

【領域番号】 2004

【領域略称名】 素核宇宙融合

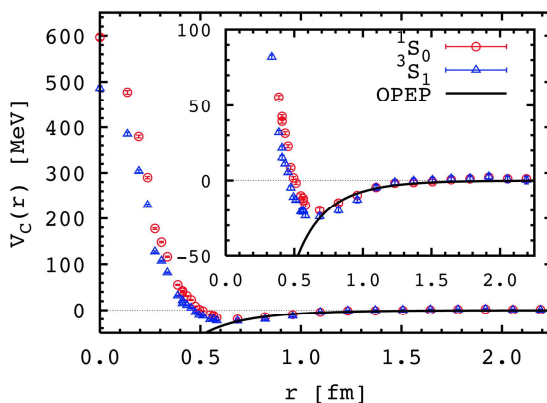
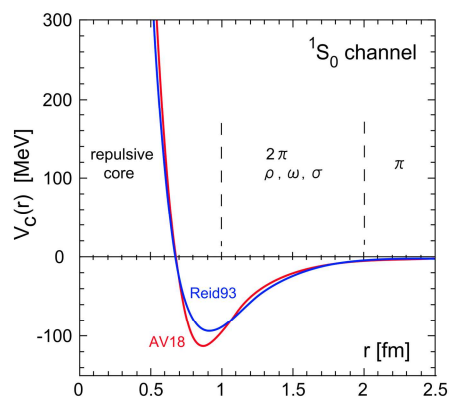
【領域代表者(所属)】 青木 慎也 (京都大学・基礎物理学研究所・教授)

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。このように、マイ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の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。