

格子 QCD シミュレーション

理論センターの格子 QCD グループでは、KEK のスーパーコンピュータを利用した量子色力学の大規模シミュレーションによる研究を推進している。KEK を中心として阪大、京大基研などを中心として十数名のメンバーからなる JLQCD collaboration を組織してシミュレーションのコード開発・最適化から実行、データ解析に至る研究を共同で行っている。2012 年から稼働している現行機（日立 SR16000M1 および IBM BlueGene/Q）は、全体で 1PFlops を超える性能をもち、世界トップレベルのシミュレーションを実行できる計算パワーをもつ。

2012 年のマシン稼働以降、JLQCD collaboration は、カイラル対称性をもつ格子フェルミオン定式化を用いた高精細格子での大規模シミュレーションを実行してきた。カイラル対称性は QCD がもつ最も重要な対称性の一つであるが、格子理論でこれを保つのは理論的に非常に難しく、通常よりも桁違いに大きな計算コストを要する。2006~2011 年の同グループの研究では、カイラル対称性を厳密に保つ定式化を用いた理論的にクリーンな計算により QCD における自発的カイラル対称性の破れにかかわる性質の研究などを行ったが、2012 年以降はカイラル対称性を若干犠牲にはするものの計算コストの格段に小さくなる定式化を開発・採用し、より大規模なシミュレーションを実行している。これにより、カイラル対称性を精度よく保ちつつ、格子カットオフ（格子間隔の逆数）で 2.4 GeV, 3.6 GeV, 4.5 GeV をもつ高精細格子上でのシミュレーションが実現した。

このシミュレーションの主たる応用は重いクォークの物理である。チャームおよびボトムクォークは質量が 1.5 GeV あるいは 4.5 GeV と比較的重いため、格子カットオフを大きく取らないと格子化の誤差が非常に大きくなってしまう。上記の高精細格子計算とそれにもとづくデータの連続極限への外挿によって、重いクォークに対しても系統誤差を小さく抑えた計算が可能になる。

2014 年末までに基礎となる格子上の QCD 真空のデータ生成は完了し、物理量計算に移行した。最初の応用は他の物理量計算の基礎となるパイおよび K 中間子の質量と崩壊定数の計算である。同時にチャームクォークを含む D および Ds 中間子の崩壊定数の計算も同時に進めた。2015 年 7 月に神戸で行われた格

子場理論国際会議(Lattice 2015)でその中間成果を発表したが、D 中間子の崩壊定数に関しては 2~3%の計算精度を実現し、現状で他グループがカイラル対称性を持たない定式化で計算したものとほぼ同レベルの精度を達成している。今後さらに、統計精度を格段に向上させる新たな手法を導入して再計算を行う計画である。また、同様のデータを用いて D 中間子のセミレプトニック崩壊形状因子の計算も進めている。

以上の他にも、得られた格子データは様々な物理量に応用可能である。これまでのところ、QCD 真空のトポロジー感受率の計算、フレーバー重項の η' 中間子の質量の計算、短距離相関関数を用いた繰り込み定数の計算、ディラック演算子の固有値スペクトルを用いたカイラル凝縮の計算などを同時に進めている。他に特筆すべき応用としては、チャームクォーク質量の精密決定があげられる。 η_c 中間子の質量をインプットとして、格子計算と摂動 QCD を組み合わせることでチャームクォークの質量を決定することが可能である。今回の高精細格子を使うことで、1%程度の精度が得られることが確認できており、現在解析と発表準備を進めている。これは PDG2014 に記載されている精度を上回っており、今後標準的な格子計算の一つとして参照されるようになると期待できる。

Lattice 2014 では、上記を含め、他に有限温度 QCD 相転移での軸性 U(1)対称性の回復にかかわる研究など、計 10 件の発表を研究グループとして行った。2012 年から行ってきた大規模計算から成果を得られつつあり、今後の広範な物理量計算を進めていきたい。

機構、特に計算科学センターの関係の皆さまには、スーパーコンピュータの整備運用、共同利用プログラム「大型シミュレーション研究」の運営に関して多大なご尽力をいただいていることを、この場を借りて感謝したい。