

研究領域名

素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層の物質構造の解明

研究期間

平成20年度～平成24年度

領域代表者

青木 慎也（京都大学・基礎物理学研究所・教授）

研究領域の概要

本領域の目的は、量子色力学(QCD)の真空構造とクォーク力学の研究から始まり、クォークの力学と核力、核力と原子核構造、原子核構造と超新星爆発などの爆発的天体現象、爆発的天体現象と元素合成、などいろいろな階層の重層的な物質構造を、素粒子・原子核・宇宙の研究者が計算科学的技法を最大限活用しながら共同で研究し、物質階層縦断的かつ分野融合型の新しい研究領域を構築することである。本領域の研究により、今まで個別に研究されてきたいろいろな階層の物質の起源に関する諸問題が1つの大きな枠組みで統一的に理解・解決される。このことは、宇宙に於ける重元素合成のメカニズムの解明という長年の懸案の解決に繋がるだけでなく、物質構造を複数の階層にまたがって統一的に研究・理解するという全く新しい研究方法のモデルケースを与えることになる。

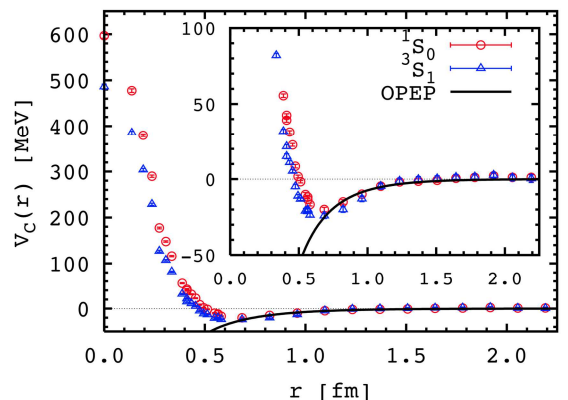
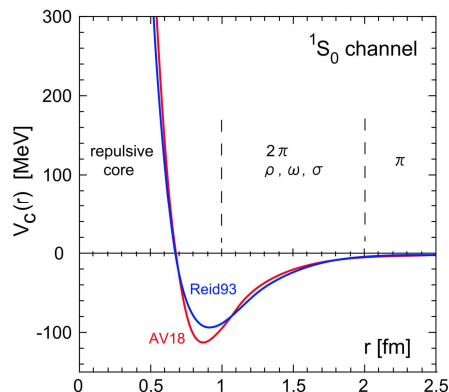
領域代表者からの報告

1. 研究領域の目的及び意義

研究領域の目的

近年の計算機の急速な発展とそれに伴う計算科学の精密化は、例えば、領域代表者らの研究グループによる「格子QCDによる核力ポテンシャルの計算」という画期的な研究成果を打ち出した。下図の左は散乱実験の結果から構成された現象論的核力ポテンシャルであり、右は格子QCDの数値シミュレーションによって理論的に計算されたものである。更なる精密化はもちろん必要であるが、格子QCDの結果は期待される核力ポテンシャルの定性的性質を良く再現している。この成果は、クォーク間の力学であるQCDから、クォークの束縛状態である核子の間のポテンシャルという1つ上の階層の相互作用を導きだしたものであり、計算科学の発展無しには成し得なかったものである。その重要性は、この論文がネイチャーの2007年ハイライト研究21件の1つに選ばれたことにも現れている。ここで示された「基本的な物質の相互作用からより上の階層の複雑な相互作用を導く」ということの必要性・重要性は、科学の多くの分野で認められているが、その難しさからなかなか実現されていないのが実状である。そこで、この研究の成功をきっかけにして、計算科学という新しい手法を用いて物質の異なった階層の性質を統一的に研究・理解するという新しい研究分野の構築を目指したのが本新学術領域研究である。

(1) 格子QCDに基づいたハドロン相互作用の理解、特に核子間相互作用、あるいはストレンジクォークを含んだ一般的なバリオン間相互作用の決定、(2) QCDで決められたバリオン相互作用を用いた軽い原子核構造の決定、(3) 軽い原子核構造の研究で得られた知見に基づいた重い原子核構造の理解、また、QCDに基づいた原子核構造論の構築、(4) このように



して得られたバリオン間相互作用や原子核構造に基づいた超新星爆発やブラックホール形成事象の理解、(5) 恒星進化の過程および超新星爆発などでの元素合成と宇宙に存在するさまざまな元素の起源の解明、と様々な階層での物質の性質・構造・起源を下(クォーク)から上(元素合成)までという1つの流れの中で統一的に研究することが、本領域の研究目的である。このような、ミクロな下部構造からマクロな上部構造という階層的な物質構造を異なった専門分野の研究者が共同で研究していくことが本領域の特徴であり、それを可能にする体制を構築することそのものも領域の目的の1つである。これらの研究目的の応用展開としては、すばる望遠鏡などによる金属欠乏星における元素組成の観測や超新星爆発・ブラックホール形成から放出されるニュートリノや重力波の将来観測などによる理論モデルの検証手段を検討することなども考えられる。また、その発生機構が未だに謎であるガンマ線バースト現象などの解明にも発展させる可能性も視野にしている。

研究領域の概要

本新学術領域は、異なった階層の物質構造をいろいろな分野の研究者が異なった視点から共同で研究を行うという素核宇宙の分野融合の領域を構築し、そこから従来とは異なった融合的な新しい研究成果を産み出すものである。

研究期間内に、分野間の連携を通して明らかにしようとしている具体的な課題は以下の通りである。(1) 格子QCDの数値シミュレーションによる計算でQCDの真空構造やハドロンの性質を精密に決定すること。これにより格子QCD計算の信頼性を確立する。(2) 格子QCDの計算で核力ポテンシャル、バリオン間ポテンシャルを精密に決定する。そのポテンシャルを用いて軽い原子核の構造を計算し、その結果を実験値と比べることでポテンシャルの妥当性を検証する。特に、三体力の必要性を検証し、可能なら格子QCDで三体力を計算する。また、格子QCDで得られた一般のバリオン間ポテンシャルを用いて、軽いハイパー核の構造を決定する。(3) 格子QCDから得られたポテンシャルを用いて、重い原子核の構造を決定する。さらに、QCDに基づいた新たな原子核構造の計算方法を確立し、従来とは違う原子核構造論の構築を目指す。(4) 格子QCDで得られたバリオン間ポテンシャルを用いた高密度物質の状態方程式を求める。特にクォークやハイペロンを含む有限温度の状態方程式の構築を目指す。(5) 得られた状態方程式や核構造の情報を用いた超新星爆発やブラックホール形成の数値シミュレーションを行い、これらのハドロン物理が天体現象に及ぼす影響や、観測プローブとなるニュートリノや重力波の振舞を明らかにする。(6) 第一世代星を含む恒星進化と超新星爆発などの爆発的な天体現象で合成される重元素組成を計算し、宇宙に存在する各元素の起源を明らかにする。

上記の研究課題を実現するために、4つの研究項目とそれぞれに対応した計画研究と公募研究を設ける。計画研究A01、A02、A03は異なった階層の物質構造を研究する研究班である。A01は主に素粒子理論、A02は主に原子核理論、A03は主に宇宙物理学、の研究者で構成されているが、A01とA02、A02とA03は研究分野に関してオーバーラップがあるので、何人かは2つの計画研究の両方に分担/連携あるいは連携/連携という形で入り、分野融合という本領域の理念を実現するための原動力になって頂いている。また、計画研究班に入っていない素核宇宙分野の研究者、特に若手研究者、に本領域に参加してもらうため公募研究を行い、分野の人的資源の活用と人材育成を行なっている。

各研究計画班の研究概要は以下の通りである。(1) A01: 格子QCD計算の基礎を築くため、A04班と連携し、現在急速に進展しつつある動的3フレーバー手法をより大規模なシミュレーションで実行する。高精度格子QCD計算の基礎を構築したのちは、A02班で行なう研究の基礎や重要なインプットとなるフレーバー物理やハドロン相互作用などの研究を行う。(2) A02: A01班やA04班と連携し、現実的なクォーク質量での格子QCD計算によるハドロン間相互作用を導く。これを基礎に、少数核子系の厳密計算や軽いハイパー核の構造計算を実行し、さらに、重い原子核内で使用可能な有効核力を構築し、それをを用いた大規模殻模型計算により、QCDから原子核構造論への道をつける。また、A03班と連携して信頼できる高密度状態方程式を構築する。(3) A03: A02班との連携により、格子QCDなどで得られるハドロン間相互作用を基礎とした現実的な状態方程式や原子核構造モデルを用いて、超新星爆発やブラックホール形成の一般相対論的数値シミュレーションを行い、そのダイナミクスや宇宙における元素の起源の解明を目指す。また高密度天体現象のシミュレーションで要となるニュートリノ輸送の計算手法に関してはA04班との連携によって高速化をはかり多次元計算への礎とする。(4) A04: 本領域の研究を具体化させるための共通の手

法である計算科学に関する研究を分野にとらわれず大局的に行って行く。A01、A02、A03 の中でその分野の計算手法に詳しい何人かを連携研究者として加え、いろいろな応用分野での計算アルゴリズムの研究を展開する。つまり、A04 は計算科学という手法で他の3つの研究分野を横断し束ねる役割をする研究班である。また、それぞれの研究によって生成された大量のデータの保管や高速な転送、また、より広い研究者コミュニティへの生成データの提供など、本領域の研究を有機的に進めるためのインフラストラクチャーの部分を整備する役割をも担っている。

2. 研究の進展状況及び成果の概要

領域全体の設定目標の達成度

本領域全体の設定目標は以下のものである。

(1) クォークから元素合成までという、いろいろな階層の重層的な物質構造を、素粒子・原子核・宇宙の研究者が共同で研究する、物質階層縦断的かつ分野融合的な新しい研究領域を構築する。

(2) 上の大目標を達成するために、具体的に分野連携が必要な研究目標を決め、それを進める中で、上記(1)の領域を徐々に構築していく。

(3) 具体的に挙げられた分野連携が必要な研究目標を達成する。

(3-1) 格子QCDに基づいたハドロン間相互作用の理解、特に核子間相互作用、あるいはストレンジクォークを含んだ一般的なバリオン間相互作用の決定(A01班とA02班の連携、A04班のサポート)

(3-2) QCDで決められたバリオン間相互作用を用いた軽い原子核構造の決定(A02班内部の共同研究とA01班からの結果との比較、A04班のサポート)

(3-3) 軽い原子核構造の研究で得られた知見に基づいた重い原子核構造の理解、また、QCDに基づいた原子核構造論の構築(A02班内部の共同研究、A04班のサポート)

(3-4) このようにして得られたバリオン間相互作用や原子核構造に基づいた超新星爆発やブラックホール形成事象の理解(A02班とA03班の連携、A04班のサポート)

(3-5) 恒星進化の過程および超新星爆発などでの元素合成と宇宙に存在するさまざまな元素の起源の解明

(A03班内部の共同研究、A04班のサポート)

次に領域全体での設定目標の達成度について述べる。

領域の研究者の個別の研究は順調に進んだと思う。このことは、本領域のメンバーの個々の研究能力や意欲は高かったことを示しており、領域のメンバー構成は妥当であったと思われる。

最初に、分野内、あるいは、計画研究班内部での、連携や共同研究に関して述べる。本領域開始以前は、素粒子理論分野内、原子核理論分野内、宇宙物理学分野内、という同じ分野の研究者同士でも、やっている研究内容が違うと、お互いの研究を正確に理解することが難しかった。例えば、原子核理論分野で、少数系原子核の研究を行っている研究者と、重い核の研究を行っている研究者は、その手法も大きく異なり、また専門化が進んでいるので、共通の問題意識で議論したり共同研究したりすることが少ない状況にあった。本領域の活動が始まったことにより、この状況はかなり改善されたと思う。特に、本領域に参加している素粒子・原子核・宇宙分野の多くの研究者が、より広い視点で自分の研究やその周辺分野を見るようになり、また、少し異なった研究に対しても、それを敬遠するのではなく、積極的に理解しようということが共通認識として定着してきた。研究の蝸壺化を防ぐという意味で、本領域の果たした役割は大きい。

本領域の中心となる分野間連携や共同研究であるが、具体的な研究成果は各班の達成度の説明に譲るとして、ここでは、成功した3つの分野連携を紹介しよう。1つは、格子QCDによる一般的なバリオン間相互作用の決定とそれを用いた軽い原子核の構造計算、であり、上の(3-1)と(3-2)に対応する。格子QCDによる核力の計算法をストレンジクォークが含まれた一般的なバリオン間相互作用に拡張するのに成功し、その結果、例えば、フレーバーSU(3)対称性が成り立つ極限では、H粒子と呼ばれるアップ、ダウン、ストレンジそれぞれのクォークを2つ含む6クォークの束縛状態が存在することが、格子QCDの計算で初めて示された。また、この計算で得られたポテンシャルを用いてヘリウム束縛エネルギーが計算されるなど、格子QCD(素粒子理論)と少数多体系の厳密計算(原子核理論)の連携研究の良い例になって

いる。さらに、核物質や中性子物質の状態方程式の計算（原子核理論）やそれを応用した中性子星の最大質量の計算（宇宙物理学）など、3つの分野にまたがる連携研究の成功例になっている。クォーク質量が現実世界のものよりまだまだ重いなど不十分な点も多いが、本領域の目指す「物質階層縦断的で分野融合的な研究」が実際に可能であることを示したものとして大きな意義が有る。2つめは、核力ポテンシャルから超新星爆発のシミュレーションのインプットとして役に立つ核物質の状態方程式を精密に決定する研究で、A02 班（原子核）と A03 班（宇宙物理）の連携研究の成功例である。現時点では、現象論的な有効相互作用が使われているが、将来的にはその部分を格子 QCD から得られた核力ポテンシャルに置き換えれば、本領域が掲げた「クォークから元素合成まで」が夢物語ではなく、実現可能なものになる。3つめは、初めの2つとは少し違って、宇宙物理学分野（A03 班）と計算機科学分野（A04 班）との連携により、3次元ニュートリノ輻射輸送問題をボルツマン方程式で直接解く計算コードを開発したことである。これにより、3次元空間超新星コアにおける3次元運動量空間におけるニュートリノ分布を解くことに世界で初めて成功した。A04 班との密接な共同研究により、反復法による行列解法を効果的に行う手法を開発して並列化・高速化を可能とすることができた。今回はテスト的な計算では有るが、将来は京コンピュータやその後継機を使って、現実的な計算を行い、超新星爆発に与えるニュートリノの影響を完全に明らかにすることができる。

以上のように、「クォークから元素合成まで、といういろいろな階層の重層的な物質構造を、素粒子・原子核・宇宙の研究者が共同で研究していく、物質階層縦断的かつ分野融合的な新しい研究領域を構築する」という本領域の目標は、かなりの部分で達成されたと考えている。ただし、実際に、(3-1) から (3-5) までの研究すべてを完了し、「クォークから元素合成まで」を完全に理解するまでには至っておらず、そのような目標へ向かっての研究領域の枠組みが出来た段階である。今後は、京やその後継計算機などを有効に使って、最終的な研究目標を達成する必要がある。

A01 班の設定目標の達成度

A01 班の研究の目的は

1. 格子計算を用いた第一原理計算の手法を確立し、QCD の真空構造とクォーク力学を解明すること
2. 格子 QCD 計算にもとづいてハドロンの相互作用を第一原理から計算することで低エネルギー有効理論や核力を精密に決定し、原子核理論で記述される階層へつなぐ基礎的な理論情報を提供すること。
3. 上記で確立された方法を応用し、素粒子のフレーバー物理等、新しい物理の解明に必要な物理量の予言を行うこと。

である。

一つ目の目標については十分達成されたと言える。JLQCD collaboration による厳密なカイラル対称性をもつフェルミオンを用いた 2+1 フレーバー QCD 計算ではカイラル対称性にもとづく低エネルギー有効理論との詳細な比較がなされ、格子 QCD 計算におけるさまざまな物理量のクォーク質量依存性、有限体積依存性がカイラル摂動論の 2 loop 補正の範囲内で有効理論の予言と見事に一致することを実証した。一方 PACS-CS collaboration による Wilson フェルミオンを用いたクォークの物理的質量直上の 2+1 フレーバーの QCD 計算では、核子も含むハドロンの質量スペクトルをハドロン崩壊をする不安定粒子以外では数%以下の精度で再現した。更にアップダウンクォークの質量差の効果、電磁相互作用の効果を取り入れた究極の現実的計算も達成した。

2つ目の目標に関連して、JLQCD collaboration, PACS-CS collaboration とともにカイラル有効理論の低エネルギー定数の決定を行った。とくに JLQCD collaboration のカイラル対称性に深く関わる位相感受率、カイラル凝縮パラメータの決定は厳密なカイラル対称性の利点を最大に活かした特筆すべき研究である。更に PACS-CS collaboration は大きな体積 ($L=3\text{fm}$) でのシミュレーションという利点を活かし、 ρ 中間子のハドロン崩壊幅、ヘリウム原子核の直接計算などハドロン相互作用に重要な成果を得た。これに加え、PACS-CS collaboration の生成したゲージ配位自身が A02 班によって核力ポテンシャルの計算に利用されている。今後、ハドロン相互作用や核力について最終的な結果を得るためには JLQCD collaboration,

PACS-CS collaboration とともにより大きな体積 ($L=6\text{fm}$) での計算が必要となるが、それには京コンピュータあるいは次世代の計算機が必要である。本研究は1で確立した手法を用いて2のハドロン相互作用への応用の第一歩をすすめたという点にある。その意味で、この目標も十分達成されたといつてよい。

3つ目の目標に関連して行われた、 π 中間子の形状因子の決定、核子の σ 項の決定は、フレーバー物理および暗黒物質探索のための重要なインプットを与える。また、強い相互作用の結合定数の決定、クォーク質量の決定など標準模型の基本パラメータの決定も重要な成果と言える。連携研究者の早川らによる電子の異常磁気能率の量子電磁気学における5ループの量子補正の計算は素粒子物理における金字塔といつてもよい成果である。その他、QCDのクォークフレーバー数が多い場合の新しい相(コンフォーマル相)についての研究についても興味深い結果を得た。これらの点で、目標は十分達成された。

A02班の設定目標の達成度

本計画研究開始当初、真空と物質のクォーク構造の理解に向けた確実な進歩が生まれつつあった。A01班に関係する分野においては、クォークの真空偏極を考慮し、かつ現実的なクォーク質量での格子QCD計算(いわゆるフルQCD計算)が手の届く範囲に見えてきた。一方、A02班に関係する分野においては、現実的核力や有効核力を用いた核子多体系の厳密計算が可能になってきた。これらの進展には、高速計算機の飛躍的な能力向上と新しい計算手法開発の両方が本質的な役割を果たしている。また、原子核構造論の基礎でありながら、半世紀以上にわたり現象論的にしか取り扱えなかった核力を、超並列計算機を用いた格子QCD計算から導出する道が、A02班に属する研究者らにより拓かれつつあった。計算科学の発展により計算可能な領域が拡大するだけでなく、これまで別々に研究されていた隣接する階層の物理が、日本の素粒子・原子核研究者の主要な貢献により融合し統一的に研究できる可能性が出てきたというのが、計画研究開始当初の背景であった。

このような背景のもとで2008年度から2012年度において行われた本計画研究では、以下のような成果を挙げられた：(i)原子核構造や高密度物質構造の解明の基礎となる核力を、格子量子色力学の第一原理計算から導出可能にするHAL QCD法を確立した。(ii)超新星爆発時の有限温度核物質の状態方程式をクラスター変分法に基づいて導くと同時に、高密度量子色力学の第一原理計算にむけてウィルソンフェルミオン行列式に対する簡約公式を導出した。(iii)量子少数粒子系計算においては、ガウス展開法を拡張し任意の2体相互作用をする5体系計算を可能にした。(iv)大次元ハミルトニアンを扱う必要のある原子核構造計算では、モンテカルロ殻模型を展開し、アルゴリズム改良による一桁近い計算速度の向上を達成し、エネルギー分散を用いた精密な外挿法を開発した。(v)原子核動力学について、対相関も含んだ時間依存密度汎関数法のコード開発を行い、数桁の速度向上を達成することにより、さまざまな原子核集団運動への適用を可能にした。

A03班の設定目標の達成度

A03班の目標は、現実的な状態方程式や原子核構造モデルを用いて、超新星爆発やブラックホール形成の一般相対論的数値シミュレーションを行い、そのダイナミクスや宇宙における元素の起源の解明を目指すことであった。三次元のアインシュタイン方程式を数値計算で解く数値相対論の分野において、本研究を開始した時点ではなされていなかった現実的な状態方程式やニュートリノ輸送の効果をとり入れたシミュレーションを行うことができるようになり、中性子星の合体現象などのダイナミクスや放出されるニュートリノや重力波の研究が飛躍的に進んだ。一方、星の重力崩壊時に球対称近似が成り立つようなケースについても、さまざまな状態方程式や親星に対して系統的な数値シミュレーション研究を行い、モデル依存性や将来のニュートリノ観測を用いた核物理へのフィードバックに関する詳細な議論などを行うことができた。爆発に至る星の進化計算については、自転の影響の取り込みとともに、電子捕獲に起因する重力崩壊型超新星爆発の親星に関する進化計算とその爆発に伴う元素合成計算を行えるようになった。ニュートリノ反応が関係する元素合成も含め、超新星爆発に伴う元素合成の理解を深めることができた。A02班との連携による超新星数値シミュレーションのための状態方程式数値テーブルの作成については、一様相のデータに基づく非一様相の計算プログラムの開発は終わり、代表的な温度における相図の作成はできた

が、広範囲にわたる状態量の計算とその数値テーブルの作成は現在も継続中である。

もう一つの大きな目標であった三次元ニュートリノ輸送の計算コード開発については、簡単な leakage 方式を基礎とした陽解法計算コードの開発に続き、新たにモーメントを用いた計算方法の定式化とその実装を行った。さらに、ニュートリノに関するボルツマン方程式を直接解く陰解法計算コードの開発を進め、A04 班との連携によってこの問題に特徴的な大規模行列を係数にもつ連立一次方程式が高速に解けるようになった。対称性を仮定しない三次元超新星モデルにおける三次元運動量空間のニュートリノ分布を世界に先駆けて計算することができるようになったのは、大きな成果である。

また本研究で得られた研究成果を論文として発表するだけでなく、他の研究者のさらなる研究に活用してもらうため、計算データの公開も一部開始することができた。さまざまな親星の重力崩壊に伴うニュートリノ放出を球対称数値シミュレーションによって求めた結果と、中性子星や超新星に関係する高密度物質の状態方程式に関するデータベースである。

A04 班の設定目標の達成度

本計画研究は、他班が推進する物理研究の基盤となる数値計算手法の応用と開発、環境整備が主な目標であった。このため以下の(1)-(3)の研究を申請時に計画し、その後(4)を加えた。公募研究を含め、全体的に目標は十分達成できたと考えられる。分野連携や高速化技術の蓄積は、今後も発展させてゆくことが重要であるため、情報交換のためのウェブサイト「高性能計算の扉」を計算基礎科学連携拠点、HPCI 戦略プログラム分野 5 と共同で構築した。

(1) 分野を横断した数値計算アルゴリズムの応用と開発

目標：素粒子、原子核、宇宙の分野で研究されているアルゴリズムや最適化の知見を融合し、応用数学の専門家等と共同で改良し、それぞれの分野に応用する。分野間の連携や共同研究を進める体制を構築する。
達成度：連携体制の構築は大きく進んだ。格子 QCD や超新星爆発のシミュレーションに現れる線形方程式を応用数学者と共同で解析し、効率的なアルゴリズムを導入するなど、連携の効果が現れている。コードの並列化やアルゴリズムの応用などで、分野横断的連携の成果も得られている。

(2) 高速計算のためのアーキテクチャの検討と高速化手法の開発

目標：近年発展の著しいグラフィックカード(GPGPU)などの演算アクセラレータや、大規模並列計算機など、様々なアーキテクチャの計算機の持つ能力を最大限に利用するための研究を行う。
達成度：演算アクセラレータを備えた計算サーバを導入し、これらを有効利用するための技術を開発した。実際の計算に適用して高速化を実現し、計算サーバは計算資源として活用されている。超並列計算の手法を含め、これらは格子 QCD 共通コードにも取り入れられている。

(3) データ共有のための環境整備

目標：大容量化するデータを効率的に利用するため、研究機関の間での高速なデータ転送を行い、データを公開、共有するための環境を整備する。格子 QCD 分野のデータグリッド「JLDG (Japan Lattice Data Grid)」を運用し、より使いやすいシステムに発展させるとともに、同様の仕組みが有効な他分野への支援を行う。

達成度：JLDG に対してはストレージ容量の増強、システムの改良を継続的に進め、また新たに 2 拠点が加わり、計画研究開始当初よりも大幅に利便性が高く大規模なデータグリッドとなった。格子 QCD 研究のインフラとして不可欠のものとなっている。宇宙物理など、他分野への応用も間もなく開始を予定している。

(4) 格子 QCD のための共通コードの開発

目標：領域内での要望や(1)-(3)の研究基盤の必要性から、格子ゲージ理論の共通コード開発を行った。初心者にとって理解しやすく、また同時に高性能な計算も可能なプログラム体系の構築を目指した。
達成度：オブジェクト指向に基づいて C++ で実装されたコードを開発し、「Bridge++」として、最初の公開版を 2012 年 7 月にリリースした。デザインの改良や機能の拡張等を継続的に行っており、開発は HPCI 戦略プログラム分野 5 へ引き継がれた。

審査部会における所見

A (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった)

1. 総合所見

計算科学をベースとして素粒子・原子核・宇宙の理論物理学を結びつけ、議論するフレームを構築したことの意義は大きい。異分野間の日常的連携が成立したことは新しい学術領域の創設として重要な成果であり、領域分野のさらなる発展が期待できる。実際、本研究領域の成果が、2011年に開始された文部科学省のHPCI戦略プログラムの戦略分野の1つ「物質と宇宙の起源と構造」へとつながった。今後のさらなる成果、さらには関連する実験との相互発展などが期待される。若手研究者育成、広報活動も十分行われている。

以上より、計算科学的技法を駆使した融合分野を開拓するとした領域の設定目標は達成されている判断できる。

2. 評価に当たっての着目点ごとの所見

(a) 研究領域の設定目的の達成度

計算科学をベースとして素粒子・原子核・宇宙の理論物理学を結びつけ、分野融合型の新しい研究分野を構築するという本領域の設定目的は、良く達成できている。議論するフレームを構築したことの意義は大きい。研究期間内に、クォークから元素合成までを対象にした理論計算に着手した。重層的物質構造の完全な解明には達していないが、宇宙と計算機科学の挙動研究など、期待どおりの成果が得られている。実際、本研究領域の成果が、2011年開始の文部科学省のHPCI戦略プログラム分野の1つ「物質と宇宙の起源と構造」へとつながった。さらに、本分野の発展を期待したい。

(b) 研究成果

計算科学をベースとして素粒子・原子核・宇宙の理論物理学を結びつけることで、新しい学術領域が創設された。今後、格子QCD計算を用いた原子核力の計算が、現象論的な原子核力の計算に定量的に迫れる精度なのか、これから信頼性・定量性をどのように評価していくのか、という点について発展が期待される。また、超新星爆発や元素合成シミュレーションに関しては信頼性をどう実験的に確認していくのか、将来の関連実験との相互発展にも期待したい。

研究成果の発表に関しては、学術雑誌発表のみならず、書籍、学会誌、シンポジウム、サマースクール等への普及活動と十分に行われている。また、成果の重要性に関しては、日本物理学会論文賞、仁科記念賞、日本物理学会若手奨励賞3名、猿橋賞、日本学術振興会賞等の受賞にも表れており、領域全体として、計算科学的技法を駆使した融合分野を開拓するとした設定目標は達成されている。

(c) 研究組織

素粒子・核物理・宇宙物理の研究者が集まり、領域内の連携が良好に進んだ。

(d) 研究費の使用

特に問題点はなかった。

(e) 当該学問分野、関連学問分野への貢献度

素粒子から宇宙までを統合的にとらえようとするアプローチは、異分野へも好影響を与えると思われる。

(f) 若手研究者育成への貢献度

参画した若手研究者は物理学会若手奨励賞3名を含む多くの受賞や、研究者としてのポストを得るなど成長が見られ、若手研究者育成に大きく貢献したと言える。