

理論センターは、文部科学省が進めているポスト「京」開発事業に伴うアプリケーション開発のための「ポスト「京」を用いて重点的に取り組むべき社会的・科学的課題（重点課題）」（平成 28 年度～31 年度）に参画している。ポスト京重点課題には 9 つの課題が選定されており、そのうちのひとつ「重点課題 9：宇宙の基本法則と進化の解明」は、KEK を含む 8 機関で形成する計算基礎科学連携拠点が推進の役割を担っており、KEK はその中で主にサブ課題 A「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」に関わる研究を担当している。

サブ課題 A では、SuperKEKB や J-PARC などの大規模精密実験・観測と呼応する格子 QCD による精密計算を実現し標準模型を精密に検証することで、これを超える理論の兆候をつかむことを目指す。また、標準理論から予想される初期宇宙での相転移現象の詳細な解明や、究極の理論と期待される超弦理論の解析を行う。

以下、それぞれの研究プロジェクトの目標と最近の状況について報告する。

(1) 素粒子現象論

量子色力学(QCD)の大規模数値シミュレーションにより、素粒子反応における標準模型からの寄与を精密に求め、精密実験の結果とつきあわせることで素粒子標準理論からの微細なずれを探索し、未知の粒子・相互作用の徴候を見つけることがポスト京での目標となる。具体的には、格子間隔（時空間の解像度）を従来の 0.1 fm から 0.03 fm まで削減した高精細格子での格子 QCD シミュレーションを実行し、重い b クォークの直接計算を実現する。誤差は格子間隔の 2 乗に比例するため、従来よりも格段に精密な計算が可能になる。

平成 26、27 年度に行った B 中間子レプトニック崩壊、D 中間子セミレプトニック崩壊の研究により、格子 QCD においてカイラル対称性を保つ定式化を用いた理論的にクリーンな計算手法を確立し、B 中間子の物理の精密研究に取り組む準備を整えた。計算の基礎となる格子データとして、以前の研究で蓄積した 3 つの格子間隔 ($a=0.081, 0.056, 0.044$ fm) での大規模なデータセットを用い、その上での物理量計算のコード開発・試験を行った。これらの成果を元に、今後 $B \rightarrow \pi l \nu$, $D l \nu$, $D^* l \nu$ セミレプトニック崩壊形状因子の本格的な計算を実行する。

(2) QCD 相転移

ビッグバンの過程で起こった相転移現象を定量的に解明することを目指す。QCDは宇宙初期にプラズマ相からハドロン相への転移が起こったと考えられており、その相転移はこれまでの格子 QCD シミュレーションによれば物理量の発散を伴わないクロスオーバーだとされている。しかしながら、残った理論的不定性のために、相転移における臨界指数は確立しておらず、QCD のカイラル対称性をより精密に扱った計算によって詳細に検討する必要がある。

以前の格子 QCD シミュレーションの結果によれば、有限温度の QCD 相転移は物理量に飛びのないクロスオーバーであったと認識されている。ところが、より最近の研究により、QCD の基本的な性質であるカイラル対称性を保つシミュレーションでは以前の理解とは異なる性質が見つかってきた。すなわち、フレーバー数 2 の QCD では、クォーク質量ゼロの極限では量子異常が高温相で消失し、トポロジ感受率に一次転移的な飛びが見られる。この著しい特徴は、フレーバー数 2 の QCD が、これまで一般的に考えられていた 2 次転移ではなく、1 次転移である事を示唆する。現実世界の良い近似となるモデルは 3 フレーバー QCD の相図(コロンビアプロット)の一つの点で表現されるが、2 フレーバーの結果は、その相図の境界の変更を示唆し、現実世界の相転移の理解にも影響を及ぼす可能性がある。ただし、感受率の飛びが確認されているのは相転移温度より高い $T > 1.3T_c$ 程度(T_c はカイラル対称性の回復する温度)で、有限サイズ効果の確認も始まったばかりであり、より相転移に近い温度と系統的な体積効果の追跡が必要である。

平成 30、31 年度は 2 フレーバー QCD の相転移の解明のため、有限体積効果の系統的な研究を、より相転移温度に近い領域まで拡張する。これにより、計算手法の改善、相転移の特徴を捉える物理量の選定を行い、最終的に 2 フレーバー QCD の相転移次数を確立することが目標である。また、並行して、3 フレーバー QCD の数値計算の準備を進める。

(3) 超弦理論

究極理論の候補とされる超弦理論とそれに基づく宇宙開闢の理解を目指したシミュレーション研究を行う。具体的には、超弦理論の定式化の有力候補とされる行列模型のシミュレーションによるインフレーション宇宙の理解を目指す研究や、超対称理論の非摂動的計算に向けた研究、超弦理論が予想する重力理論と場

の量子論の等価性を数値的に検証する研究などを多角的に行う。

超弦理論のもたらす一つの大きな予想に、ゲージ重力対応と呼ばれるものがある。これは、素粒子理論の基礎となっているゲージ場の量子論と、時空の力学を表す重力の理論が、実は同じものの2つの現れ方にすぎないという驚くべきものだが、その検証はこれまでのところごく限られた場合にとどまっている。格子 QCD の研究を通じて培われた様々な数値的手法を使って超対称ゲージ理論のシミュレーションを実現し、重力理論との比較を行うことができれば、この検証がさらに進展し、超弦理論の新たな進展にもつながる可能性があるだけでなく、ブラックホールの内部構造の理解やクォーク・グルーオン・プラズマの性質を理解にもつながる。

過去には、1次元超対称ゲージ理論の数値シミュレーションにより、IIA 型超重力理論におけるブラックホール時空との間の対応が調べられた。重点課題9・サブ課題Aでは、最大超対称な2次元ヤンミルズ理論において計算を進め、ゲージ理論の熱力学量が双対なブラックホールの振る舞いを再現することを確認した。今後の2年間は、ポスト京で実施予定の計算の準備として、最近理論的に完成した $O(a)$ 改良された超対称ヤンミルズ格子理論のコード開発を行う。このコードを用いて、 $N_c=12$ で格子サイズを数点変えた計算から連続極限をとり、これまでに得られている結果を精密化する。さらに、 N_c を変えた計算を行い、重力の量子効果を表す補正項を求める。

超弦理論は重力を含む統一理論として多くの研究がなされてきたが、場の量子論における格子ゲージ理論に相当するような非摂動的計算手法は確立していない。1996年に石橋・川合・北澤・土屋 (IKKT) が提唱したタイプ IIB 行列模型は、超弦理論の非摂動的定式化の有力候補であり、その数値的研究により、微視的な9次元空間から膨張する3次元宇宙が出現、あるいは指数関数的な宇宙膨張を示唆する結果など、興味深い結果が得られている。重点課題9・サブ課題Aのこれまでの準備的な研究では、フェルミオンの効果を見逃した場合について、行列サイズ 512×512 までの数値シミュレーションを行い、初期宇宙における膨張則に関する知見を得た。さらに、 $N \times N$ の行列に対する結果を、 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 程度の行列で得ることができる新しい手法の開発に成功した。さらに、フェルミオンの効果を取り入れた並列コードの開発に取り組んでおり、完成に近づいている。これらの成果をもとに、今後2年間、フェルミオンの効果を取り入れた計算を行列サイズ 128×128 程度行い、初期宇宙における膨張則およびインフ

レーションの継続期間 (e-folding) を決定する。

最後に、KEK が平成 30 年度から機能強化経費にもとづいて準備を進めている「素粒子原子核宇宙シミュレーションプログラム」について簡単に紹介したい。KEK が進めてきた共同利用プログラム「大型シミュレーション研究」は、平成 29 年度をもって中止することになった。これに代わる共同利用プログラムは、素粒子原子核研究所と計算科学センターが協力して担当し、素粒子・原子核・宇宙分野のシミュレーション研究を対象として、計算基礎科学連携拠点を通じて全国から課題を募る。現在、必要となるスーパーコンピュータの調達手続きを進めており、平成 30 年度中にテスト利用が可能になる予定である。

今回の新しい共同利用プログラムでは特に実験との連携的研究および国際共同研究を重点的に支援する方針で、素粒子原子核研究所が進める実験プロジェクトとの密接な連携が進むことが期待される。