

領域略称名：素核宇宙融合 領域番号：2004
---------------------------

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」

(領域設定期間)

平成20年度～平成24年度

平成25年6月

領域代表者 京都大学・基礎物理学研究所・教授・青木 慎也

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究領域の設定目的の達成度	8
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	13
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	14
7. 総括班評価者による評価	15
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	17
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）	20
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 研究領域の目的

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、など様々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。

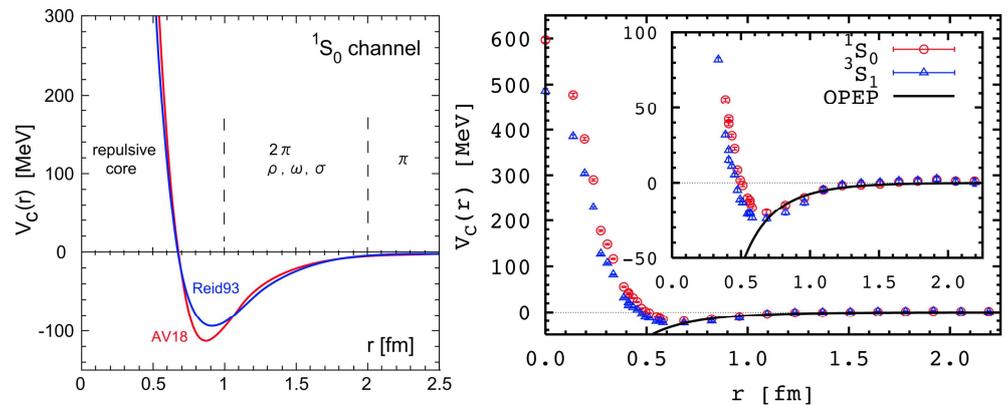
近年の計算機の急速な発展とそれに伴う計算科学の精密化は、例えば、領域代表者らの研究グループによる「格子 QCD による核力ポテンシャルの計算」という画期的な研究成果を打ち出した。下図の左は散乱実験の結果から構成された現象論的核力ポテンシャルであり、右は格子 QCD の数値シミュレーションによって理論的に計算されたものである。更なる精密化はもちろん必要であるが、格子 QCD の結果は期待される核力ポテンシャルの定性的性質を良く再現している。この成果は、クォーク間の力学である QCD から、クォークの束縛状態である核子間のポテンシャルという1つ上の階層の相互作用を導きだしたものであり、計算科学の発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。このように、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、これらのハドロンの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の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の相互作用を導く。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。

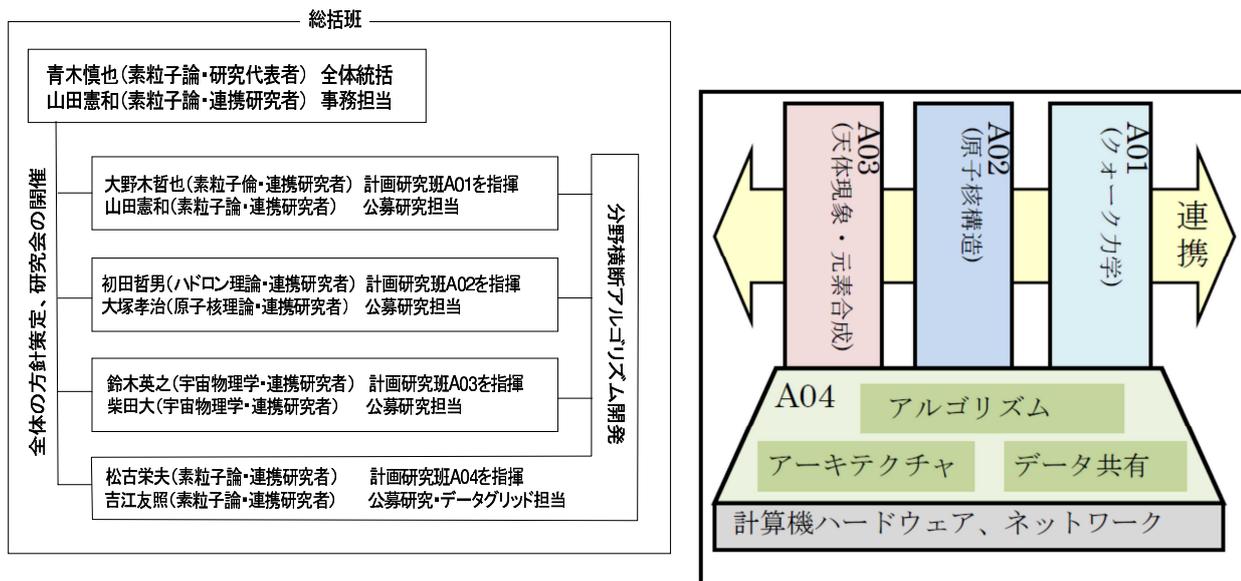
(3) A03: A02 班との連携により、格子 QCD など得られるハドロンの相互作用を基礎とした現実的な状態方程式や原子核構造モデルを用いて、超新星爆発やブラックホール形成の一般相対論的数値シミュレーションを行い、そのダイナミクスや宇宙における元素の起源の解明を目指す。また高密度天体現象のシミュレーションで要となるニュートリノ輸送の計算手法に関しては A04 班との連携によって高速化をはかり多次元計算への礎とする。(4) A04: 本領域の研究を具体化させるための共通の手法である計算科学に関する研究を分野にとらわれず大局的に行っていく。A01、A02、A03 の中でその分野の計算手法に詳し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. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

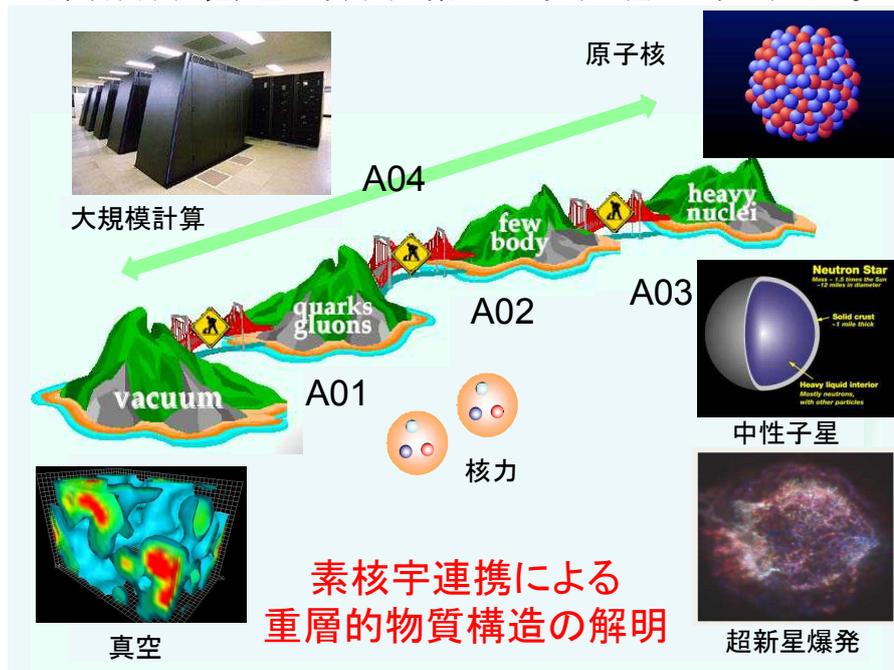
領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### 1. 研究組織

総括班の組織及び領域全体像は以下の通りである。



また、計画研究班相互の学問的な繋がりは以下の図のように表せる。



### 総括班

【研究代表者】青木慎也（領域代表者、領域全体の統括）

【連携研究者】大野木哲也（A01 班研究代表者、A01 班の指揮）、山田憲和（A01 班研究分担者、総括班事務担当）、初田哲男（A02 班研究代表者、A02 班の指揮）、大塚孝治（A02 班研究分担者、A02 班の研究の推進／公募研究担当）、鈴木英之（A03 班研究代表者、A03 班の指揮）、柴田大（A03 班研究分担者、A03 班の研究の推進／公募研究担当）、松古栄夫（A04 班研究代表者、A04 班の指揮）、吉江友照（A04 班研究分担者、A04 班の研究の推進／公募研究担当／データグリッド担当）

### A01 班

【研究代表者】大野木哲也

【研究分担者】藏増嘉伸、山田憲和

【連携研究者】石塚成人、早川雅司、橋本省二、谷口裕介、石井理修、金児隆志、石川健一、野秋淳一、山崎

剛、深谷英則、古井貞隆、青木保道

【研究協力者】出淵卓

【公募研究】谷口裕介、江尻信司、武田真滋、山崎剛、深谷英則、飯田英明、出淵卓、菊川芳夫、佐々木潔

### A02 班

【研究代表者】初田哲男

【研究分担者】大塚孝治、中村純、青木慎也、中務孝、藤井新一郎（2010年度まで）、肥山詠美子

【連携研究者】清水則孝、矢花一浩、佐々木勝一、石井理修、鈴木俊夫、鷹野正利、根村英克、藤井新一郎

【公募研究】梅谷篤史、佐々木 勝一、鷹野 正利、根村 英克、松尾 正之、橋本 幸士、阿部喬

### A03 班

【研究代表者】鈴木英之

【研究分担者】柴田大、梶野敏貴、住吉光介、梅田秀之

【連携研究者】大西明、山田章一、瓜生康史、千葉敏、岩本信之、親松和浩、鷹野正利、吉田敬

【公募研究】花輪知幸、野本憲一、祖谷元、丸山敏毅、長滝重博、安武伸俊、関口雄一郎

### A04 班

【研究代表者】松古 栄夫

【研究分担者】金児 隆志、吉江 友照

【連携研究者】石川 健一、櫻井 鉄也、清水 則孝、鈴木 英之、多田野 寛人、橋本 省二、矢花 一浩、高橋 大介、住吉 光介、青山 龍美、野秋 淳一、浮田 尚哉

【研究協力者】水田 晃、元木 伸治

【公募研究】櫻井 鉄也、石川正

## 2. 連携状況

研究組織で下線が付いているものは複数の計画研究班に属しているメンバーであり、そのメンバーを中心にして、以下のような計画研究班同士の連携が行われた。

A01-A02 連携：格子 QCD による  ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$  原子核の直接計算と、格子 QCD で求めた核力を用いた少数核子系計算の比較という、原子核の直接計算と核力ポテンシャルという相補的なアプローチの研究交流を行い、相互理解を深めた。また、格子 QCD における精密計算手法に関しても日常的な情報共有をおこなってきた。核力の格子シミュレーションでのデータ共有環境の整備に関しても連携している。

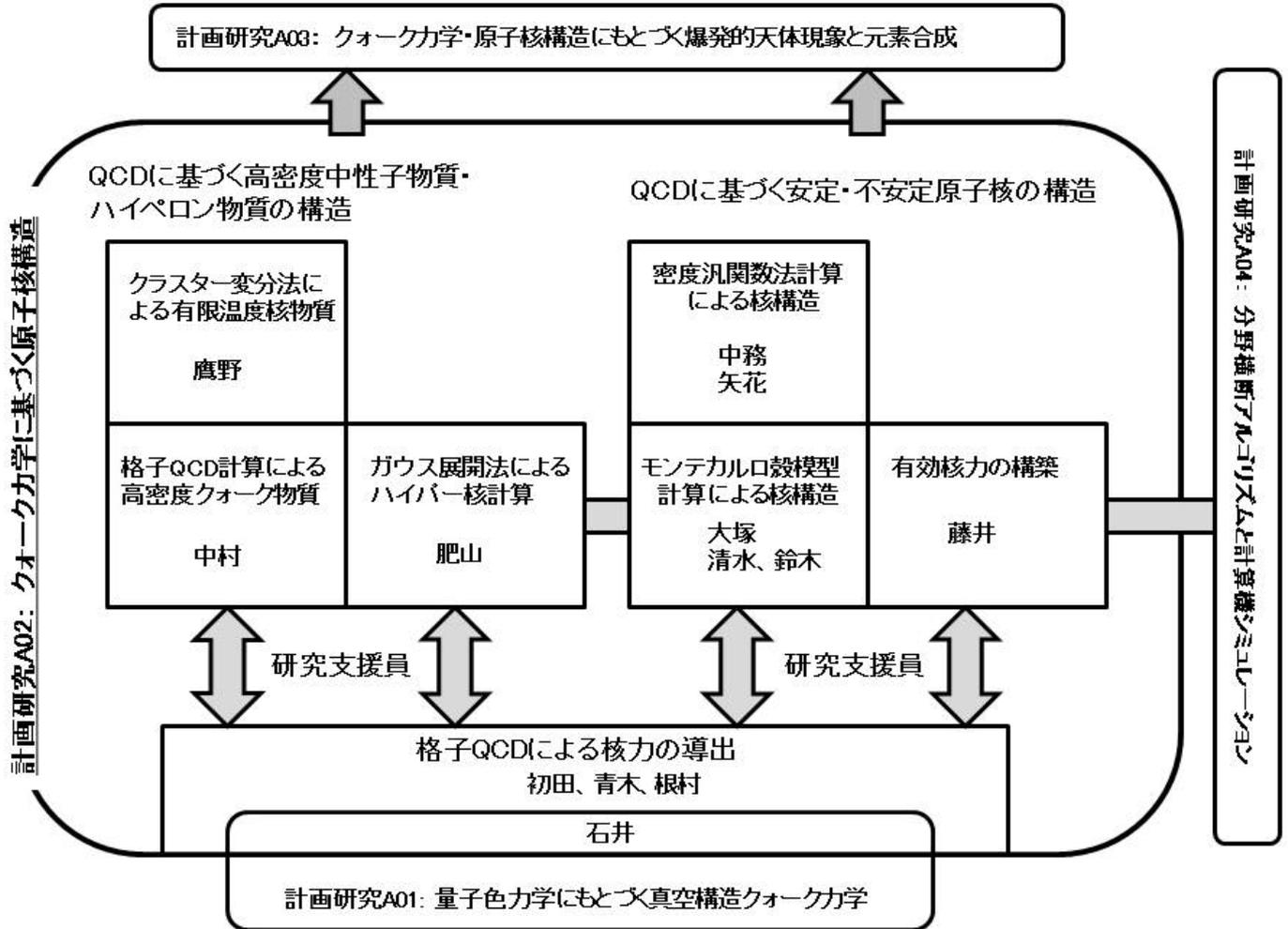
A02-A03 連携：超新星爆発時に要求されるハイペロンを含む状態方程式、および中性子星クラスト領域の中性子過剰物質の状態方程式に関して連携研究を行った。特に、超新星爆発計算で必要となる有限温度核物質状態方程式を共同で構築するため、A02 の鷹野と A03 の鈴木が計算手法に関する議論を行い、クラスター変分法による一様相状態方程式とそれを用いたトーマスフェルミ計算による非一様相の計算を行った。

A01-A04 連携：アルゴリズムの改良、計算機アーキテクチャの効率的利用、データ共有環境、共通コード開発の全ての面で緊密な連携を行っている。

A02-A04 連携：格子 QCD 計算、核物質変分計算、密度汎関数法計算などについて A02 班が A04 班に協力を仰ぎ、効率化・高速化を進めた。

**A03-A04 連携**：A03 班の超新星爆発シミュレーションに関しては、大規模並列化法、線型問題の解法などについて連携研究を進めた。特に、多次元ニュートリノ輻射輸送計算コードの基礎部分を開発してテスト計算を行い、現れる大規模行列解法について、計画研究 A03 の住吉と A04 の松古・橋本らが連携した議論を行った。実際の行列を取り出したテスト計算を行なった。

以下は、例えば A02 班から見た領域内の計画研究班の連携を模式図にしたものである。



### 3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

#### 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が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っていると、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。研究の蝟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の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の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=3fm)でのシミュレーションという利点を活かし、 $\rho$  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=6fm) 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いよい。

3つ目の目標に関連して行われた、 $\pi$  中間子の形状因子の決定、核子の  $\sigma$  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っ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、モンテカルロ殻モデルを展開し、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、分野横断の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 拠点が変わり、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。

#### 4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

本領域では、研究を推進する上での大きな問題点は特になかった。とはいえ、いくつか気になる点があるので、それを述べて、可能な対応策を検討した。

(1) 新学術領域の予算で研究員を雇用しているが、研究員の存在は研究の推進に多大な貢献をしている。特に、分野連携、融合に関して積極的に関与しており、本新学術領域の発展には若手研究員の存在は欠かせない。一方、このようにしてキャリアを積んできた研究員が、その次の安定した研究職を得ることは非常に難しい。分野連携、融合で経験を積んできた若手研究者を財産と考え、その能力が活用できる方策が必要である。これは、本領域の活動範囲を超える問題であるが、次世代スーパーコンピュータの戦略機関や計算科学研究機構など外部の組織、機関と連携をし、新しいキャリアパスの開拓に努めたいと考えていた。研究員のうち、何人かは大学や研究所で常勤の職を得ている。また、幸い、HPCI 戦略分野5「物質と宇宙の起源と構造」が2011年度4月から本格的に活動を開始したので、多くの若手研究員がそこで重要なポストを得て活躍している。ただし、この戦略分野5は2015年度で活動が終了するので、そこで雇われている若手研究員のその後の受け入れ先をどうするかは今後の課題として残っている。

(2) 本新学術領域のこれまでの活動は研究が中心であり、十分な研究成果が得られつつある。また、分野間の連携体制も築かれつつある。これからは、研究成果を出すだけでなく、その成果の社会への発信や広報活動も重要になると考えている。これまでの広報活動は、ホームページなどに限定されていたが、多様な方法で社会への発信を行うように努力した。幸い、計算基礎科学連携拠点が専用の広報担当者を雇用したので、拠点と協力して一般への広報活動の充実を図ることが可能になった。また、アウトリーチ活動の一環として、2012年12月15日（土）は、奈良県新公会堂で市民講演会「クォークから宇宙まで」を企画し、ノーベル賞受賞者である益川敏英・名古屋大学特別教授に「現代社会と科学」という題で社会と科学の関係についての講演をして頂いた。また、小林富雄・東京大学教授に「“ヒッグス粒子”の発見と今後の展望」という題で素粒子物理学実験の最先端の話題についてお話して頂いた。この講演会には、高校生、大学生からお年寄りまでの約180名の方が参加した。

## 5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

### A01 班の若手の成長の状況など

ポスドクとして採用した若手研究者は 青山、山崎、長井、新谷、Sang-Woo Kim、滑川、J.W.Lee である。若手のメンバーには、プロジェクト全体に関わりながらも、同時に計画研究のテーマの中で独自性があり、かつ長期的な視野で大きく成長する可能性のあるテーマを各自が見つけ、主体性をもって研究を進められるように配慮した。その結果、青山氏は、量子電磁気学における異常磁気能率の量子補正、山崎氏はハドロンの相互作用、長井氏は QCD のコンフォーマル相、新谷氏は格子ゲージ理論のグラフエンへの応用、Kim 氏は行列模型を用いた AdS/CFT 対応の数値的研究、滑川氏は重いクォークの物理、Lee 氏はフェルミオン多体系における新しいモンテカルロの解析方法とそれぞれのテーマで世界レベルでのエキスパートに成長した。この中で、山崎氏が第 4 回日本物理学会若手奨励賞（素粒子論領域）を「格子 QCD 数値計算による K 中間子崩壊過程の解析」という研究で受賞した。

ポスドク研究員の終了後、それぞれの研究が高く評価され、青山氏は名古屋大学 KMI 特任准教授、山崎氏、長井氏は同特任助教に転任し、新谷氏、Sang-Woo Kim 氏は海外の研究員に、滑川氏は国内の研究員に転出している。

### A02 班の若手の成長の状況など

連携研究者：清水則孝氏は、東京大学大学院理学系研究科・助教から東京大学原子核科学研究センター・特任准教授へ、佐々木勝一は、東京大学大学院理学系研究科・助教から東北大学大学院理学研究科・准教授へ、根村英克氏は、東北大学大学院理学研究科・助教から筑波大学・計算科学研究センター・特任准教授へ、とその活動が評価され着実にステップアップしている。

研究支援員：池田陽一氏は、A02 班 PD から理化学研究所仁科加速器研究センター・特別研究員へ、阿部喬氏は、A02 班 PD から東京大学大学院理学系研究科・助教へ、佐藤弘一氏は、A02 班 PD から理化学研究所・基礎科学特別研究員へ、とやはりその活動が評価され、研究職を得ている。また、池田陽一は 2010 年度日本物理学会若手奨励賞受賞、阿部喬は 2011 年度日本物理学会若手奨励賞受賞、している。

公募研究代表者：梅谷篤史は、理化学研究所・協力研究員から日本工業大学共通教育系・准教授へと常勤の職を得ている。

### A03 班の若手の成長の状況など

A03 班では、6 人の若手研究者をポスドク研究員として雇用して本計画研究に従事してもらった。そのうち、数値相対論の分野で研究を進めてもらった Luca Baiotti 氏は、その後大阪大学レーザー研究所に講師に、木内健太氏は HPCI 特任研究員（京都大学基礎物理学研究所特任助教）にステップアップし、大川博督氏はポルトガル CENTRA のポスドク研究員として海外での研究生活を開始した。国立天文台で超新星爆発に関する研究を行った中村航氏は、その研究成果が評価されて早稲田大学大学院先進理工学研究科の次席研究員として採用され、引き続き研究を続けている。東京大学で主に恒星進化の研究に従事していた吉田敬氏は、超新星の親星となる星の進化計算や元素合成の研究が評価されて、現在は京都大学基礎物理学研究所の特任助教として研究を継続している。東京理科大学で高密度物質の状態方程式のデータベース作成を担当した石塚知香子氏は、新たな新学術領域科研費「実験と観測によって解き明かす中性子星の核物質」によるポスドク研究員として東京理科大学で状態方程式に関する研究を行っている。

### A04 班の若手の成長の状況など

A04 班には計 4 名の研究支援員が参加したが、彼らはアルゴリズムや高速化手法の開発などと並行してそれらを自らの研究に応用し、専門分野を超えた知見を得るとともに分野間の連携を促進するのに貢献した。野秋淳一氏は格子 QCD 共通コード開発に従事し、高エネルギー加速器研究機構特任助教として転任、現在も計算素粒子物理学の研究を行っている。浮田直哉氏はデータ共有のための環境整備と共通コード開発に従事し、その後筑波大学計算科学センター研究員として計算素粒子物理学の研究を行っている。水田晃氏は、相対論的数値流体方程式の解法の開発とそれを利用したガンマ線バースト現象の研究を行い、理化学研究所戎崎計算宇宙物理研究室研究員に転任した。元木伸治氏は、計算機アーキテクチャを利用した高速化と共通コード開発に参加し、現在は会津大学コンピュータ理工学部特別研究支援者として、計算機科学と計算物理学の連携的研究を行っている。

## 6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

### 総括班

総括班の経費は、主に、計 3 回領域全体のシンポジウムの開催費や参加旅費、計 2 回の領域全体の国際シンポジウムの開催費や参加旅費・海外招待講演者の旅費、計 2 回の体験型サマースクール「クォークから超新星爆発まで」の開催費や参加学生の旅費、計 8 回の素核宇宙融合レクチャーシリーズの開催費や参加旅費、などに使われた。また、核計画研究班が主催する研究会開催費や研究会参加旅費の補助、研究情報収集のための海外旅費の補助、領域の研究成果の発表や本領域の意義の発信のための海外旅費の補助、などにも使われた。

領域代表は、特に、本新学術領域の活動を海外の研究者に知らせるために、積極的に海外での研究会に参加し講演を行った。

### A01 班

研究経費を用いて、中規模の数値計算に必要な GPU サーバ 4 台を大阪大学に設置した。このサーバを用いて、プログラム開発や大規模計算に向けてのテストを行った。また、このサイズの計算機に適切なコンフォーマル相の探求に関する計算を行った。また、年 3 名程度雇用した若手研究支援員が活躍して、研究の進展に大いに寄与し、分野内の活性化に大きく役立った。それ以外にも、計画研究班主催の研究会の開催費や参加旅費、T2K などの計算機使用料などにも使われた。特に T2K の年間契約は研究の進展に大きく役立った。

### A02 班

研究支援員の雇用が主な研究経費の使用先であり、2009 年度-2010 年度には研究支援員 4 名採用（東大、筑波大、理研、広島大に配置）、2011 年度-2012 年度には研究支援員 4 名採用（東大、筑波大、理研、広島大に配置）した。これらの研究支援員は、当初の予定通り A02 班内の連携研究に大きく貢献した。それ以外にも、計画研究班主催の研究会の開催費や参加旅費、T2K などの計算機使用料などにも使われた。A01 班と同様に、T2K の年間契約は研究の進展に大きく役立った。

### A03 班

研究経費を用いて、計算コード開発のための計算サーバを購入し、京都大学基礎物理学研究所、東京大学、沼津高等工業専門学校に設置した。また、6 名の研究支援者を雇用し、分野内の共同研究の活性化に役立てた。それ以外にも、研究会の参加旅費、外国からの研究者の招聘旅費、T2K などの計算機使用料などにも使用された。

### A04 班

研究経費は、計 4 名の研究支援者の雇用、計算サーバやファイルサーバの購入、プログラミング講習会の講師費用などに使われた。

研究支援員は研究の進展に活躍している。また、JLDG の管理運用においても貢献している。さらに、格子 QCD 共通コード作成のプロジェクトの中核メンバーとして活躍している。

計算サーバは、GPGPU を使った効率的プログラムの開発において重要な資源となっている。またすでに A01 班の格子シミュレーションや A02 班の核物質状態方程式の計算において計算資源として貢献している。

JLDG はこれまでのデータ公開に加えて、研究グループ内でのデータ転送・共有についても 2009 年度に本格的運用を開始し、A01 班、A02 班で行われている格子シミュレーション研究の進展に貢献している。

## 7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」

評価意見

評価者 岡 真（東京工業大学・大学院理工学研究科・教授）

### 1. 領域の目的の達成度

本領域が目的としてきたのは、計算科学という手法を接点として、素粒子物理、原子核物理、宇宙物理分野の新しい融合研究を形成し、分野の有機的連携を進めることであり、本領域の活動によりその目的は十分に達成されたと考える。実際に、これらの各分野において世界最先端の研究で高い評価を受けている領域代表、各計画研究代表者、研究分担者等のグループが中心となって、複数回の国際シンポジウム、国内研究会における活発な議論と情報交換および新しい連携研究の形成、レクチャーシリーズやサマースクールによる若手研究者の育成と分野の強化へ向けた取り組みが実施された。その結果、「異なった専門分野の研究者が計算科学という新しい手法を基盤に、クォークから元素合成までの重層的物質構造を解明する」ことができた。本領域が目指した、計算科学を接点とする異分野の融合組織が目に見える形で成立したことは、今後のこれらの分野の研究の進展に重要であるばかりでなく、今後他の分野における新しい連携手法にも役に立つ重要な成果である。また、本領域の成功により、次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム事業をはじめとする、今後の大型計算科学における分野間の広い連携の基盤体制が整備されたことも高く評価できる。

一方でこの研究で目指した、いろいろな階層の重層的な物質構造の起源を統一的に研究・理解するという最終目標は、これらの分野全体の課題となる困難な問題で、この領域研究によって端緒についたばかりである。今後、この新しい連携による融合研究分野をさらに進めることによって、研究の大きな進展を期待している。

### 2. 領域推進計画の達成度

本領域では、計画研究分野として設定された（1）量子色力学に基づく真空構造とクォーク力学、（2）クォーク力学に基づく原子核構造、（3）クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成、の各物理分野の最新の研究成果を互いに共有し、（4）分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション、による計算科学としての協同関係を中心に、全研究分野の有機的連携を進めてきた。具体的に、本領域の実施を通じて、これらの分野間での研究状況の相互理解と共有、他分野の研究結果を生かす取り組みが進んできたことは評価できる。また、総括班によるシンポジウム・研究会、レクチャーシリーズ、サマースクール等も積極的に進められ、領域を構成する研究者の目的・連携への意識も強まり、若手研究者の分野間交流も大いに進んだ。

### 3. 各計画研究の達成度

#### A01: 「量子色力学に基づく真空構造とクォーク力学」

格子 QCD の精密化を図り、QCD の真空構造とハドロンダイナミクスの性質を明らかにすることを目的とし、順調に研究を進めた。格子上でのカイラル対称性の破れの検証、物理的クォーク質量でのハドロン質量の計算および QCD+QED 計算の成功、ヘリウム原子核などハドロン多体系のシミュレーションなどにおいて、画期的な成果を挙げた。A02 領域の主要研究者との連携も強く、本領域の研究のコアの部分としての役割を果たした。これらの成果は 16 編以上の論文として発表され、高い評価を受けている。

#### A02: 「クォーク力学に基づく原子核構造」

格子 QCD によるバリオン間ポテンシャルの計算法を確立し、核力の中心力に始まり、スピン依存軌道力、3 体力、SU(3)バリオン間力、H ダイバリオン束縛状態などの結果が得られるなど、バリオン間力の多彩な性質を第一原理から説明することに成功した。また、量子少数多体系計算分野における 5 体系の計算の成功、モンテカルロ殻模型における解析方法の精密化、時間依存密度汎関数法のコード開発などの、原子核物理分野の主要な研究課題において重要な成果が得られた。研究成果は 62 件におよぶ論文として発表され、研究代表者および分担者は、HALQCD の核力計算成果で 2012 年度仁科記念賞、少数系厳密計算における成果で 2013 年度猿橋賞などの著名な賞の受賞対象となった。

#### A03: 「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」

核物理と天体物理の連携により、現実的な状態方程式や核構造モデルと、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間での連携研究を目的に順調に研究を進めた。特に、三次元ニュートリノ輸送計算コードの開発、新たな高密度状態方程式の作成などの成果が顕著である。これらの成果は、13 件以上の論文として発表されている。今後、A02 における第一原理計算結果等も取り入れてこの領域としての特色ある研究分野が進展することが期待される。

#### A04: 「分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション」

本計画研究は上記のそれぞれの物理目標を掲げる研究を計算アルゴリズムの高速化と最適化、データ共有化、共通コードの開発等において横断的にサポートすることを目指し研究を進めた。とりわけ、関連分野の研究に資する高速アルゴリズムの開発と応用、データグリッドシステムの環境整備による利便性の向上とデータの公開、格子 QCD シミュレーションのための共通コードの開発、公開を行った実績が高く評価できる。これらの数値計算上の技術開発は、本領域が目指してきた「計算科学を接点とする異分野の融合」を進める上で、もっとも重要な基盤整備の役割を果たすことになる。本領域での素核宇宙分野との研究協力関係を、今後もさらに継続・強化していくことが望まれる。

## 8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎または計画研究毎に整理する]

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

### A01 班

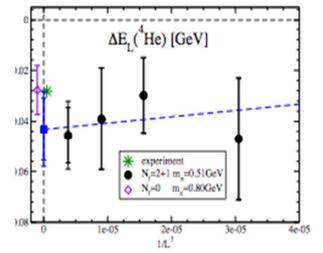
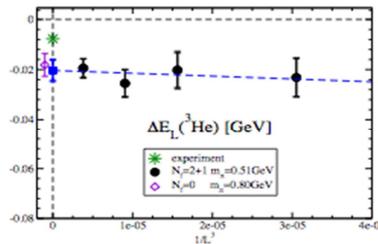
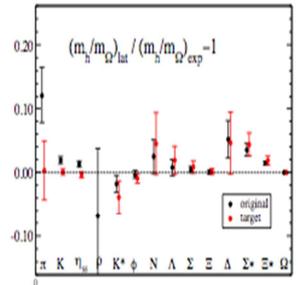
(1) PACS-CS collaboration による現実的な QCD のシミュレーションにより、ハドロン質量スペクトルの実験値を高い精度で再現した (図)。また、reweighting 法を用いて 1+1+1 フレーバーの QCD+QED の効果を取り入れた計算により、アップ・ダウン・ストレンジクォーク質量の決定を行った。

(2) PACS-CS collaboration による QCD シミュレーションにより  $\rho$  中間子の崩壊幅およびパイオン結合定数を QCD の第一原理から決定した。

(3) PACS-CS collaboration による QCD シミュレーションにより、ヘリウム原子核の結合エネルギーの QCD の第一原理からの直接計算を実現した。(図 2 枚)

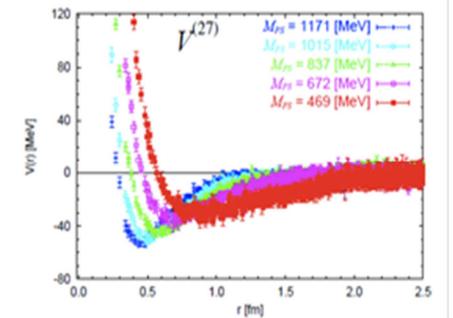
(4) JLQCD collaboration による厳密なカイラル対称性を持つ QCD シミュレーションにより、ディラック演算子の固有値分布を求め、カイラル摂動論からの予言が完全に再現されることを実証した。またそれを通じて低エネルギー有効理論に現れるカイラル凝縮パラメータの決定を行った。その後、この手法を有限温度に拡張し、QCD の有限温度の相転移に関する U(1)対称性の回復に関する新しい知見を得た。

(5) JLQCD collaboration による厳密なカイラル対称性を持つ QCD シミュレーションにより、暗黒物質探索に重要なパラメータである核子のストレンジクォーク成分を決定し、従来の値よりも格段に小さい値を与えることを初めて明らかにした。この結果は今後の暗黒物質探索実験や模型構築に大きなインパクトを与えている。



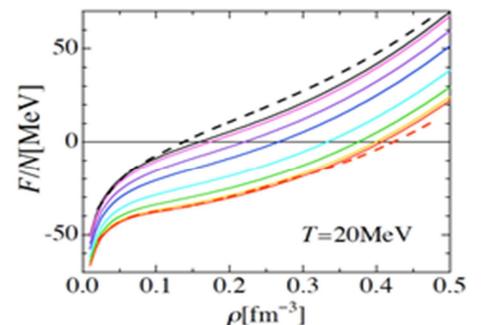
### A02 班

(1) 格子 QCD の基づくバリオン間相互作用: A02 班の青木・石井・初田が提唱し、HAL QCD Collaboration が進めてきた、格子上でバリオンの相対波動関数を計算しバリオン間の相互作用を引き出す手法 (HAL QCD 法) を確立した。特に、(i)波動関数の部分波への分解を行うことで、さまざまなチャンネルでのバリオン間ポテンシャルを導出できることを示したこと、(ii)波動関数の虚時間依存性を活用することで、有限の虚時間のデータから信頼のおけるポテンシャルを導出できることを示したこと、(iii)多バリオンの相関関数を極めて効率よく計算するアルゴリズムを開発し、3体相互作用以上の核力を研究できる端緒を開いたことが今後につながる主要成果である。右図は、SU(3)フレーバー対称性がある場合の、 $1S_0$ チャンネルでのバリオン間力のクォーク質量依存性を表している。これらの成果は、“Lattice quantum chromodynamical approach to nuclear physics”, HAL QCD Collaboration (Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A105)に総合報告としてまとめた。



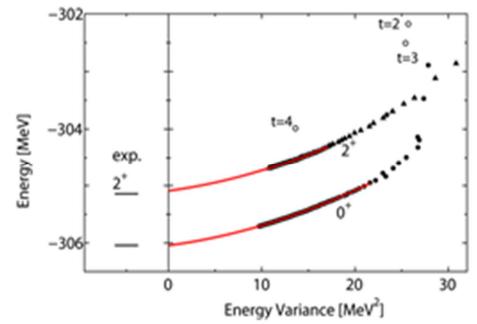
(2) 少数粒子系の量子力学的厳密計算: A02 班の肥山らが中心となり開発してきたガウス展開法を、任意の相互作用 (中心力、スピン軌道力、テンソル力、運動量依存力、など) を持ち、粒子転換 (例えば、 $\Lambda N$ - $\Sigma N$  や  $\Lambda$ - $\Lambda$ - $\Xi N$ - $\Sigma \Sigma$  など) がある場合について、束縛状態、共鳴状態、連続状態を含む 5 体系にまで拡張することに成功した。これをダブルハイパー核の問題に適用し、Hida-event と呼ばれる事象が、 ${}_{\Lambda\Lambda}^{11}\text{Be}$  の基底状態に対応することを明らかにした。ガウス展開法の基礎とその応用に関する総合報告をまとめた: “Gaussian expansion method for few-body systems and its applications to atomic and nuclear physics”, E. Hiyama, (Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A204)

(3) 高密度物質の状態方程式: 超新星爆発への応用に必要な数値テーブルの構築にむけて、鷹野らを中心として、A02 班と A03 班の協力のもと、現実的核力とクラスター変分法を用いた有限温度での非対称核物質の状態方程式の研究を進展させた。(例として、非対称核物質の有限温度での自由エネルギーをバリオン密度の関数として与えたものを右図に示している。) 有限密度 QCD に対する格子ゲージ理論からのアプローチについての総合報告をまとめた: “Towards extremely dense matter on the



lattice”, XQCD-J Collaboration, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A103.

(4)モンテカルロ殻模型による原子核構造：大次元の原子核ハミルトニアン  
の固有値や波動関数を数値的に求める手法として A02 班の大塚らが  
進めてきたモンテカルロ殻模型をさらに発展させた。特に、(i) 計算アル  
ゴリズムの改良により従来の 8 倍の計算速度を達成し、(ii) エネルギー  
分散を用いた外挿法による物理量の精密計算を可能にした。右図には、  
(ii)の外挿法を用いたエネルギー固有値の変化と実験データとの比較の  
一例が示されている。さらに、モンテカルロ殻模型の基礎と応用に関す  
る総合報告をまとめた：“New-generation Monte Carlo shell model for  
the K computer era”, N. Shimizu et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012)  
01A205

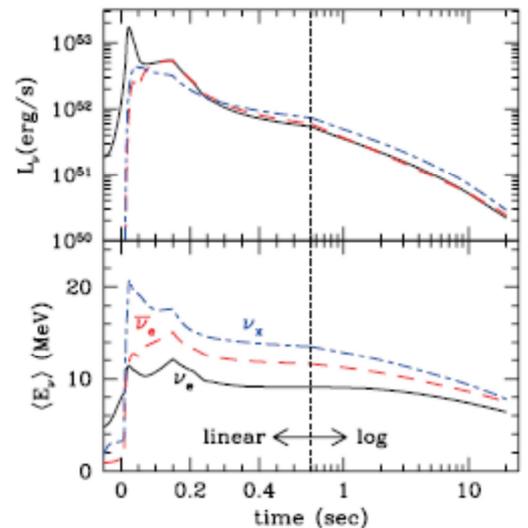


(5)時間依存密度汎関数法と原子核動力学：A02 班の中務、矢花らを中心に、対相関まで含んだ時間依存密度汎  
関数法の新たな数値計算コードを開発した。これにより、数値計算コストを数ケタ下げることが可能になり、複  
数の原子核形状の量子揺らぎによる共存現象はおとより、核分裂の微視的シミュレーションまでもが視野に入っ  
てきた。また、エキゾチック原子核の典型的な励起モードであるピグミー共鳴についての、時間依存密度汎関数  
法計算により、ピグミー共鳴が中性子スキンの厚みや対称エネルギーの密度依存性に関して有用な情報源となり  
うることを示した。さらに、時間依存密度汎関数法の基礎と応用に関する総合報告をまとめた：

”Density functional approaches to collective phenomena in nuclei: Time-dependent density-functional  
theory for perturbative and non-perturbative nuclear dynamics”, T. Nakatsukasa, Prog. Theor. Exp. Phys.  
(2012) 01A207.

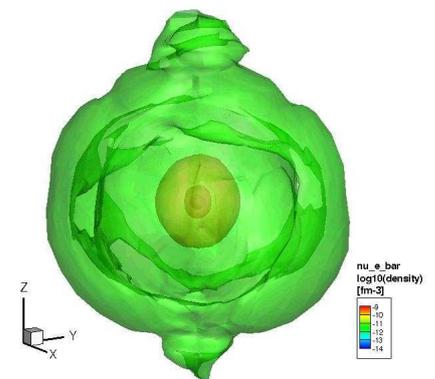
### A03 班

(1) 梅田らによる質量・金属量の違う親星を初期モデルとして、重力  
崩壊からバウンス、衝撃波伝播、原始中性子星／ブラックホール誕生  
を一貫して追う数値シミュレーションを行い、ニュートリノ放出スペ  
クトルの時間発展を系統的に明らかにした。図は、13 太陽質量の親星  
の爆発時に放出されるニュートリノの計算例である。ブラックホール  
形成が起こる場合については、状態方程式の影響が顕著に現れること  
を見だし、クォーク・ハドロン相転移やハイペロン出現をニュート  
リノ放出の継続時間やスペクトルにより探ることを提案した。また、  
将来のニュートリノ観測により高温高密度状態におけるエキゾチック  
物質の出現を検証できるか、詳細な議論を行った。



(2) クラスタ変分法に基づく高密度物質の新しい状態方程式の作成  
に取り組み、代表的な温度における相図を作成して、既存の Shen 状態  
方程式との比較を行った。また、古澤らとの共同研究で多核種の存在  
を考慮した状態方程式の作成、および石塚を中心に高密度物質の状態  
方程式データベースの開発を行った。

(3) 数値相対論に関してはまず有限温度の状態方程式およびニュート  
リノ冷却の効果を考慮する輻射輸送コードを取り入れた。その後テスト  
計算を行い、コードの正当性を確かめた後に、回転する大質量星  
がブラックホールと降着円盤からなる系へ重力崩壊する過程を明ら  
かにした。特に、誕生する降着円盤が、これまで予想されてこなか  
った短い時間変動を示すこと、さらに質量降着による衝撃波加熱に  
より高光度のニュートリノ放射を行うことを解明した。さらに連星  
中性子星の合体にコードを適用し、連星中性子星の合体後には、高  
温度の大質量中性子星が誕生しそうなこと、それは最大  $5 \times 10^{53}$  ergs/s  
にも達する高光度でニュートリノ放射をすること、さらに  
周波数が 2~3 kHz 程度の特徴的な重力波を放射することを解明した。  
この成果は Phys. Rev. Lett. に発表され、結果の一部が表紙に掲載  
された。ブラックホール・中性子星連星に対するシミュレーション  
も実行した。



(4) 住吉を中心に 3 次元ニュートリノ輻射輸送問題においてボルツ  
マン方程式を直接解く計算コードを開発して、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。この時、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。図は、3 次元ニュートリノ輻射輸送計算による  
超新星コアにおけるニュートリノ密度分布である。

(5) 星の進化計算に関しては、回転星の計算コード開発を完了することができ、今後そのコードを使っていろいろな計算を行える段階に達する事ができた。図はこのコードを用いて星の進化を計算し、回転星と非回転星の HR 図上での違いを示したものである。また 電子捕獲型超新星の爆発直前のモデルを構築することに成功した。このような計算は過去 20 年以上行われておらず、最新の物理を取り入れた計算の結果、過去のモデルと比べ爆発直前の電子捕獲がより進み、中心での爆燃波の発達が早いことがわかった。この結果は最終的な超新星爆発に影響を及ぼす可能性がある。このように計算した超新星の親星モデルを用いて元素合成の計算を行い、重力崩壊型超新星によって非常に明るい超新星を説明できるかどうかの議論を行い、また重力崩壊型超新星により弱 r 過程元素の合成が可能であることを示した。

(6) 梶野を中心に超新星爆発とガンマ線バーストで、ユニバーサリティーを満たす重元素 (r 過程元素) が生成される条件を明らかにした。そしてこれらの重元素が、宇宙・銀河の化学進化に与える影響および残存超新星ニュートリノによる重力崩壊型超新星の宇宙論的進化の考察を進めた。またニュートリノと超新星物質との相互作用、特に真空振動・物質振動によるフレーバー振動が元素合成過程に及ぼす影響を研究し、ニュートリノ平均温度および未知のニュートリノ振動パラメータの決定方法を提案した。さらにニュートリノ自己相互作用によるフレーバー振動の量子論的な厳密解の導出を試みるとともに、超新星ニュートリノが引き起こす諸現象の理解を進めた。その他、原始中性子星内部でのニュートリノ吸収および散乱断面積に現れるパリティの破れの効果によって非等方的なニュートリノ輸送が起き、パルサーキックに大きく影響することを定量的に明らかにし、パルサーキック速度を説明できる可能性を示した。理化学研究所 RIBF で世界で初めて測定された中性子過剰核のベータ崩壊寿命が超新星 r プロセスに及ぼす影響も明らかにした。

#### A04 班

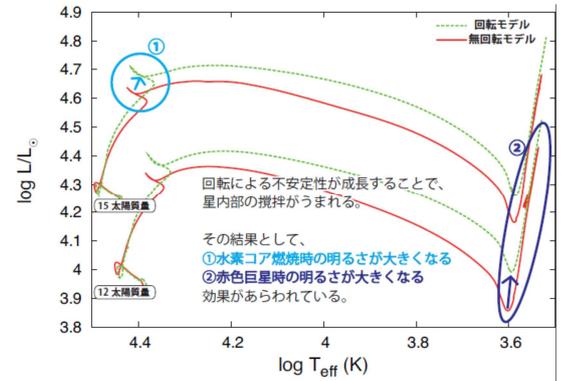
(1). 分野を横断した数値計算アルゴリズムの応用と開発： 分野を横断した研究者間で共通の問題を扱えるような基盤を構築した。格子 QCD や超新星爆発シミュレーションにおいて、応用数学の研究者と共同で、線形方程式の性質の理解を進め、超新星爆発の場合は超並列計算の場合でも効率のよいアルゴリズムにより高速化を実現した。超新星爆発シミュレーションコードの大規模並列化、Block Krylov 法の格子ゲージ理論への応用、相対論的数値流体方程式のスキームの研究等を行った。これらの知見を共有し、更なる連携のための基盤とするため、アルゴリズムや高速化手法をまとめるウェブサイト「高性能計算の扉」(計算基礎科学連携拠点で運用)を構築した。

(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： 2008 年度に導入した GPGPU (NVIDIA Tesla S1070) 並列クラスターサーバを含め、AMD 社の GPU や Cell B.E. などのアクセラレータを備えた計算サーバを導入し、これらの性能を引き出すためのプログラミング技法を開発した。応用例として、核物質の状態方程式を求める際の積分計算に対し GPGPU を用いた高速化を行い、数十倍の高速化を実現した。またこれらの技術は、格子 QCD 共通コードの中に取り入れられている。研究会や講習会を通してプログラム開発技術の共有を進めた。導入したサーバはコード開発だけでなく、本新学術領域の実際の計算にも利用され重要な計算資源となっている。

(3). データ共有のための環境整備： 毎年度 JLDG のためのファイルサーバを導入し、データ共有環境の増強を行いながら、より便利なシステムを目指した開発を継続的に行った。現在までに、本研究開時点の 6 拠点に加え、東京大学情報基盤センター(柏)、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構が JLDG 拠点として加わり、これまでに 360TB、2400 万ファイルのデータを蓄積している。基盤となる Gfarm グリッドファイルシステムのアップデートを取り入れることにより、研究グループ内のデータ共有・高速転送サービスを開始するなど、利便性が大きく向上した。システムの利用法についての講習会を開催した。PACS-CS や JLQCD コラボレーションによって生成されたデータの公開を進めた。HPCI 共有ストレージとの連携システム構築に向けての技術検討を行った。また、宇宙物理のシミュレーションなど、大規模データが生成され高速なデータ転送が必要な分野への拡張を検討した。

(4). 格子 QCD 共通コードの開発

2009 年に行った需要調査とその後の開発方針の策定に基づき、オブジェクト指向に基づいたデザインと C++ での実装を決定した。月 2 回程度のミーティングと関連情報に関するセミナーなどを行いながら開発を進め、2012 年 7 月に、最初の公開版をリリースした。その後もデザインの改良、機能の拡張、高速化、GPGPU やマルチスレッドへの対応、ドキュメントの整備、計算結果の検証などを継続的に行った。開発は HPCI 戦略プログラム分野 5 へ引き継がれ、今後も継続する。



## 9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 1. 主な論文

#### A01 班

- 1) T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, "Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD", Physical Review D81:111504, 2010.
- 2) H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, "Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD", Physical Review Letters 104:122002, 2010.
- 3) S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, "Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD", Physical Review D81:074503, 2010.
- 4) J. Noaki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, "Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions", Physical Review D 81, 034502 (2010).
- 5) S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, "Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry", Physical Review D 80, 034508 (2009).
- 6) K. Takeda, T. Onogi et al. "Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry", Physical Review D83, 114506 (2011).
- 7) M. Hayakawa, N. Yamada et al. "Running coupling constant of ten-flavor QCD with the Schrödinger functional method", Physical Review D83 074509 (2011).
- 8) N. Ishizuka, Y. Kuramashi, et al "  $\rho$  meson decay in 2+1 flavor lattice QCD " , Physical Review D84 094595 (2011).
- 9) T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa "Two nucleon bound states in quenched lattice QCD", Physical Review D84 054506 (2011).
- 10) Y. Namekawa, Y. Kuramashi, et al "Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD", Physical Review D84 074505 (2011).
- 11) S. Aoki, T. - W. Chiu, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. - H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, K. Takeda, "Simulation of quantumchromodynamics on the lattice with exactly chiral lattice fermions", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 01A106( 2012).
- 12) H. Ohki, K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi "Nucleon strange quark content from  $N_f=2+1$  lattice QCD with exact chiral symmetry, Physical Review D87, 034509 (2013).
- 13) S. Aoki, N. Ishii, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, O. H. Nguyen, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, "Lattice quantumchromodynamics at the physical point and beyond ", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 01A102, ( 2012).
- 14) T. Yamazaki, K. -I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa "Helium nuclei, deuteron and dineutron in 2+1 flavor lattice QCD ", Physical Review D86, 074514 (2012).

- 15) S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie ,” 1+1+1 flavor QCD + QED simulation at the physical point”  
Physical Review D86 034507 (2012).
- 16) S. Takeda, Y. Kuramashi, A. Ukawa , On the phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential “, Physical Review D85, 096008 (2012).

#### A02 班

- 1) HAL QCD Collaboration (S. Aoki , T. Hatsuda et al.), ” Lattice QCD approach to Nuclear Physics” , PTEP 2012 (2012) 01A105.
- 2) HAL QCD Collaboration, (S. Aoki , T. Hatsuda et al.), ” Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD, Prog.Theor.Phys. 127 (2012) 723-738.
- 3) Yutaka Utsuno, Takaharu Otsuka, B. Alex Brown, Michio Honma, Takahiro Mizusaki, Noritaka Shimizu., “Shape transitions in exotic Si and S isotopes and tensor-force-driven Jahn-Teller effect” , Phys. Rev. C86 (2012) 051301.
- 4) Noritaka Shimizu, Takashi Abe, Yusuke Tsunoda, Yutaka Utsuno, Tooru Yoshida, Takahiro Mizusaki, Michio Honma, Takaharu Otsuka. ” New Generation of the Monte Carlo Shell Model for the K Computer Era” , PTEP 2012 (2012) 01A205.
- 5) T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, J.P. Vary, “Benchmarks of the full configuration interaction, Monte Carlo shell model, and no-core full configuration methods, Phys.Rev. C86 (2012) 054301.
- 6) Lang Liu, Takaharu Otsuka, Noritaka Shimizu, Yutaka Utsuno, Robert Roth, “No-Core MCSM calculation for  $^{10}\text{Be}$  and  $^{12}\text{Be}$  low-lying spectra” , Phys. Rev. C86 (2012) 014302.
- 7) Takashi Nakatsukasa, “Density functional approaches to collective phenomena in nuclei: Time-dependent density-functional theory for perturbative and non-perturbative nuclear dynamics” , PTEP 2012 (2012) 01A207.
- 8) XQCD-J Collaboration (A. Nakamura et al.), “Towards extremely dense matter on the lattice” , PTEP 2012 (2012) 01A103.
- 9) Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura, “EoS of finite density QCD with Wilson fermions by Multi-Parameter Reweighting and Taylor expansion” , JHEP 1204 (2012) 092.
- 10) Emiko Hiyama, Gaussian expansion method for few-body systems and its applications to atomic and nuclear physics, PTEP 2012 (2012) 01A204.
- 11) HAL QCD Collaboration (S. Aoki , T. Hatsuda et al.), “Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD” , Phys.Rev.Lett. 106 (2011) 162002.
- 12) Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen, “Renormalization persistency of tensor force in nuclei” , Phys.Rev. C84 (2011) 044322.
- 13) Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura, “Imaginary Chemical Potential Approach for the Pseudo-Critical Line in the QCD Phase Diagram with Clover-Improved Wilson Fermions” , Phys.Rev. D83 (2011) 114507.
- 14) Tsunenori Inakura, Takashi Nakatsukasa, Kazuhiro Yabana, “Emergence of pygmy dipole resonances: Magic numbers and neutron skins” , Phys.Rev. C84 (2011) 021302.
- 15) Paolo Avogadro, Takashi Nakatsukasa., “Finite amplitude method for the quasi-particle-random-phase approximation” , Phys.Rev. C84 (2011) 014314.
- 16) Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Noriyoshi Ishii, “Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations” , Prog. Theor. Phys. 123 (2010) 89-128.
- 17) Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda, Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen, “Novel features of nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei” , Phys.Rev.Lett. 104 (2010) 012501.
- 18) E. Hiyama, M. Kamimura, Y. Yamamoto, T. Motoba, “Five-body cluster structure of double- $^{\Lambda}$  hypernucleus  $^{\Lambda}_{11}\text{-}^{\Lambda}\text{Be}$ ” , Phys.Rev.Lett. 104 (2010) 212502.
- 19) Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura, “Wilson Fermion Determinant in Lattice QCD” , Phys. Rev. D82 (2010) 094027.
- 20) S. Fujii, R. Okamoto, K. Suzuki, “Ground-state and single-particle energies of nuclei around 0-16,

Ca-40, and Ni-56 from realistic nucleon-nucleon forces”, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 182501.

#### A03 班

- 1) K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, T. Totani, H. Umeda and S. Yamada, “Supernova neutrino light curves and spectra for various progenitor stars: From core collapse to proto-neutron star cooling”, Astrophysical Journal Supplement Series 205 (2013) 2.
- 2) W. Aoki, T. Suda, R. N. Boyd, T. Kajino and M. A. Famiano, “New Insights into the Astrophysical r-Process”, Astrophys. J. Lett. 766 (2013), L13.
- 3) K. Sumiyoshi and S. Yamada, “Neutrino Transfer in Three Dimension for Core-Collapse Supernovae. I. Static Configurations”, Astrophysical Journal Supplement Series 199 (2012) 17.
- 4) H. Umeda, T. Yoshida and K. Takahashi, “Massive Star Evolution and Nucleosynthesis -Lower End of Fe-Core Collapse Supernova Progenitors and Remnant Neutron Star Mass Distribution”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 1 (2012) A302.
- 5) S. Furusawa, S. Yamada, K. Sumiyoshi and H. Suzuki, “A New Baryonic Equation of State at Sub-nuclear Densities for Core-Collapse Simulations”, Astrophys. J. 738 (2011) 178.
- 6) Y. -I. Sekiguchi and M. Shibata, “Formation of black hole and accretion disk in collapsar”, Astrophys. J. 737 (2011) 6.
- 7) Y. I. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Effects of hyperons in binary neutron star mergers”, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 211101-1-5.
- 8) Y. I. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 051102-1-5.
- 9) T. Yoshida and H. Umeda, “A progenitor for the extremely luminous Type Ic supernova 2007bi”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters 412 (2011) L78-L82.
- 10) T. Kuroda and H. Umeda, “Three-dimensional Magnetohydrodynamical Simulations of Gravitational Collapse of a 15 M [sun] Star”, The Astrophysical Journal Supplement Series 191 (2010) 439-466.
- 11) K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, “Impact of quarks and pions on dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating stellar core collapse”, Astrophysical Journal 721 (2010) 1284-1294.
- 12) Dai. G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Toshitaka Kajino, and Grant J. Mathews, “New constraint on the Primordial Magnetic Field”, Phys. Rev. D81 (2010) 023008.
- 13) K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, “Emergence of hyperons in failed supernovae: trigger of the black hole formation”, Astrophysical Journal 690 (2009) L43-L46.

#### A04 班

- 1) \*A. Imakura, T. Sakurai, K. Sumiyoshi, H. Matsufuru, “A Parameter Optimization Technique for a Weighted Jacobi-Type Preconditioner”, JSIAM Letters 4 (2013) 41-44.
- 2) \*K. Nagata, S. Motoki, Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito, Towards extremely dense matter on the lattice, Prog. of Theor. Exper. Phys. (PTEP) 2012 (2012) 01A103. A02 班 8) と共通。
- 3) \*S. Furusawa, S. Yamada, K. Sumiyoshi and H. Suzuki, A new baryonic equation of state at sub-nuclear densities for core-collapse simulations, Astrophysical Journal 738 (2011) 138. A03 班 5) と共通。
- 4) K. Ioka, Y. Ohira, N. Kawanaka, and \*A. Mizuta, Gamma-Ray Burst without Baryonic and Magnetic Load ?, Prog. Theor. Phys. 126 (2011) 555-564. ,
- 5) PACS-CS collaboration (S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, \*Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié), “Non-perturbative renormalization of quark mass in Nf=2+1 QCD with the Schroedinger functional scheme”, JHEP 08(2010) 101, 1-27.
- 6) JLQCD collaboration (\*H. Fukaya S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada), “Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD,” Phys. Rev. Lett. 104, 122002 (2010). A01 班 2) と共通。
- 7) JLQCD and TWQCD collaborations (\*J. Noaki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada), “Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions,” Phys. Rev. D 81 034502 (2009). A01 班 4) と共通。
- 8) JLQCD and TWQCD collaborations (S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, \*T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada), “Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” Phys. Rev. D 80, 034508 (2009). A01 班 5) と共通。

## 2. 学会発表など

#### A01 班

- 1) 山田憲和 “Conformal window in many flavor QCD”, 国際シンポジウム “From Quarks to Supernovae”, 2010年11月

28 日, 熱川ハイツ(静岡県)

2) 大野木 哲也 “Lattice Problems for Particle Physics Phenomenology”, Lattice QCD confronts experiments - Japanese-German Seminar 2010, 2010 年 11 月 4 日、三島商工会議所会館(静岡県)

3) 蔵増嘉伸, “Progress in Lattice QCD”, 35<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics ICHEP 2010, 2010 年 7 月 27 日, Palais des Congrès de Paris, France

4) N. Yamada, “Exploring for Technicolor from QCD “ New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions, 2012 年 05 月 16 日 Brookhaven National Laboratory, USA

5) Y. Kuramashi, ” 1+1+1 Flavor QCD+QED Simulation at the Physical Point”, New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions, 2012 年 05 月 16 日, Brookhaven National Laboratory. USA

#### A02 班

1) T. Hatsuda, ” Strangeness Nuclear Physics from Lattice QCD”, HYP2012, 2012 年 10 月 1-5 日, Barcelona, Spain.

2) T. Hatsuda, “Lattice QCD in Nuclear Physics, Lectures at Berkley School of Collective Dynamics in High Energy Collisions, 2012 年 5 月 13-18 日、LBNL, Berkley, USA.

3) T. Hatsuda, “Nuclear force and nuclear physics from lattice quantum chromodynamics”, Conference on Nuclear Physics, 2011 年 8 月 8-12 日, Manchester, UK.

4) T. Hatsuda, “Recent results in particle and nuclear physics from lattice QCD”, 19<sup>th</sup> International Conference on Particle and Nuclei, 2011 年 7 月 24 日-29 日, Cambridge, USA.

5) T. Hatsuda, “Hadron Interaction from lattice QCD”, International School of Nuclear Physics: 33<sup>rd</sup> Course: From Quarks and Gluons to Hadrons and Nuclei, 2011 年 9 月 16-24 日, Erice, Italy.

6) T. Hatsuda, “Nuclear Physics from Lattice QCD”, Lattice 2010, 2010 年 6 月 19 日, Sardinia, Italy.

7) T. Hatsuda, “Nuclear Forces from Lattice QCD”, Chiral Dynamics 2009, 2009 年 7 月 7 日, Univ. Bern, Bern, Switzerland.

#### A03 班

1) K. Sumiyoshi, “Numerical modeling of core-collapse supernovae and compact objects”, IAU Symposium 291: Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years, IAU General Assembly XXVIII, Beijing, China, 2012. 8. 20.

2) M. Shibata, “Numerical simulations of gravitational waves with matter”, in “ Gravitational Wave and Electromagnetic Studies of Compact Binary Mergers”, Santa Barbara, USA, July 30--Aug 3, 2012

3) T. Kajino, “Supernova Nucleosynthesis and the Physics of Neutrino Oscillation”, Carpathian International Summer School of Physics 2012: Exotic Nuclei and Nuclear/Particle Astrophysics IV, From nuclei to stars, June 24-July 7, 2012, Sinaia, Romania.

4) M. Shibata, “Numerical simulation for binary neutron star mergers”, in “Gamma-ray Bursts in the Era of Rapid Follow-up”, Liverpool, UK, June 18--22, 2012.

5) Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Takashi Yoshida, “Evolution of stars just below the critical mass for iron core formation”, Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts, IAU Symposium 279, Nikko, Japan, 12-16 March, 2012.

6) K. Sumiyoshi, “A numerical challenge on the core-collapse supernovae: physics of neutrino and matter at extreme conditions”, International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2011” (nanoPHYS’11) International House of Japan, Jan. 27, 2011, Roppongi, Tokyo, Japan.

7) T. Kajino, “Supernova Nucleosynthesis, Neutrino Mass and Oscillation, and Nuclear Weak Interactions”, French-Japanese Joint Symposium on Nuclear Structure Problems, January 5-8, 2011, RIKEN, Wako, Japan.

8) H. Suzuki, “Neutrinos from supernovae and failed supernovae”, 11th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, Dec. 13, 2010, Toyama International Conference Hall, Toyama, Japan.

9) T. Kajino, “Nucleosynthesis and Neutrinos”, International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei, Okinawa, Japan, November 15-17, 2010.

10) Hideyuki Umeda, “On the progenitors of GRBs”, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts, Kyoto, Japan, April 19-23, 2010.

11) M. Shibata, “Simulation for neutron star-neutron star and black hole-neutron star binaries” in “Computational relativistic astrophysics”, Oct 20--22, 2009, Princeton, USA.

#### A04 班

1) Hidei Matsufuru, Computational physics project (A04) report, International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science, 2012 年 12 月 13-16 日, 奈良県新公会堂

- 2) T.Kaneko, Precision determination of the CKM matrix element  $|V_{us}|$ , International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science, 2012年12月13-16日, 奈良県新公会堂
- 3) Akira Mizuta, Photospheric thermal radiation from GRB collapsar jets, 13th Marcel Grossmann Meeting, 2012年7月2日, Stockholm Univ., Sweden
- 4) K. Sumiyoshi, Numerical challenges in physics of core-collapse supernovae: the role of dense matter and neutrinos, Third International Conference on Nuclear Fragmentation: From Basic Research to Applications (NUFRA2011), 2011年10月2-9日, Kemer, Turkey
- 5) T.Kaneko, "Lattice studies of hadron physics with disconnected quark loops", 35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2010), Palais des Congres, France, July 22-28, 2010
- 6) T.Kaneko, "Pion form factors from lattice QCD with exact chiral symmetry", 6th International Workshop on Chiral Dynamics (Chiral Dynamics 2009), University of Bern, Switzerland, July 6-10, 2009
- 7) T.Yoshie, "International Lattice Data Grid" (invited talk), HackLat2009, 7 May 2009, NeSC, Edinburgh, UK

### 3. 書籍

- 1) 青木慎也、「時空格子上のクォークとグルオンからハドロンへ」、計算と宇宙(岩波講座計算科学第2巻第3章)(岩波書店)(2012).
- 2) 初田哲男、「クォークからハドロン・原子核へ」、計算と宇宙(岩波講座計算科学第2巻第4章)(岩波書店)(2012).
- 3) 柴田大、「星の一生と終末」、計算と宇宙(岩波講座計算科学第2巻第5章)(岩波書店)(2012)
- 4) 青木慎也、「場の理論における非摂動的方法」、第2版 現代数理科学事典(2009)
- 5) 梶野敏貴他、「天文学大事典」(地人書館)(2009)
- 6) 梶野敏貴他、「地球と宇宙の化学事典: 宇宙の年齢、ビッグバン宇宙」、(朝倉書店)(2011)

### 4 ホームページ

総括班: 「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」 <http://bridge.kek.jp/>

A01 班: 「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」 <http://suchix.kek.jp/bridge/A01/>

A02 班: 「クォーク力学に基づく原子核構造」 <http://home.hiroshima-u.ac.jp/bridge02>

A03 班: 「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」

[http://asph1.ph.noda.tus.ac.jp/bridge\\_a03/](http://asph1.ph.noda.tus.ac.jp/bridge_a03/)

Supernova Neutrino Database <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

EOSDB (状態方程式データベース) <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/eos-gate/>

A04 班: 「分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション」 <http://bridge.kek.jp/A04/>

### 5. 主催シンポジウムなど

①ワークショップ「計算科学による素粒子・原子核・宇宙の融合」

2008年12月1日(月)～2日(火)、筑波大学計算科学研究センター

②計算基礎科学連携拠点シンポジウム「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」

2009年2月23日(月)、つくば国際会議場

③合同シンポジウム「次世代スーパーコンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」

2010年3月15日(月)～16日(火)、東京ステーションコンファレンス、東京大学小柴ホール

④国際シンポジウム“From Quarks to Supernovae”

2010年11月28日(日)～30日(火)、熱川ハイツ(静岡県賀茂郡)

⑤新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会

2011年6月23日(木)～24日(金)、理化学研究所 計算科学研究機構

⑥研究会「素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展」

2011年12月3日(土)～5日(月)、合歓の郷(三重県志摩市)

⑦研究会「超新星爆発と数値シミュレーション」

2011年12月26日(月)～28日(水)、京都大学基礎物理学研究所

⑧International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012)

平成2012年12月13日(木)～16日(日)、奈良県新公会堂

## 6. 一般向けアウトリーチ活動

- ①市民講演会「クォークから宇宙まで」、2012年12月15日（土）、奈良県新公会堂、参加者：約180名  
16:00～16:50 益川敏英（名古屋大学特別教授）「現代社会と科学」  
17:00～17:50 小林富雄（東京大学教授）「“ヒッグス粒子”の発見と今後の展望」

## 7. 受賞など

- 1) 青木 慎也（領域代表、A02 班研究分担者）、平成20年度第25回井上學術賞「格子 QCD の相構造の解明とクォークと核力の研究」
- 2) 青木 慎也（領域代表、A02 班研究分担者）、初田 哲男（A02 班研究代表者）、石井理修（A01, A02 班連携研究者）、日本物理学会第17回論文賞「Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations」
- 3) 青木 慎也（領域代表、A02 班研究分担者）、初田 哲男（A02 班研究代表者）、石井理修（A01, A02 班連携研究者）、第23回つくば賞「格子量子色力学による核力の研究」
- 4) 青木 慎也（領域代表、A02 班研究分担者）、初田 哲男（A02 班研究代表者）、石井理修（A01, A02 班連携研究者）、2012年度仁科記念賞「格子量子色力学に基づく核力の導出」
- 5) 山崎 剛（A01 班研究支援員）、2010年度物理学会若手奨励賞「格子 QCD 数値計算による K 中間子崩壊過程の解析」
- 6) 肥山 詠美子（A02 班研究分担者）、2013年度猿橋賞「量子少数多体系の精密計算法の確立とその展開」
- 7) 池田 陽一（A02 班研究支援員）、2010年度物理学会若手奨励賞「3体精密計算に基づくストレンジネスダイバリオン共鳴の研究」
- 8) 阿部 喬（A02 班研究支援員）、2011年度日本物理学会若手奨励賞受賞「有効場理論を用いた格子計算による低密度中性子物質の性質の解明」
- 9) 柴田 大（A03 班研究分担者）、平成21年度第6回日本學術振興会賞「数値相対論の開拓および応用」

## 8. サマースクール「クォークから超新星爆発まで」

本新学術領域の目的は素粒子・原子核・宇宙物理分野の連携であり、実際、量子力学の基づくクォークの力学と核力、核力の詳細に基づく原子核構造、原子核構造とその反応に基づく超新星爆発などの天体現象など、物質の階層を越えた研究領域の形成が着々と進んでいる。このような素核宇宙連携の研究活動状況を関連分野の研究者に幅広く知ってもらうために、数値計算・数値シミュレーションを中心として体験型サマースクールを2011年8月4日～8日、2012年7月27日～31日の5日間、2回企画した。学部4年生から大学のシニアな教員まで30名程度の幅広い参加者が集まった。開催場所は京都大学基礎物理学研究所である。このサマースクールは2013年度以降も HPCI 戦略分野5の活動として引き続き行われる予定である。

## 9. 素核宇宙融合レクチャーシリーズの開催

本新学術領域の目的である素粒子・原子核・宇宙物理の分野間の融合を目指す活動の一環として、「素核宇宙融合レクチャーシリーズ」を企画し、計8回のレクチャーを行った。シリーズの講義内容をまとめた「素核宇宙標準教科書」を作成中であり、2013年度中に公開する予定である。このレクチャーシリーズは今後も HPCI 戦略分野5の活動として引き続き行われる予定である。

## 10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

本新学術領域の目に見える最も顕著な成果は、素粒子、原子核、宇宙という3つの分野の研究者が、(1) 日常的に交流できるようになったこと、(2) お互いに他分野の問題意識を理解し共有するようになったこと、(3) 関連する研究テーマがあれば連携してその問題に取り組もうという機運が出てきたこと、の3つであろう。これにより、「クォークから元素合成まで」という理念としてはよく言われるが実際には実現の難しい、物質階層縦断的かつ分野融合的な研究を実行して行ける研究者のネットワークが整備された。このことは、長い目で見て、専門分野に細分化されがちな現代科学を大きな枠組みで再構築する土台となるもので、その波及効果は大きい。

以下では、個別の研究成果の波及効果などについて述べる。

(1) 本領域の最も大きな研究成果の1つは、格子 QCD によるハドロン間相互作用の導出を成功させたことである。この領域が始まる前には、格子 QCD による核力ポテンシャルの導出には成功していたが、一般のバリオンやメソンなどへの応用、3 体力や非弾性領域への拡張など、未知な部分が多かったが、本領域の研究により、そのような応用や拡張がうまくいくことが具体的に示された。このことは、原子核物理の基礎である核力や一般化されたバリオン間力などが QCD に基づいて計算されることを意味し、この分野の基礎付けという点で、教科書の記述を変えるぐらいにインパクトのある結果と言える。また、中性子星の最大質量に対する、ハイペロンの効果や3 体斥力の効果などを QCD から見積もることが可能になるので、宇宙物理学への波及効果も大きい。

(2) 現実的な核力による核物質状態方程式の精密化と宇宙物理への応用も、重要な研究成果の1つである。原子核分野と宇宙分野の連携により成し得たこの研究は、原子核の精密な計算を宇宙物理の研究に適用出来ることを可能にし、超新星爆発や中性子星などの重要な宇宙物理の研究に与える波及効果は大きい。さらに、将来的に、現実的な核力の部分を格子 QCD から求めた核力に置き換えることが出来るようになれば、「クォークから超新星爆発、元素合成まで」の実現が現実味を帯びてくることになり、素粒子、原子核、宇宙物理の連携の成功として、インパクトのある結果になる。

(3) 3次元ニュートリノ輻射輸送をボルツマン方程式により計算するコードの実用化は、超新星爆発の研究分野に大きなインパクトを与える結果である。3次元ニュートリノ輻射輸送をボルツマン方程式で解く事は、実空間3次元運動量空間3次元の計6次元の輻射輸送の問題を近似なしに扱う事を意味し、今までは誰も計画すら考えもしなかった難しい計算である。テストとはいえ、そのような夢の計算を実用化したことの意義は大きい。将来、京を大幅に超える計算機が開発されれば、ここで開発されたコード（及びその改良版）を使って、3次元ニュートリノ輻射輸送をボルツマン方程式で正確に評価した超新星爆発のシミュレーションが実行すれば、この分野のブレークスルーとなる画期的成果となる。

最後になるが本領域が作り出した研究体制の今後について述べる。

本領域の活動が基盤になり、さらにそこに銀河形成等の宇宙物理などの研究分野が加わり、HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」として、2011年から本格的にその活動を開始した。このことは、計算科学を基盤とする素粒子・原子核・宇宙分野の研究体制に対する非常に大きな波及効果であり、本領域の掲げた「クォークから元素合成まで」という研究理念が拡大された形で継承されている。また、素核宇宙融合レクチャーシリーズ、サマースクール「クォークから超新星爆発まで」、格子 QCD 共通コード Bridge++ の開発、などの体制構築の活動も、HPCI 戦略プログラム分野5の活動に引き継がれている。