

マスターフィールド形式を用いた QCD ハドロンスペクトル計算

Calculation of QCD hadron spectrum in master field formalism

浮田 尚哉

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

格子QCD計算から現実のQCDを得るには、(1)クォーク質量を物理的質量(物理点)に調整し、(2)格子間隔ゼロと(3)体積無限大への極限操作を要する。これら調整と極限操作に起因する系統誤差の理論的評価法が存在するが、そもそも各々の格子QCD計算が、その評価法の適用範囲内のパラメータかどうかの判断は難しい。結局、格子QCD計算の問題は、これら系統誤差を取り除いた定量的な解析が実行できるかどうか、ということである。究極的には、マスターフィールド形式と呼ばれる巨大体積格子を用い、且つ物理点で格子間隔の非常に細かい数値計算が実現出来れば、上記系統誤差が全て除去可能になる。

我々格子QCDグループ (PACS collaboration) は、PACS10と呼ばれる物理体積が $(10\text{fm})^4$ 以上のゲージ配位を生成して、上記系統誤差の完全な除去を目指している。現在では、格子間隔が、 0.084fm と 0.065fm の2つの配位セットの生成が完了している。

本プロジェクトでは、昨年度の格子間隔 0.084fm のQCDハドロンスペクトル計算に引き続き、解析手法の開発と格子間隔 0.065fm の配位を用いたQCDハドロンスペクトル計算を行う。

2. 研究成果の内容

1) 解析手法の開発：

格子 QCD のハドロンスペクトル計算は、相関関数の時間依存性から評価する。伝統的な相関関数の計算法 (one to all と呼ばれる手法) では、1 回の測定で、3次元空間のある1点の始点 (あるいは局在した1つの空間領域) から全4次元格子点への相関関数を計算する。始点をずらした測定を何度も繰り返して、統計数を上げていく。つまり伝統的計算法では、測定数と統計数が等しい。

ところで、典型的な QCD スケールに比べて非常に大きな体積を用いたマスターフィールド形式の場合、同時に複数の始点を置いた相関関数の計算 (many to all) が可能であることに気づく。

例えば、同時に 10 個の始点を置けるなら、測定数（計算回数）を 10 分の 1 に削減できる。この many to all の手法には、グリッド法と呼ばれる先行研究があるが、巨大体積格子を意識していなく、改良の余地が十二分にあった。

本研究成果は、グリッド法を包含した格子の幾何学に基づいた many to all の一般的手法の開発・整備を行い、数値実験でその有効性を示したことである。計算回数の削減量は、3次元空間体積に逆比例する。一辺 10fm の体積では、伝統的手法の数十倍の 1 程度まで削減できることを確認した。

2) ハドロンスペクトルの精密測定：

開発した手法を用いて、格子間隔 0.065fm の配位を用いた QCD ハドロンスペクトルの精密測定を実行した。

一つ興味深い結果は、 Ω バリオンの不安定粒子的振る舞いの観測である。QCD では Ω バリオンは安定粒子であり、これまでの数値計算でも安定粒子として観測されてきた。ところが、昨年度の格子間隔 0.084fm の結果では、有効質量をサブパーセントの統計誤差で評価してみると、安定粒子の存在を示すプラトー領域が現れず不安定粒子の兆候が観測された。もちろん、 Ω バリオンは崩壊しないのだが、エネルギーの近い 2 粒子状態が存在し、更に離散化された格子ではスピンの高い状態との混合が考えられる。本年度の格子間隔 0.065fm のプレリミナリーな結果でも、 Ω バリオンの有効質量の時間的振る舞いに昨年度同様に不安定粒子の兆候が見られた。もはや Ω バリオンの状態は、エネルギー的に孤立した状態とは見做されず、実際高精度の数値計算によってそれらの状態との混合の効果が確認できたのである。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

巨大体積格子を用いた QCD ハドロンスペクトル計算では、非常に大きな記憶容量を持つプラットフォームが必要とされる。ノード当たりのメモリ容量の大きな Cygnus と、多数ノードを使用できる Oakforest-PACS は、本プロジェクトの遂行に適していた。

4. 今後の展望

今年度までの数値計算では、物理点かつ有限体積効果を統計誤差以下に抑えた結果である。しかし、格子間隔 0.084fm と 0.065fm のみの結果で、有限格子間隔による系統誤差の評価がまだ完了していない。今後は、格子間隔 0.065fm のハドロンスペクトル計算を完了し、さらに格子間隔 0.04fm の計算を実行して、全ての系統誤差を取り除いたマスターフィールド形式を用いた格子 QCD 計算の実現を目指す。

5. 成果発表

- (1) 学术论文 なし
- (2) 学会発表 なし
- (3) その他 なし

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus		18,900	
Oakforest-PACS		240,000	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			