子 (代表者 青木保道) が同じ QCD 真空を用いて物理解析を行っている。本課題では 量子電磁気の効果をはじめ取り入れることにより、クォークの電荷の物理的影響を取り入れ、アップ、ダウンクォークを取り替えるアイソスピン対称性の破れを第一原理から研究することが目的である。

1. 具体的な利用内容、計算方法

米国で作成した QCD 真空を記録したファイルを RICC に転送し、別に作成した量子電磁場 (光子場) と掛け合わせるにより、量子色力学と量子電磁気学双方の効果を取り入れた QCD+QED 計算を行った。QCD+QED の真空上でのクォークの運動をディラック方程式を解き、2つないし3つのクォークから作られる、パイオン・ケイオンなどの中間子や陽子・中性子などの重粒子の時空間上での運動を求める。運動の軌跡より、各粒子の質量やより軽い粒子への崩壊率を求める。これらの運動を量子場の理論として正しく、効率よくもと

めるため、QCD+QED の真空をパラメータ当たり 200 個程度を用いる。クォークの質量は 5MeV, 10MeV 程度と自然界のそれよりわずかに重い物を用いて、自然界へのクォーク質量へカイラル外挿を行う。

2. 結果

まず、荷電パイオン (アップクォークとダウンクォークが強い力で結びついた束縛状態、up+down と略記)、中性パイオン (up+up と down+down の重ね合わせ)、荷電ケイオン (strange+down)、中性ケイオン (strange+up) の 4 つの中間子の質量を量子電磁気学の効果を正しく取り入れながら、シミュレーションで精密に計った。電荷を持った中間子は中性のそれより、電磁気場をあたかも雲のように纏い、その分だけわずかに (数パーセント) に重くなる。

この 4 つの中間子質量は加速器からの実験で非常に精度良く求められているため、シミュレーションの up, dow, strange それぞれのクォーク質量を外挿・内挿することにより、自然界の中間子質量を再現するクォーク質量、つまり自然界のクォーク質量を逆算する。この際の外挿、内挿の公式はクォークの持つ (拡張された) カイラル対称性に基づいたカイラル摂動論と呼ばれる理論で与える。量子電磁気の効果が入った場合のカイラル摂動論は比較的新しく、特にストレンジクォークがアップ、ダウンより 10 倍程度重いという性質に着目し外挿の系統誤差を抑えることの出来る SU(2) カイラル摂動論は今まで与えられていなかった。

このクォーク質量は素粒子標準模型の最も基礎となる重要なパラメータであるが、クォークは単体では取り出すことが出来ない (クォークの閉じ込め) ため、実験的に計ることの出来る中間子 (クォークの束縛状態) の中のクォークの質量を理論

的に求めることが必要となる。

また、クォーク質量は非常に小さいスケール（高いエネルギーのスケール）における量子ゆらぎの効果が無限に大きくなるという紫外発散を引き起こす。これを物理的に意味のある有限な量にするための繰り込みとよばれる操作が必要になるが、これもクォークの運動法則をシミュレーションから求めることによって、摂動論によらない非摂動的繰り込みを行うことにより主要な系統誤差を取り除く。

このようにして求めた アップ、ダウン、ストレンジクォークの質量を使い、陽子 (up+up+down) 中性子 (up+down+down) の質量をそれぞれ求め、陽子、中性子の質量というこの世界を成り立たせている最も基本的な要素の性質を調べる。

3. まとめ

クォーク質量 (2GeV をスケールとする MSbar 繰り込み処方) の結果として

アップクォーク : 2.24 (10) (34) MeV

ダウンクォーク : 4.65 (15) (32) MeV

ストレンジ : 97.6 (2.9) (5.5) MeV

が得られた。アップクォークの質量がどれだけ小さいかは Strong CP 問題と呼ばれる陽子、中性子の電気双極子が理論的に予想されるより何桁も小さいという素粒子標準模型の「自然さ問題」に関係するが、今回の計算では アップクォークの質量は Strong CP 問題を説明できるくらいまで軽くはないという結果となったので、この問題は他の解決を強く示唆する (アキシオン粒子と呼ばれる未発見の粒子の存在が他の解決法のひとつである)

ここで求められたクォーク質量を用いて、陽子中性子の質量を計算できる。まず、仮にアップクォークとダウンクォークに質量の差も電荷の差もなかった、つまりアップとダウンは全く等しいクォークだ、と仮定すると陽子と中性子の質量は正確に等しくなる。これはアイソスピンと呼ばれる対称性の帰結である。次に 電荷の違いのみを入れてアップが $+2/3e$ (e は素電荷) ダウンが $-1/3e$ で、質量はかわらないとしてみると、陽子

の質量は中性子の質量より 0.383(68) MeV おもくなるという計算結果になった。陽子はより軽い中性子にベータ崩壊できる、つまりこの自然界の陽子はほとんど全て中性子になってしまうということになってしまう。しかし、上で求めたアップクォークとダウンクォークの質量差 約 2.4 MeV を与えると、陽子は アップが 2 つでダウンが 1 つからできており 中性子はアップが 1 つでダウンが 2 つから出来ていることを反映して 陽子、中性子の質量が逆転して中性子の方が 2.13(16) (70) MeV 陽子より重くなるという計算結果を得た。自然界の陽子・中性子間の質量差は 1.293321(4) MeV であり、陽子は安定して存在できるのでこの化学的な世界が成り立っている。我々の計算では 系統誤差の範囲ではあるが大きめの質量差になっていることが分かる。

この計算からの他の物理的結果としては、K 中間子の質量差の起源、パイ、K 中間子の崩壊定数の比 (小林・益川理論のクォーク混合行列への制限を与える) へのアイソスピンの破れの影響などを調べることが出来た。

4. 今後の計画・展望

今回の計算では、格子間隔が 0.1fm (陽子の大きさが 1fm) とまだ比較的荒いので、離散誤差が 4% 程度と見積もられる。また、シミュレーションに用いられたクォーク質量 10-20 MeV と自然界のそれより大分重いので、カイラル外挿の誤差が系統誤差 (アップ、ダウンクォークの質量差に 8% 程度の影響) をもたらしめている。さらに、光子は質量が 0 で遠方まで伝搬することが出来るが、このため格子の大きさが 2fm 程度であることによる有限体積効果の影響が一番大きな系統誤差 (アップクォーク質量に+14%) の源となっている。これらの系統誤差は、より細かい格子間隔で、全体が大きな格子を用いて、自然界により近いクォーク質量の計算を行うことによって取り除くことが出来る。

さらに、QCD+QED のシミュレーションは多くの興味深い現象を解き明かせる可能性があることから引き続きより広い範囲の物理量についての計算を行っていきたい。

5. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用

平成 22 年度 RICC 利用報告書

した状況（どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか）や、継続して利用する際に行う具体的な内容

およそ 75% の計算を遂行することが出来たが、残りの 25% 程度は来年度に持ち越し解析を行いたい。また、海クォークの電荷の影響を取り入れたより完全な QCD+QED 計算を行い、また物理量を広げて行く予定である。

6. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由
ジョブキューが混んでおり、予測したより計算が流れなかったため、予定していた計算が終了できませんでした。
7. 利用研究成果が無かった場合の理由

平成 22 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

T. Blum et. al. “Electromagnetic mass splittings of the low lying hadrons and quark masses from 2+1 flavor lattice QCD+QED”

Physical Review D 82 094508 [47 pages]

N. Christ et. al. “ η and η' Mesons from Lattice QCD” ,

Physical Review Letters 105 241601 [4 pages]

Tomomi Ishikawa et. al. “Improving chiral property of domain-wall fermions by reweighting method”

Proceedings of Science LAT2009 035 [7 pages]

Y. Aoki et. al. “Continuum Limit Physics from 2+1 Flavor Domain Wall QCD”

Physical Review D 印刷中

Y. Aoki et. al. “Continuum Limit of BK from 2+1 Flavor Domain Wall QCD.”

arXiv:1012.4178 [hep-lat] (PRD 投稿中)

Tomomi Ishikawa et. al. “One-loop operator matching in the static heavy and domain-wall light quark system with $O(a)$ improvement”

Journal of High Energy Physics 印刷中

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Taku Izubuchi Lattice QCD+QED simulation

CERN Theory Institute, Future directions in lattice gauge theory - LGT10 2010/08/13 Meyrin Switzerland

Taku Izubuchi Isospin Breaking Study on Lattice

The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory 2010/06/17 Tanka Italy

【その他】

宇野 隼平 博士論文 QCD+QED 格子計算によるクォーク質量の決定 2010 年 3 月

名古屋大学理学研究科

Ran Zhou PhD Thesis Electromagnetic splittings of low lying hadrons and light quark masses in 2+1 flavor QCD+QED June, 2010

University of Connecticut