

## 新物理探索に向けた B 中間子の物理の格子 QCD 研究

### B meson physics from lattice QCD for search of new physics

金見隆志

高エネルギー加速器研究機構

#### 1. 研究目的

現在の素粒子標準理論は地上実験の殆どの結果を良く記述するが、暗黒物質や暗黒エネルギーの正体を説明できないなど、致命的な欠陥もある。このため、標準理論を超える物理、即ち、未発見の素粒子や物理法則が存在すると考えられており、これを新物理と呼ぶ。新物理を探索解明し、それを内包する新しい基礎理論を構築することは、素粒子物理の最重要課題の一つである。

このため、ハドロン崩壊を精密に測定する国際協力実験が世界中で行われており、実験測定結果と標準理論の予言をつきあわせて標準理論の綻び、即ち、新物理のヒントを見つけ出そうとしている。このアプローチでしばしば問題となるのが、従来解析的手法では計算することが難しい量子色力学 (QCD) の非摂動効果である。例えば、我が国が主導する SuperKEKB/Belle II 実験 (以下、Belle II 実験と呼ぶ) では、今後 10 年間に B 中間子崩壊の測定精度を格段に向上させようとしているが、新物理への感度を最大化するためには、QCD の非摂動効果を記述する「B 中間子行列要素」を実験に見合う精度で計算する必要がある。

QCD を時空格子上に定式化した格子 QCD の計算機シミュレーションは、その誤差を系統的に削減することができる強力な計算手法である。しかし、Belle II 実験に見合う理論計算精度を達成するためには、これまでと較べて格段に細かい格子を用いる必要があり、現在主流となりつつある GPU 計算機の利用が不可欠である。本研究は、Belle II 実験と協力した新物理探索を念頭におき、GPU 計算機上で効率的に動作する QCD コードセットを開発、整備することを目指している。

#### 2. 研究成果の内容

令和 7 年度は、必要なコードの開発と GPU 計算機である Miyabi での動作確認を行った。基盤となるコードセットとして、米国ブルックヘブン国立研究所の Peter Boyle 氏とエジンバラ大学の Antonin Portelli 氏が開発し、富岳での使用実績も多い「Grid++/Hadrons」を採用した。これに B 中間子行列要素の精密計算に必要な関数群、例えば、運動量射影したノイズ法を用いてクォーク伝播関数を計算する関数などを開発・実装した。次いで、 $64^3 \times 128$  という比較的大きい格子サイズ、B 中間子の物

理の離散化誤差を抑制するために 4.5GeV の格子カットオフ、計算コストを削減するために 500MeV の非物理的に重い  $\pi$  中間子質量を用いて  $B \rightarrow \pi \ell \nu$  セミレプトニック崩壊を記述する B 中間子行列要素を富岳、Miyabi-C、Miyabi-G 上で計算し、統計精度の範囲で結果が一致することを確認した。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

格子 QCD のシミュレーションでは、クォーク行列と呼ばれる巨大な疎行列の線形演算に殆どの計算時間が費やされる。通信が速く、メモリ参照も簡単な GH200 を搭載する Miyabi-G 実機を用いることにより、コードセットの開発、テストを効率的に行うことができた。

### 4. 今後の展望

今後は、本課題で開発したコードセットを Miyabi 上で高速に動作するように最適化を行うことによって、B 中間子崩壊の精密 QCD シミュレーションを実現する。本課題で注目した B 中間子のセミレプトニック崩壊は、Belle II 実験の比較的早い段階で高精度を達成できると期待されており、本課題が実現する精密シミュレーションにより、同実験と連携した新物理探索を推し進めていく。

### 5. 成果発表

- (1) 学術論文
- (2) 学会発表

- ・ "Lattice QCD for precision flavor, QCD spectroscopy", 13th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference, 2025/5/9, GIS National Tiwan University Convention Center, Taipei, Taiwan (招待講演)

- ・ "重いクォークの物理による新物理探索"、富岳成果創出加速プログラム「超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発」総括研究会、2025/9/9、ビジョンセンター田町、東京 (招待講演)

- ・ "格子 QCD"、Flavor Physics Workshop 2025、2025/9/25、白樺リゾート 池の平ホテル、長野 (招待講演)

- ・ "Heavy meson semileptonic decays from lattice QCD simulations"、「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2025、2026/1/14、御茶ノ水ソラシティカンファレンスセンター、東京 (招待講演)

- (3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*		
		当初配分	移行*	一般利用による追加

筑波大学計算科学研究センター 2025 年度学際共同プログラム利用報告書

Pegasus				
Miyabi-G	○	34650		
Miyabi-C	○	7040		
	※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入			