

## 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

|          |  |
|----------|--|
| 著者       | 青木 慎也  |
| 著者別名     | Aoki Sinya   |
| 発行年      | 2013   |
| その他のタイトル | Research on the Emergence of Hierarchical Structure of Matter by Bridging Particle, Nuclear and Astrophysics in Computational Sciences |
| URL      | <a href="http://hdl.handle.net/2241/120649">http://hdl.handle.net/2241/120649</a>  |

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：12102

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20105001

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Research on the Emergence of Hierarchical Structure of Matter by Bridging Particle, Nuclear and Astrophysics in Computational Sciences

研究代表者

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：30192454

研究成果の概要（和文）：

本研究では、領域全体の研究会を年1回、合計で5回開催した。そのうちの2回は国際シンポジウムであり、海外の研究者を招待し講演をして貰い、また、本領域に対するアドバイスなどを求めた。素核宇宙融合レクチャーシリーズを合計8回開催し、分野間の相互に努めた。計算基礎科学サマースクールを2回開催し、学生や若手研究者の育成に努めた。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we have organized one workshop covering all areas of the project every year, totally 5 workshops during our project, two of which are international symposiums. We have invited foreign researchers to give talks at these international symposiums, and have asked them for their advices to our projects. We have organized 8 lectures on particle physics, nuclear physics and astrophysics as the lecture series for non-experts, and 2 summer schools on computational fundamental physics for beginners.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 2,800,000  | 840,000   | 3,640,000  |
| 2009年度 | 3,800,000  | 1,140,000 | 4,940,000  |
| 2010年度 | 5,500,000  | 1,650,000 | 7,150,000  |
| 2011年度 | 3,800,000  | 1,140,000 | 4,940,000  |
| 2012年度 | 5,900,000  | 1,770,000 | 7,670,000  |
| 総計     | 21,800,000 | 6,540,000 | 28,340,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：素粒子（理論）原子核（理論）宇宙物理（理論）

## 1. 研究開始当初の背景

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生み出した（[1] N.Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 90 (2007) 022001）。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あり得なかったものである。その縦走性は、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表れている（[2]<http://www.nature.com/nature/journal/v450/n7173/full/4501130a.html>）。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、科学の多くの研究分野で認識されているが、その難しさからなかなか実現されていない。そこで、今回の成功を基盤として、計算科学という新しい手法を用いて異なった階層での物質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着想するに至ったのである。

## 2. 研究の目的

本研究は、新学術領域研究（研究領域提案型）「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」の総括班としての計画研究であり、課題名も領域名と同じである。この総括班の研究目的は本領域で行う4つの研究計画班の研究の円滑な遂行を助けるだけでなく、研究班の間の相互作用を促進し有機的な連携を積極的に押し進めていくことである。

本領域自体の研究目的は、量子色力学(QCD)の真空構造とクォーク力学の研究に始まり、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・宇宙物理の研究者が、計算科学的手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事である。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。この研究では、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大問題の解決を目指すだけでなく、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を目的としている。

総括班の具体的な役割は、各分野に対応した計画研究班内部での新たな共同研究を推進することはもちろん、各計画研究班で得られた知識を全計画研究班で共有して貰い、そこから新たな研究に繋げ、さらには複数の計画研究班にまたがるような共同研究に発展させることである。このような共同研究の発生を促進するためには意識的に働きかける必要があり、そのことが総括班の（研究）目的の1つである。

## 3. 研究の方法

本領域全体の基本的な研究戦略は、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支店から共同で研究を行うという組閣宇宙の分野融合の領域を構築し、新しい研究成果を生み出す事である。この研究戦略を実現するために、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。

総括班は、本領域が開始後ただちに各計画研究班のメンバーを中心とした領域全体の研究会を企画する。ここでは、今までの研究内容の紹介、これからの研究目標の設定、共同研究のテーマの検討と実際の共同研究の立ち上げ、複数の計画研究班にまたがった共同研究の具体案の検討などを行う。このような領域全体の研究会を定期的に年1、2回開催する。特に、3年目と5年目には、公募研究の成果発表も兼ねて、海外からの一流の専門家を招いた国際研究集会（あるいはシンポジウム）を行う。これは、本領域の活動を海外研究者に知ってもらおうと同時に領域の活動への意見やアドバイスを聞くためのものであり、本領域の活動結果の客観的な評価を知り、その後の改善に繋げていくためである。

上記のような研究会とは別に、各専門分野の基礎知識や計算科学の手法や技術に関するテーマで連続講義を総括班と計画研究班が協力して開催する。その講義内容は標準テキストとしてまとめて、記録として残していく。

総括班のメンバーは計画研究班で行われる研究会などに積極的に参加し、相互理解を深め議論の活性化を促す。

ホームページを整備し、領域内の情報交換や領域の活動・研究成果の外部への広報等に活用する。

研究効率の向上のため、計算コードの体系化とその維持改良を行うシステムを検討する。

## 4. 研究成果

本領域は2008年12月から活動を開始し、2013年3月の終了時点で、4年4ヶ月の活動を行った。本領域全体に活動は順調に進み、当初の目的はほぼ達成された。その中で、総括班は以下のような活動を行い、成果を上げて来た。

- (1) 総括班が中心となり、領域全体のシンポジウムを毎年開催した。その5回の全体シンポジウムのうちの2回は国際シンポジウムであり、海外からの講演者を招き、領域活動を理解して頂き、この活動を海外に宣伝する事に努めた。また、海外の参加者からの助言や評価を元に領域活動の発展に役立てた。
- (2) この領域は素粒子、原子核、宇宙物理学の異なる3つの専門分野の理論家が集まっているので、相互理解をより深めるために、非専門家向けの「素核宇宙融合レクチャーシリーズ」を企画した。レクチャーシリーズは2010年度から開始された全部で8回行われた。
- (3) 計算科学の実際の研究のやり方を学生や

分野の異なる若手研究者に体験してもら  
うために「計算基礎科学サマースクール」  
を企画し、2011年、2012年の2  
回開催した。

(4) 計画研究班の活動を推進するために、研  
究会の開催などに協力した。

上記の活動のうち、研究会、シンポジウム、  
スクール、レクチャーシリーズなどの主な開  
催状況を以下に記す。

#### 平成 20 年度

●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」

参加者：59名

日時：平成 20 年 12 月 1 日（月）～2 日（火）

場所：筑波大学計算科学研究センター

主催：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」

●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」

日時：平成 21 年 2 月 23 日（月）

場所：つくば国際会議場中ホール 300

主催：筑波大学計算科学研究センター、高  
エネルギー加速器研究機構、国立天文台、  
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」

#### 平成 21 年度

●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」

日時：平成 22 年 3 月 15 日（月）～16 日  
（火）

場所：東京ステーションコンファレンス  
605、東京大学理学部 1 号館 小柴ホール

主催：次世代スーパーコンピュータ戦略プ  
ログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」、  
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」

#### 平成 22 年度

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第 1 回  
「数値相対論の基礎とその応用」

参加者：40名

講師：柴田 大（京都大学基礎物理学研究所）

日時：平成 22 年 6 月 9 日（水）14：30～  
10 日（木）12：00

場所：東京大学理学部 1 号館 233 号室

主催：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」

●国際シンポジウム “From Quarks to  
Supernovae”

日時：平成 22 年 11 月 28 日（日）～30 日  
（火）

場所：熱川ハイツ（静岡県賀茂郡）

主催：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」

#### 平成 23 年度

●サマースクール「クォークから超新星爆  
発まで」—基礎物理の理想への挑戦—

日時：平成 23 年 8 月 4 日（木）10:00～8  
月 8 日（月）14:30

場所：京都大学基礎物理学研究所

主催：京都大学基礎物理学研究所、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」、計算基礎  
科学連携拠点、HPCI 戦略プログラム 分野  
5「物質と宇宙の起源と構造」

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第 3 回  
「高エネルギー天体物理の基礎」

参加者：43名

講師：固武 慶（国立天文台 理論研究部/  
天文シミュレーションプロジェクト）

日時：平成 23 年 6 月 8 日（水）13：30～、  
9 日（木）10：00～

場所：東京大学 理学部 4 号館 3 階 1320 号  
室（会議室）

主催：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」

●研究会「素核宇宙融合による計算基礎物理学の進展」

参加者：70名

日時：平成23年12月3日（土）13:00～5日（月）15:00

場所：合歓の郷（三重県志摩市）

主催：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」、HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」、理化学研究所仁科加速器研究センター

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第4回「原子核殻模型の基礎と応用」

参加者：30名

日時：平成24年1月11日（水）13:30～、12日（木）10:00～

場所：京都大学 基礎物理学研究所 研究棟 K206

主催：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」

共催：計算基礎科学連携拠点、HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」

平成24年度

●サマースクール「クォークから超新星爆発まで—基礎物理の理想への挑戦—」

参加者：61名

日時：平成24年7月27日（金）10:00～7月31日（火）15:00

場所：京都大学基礎物理学研究所

主催：京都大学基礎物理学研究所、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」、計算基礎科学連携拠点、HPCI戦略プログラム 分野5「物質と宇宙の起源と構造」

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第6回「Monte Carlo approach to string/M

theory」

参加者：45名

講師：花田政範・高エネルギー加速器研究機構特任助教

日時：平成24年6月18日（月）～19日（火）

場所：筑波大学計算科学研究センター

主催：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」、HPCI戦略プログラム分野5

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第7回「銀河形成とダークマター」

参加者：22名

日時：平成24年11月20日（火）～21日（水）

場所：神戸大学統合研究拠点

主催：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」

共催：計算基礎科学連携拠点、HPCI戦略プログラム分野5

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

参加者：101人

日時：平成24年12月13日（木）～16日（日）

場所：奈良県新公会堂レセプションホール

主催：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」、計算基礎科学連携拠点、HPCI戦略プログラム分野5、理化学研究所仁科加速器研究センター

●素核宇宙融合レクチャーシリーズ第8回「量子多体系の密度汎関数アプローチ」

参加者：32人

日時：平成25年2月22日（金）～2月23日（土）

場所：理化学研究所仁科ホール、研究本館

主催：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」

共催：計算基礎科学連携拠点、HPCI 戦略プログラム分野 5

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

##### A. 原著論文 (査読有)

1. S. Aoki, J. Balog, T. Doi, T. Inoue, P. Weisz, Short Distance Repulsion Among Baryons, *Int. J. Mod. Phys. E22* (2013) 1330012.

DOI: [10.1093/ptep/pts002](https://doi.org/10.1093/ptep/pts002).

2. Sinya Aoki, Bruno Charron, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Construction of energy-independent potentials above inelastic thresholds in quantum field theories, *Phys. Rev. D87* (2013) 34512.

DOI: [10.1103/PhysRevD.87.034512](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.034512).

3. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Toward an understanding of short distance repulsions among baryons in QCD — NBS wave functions and operator product expansion —, *Prog. Theor. Phys.* 128 No.6 (2012) 1269–1282.

DOI: [10.1143/PTP.128.1269](https://doi.org/10.1143/PTP.128.1269)

4. Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki, Lattice QCD approach to Nuclear Physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2012) 2012 (1):: 01A105.

DOI: [10.1093/ptep/pts010](https://doi.org/10.1093/ptep/pts010)

5. Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki, Hadron-Hadron Interactions from Imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter Wave Function on the Lattice, *Phys. Lett. B712* (2012) 437–441.

DOI: [10.1016/j.physletb.2012.04.076](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.04.076)

6. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Short distance repulsion in 3 nucleon forces from perturbative QCD, *New J. Phys.* 14 (2012) 043046.

DOI: [10.1088/1367-2630/14/4/043046](https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/4/043046)

7. Sinya Aoki, Hadron interactions in lattice QCD, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 66 (2011) 687–726.

DOI: [10.1016/j.pnnp.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2011.07.001)

8. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Application of the operator product expansion to the short distance behavior of nuclear potentials, *JHEP* 05 (2010) 008.

DOI: [10.1007/JHEP05\(2010\)008](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2010)008)

9. 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.

DOI: [10.1143/PTP.123.89](https://doi.org/10.1143/PTP.123.89)

##### B. 会議録 (査読有)

10. Sinya Aoki, Lattice QCD, *Nucl. Phys. A827* (2009) 145c–152c.

DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2009.05.029](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2009.05.029)

[学会発表] (計 47 件)

##### A. 国際会議等

1. Sinya Aoki, Quarks to Universe in computational science, Symposium “Quarks to Universe in Computational Science” (QUCS2012), December 13–16, 2012, Nara New City Hall, Nara, Japan

2. Sinya Aoki, Computing Nuclear Force in Lattice Gauge Theory, QCD Structure I, October 7–20, 2012, Central China Normal University, Wuhan, China

3. Sinya Aoki, Hadron interactions from lattice QCD, Workshop ‘New Frontiers in Lattice Gauge Theory’, Aug. 27 – Sept. 28, 2012, GGI, Florence, Italy

4. Sinya Aoki, Hadron interactions from lattice QCD, INT Program ‘Lattice QCD studies of excited resonances and multi-hadron systems’, July 30 – Aug. 31, 2012, INT, Seattle, USA.

5. Sinya Aoki, Hadron interactions in lattice QCD, Lattice Hadron Physics IV, July 2–4, CSSM, University of Adelaide, Adelaide, Australia.

6. Sinya Aoki, Nuclear Force from Quarks and Gluons, ‘Japan Days’ Colloquium, May 2, 2011, University of Wuppertal, Germany (The 150th anniversary of the Friendship Treaty between Japan and Germany)

7. Sinya Aoki, Nuclear Force from lattice QCD and its extensions’, MLL-colloquium, October 21, 2010, TU, Munich, Germany

8. Sinya Aoki, Extraction of hadron interactions from lattice QCD, CERN Theory Institute ‘Future directions in lattice gauge theory –LGT10’, 19 July – 13 August, 2010, CERN, Switzerland.

9. Sinya Aoki, Hadron-Hadron Interactions from lattice QCD, Elba XI Workshop

「Electron-Nucleus Scattering XI」, Elba, Italy, June 21-25, 2010.

10. Sinya Aoki, A challenge in lattice QCD, Conference on Computational Physics 2009, Kaohsiung, Taiwan, December 15-19, 2009.

11. Sinya Aoki, The repulsive core of the nucleon-nucleon potentials and the operator product expansion, 2009 Taipei Workshop on Lattice QCD, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, December 13-15 2009.

12. Sinya Aoki, Baryon-Baryon-Interaction from Lattice QCD, The 5-th International Conference on Quark and Nuclear Physics, Beijing, China, September 21-26, 2009.

13. Sinya Aoki, Nuclear Forces from Lattice QCD, KITPC Program 「Lattice Quantum Chromodynamics」, KITPC@CAS, Beijing, China, July 6-25, 2009.

14. Sinya Aoki, Baryon interaction from Lattice QCD, The miniworkshop 「Light Quark Masses and Hadron Physics (From quarks to life)」, Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2-5 June, 2009.

#### B. 国内研究会、学会など

15. 青木 慎也「分野5『物質と宇宙の起源と構造』について」合同シンポジウム「次世代スーパーコンピューターでせまる物質と宇宙の起源と構造」第1日『戦略機関が目指すもの』(東京ステーションコンファレンス、東京、2010年3月15日)

16. 青木 慎也「計算基礎科学連携拠点」、シンポジウム「大規模計算画切り拓く基礎科学の将来」(つくば国際会議場 中ホール 300、2009年2月23日)

17. 青木 慎也「本領域の基本方針」、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」(筑波大学計算科学研究センター、2008年12月1日-2日)

[図書] (計2件)

1. 青木 慎也, 岩波講座「計算科学 2 計算と宇宙」第3章 時空格子上のクォークとグルオンからハドロンへ (2012年2月)(岩波書店) p. 31-p. 71.

2. 青木 慎也, 「場の理論における非摂動的な方法」、第2版 現代数理科学事典 (2009年12月)

[その他]

ホームページ等

<http://bridg.kek.jp>

受賞

1. 青木慎也、初田哲男、石井理修

「格子量子色力学に基づく核力の導出」

2012年度仁科記念賞(2012年12月6日) 仁科記念財団

2. 青木慎也、初田哲男、石井理修

「格子量子色力学による核力の研究」

第23回つくば賞(2012年10月17日) 茨城県科学技術振興財団

3. 青木慎也、初田哲男、石井理修

「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

日本物理学会第17回論文賞(2012年3月26日) 日本物理学会

4. 青木 慎也

「格子QCDの層構造の解明とクォークと核力の研究」

第25回井上學術賞(2009年2月4日) 井上科学振興財団

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 30192454

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

大野木 哲也 (ONOGI TETSUYA)

大阪大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 70211802

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員

研究者番号: 20192700

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号: 90211987

松古 栄夫 (MATSUFURU HIDEO)

高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教

研究者番号: 10373185

大塚 孝治 (OTSUKA TAKAHARU)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 20201379

柴田 大 (SHIBATA MASARU)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 80252576

吉江 友照 (YOSHIE TOMOTERU)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 40183991

山田 憲和 (YAMADA NORIKAZU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号: 50399432