

ハドロン間相互作用の格子 QCD 第一原理計算

First-principles Lattice QCD calculation of Hadron interactions

土井 琢身

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

1. 研究目的

本研究では、格子 QCD 第一原理計算により、ハドロン間相互作用を QCD から直接決定することを目指している。ハドロン間相互作用は原子核物理を構築する上で最も基礎となる量であると共に、中性子星の構造や宇宙における元素合成など、宇宙天文物理における現象の解明にも重要な役割を果たす。近年はさらに様々なエキゾチックハドロン共鳴状態（の候補）が大規模加速器実験により発見されており、対応する系におけるハドロン間相互作用の決定が喫緊の課題となっていた。

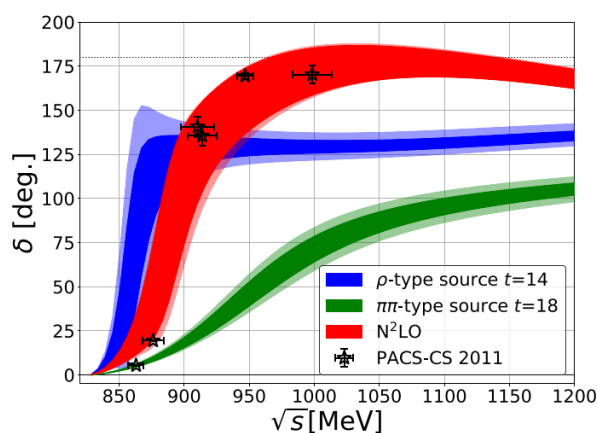
2020 年度の研究では、特にハドロン共鳴状態の統一的理解に向けて、 $I=1$ $\pi\pi$ 相互作用（ ρ メソン共鳴状態）を対象とした格子 QCD 計算の実行を目的とした。ハドロン間相互作用の計算には、近年我々のグループが開発した HAL QCD 法が非常に大きな成功を収めているが、これまではクォーク対生成消滅ダイアグラムが陽に存在する系への適応は計算コストの観点から困難であった。これについて昨年度までに all-to-all quark propagator の効率的計算方法を開発し、統計誤差を約一桁削減可能なことを見出した。そこで 2020 年度はこの手法を用いた大規模計算を行い、HAL QCD 法において ρ メソン共鳴状態を導出することを目指した。

2. 研究成果の内容

本研究では主に OFP を使い、HAL QCD 法による $I=1$ $\pi\pi$ 相互作用（P 波）の格子 QCD 計算を行った。PACS-CS Coll. によって生成された $N_f=2+1$ ゲージ配位を用い、パイオン質量 0.41GeV における計算を行った。先行研究により、このパイオン質量においては ρ メソンは質量 0.89GeV の共鳴状態として存在することが解っており、共鳴状態研究のベンチマークに適切なセットアップとなっている。

クォーク対生成消滅ダイアグラムの計算に必要な all-to-all quark propagator については、one-end trick, sequential 法、covariant approximation averaging 法を組み合わせた計算を行った。さらに、HAL QCD 法におけるポテンシャルを定義するスキームとして、シンク演算子に小さな smearing を入れた計算を行った。これらにより、従来我々が用いてきた all-to-all 計算（hybrid 法など）と比べ、約一桁統計精度を向上させることに成功した。ソース演算子としては、 ρ タイプのものと、 $\pi\pi$ タイプのもの、計 2 種類を用いた計算を行った。

HAL QCD ポテンシャルの計算においては、その非局所性について微分展開を用いた決定を行った。微分展開の第 0 次項 (LO) の計算から、この系においては非局所性が大きいことが解ったが、2 種類のソース演算子の結果を用いることで、微分展開の第 2 次項 (N2LO) まで決定することに成功した。得られたポテンシャルは、全領域で引力という性質を示しており、P 波における遠心力ポテンシャルを加味すると、引力ポケット+斥力バリアという、共鳴状態に典型的なポテンシャルとなっていることを明らかにした。ポテンシャルを基に散乱位相差を計算した結果が下図の赤線となる。エネルギー $\sqrt{s} = 0.89\text{GeV}$ 付近で 90 度を切っており、 ρ メソン共鳴状態が HAL QCD 法によって導出されたことがわかる。有限体積法を用いた先行研究 (黒点) ともおおそ無矛盾であり、特に共鳴状態の質量についてはほぼ一致する結果が得られた。ただし、共鳴状態の幅と対応する $\rho \rightarrow \pi\pi$ 結合定数については先行研究と比べ 2 倍ほど大きい値が得られた。これは、N2LO ポテンシャルの構築に用いられたエネルギー領域が高く、崩壊幅計算に必要な低エネルギー領域においては微分展開の打ち切り誤差が大きくなるためだと考えている。これについては今回用いた重心系での計算に加え、実験室系での計算を行うことで改善できると考えられ、今後研究を進める予定である。本年度の成果については現在論文を準備中であり、間もなく投稿できる見込みである。



I=1 $\pi\pi$ 散乱位相差

また Cygnus においては、他所で生成したゲージ配位について、クーロンゲージ固定の計算を行った。これは物理量測定計算を行う上で重要なステップであり、GPU に最適化されたコードを用いることで高速なゲージ固定計算を行うことができた。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究により、HAL QCD 法においてクォーク対生成消滅ダイアグラムを含む系への計算手法を確立することができたが、これは学際共同研究ならではの大規模計算資源を用いることで初めて可能となったものである。本研究の成果は、今後 HAL QCD

法による様々な共鳴状態の研究へと道を拓くものであり、その意義は大きい。

4. 今後の展望

2021 年度においては、本研究の成果をさらに発展させ、メソン・バリオン間力の計算と、対応するバリオン共鳴状態の研究を行う予定である。さらに、より一般的な all-to-all 計算の枠組みをバリオン間力計算にも適用し、奇パリティチャンネルにおけるバリオン間力の決定も目指す予定である。また、メソン・メソン間力の挑戦的研究として、 $I=0 \pi \pi$ 相互作用 (σ メソン共鳴状態) の研究も今後の重要な課題である。

5. 成果発表

(1) 学術論文： なし

(2) 学会発表

1. Y. Akahoshi, S. Aoki (HAL QCD Coll.), “Study of the rho resonance using the HAL QCD method”, APLAT2020, 2020/08/4-7
2. K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki (HAL QCD Coll.), “Studies on meson-baryon interactions in the HAL QCD method with all-to-all propagators”, APLAT2020, 2020/08/4-7
3. 赤星友太郎, 青木慎也 for HAL QCD Coll., “HAL QCD 法を用いたロー中間子共鳴状態の解析”, 日本物理学会, 2020/09/14-17
4. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Coll., “All-to-all propagator を用いた HAL QCD 法のメソン-バリオン系への応用”, 日本物理学会, 2020/09/14-17
5. T. Doi for HAL QCD Coll., “Recent progress on Hadron Interactions from Lattice QCD”, ELPH 研究会 C029, 2020/11/4-5
6. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD でのメソン-バリオン相互作用の解析によるバリオン 10 重項の研究”, 日本物理学会, 2021/03/12-15
7. 赤星友太郎, “格子 QCD によるハドロン間力計算の将来 -物理点バリオン間力から共鳴状態まで-“, 日本物理学会, 2021/03/12-15

(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 | ○ | 3,000 | |
| 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。 | | | |