

令和4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5年5月30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4年度（報告年度）の実施内容	- 4 -
2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画	- 4 -
2-2. 実施内容（成果）	- 6 -
2-3. 活動（研究会の活動等）	- 20 -
2-4. 実施体制	- 25 -

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

令和2年度に開始した本事業の目的は以下の通りである。

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 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 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進める。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、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4年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和4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にシンポジウムの開催、研究紹介記事・動画の制作、ウェブサイトでの発信を行う。

(2) [B中間子崩壊]の研究

小林益川行列要素の高精度決定を目指し、 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の形状因子を、格子 QCD の数値シミュレーションによって計算する。我が国の SuperKEKB/Belle II 実験の測定精度に見合う理論計算精度を達成するため、重点課題9で実施したシミュレーションを格段に高精度化する。具体的には、相関関数を時空格子上の位置について平均することにより統計精度を向上させ、また、時間距離を変えた計算により励起状態の寄与による不定性を制御する。令和4年度は、より軽い π 中間子質量(230MeV)で $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 形状因子を計算する。これによって π 中間子質量についてのカイラル外挿を制御して小林・益川行列要素 $|V_{ub}|$ を目標精度で決定する。

(3) [QCD相構造]の研究

2+1 フレーバーQCDの有限温度ドメインウォールフェルミオンシミュレーションにおいて、格子カットオフ $1/a \approx 2.4$ GeV付近を中心に、体積スケールと、パラメータサーチを行い、相転移の有無の確認と相転移温度を決定する。物理量として、トポロジー励起、ドメインウォールフェルミオン演算子の固有値、カイラル感受率などを用いる。必要に応じてゼロ温度シミュレーションも実行する。令和4年度は、粗い格子の温度スキャンで空間体積を拡大した計算を行い、相転移の次数、及び、転移温度を決定する。クォーク質量が重い方の計算では、令和3年度の小体積、小格子間隔の結果と合わせて連続極限を議論する。

(4) [バリオン間力]の研究

QCDに直接基づく原子核物理の構築を目指し、バリオン間力の格子QCD計算を進める。令和4年度は、改善された物理点パラメータを用いてゲージ配位生成を継続する。さらに、得られた配位を用いた測定計算を行い、バリオン間力・特にハイペロン力の決定を行う。J-PARCにおけるハイパー核実験や、LHCなどハドロン衝突実験におけるバリオン間相関観測、エキゾチックハドロン/原子核探索などにおいて、バリオン多体系計算グループや加速器実験グループとの共同研究を進める。

(5) [核構造と r 過程]の研究

計算資源や有効相互作用の準備状況により着実な成果が見込める核物理・学際的に重要な核種に絞り、核構造計算を行う。軽い核での第一原理的計算による β 崩壊の g_A クエンチングの研究を進めるとともに、中重核領域での核物理や元素合成過程解明に重要な核種の構造研究を進める。

(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総合的に追跡する計

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。令和 4 年度は、令和 3 年度に計画していた 1 モデル分と令和 3 年度に採用したものは異なる 2 つの状態方程式、1 つの連星質量比を採用して 3 モデルのシミュレーションを遂行する。

(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。令和 4 年度は、フェルミオンを含んだ超対称行列模型の複素ランジュバンシミュレーションにおいて、実時間と実空間が得られるかを調べる。複素ランジュバン法の破綻を回避する項のパラメタを可能な限り 0 にしつつ、行列サイズ 1024 のシミュレーションを行う。

(8) 格子量子色力学コードの富岳向け最適化

本年度は前年度に成果創出プログラムにより開発されたアプリケーションプログラムの保守と最適化を行う。アプリケーションプログラムにはこれまでに最適化を行ったウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーと 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が組み込まれている。富岳は本格稼働したが徐々にその機能や運用形態が改善されている。富岳の改善された機能や運用形態に追従するための保守と最適化、および、実計算を行うアプリケーションプログラム使用ユーザーからの最適化調整や要望に対するサポートを行う。

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、ウェブサイトでの研究紹介記事やプレスリリース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 $|V_{ub}|$ の高精度決定を目指し、ポスト京重点課題9で行った格子 QCD の数値シミュレーションによる $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の形状因子の計算を高精度化した。エジンバラ大学とブルックヘブン国立研究所で開発されたシミュレーションコード「Grid/Hadrons」を採用し、理化学研究所計算科学研究センターとレーゲンスブルグ大学での研究開発に基づいた最適化、特に固定長の SIMD 演算の使用、を取り入れることにより演算を高速化して高統計のシミュレーションを実施した。令和4年度は、QCD の物理を特徴づけるカイラル対称性を保ちつつ、 π 中間子質量を 230 MeV まで下げて $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊を記述する相関関数を計算し、崩壊振幅への強い相互作用の非摂動効果を記述する形状因子を抽出した。前年度までのシミュレーションと併せて、格子カットオフが $a^{-1}=2.5, 3.6, 4.5$ GeV, π 中間子質量が 230 - 500 MeV, ボトムクォーク質量が チャームクォーク質量から $0.7 \times a^{-1}$ までのパラメタ領域で形状因子のデータを取得することができた。

現実世界、即ち、連続時空と現実世界のクォーク質量での形状因子を運動量遷移（レプトン ℓ とニュートリノ ν 対の不変質量）の関数として決定するため、形状因子のデータを格子間隔がゼロの極限と現実世界の π 中間子質量とボトムクォーク質量へと外挿し、また、運動量遷移について内挿した。カイラル対称性を保つことによって離散化誤差を削減し、また、カイラル対称性に基づいたカイラル摂動論が予想する関数形を用いることにより、格子間隔と π 中間子質量についての外挿を制御した。また、ボトムクォーク質量についての外挿に、重クォーク有効理論が予想する関数形を用いた。一方、運動量遷移については、シミュレーションを行った $19-26$ GeV² の範囲での内挿であるため、単純な多項式近似を用いた。 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊を記述する形状因子には、弱カレントの空間成分の寄与を記述する f_2 と空間成分と時間成分の寄与の差を記述する f_1 がある。図1に、重クォーク有効理論で良く用いられる2つの組み合わせ、即ち、 f_2 と f_1+f_2 の運動量遷移についての内挿とボトムクォーク質量への外挿をプロットした。重点課題の結果（白抜きのシンボル）と比べ、本研究の結果では、「富岳」を用いて格子上の位置と時間距離を変えた相関関数を計算することにより、形状因子の抽出に使用できる統計サンプル数を増大させ、統計精度を削減した。さらに、「富岳」の計算資源を活かしてシミュレーションパラメタを増やし、また、カイラル対称性を保つ理想的な定式化によって離散化誤差を削減するなどして、格子間隔とクォーク質量の外挿の制御も同様に改善されている。この内外挿によって、現実世界での形状因子を、シミュレーションを行った運動量遷移の領域で決定した。

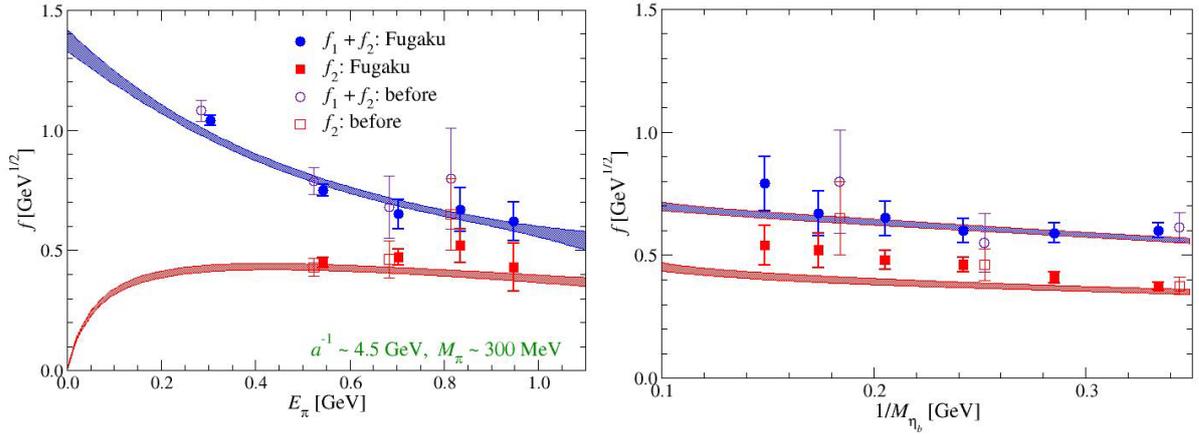


図1 形状因子の運動量遷移についての内挿（左図）と、ボトムクォーク質量（右図）への外挿
ただし、運動量遷移の代わりに重クォーク極限でも値が発散しない π 中間子エネルギー E_π を、
ボトムクォーク質量の代わりに実験値が高精度で定まっているボトモニウム質量 M_{η_b} を用い
た。両図ともカットオフが4.5GeV、 π 中間子質量が300MeVでのデータをプロットしている。
青と赤のシンボルは、それぞれ、重クォーク有効理論で用いられる形状因子 f_2 と f_1+f_2 を表して
いる。また、塗りつぶしたシンボルと白抜きシンボルは、それぞれ、本研究の成果と重点課
題9の成果を表している。

運動量遷移の範囲を物理的に許されている全領域へと拡張するため、上述のデータから代表的な運動量遷移の値19.0, 23.5, 26.5 GeV²での形状因子を計算し、これを理論のユニタリ性と形状因子の解析性のみを仮定し、現象論的仮定を排除した関数形を用いてパラメトライズした。この関数形を上述のクォーク質量についての外挿と同時に行わなかったのは、両者が異なる理論的な性質に基づいており、単純に併用できないからである。図2では、実験データの解析に良く用いられているベクトル(f_+)、スカラー(f_0)形状因子に換算し、全運動量遷移領域でプロットした。カイラル対称性を保つ理想的な定式化を用いることで格子間隔と π 中間子質量についての外挿から生じる系統誤差を制御し、「富岳」を用いた高統計シミュレーションによって統計サンプル数を増やして統計誤差を制御することにより、重点課題と比べて不定性を半分に削減し、運動量遷移の全領域で5%精度を達成した。これをKEKB/Belle実験で測定された微分崩壊率の最終データと組み合わせて $|V_{ub}|$ を決定した。我が国は、現在、この実験の後継であるSuperKEKB/Belle II実験を主導しており、今後数年間で測定精度を各段に向上させる。本研究の結果は、uperKEKB/Belle IIの今後の実験データを用いて $|V_{ub}|$ の精度を改善し、また標準理論を超える新物理を探索するための基礎データとなる。

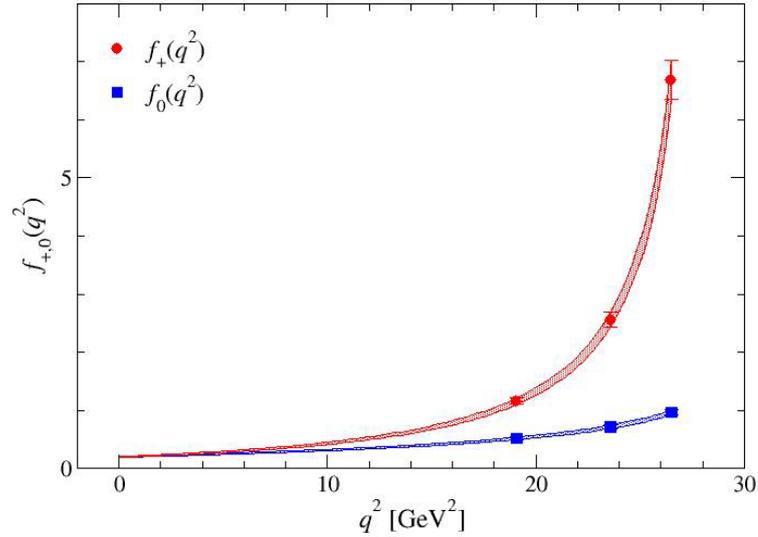


図 2 ベクトル形状因子 f_+ (赤)とスカラー形状因子 f_0 (青)

シンボルは代表的な運動量遷移の値で計算した形状因子の値、それらを現象論的仮定を用いない関数形でフィットしたものを運動量遷移の関数としてプロットした。

(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_l 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 N_t の逆数で与えられる温度 $T = 1/(aN_t)$ 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): $m_l(\beta)$, $m_s(\beta)$ 。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。今年度は LCP 関係の 2 点の改良を行いつつ、それに基づく昨年度までの LCP: $m_l = 0.1m_s \approx 3m_{ud}$ (軽い二つのクォーク質量が現実の ud クォークの約 3 倍)の結果の精査、さらに粗い格子で体積スケーリングを行うべく、大体積シミュレーションとその解析を遂行した。

まず、有限温度計算で用いられる最も粗い格子(最低温点) $\beta = 4.0$ でゼロ温度計算を実行し、格子スケールの精密決定を行った。これにより、これまで外挿により求めていた格子スケールの確度が向上し、有限温度の次元量の計算結果の精密化が図れた。また、昨年度の有限温度計算の実行各パラメタで有限な L_s (仮想 5 次元サイズ)の帰結であるカイラル対称性の残留度 m_{res} を測定し、得られた $m_{res}(\beta)$ を加法くりこみ因子として修正した結果(細かい格子 $N_s^3 \times N_t = 32^3 \times 16$ は再重み付け:reweighting、粗い格子 $24^3 \times 12$ は修正入力質量での再計算)を導いた。

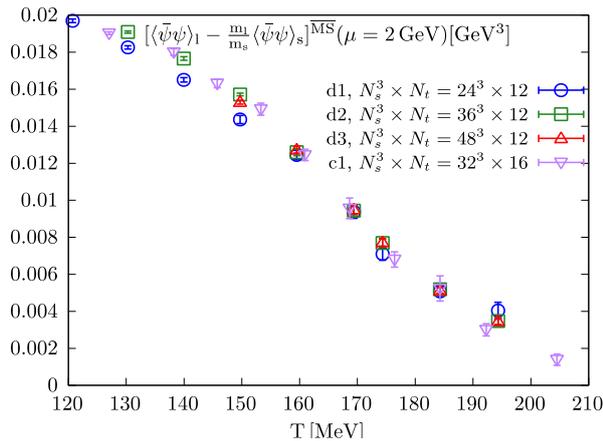


図 3-1 くりこまれたカイラル凝縮

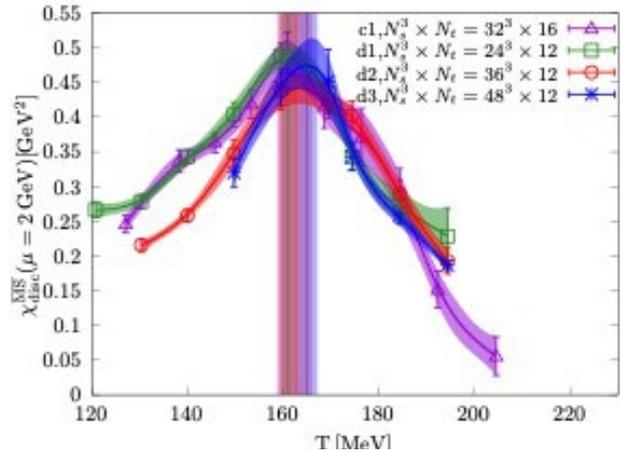


図 3-2 くりこまれた非連結カイラル感受率

これら新しい知見を用いて、粗い格子の二つの体積 $36^3 \times 12$ 及び $48^3 \times 12$ の計算を実行して得られた結果を、昨年度の $24^3 \times 12$ 、 $32^3 \times 16$ の修正版と併せて考察する。図 3-1 はくりこまれたカイラル凝縮を温度の関数としてプロットしたものである。このデータを用いて、くりこまれたカイラル感受率の非連結ダイアグラム部分 χ_{disc} を求め、平滑化スプライン内挿と共に図 3-2 に示した。まず、格子間隔が異なり、物理体積が同じ $24^3 \times 12$ 、 $32^3 \times 16$ の結果の良い一致から、格子間隔依存性は統計誤差の範囲で無視できることが分かる。これは、この統計精度では、粗い格子の結果を連続極限の結果と捉えて良い事を意味する。

次に、粗い格子の三つの異なる体積の χ_{disc} の頂点の高さが同じであることから、これは相転移ではなく、クロスオーバーである事が結論される。また、秩序変数からも同じ結論が得られる。この物理量を用いた擬相転移温度は、3つの体積からの無限体積極限(図 3-3)により、 $T_{pc} = 165(2)$ MeV と見積もられる。この際、図 3-2 の内挿のバリエーションとしてスプライン内挿を用いても極限值が変化しないこと-内挿手法の系統誤差はほぼ無視できることを確認した。

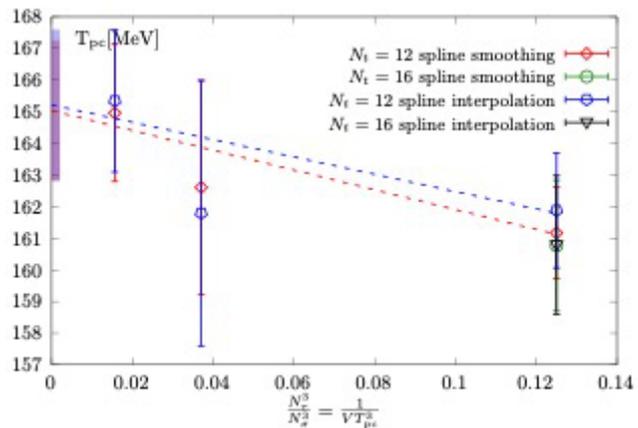


図 3-3 擬相転移温度を体積の逆数の関数としてプロット

ここで開発された手法を物理点直上、さらに、カイラル極限に近い領域の計算に適用することが QCD 相構造の究極的な解明のための将来の課題となる。

(4) [バリオン間力]の研究

QCD に直接基づく原子核物理の構築を目指し、バリオン間力の格子 QCD 計算を進めた。令和 4 年度は、改善されたゲージ配位生成パラメタに基づき、物理点パラメタにおけるゲージ配位生成を継続した。QCD の作用としては、(2+1)-フレーバーにおいて、stout smearing を用いた clover fermion action と

Iwasaki gauge action を用いた。「富岳」のコーデサイン開発の成果である QWS (QCD Wide SIMD) Library を実質的に中に組み込んだ「富岳」用最適化コードを用いてハイブリッドモンテカルロ (HMC) 法による配位生成を行い、(十分な熱化を行った後に) 最終的に 1,600 配位 (8,000 トラジェクトリ) という大統計の配位生成を達成した。得られた配位を用いたハドロンスペクトラム計算により、格子間隔 $1/a = 2.338 \text{ GeV}$, 格子体積 $(96a)^4 = (8.1\text{fm})^4$, $(m_\pi, m_K) = (137, 501) \text{ MeV}$ という結果が得られ、(アイソスピンの破れに伴う不定性の範囲内で) 正しく物理点直上での配位生成になっていることを確認した。ただし、 m_π, m_K はそれぞれ π 中間子、K 中間子の質量である。また PCAC quark mass, PS meson decay constant 等についても計算し、同一格子 QCD 作用を用いた先行研究よりも精度の良い決定を行うと共に、トポロジカルチャージについても良いサンプリングが出来ていることを確認した。

さらに、得られた配位に基づき NBS 波動関数の測定計算を行い、バリオン間力・特にハイペロン力の決定を行った。偶パリティチャネル (S 波、D 波) における二体バリオン間力について、ストレンジネス $S = 0 \sim (-6)$ まで系統的に計算した。これらの計算において、クォーク・ソルバーについては先に述べた QWS 組み込みによる「富岳」最適化を行い、相関関数の縮約計算については我々が開発した統一縮約法 (UCA) を「富岳」向けに最適化したコードを用いた。測定計算全体の計算効率としては、576 ノードで 13-15% の演算効率、82-84% の並列化効率という高効率を達成している。こうして得られた様々な結果のうち、ここでは $S = (-2)$ チャネルから、アイソスピン $I=0$, 1S_0 チャネルにおける相互作用ポテンシャルの結果を示す。(なお、生成された配位から原理的に計算可能な最大統計数は 1,600 配位 \times 96 ソース \times 4 回転であるが、ここではその半分の統計数に対応する結果を用いている。) このチャネルは $\Lambda\Lambda - N\Sigma$ 間結合相互作用となっており、エキゾチックハドロンの候補として知られる H ダイバリオンに対応するチャネルである。図 4 においては、「富岳」で得られた物理点直上 ($m_\pi=137\text{MeV}$) での結果に加え、「京」で得られた物理点近傍 ($m_\pi=146\text{MeV}$) での結果を比較のために示している。ここから、「富岳」においてはクォーク質量がより軽くなった (一般に統計誤差が増大する) 計算をしているのにも関わらず、同程度の統計精度での決定ができていることが解る。また (そのクォーク質量セットアップの結果として) クォーク質量に起因する系統誤差を排除した結果を得ることに成功していることになる。このような物理点直上でのバリオン間力計算は世界初となるものであり、これは「富岳」ならではの大統計計算を行ったことによる成果である。また物理的な結果として、 $N\Sigma$ 間に強い引力が存在すること、 $\Lambda\Lambda$ 間にはそれより弱い引力が存在すること、 $\Lambda\Lambda - N\Sigma$ 間の結合は弱いことが解る。これらの結果は Σ ハイパー核の解明に大きなインパクトを与えるものである。

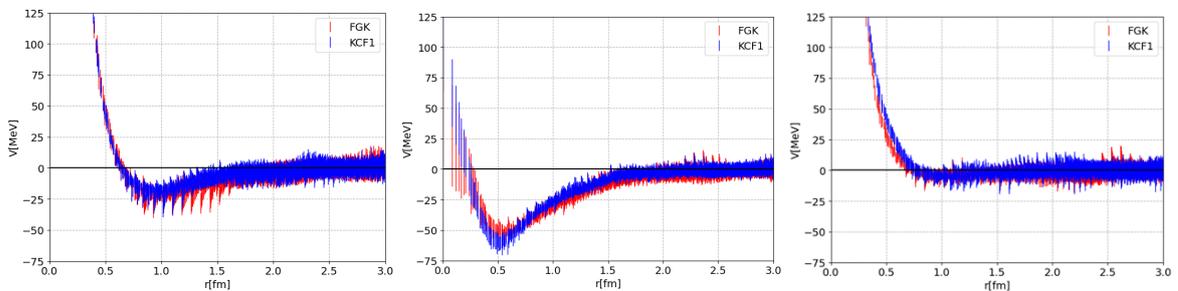


図 4 $I=0$, 1S_0 チャネルにおける $\Lambda\Lambda - N\Sigma$ 間結合チャネルポテンシャル

(左: $\Lambda\Lambda - \Lambda\Lambda$, 中: $N\Sigma - N\Sigma$, 右: $\Lambda\Lambda - N\Sigma$) 赤は「富岳」で得られた物理点直上 ($m_\pi=137\text{MeV}$) での結果。青は京で得られた物理点近傍 ($m_\pi=146\text{MeV}$) での結果

この相互作用ポテンシャルの結果を基に散乱パラメタ (phase shift、inelasticity) を計算した結果が図5である。この結果は、Hダイバリオンは束縛せず、 $N\Xi$ の virtual state として存在することに対応しており、今後フル統計を用いた解析により最終的な結論を得る予定である。

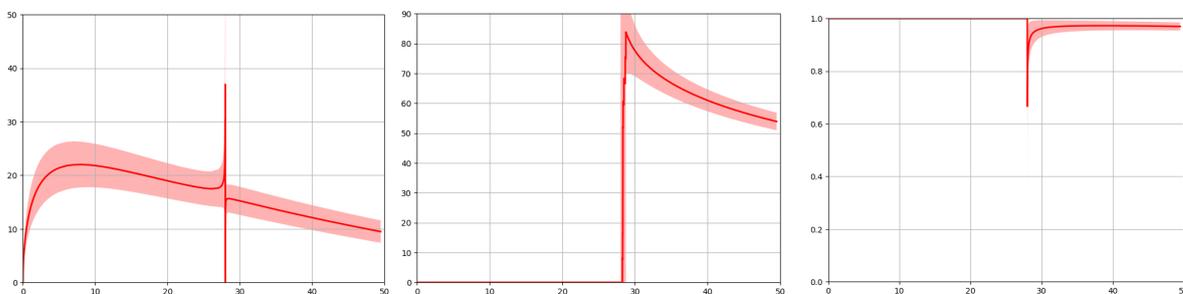


図5 I=0, 1S_0 チャネルにおける物理点 $\Lambda\Lambda-N\Xi$ 間散乱パラメタ (左: $\Lambda\Lambda$ phase shift、中: $N\Xi$ phase shift、右: $\Lambda\Lambda-N\Xi$ inelasticity)

以上は $S=(-2)$ チャネルにおける結果であるが、それ以外にも、 $S=(-4)$ 、 $I=1$, 1S_0 チャネルにおける $\Xi\Xi$ 間の強い引力、 $S=0$ 、 $I=0$, $^3S_1-^3D_1$ チャネルにおける NN 間の強いテンソル力などの結果が得られている。

これら格子 QCD によるバリオン間力計算と並行して、J-PARC におけるハイパー核実験や、LHC などハドロン衝突実験におけるバリオン間相関観測、エキゾチックハドロン/原子核探索などにおいて、バリオン多体系計算グループや加速器実験グループとの共同研究を進めた。特に、 $N\Xi$ 相互作用を基に $\Xi N\alpha\alpha$ 系の研究を行った。Gaussian Expansion Method (GEM) と呼ばれる厳密少数多体系計算手法に基づき原子核 4 体多体系計算を行い、 $I=0, 1$ 両方にスピン・パリティ $J^P = 1^-, 2^-$ の束縛原子核が存在することを予言した。得られた原子核スペクトラムを図6に示す。

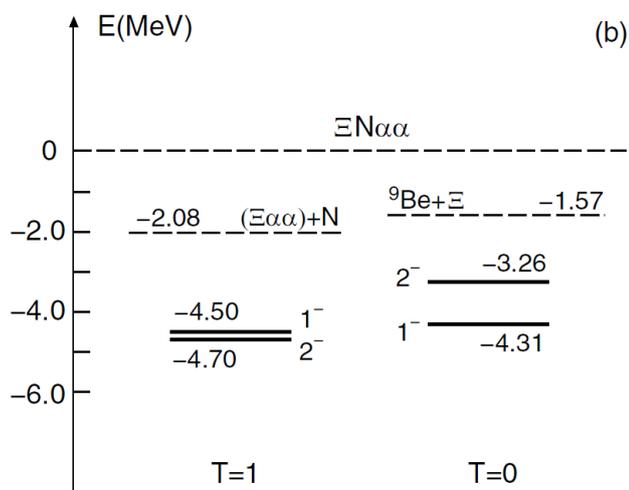


図6 $\Xi N\alpha\alpha$ 系のエネルギースペクトラム (図中の T は、文中のアイソスピン I を意味する)

これから解るように、得られたスピンドブレット状態のスペクトラムは $I=0, 1$ で反転することが解った。詳細な解析により、この結果は、格子 QCD で予言される $N\Xi$ 相互作用が、強い引力 ($I=0, {}^1S_0$)、弱い引力 ($I=0, {}^3S_1$)、弱い引力 ($I=1, {}^3S_1$)、弱い斥力 ($I=1, {}^1S_0$) というスピン・アイソスピン依存性を持つことを反映していることを明らかにした。逆に言えば、これらのハイパー核のスピンドブレット状態 (のアイソスピンによる反転現象) を実験で観測することで、格子 QCD で得られた $N\Xi$ 相互作用のスピン・アイソスピン依存性を検証することができる。その将来的な実験手法として、 ${}^{10}\text{B}$ ターゲットの (K, K^+) , (K^-, K^0) 反応を提唱し、今後のハイパー核実験の方向性に対しインパクトを与えた。

(5) [核構造と r 過程]の研究

第一原理計算によって軽い核の構造計算を遂行した。ベータ崩壊における gA のクエンチングに関係して、前年度までは実験でガモフテラー遷移が測定されているヘリウムから酸素までの軽い核についてガモフテラー換算遷移強度 ($B(GT)$) などの系統的な計算を行ったが、今年度は特に $A=12$ の系に焦点を絞り前年度までの計算をさらに推し進め、窒素 12 およびホウ素 12 から炭素 12 への $B(GT)$ 、炭素 12 の M1 換算遷移強度 ($B(M1)$) などの評価を行

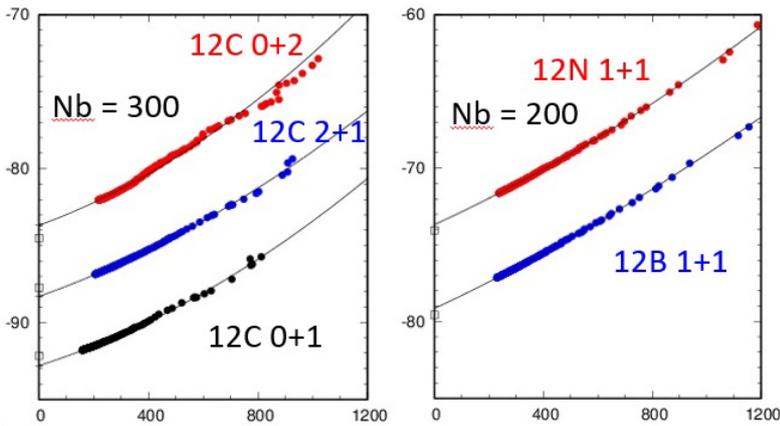


図7：エネルギー分散によるエネルギーの外挿 縦軸はエネルギー (MeV)、横軸はエネルギー分散 (MeV^2)。Nb はモンテカルロ殻模型の基底数を表している。0+1, 0+2 などの表記は第一 $J^\pi=0^+$ 状態、第二 $J^\pi=0^+$ 状態を表している。J, π は原子核準位のスピンとパリティを表す。

算遷移強度 ($B(M1)$) などの評価を行った。具体的には、カイラル有効場の理論により構築された核力に起源をもつ Daejeon16 二体相互作用を採用し、7 主殻の模型空間に対して対象とする状態に最適な調和振動子エネルギーの値 (15MeV 近辺) で閉殻芯を仮定しないモンテカルロ殻模型による第一原理計算を行った。これまで 100 基底までだった波動関数の計算を 200 基底 (炭素 12 に関しては 300 基底) まで行った。これにより、エネルギー分散によりエネルギーを外挿することが可能になり、その外挿値は 1% 以内の精度で実験値を再現している (図 7)。

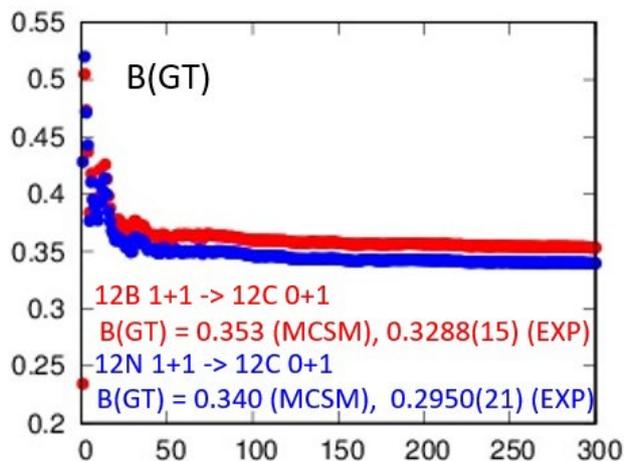


図8：ガモフテラー遷移強度 縦軸はB(GT)、横軸は基底数。

原子核構造計算の計算手法の改良をおこなった。本事業で用いている準粒子真空殻模型計算法とモンテカルロ殻模型計算法には、角運動量射影におけるオイラー角の三重積分が現れ、計算上のボトルネックとなる。この3重積分はオイラー角を離散化して、台形則とガウス-ルジャンドル求積法をくみあわせたサンプル点を多数用意し、各点ごとの値を合計することによって数値的に求める。本研究ではLebedev求積法を導入することにより、旧来手法と比べて理論的には2/3のサンプル点で同じ計算精度を達成できることを示し、論文を出版した。(N. Shimizu and Y. Tsunoda, Comput. Phys. Commun. 283, 108583 (2023).) 角運動量射影の計算量はサンプル点数にほぼ比例するので、計算量を理想的には2/3に削減できることになる。図9にベンチマークテストによる提案手法と旧来手法の比較を示す。

大規模殻模型計算によってネオジウム、サマリウム同位体の核構造研究をおこなった。これらの同位体は、中性子数を増やしていくと、球形から軸対称プロレート変形に遷移していくと考えられている。この遷移の中間領域は平均場近似が適しておらず、配位混合をとりこんだ殻模型計算による記述が待ち望

このような高精度な波動関数を用いることにより、通常の間殻芯を仮定する殻模型計算では評価が困難なアイソスピン対称性の破れの効果などが議論できるようになり、我々の計算では窒素12とホウ素12のB(GT)の実験値の傾向を再現することに成功した(図8)。定性的には、窒素12(陽子数7)の方がホウ素12(陽子数5)よりも陽子の数が多く、クーロン力によりアイソスピン対称性の破れが大きいため、主に遷移に寄与するT=0の成分以外の混ざりが大きくなり、その分、遷移強度が小さくなると予想される。今後、今年度得られた計算結果を元に上記の定性的な解釈を定量的な観点から検証することが期待される。さらに、炭素12のB(M1)も計算を行ったが、これにより窒素12やホウ素12のB(GT)の計算結果と組み合わせることにより、gAのクエンチングを第一原理計算の観点からA=12の系において定量的に議論する足掛かりができた。

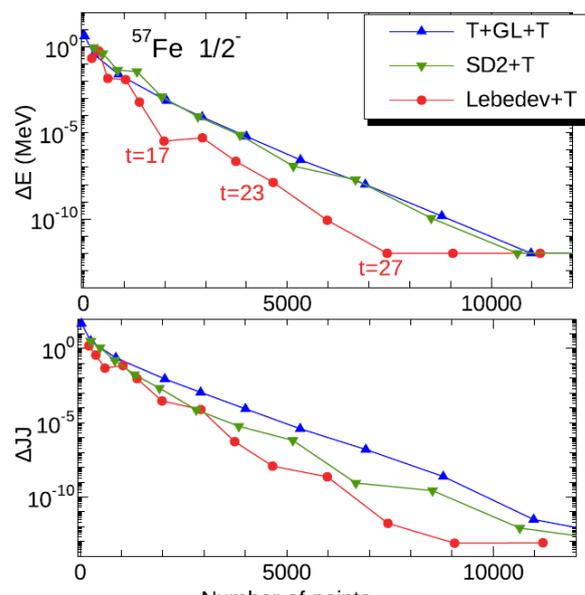


図9 角運動量射影の計算精度 鉄57原子核の1/2-状態を例にとった。上図はエネルギー期待値の数値誤差、下図は角運動量期待値の数値誤差を示す。横軸は求積法におけるサンプル点数。提案手法(赤丸：Lebedev+T)が、旧来手法(青三角：T+GL+T)より少ない点数で同程度の計算誤差を達成している。緑逆三角：SD2+Tは2次元球のspherical designを用いた求積法を比較のため示す。

まれていた。これまで計算量の観点で不可能であったが、「富岳」によってはじめて可能となった。特にネオジウム 150 はニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索実験に用いられている核種であり、この核行列要素を求めることも重要な課題である。

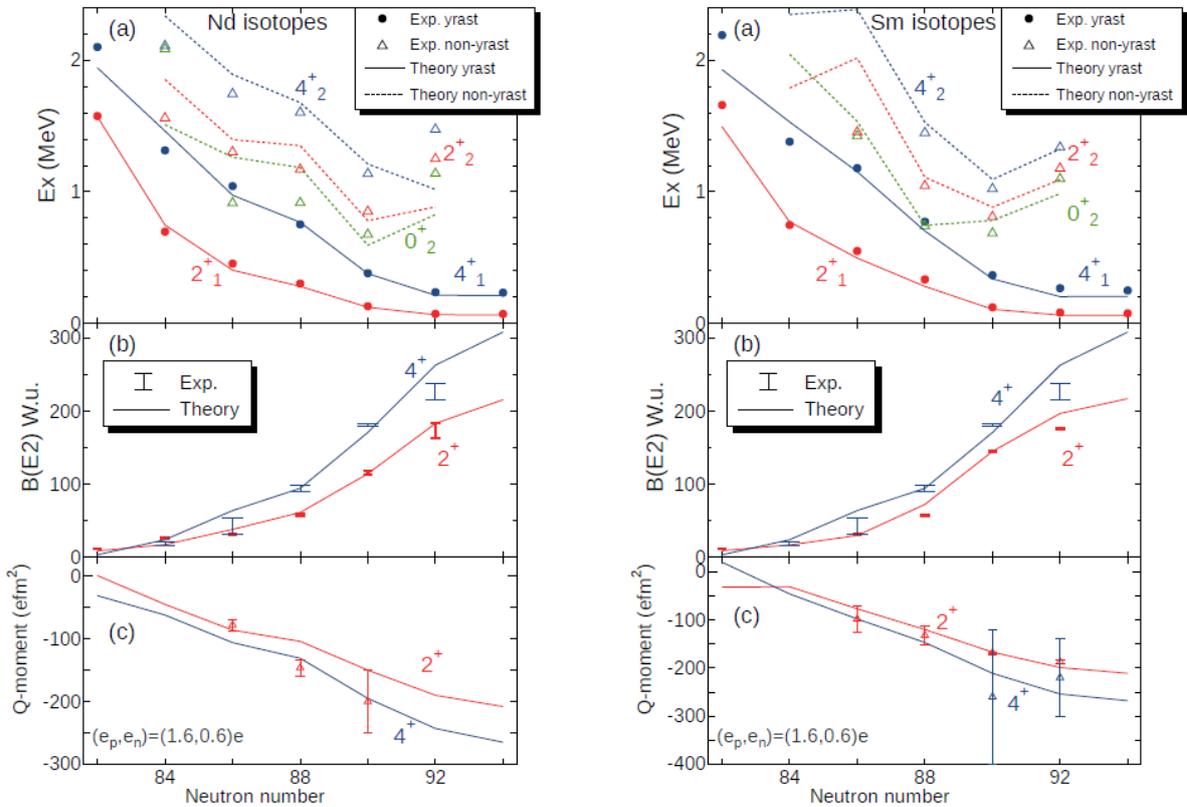


図 10 ネオジウム同位体、サマリウム同位体の第一、第二 2+ 励起状態、第一、第二 4+ 励起状態、第二 0+ 励起状態 (a) 励起エネルギー (b) E2 遷移確率 (c) 四重極能率を示す。横軸は中性子数。

図 10 に、準粒子真空殻模型計算によるネオジウム同位体、サマリウム同位体の計算結果を示す。比較のために実験値もシンボル (丸、三角、誤差棒) で示してある。励起エネルギー、E2 遷移確率、四重極能率ともに理論値が実験値を良く再現している。球形から軸対称変形への遷移の中間的な状態であるネオジウム 150 とサマリウム 150 の基底状態は、二つの変形度が異なるプロレート状態が配位混合している特異な状態であることを示した。ネオジウム 150 のニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素を求め、短距離相関の形に依存するがおよそ 4.0 であることを示した。また、前述の二つの変形状態の混合が核行列要素を大きくする効果をもつことがわかった。これらの議論をまとめ、Physical Review C 誌に投稿した。

大規模殻模型計算によって、カルシウム 40 の超変形状態 (0_3^+) から基底状態 (0_1^+) への電気単極遷移を調べた。オーストラリア国立大でその遷移行列要素 ($\rho^2(E0; 0_3^+ \rightarrow 0_1^+)$) が初めて測定された。この値は $2.3(5) \times 10^{-3}$ と、周辺核の典型的な値よりも 1 桁小さいことがわかった。この電磁遷移が抑制されるメカニズムを理解することは、核構造のみならず、元素合成で起こる捕獲反応の解明にも大きな意義をもつものである。バレンス殻として sd 殻すべてと pf 殻の一部をとった大規模殻模型計算を KSHELL コードによって遂行した。図 11 に示すように、この計算によって、カルシウム 40 周辺核の電気単極遷移の行列要

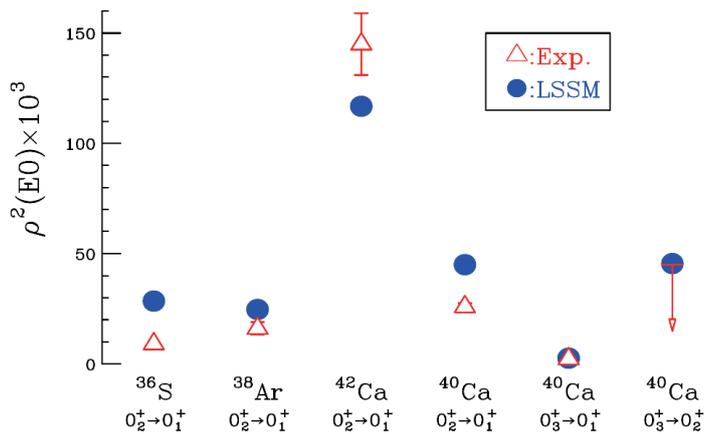


図 1.1 カルシウム 40 周辺核の電気単極遷移行列要素 $\rho^2(E0)$ の実験値 (三角) と大規模殻模型計算の値 (丸) との比較

素をよく再現することができた。大規模殻模型計算で得られた波動関数を解析した結果、以下のメカニズムによって 0_3^+ から 0_1^+ への電気単極遷移が抑制されることがわかった。

- (1) 0_1^+ は球形、 0_2^+ は通常変形、 0_3^+ は超変形した状態が主な成分の、三重変形共存が起きている。
- (2) これらの状態は純粋な変形状態ではなく、3 つの変形した状態が混ざり合っている。
- (3) その混合振幅は、 0_3^+ から 0_1^+ への電気単極

遷移の行列要素を打ち消し合い、他の電気単極遷移の行列要素の値を強めるような符号をとる。

従来、電気単極遷移は、2 つの異なる変形状態が存在する、二重変形共存のみ考慮されてきた。二重変形共存では混合振幅の自由度が小さいため、その符号を考慮する必要がなかった。したがって、ここで得られた行列要素の干渉効果

は三重変形共存に特有の現象である。この成果は、実験との共著論文 (E. Ideguchi et al., Phys. Rev. Lett. 128, 252502 (2022)) として出版され、プレス発表された。

宇宙に存在する重い原子核は、中性子過剰核を経由する合成過程である r 過程によって生成される。特に、中性子過剰核の質量やガモフテラー遷移強度は、中性子捕獲反応と競合するベータ崩壊半減期に寄与する量である。本研究では、モンテカルロ殻模型により中性子数 82 付近の原子核を系統的に計算し、実験室で測定された質量を再現するとともに、未知の質量に対する予言を与えた。また、ガモフテラー遷移強度を評価する手法を開発した。図 1.2 はカドミウム 130 での結果である。従来のモンテカルロ殻模型計算では、10 個程度の低エネルギー状態に最適化した基底によって波動関数を記述するため、強いガモフテラー遷移を十分に記述することは難しかったが、ガモフテラー遷移により結びつく基底を取り入れることにより、ガモフテラー遷移の記述が可能となった。

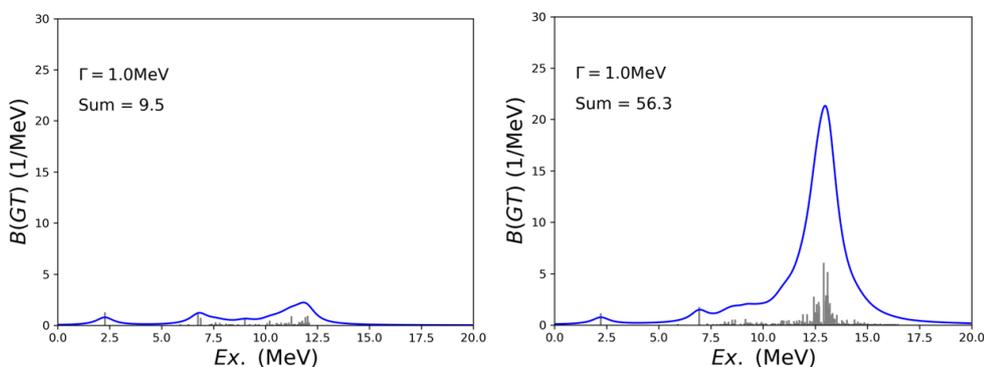


図 1.2 カドミウム 130 原子核のガモフテラー遷移強度 左図は終状態の原子核を従来通りのモンテカルロ殻模型により計算した結果、右図は新しい手法により計算した結果。

ニッケル 78 付近の中性子過剰核は、元素合成の r 過程にかかわる核種である。r 過程の研究への応用を目指して、モンテカルロ殻模型法によるニッケル 78 周辺の原子核構造の計算を行った。模型空間として pf 殻と sdg 殻の 2 主殻を用い、偶偶核や奇核の励起エネルギーの実験値を再現できるように有効相互作用の調整を行った。図 1 3 は偶偶核の 2^+ 、 4^+ 状態の励起エネルギーの実験値(点)と計算値(線)の比較であり、実験値を概ね再現している。また、r 過程にかかわる現象の一つであるベータ崩壊の半減期の予備的計算を 3 つの偶偶核に対して行い、実験値に近い計算値が得られた。

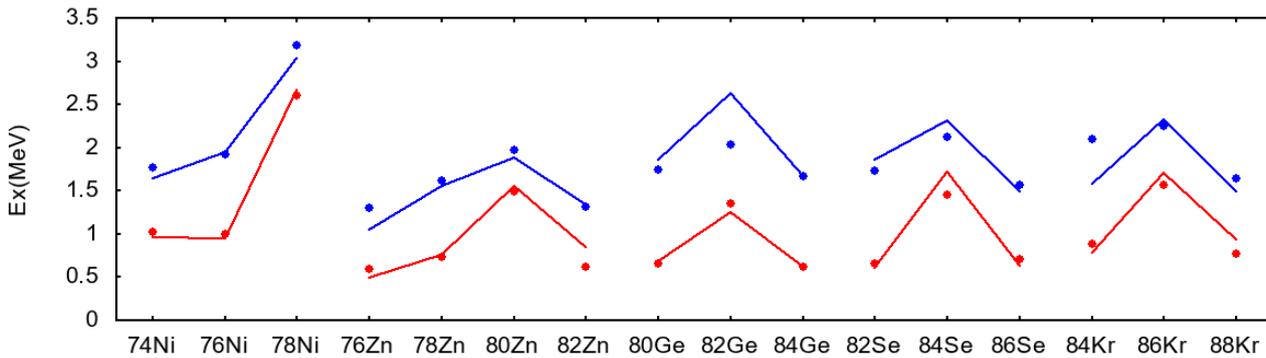


図 1 3 ニッケル 78 周辺の偶偶核の 2^+ 、 4^+ 状態の励起エネルギー 2^+ を赤、 4^+ を青で示し、実験値を点、計算値を線で示す。

(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た世界で初めての連星中性子星合体の数値相対論シミュレーションにより、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した。研究計画にある通り、以下の 3

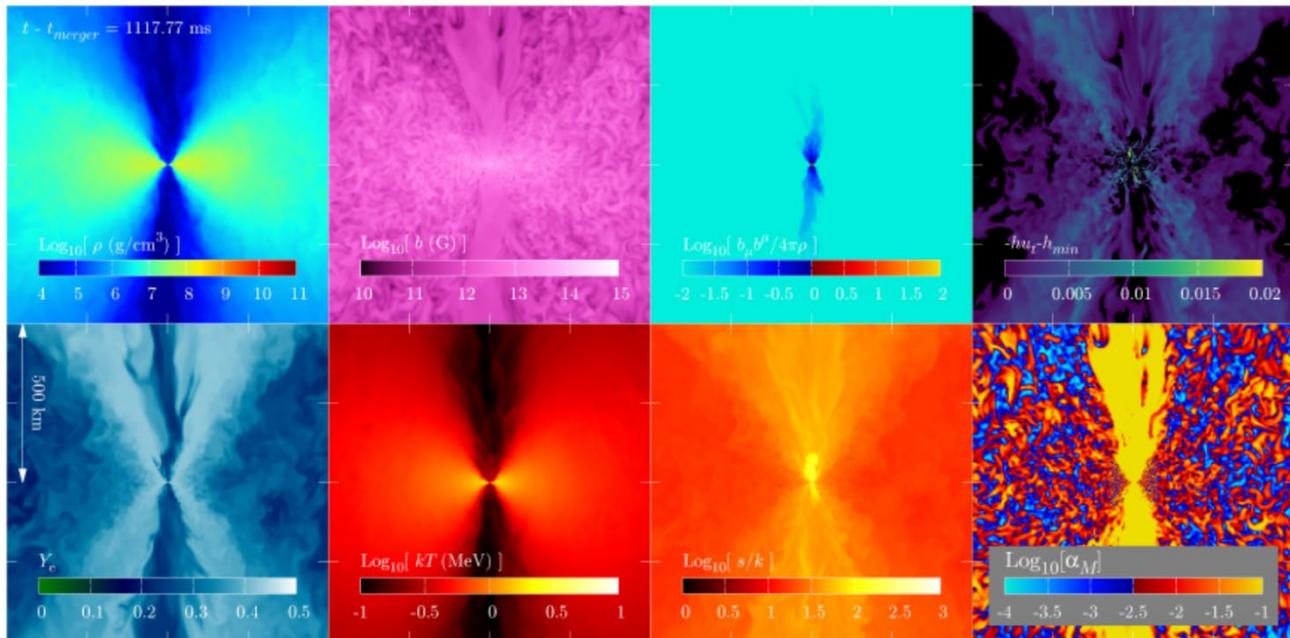


図 14 連星中性子星の合体後に形成されるブラックホールとその周りのガス円盤の構造
 図上段：左から密度、磁場強度、プラズマパラメータ、ローレンツ因子. 図下段：陽子過剰率、温度、エントロピー、磁気乱流による粘性係数

モデルについてシミュレーションを遂行した。(1) 連星中性子星合体からの重力波イベント GW170817 と整合的な状態方程式(SFHo EOS: 中性子星半径およそ 12km) を採用; GW170817 の観測の中央値である太陽質量の 1.2 倍と 1.5 倍の中性子星からなる連星中性子星、(2) SFHo EOS を採用; 太陽質量の 1.25 倍と 1.65 倍の中性子星からなる連星中性子星(このモデルは従来調べられていない合体後ブラックホールに直ちに崩壊する場合を探索する目的で行った)、(3) SFHo EOS とは別の GW170817 と整合的な状態方程式(BHB ϕ EOS: 中性子星半径およそ 13.5km) を採用; GW170817 の観測の中央値である太陽質量のおよそ 1.2 倍と 1.5 倍の中性子星からなる連星中性子星

上述の初期条件(1)は、GW170817 の観測結果にもっとも整合的であると考えられるモデルであり、必要となる物理をすべて組み入れて合体から合体後の進化までを総合的に追跡した本シミュレーション (図 1 4, 1 5 参照) は、GW170817 の現段階でもっとも信頼のおける理論モデルを提供する。GW170817 では、重力波に付随して、可視～赤外線における突発的天体現象(キロノバ AT2017gfo)が観測されたが、その

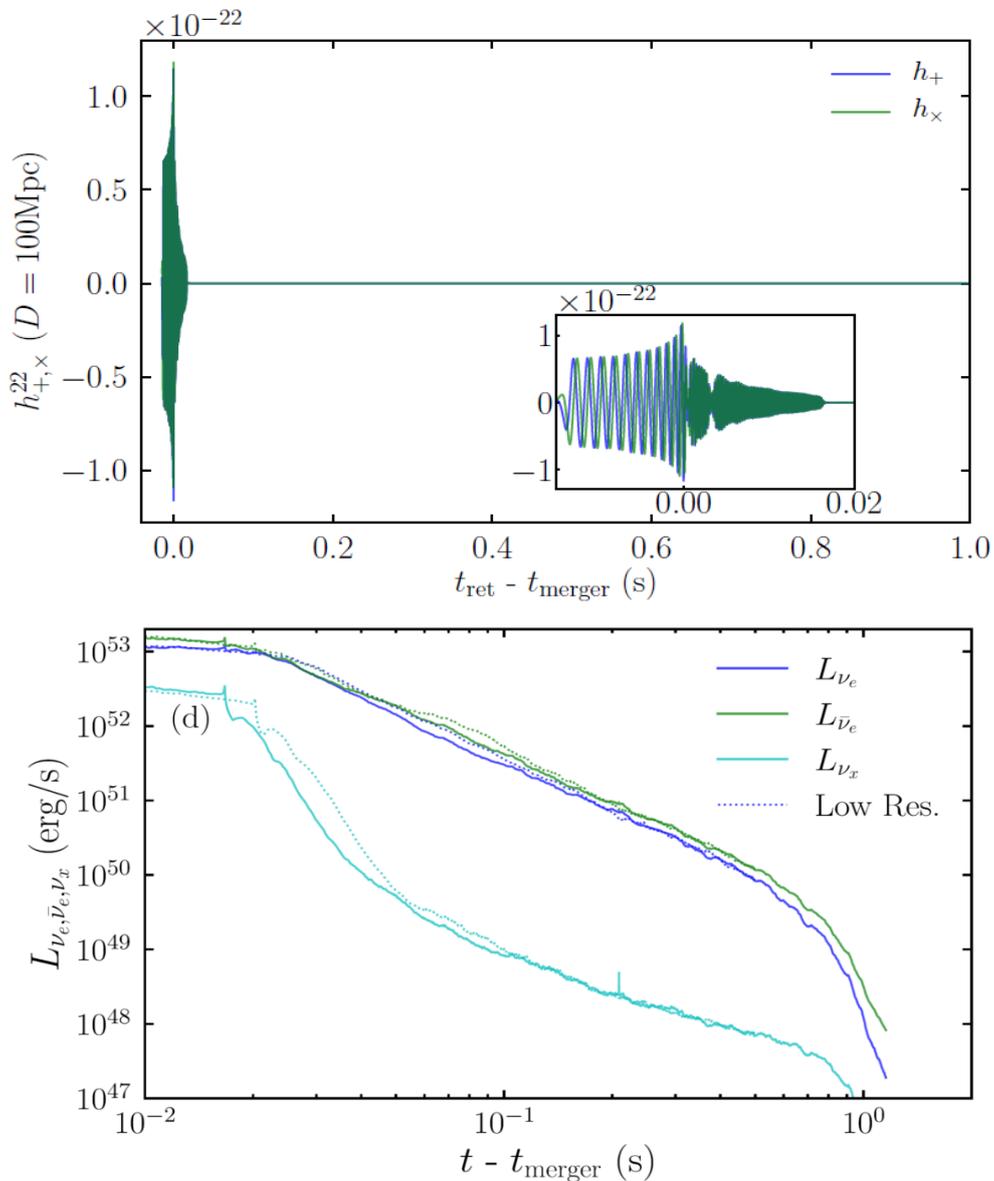


図 1 5 : 初期条件(1)における重力波放射(上図)およびニュートリノ放射(下図)

起源は中性子星合体における中性子過剰の放出物質中で進行する中性子捕獲核融合反応の崩壊熱である。シミュレーション結果から、この放出物質の総量および化学的・熱力学的特性を明らかにし、元素合成の概要を評価したところ、AT2017gfo の観測を説明はできるものの、より半径の大きい中性子星の合体が起源である可能性を示唆する結果を得た。これは、重力波とは独立に、電磁波観測によって中性子星の状態方程式を制限する成果であるといえる。本研究は国際会議の招待講演で発表済みであり、また Physical Review Letters に成果をまとめて投稿中である。なお、詳細な元素合成計算については、共用ストレージ課題（申請・採択済）で実施する。

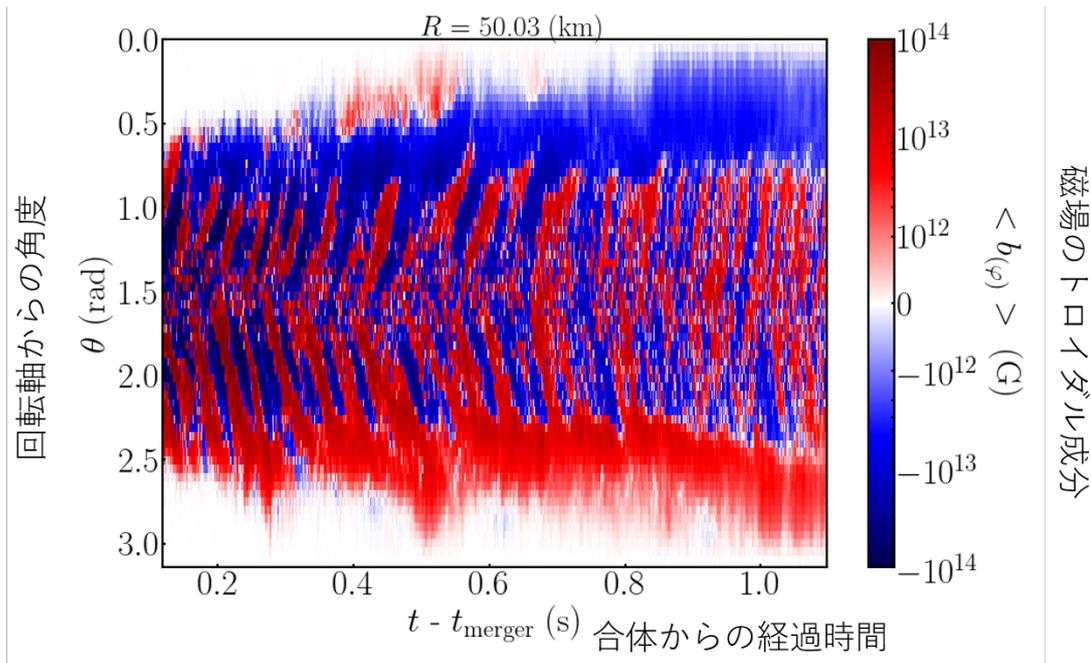


図 1 6 :初期条件(1)におけるバタフライダイアグラム 磁場のトロイダル成分の極性が周期的に変化し、磁気回転不安定性によるダイナモ機構によって乱流状態が維持されていることが明らかになった。

初期条件(3)では、より半径の大きい中性子星を预言する BHB ϕ EOS を採用してシミュレーションを行った。こちらの計算は、高負荷実行で発生した CPU ハード障害の解決までの期間の影響を受けたが(2021/7/16 のファームアップで解決)、途中までの計算結果を得ることができた。初期条件(2)は、これまでシミュレーションが行われてこなかった合体後にただちにブラックホールへと崩壊する場合であり、シミュレーションが完了した。

尚、数値シミュレーションにより GW170817 の理論モデルを構築しようという試みは従来も行われてきたが、合体から合体後 1 秒までを首尾一貫して追跡する研究は本研究が初めてである。従来の研究では、(A) 合体後の系を 2 次元軸対称化する、(B) 軸対称化に伴い磁場増幅が適切に追跡できないので粘性を導入する、といった処方が取られてきた。この場合、軸対称化に伴って初期条件が変わってしまう、粘性係数を手で導入しなければならない、などの問題点が生じる。本研究では、独自に開発した数値相対論コード(世界で初めて HLLD 磁気流体ソルバーを数値相対論の枠組みで実装)により、ダイナモ機構による磁場増幅と、それに伴う磁気乱流(粘性、翻ってし質量放出の駆動源となる)を正しく追跡することに成功した(図 1 6 参照)。乱流状態における磁場構造および乱流粘性は合体後の系からの質量放出に重要であ

り、我々の結果は、従来仮定されていた磁場構造や乱流粘性がかなり optimistic であったことを示唆しており、令和5年から開始予定の重力波観測 O4 に伴って行われる電磁波対応天体の観測の解析において考慮すべき結果である。この結果も含め、本研究は GW170817 の描像を明らかにするという観点において、科学的に新たな知見を与えるものであると考えている。また、上述の数値相対論コードの実装に成功したことは、アプリケーション開発における成果であるといえる。

(7) [時空生成]の研究

超弦理論の非摂動的定式化として提案された行列模型の複素ランジュバン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、以下の研究を行った。昨年度の研究で、この行列模型の素朴な数値シミュレーションでは実の時空が出現しないことを見出し、作用にローレンツ不変な項を加えることで、実の時空を実現した。フェルミオンの効果を落として単純化した模型に付加項を導入した場合、連続的に膨張する空間が現れたが、膨張しているのは1次元であった。3次元空間の膨張は、フェルミオンの効果を取り入れることで実現できると考え、今年度はフェルミオンを含む超対称行列模型の行列サイズ 1024 でのシミュレーションに向けた準備として、行列サイズ 128 でのシミュレーションを行った。ただし、シミュレーションの安定化のために mf というパラメタ（もとの模型は $mf=0$ に対応するので最終的には0へ外挿する）を導入した。 $mf=2$ 程度までのシミュレーションを行うことはできたが、フェルミオンを含まない場合と同様の結果が得られた。 $mf=0$ への外挿を行うためには、 mf をより小さくする必要があるが、複素ランジュバン法の正当化条件が満たされなくなるため、実行できなかった。今後、行列サイズを大きくすることにより、 mf をより小さくできるかどうかを調べ、3次元空間の膨張が起こるかどうかを確認する必要があると考えられる。

(8) 格子量子色力学コードの富岳向け最適化

本年度は前年度に成果創出プログラムにより開発されたアプリケーションプログラムの保守と最適化を行った。アプリケーションプログラムにはこれまでに最適化を行ったウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーと5次元ドメインウォール・フェルミオンクォーク・ソルバーが組み込まれている。「富岳」は本格稼働したがその機能や運用形態の改善が続いている。「富岳」の改善された機能や運用形態に追随するための保守と最適化、および、実計算を行うアプリケーションプログラム使用ユーザーからの最適化調整や要望に対するサポートを行った。具体的にはステージングに関するジョブスクリプトの改善とハイブリッドモンテカルロシミュレーションのパラメタの調整方法の助言を与えた。また投稿中であったウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーの性能評価の論文の査読評価に基づく追加のシミュレーションと論文の改訂を行い、論文が採択された[論文 1]。「富岳」向けウィルソン・クローバー・フェルミオン用クォーク・ソルバーのソフトウェア開発と計算性能についての国際会議報告論文が出版された[論文 2]。

[論文 1] Ken-Ichi Ishikawa, Issaku Kanamori, Hideo Matsufuru, Ikuo Miyoshi, Yuta Mukai, Yoshifumi Nakamura, Keigo Nitadori, Miwako Tsuji, “102 PFLOPS lattice QCD quark solver on Fugaku”, Computer Physics Communications, Volume 282, 2023, 108510, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108510>.

[論文 2] Y. Nakamura, “Software development and performance of Fugaku and ARM architectures”,

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テーマ責任者メール会議などの会議を開催するとともに、テーマ責任者やサブ課題代表を通じて情報収集、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毎月第 4 または第 5 木曜（4/28, 5/26, 6/30, 7/28, 8/25, 9/29, 10/28, 11/25, 12/23, 1/27）で開催し、進捗状況の確認と情報交換を行った。

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た。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ウェブ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、新型コロナウイ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。

<セミナー、研究会等>

セミナーや研究会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。本年度も新型コロナウイルスの影響でセミナーや研究会の開催数は少なく、オンラインによる開催も多かった。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と同じく開催された。セミナーと研究会等は本年度 5 件が実施され総参加者は計 283 名であった。

●第 15 回 HPC-Phys 勉強会

参加者：26 名

日時：令和 4 年 7 月 1 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 15 回目。銀河形成のシミュレーションと「富岳」のコーデザインに関する勉強会を開いた。

●第16回 HPC-Phys 勉強会

参加者：31名

日時：令和4年9月16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16回目。スパコンのハードウェアの今後の動向についての解説と2026年・2031年に行いたい研究課題と必要な計算資源についての紹介が行われた。

●第17回 HPC-Phys 勉強会

参加者：33名

日時：令和4年12月14日

場所：オンライン・オンサイト（理化学研究所計算科学研究センター（神戸））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17回目。プロファイラ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：161名

日時：令和4年12月12日,13日

場所：神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール及びオンライン開催

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」

共催：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、神戸大学惑星科学研究センター

後援：一般財団法人高度情報科学技術研究機構

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18回 HPC-Phys 勉強会

参加者：32名

日時：令和5年2月8日

場所：オンライン・オンサイト（神戸大学統合研究拠点（神戸））開催

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）

共催：神戸大学惑星科学研究センター（CPS）、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18回目。ベンダー（インテル社）によるプロファイラの紹介、テンソルネットワーク型量子回路シミュレーション、大規模固有値問題に関する諸問題の講演を行った。

<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。

●ウェブサイトの制作・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

・超変形した原子核 ^{40}Ca 崩壊メカニズムを解明

発表日：令和4年6月20日情報解禁

発表主宰者：大阪大学

●ウェブマガジン「月刊 JICFuS」「月刊 JICFuS ムービー」製作

若手研究者を中心にインタビュー記事「月刊 JICFuS」を掲載。本年度はオンラインによる取材2件による紹介記事(47号、49号)2本の制作を行った。さらに動画による紹介「月刊 JICFuS ムービー」を、高エネルギー加速器研究機構協力による1本(52号)の制作を行った。また、昨年度に引き続き、拠点長による研究分野紹介「拠点長コラム」の掲載を1本行った。

【月刊 JICFuS】

・第47号「Investigating the nature of matter」（令和4年10月13日）理化学研究所 R-CCS Yu Zhang 研究員

・第49号「高精度な格子 QCD シミュレーション —高精度実験とタグを組み新物理の発見を目指す」（令和5年1月11日）高エネルギー加速器研究機構 金児隆志 研究機関講師

【月刊 JICFuS ムービー】

・第52号「計算基礎科学連携拠点（JICFuS）の軌跡」（令和5年3月2日）計算基礎科学連携拠点 橋本省二 拠点長

【拠点長コラム】

執筆者はすべて橋本省二 課題代表／拠点長

- ・ 第4号「宇宙一の大衝突」（令和4年7月4日）

●リーフレット

各種イベントで配布を予定し、A3判変形四つ折り。2か国語（日・英）で製作。本年度も新型コロナウイルスの影響で各種イベントが中止となったため、オンラインによる公開を行っている。

<個別活動、特記事項>

活動として、各テーマ／サブ課題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

- ・ 25th Meeting on Physics at B Factories

参加者：国内外から79名

日時：令和4年5月16日

場所：高エネルギー加速器研究機構+Zoomによるハイブリッド開催

主催：高エネルギー加速器研究機構

概要：SuperKEKB/Belle II 実験の研究者と協力し、理論、実験研究者がBファクトリー実験で展開すべき物理について議論する国際研究会を開催した。アメリカの国際会議で発表された Belle II 実験の成果の詳細や、標準理論と実験の間に矛盾が見えると報告されているハドロニック崩壊の理論、実験研究の進展について招待講演が行われた。

- ・ 26th Meeting on Physics at B Factories

参加者：国内外から68名

日時：令和4年7月19日

場所：名古屋大学素粒子宇宙起源研究所+Zoomによるハイブリッド開催

主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

概要：SuperKEKB/Belle II 実験の研究者と協力し、理論、実験研究者がBファクトリー実験で展開すべき物理について議論する国際研究会を開催した。ヨーロッパの国際会議で発表された Belle II 実験の成果の詳細や、セミレプトニック崩壊の高精度化によって今後重要となるアイソスピン補正について招待講演が行われた。

- ・ Flavor Physics Workshop 2022

参加者：68名

日時：令和4年11月7-10日

場所：静岡県、ニュー八景園

主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

概要：実験、理論研究の若手育成を目的として、SuperKEKB/Belle II 実験の研究者と協力して開催した。標準理論や実験技術の基礎から新物理探索の最新の状況までの講義を設けた。

・ KEK Flavor Factory 2023

参加者：国内外から 152 名

日時：令和 5 年 2 月 9-12 日

場所：高エネルギー加速器研究機構+Zoom によるハイブリッド開催

主催：高エネルギー加速器研究機構

概要：新物理探索に向けたフレーバー物理の実験、理論研究の第一線で活躍している研究者を招き、最近の進展について講演、議論が行われた。

(3) [QCD 相構造]の研究

・ R-CCS workshop on Challenges and Opportunities in Lattice QCD Simulations and Related Fields,

参加者：国内外 35 名

日時：2023 年 2 月 15-17 日

場所：理化学研究所計算科学研究センター(神戸市)

主催：理化学研究所計算科学研究センター(R-CCS)

後援：計算基礎科学連携拠点(JICFuS)

概要：格子 QCD シミュレーションの課題と機会についてその周辺領域まで含めた最新の研究を、国内外の研究者を招いて議論を行った。

(7) [時空生成]の研究

2 週間に一回、zoom を使ったコラボレーション・ミーティングを行った。これには、KEK に所属するメンバー以外にも、海外からアテネ工科大の Konstantinos Anagnostopoulos 氏、Stratos Kovalkov Papadoudis 氏、INFN の平沢光昭氏が参加し、国内からも徳山高専の伊藤祐太氏、静岡大の土屋麻人氏、摂南大の東武大氏が加わった。このミーティングでは、計算結果の議論、今後の指針の議論の他、研究会での発表に関する議論など、多岐にわたる内容が議論された。

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 数理創造プログラム	国立研究開発法人 理化学研究所 数理創造プログラム 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	茨城県つくば市天王台1丁目1番1 国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター	国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター 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

(3) [QCD 相構造]の研究

学会等発表

1. “2+1 Flavor Finite Temperature Domain Wall Fermion Simulation with Fine-tuned Quark Masses”, I. Kanamori, 基研研究会・iTHEMS 研究会 2022 「格子上の場の理論と連続空間上の場の理論」(京都市), 2022. 7. 19-22.
2. “Thermodynamics of QCD with chiral fermion near physical point” (poster), I. Kanamori, 33rd IUPAP Conference on Computational Physics (online), 2022. 8. 1-4.
3. “Thermodynamics with Möbius domain wall fermions near physical point (I)”, Y. Aoki, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn), 2022. 8. 8-13.
4. “Thermodynamics with Möbius domain wall fermions near physical point II”, I. Kanamori, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn), 2022. 8. 8-13.
5. “2+1 flavor domain wall fermions for finite temperature with fine-tuned quark masses”, I. Kanamori, 日本物理学会 2022 年秋季大会 (岡山市), 2022. 9. 6-8.
6. “Lattice QCD with the Supercomputer Fugaku - progress and prospects”, Y. Aoki, ACAT 2022 (Bari), 2022. 10. 23-28.
7. “QCD 相構造: カイラルフェルミオンを用いた有限温度 QCD”, 金森逸作, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (神戸市), 2022. 12. 12-13.
8. “Controlling residual chiral symmetry breaking effects of domain wall fermions in QCD thermodynamics” (poster), Y. Aoki, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (神戸市), 2023. 2. 15-17.
9. “Finite temperature QCD phase transition with (2+1)- and 3-flavor Möbius domain wall fermions”, Y. Zhang, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (神戸市), 2023. 2. 15-17.
10. “Application of mass reweighting in (2+1)-flavor QCD thermodynamics with Möbius Domain Wall fermions” (poster), J. Goswami, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (神戸市), 2023. 2. 15-17.
11. “Controlling residual chiral symmetry breaking effects of domain wall fermions in QCD thermodynamics”, Y. Aoki, 日本物理学会 2023 年春季大会 (online), 2023. 3. 22-25.
12. “Studies of chiral phase transition using Möbius domain wall fermions in (2+1)-flavor QCD”, J. Goswami, 日本物理学会 2023 年春季大会 (online), 2023. 3. 22-25.

論文

1. “What is chiral susceptibility probing?”, H. Fukaya, S. Aoki, Y. Aoki, S. Hashimoto, C. Rohrhofer, K. Suzuki, PoS LATTICE2021 (2022) 050.

2. “Symmetries of temporal correlators and the nature of hot QCD”, L. Glozman, Y. Aoki, S. Hashimoto, C. Rohrhofer, PoS LATTICE2021 (2022) 357.
3. “Axial U(1) symmetry at high temperatures in Nf=2+1 lattice QCD with chiral fermions”, S. Aoki, Y. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, I. Kanamori, T. Kaneko, Y. Nakamura, C. Rohrhofer, K. Suzuki (JLQCD collaboration), PoS LATTICE2021 (2022) 332.
4. “2+1 flavor fine lattice simulation at finite temperature with domain-wall fermions”, Y. Aoki, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, I. Kanamori, T. Kaneko, Y. Nakamura, PoS LATTICE2021 (2022) 609.
5. “Thermodynamics with Möbius domain wall fermions near physical point II”, S. Aoki, Y. Aoki, H. Fukaya, J. Goswami, S. Hashimoto, I. Kanamori, T. Kaneko, Y. Nakamura, Y. Zhang, PoS LATTICE2022 (2023) 176.

(4) [バリオン間力]の研究

学会等発表

1. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による SU(3) 極限での Lambda(1405) の研究”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 日-8 日, 岡山理科大学, 一般講演
2. Kotaro Murakami, “Studies on baryon resonances from meson-baryon scatterings in lattice QCD”, International workshop on “Hadron physics with kaon beam and related topics”, online, 3-4 October 2022.
3. Kotaro Murakami, “Studies on baryon resonances from lattice QCD”, Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS), J-PARC, 14-16 March 2023.
4. 伊藤悦子 for HAL QCD collaboration, “物理点におけるハドロン間力計算に向けての QCD 配位生成”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24
5. 土居孝寛 for HAL QCD collaboration, “物理点 QCD 配位におけるバリオン間相互作用 (Strangeness=-1, -3)”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24
6. 土井琢身 for HAL QCD collaboration, “物理点 QCD 配位におけるバリオン間相互作用 (Strangeness=-4, 0)”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24
7. Yan Lyu, N-phi interaction and most charming dibaryon from lattice QCD, 820th ASRC Seminar, July 2022
8. Yan Lyu, and Emma Chizzali, N-phi experimental and theoretical overview, FemTUM2022, August 2022
9. Yan Lyu, N-phi interaction from lattice QCD, ELPH workshop, December 2022
10. Yan Lyu, N-phi interaction and two-pion tail from lattice QCD, RCNP workshop, January 2023
11. T. Doi and G. Mantzaridis, “ $p\Omega$ and $\Lambda\Xi$: experimental and theoretical overview”,

- Invited Talk given at workshop on Femtoscopy in high-energy collisions at ALICE (FemTUM 2022), Munich, Germany / online, Aug. 31 - Sep. 2, 2022.
12. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Nuclear Physics from Lattice QCD”, Invited Talk given at “15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15)”, Seoul, Korea / online, Aug. 21-26, 2022.
 13. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Lattice QCD study of hadron interactions with strangeness”, Invited Talk given at “14th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2022)”, Prague, Czech / online, Jun. 27 - Jul. 1, 2022.
 14. 井上貴史 for HALQCD Collaboration, “HALQCD バリオン間力への離散化誤差の影響についてその2”, 日本物理学会2022年秋季大会(岡山理科大学、2022年9月6日-8日)
 15. 井上貴史 for HALQCD Collaboration, “HALQCD バリオン間力への離散化誤差の影響についてその3”, 日本物理学会2023年春季大会(オンライン、2023年3月22日-25日)

論文

1. Kotaro Murakami, Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Takumi Doi, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), “Lattice quantum chromodynamics (QCD) studies on decuplet baryons as meson-baryon bound states in the HAL QCD method”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2023, Issue 4, 043B05 (2023). (Editor’s Choice)
2. E. Hiyama, M. Isaka, T. Doi and T. Hatsuda, “Probing the ΞN interaction through inversion of spin-doublets in $\Xi N \alpha \alpha$ nuclei”, Phys. Rev. C 106, 064318 (2022).
3. Yan Lyu, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Jie Meng, Kenji Sasaki, and Takuya Sugiura, “Attractive N-phi interaction and two-pion tail from lattice QCD near physical point”, Physical Review D 106, 074507 (2022).
4. Yan Lyu, Hui Tong, Takuya Sugiura, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Jie Meng, and Takaya Miyamoto, “Optimized two-baryon operators in lattice QCD”, Physical Review D 105, 074512 (2022).

(5) [核構造と r 過程]の研究

学会等発表

1. Recent progress of shell-model calculations and quadrupole collective states (口頭発表). N. Shimizu, International Symposium on Nuclear Spectroscopy for Extreme Quantum Systems (NUSPEQ2023), Plaza Verde, Numazu, Shizuoka, Japan 2023/03/07.
2. 原子核殻模型計算による統計的性質(口頭発表), 清水則孝, 研究会「中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成」 東京大学本郷キャンパス小柴ホール, 2023/02/10.
3. Shell model and Machine Learning (口頭発表), 清水則孝, RIKEN Nishina Center mini workshop “Combining Nuclear Theory and Machine Learning for fundamental studies

- and applications”, RIBF building, RIKEN Nishina Center, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, 2022/11/29.
4. 準粒子真空殻模型によるネオジム 150 のニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素 (口頭発表), 清水則孝, 二重ベータ崩壊核行列要素実験理論合同研究会, 大阪大学核物理研究センター, 2022/10/3.
 5. 殻模型と対相関 (口頭発表), 清水則孝, RCNP 研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」, 大阪大学核物理研究センター, 2022/09/26.
 6. Shell-model study towards astrophysical applications (口頭発表), N. Shimizu, YIPQS long-term workshop “Mean-field and Cluster Dynamic in Nuclear Systems 2022” (MCD2022), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2022/06/13.
 7. 角運動量射影におけるガウス型求積法 (口頭発表), 清水則孝, 角田佑介, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022/09/07.
 8. Theoretical uncertainty on the nuclear Schiff moments of ^{129}Xe and ^{199}Hg (口頭発表), 柳瀬宏太, The 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022), 九州大学
 9. 原子核殻模型によるキセノン原子核の核行列要素の理論計算 (口頭発表), 柳瀬宏太, 二重ベータ崩壊核行列要素実験理論合同研究会, 大阪大学核物理研究センター, 2022/10/3.
 10. Shell-model study for the Nuclear Schiff moments of ^{129}Xe and ^{199}Hg (口頭発表), K. Yanase, KMI workshop: Searches for Electric Dipole Moments: From Theory to Experiment, 名古屋大学, 2023 年 3 月.
 11. モンテカルロ殻模型による $N=82$ 付近のベータ崩壊半減期の理論計算 (口頭発表), 柳瀬宏太, 清水則孝, 角田佑介, 宇都野穰, 日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン, 2023 年 3 月.
 12. Emerging of alpha clustering due to nuclear forces, T. Otsuka, 理化学研究所仁科加速器科学研究センター, 2022 年 5 月.
 13. Large-scale shell-model approach to nuclear collective motion (oral), Y. Utsuno, N. Shimizu, Y. Tsunoda, 66th DAE Symposium on Nuclear Physics, Guwahati, India, 2022 年 12 月.
 14. 大規模殻模型計算と 3 準位模型による ^{40}Ca の超変形状態からの $E0$ 遷移の理解 (口頭発表), 宇都野穰, 清水則孝, 井手口栄治, 青井考, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022/09/06.
 15. New facets of alpha-clustering and deformation towards driplines depicted by nuclear forces, T. Otsuka, “YIPQS long-term workshop Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022)”, 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 5 月.
 16. Prevailing triaxiality of heavy deformed nuclei (oral, remote), T. Otsuka, Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (SSNET’22 Conference), 2022 年 5 月.

17. alpha clustering from first principles for Be and C isotopes including the Hoyle state, T. Otsuka, Oslo University, 2022年5月.
18. Emerging concepts in nuclear structure based on the shell model (oral, remote), T. Otsuka, Frontiers in Nuclear Structure Theory, KTH, Stockholm, Sweden, 2022年5月.
19. Structure evolutions towards neutron driplines (oral), T. Otsuka, YIPQS long-term workshop Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022), 京都大学基礎物理学研究所, 2022年6月.
20. Monopole-quadrupole interplay in nuclear structure and resulting self-organization phenomena (oral), T. Otsuka, YIPQS long-term workshop Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, 2022年6月.
21. What locates neutron driplines? (oral, remote), T. Otsuka, DREB2022 - Direct Reactions with Exotic Beams, University of Santiago de Compostela, Spain 2022/6/27.
22. 炭素12の第一原理計算とホイール状態 (oral), 大塚孝治, RCNP研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望, 大阪大学核物理研究センター, 2022/7/8.
23. Prevailing triaxiality in nuclear shapes (oral), T. Otsuka, Zakopane Conference on Nuclear Physics 2022, Zakopane, Poland, 2022年8月.
24. Shell evolution and arising paradigm changes (oral), T. Otsuka, 28TH INTERNATIONAL NUCLEAR PHYSICS CONFERENCE (INPC 2022), Cape Town, Africa, 2022/9/16.
25. Prevailing triaxiality in heavy deformed nuclei and possible experimental observation by M1 excitation, T. Otsuka, Institute für Kernphysik, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2022年10月.
26. Knocking out nucleons and alphas to see novel nuclear structures, T. Otsuka, Institute für Kernphysik, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2022年10月.
27. (A) Triaxial ellipsoids probed by the RHC and a possible paradigm change in nuclear structure (B) Progress report on 96Zr and 96Ru, T. Otsuka and Y. Tsunoda, EMMI Rapid Reaction Task Force (RRTF) "Nuclear physics confronts relativistic collisions of isobars, Heidelberg University, 2022/03/06.
28. Cluster structure of atomic nuclei from ab initio perspectives (oral), T. Otsuka, 大阪大学, 第8回クラスター階層領域研究会, 2023/2/11.
29. 原子核の「原風景」を求めて(口頭発表), T. Otsuka, RCNP コロキウム, 2023年1月.
30. Prevailing triaxiality driven by the tensor force (oral), T. Otsuka, VI-th topical workshop on "Modern Aspects in Nuclear Structure", Bormio, Italy, 2023年2月.
31. New aspects of nuclear structure (Impacts from modern Shell Model) (oral), T. Otsuka, INTPART School 2023, Okinawa, 2023/2/23-3/3.
32. Recent studies on the shape evolution of medium-heavy nuclei and their impacts (口頭発表)
33. Y. Tsunoda, VIth Topical Workshops on Modern Aspects in Nuclear Structure, Bormio,

Italy, 2023年2月.

34. モンテカルロ殻模型による N=50 近傍の核構造の研究 (口頭発表), 角田佑介, 清水則孝, 大塚孝治, 日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン, 2023 年 3 月.
35. モンテカルロ殻模型とその発展的手法による原子核の形状の研究 (ポスター発表), 角田佑介, 第 2 回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会、オンライン, 2023 年 3 月
36. モンテカルロ殻模型計算による r 過程核の研究 (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、神戸大学, 2022 年 12 月.
37. モンテカルロ殻模型による N=50 近傍の核構造の研究 (口頭発表), 角田佑介, 清水則孝, 大塚孝治, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 2022 年 9 月.
38. Structure of medium-mass nuclei studied by Monte Carlo shell model and quasi-particle vacua shell model calculations (口頭発表), Y. Tsunoda, YIPQS long-term workshop Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022), 京都大学基礎物理学研究所, 2022 年 6 月.
39. Recent findings about shell evolution in the neutron-rich Ca region (oral), Y. Utsuno, Workshop Physics of RI: Recent Progress and Perspectives, 2022 年 5 月.
40. Alpha-clustering of light nuclei from first principles (oral), T. Abe, JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program Nuclear Physics in the 21st century, Osaka, 2023 年 2 月.
41. Alpha-cluster structure from first principles (oral), T. Abe, RIKEN-YITP Workshop Physics of RI: Recent progress and perspectives, hybrid (RIKEN), 2022 年 5 月.
42. Alpha-cluster structure from first principles (oral), T. Abe, YIPQS long-term workshop Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022), hybrid YITP, Kyoto University, 2022 年 5 月.
43. 富岳で探る炭素 12 のホイル状態(口頭発表), 阿部喬, 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, 神戸大学先端融合研究環総合研究拠点コンベンションホール, 2022 年 12 月.
44. 第一原理計算によるホイル状態のクラスター構造(口頭発表), 阿部喬, 日本物理学会 2023 年春季大会, 原子核クラスター物理の新たな進展と展望, オンライン, 2023 年 3 月.
45. 富岳向け QCD ソルバー, 中村宜文, 第 15 回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会, オンライン, 2022 年 7 月.
46. 理研梅峰賞, 阿部喬, 大塚孝治, 理化学研究所, 2023 年 3 月.
47. 記者発表「原子核でクラスター発生? -富岳コンピュータで70年間の謎解きに成功-」
2022 年 4 月 27 日, スーパーコンピュータ「京」と「富岳」を用いた第一原理計算により、
炭素 12 原子核の量子構造を明らかにした。
https://www.riken.jp/press/2022/20220427_2/.
48. 一宇宙での元素合成過程の謎に迫る成果— 超変形した原子核 ^{40}Ca の崩壊メカニズムを解明, 2022 年 6 月 20 日, カルシウム 40 の超変形状態から球形の基底状態への予想外に抑制された崩壊を発見. 本事業では理論解析を担当.

論文

1. $SO(3)$ quadratures in angular-momentum projection, N. Shimizu and Y. Tsunoda, *Comput. Phys. Commun.* 283, 108583 (2023).
2. A new study of the $N=32$ and $N=34$ shell gap for Ti and V by the first high-precision MRTOF mass measurements at BigRIPS, S. Iimura, M. Rosenbusch, A. Takamine, Y. Tsunoda, M. Wada, S. Chen, D. Hou, W. Xian, S. Yan, P. Schury, Y. Hirayama, Y. Ito, H. Ishiyama, S. Kimura, T. M. Kojima, H. Koura, J. Lee, J. Liu, S. Michimasa, H. Miyatake, J. Y. Moon, S. Nishimura, S. Naimi, T. Niwase, A. Odahara, T. Otsuka, N. Shimizu, T. Sonoda, Y. X. Watanabe, and H. Wollnik. *Phys. Rev. Lett.* 130, 012501 (2023).
3. beta-decay of exotic P and S isotopes with N around 28, V. Tripathi, S. Bhattacharya, E. Rubino, C. Benetti, J. Perello, S. L. Tabor, S. N. Liddick, P. C. Bender, M. P. Carpenter, J. J. Carroll, A. Chester, C. J. Chiara, K. Childers, B. R. Clark, B. P. Crider, J. T. Harke, B. Longfellow, R. S. Lubna, S. Luitel, T. H. Ogunbeku, A. L. Richard, S. Saha, N. Shimizu, O. A. Shehu, Y. Utsuno, R. Unz, Y. Xiao, S. Yoshida, and Yiyi Zhu, *Phys. Rev. C* 106, 064314 (2022).
4. Large collectivity in ^{29}Ne studied by heavy-ion inelastic scattering, A. Revel, J. Wu, H. Iwasaki, J. Ash, D. Bazin, B. A. Brown, J. Chen, R. Elder, P. Farris, A. Gade, M. Grindler, N. Kobayashi, J. Li, B. Longfellow, T. Mijatovic, J. Pereira, A. Poves, A. Sanchez, N. Shimizu, M. Spieker, Y. Utsuno, and D. Weisshaar, *Phys. Lett. B.* 838, 137704 (2023).
5. Quasi- $SU(3)$ Coupling Induced Oblate-Prolate Shape Phase Transition in the Casten Triangl, K. Kaneko, Y. Sun, N. Shimizu, and T. Mizusaki, *Phys. Rev. Lett.* 130, 052501 (2023).
6. Electric Monopole Transition from the Superdeformed Band in ^{40}Ca , E. Ideguchi, T. Kibédi, J. T. H. Dowie, T. H. Hoang, M. Kumar Raju, N. Aoi, A. J. Mitchell, A. E. Stuchbery, N. Shimizu, Y. Utsuno, A. Akber, L. J. Bignell, B. J. Coombes, T. K. Eriksen, T. J. Gray, G. J. Lane, and B. P. McCormick. *Phys. Rev. Lett.* 128, 252501 (2022).
7. alpha-clustering in atomic nuclei from first principles with statistical learning and the Hoyle state character, Otsuka, T. Abe, T. Yoshida, Y. Tsunoda, N. Shimizu, N. Itagaki, Y. Utsuno, J. Vary, P. Maris and H. Ueno, *Nature Commun.* 13, 2234 (2022).
8. Two-particle transfer processes as a signature of shape phase transition in Zirconium isotopes, J. A. Lay, A. Vitturi, L. Fortunato, Y. Tsunoda, T. Togashi, T. Otsuka, *Phys. Lett. B* 838, 137719 (2023).
9. Multi-step Coulomb excitation of ^{64}Ni : shape coexistence and nature of low-spin

excitations, D. Little, A. D. Ayangeakaa, R. V. F. Janssens, S. Zhu, Y. Tsunoda, T. Otsuka, B. A. Brown, M. P. Carpenter, A. Gade, D. Rhodes, C. R. Hoffman, F. G. Kondev, T. Lauritsen, D. Seweryniak, J. Wu, J. Henderson, C. Y. Wu, P. Chowdhury, P. C. Bender, A. M. Forney, and W. B. Walters, Phys. Rev. C 106, 044313 (2022).

(6) [中性子星合体]の研究

学会等発表

1. Kenta Kiuchi et al., Self-consistent picture of the mass ejection from one-second lasting binary neutron star merger in numerical-relativity neutrino-radiation magnetohydrodynamic simulation (招待講演, 口頭), Unsolved problems in Astrophysics and Cosmology 2022, The Hebrew Univ., Jerusalem, Israel
2. Kenta Kiuchi et al., Constraining the Nuclear Equation of State from Compact Binary Merger (招待講演, 口頭), Gordon Research Conference: Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics, Holderness, NH, USA
3. Kenta Kiuchi et al., Waveform challenges and numerical relativity (招待講演, 口頭), Frontiers in Numerical Relativity, Jena Univ., Jena, Germany, 2022
4. Yuichiro Sekiguchi, Neutron star mergers and the origin of heavy elements (招待講演, 口頭), 3rd Japanese-American-German Frontiers of Science Symposium (JAGFOS 2022), Irvine, California, USA 2022

(7) [時空生成]の研究

学会等発表

1. The emergence of expanding space-time in a novel large- N limit of the Lorentzian type IIB matrix model, Mitsuaki Hirasawa, The 39th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022), August 11, 2022, University of Bonn, Bonn, Germany.
2. タイプ IIB 行列模型の新たなラージ N 極限における膨張時空の創発, 畠山洗太, 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2022, 2022 年 08 月 24 日, 東京理科大学神楽坂キャンパス, 東京.
3. Infrared regularization of the Lorentzian IKKT matrix model and the emergence of expanding universe, Jun Nishimura, Corfu 2022, August 30, 2022, ICTS Bangalore, India and Online.
4. タイプ IIB 行列模型の新しいラージ N 極限における膨張宇宙の創発, 畠山洗太, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 日, 岡山理科大学岡山キャンパス, 岡山.
5. The emergence of expanding space-time in a novel large- N limit of the Lorentzian type IIB matrix model, Mitsuaki Hirasawa, Corfu 2022, September 20, 2022, Corfu, Greece.
6. 超弦の行列模型から創発される時空の研究, 畠山洗太, 第 9 回 HPCI システム利用研究課題

成果報告会, 2022年10月28日, オンライン開催.

7. The emergence of expanding space-time in the type IIB matrix model, Asato Tsuchiya, East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2022, November 14, 2022, KIAS, Korea.
8. The emergence of (3+1)-dimensional space-time in the type IIB matrix model, Kohta Hatakeyama, KEK Theory Workshop 2022, December 08, 2022, Online (KEK Theory Center, Japan).
9. 超弦理論の非摂動的定式化の完成に向けて, 西村淳, 富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星シンポジウム, 2022年12月13日, 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール, 兵庫.
10. 超弦理論の数値シミュレーションと(3+1)次元時空の生成, 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, 2022年12月13日, 神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール, 兵庫.
11. Emergence of (3+1)-dimensional expanding space-time in the type IIB matrix model, Asato Tsuchiya, 2022 NTU-Kyoto high energy physics workshop, December 19, 2022, National Taiwan University, Taiwan.
12. Emergence of an expanding (3+1)-dimensional spacetime in the type IIB matrix model, Takehiro Azuma, The 5th R-CCS International Symposium, February 6, 2023, RIKEN Center for Computational Science (R-CCS), Japan.
13. Emergence of an expanding (3+1)-dimensional spacetime in the type IIB matrix model, Takehiro Azuma, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, February 15, 2023, RIKEN Center for Computational Science (R-CCS), Japan.
14. タイプ IIB 行列模型における膨張する(3+1)次元時空の創発, 畠山洸太, 日本物理学会 2023年春季大会, 2023年3月24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. Y. Nakamura, “Software development and performance of Fugaku and ARM architectures”, PoS(LATTICE2021) 023, 15 pp. (2022)
<https://doi.org/10.22323/1.396.0023>
2. 中村宜文, “富岳向け QCD ソルバー”, 第15回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会, 2022年7月1日, オンライン

論文

1. Ken-Ichi Ishikawa, Issaku Kanamori, Hideo Matsufuru, Ikuo Miyoshi, Yuta Mukai, Yoshifumi Nakamura, Keigo Nitadori, Miwako Tsuji, 102 PFLOPS lattice QCD quark solver on Fugaku”, Computer Physics Communications, Volume 282, 2023, 108510, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108510>.