令和２年度高性能汎用計算機高度利用事業
「富岳」成果創出加速プログラム
「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」
成果報告書

令和 3 年 5 月 28 日

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

橋本省二

目次

１．補助事業の目的 - 2 -

２．令和２年度（報告年度）の実施内容 - 4 -

２－１．当該年度（令和２年度）の事業実施計画 - 4 -

２－２．実施内容（成果） - 7 -

２－３．活動（研究会の活動等） - 16 -

２－４．実施体制 - 20 -

別添１　学会等発表実績 - 22 -

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」

１．補助事業の目的

高エネルギー加速器研究機構では、宇宙を支配する基本法則と物質の成り立ちに関わる大きな謎にシミュレーションを通じて挑む。新しい基本法則の探究から、複雑な原子核の理解、激しい天体現象を通じて起こった元素合成の解明まで、素粒子・原子核・宇宙物理の中心的な課題を取り上げ、富岳の計算能力を最大限に活かして早期に成果を得る。我が国が中心となって推進する実験・観測プロジェクトとの密な連携体制を組み、本事業では、相互に関連する以下の研究課題のシミュレーション研究を推進し、相互の成果を最大化することを目指す。

[B 中間子崩壊]

SuperKEKB/Belle II 実験で測定される B 中間子の崩壊では、そのいくつかで素粒子標準模型からのずれを示唆する実験データが得られている。データの蓄積とともに真偽が明らかになるはずだが、同時に必要になるのが、B 中間子崩壊に対する量子色力学(QCD)の寄与を正確に理解することである。格子 QCD シミュレーションにより B 中間子崩壊、特に $B \to \pi \ell \nu$ 崩壊、の形状因子を精密に計算し、実験結果と組み合わせて素粒子標準模型を超える物理法則に制限をあたえる。

[QCD 相構造]

宇宙初期に高温相にあったとされる QCD の真空は、相転移によって低温相に移行し、物質の質量の起源となっている。相転移の詳細は系のもつ対称性に支配されるが、QCD の対称性は量子異常により不明確になるため相構造は十分に理解されていない。カイラル対称性を保つシミュレーションにより、２＋１フレーバーQCD の相構造を確立する。

[バリオン間力]

陽子・中性子などのバリオンの間に働く力、バリオン間力は、原子核の理解の基礎になるべきものだが、それ自体が QCD によるクォークの複雑な相互作用の結果として生まれるもので、その計算には格子 QCD シミュレーションが必要になる。特に実験的情報の少ないストレンジクォークを含むバリオン間のハイペロン力の決定には、格子 QCD 計算による他ない。ハイペロン力や、さらに重いチャームクォークを含むバリオン間力の計算により未知の２バリオン状態の存否を明らかにし、J-PARC におけるハイパー核実験や LHC における重イオン衝突実験につなげる。

上記の３課題は、格子量子色力学計算に関わるものである。ポスト京開発中にコデザインの対象コードの一つとして取り上げられた格子量子色力学のコードについて、ウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバー、および、５次元ドメインウォール・フェルミオン・クォーク・ソルバーの富岳への最適化を進める。

［核構造とｒ過程］
原子核構造の研究を中性子過剰核に進め、重元素合成のｒ過程を定量的に理解することが大きなチャレンジとなる。これまでに培ったモンテカルロ殻模型の手法を適用してニッケル（原子番号２８）同位体の構造計算を質量数６８近傍から７８近傍、さらに質量数１００を超える領域にまでに進める。理研 RI ビームファクトリー(RIBF)での実験結果との比較によって信頼性を高め、ｒ過程の主要部を定量的に明らかにする。

［中性子星合体］
重元素合成の機構としてのｒ過程には、大量の中性子が必要になる。そのもっとも有力な起源と考えられているのが中性子星合体であり、2017 年の重力波イベントに付随した電磁波対応天体の観測によっても強く示唆されている。中性子星合体のシミュレーションを進めて合体時の放出物質の性質を明らかにすることで、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 等の重力波干渉計による重力波観測、光学望遠鏡による電磁波観測による検証へつなげる。

［時空生成］
ビッグバンは宇宙の始まりだとされているが、その最初の機構は明らかになっておらず、インフレーション宇宙論も現象論的な理論にすぎない。すべてを説明する理論として期待されている超弦理論を出発点として、無から時空が生成して成長する様子をシミュレーションで明らかにする。

２．令和２年度（報告年度）の実施内容

２－１．当該年度（令和２年度）の事業実施計画

（１）事業統括

本事業全体の取りまとめを行う。以下にあげる各研究の進捗を確認し、計算機資源の配分等の調整を行う。本研究を一般に紹介するためのホームページを作成する。

（２）[B 中間子崩壊]の研究

B→πℓν 崩壊の形状因子を高精度で決定するため、4.5GeV の格子カットオフで高統計のシミュレーションを進めるとともに、富岳を用いたより細かい格子での大規模シミュレーションに備える。ポスト京重点課題の本格実行フェーズで得られた知見から、SuperKEKB/Belle II 実験に見合う目標精度を達成するためには、小さい格子間隔での統計精度を向上させ、連続時空と現実世界のクォーク質量への外挿を制御する必要があることがわかった。そこで、本格実行フェーズで生成した格子配位を用い、格子カットオフ 4.5GeV で、高統計数の相関関数のデータを生成する。この計算は、既に実計算の実績がある HPCI 第二階層の計算機資源を用いて行う。標準理論を超える物理法則を幅広い B 中間子崩壊で精密に探るために、さらに細かい格子でシミュレーションを行い、離散化誤差を高精度で制御することを目指す。配位生成やクォーク伝播関数の計算のアルゴリズムとコードの検討・調整や、自己相関を調べるテスト計算を行い、次年度に富岳を本格的に使用する体制を整える。

（３）[QCD 相構造]の研究

2+1 フレーバーQCD のシミュレーションは、軽い 2 フレーバー(u, d クォーク)の平均質量と、重い 1 フレーバー(s クォーク)の質量、さらにゲージ結合の計３つの格子パラメタで決まる。ゲージ結合は主に格子間隔を制御し、ひいては、時間方向の格子サイズの逆数で与えられる温度を制御する。温度を変化させる際に温度以外の物理量を一定に保つため、ゼロ温度シミュレーションにより物理量一定を実現する格子クォーク質量をゲージ結合の関数として予め求めておく必要がある。このゼロ温度パラメタ探索シミュレーションは、また、本研究で用いる感受率などのくりこみにも用いられる。初年度は、HPCI 第二階層資源と富岳を用いて、ゼロ温度シミュレーションを行う。求めた配位上でスケールパラメタ t_0 とπ、K メソン質量を計算し、格子間隔及び物理点に相当する格子質量パラメタをゲージ結合の関数として求め、次年度以降の有限温度計算に備える。

（４）[バリオン間力]の研究

バリオン間力の統一的理解に向けて、バリオン間力の格子 QCD 計算や、得られたバリオン間力を基にした原子核やバリオン相関などへの応用研究を行う。様々なバリオン間力のうち、核力は豊富な実験データがあるがそれ以外のバリオン間力はほとんどデータが無い。そこで本年度は HPCI 第二階層の計算機資源を用いることで、ストレンジクォークやチャームクォークを含むバリオン間力を物理点近傍のクォーク質量で計算し、未知のダイバリオン状態を探索する。また、これらのバリオン間力を基に、少数多体系計算グループと連携し、ハイパー原子核など、どのような未知の原子核が存在するかを調べる。これらの結果を基に、 J-PARC におけるハイパー核実験や、重イオン衝突におけるエキゾチックハドロン/原子核生

成実験、バリオン間相関観測実験との連携を進める。これらと併行して、重いクォーク質量領域で、ハドロン間力の新たな計算手法の研究開発を進める。富岳の利用に向けてコードの準備やテスト計算を行い、次年度以降の本格利用に向けた体制を整える。これらの研究は理研、阪大、京大が連携して実施し、理研は物理点近傍でのバリオン間力を計算とダイバリオンおよびハイパー原子核を探索、阪大が物理点近傍でのバリオン間力計算と富岳に向けた準備、京大は共鳴状態の解明に向けたハドロン間力の新たな計算手法の研究開発を主として担当する。

（５）[核構造とｒ過程]の研究

元素合成過程解明に重要な中性子過剰核の大規模原子核構造計算に向け、準備研究をおこなう。特にカルシウム同位体からニッケル同位体近傍の中性子過剰核を中心に原子核構造計算をすすめる。最新の加速器実験によって得られた実験結果と比較・検討をおこない、殻模型有効相互作用の改良を進める。並行して、モンテカルロ殻模型に準粒子真空基底を導入するなどの新しい量子多体計算手法の検討と、計算コードの開発・高度化を進め、次年度以降の大規模計算に備える。

（６）[中性子星合体]の研究

弱い相互作用、ニュートリノ輻射輸送、一般相対論的磁気流体力学のすべてを考慮して、連星中性子星合体の数値相対論シミュレーションを合体後 1 秒程度まで行い、連星合体のダイナミクス、放射される重力波の波形、放出物質の熱力学的性質および化学的組成を定量的に明らかにする。上述の物理過程をすべて同時に考慮して、合体から合体後の進化までを追跡する計算は本研究が初めてである。さらに、放出物質のデータを用いてｒ過程元素合成計算を行い、その崩壊熱をエネルギー源とする紫外・可視・赤外域の電磁波放射現象を明らかにする。得られた重力波波形は、重力波観測実験 KAGRA における重力波テンプレートとしても活用される。また、放出物質から導かれるデータは電磁波追観測チーム J-GEM における解析に用いられる。本年度は、重力波イベント GW170817 からの制限に適合する相対論的平均場理論に基づく中性子星の状態方程式を採用して計算を実行し、GW170817 の解析も行う。

（７）[時空生成]の研究

超弦理論の非摂動論的定式化として提案された行列模型のシミュレーションを行い、(3+1)次元の膨張宇宙が出現することを検証する。これまでの研究では、数値シミュレーションを安定化するために、時間に対してわずかな虚時間成分を導入するウィック回転を行った場合について、計算を行ってきた。その結果、連続的な時間が出現し空間 3 方向が大きくなる現象が確認される一方、3 方向の空間の広がりは 2 点のみが担っており、残りの点が原点付近に局在するような状況がみられた。又このような状況は、ウィック回転の大きさを小さくすることにより、解消する傾向がみられた。本年度においては、行列サイズを大きくした計算や、より時間が経過した状況に対する計算を実行することにより、連続的な空間に近づく振る舞いが得られるかどうかを検証する。また、これまで無視してきたフェルミオンの効果を取り入れた計算のコードを開発し、次年度の研究に向けた準備も並行して進める。

（８）格子量子色力学コードの富岳向け最適化

本年度は富岳の構築と共に実機でのテストが可能となる予定である。ウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーの最適化について次の２点を行う。富岳構築に伴い多ノード実機上での MPI 並列性能の最適化を行う。また、実機上でしか実行・最適化することの出来ない半精度加速部分のカーネルコードの最適化も行う。５次元ドメインウォール・フェルミオンクォークソルバーについては次の最適化を行う。５次元ドメインウォール・フェルミオン・クォークソルバーの計算カーネル部は上記ウィルソン・クローバー・フェルミオン・クォーク・ソルバーの計算カーネルと構造が共通である。富岳最適化済みのウィルソン・クローバー・フェルミオン・クォーク・ソルバーの計算カーネル部を５次元ドメインウォール・フェルミオン・クォーク・ソルバーの計算カーネルへ組み込む作業を進める。

２－２．実施内容（成果）

（１）事業統括

本事業全体の取りまとめを行った。以下にあげる各研究の進捗を確認し、計算機資源の配分等の調整を行った。本研究を一般に紹介するためにシンポジウムの開催、ホームページの作成・公開、研究紹介記事など随時情報発信を行った。活動の詳細は、２-３．活動（研究会の活動等）に報告する。

（２）[B 中間子崩壊]の研究

小林・益川行列要素$|V_{ub}|$を高精度で決定するため、ポスト京重点課題９で行った$B\to\pi\ell\nu$崩壊の研究の高精度化に着手し、計画していた準備とシミュレーションを行った。$|V_{ub}|$は素粒子標準理論の基礎パラメタであり、その主要な不定性は、微分崩壊率の実験測定と形状因子の理論計算から生じる。我が国が主導するSuperKEKB/Belle II実験によって前者は格段に削減されるため、本研究では、これに見合う理論計算を実施する。QCDの大規模シミュレーションによって形状因子を運動量遷移と呼ばれる力学変数の関数として高精度で決定するためには、運動量を変えて軽いクォークの伝播関数を繰り返す必要があり、大きな演算量を必要とする。本年度は、まず、富岳において高効率で動作するコードセットの開発・整備を行った。メニーコアアーキテクチャに向けて設計されたGridを採用し、相関関数を高統計精度で計算するための手法をC++関数として開発・実装して、富岳で本格的な計算を行う体制を整えた。第二階層のOakforest-PACS計算機で使用していた以前のコードセットと比較して、実行性能が約40％向上した。また、QCD相構造の研究との情報交換により、さらなる高速化が可能である見通しも得た。

このコードセットを用い富岳とOakforest-PACS上でシミュレーションを実施した。連続時空への外挿の制御において重要な4.5GeVの格子カットオフで、高統計制度を達成するために重要な運動量反跳ゼロの場合に、高統計のデータ・セットを生成した。さらに、現実世界のπ中間子質量への外挿の制御に向けて、小さい格子カットオフ2.5GeVでのシミュレーションも実施した。相関関数の総時間距離を変えた計算により先行研究で問題となっていた励起状態の寄与による不定性を制御し、相関関数の統計精度を約15%改善した。

（３）[QCD 相構造]の研究

2+1 フレーバーQCD のシミュレーションは、軽い 2 フレーバー(u, d クォーク)の平均質量 m_{ud} と、重い 1 フレーバー(s クォーク)の質量 m_s、さらにゲージ結合 β の計３つの格子パラメタで決まる。ゲージ結合は主に格子間隔 $a=a(\beta)$ を制御し、ひいては、時間方向の格子サイズの逆数で与えられる温度 $T=1/(a N_t)$ を制御する。温度を変化させる際に温度以外の物理量を一定に保つため、ゼロ温度シミュレーションにより物理量一定を実現する格子クォーク質量をゲージ結合の関数として予め求めておく必要がある(Line of Constant Physics: LCP): $m_{ud}(\beta), m_s(\beta)$。格子間隔 $a(\beta)$ を含めた LCP は現実世界のハドロン質量比を与えるパラメタ近傍でゼロ温度シミュレーションと解析を行い、現実世界の質量スケールをインプットする事により求められる。ここで用いられるメビウス・ドメインウォールフェルミオン格子作用は、[B 中間子崩壊]の研究と共通で、JLQCD コラボレーションにより精細格子のアンサンブルが生成されてい

る。本年度はこれらのアンサンブルを用いて LCP を以下の様に求めた。

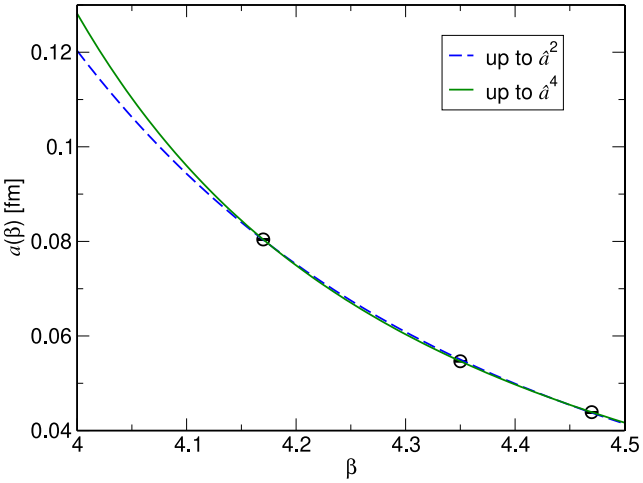

図 1：格子間隔 a(β)

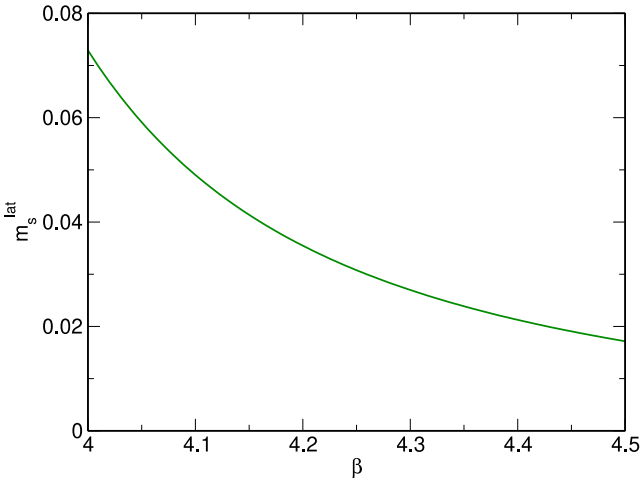

図 2：m_s(β)

図 1 は格子間隔をβの関数として図示したもので、○で示される 3 点のシミュレーション結果を摂動論的なスケールでパラメトライズする手法を用いて内外挿した。これによりβの連続関数として格子間隔の値が求められたことになる。図 2 で示される m_s(β)はまず、図 1 の 3 点で測定されているクォーク質量くりこみ定数 Z_m をβの関数として内外挿し $Z_m\ m_s^{lat}\ a^{-1} = m_s^{phy}$ を用いて求めた。右辺の物理点 s クォーク質量(物理次元)は高精度に求められており、それをインプットとして左辺の格子クォーク質量(無次元)を導いている。m_s(β)が求まったので、それとの比が、やはり高精度で知られている m_{ud}(β)も求まったことになる。これら LCP を有限温度で用いられるβ領域でさらに精密化するために、β=4.1 近傍の測定とその LCP への組み込みは次年度の優先課題となる。

ゼロ温度の解析と並行して、有限温度相転移点の探索に有用なカイラル感受率を有限温度シミュレーションのみで正則化する手法を開発した。これにより、ゼロ温度の詳細なシミュレーションを追加で行う事無く有限温度相転移の探索を行えることになる。

ドメインウォールフェルミオンシミュレーションを富岳で効率よく実行するために、富岳の CPU で高効率に動作する QCD パッケージ Grid の Arm SVD 対応版を用いたチューニングを行った。この間、我々のベンチマークにより富岳の MPI 関係の二つの問題が同定され、そのうちの一つであるメモリリーク問題が改善されたことにより、意味のある実行時間幅でのプロダクションが 2 月中旬から可能になった。その結果、当初試算で Intel Knights Landing (KNL) とのメモリ速度比から、KNL の 2 倍の実行効率を目指していたが、1.5 倍程度を達成していることを確認した。HPCI 第二階層資源で進んでいた計算の富岳への移行が完了し、有限温度計算のプロトタイプの実行により、次年度以降の有限温度計算のパラメタ選定に資する情報を得た。

（4）［バリオン間力］の研究

バリオン間力の統一的理解に向けて、バリオン間力の格子 QCD 計算や、一般ハドロン間力への拡張、また得られたバリオン間力を基にしたバリオン相関の応用研究などと共に、次年度からの富岳の本格利用に向けたコード最適化を行った。

バリオン間力に関しては、京で生成した(2+1)フレーバー・大体積ゲージ配位（格子サイズ(8.1fm)^4、格子間隔(2.3GeV)$^{-1}$）を用い、物理点近傍の軽クォーク質量（パイオン質量 146MeV）かつ物理点チャームクォーク質量において、チャームクォークのみからなるバリオン・Ωccc 間の相互作用（$^1S_0$ チャネル）を計算した。得られたポテンシャルは図 3 のようになり、強い引力と斥力芯からなることが明らかになった。Ωsss 間の相互作用と比べ、関与するクォーク質量が重くなっていることに対応して引力のレンジが短くなっている。また斥力芯は弱くなっており、これはグルーオン交換によるカラー磁気相互作用の観点から理解できる。得られたポテンシャルの結果を基に計算した散乱位相差が図 4 であり、位相差が閾値エネルギーにおいて 180 度となっていることから、この系は強い相互作用（QCD）の結果として束縛ダイバリオン状態となることが明らかになった。

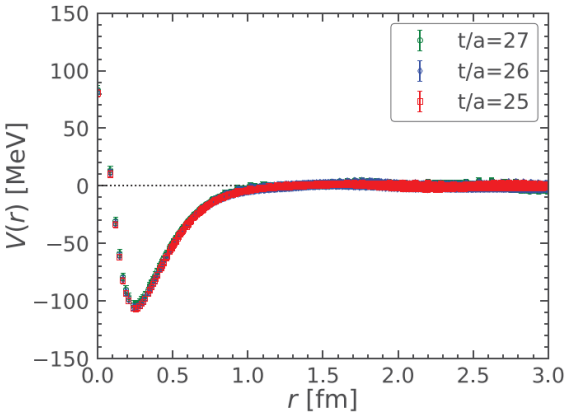

図 3：Ωccc 間の相互作用（QCD）

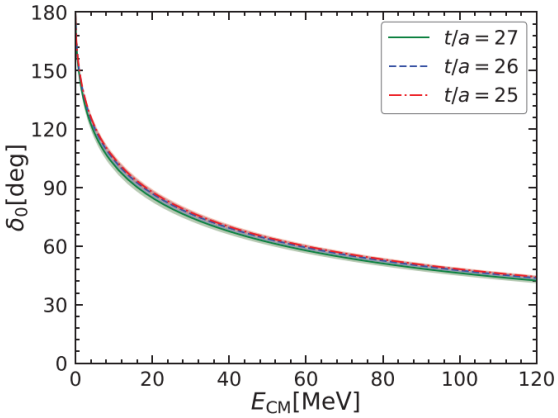

図 4：Ωccc 間の散乱位相差（QCD）

ただし、現実の系においては、QCD のみならずクーロン力（この場合は斥力）の効果も考える必要がある。Ωccc 粒子内の電荷分布も考慮したうえで格子 QCD バリオン間力＋クーロン力を用いてこのダイバリオン系の計算を行うと、束縛・非束縛のちょうど境界である、ユニタリー極限のごく近傍（非束縛側）に位置することが明らかになった。どの程度ユニタリー極限に近いかを示す指標である有効距離 r_{eff} と散乱長 a_0 の比は、r_{eff}/a_0=−0.024(0.010)(+0.006/−0.014)であり、これは様々なダイバリオン系の中でも最も小さな値（＝最もユニタリー極限に近い）になっている。(図 5)

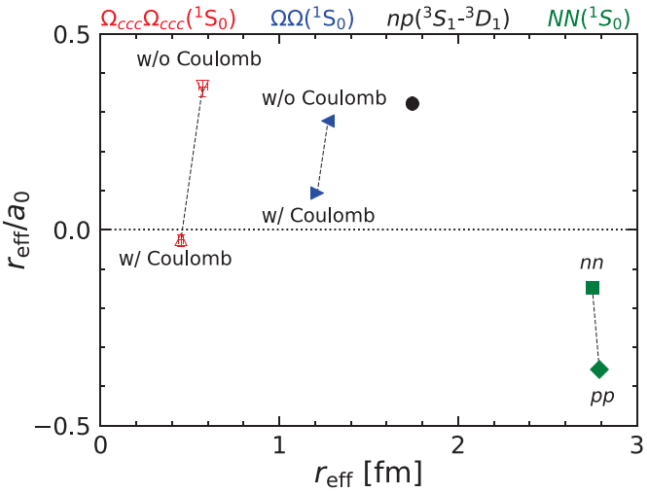

図 5：様々なダイバリオンにおけるユニタリ―極限への近傍度合
（本研究が予言するΩcccΩccc 系の結果は赤）

このように、本研究によりチャームクォークのみからなるダイバリオン系がユニタリ―極限のごく近傍に存在することを世界で初めて明らかにすることができた。本成果は既に論文としてまとめ、投稿中である。[1]

エキゾチックなダイバリオン候補として近年強い興味を持たれているのが d*(2300)（J^P, I)=(3^+, 0）である。これは実験的には ABC effect としても知られており、$^7S_3$チャネルにおけるΔΔダイバリオンとして理解できるのではと考えられてきたが、QCD に直接基づく理論計算はこれまで行われていなかった。そこで我々はΔΔ相互作用を格子 QCD で計算し、この系の性質を解明する研究を行った。Δを安定粒子として扱うために重いパイオン質量領域（0.68-1.02GeV）において格子 QCD 計算を行った。得られたポテンシャルが図 6 であり、全領域で引力という特徴的振る舞いを示している。このポテンシャルを基に計算した散乱位相差が図 7 であり、このパイオン質量領域においてΔΔダイバリオン束縛状態が形成されることを初めて明らかにした。[2]

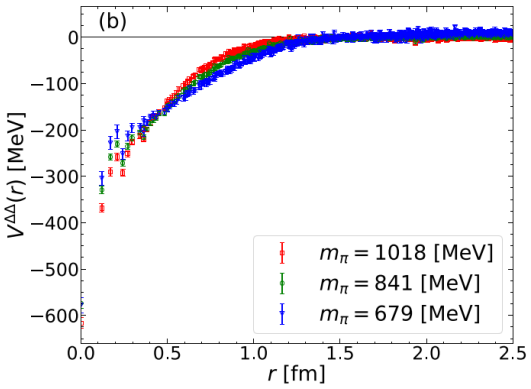

図 6：ΔΔ（$^7S_3$チャネル）間の相互作用

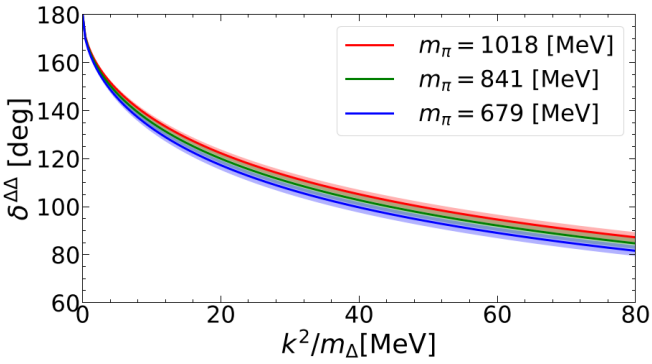

図 7：ΔΔ（$^7S_3$チャネル）間の散乱位相差

格子 QCD によるバリオン間力計算が進展するにつれ、その実験的検証も重要な課題となっている。特に近年、原子核衝突実験においてバリオン間相関を観測することによりバリオン間相互作用の情報を取り出す研究が進展している。そこで我々は LHC ALICE 実験グループと連携することで、格子 QCD 計算と加速器実験の共同研究を進めた。図 8 は我々（HAL QCD）の物理点近傍格子 QCD 計算で得られた NΞ ハイペロン力［3］を基に予言した NΞ バリオン間相関と、実際に実験で観測されたバリオン間相関［4］を比較した図である。非常によく一致しており、バリオン間力研究の新たな 1 ページが拓かれたといえる。

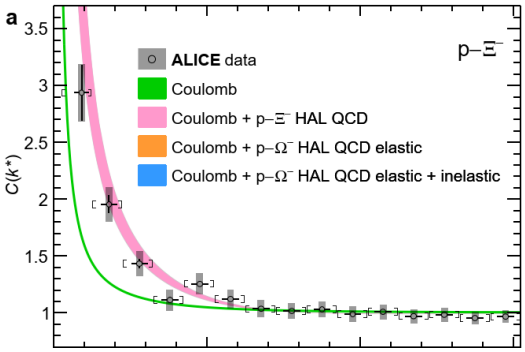

図 8：原子核衝突実験での NΞ 相関［4］

さらにバリオン間力のみならず、一般ハドロン間力への拡張として、I=1 ππ 相互作用の計算を重いクォーク質量で行った。従来の HAL QCD 法では、クォーク対生成消滅ダイアグラムが存在する系については、計算コストが大きくなりすぎ研究困難であったが、all-to-all プロパゲーターを exact low-modes + stochastically estimated high-modes で計算する hybrid method を用いることでこの困難を克服した。パイオン質量 0.87GeV における計算を行い、ππ 相互作用の結果として ρ メソンが深い束縛状態として現れることを示した［5］。

以上のような物理的研究に加えて、次年度からの富岳の本格利用に向けたコードの最適化も行った。京で用いたコードをそのまま用いた場合は非常に低い計算効率であったが、最適化により計算効率を約 10 倍改善することに成功し、今後の本格利用に向けた体制を整えた。さらに、バリオン間力計算の系統誤差削減や P 波相互作用の計算に向けて all-to-all プロパゲーターを用いた新たな計算アルゴリズムを開発した。

[1] Y. Lyu, H. Tong et al., arXiv:2102.00181 [hep-lat].
[2] S. Gongyo et al. (HAL QCD Coll.), Phys. Lett. B811 (2020) 135935.
[3] K. Sasaki et al. (HAL QCD Coll.), Nucl. Phys. A998 (2020) 121737.
[4] ALICE Coll., Nature 588 (2020) 232.
[5] Y. Akahoshi et al., PTEP 2020 (2020) 073B07.

（５）[核構造とｒ過程]の研究

富岳における大規模計算に対応するため、原子核構造計算手法の開発をおこなった。東京大学グループ独自の手法であるモンテカルロ殻模型を発展させ、準粒子真空基底殻模型(QVSM)を提唱、コード開発と手法の有用性を検証した。この手法では、原子核殻模型波動関数を、粒子数・パリティ・角運動量射影したボゴリウボフ準粒子真空基底の重ね合わせで表現する。中重核において、ベンチマークテストをおこない、手法の有用性を示した。さらに富岳利用に向けてコード開発をおこなった。図９は、QVSM コードの富岳における並列性能（ストロングスケーリング）を示したものである。最も計算量が多い 36 基底目では、富岳およそ 20,000 ノードまでの良好な並列性能を示している。これらの成果をとりまとめ、N. Shimizu et al., Phys. Rev. C 103, 014312 (2021)に出版した。

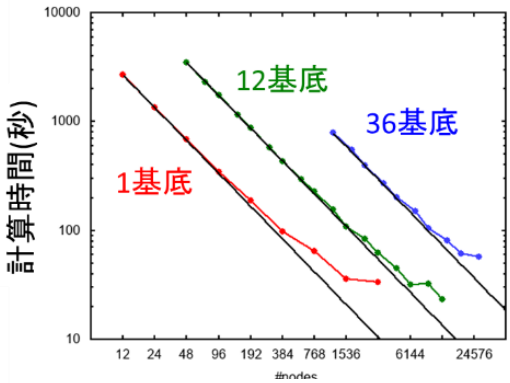

図 9：QVSM コードの富岳における並列性能（ストロングスケーリング）

中重核領域の原子核研究分野では、マグネシウム(陽子数 12)近傍の中性子過剰核について、殻模型計算・モンテカルロ殻模型による大規模原子核構造計算をおこなった。中性子ドリップラインの位置を理論的に求め、それを決定するメカニズムとして原子核の変形効果が重要な役割を果たすことを示した。さらに核子間相互作用の３体力成分に起因する不定性と、有効相互作用構築に起因する不定性の両方を第一原理的に評価し、N. Tsunoda et al., Nature 587, 66 (2020)に出版した。

さらに、ニッケル(陽子数 28)、スズ(陽子数 50)、サマリウム（陽子数 62)同位体や、中性子数 82 近傍の中性子過剰同位体などの近傍の複数の領域の核種を計算し、理論計算に基づいた原子核構造の研究を進めるとともに、実験グループとも共同研究を行ってきた。ニッケル領域ではニッケル 64 での変形共存について議論した N. Mărginean *et al.*, Phys. Rev. Lett. 125, 102502 (2020)など 3 本の論文を実験グループと共著で発表した。図 10 にニッケル 64 の準位図を示す。赤で示したプロレート変形と考えられる状態を含めて、モンテカルロ殻模型計算により実験データを再現している。計算ではエネルギーが低い方から 4 つの角運動量 J=0 の状態がそれぞれ球形、オブレート変形、球形、プロレート変形となっており、異なる形の状態が低いエネルギーに現れる変形共存現象と考えられる。

モンテカルロ殻模型を発展させた手法である準粒子真空殻模型は、対相関が重要となる質量数の大きい原子核やニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素をより高い精度で計算できると期待される。カルシウム同位体の中性子過剰核や、二重ベータ崩壊核であるゲルマニウム 76、ネオジム 150 やその周辺のサマリウム同位体などについて、ベンチマーク計算よりも広い模型空間で有効相互作用の改良とより現実的な計算を進めた。

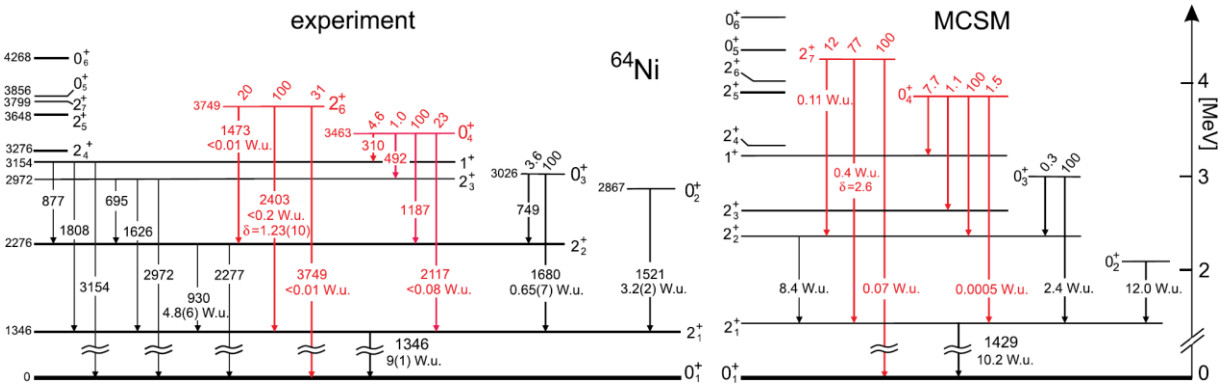

図 10: ニッケル 64 の準位図。左は実験値、右はモンテカルロ殻模型(MCSM)による計算値。
N. Mărginean *et al.*, Phys. Rev. Lett. 125, 102502 (2020)より引用。

モンテカルロ殻模型に基づく第一原理計算手法により、軽い核の第一原理計算の原理実証研究をおこなった。特に、恒星内での元素合成過程において重要な役割を果たすと思われる炭素 12 の Hoyle 状態を含む励起状態の構造の第一原理計算を推進し、富岳を用いることにより京コンピュータでは到達できなかった計算精度を達成し、実験値と比較可能な水準まで達することができた。

図 11 に Hoyle 状態を含む炭素 12 の低励起状態の計算結果を示す。エネルギー準位、遷移強度確率、および、四重極モーメントの実験結果との比較である。図中の左側が実験値(EXP)で、右側が計算値(MCSM)であり、横線がエネルギー準位、縦の矢印が遷移強度確率を表している。準位間で左右 2 本ある矢印のうち、左側が単極遷移、右側が四重極遷移を表し数値はそれぞれ M(E0)[efm^2]、B(E2)[e^{2}fm^4]である。また、2^+状態の横にある数値は四重極モーメント Q[efm^2]を示している。この図をみてわかるように、Hoyle 状態（0_2^+）も含め実験値と比較的よい一致が本計算により得られていることがわかる。本計算では核力としてカイラル有効場の理論に基づく Daejeon16 NN 相互作用を用い、殻模型空間で 7 主殻に及ぶ基底空間を取った大規模なものである。

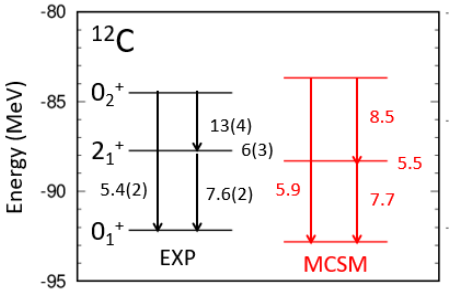

図 11：Hoyle 状態を含む炭素 12 の低励起状態の計算結果

（６）［中性子星合体］の研究

本年度の研究計画の通り、 弱い相互作用、ニュートリノ輻射輸送、一般相対論的磁気流体力学のすべてを考慮した数値相対論シミュレーションコードの富岳実機上でのコードのチューニングを行った。詳細プロファイラによる解析の結果、2 つの大きなボトルネックとして、ソフトフェアパイプライニングの非適用ループの存在、メモリースループット値が想定よりも低い、ということが明らかになった。前者については、空間三次元に対応する三重ループの融合とブロック分割および明示的ソフトフェアプリフェッチを行い、後者については、不要な変数の削除および Open MP スレッド分割方法の変更による最適化を行った。その結果、実行性能がそれぞれ 200%および 140%に向上した。長時間シミュレーションではじめて影響の出る問題点（空間対称性および保存則の破れ）の改善も行い、2021 年度のサイエンスラン遂行の準備を完了した。

（７）［時空生成］の研究

超弦理論の非摂動論的定式化として提案された行列模型のシミュレーションを行い、(3+1)次元の膨張宇宙が出現することを検証すべく、以下のような研究を行った。まず、これまでの研究では、数値シミュレーションを安定化するために、時間に対してわずかな虚時間成分を導入するウィック回転を行った場合について、計算を行ってきた。その結果、連続的な時間が出現し空間 3 方向が大きくなる現象が確認される一方、3 方向の空間の広がりは 2 点のみが担っており、残りの点が原点付近に局在するような状況がみられた。本年度においては、ウィック回転をしなくても安定にシミュレーションを行うことができることが明らかになり、これまでとは異なる新しい相の存在が発見された。この相では、連続的な時空が現れているが、これまでの研究で見られていたような空間 3 次元方向のみの膨張は見られていない。この原因は、シミュレーションを行った行列のサイズが小さいことが考えられる。特にフェルミオンの効果を入れたシミュレーションのコストは行列サイズの 5 乗に比例するが、我々はそのような計算を可能にする並列化コードを開発し、今後大きな行列サイズのシミュレーションを行うための準備が整った。

（８）格子量子色力学コードの富岳向け最適化

本年度は富岳の構築が進行しそれに伴って実機でのテストおよび最適化を行った。最適化されたウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーについて次の最適化と試験を行った。多ノード実機上での MPI 並列性能の最適化をおこない、ベンチマークテストで格子サイズ 192^4 のターゲット問題を富岳の 147456 ノードを用いて行い、京の速度の約３８倍の高速化を果たした（活動（８）[1,2,4,5]）。また並列性能最適化において低レベル通信ライブラリ uTofu を用いた低レイテンシ隣接通信ライブラリを開発した（活動（８）[2,3]）。５次元ドメインウォール・フェルミオン・クォーク・ソルバーについては上述の富岳最適化済みのウィルソン・クローバー・フェルミオン・クォーク・ソルバーの計算カーネル部を５次元ドメインウォール・フェルミオン・クォーク・ソルバーの計算カーネルへ組み込んだ。コデザイン業務を通じて作成した富岳向けに最適化されたウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーを QCD Wide SIMD Library (QWS)という名前でソフトウェア公開した(https://github.com/RIKEN-LQCD/qws)。また、本コデザイン業務で得られた知見を汎用コードの最適化に用いた（活動（８）[6,7,8]）。

２－３．活動（研究会の活動等）

領域①「人類の普遍的課題への挑戦と未来開拓」の本課題「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」および「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」は、計算基礎科学連携拠点として協力し、素粒子・原子核・宇宙・惑星物理分野の計算科学をリードする存在として、さまざまな科学的成果を創出するとともに、計算科学推進体制の構築や分野振興活動を行った。
課題内では、プロジェクトマネージャーが課題代表者のもとで行われる運営委員会などの会議を開催するとともに、サブ課題やテーマ責任者を通じて情報収集、課題内のメーリングリストを通じて情報交換している。特に、複数テーマに関係する QCD コード関係の富岳を使った進捗報告と情報交換の会を隔週で行った（9/30、10/13、27、11/10、25、12/9、23、1/13、27、2/10、24、3/10、24）。
課題外では、各種メディアをウォッチし、学会や研究者グループ等のメーリングリストに登録して情報収集を行っている。このような課題内外の情報収集を行うとともに、２課題に所属する素粒子・原子核・宇宙・惑星の４分野にわたる研究者が交流して情報交換する場を設けるためセミナーや研究会を開催した。
また、研究内容と成果を広報して国民の理解を得ることは、領域①としては特に重要で、定期的な記事配信などホームページを通じた成果の公表、イベント等での一般普及活動などを計画していたが、新型コロナウィルスの影響でイベント等での一般普及活動などは実施できなかった。

＜研究会、セミナー等＞
研究会やセミナーは研究を進めるうえで重要な役割を果たす。特に研究分野の最新の動向を知るのみならず、自身の研究との関係性や今後の発展を考えるため、研究手法の異なる理論や実験・観測の研究者と協力してサイエンスを進めていくためにも必要不可欠なものである。本年度は新型コロナウィルスの影響でセミナーや研究会の開催数が減り、またそのすべてがオンラインによる開催となった。重点課題⑨から引き続き行われている HPC-Phys 勉強会は計算科学を軸に各分野の交流が活発に行われており、参加者からも好評を得ており前年度に比べて開催数も増えている。セミナーと研究会は本年度 7 件が実施され総参加者は計 624 名であった。

●第７回 HPC-Phys 勉強会
参加者：36 名
日時：令和 2 年 6 月 17 日
場所： オンライン開催
主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）
概要： 物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの７回目。伝統的な HPC の話題で勉強会を開いた。

●第８回 HPC-Phys 勉強会
参加者：33 名

日時： 令和２年９月 24 日
場所： オンライン開催
共催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS)、理研計算科学研究センター（R-CCS)
概要： 物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの８回目。富岳４冠達成の功績に関わる、HPL-AI 用と Graph500 用のプログラム作成に関する講演を行った。

●研究会「星の錬金術から銀河考古学へ」
参加者：209 名
日時：令和２年 10 月 26 日～30 日
場所：オンライン開催
主催：国立天文台
後援：理研 RIBF 理論研究推進会議、計算基礎科学連携拠点（JICFuS)
概要： 元素合成に関するｒプロセスを中心に銀河の化学進化をテーマとした研究会。

●第９回 HPC-Phys 勉強会
参加者：50 名
日時： 令和２年 12 月３日
場所： オンライン開催
主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS)
共催：理研計算科学研究センター（R-CCS)
概要： 物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの９回目。富岳開発に関する講演を行った。

●「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム
参加者：126 名
日時：令和３年１月 28 日,29 日
場所：オンライン開催
主催：計算基礎科学連携拠点、「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」・「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」
概要：「富岳」での成果創出を目指して、各課題によるこれまでの研究の進捗とこれからの展望が発表された。

●第１０回 HPC-Phys 勉強会
参加者：55 名
日時： 令和３年２月４日
場所： オンライン開催

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）
共催：理研計算科学研究センター（R-CCS）
概要： 物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの 10 回目。GPU に関する講演を行った。

●CfCA 流体学校
参加者：115 名
日時：令和 3 年 3 月 10 日～3 月 12 日，3 月 22 日～3 月 23 日
場所：オンライン開催
主催：国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト
後援：「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」、「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」
概要： 基礎編と応用編の２つの日程で開催された。数値流体の基礎や磁気流体力学についてのスクール。

＜研究成果の情報発信＞
課題で得られた研究成果の普及、社会への情報発信は、計算基礎科学連携拠点（JICFuS）として、領域①「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」および「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」が協力し、これまでの JICFuS 広報コンセプトを継続して行っている。

●ウエブサイトの制作・更新管理
領域①「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」のウェブサイト（日・英）を制作し、2020 年 9 月から公開している。
　計算基礎科学連携拠点（JICFuS）　http://www.jicfus.jp/jp/
　領域①「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで」
　https://jicfus.jp/fugaku_pn/jp/

●メディア対応
1）プレスリリースおよびニュースリリース
・原子核の存在限界（中性子ドリップライン）の新たなメカニズム
発表日：令和 2 年 11 月 5 日情報解禁
発表主宰者：東京大学 大学院理学系研究科，理化学研究所，日本原子力研究開発機構
上智学院，宇都宮大学，日本大学 文理学部
メディア掲載：マイナビニュース(11/6)

●ウエブマガジン「月刊 JICFuS」製作
若手研究者を中心にインタビュー記事を掲載。本年度はオンラインにて取材を行い 40 号と 41 号の２本

を制作した。
・第 40 号「原子核シッフモーメントの精密計算で 宇宙が物質だけからできている謎に迫る」（令和 3 年 3 月 11 日）東京大学 原子核科学研究センター　柳瀬 宏太 特任研究員
・第 41 号「スーパーコンピュータを使った超弦理論の数値シミュレーションによる時空創発の研究」（令和 3 年 3 月 13 日）高エネルギー加速器研究機構 畠山洸太 研究員

●リーフレット
A3 判変形四つ折り。２か国語（日・英）で製作し、各種イベントで配布予定。本年度は新型コロナウィルスの影響で各種イベントが中止となったため、日本語のみ制作しオンラインにて公開となった。

＜個別活動、特記事項＞
活動として、各研究テーマの個別活動や特記事項を以下に報告する。
（２）[B 中間子崩壊]の研究
理論・実験研究者間の情報交換と若手研究者の育成を目指し、SuperKEKB/Belle II 実験の研究者と協力して、次の研究会と勉強会を開催した。
・「Flavor Physics Workshop 2020」、2020 年 11 月 24-27 日、オンライン開催、参加登録者 193 名
・「第 23 回 B ファクトリー物理勉強会」、2020 年 12 月 22 日、オンライン開催、参加登録者 62 名

２－４．実施体制

実施項目	実施場所	担当責任者
（１）事業統括	茨城県つくば市大穂１番地１ 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター センター長　教授　橋本 省二
（２）[B中間子崩壊]の研究	茨城県つくば市大穂１番地１ 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター センター長　教授　橋本 省二
（３）[QCD相構造]の研究	兵庫県神戸市中央区港島南町７丁目１番地２６ 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー　青木 保道
（４）[バリオン間力]の研究	埼玉県和光市広沢２番１号 国立研究開発法人理化学研究所仁科加速器科学研究センター	国立研究開発法人 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 専任研究員　土井 琢身
	大阪府茨木市美穂が丘１０番地１ 国立大学法人大阪大学 核物理研究センター	国立大学法人大阪大学 核物理研究センター 教授　保坂 淳
	京都市左京区北白川追分町 国立大学法人京都大学 基礎物理学研究所	国立大学法人京都大学 基礎物理学研究所 教授　青木 慎也
（５）[核構造とr過程]の研究	東京都文京区本郷七丁目３番１号 国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科	国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科 原子核科学研究センター 特任准教授　清水 則孝
（６）[中性子星合体]の研究	茨城県つくば市大穂１番地１ 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター センター長　教授　橋本 省二

（７）［時空生成］の研究	茨城県つくば市大穂１番地１ 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター センター長　教授　橋本 省二
（８）格子量子色力学コードの富岳向け最適化	広島県東広島市鏡山一丁目３番２号 国立大学法人広島大学	国立大学法人広島大学 理学研究科 准教授　石川 健一

別添１　学会等発表実績

（２）[B 中間子崩壊]の研究

学会等発表

1. 「相対論的格子 QCD による B 中間子セミレプトニック崩壊の研究」、金児隆志、シンポジウム「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」、2021 年 1 月 28 日、高エネルギー加速器研究機構（オンライン開催）

（３）[QCD 相構造]の研究

論文

1. “Axial U(1) symmetry and mesonic correlators at high temperature in Nf=2 lattice QCD”, Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Christian Rohrhofer, PoS LATTICE2019 (2020) 178.
2. “Symmetries of the light hadron spectrum in high temperature QCD”, C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L.Ya. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, K. Suzuki, PoS LATTICE2019 (2020) 227.
3. “Study of the axial U(1) anomaly at high temperature with lattice chiral fermions”, S. Aoki, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, C. Rohrhofer, K. Suzuki, Phys. Rev. D103 (2021) 74506.
4. “Performance Modeling of Streaming Kernels and Sparse Matrix-Vector Multiplication on A64FX”, Christie Alappat, Nils Meyer, Jan Laukemann, Thomas Gruber, Georg Hager, Gerhard Wellein, Tilo Wettig, *2020 IEEE/ACM Performance Modeling, Benchmarking and Simulation of High Performance Computer Systems (PMBS)*, 2020, pp. 1-7.

学会等発表

1. Poster at the 3rd R-CCS International Symposium, Feb 15, 2021, “Preparation of LQCD code for Fugaku”, Issaku Kanamori, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyam, Takumi Doi, Shoji Hashimoto, Ken-Ichi Ishikawa, Takashi Kaneko, Hideo Matsufuru, Tomoya Nagai and Yoshifumi Nakamura.
2. Poster at the 3rd R-CCS International Symposium, Feb 15, 2021, “Lattice QCD on Fujitsu A64FX”, Nils Meyer, Tilo Wettig, Dirk Pleiter, Stefan Solbrig and Peter Georg.
3. 深谷英則(阪大理)，青木慎也(京大基研)，青木保道(理研 RCCS)，橋本省二(KEK、総研大)，金森逸作(理研 RCCS)，金児隆志(KEK、総研大)，中村宜文(理研 RCCS)，Christian Rohrhofer(阪大理)，鈴木渓(JAEA)，Axial U(1) anomaly in 2+1-flavor lattice QCD at high temperature near the physical point，日本物理学会 第 76 回年次大会，オンライン（https://w4.gakkai-web.net/jps_search/2021sp/），2021 年 3 月

（４）[バリオン間力]の研究

論文

1. T. Miyamoto, Y. Akahoshi, S. Aoki, T. Aoyama, T. Doi, S. Gongyo and K. Sasaki, Partial wave decomposition on the lattice and its applications to the HAL QCD method, Physical Review D, Vol.101 (2020), 2020年4月
2. S. Gongyo, K. Sasaki, T. Miyamoto, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue and N. Ishii (HAL QCD Collaboration), d*(2380) dibaryon from lattice QCD, Phys. Lett. B, Vol.811, 135935 (2020), 2020年12月
3. H. Irie, H. Liang, T. Doi, S. Gongyo and T. Hatsuda, Hybrid Quantum Annealing via Molecular Dynamics, Scientific Reports, Vol.11, 8426 (2021), 2021年4月
4. Takuya Sugiura(RIKEN), Tatsumi Aoyama(KEK), Takumi Doi(RIKEN), Nuclear force from lattice QCD with LapH smearing, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020), online, 2020年8月
5. 杉浦拓也(理研 iTHEMS), HAL QCD + LapH法を用いた奇パリティ核力, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, オンライン, 2021年1月
6. 杉浦拓也(理研), 青山龍美(高エネルギー加速器研究機構), 土井琢身(理研), 赤星友太郎(京都大学基礎物理学研究所), 土居孝寛(大阪大学RCNP), 格子QCDによる奇パリティ格力の計算, 日本物理学会第76回年次大会(2021年), オンライン, 2021年3月
7. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, Recent progress on Hadron Interactions from Lattice QCD, ELPH 研究会 C029：「様々なフレーバー領域で探るクォーク・ハドロン多体系の分光と構造」, 東北大学電子光理学研究センター, 仙台, 日本, 2020年11月

（５）[核構造とｒ過程]の研究

論文

1. The variational approach with the superposition of the symmetry-restored quasi-particle vacua for nuclear shell-model calculaions, N. Shimizu, Y. Tsunoda, Y. Utsuno, and T. Otsuka, Phys. Rev. C 103, 014312 (2021), 2021年1月
2. Triple enhancement of quasi-SU(3) quadrupole collectivity in Strontium-Zirconium N~Z isotopes, K. Kaneko, N. Shimizu, T. Mizusaki, and Y. Sun, Phys. Lett. B 817, 136286 (2021), 2021年4月
3. High-spin states in 35S, S. Go, ..., N. Shimizu, Y. Utsuno 他, Phys. Rev. C 103, 034327 (2021), 2021年3月
4. Structure of 30Mg explored via in-beam gamma-ray spectroscopy, N. Kitamura, ..., N. Shimizu 他, Phys. Rev. C 102, 054318 (2020), , , 2020年11月
5. The impact of nuclear shape on the emergence of the neutron dripline, N. Tsunoda, T. Otsuka, K. Takayanagi, N. Shimizu, T. Suzuki, Y. Utsuno, S. Yoshida and H. Ueno, Nature 587, 66

(2020), 2020年11月

6. Quasi-SU(3) coupling of (1h11/2, 2f7/2) across the N=82 shell gap: Enhanced E2 collectivity and shape evolution in Nd isotopes, K. Kaneko, N. Shimizu, T. Mizusaki, and Y. Sun, Phys. Rev. C 103, L021301 (2021)., 2021年1月
7. Gamow-Teller transitions of neutron-rich N=82 and N=81 nuclei by shell-model calculations, N. Shimizu, T. Togashi and Y. Utsuno, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033D01 (2021), 2021年2月
8. Large-scale shell-model calculations of nuclear Schiff moments of 129Xe and 199Hg, K. Yanase and N. Shimizu, Phys. Rev. C 102, 065502 (2020)., 2020年12月
9. Screening of nucleon electric dipole moments in atomic systems, K. Yanase, Phys. Rev. C 103, 035501 (2021)., 2021年3月
10. Electromagnetic character of the competitive γγ/γ-decay from 137mBa, P.-A. Söderström, ..., T. Otsuka, ..., Y. Tsunoda et al., Nat. Commun. 11, 3242 (2020), 2020年6月
11. Shape Coexistence at Zero Spin in 64Ni Driven by the Monopole Tensor Interaction, N. Mărginean, ..., Y. Tsunoda, ..., T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. 125, 102502 (2020), 2020年9月
12. β decay of 75Ni and the systematics of the low-lying level structure of neutron-rich odd-A Cu isotopes, F. L. Bello Garrote, ..., Y. Tsunoda, T. Otsuka et al., Phys. Rev. C 102, 034314 (2020), 2020年9月
13. Detailed low-spin spectroscopy of 65Ni via the neutron capture reaction, C. Porzio, ..., Y. Tsunoda, T. Otsuka et al., Phys. Rev. C 102, 064310 (2020), 2020年12月
14. Triaxial rigidity of 166Er and its Bohr-model realization, Y. Tsunoda and T. Otsuka, Phys. Rev. C 103, L021303 (2021), 2021年2月

学会等発表

1. 準粒子真空基底によるモンテカルロ殻模型の拡張（口頭発表），清水則孝，角田佑介，宇都野穣，大塚孝治，日本物理学会第76回年次大会（オンライン開催），2021/3/14，国内
2. Data-driven approaches in nuclear shell-model calculations（口頭発表），Noritaka Shimizu, Nuclear data symposium 2020, RIKEN Nishina Center, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, 2020/11/27, 国際
3. Eigenvector continuationによる殻模型近似波動関数の構成(口頭発表)，吉田聡太，清水則孝，日本物理学会第76回年次大会（Zoom online），2021/3/14，国内
4. モンテカルロ殻模型による二重ベータ崩壊の核行列要素の計算（口頭発表），角田佑介，新学術領域「地下宇宙」2020年度領域研究会、オンライン，2020/6/2，国内
5. Structure of Medium-mass Nuclei Studied by Monte Carlo Shell Model Calculations（口頭発表），Y. Tsunoda, , the RIBF Users Meeting 2020, オンライン，2020/9/9，国際
6. モンテカルロ殻模型によるZ=28近傍の核構造の研究（口頭発表），角田佑介、大塚孝治、清水則孝、本間道雄、宇都野穣，，日本物理学会2020年秋季大会、オンライン，2020/9/16，国内

7. Nuclear shapes and collective motions in the region of Sm（口頭発表), Y. Tsunoda, , 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, オンライン, 2020/10/6, 国際
8. モンテカルロ殻模型とその発展的手法による核構造研究（口頭発表), 角田佑介, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム、オンライン, 2021/1/29, 国内
9. モンテカルロ殻模型とその発展的手法による核構造研究 （口頭発表), 角田佑介, 日本物理学会第76回年次大会、オンライン, 2021/3/12, 国内
10. 原子核物理の再出発（口頭発表）, 大塚孝治, 「原子核・ハドロン物理2020」高エネルギー物理学研究所研究会, 2020-10-06, 国内
11. エキゾチック核、ドリップラインと核半径（口頭発表）, 大塚孝治, ELPH研究会「電子産卵による原子核研究ー原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径ー」, 2021年3月, 国内
12. Single-particle, shape deformation and cluster hierchies in atomic nuclei（口頭発表）, 大塚孝治, 第5回クラスター階層領域研究会, 2020年9月, 国内
13. neutron Driplines and Shape Evolution of Atomic Nuclei（口頭発表）, 大塚孝治, 第3回クラスター階層領域研究会, 2020年5月, 国内
14. Large-scale shell-model calculations of nuclear Schiff moments of 129Xe and 199Hg (oral), K. Yanase, Beyond-the-Standard-Model Physics with Nucleons and Nuclei (INT 20-2b), オンライン, 2020/7/23, 国際
15. ″原子核殻模型による電気双極子モーメントの精密計算(口頭発表)″, 柳瀬宏太, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム、オンライン, 2021/1/28, 国内
16. ″八重極相関による電気双極子モーメントの増幅効果(口頭発表)″, 柳瀬宏太、清水則孝, 日本物理学会第76回年次大会、オンライン, 2021年3月14日, 国内

（６）[中性子星合体]の研究

学会等発表

1. 関口雄一郎, ″数値相対論ニュートリノ輻射磁気流体コードの開発と現状：連星中性子星合体の全容解明に向けて″, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム　2021.1.28-29 (28発表)

（７）[時空生成]の研究

学会等発表

1. “Space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model in the large-N limit”, Mitsuaki Hirasawa, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020), August 5, 2020, Online (KEK Theory center, Japan).
2. “The effects of fermions in the complex Langevin simulation of the Lorentzian type IIB matrix model”, Kohta Hatakeyama, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT

2020), August 5, 2020, Online (KEK Theory center, Japan).

3. “Space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model in the large-N limit”, Mitsuaki Hirasawa, KEK Theory Workshop 2020, December 16, 2020, Online (KEK Theory center, Japan).
4. “The effects of fermions in the complex Langevin simulation of the Lorentzian type IIB matrix model”, Kohta Hatakeyama, KEK Theory Workshop 2020, December 17, 2020, Online (KEK Theory center, Japan).
5. 「ローレンツ型タイプ IIB 行列模型のラージ N 極限における時空構造」, 平沢光昭, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 17 日, オンライン開催.
6. 「ローレンツ型タイプ IIB 行列模型の複素ランジュバン・シミュレーションにおけるフェルミオンの効果」, 畠山洸太, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 17 日, オンライン開催.
7. 「超弦理論の数値シミュレーションによる時空創発の研究」, 畠山洸太, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 2021 年 1 月 29 日, オンライン開催（主催：計算基礎科学連携拠点).
8. 「超弦理論の行列模型定式化における時空創発の数値的研究」, 畠山洸太, 日本物理学会第 76 回年次大会(2021 年), 2021 年 3 月 12 日, オンライン開催（一般シンポジウム「富岳・ポスト富岳時代の素粒子原子核物理学」).
9. 「ローレンツ型タイプ IIB 行列模型における新しい相と連続的な時空の創発」, 平沢光昭, 日本物理学会第 76 回年次大会(2021 年), 2021 年 3 月 13 日, オンライン開催.
10. 「タイプ IIB 行列模型におけるユークリッド型とローレンツ型の関係と時空構造」, 畠山洸太, 日本物理学会第 76 回年次大会(2021 年), 2021 年 3 月 13 日, オンライン開催.

（８）格子量子色力学コードの富岳向け最適化

学会等発表

1. Yoshifumi Nakamura, “Supercomputer Fugaku and QCD Wide SIMD Library (QWS) on Fugaku”, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory, Aug.4-7, 2020, ONLINE.
2. Issaku Kanamori, “Implementation of neighboring communications in QWS”, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory, Aug.4-7, 2020, ONLINE.
3. 金森 逸作, 中村 宜文, 似鳥 啓吾, 辻 美和子（理研), 向井 優太, 三吉 郁夫（富士通), 松古 栄夫（高エネ研), 石川 健一（広島大),「低レイテンシ uTofu インターフェースを用いた格子 QCD 計算における通信の高速化」, 第 177 回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 2020 年 12 月 21 日～22 日, オンライン.
4. 中村宜文,「スーパーコンピュータ「富岳」とコード開発」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日～15 日, オンライン.
5. Yoshifumi Nakamura, “Benchmarking QCD Wide SIMD Library (QWS) on Fugaku”, the 3rd R-CCS international symposium, February 15 - 16, 2021, RIKEN R-CCS, Kobe, Japan, ONLINE.

6. Issaku Kanamori, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Takumi Doi, Shoji Hashimoto, Ken-Ichi Ishikawa, Takashi Kaneko, Hideo Matsufuru, Tomoya Nagai, Yoshifumi Nakamura, “Preparation of LQCD code for Fugaku”, the 3rd R-CCS international symposium, Feb.15-16, 2021, RIKEN R-CCS, Kobe, Japan, ONLINE.
7. 金森逸作,「富岳での格子 QCD コードの整備状況」,「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙」シンポジウム, 2021 年 1 月 28～29 日, オンライン.
8. 石川健一, 金森逸作, 松古栄夫,「汎用コード Bridge++ を用いたマルチプラットフォーム向けマルチグリッドソルバーの実装」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日-15 日, オンライン.