

【領域番号】 2004	【領域略称名】 素核宇宙融合
【領域代表者（所属）】 青木 慎也（京都大学・基礎物理学研究所・教授）	
<p>領域全体の設定目標の達成度</p> <p>本領域全体の設定目標は以下のものである。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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)</p> <p>(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)</p> <p>(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)</p> <p>(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)</p> <p>(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</p> <p>(A03 班内部の共同研究、A04 班のサポート)</p> <p>次に領域全体での設定目標の達成度について述べる。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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</p>	

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、 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=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を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 拠点が増え、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。