

平成30年度 文部科学省
ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関する
アプリケーション開発・研究開発

平成30年度
「宇宙の基本法則と進化の解明」
成果報告書

令和元年5月31日
国立大学法人筑波大学
青木慎也

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人筑波大学が実施した平成30年度「宇宙の基本法則と進化の解明」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の題目	1
2. 実施機関（代表機関）	1
3. 委託業務の目的	1
4. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容	1
4-1. 実施計画	1
4-2. 実施内容（成果）	4
4-3. 活動（研究会等）	25
4-4. 実施体制	32

別添 1 学会等発表実績

別添 2 実施計画

1. 委託業務の題目

「宇宙の基本法則と進化の解明」

2. 実施機関（代表機関）

代 表 機 関	機関名	国立大学法人筑波大学計算科学研究センター（計算基礎科学連携拠点）					
	所在地	〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1					
	課題 責任者	ふりがな 氏名	あおき しんや 青木 慎也	生年 月日	西暦 1959年 5月 16日（59歳） ※2019年 4月 1日現在		
		所属部署名	数理物質系／計算科学研究セン ター	役職	客員教授		
		連絡先	Tel. 029-853-6250 Fax. 029-853-6406 E-mail saoki@het.ph.tsukuba.ac.jp				
	事務 連絡 担当者	ふりがな 氏名	ながい ともや 永井 智哉	/			
		所属部署名	計算科学研究センター			役職	主任研究員
		連絡先	Tel. 029-853-6260 Fax. 028-853-6260 E-mail tnagai@ccs.tsukuba.ac.jp				

3. 委託業務の目的

素粒子から宇宙までの異なるスケールにまたがる現象の超精密計算を実現し、大型実験・観測のデータと組み合わせ、多くの謎が残されている素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史を解明することを目的とする。

このため、国立大学法人筑波大学を中核機関として、分担機関である大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人京都大学、国立大学法人東京大学理学系研究科、国立大学法人東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構、国立研究開発法人理化学研究所、国立大学法人大阪大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台、国立大学法人千葉大学、国立大学法人広島大学と連携し、研究開発を推進する。

4. 平成30年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

重点課題⑨に関する研究開発要素について以下を目標とし研究開発を推進する。

①サブ課題A「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」

D(s)およびB(s)中間子のセミレプトニック崩壊形状因子計算における系統誤差を評価、有限温度QCD相転移のシミュレーションによる有限体積効果等を評価、行列模型および超対称理論の大規模シミュレーション手法を開発するとともに、ポスト京等さまざまな計算プラットフォームで性能の出る計算コード開発に向けた体制を確立する。

また、理化学研究所計算科学研究センターとのコデザイン作業をする。

②サブ課題B「物質創成史の解明と物質変換」

ポスト「京」で用いる新たなコードの開発を進めるとともに、元素合成計算や核変換研究に必要な原子核データを段階的に得ることを目標として以下を実施する。

- ・ QCD分野に関しては、「京」におけるバリオン間力計算のさらなる高精度化、微分展開の高次化、およびポスト「京」で初めて計算可能となる奇パリティバリオン力、3バリオン力についても解明するため、統計精度の向上手法の開発や、高次項の計算手法の開発を進める。
- ・ 原子核分野に関しては、大規模量子多体計算を遂行することにより、エキゾチックな原子核の構造を明らかにする。当該年度は、サマリウム同位体などの中重核の構造計算を遂行しエキゾチック構造の解明をおこなうと共に、実験研究との共同研究を推進して成果の利活用をはかる。
- ・ 宇宙分野に関しては、中性子星連星合体用の一般相対論的輻射磁気流体コードの並列チューンを進めると共に、2017年8月に観測された連星中性子星合体现象を説明するためのシミュレーション研究を進める。また、超新星爆発用輻射流体コード高速化のためのチューンを進めながら、段階的にサイエンスランを実行する。
- ・ 同時に「京」などを用いて科学的成果を段階的に創出する。

また、理化学研究所計算科学研究センターとのコデザイン作業をする。

③サブ課題C「大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明」

重力計算コード、ボルツマンコード、輻射流体コードそれぞれについて最適化を進め、それぞれ、宇宙の構造形成シミュレーション、残存ニュートリノ輸送シミュレーション、コンパクト天体への降着シミュレーションを遂行する。また大規模データの統計解析手法を開拓する。

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の④～⑫の研究開発に取り組む。

④素粒子分野のサブ課題Aの研究推進およびアプリケーション開発の取りまとめ

(再委託先：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)

サブ課題Aで、セミレプトニック崩壊、有限温度QCD、超対称理論における計算手法の開発と予備的シミュレーションの実行および解析を実施する。

⑤サブ課題B全体の統括および量子色力学・数値相対論研究の実施

(再委託先：国立大学法人京都大学)

サブ課題Bで、QCD分野は、ポスト「京」で初めて計算可能となるバリオン間力成分の解明・高精度化に向け、系統誤差として非弾性状態の混合を抑制する手法の研究を進め、宇宙分野は、中性子星連星合体用の一般相対論的輻射磁気流体コードの並列チューンを進めると共に、2017年8月に観測された連星中性子星合体现象を説明するためのシミュレーション研究を進める。また、超新星爆発用輻射流体コード高速化のためのチューンを進めながら、段階的にサイエンスランを実行する。両分野とも、「京」及び京大基研や国立天文台などのHPCを用いて科学的成果を段階的に創出する。

⑥エキゾチック原子核の量子多体構造の研究

(再委託先：国立大学法人東京大学)

原子核分野に関しては、大規模量子多体計算を遂行することにより、エキゾチックな原子核の構造を明らかにする。当該年度は、サマリウム同位体などの中重核の構造計算を遂行しエキゾチック構造の解明をおこなうと共に、実験研究との共同研究を推進して成果の利活用をはかる。

⑦格子QCD計算によるバリオン間相互作用の精密決定

(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所)

サブ課題Bで、ポスト京で初めて計算可能となるバリオン間力成分の解明に向け、統計精度の向上手法や、高次項の計算手法、系統誤差の抑制手法の開発を進める。

- ⑧格子QCD によるハドロン間力の研究開発
(再委託先：国立大学法人大阪大学)
サブ課題Bで、ハドロン共鳴や中性子星構造の理解に向けて、ハドロン間力の生成及びバリオン間力の高次成分の抽出を行う。
- ⑨大規模宇宙論的シミュレーション遂行と広域銀河サーベイ観測データの解析
(再委託先：国立大学法人東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構)
サブ課題Cで、大規模宇宙論的シミュレーションを実行する。また広域銀河サーベイ観測データとの比較のための統計解析手法を開拓する。
- ⑩一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール降着流および噴出流の研究
(再委託先：大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台)
サブ課題Cにおいて、ボルツマン方程式に基づく精緻な一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコードの開発・改良を進めつつ、ブラックホールおよび中性子星といった相対論的天体周囲でのガスダイナミクスを解明する。一般相対論的輻射輸送計算コードを開発して輻射スペクトルを計算し、理論と観測との比較を行う。
- ⑪巨大ブラックホールの成長と銀河中心核活動機構、降着円盤やジェット中での磁気リコネクション及び高エネルギー粒子加速機構の研究、超高解像度重力N体シミュレーションの遂行
(再委託先：国立大学法人千葉大学)
サブ課題Cでブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーションコードの最適化を進め、状態遷移シミュレーションを実施する。
衝撃波における電子加速についてプラズマ粒子計算を行うとともに電子加速からイオン加速までを明らかにするための動的領域分割可能な粒子コードの開発に着手する。
超高解像度重力N体シミュレーションをベースに、さまざまな天体形成をモデル化し、次世代の大規模サーベイのための理論テンプレートを整備する。またデータ公開を引き続き進める。
- ⑫大規模粒子系コード等の最適化、粒子系コードによる宇宙構造形成の研究
(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究センター)
サブ課題Cで、大規模粒子系コード等について最適化を進める。
- ⑬ターゲットアプリケーションのコードデザイン・開発
(再委託先：国立大学法人広島大学)
サブ課題AおよびBで用いるアプリケーション及びターゲットアプリケーションを理化学研究所計算科学研究センターとコードデザインにより開発する。本年度はこれまでに策定した仕様に従ってカーネル部の実装とチューニングを理化学研究所計算科学研究センターと協力して行う。
- ⑭プロジェクトの総合的推進
プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や研究連絡会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。
特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査あるいは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。
プロジェクトで得られた成果については積極的に公表し、今後の展開に資する。

4-2. 実施内容（成果）

プロジェクトの総合的推進として、プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会5回（他にメール審議を随時）や研究連絡会2回、全体シンポジウムの開催等、参画各機関の連携・調整にあたった。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化などを検討し、諮問委員会1回および必要に応じメールによる審議を開催して有識者から意見を聞くなど、プロジェクトを推進した。プロジェクトで得られた成果については積極的に公表した。

サブ課題、分担機関ごとの実施内容や成果は①～⑬に、重点課題全体でのプロジェクト推進としての活動（研究会、セミナー等や研究成果の情報発信など）については4-3に詳細を記す。

①サブ課題A「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」

サブ課題Aでは以下の取組を行った。

1) 素粒子現象論

B中間子セミレプトニック崩壊の研究を本格化させると同時に、当初は視野に入っていなかった新たな応用の可能性に関する開発を行った。

B $\rightarrow\pi l\nu$ セミレプトニック崩壊は、標準理論を超える「新物理」の有望なプローブと期待されているが、この崩壊モードとインクルーシブ崩壊から決定した小林・益川行列要素 $|V_{ub}|$ が有意にずれているという問題は長年未解決のままである。サブ課題Aでは、この測定における理論的不定性の要因になっている形状因子を、格子QCDのシミュレーションによって計算し、不定性を削減することを目指している。カイラル対称性を保つ高速な定式化と、0.081, 0.056, 0.044 fm という小さい格子間隔を用いることにより、先行研究でしばしば問題となっていた離散化誤差とボトムクォーク質量についての外挿を制御し、本格実行フェーズの目標である10%の精度を達成できる見通しを得た。この結果が予言する微分分岐比の運動量遷移依存性は Belle 実験のデータと、また、 $|V_{ub}|$ の数値結果は先行研究とよく一致している。この研究については、系統誤差の評価を含む解析を2019年度中に完了させ、実験データとのより詳細な比較を行って成果を論文にまとめる。

B $\rightarrow\pi l\nu$ 崩壊の研究成果は、 $|V_{ub}|$ のずれの原因がインクルーシブ崩壊の理論・実験研究手法にある可能性を示唆する。インクルーシブ崩壊においても理論的不定性を制御するため、格子QCDによるインクルーシブ崩壊の研究手法の開発を進めた。ボトムクォークからチャームクォークへの遷移を伴うインクルーシブ崩壊に着目することで計算コストを削減し、従来の解析的計算手法と格子シミュレーションの詳細な比較を行った。その結果、前者の理論的基礎である重クォーク展開の高次補正の重要性が明らかになりつつある。また、インクルーシブ崩壊の遷移振幅から基底状態への崩壊の寄与を取り除いて、励起状態への崩壊の情報を取り出すことができる。この手法により、理論予言と実験測定がずれているB $\rightarrow D^{*} l\nu$ 崩壊の研究にも応用することができる。

新物理を明らかにする上で、そのヒントを幅広い崩壊モードで探ることが重要となる。サブ課題Aにおいて開発してきた研究手法を応用し、LHCb 実験で標準理論と実験の間にずれが見つかっているB $\rightarrow K l l$ 希崩壊の研究の可能性についても着目した。この崩壊へのチャーモニウム共鳴の寄与は、QCDの長距離効果を見捨てる因子化近似を用いて評価されてきたが、関連する相関関数を格子QCDによって計算し、因子化近似が有意に破れ得ることを示唆する結果を得た。格子計算をB $\rightarrow K l l$ 希崩壊の定量的研究につなげるためには、格子上の有効相互作用演算子をくりこむ必要がある。このための、格子

上の相関関数と連続時空での摂動計算とのマッチングにより格子演算子をくりこむ手法の開発と応用にも着手した。

以上の研究成果について、国際会議での6件の発表（5件は口頭発表、そのうち2件は招待講演）と日本物理学会での6件の口頭発表を行った。また、2017年度に完了した核子行列要素の研究を査読付き学術誌の論文にまとめた。

2) QCD 相転移

2017年度までの研究により、フレーバー数2のQCDの有限温度相転移の高温相において、トポロジカル感受率に一次転移的な飛びが見つかり、軸性量子異常が消失する現象も見つかった。もしこれが一次転移であれば、従来考えられてきたQCD相図の変更を示唆する点、また、ポスト京で計画されている3フレーバーの相図解明のための第一歩として重要な意味をもつ。一次転移と軸性異常の消失という二つの物理量の振る舞いは、理論的に予想されている一つのシナリオと合致しているが、反して、軸性異常の存在と感受率の滑らかな変化というもう一つのシナリオも完全に排除されたわけではない。相転移の有無や軸性異常の末路の確実な決定のためには、体積の変化に対する応答を調べる必要があるため、2018年度においては、異なる体積の数値計算を継続して行った。

この研究により、感受率のとびが不明瞭になった一方、感受率および軸性量子異常に通常では考えられない大きな有限体積効果を発見した。クォーク質量が大きいときにより大きくなる有限体積効果は、これまでに想定していなかった相構造を強く示唆しており、今後の有限温度QCD相転移の研究において重要な意味をもつ。

2018年度には、このより相構造のより詳細な分析を進めるため、様々な相関関数の測定を進めた。これにより、フレーバー1重項双1次演算子の相関に軽い粒子が現れるという新奇な現象を発見し、それが体積効果の原因になっている様子が見えつつある。今後更に統計を上げ、異なる格子間隔のデータも交えてこの問題の全貌解明を進める必要がある。

これらの成果は、2018年7月に行われた格子場理論国際会議において2件口頭発表として公開され、関連して、その他の国際会議で招待講演を4件行った。また、日本物理学会での講演も4件行っている。

3) 超弦理論

超弦理論の従来の研究では、10次元の理論のうちの余った6次元を天下一的にコンパクト化する手法がとられているために(3+1)次元の理論としては無数の可能性が現れることが知られており、「弦理論のランドスケープ問題」と呼ばれている。一方で、超弦理論を非摂動的に定式化できれば、この余剰6次元がダイナミカルに小さくなり、結果として(3+1)次元の理論が一意的に決まる可能性もある。サブ課題Aでは、このような大きな目標をもってタイプIIB行列模型の数値的研究を推進している。この模型は、1996年に石橋・川合・北澤・土屋が超弦理論の非摂動的定式化として提唱したものである。これまでの研究から、実際に(9+1)次元の微視的な宇宙から、(3+1)次元の膨張する宇宙が生成するような結果が得られるなど、超弦理論の非摂動的定式化として望ましい性質を持つことが示唆されている。

2018年度には、行列で表される時空の詳細な構造を数値的に調べた結果、3次元方向に膨張する空

間を表す行列の固有値のうち、2つだけが大きくなっているという状況が明らかになった。これは行列で表される空間が滑らかなものとはみなし得ないことを意味しており、深刻な問題である。この問題を理解し解決するため、様々な角度から研究を進めた結果、計算の際に現れる符号問題を避けるために用いた近似に問題があることが明らかになった。この近似を用いずに、符号問題を解決して正しい計算を行うのは容易ではないが、我々は近年急速に発展した複素ランジュバン法を用いることによって、計算が実行可能であることを明らかにした。さらに、計算を実行した結果、行列で表される時空が滑らかなものに近づいていく兆候を確認できた。以上の結果は2編の論文にまとめ、2018年5月と7月に行われた国際会議や2019年3月に行われた日本物理学会年次大会において口頭で発表した。

また、同じ手法を有限密度 QCD の相転移の問題に適用する研究も並行して行い、これまで符号問題のために調べられなかったパラメタ領域でも計算が実行可能であることを明らかにした。この結果については、2018年7月に行われた格子場理論国際会議において2件、口頭で発表した。会議録も出版されている。また、2018年6月と8月に行われた研究会においても、関連する招待講演を行った。

②サブ課題B「物質創成史の解明と物質変換」

実施計画に従い、本年度は、格子QCD、原子核、宇宙分野の研究者が、それぞれ独自に研究を進めた。以下では、別個に活動内容を記載する。

1) 格子QCD

格子QCD分野では、京による大規模計算で初めて計算可能になった、物理的クォーク質量におけるバリオン間相互作用の研究を継続した。パイオン質量 146MeV において、格子サイズ $(8.1\text{fm})^4$ 、格子間隔 $(2.3\text{GeV})^{-1}$ の4次元時空格子を用い、核力、ハイペロン力の中心力、テンソル力(偶パリティチャンネル)の系統的な計算を行った。本年度は新たに $N\Omega$ バリオン系についての研究を行い、 5S_2 チャンネルにおいては相互作用が相対距離の全域において引力であることを明らかにした(図1左)。この強い引力相互作用の結果、系はユニタリー極限近傍にあることを予言し、 $N\Omega$ 閾値付近に(準)束縛状態を作る可能性を見出した(図1右) [L1]。また、 $N\Omega$ 以外のチャンネルにおけるバリオン間力についても解析を進めると共に、得られた格子ハイペロン力に基づいた状態方程式の計算、 Ξ ハイパー核の計算などを開始した。

昨年度までの物理点におけるバリオン間力計算では、アップ、ダウン、ストレンジクォークの自由度が関与するバリオン間力を対象にしてきた。しかし近年、チャームクォークの自由度が関わる多体ハドロン系について、エキゾチックハドロンの実験観測報告などが相次いでおり、大きな興味を持たれている。そこで本年度より新たにチャームクォークが関わる二体ハドロン間力の物理点計算を京でスタートさせ、 ΛcN 相互作用などについて結果が得られつつある。

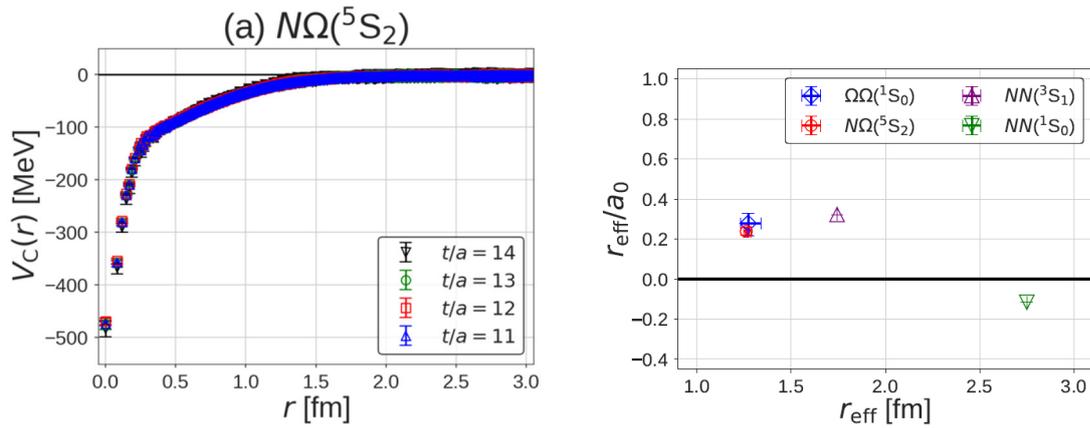


図1：物理点格子 QCD による $N\Omega$ (5S_2) 相互作用 $N\Omega$ (5S_2)、 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系の散乱パラメータ

格子 QCD を用いた相互作用計算では、我々 HAL QCD (Hadrons to Atomic nuclei from Lattice QCD) 共同研究グループが開発した時間依存型 HAL QCD 法のほかに、従来から用いられてきた直接法と呼ばれる手法もある。これまで手法間で互いに異なる結果が報告されていたことから、この矛盾問題の解決は重要課題となっていた。我々は昨年度までに、これまでの直接法の結果には信頼性が無いことを明らかにしていたが、京で得られたデータも用いた本年度の研究によって、HAL QCD 法の信頼性を確立した[L2]。さらに、直接法で信頼性が失われていた原因が、弾性散乱状態の励起状態の混合に起因することを明らかにした (図2)。そして、正しく計算した場合は、2 手法の結果は一致することを示し、長年の矛盾問題を最終的に解決した[L3]。

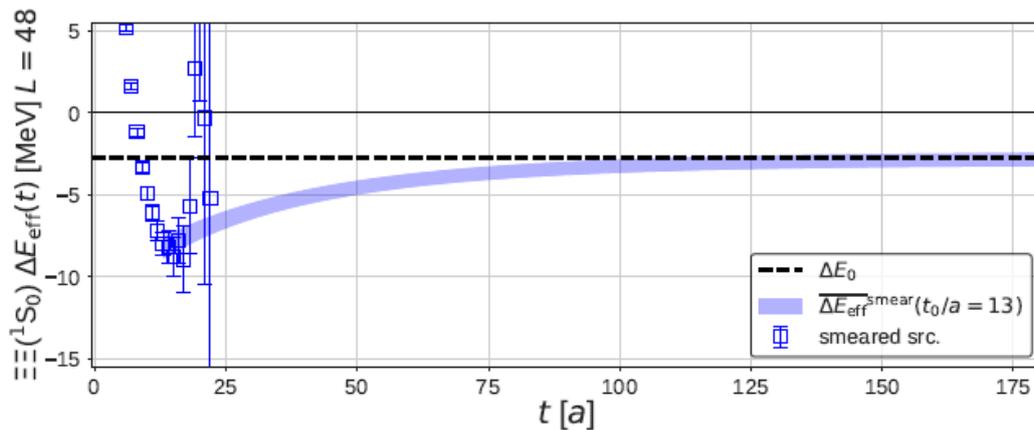


図2：直接法における (信頼性の無い) 擬プラトーの出現

さらに将来に向けたハドロン間力計算の新たな手法として、クォークの低エネルギーモードを利用した計算手法 (LapH(Laplacian Heaviside)法、all-to-all 法) の研究開発を行った。この手法は従来の計算で系統誤差の主要原因だった非弾性散乱状態の混合を抑制できる可能性を持っており、またこれまで計算が難しかったクォーク・反クォークの対生成・消滅のある共鳴状態の研究にも有用である。我々の研究により、LapH 法においてはポテンシャルの非局所性について微分展開の収束性が悪くなるケースがある

ことが解ったため、本年度は特に all-to-all 法を用いて演算子の局所性を保った研究を行い、I=2 チャンネルの $\pi\pi$ 相互作用の計算で信頼性のある結果が得られることを確かめた。

参考文献

- [L1] T. Iritani et al. (HAL QCD Coll.), Phys. Lett. B792, 284 (2019).
- [L2] T. Iritani et al. (HAL QCD Coll.), Phys. Rev. D99, 014514 (2019).
- [L3] T. Iritani et al. (HAL QCD Coll.), JHEP 1903, 007 (2019).

2) 原子核

2-1) 中重核、重い核の構造の研究

中重核領域の原子核研究分野では、モンテカルロ殻模型法により、ニッケル(陽子数 28)、スズ(陽子数 50)、水銀(陽子数 80) 同位体などの近傍の複数の領域の核種を計算し、理論計算に基づいた原子核構造の研究を進めるとともに、実験グループとも共同研究を行ってきた。ニッケル領域では銅 75 の基底状態、アイソマー状態の磁気モーメントについて実験グループと共同研究を行い、Y. Ichikawa *et al.*, Nature Physics 15, 321-325 (2019) を発表した。スズ同位体では中性子数が増えることで原子核形状の二次相転移が起こることを理論計算で示し、T. Togashi, Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, and M. Honma, Phys. Rev. Lett. 121, 062501 (2018) を発表した。水銀同位体では中性子数が 101, 103, 105 の核種でのみ原子核が変形し、その他の同位体では球形になるという現象を理論計算によって解明し、実験グループと共著の B. A. Marsh *et al.*, Nature Physics 14, 1163-1167 (2018) を発表した。図 3 に水銀同位体の平均二乗半径を示す。実験では中性子数が 101, 103, 105 の核種で半径が大きくなっており、原子核が変形していることを示している。モンテカルロ殻模型計算で得られた基底状態の波動関数の変形度から平均二乗半径に換算した値は水銀 181 を除いて実験を再現しており、水銀 181 でも計算で得られた低い励起エネルギーの $1/2^-_3$ 状態が実験での基底状態に対応している。

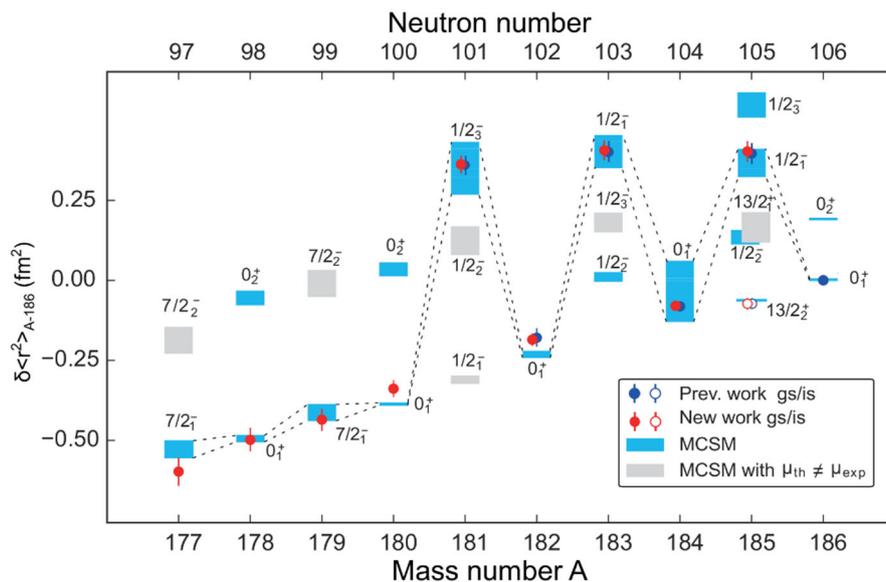


図 3 : 水銀同位体の平均二乗半径(水銀 186 の値との差)の実験値(丸)と、モンテカルロ殻模型(MCSM)計算の波動関数の変形度から換算した値(長方形)の比較。B. A. Marsh *et al.*, Nature Physics 14, 1163-1167 (2018) より一部改変。

2-2) 質量数130領域の原子核構造とカイラル二重項バンド

大規模殻模型計算を実行し、質量数130領域の原子核構造の解明を進めた。特にセシウム128は、カイラル二重項バンドに特徴的な準位構造を示し、興味を持たれている。

右図に、セシウム128の殻模型計算結果による準位構造を示す。縦軸は励起エネルギー、横棒は準位を表し、添えている数字と符号は各準位のスピンのパリティをあらわしている。矢印とその幅は、E2遷移確率とその強さをあらわしている。計算結果は実験値をよく再現しており、同じスピン・パリティの状態が、近い励起エネルギーにペアとなって現れており、カイラル二重項バンドの特徴を示している。大規模計算によって得られた波動関数の解析を進めており、現在論文準備中である。この研究をもとに、加速器実験グループとの共同研究を進めた。とくにランタン135には、励起エネルギー2738keVにアイソマーと呼ばれる比較的寿命が長い状態があり、状態の詳細は不明であったが、最新の実験結果と理論計算をつきあわせて検討することにより、スピン・パリティは23/2+、この状態は中性子が0h11/2一粒子軌道に2ホールを占める配位が主であることを明らかにし、Md. S. R. Laskar *et al.*, Phys. Rev. C **99**, 014308 (2019) に発表した。

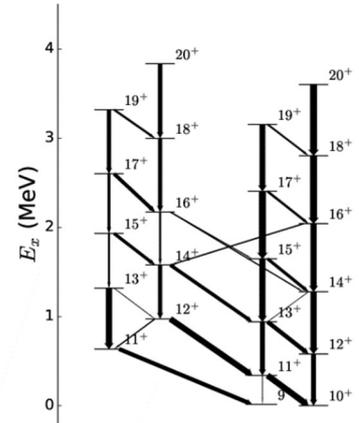


図4: セシウム128の殻模型計算結果による準位構造

2-3) 反転の島領域の原子核構造と中性子過剰核の存在限界

本年度は、反転の島の主題である陽子数8-12の中性子過剰核の存在限界について、顕著な進展があった。この領域の原子核が大きく変形していることは、これまでの我々の研究からもよく分かっていたが、中性子ドリップラインを決める機構として、この変形度が大きな役割を果たしているというメカニズムを提唱した。すなわち、中性子を増やしていくと、一粒子エネルギーは負となり、一見束縛可能に思われるが、原子核全体の変形度が小さくなってしまいうために、トータルとして粒子を増やすことでエネルギーを得ることができないため、それ以上中性子を束縛することができないというメカニズムである。

この新しいメカニズムは、反転の島よりも陽子数の少ない原子核では生じないと考えられる一方、実験的にも理論的にも研究の進んでいない陽子数のより多い原子核では普遍的に生じるメカニズムであると予想されるため、中性子ドリップライン研究の礎となると期待される。

また、反転の島領域の原子核についての実験との共同研究も進み、³¹Mgの研究をH. Nishibata *et al.*, Phys. Rev. C **99**, 024322 (2019), ²⁷Neの研究をC. Loelius *et al.* Phys. Rev. Lett. **121**, 262501 (2018) に発表した。

2-4) 軽い核の核構造の第一原理的な研究

本年度では、モンテカルロ殻模型による第一原理計算手法を用いてこれまで得られていた JISP16 NN 相互作用による結果に加え、カイラル有効場の理論による相互作用を元に構築された JISP16 NN 相互作用の改良版である Daejeon16 NN 相互作用による p 殻核や sd 殻核の代表的な 0^+ 基底状態のエネルギーや点陽子荷電半径の計算を行った。エネルギー（右上図）については、計算結果（赤、青）は最適な調和振動子エネルギーにおける様々な模型空間で得られたエネルギーを模型空間無限大の極限へ外挿したもので、新たな Daejeon16 NN 相互作用による結果（青）はこれまでの JISP16 NN 相互作用による結果（赤）と比べ、より実験値（黒）に近い値が得られ p 殻核領域における改善がみられた。荷電半径についてもエネルギーと似た傾向を示すことが右下図から見て取れる。なお、炭素 8 は共鳴状態で実験的に精度よく測定することが難しいので、代わりに束縛状態である炭素 7, 9 の荷電半径の実験値を炭素 8 の計算結果の左右に載せてある。また、計算結果の誤差は荷電半径に関して最適な調和振動子エネルギー近傍の結果から評価した。これらのエネルギーと半径の計算結果から、sd 殻核やより重い核では 2 体核力だけでなく 3 体力についてもあらわに取り入れる必要があることが示唆される。今後、sd 殻核での第一原理計算に向けてカイラル有効場の理論から導出された核力などを使い、2 体力だけでなく 3 体力を計算に直接取り入れる方向で研究を進める。

さらに本年度では、元素合成において重要な役割を果たす炭素 1 2 の Hoyle 状態を含む軽い核に特徴的に現れるアルファクラスター構造の解析を目指し、これまで得られた波動関数を用いた動径密度分布や弾性散乱の形状因子の計算にも着手した。下図がそれらの結果（左図が動径密度、右図が弾性散乱の形状因子）である。4He、12C、16O の動径密度に関しては、定性的に実験から得られた値を再現している（実験値：B. Frois, C. N. Papanicolas, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 37, 133 (1987)）。今後、エネルギーや半径の計算と同様に模型空間無限大への外挿手法などを用いて、これらの物理量とアルファクラスター構造との関連を定量的な観点から明らかにしたい。

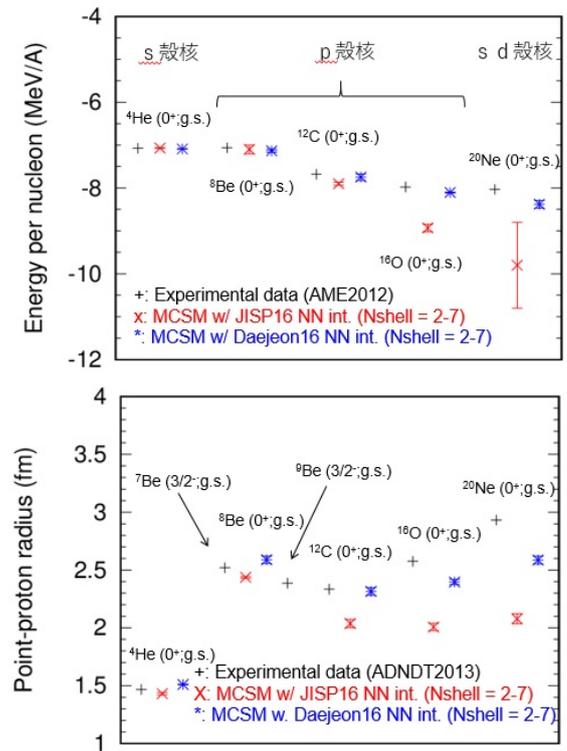


図 5: Daejeon16 NN 相互作用による p 殻核や sd 殻核の代表的な 0^+ 基底状態のエネルギー（上）や点陽子荷電半径（下）

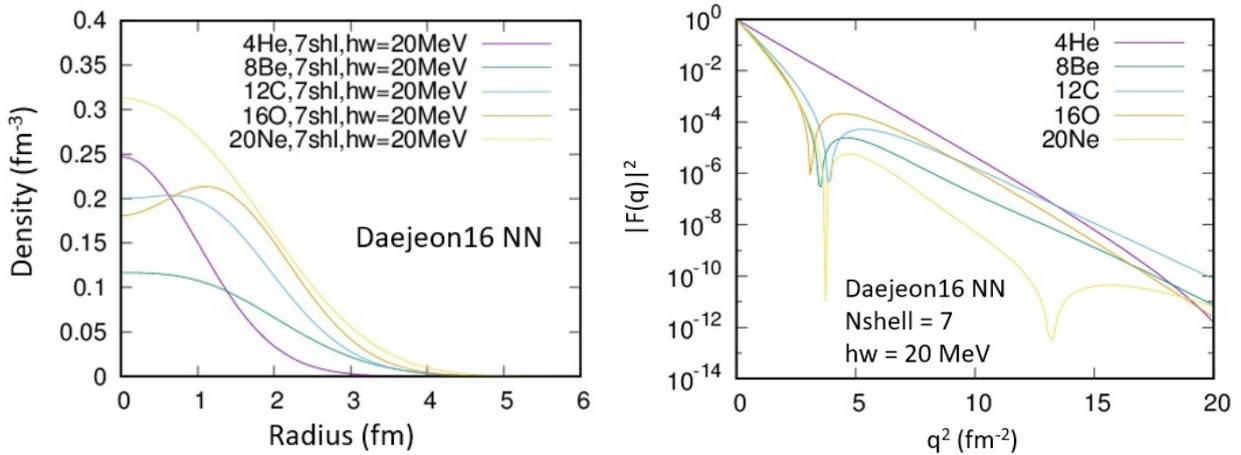


図 6 : 左図が動径密度、右図が弾性散乱の形状因子

2-5) 大規模原子核構造計算手法・コード開発

モンテカルロ殻模型計算では、旧来は波動関数をスレーター行列式の線形結合として表現していたが、対相関が強くなる重い質量領域では不利となる。スレーター行列式の代わりに準粒子真空基底の線形結合によって表現するような新たな計算手法の開発を進めた。並行して、大規模並列計算用の殻模型計算コード「KSHELL」の開発を進めた。殻模型計算では、大規模疎行列の固有値問題を解くことになる。解くべき行列の行列要素は、行列要素数が極めて多数となってメモリー上に保存できないため、事前には用意せず必要な時にオンザフライで生成する方式をとる。そのため、行列要素生成のオーバーヘッドがボトルネックとなる。これを抑えるために、Thick-restart block Lanczos method の採用を提案、有効性を示し、論文投稿中である。

3) 宇宙

3-1) 一般相対論的ニュートリノ輻射磁気流体シミュレーションコードの開発と最適化

2019年4月より Advanced LIGO, advanced VIRGO による観測が再開し、2017年8月17日のイベントに引き続いて、連星中性子星合体からの重力波候補が3例報告されている。距離が遠いため、重力波イベントに付随する電磁波対応天体は発見されていないが、GW170817 と電磁波対応天体 AT2017 gfo が実証したように重力波と電磁波の同時観測は、連星中性子星の合体を理解する上で本質的であるとともに中性子星の性質や重元素の起源を解明する新しい手段として極めて重要な研究対象になった。

観測結果を解釈する上で理論モデルは不可欠であり、連星中性子星合体の理論モデル構築は喫緊の課題である。この作業には、4つの基本相互作用(重力、強い力、弱い力、電磁気力)のすべてを考慮に入れた数値相対論コードの構築が必要不可欠になる。そこで本プロジェクトでは、HPCI プロジェクト戦略課題で開発されたコードをベースに一般相対論、原子核密度状態方程式、ニュートリノ輻射輸送、磁気流体の全ての効果を実装した一般相対論的ニュートリノ輻射磁気流体コードを開発している。

一般相対論的ニュートリノ輻射流体コードと一般相対論的磁気流体コードはすでに独立に開発したが、今年度はこれらの統一化を行った。具体的にはアインシュタイン方程式の物質項として寄与する相対論的磁気流体パートと輻射流体パートを分離し、コンパイル時にフラグを指定することで輻射輸送なしの磁気流体/磁気流体効果なしの輻射輸送/輻射輸送磁気流体に切り替え可能であるようにコードを設計した。相対論的流体の移流項についても同様の扱いにより既存の設定および輻射輸送磁気流体を再

現できる仕様になっている。また、原子核密度状態方程式、連星質量および対称性（例：軌道面对称性あり／なし）を変えたシミュレーションを実行することを念頭において、それらをパラメーターファイルで管理する一元化を行った。また、静的多層格子の **prolongation** および **restriction** の MPI 通信を最適化するため、既存のコードでは MPI プロセス数を指定した上で通信用サブルーチンの自動生成を行ってきたが、通信ルールを整理し MPI プロセス数に対応した自動生成が必要のないようコードを整備した。

アインシュタイン方程式、輻射磁気流体移流項および物質項、静的多層格子構造に関する最適化は昨年度までに報告した通りである。最初の 2 項については実行性能 20%程度、15%程度をそれぞれ達成している。静的格子構造の MPI 通信については 32,768 コアまで良いスケーリング（但し **weak**）を確認した。

ニュートリノ輻射輸送磁気流体とテーブル型原子核密度状態方程式を実装した場合、ボトルネックとなるのはプリミティブリカバリーと呼ばれる部分である。これは相対論的流体を保存形で解く場合に付随する特有の問題で、ローレンツ因子および相対論的エンタルピーで重み付けされたエネルギー、運動量といった保存量から、静止密度、4 元速度、圧力といった基本量を求めるために各ステップで非線形代数方程式を解く必要がある。テーブル型核密度状態方程式を実装している場合の問題点は、**iteration** の度に呼び出される状態方程式データによるキャッシュの汚染である（典型的に熱力学量 1 変数当たり約 25Mbyte）。

合体後の残存中性子星は、基本的に図 7 のように外側に向かって密度が小さくなっていく構造をもつ。本コードでは直交座標を実装しており、各方向に MPI プロセスで分割している（図 7 参照）。この分割と残存中性子星の構造より各 MPI プロセスが担当する密度領域は一定の幅に収まるため、プリミティブリカバリーに必要なテーブル型状態方程式のサイズはテーブル全体に比べ小さくて済む。そこで本コードでは各 MPI プロセスが担当する密度の最大値と最小値をサーチし、テーブル型状態方程式をブロック分割する方法を実装することでキャッシュミスの軽減を行った。図 8 にコード全体のスケーリングを示す（ストロングスケーリング）。16,000 コアまで並列化効率 75%程度である。

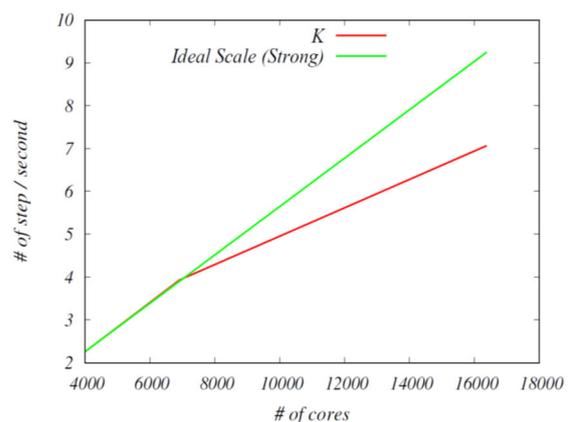
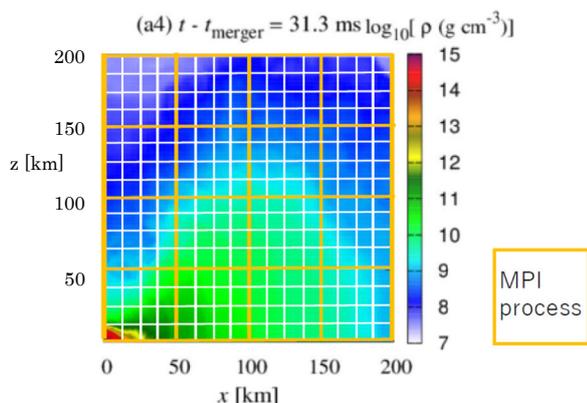


図 7 (左) 残存中性子星の密度構造（子午面： $y = 0, x, z > 0$ のみプロット）と MPI プロセス分割、
図 8 (右) スケーリング

2018 年度は本コードを使用して連星中性子星合体のテスト計算を行った。現在までの研究により残

存中性子星が長時間生き残る場合には、波長の短い磁気流体不安定性を解像しない限り、信頼性の高い計算結果が導けないことが分かっている。このため必要とされる計算機資源が現実的ではなくなるため、本プロジェクトでは残存中性子星が比較的短時間でブラックホールに崩壊するモデルから優先的にシミュレーションする方針を進める。磁気流体不安定性の波長は密度の $-1/2$ 乗に比例するために、ブラックホールの周辺に形成される降着円盤中で磁気流体不安定性モードを解像するのは比較的容易となる。具体的には SFHo と呼ばれる原子核密度状態方程式を仮定し、 $1.35-1.35$ 太陽質量の等質量連星をシミュレーションした。このモデルは合体後に約 10 ミリ秒程度でブラックホールに崩壊する。グリッド幅を 200m に設定し、崩壊後約 100 ミリ秒程度までを追跡した (図 9 参照)。降着円盤内で磁気回転不安定性と巻き込みにより磁場が増幅する様子が捕らえられている。また降着円盤の質量は約 0.04 太陽質量であり、ショートガンマ線バーストを駆動できる可能性がある。しかしながら、この計算では約 100 ミリ秒の時点で軌道面方向への重心のずれによる問題が発生したため、本来要求されるタイムスケール (400 ミリ秒程度) までは計算が届かなかった。重心のずれは現在のコードの仕様ではバリオン質量や運動量の保存が保証されていないことに起因している可能性がある。そこで次年度は軌道面対称性を課した条件で科学的なシミュレーションを進めるとともにバリオン質量/運動量の保存を打ち切り誤差の差の範囲内で保証する Staggered Fixed Mesh Refinement および Reflux の実装を進める。現状のコードから大幅な変更なしに可能であることが分かっている。

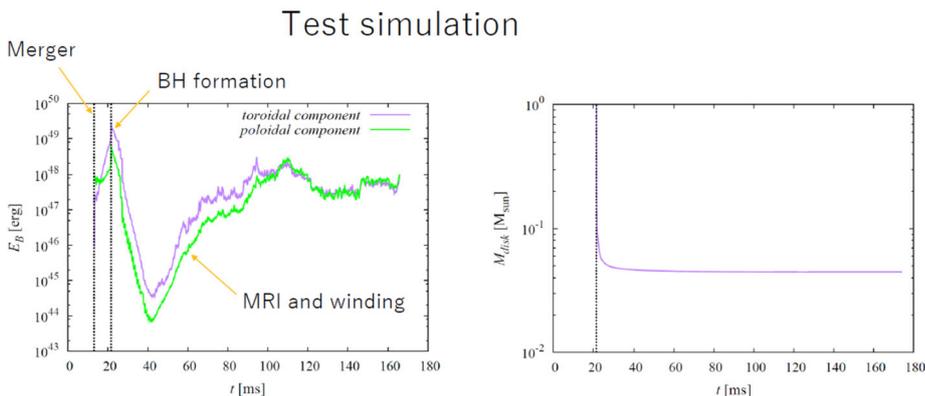


図 9 (左) 磁気エネルギーの時間発展。縦の黒線はそれぞれ合体とブラックホール形成を表す。
(右) 降着円盤質量の時間発展。

3-2) 空間三次元+運動量空間三次元のニュートリノ輻射輸送を考慮した重力崩壊型超新星流体計算 学術的背景

重力崩壊型超新星の爆発メカニズムは、この問題が提起されてから半世紀以上経ったにも関わらず、未だ完全に解明されていない。一次元球対称計算において、1) 輻射流体計算法、2) EOS や反応レート、3) 重力の取り扱いについて、より正確に計算すればするほど爆発しない結果が得られた [e. g. Sumiyoshi & Yamada, ApJ, 629, 922 (2005)] (ただし極めて軽い親星の場合は除く)。そこで、空間の多次元性に注目が集まり、様々な二次元軸対称計算や三次元計算が行われ、一次元球対称計算では爆発しなかったモデルが爆発するという結果が得られるようになった [e. g. Janka, H.-T., ARNPS, 62, 407 (2012); Burrows, A., RvMP, 85, 245 (2013)]。しかし、多次元計算を実現するために、上記の 1)~3) については、近似を適用せざるを得なくなった。しかし、その近似が結果にどの程度影響を与えているかにつ

いては詳しくわかっていない。我々は、京の戦略課題5において、上記の1)と2)に対しできる限り近似を課さない多次元計算用のボルツマン流体コード(ニュートリノに対してボルツマン方程式を近似なしに解きながら輻射流体計算を実行するコード)を開発した[Sumiyoshi et. al., ApJS, 199, 17 (2012); Nagakura et. al., ApJS, 214, 16(2014); Nagakura et. al., ApJS, 229, 42 (2017)]。このコードを利用して二次元軸対称計算を行ない、EOS 依存性[Nagakura et. al., ApJ, 854, 136 (2018)] と、回転の効果[Harada et. al., ApJ, 872, 181 (2019)] について解析した。これらの結果を踏まえ、重点課題9では座標空間や運動量空間に課した対称性を外し、実空間+運動量空間ともに三次元の重力崩壊型超新星のニュートリノ輻射流体計算を行うことを目的としている。

研究概要

ボルツマン流体コードの検証：ボルツマン流体コードの三次元計算用サブルーチンの流体部分のチェック計算のために、定在降着衝撃波の Lightbulb 近似による数値計算を行い、ZEUS-MP/2 コードで計算された結果[W. Iwakami, et al., ApJ, 786, 118 (2014)]と比較した。その結果、Spiral モード振幅の増幅と減少を繰り返し、増幅する度に回転方向が変化する複雑なパターンを再現できることを確認した (図 10 左)。また、ニュートリノ輻射輸送計算の部分のチェックについては、ある時刻における流体の物理量を利用してニュートリノ輻射輸送計算のみを行い、流体とのカップリング計算を行わないボルツマンコードで計算した結果[K. Sumiyoshi, et al., ApJSS, 216, 5 (2015)]と比較した。その結果、既存の結果と定性的に一致する結果が得られることを確認した (図 10 右)。

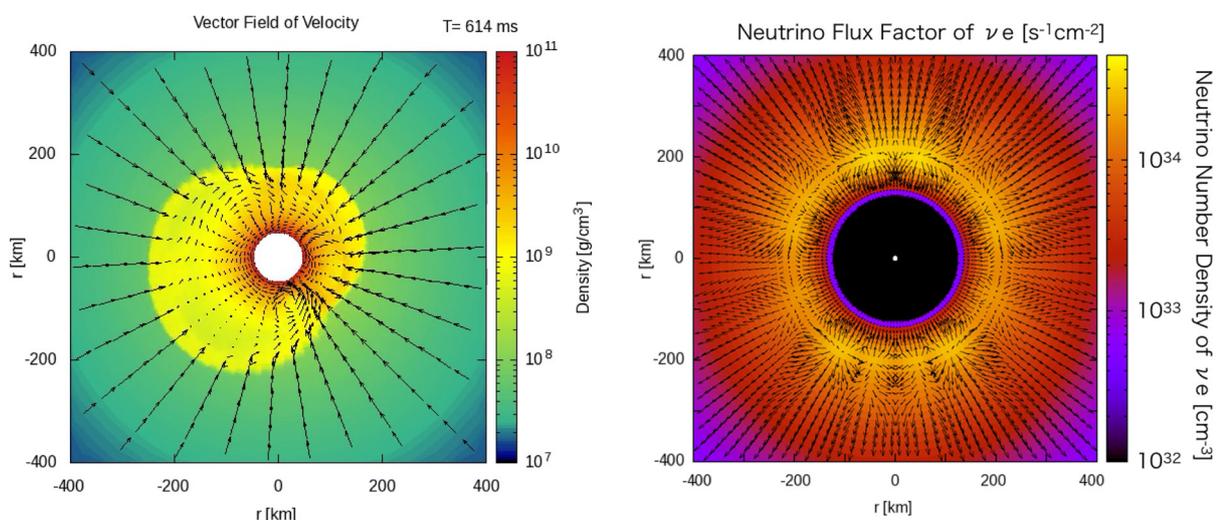


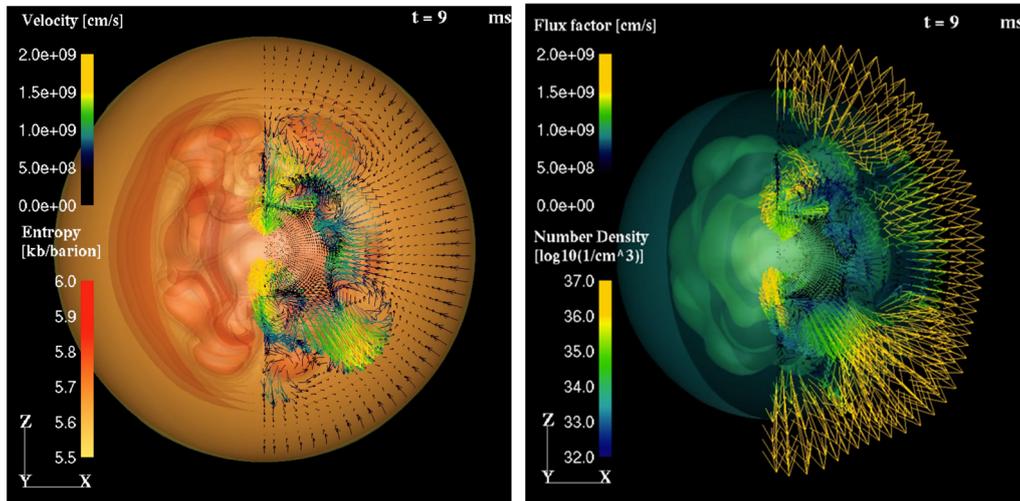
図 10 Lightbulb 近似による流体計算結果 (左) と、ある時刻における流体の物理量に対するボルツマン輻射計算を行った結果 (右)。両者共にボルツマン流体コードを利用して計算を行った。

ボルツマン流体コードの整備：空間三次元計算を始めた当初、計算効率の低下の問題が発生した。コードに完全に三次元化されていない部分が存在し、計算速度を重視して計算効率が低く設定されている流体サブルーチンによる計算時間の比重が増大していたことが原因であった。問題箇所を修正することで効率は改善され、10%程度の効率を維持している。

また、半径 10km 付近のニュートリノ加熱項の空間的変動が激しい領域に、軸付近で非動径方向の速度成分が局所的に異常に速く成長する現象が見られた。そこで、軸付近のグリッドが細かい領域に対し、

複数の ϕ 方向メッシュに渡って保存量を平均化する「粗視平均化」を行うサブルーチンを流体計算部分に導入した。球座標系 (r, θ, ϕ) において、格子点数が $N_\theta=48, N_\phi=96$ のときに、半径 12km 以下の領域で、座標軸から θ 方向 1 点目については ϕ 方向 8 点を平均化、2 点目については ϕ 方向 4 点を平均化、3 点目については ϕ 方向 2 点を平均化した結果、上述の問題の発生を抑制できることを確認した。また、この粗視平均化の手法はクーラン条件の緩和にも役立つ。どのパラメータであれば計算結果が変わらないか、時間刻みをどれだけ伸ばせるかを確認することは今後の課題である。

空間三次元+運動量空間三次元計算の実行：平成 30 年度は以下のシミュレーションを実行した。解像度は $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times N_\nu \times N_{\nu_\theta} \times N_{\nu_\phi} = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ 、並列数は $3072\text{MPI} \times 8\text{openMP} = 24,756$ である。11.2Msol の親星 [S. E. Woosley and A. Heger, Rev. Mod. Phys., 74, 1015 (2002)] について半径 200km までの領域を計算対象とし、様々な観測結果の制限をクリアしている最新の Furusawa-Togashi EOS [S. Furusawa et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 094001 (2017)] を使って、重力崩壊・コアバウンス発生後 19ms まで計算を行った。その結果、ニュートリノバースト発生後に原始中性子内部で対流が急成長し飽和する段階におけるニュートリノ数密度やニュートリノフラックスの空間三次元的構造を捉えることができた。図 11 にその結果を示す。これはバウンス後 9ms の対流の成長段階における、エントロピー等値面・速度ベクトル（左）と電子ニュートリノ数密度の等値面・ニュートリノフラックスファクターベクトル（右）である。中心部付近では、速度ベクトルとニュートリノフラックスファクターベクトルの向きや大きさが一致しており、光学的に厚い領域であることがわかる。一方、外側では両ベクトルの向きや大きさが異なっており、光学的に薄い領域であると言える。両者の中間領域は、近似的なニュートリノ輻射輸送法で正しく計算できているのか自明ではない領域であり、「京」でこそ計算することができた成果であると言える。



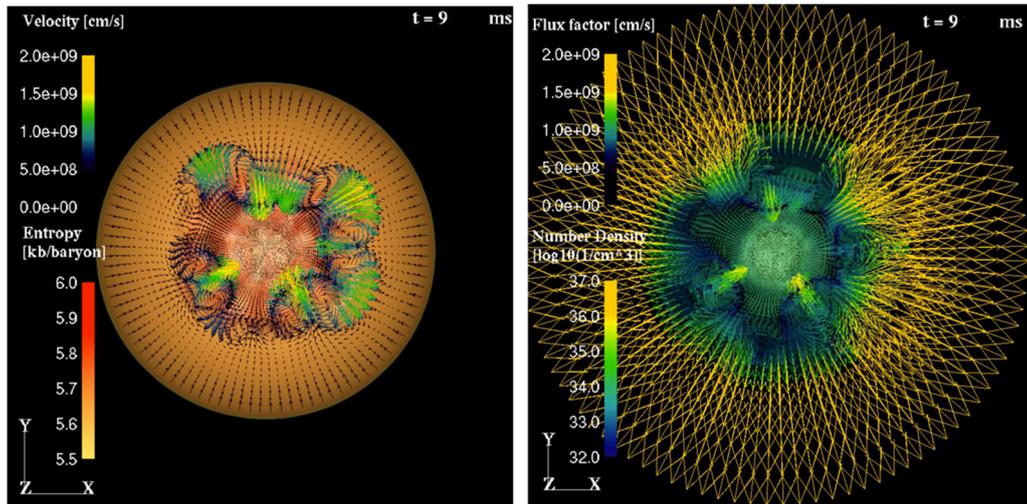


図 11 子午面（上）と赤道面（下）で切断した、エントロピー等値面・速度ベクトル（左）と電子ニュートリノ数密度の等値面・フラックスファクターベクトル（右）の断面図。フラックスファクターはニュートリノの伝播速度に相当する物理量である。

今後の展望：ボルツマン流体コードを利用した空間 3 次元計算で、これまでに得られた 19ms までのデータを利用して解析を行うと共に、計算領域の限界である半径 200km に衝撃波が到達する直前まで計算を進める。さらに、ポスト京で続きの計算が行えるように領域を拡張し、爆発が確認できる時刻まで計算を行えるようにボルツマン流体コードのチューニングを進める。

3-3) 3+1+1 コードによる重力崩壊型超新星の長時間、実空間 3 次元計算

重力崩壊型超新星爆発から生じる元素を解明するのが、本班の究極的な目標である。そのため、長時間計算を行うためのメッシュ粗視平均化のコード開発を進めるほか、物理素過程の精密化等も行い、来るポスト京の時代に備えている。連星ブラックホールや連星中性子合体からの重力波が検出されたことも踏まえ、時流にそったトピックも研究に追加している。

コード開発状況：粗視平均化のコード開発は昨年度までに基本的に終了しており、2018 年度はそれに関する論文を投稿した。粗視平均化は衝撃波の平均的な発展などにはそれほど影響しないことがわかったが、衝撃波の形状そのものは変わってしまうことも判明した。今後は目標に合わせて、平均化のパラメータ等を調整する予定である。

ニュートリノ加熱爆発モデル：コード開発だけではなく、サイエンスの結果も順調に出ている。もっとも普遍的な超新星爆発の機構と考えられているニュートリノ加熱爆発においてもモデルをアップデートした。これまでのモデルよりもより詳細な物理素過程を考慮したモデルを使用した。具体的には、核力のモデルから計算された状態方程式（富樫&古澤）を使用した他、Horowitz+2017 に代表される最新のニュートリノ反応式を使用した。このモデルはこれまでのモデルよりも強く爆発することが確認された。観測されている超新星爆発を再現するにはまだエネルギーが足りないが、このように物理素過程を精密化することで、観測結果に近づいている傾向は見られる。

観測との比較においては近傍で起こった 1987A との比較も重要である。状態方程式は旧来のものを使用した。先のニュートリノ反応を用いて、最新の親星モデルを用いた 1987A モデルのシミュレーション

ンも行い、衝撃波が復活することを確かめた。ニッケル生成量は観測結果と比較すると足りないが、解像度等のパラメータを変えた 2 次元モデルでは観測とそれほど変わらないニッケルが生成されていた。このような計算の高解像度、長時間計算が本プロジェクトの最終目標であり、計算の見通しがつき始めている。

自転爆発モデル：星のコアが高速自転している場合に、非軸対称な流体不安定性が発達し、これまでとは違った機構で爆発が起こる(Takiwaki+2016)。この爆発の様子やそこから出る特徴的なニュートリノ、重力波シグナルのことは既に昨年度報告済である(Takiwaki+2018)。本年度は現象論的に一般相対性理論な効果を取り入れてこの計算をやり直し、その結果コアがより強く収縮することによって、非軸対称不安定性の起こる領域がより内側に遷移し、この不安定性のパターンがより高い周波数に移ることを確認した。これまでのニュートン力学の計算に比べておよそ 2 倍の周波数となった。現在、論文を準備中である。図 12 はその爆発の様子である。エントロピーを表示している。

BH 形成モデル：LIGO-VIRGO の多数のブラックホール合体の検出を受け、こうした BH を作るような超新星爆発の研究を世界に先駆けて行った。ブラックホールが生成される直前に大規模なニュートリノ、重力波放出があることがわかった。論文は Kuroda+2018 にまとめた。

Ultra-stripped 超新星モデル：重力波検出により注目される連星中性子星は 2 回の超新星爆発を経てきたはずであるが、2 回目の超新星爆発は連星系を壊さないような特殊な超新星爆発が起こると考えられており、それが、外層が極端にはがされた ultra-stripped 超新星である。このモデルは比較的短いタイムスケールで爆発が起こるため、シミュレーション時間内に観測と直接比較できるデータが得られる。中でも一番重要なのはニッケルの生成量だが、観測されている弱めの ultra-stripped 超新星ならば、我々のシミュレーションで説明できることが分かった。

ニッケル合成と超新星の爆発機構：従来爆発の指標として用いられてきた爆発エネルギーは、超新星の明るさおよびスペクトルによる膨張速度の測定という二つの独立した量から算出されるため、不定性の大きいものであった。一方、ニッケル量は超新星の明るさから直接的に評価可能であるため、不定性の小さい測定が可能である。そこで、超新星爆発による膨張物へのエネルギー注入をパラメトリックに与えるモデルを用いてシミュレーションを多数行い、単位時間あたりの爆発物への注入率（これは、爆発機構へ迫る重要な量である）とニッケル合成量の関係を明らかにした。その結果、旧来のシミュレーションでは観測されているニッケル合成が困難であることがわかり、物理素過程等の精密化が必要だと分かった。結果は Suwa+2019 にまとめられている。

中性子星の最小質量：2015 年に、新しい連星中性子星の質量測定結果が報告された。その中の一つは、太陽質量の 1.17 倍という中性子星としては極めて小さな質量を有していることが明らかにされた。このような小さな中性子星をどのように生成するかは大問題であり、特に標準的な星の進化および超新星爆発で形成可能かは全くわかっていなかった。そこで、連星進化を取り入れた星の進化計算を行うことで鉄

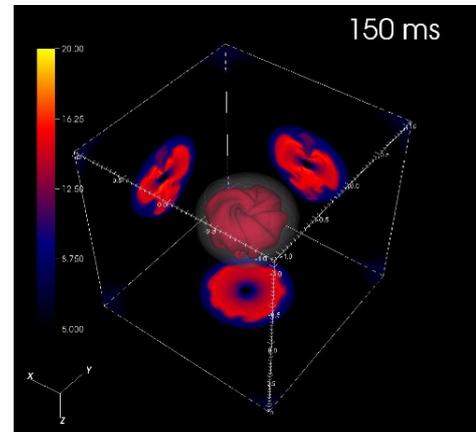


図 12：一般相対性理論な効果を取り入れた爆発の様子（エントロピーを表示）

コアを形成する星の最小質量を明らかにし、さらに超新星爆発計算を行うことでこれらの星が 1.17 太陽質量の中性子星を形成可能か検証した。その結果、現状の標準的な計算で得られる最小質量は、観測されている小質量中性子星よりも小さく、すなわちこのシナリオで生成可能であることがわかった。結果は Suwa+2018 にまとめられている。

③サブ課題 C 「大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明」

宇宙の構造形成、ブラックホール降着流、プラズマ物理の計算コードを「京」およびポスト「京」上で効率よく使用できるよう最適化をすすめた。「京」や Oakforest-PACS など国内最大級の並列計算機を用いて大規模シミュレーションを実施し、銀河および活動銀河核の形成や、ブラックホール降着流、プラズマ衝撃波による粒子加速などに関するサイエンス成果を得た。宇宙の構造形成の研究では、ブラゾフソルバーを拡張し、現実的な宇宙論の設定での構造形成計算を可能にし、ニュートリノ航跡とよばれる過密度部内での銀河の分布の特徴を明らかにした。重力 N 体シミュレーションから生成した銀河ハロー形成史と星形成・銀河形成モデルを組み合わせ、超臨界ブラックホール降着過程を取り入れた場合の活動銀河核の空間分布を求めた。大規模構造形成シミュレーションの出力に 6 次元位相空間情報を用いた発展的な構造検出アルゴリズムを適用して、小質量の物体（サブハロー）を含むハロー合体形成史のデータセットを作成し、インターネット上に公開した。

ブラックホール降着流の研究では、一般相対論的輻射流体力学コードの最適化を行い、ブラックホール及び中性子星周囲の超臨界降着流の X 線領域の輻射輸送シミュレーションを実施した。また、この計算コードを M87 銀河の中心ブラックホールに適用し、Event Horizon Telescope の撮像結果を再現することに成功した。

高次精度磁気流体コード CANS+を用いて銀河系内ブラックホール候補天体の光度変動のシミュレーションを行い、増光時に観測される準周期振動の周期に近いことを明らかにした。円盤の高温領域と低温領域の境界における熱伝導を考慮したシミュレーションにも着手した。

プラズマ物理の研究では、超大規模 3 次元 PIC シミュレーションを実施し、世界で初めてイオンワイベル不安定の 3 次元飽和過程を明らかにすることに成功した。

H30 年度には萌芽的課題 3 「太陽系外惑星 (第二の地球) の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」との合同研究会を開催し、上記の計算コード開発や計算資源利用の最適化、およびサイエンス成果について議論した。

④素粒子分野のサブ課題 A の研究推進およびアプリケーション開発の取りまとめ

(再委託先：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)

サブ課題 A で、セミレプトニック崩壊、有限温度 QCD、超対称理論における計算手法の開発と予備的シミュレーションの実行および解析を実施した。具体的には、 $D(s)$ および $B(s)$ 中間子のセミレプトニック崩壊形状因子計算における系統誤差の評価のため、計算データのフィットの際の相関の影響やさまざまな極限に外挿する際のフィット関数に関する安定性を調べ、付随する誤差を定量化する手法を開発した。有限温度 QCD 相転移のシミュレーションにおいて、相転移近傍での有限体積効果を確認するための新たなシミュレーションを行うと同時に、さまざまな量子数の相関距離を計算して、有限体積効果への影響がもっとも強いモードを同定した。超対称理論の大規模シミュレーションにおいて不可欠となる符号問題克服に向けた複素ランジュバン法の研究を進め、超弦理論への応用する準備を整えた。さまざまな計算プラットフォームで性能の出る計算コード開発に向けて海外の研究チームとの協力体制を確立した。具体的な研究内容の詳細は①に記載。

⑤サブ課題 B 全体の統括および量子色力学・数値相対論研究の実施

(再委託先：国立大学法人京都大学)

サブ課題 B で、QCD 分野は、ポスト「京」で初めて計算可能となるバリオン間力成分の解明・高精度化に向け、系統誤差としての非弾性状態の混合を抑制する手法の研究や有限体積による部分波の混合をコントロールする手法の開発を進め、宇宙分野は、中性子星連星合体用の一般相対論的輻射磁気流体コードの並列チューンを進めると共に、今後観測されると予想される連星中性子星合体現象を説明するためのシミュレーション研究を進めた。また、超新星爆発用輻射流体コード高速化のためのチューンを進めながら、段階的にサイエンスランを実行した。両分野とも、「京」及び京大基研や国立天文台などの HPC を用いて科学的成果を段階的に創出した。具体的には、QCD 分野に関しては、クォーク伝搬関数のすべての成分を近似的に計算する方法をポテンシャルの計算に応用し、近似に由来する誤差の軽減法を検討した。その手法をパイ中間子の散乱に応用し、非弾性状態の混合が軽減されることを確認した。また、有限体積により複数の部分波が混ざっている状態から特定の部分波を取り出す方法を実際のデータに適用し、その有効性を確認した。宇宙分野に関しては、連星中性子星の合体に対する 20 以上の高解像度シミュレーションを行い、重力波波形のモデル化を推進した。

具体的な研究内容の詳細は、②サブ課題 B の格子 QCD 及び宇宙分野の欄に記載。

⑥エキゾチック原子核の量子多体構造の研究

(再委託先：国立大学法人東京大学)

原子核分野に関しては、大規模量子多体計算を遂行することにより、エキゾチックな原子核の構造を明らかにした。当該年度は、サマリウム同位体などの中重核の構造計算を遂行しエキゾチック構造の解明をおこなうと共に、実験研究との共同研究を推進して成果の利活用をはかった。具体的には、サマリウム同位体やスズ同位体における、中性子増加に伴う形の相転移や励起準位の性質の理論的な解明を進めた。また、銅 75、ランタン 135、水銀同位体などの様々な原子核について、加速器実験で得られた結果の理論解析を進め、共著論文を発表した。

具体的な研究内容の詳細は、②サブ課題 B の原子核分野の欄に記載。

⑦格子 QCD 計算によるバリオン間相互作用の精密決定

(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所)

サブ課題 B で、ポスト京で初めて計算可能となるバリオン間力成分の解明に向け、統計精度の向上手法や、高次項の計算手法、系統誤差の抑制手法の開発を進めた。具体的には、物理的クォーク質量においてバリオン間力を計算し、様々なチャンネルでの解析を進めた。特に、 $N\Omega$ 系が、重陽子や $\Omega\Omega$ 系と同様に、ほぼユニタリ極限に対応する(準)束縛状態をなすことを明らかにした。また、HAL QCD ポテンシャルに基づく有限体積固有状態の解析により、いわゆる直接法における相互作用計算における系統誤差を同定し、長年の未解決問題であった HAL QCD 法と直接法の矛盾について、問題は直接法の系統誤差にあったことを明らかにすると共に、正しい計算では二手法の結果が一致することを示し、問題の最終的解決を与えた。

具体的な研究内容の詳細は、②サブ課題 B の格子 QCD 分野の欄に記載。

⑧格子 QCD によるハドロン間力の研究開発

(再委託先：国立大学法人大阪大学)

サブ課題 B で、ハドロン共鳴や中性子星構造の理解に向けて、ハドロン間力の生成及びバリオン間力の高次成分の抽出を行った。具体的には、物理的クォーク質量においてバリオン間力を計算し、特にストレンジネス $S=-3$ 、 -1 チャンネルでの解析を進めた。またチャームクォークが入ったバリオン間力の計算も進めた。

具体的な研究内容の詳細は、②サブ課題 B の格子 QCD 分野の欄に記載。

⑨大規模宇宙論的シミュレーション遂行と広域銀河サーベイ観測データの解析

(再委託先：国立大学法人東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構)

すばる望遠鏡ハイパーシュープリームカムを用いた広域銀河サーベイデータを解析し、銀河形成モデルを検証するために、大規模宇宙論的 N 体シミュレーションの出力を多数連ねて銀河ハローの形成合体史(マージャーツリー)を作成した。銀河形成および活動銀河核進化過程の準解析的モデルを改訂し、作成したマージャーツリーに実装し、これらの天体の数密度や空間分布、さらにはその時間進化を求めた。特に、活動銀河核の中心エンジンとして働くブラックホールへのガス降着の現実的なモデルを考案した。この新モデルはブラックホール質量とガス質量をパラメータとしており、パラメータを様々に変化させて得た結果と、すばる望遠鏡の観測から得られる活動銀河核の空間分布のデータと比較することで、超巨大ブラックホール降着モデルに制限を与え得ることを示した。また、銀河ハローの形成史と銀河の基本的な特徴(星質量や色など)を対応付ける新たな現象論的モデルを考案し、最近の多数の銀河の観測から示唆されるような、衛星銀河の色による数密度分布の差は銀河内の星形成が終了する時期の違いにより説明できることを示した。この成果は本節⑩を遂行する千葉大学と共同研究で得たものである。

ブラソフ方程式の3次元直接数値シミュレーションを実行し、質量を持つ残存ニュートリノが宇宙大規模構造形成におよぼす影響を研究している。H30年度は、ニュートリノ質量の和をパラメータとして、複数の値を設定した宇宙大規模構造の数値シミュレーションを行った。様々な大きさのシミュレーション領域を設定し、数多くの統計的サンプルについて数値シミュレーションを行うことで、幅広い空間スケ

ールについてニュートリノの力学的影響を詳細に調べることができた。具体的にはダークマターの密度揺らぎのパワースペクトル、ダークマターハローの質量関数を調べ、従来の粒子法を用いた N 体シミュレーションや解析的な研究と整合的な結果を確認した。また、理論的に予言されている、ニュートリノとダークマターの相対速度に起因するニュートリノ航跡の存在をダークマターとニュートリノの相互相関関数の解析により明らかにし、ニュートリノ航跡の大きさがニュートリノ質量に依存することを発見した。この研究過程で、次のように計算コードの一部を大幅に改訂した。ダークマターの重力計算に関して昨年度まではニュートリノ成分との重力相互作用の計算のために Particle-Mesh (PM) 法と呼ばれる空間解像度があまり良くない手法を用いていたが、ブラソフ方程式のメッシュ幅と重力計算のメッシュ幅を適切に調整することでダークマターの重力計算を空間解像度の良い Tree-PM 法を用いて計算できるように改良することに成功した。

⑩一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール降着流および噴出流の研究

(再委託先：大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台)

一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションのコード開発および最適化を進めた。ボルツマン方程式に基づく一般相対論的輻射流体力学コードに対しては、1次元および2次元空間での光の伝搬テスト、相対論的ガスと輻射の相互作用を解くテスト、輻射流体の衝撃波のテストを行って計算精度を確かめた。さらに、最終テストとして、降着円盤およびジェットにおける輻射場の進化計算を行った。この結果、降着円盤及びジェットの構造と力学的進化を同時に調べることが可能となった。本研究で開発した手法により計算された輻射場と、従来のモーメント法により得られた輻射場との間に有意な差が見られた。これは、円盤上空での輻射フラックスが、モーメント法では回転軸方向に集中するのに対し、新たな手法では比較的等方であることに起因する。円盤表面付近、すなわち光学的厚みが急激に変化する領域で、モーメント法が輻射フラックスを誤評価することをつきとめた。

次に、モンテカルロ法に基づく一般相対論的輻射流体力学コード RAIKOU の最適化を行い、ブラックホール及び中性子星周囲の超臨界降着流の X 線領域の輻射輸送シミュレーションを実施した。その結果、円盤上空のアウトフロー領域において生じる光子と電子の散乱によって光子のエネルギーが減少し、硬 X 線が弱まる。この効果は中心天体が中性子星のときに顕著であるため、中心天体がブラックホールと中性子星の場合で現れる輻射スペクトルが異なることがわかった。また、RAIKOU コードを M87 銀河の巨大ブラックホールに適用し、Event Horizon Telescope の撮像結果を再現することに成功した。

⑪巨大ブラックホールの成長と銀河中心核活動機構、降着円盤やジェット中での磁気リコネクション及び高エネルギー粒子加速機構の研究、超高解像度重力 N 体シミュレーションの遂行

(再委託先：国立大学法人千葉大学)

1) ブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション

輻射エネルギー密度と輻射流束の時間発展方程式を M1-クロージャー関係を仮定して磁気流体方程式とともに解く高次精度輻射磁気流体コード CANS+R を用いて、エディントン光度に対応する降着率（球対称降着流の上限）の 10%程度の場合のブラックホール降着流の大局的 3 次元輻射磁気流体シミュレーションを実施した。この降着率はブラックホール候補天体が増光し、硬 X 線が卓越した状態（ハードステート）から軟 X 線が卓越した状態（ソフトステート）に遷移中の降着率に対応し、この遷移過程で、ブラッ

クホール候補天体は激しい活動性を示す。シミュレーションの結果、ブラックホール近傍の光学的に薄い高温降着流と、シュバルツシルト半径の 20 倍以上遠方に位置する光学的に厚い低温円盤が共存し、その間には輻射冷却によって円盤が鉛直方向に収縮して磁場が強められた領域が形成されることが明らかになった。また、この領域に蓄積された磁気エネルギーが解放されて円盤が加熱されるとともに間歇的にジェットを噴出すること、その間隔が回転周期の 10 倍程度になり、ブラックホール候補天体の増光時に観測される準周期振動 (Quasi-Periodic Oscillation: QPO) の周期に近いことなどが明らかになった。以上の結果は、降着率が増加して光学的に薄い高温降着流 (Radiatively Inefficient Accretion Flow: RIAF) が存在できる上限降着率を超えてもブラックホール近傍の高温領域が維持されることを示しており、銀河系内ブラックホール候補天体のハードステートからソフトステートへの状態遷移中に観測される「明るいハードステート」を説明することができる。高温領域と低温領域の境界における熱伝導を考慮したシミュレーションにも着手した。

中心天体が巨大ブラックホールの場合のシミュレーションも実行し、エディントン降着率の 10%程度でも、遷移中の降着円盤の一部が輻射圧優勢になって円盤が鉛直方向に膨張することが示された。

2) 高エネルギー粒子加速機構の研究

相対論的衝撃波における電磁波放射及び粒子加速研究を進めた。昨年度までは陽電子・電子系での 2 次元 PIC シミュレーションで磁場が面外配位の垂直衝撃波の構造及び電磁波放射機構を明らかにしてきたが、2018 年度は面内磁場配位に着目し、上流磁場の強度 σ を変えて研究を行った。その結果、 $\sigma > 10^{-2}$ の比較的磁場が強い状況ではこれまでと同じ強度の電磁波が衝撃波面から放射されることがわかったが、予想外にも、 $\sigma < 10^{-2}$ の磁場が弱い状況下においても強い電磁波が放射されることが明らかになった。衝撃波面近傍でのワイベル不安定性が局所的に強い磁場を作り、これによる放射効率が高まったためと理解された。昨年度の成果と併せて、相対論的衝撃波では電磁波放射が普遍的に起こりうることを明らかにした論文を出版した (Iwamoto et al., *Astrophys. J.*, 2018)。

次に、宇宙種磁場生成機構として有力なイオンワイベル不安定の飽和過程を明らかにした。これまで計算時間と空間スケールの制約から、イオンワイベル不安定の非線形過程や飽和レベルには不明な点が多く、種磁場生成機構としての重要性も明らかになっていなかった。本年度は「京」の 16,384 ノード (131,072 コア) を用いて超大規模 3 次元 PIC シミュレーションを実施し、世界で初めてイオンワイベル不安定の 3 次元飽和過程を明らかにすることに成功した。その結果、3 次元計算では強い磁場を長時間維持することが可能であることが明らかになり、これまでの研究で示された磁場の急速な散逸は 2 次元計算による次元制約のためであることを示した (Takamoto et al., *Astrophys. J. Lett.*, 2018)。

宇宙線加速 (特にイオン) を追うためには、系の長時間発展を追う必要があり、ポスト京では多数の計算コアを使って強スケールにより長時間発展を現実的な計算時間の範囲内で追うことを目標としている。そのためには、極めて高い並列化効率の計算コードが要求される。特に PIC 計算では粒子が空間上に非均一に分布するため、各空間領域を担当するプロセス間での負荷不均一性が生じる。これを回避するため、PIC シミュレーションコードへの動的負荷分散機能の実装に着手した。自己重力系 N 体計算で実績のある recursive multi-section 法 (Ishiyama et al. 2009) を採用した独自の PIC シミュレーションコードの開発を行った。

3) 大規模宇宙論的 N 体シミュレーション・データベースの公開

これまで「京」などを用いて行ってきた一連の大規模宇宙論的構造形成シミュレーションに対し、6次元位相空間情報を用いた発展的な構造検出アルゴリズムを適用して、サブハロー込みのハロー合体形成史のデータセットを作成し、インターネット上に公開した。WEB アプリからアクセスできるデータベースシステムを整備してきた (<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~ishiytm/db.html/>)。

H30 年度はそのデータ利用として、ハロー合体形成史上で準解析的銀河、活動銀河核形成モデルの適用を進めた。銀河中心に存在する低光度活動銀河核へのガス降着のタイムスケールが、ブラックホール質量と降着するガス質量の冪関数として表されるモデルが、赤方偏移 6 以下の幅広い区間で観測される活動銀河核の光度関数を最も良く再現できることを示した。成果をまとめた論文は Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて出版された。

また地球質量から銀河団質量までの 20 桁以上におよぶ質量スケールで、首尾一貫したサブハロー進化の解析的モデルの構築を進めた。幅広い質量や赤方偏移に存在するホストハローに内包されるサブハローの質量進化や質量関数が、一連のシミュレーション結果と矛盾しないモデルの構築に成功した。これによりシミュレーションでは分解できていない質量スケールのサブハローの、ダークマター対消滅シグナルへの寄与を精密に評価できるようになった。成果をまとめた論文は Physical Review D 誌にて出版された。

さらに H29 年度に実装した現象論的モデルと“particle tagging” という手法を銀河、矮小銀河ハロー合体史に適用し、ハロー内で形成する恒星の質量や分布の推定を可能にした。これにより高赤方偏移の銀河形成と、近傍宇宙で観測される恒星ストリーム構造を対応づけられるようになった。そして現在観測される恒星ストリームは赤方偏移が $0.5 < z < 2.5$ の特徴的な期間に、銀河系ハローに取り込まれた矮小銀河を祖先とすることを明らかにした。

シミュレーションや準解析的モデルに必要な、ツリー法の最適化を進めた。CPU の各コアに備わっている SIMD 演算器を活用し、ツリー法において必要となる多重極展開のうち四重極項までの計算の高速化を行った。単極子項のみ用いられていた従来の実装に比べ、シミュレーションが最大で 2 倍程度高速化可能である。

⑩大規模粒子系コード等の最適化、粒子系コードによる宇宙構造形成の研究

(再委託先：国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究センター)

ポスト「京」を想定した重力多体計算及びその他の粒子法計算コードの開発と最適化を行った。また、差分法向けフレームワークの開発をさらに進めた。粒子法部分については、大規模並列粒子法シミュレーションコード開発フレームワーク Framework for Developing Particle Simulator (FDPS) をさらに改良すると共に、ポスト「京」上での使用に向けた最適化を進めた。

FDPS を使った重力多体計算コードは、既に「京」全ノードを使った計算で実行効率 40 パーセント以上と、高いウィークスケーリング性能を達成している。H29 年度から H30 年度にかけて、メモリバンド幅やネットワーク性能が相対的に低い計算機でも同等な性能を実現できるよう計算コードを最適化した。この改良の多くは、フレームワークとしての汎用性をそこなうことなく、1 タイムステップあたりのメモリアクセスやノード間通信を理論的に必要な最小限に近づけることを目指したものである。コードの様々な箇所を改良したことにより、最新の GPGPU である NVIDIA V100 を使用して実行効率 30 パーセント以

上の性能を実現できた。

差分法計算向けのフレームワークは、H29 年度までにおこなった「京」上での試験的な実装や、Sunway TaihuLight 向けにおこなった性能評価に基づき、H30 年度はメモリバンド幅要求が少ない高次差分法を定式化し、実装した上で実機での性能評価を行った。

⑬ターゲットアプリケーションのコードデザイン・開発

(再委託先：国立大学法人広島大学)

サブ課題 A および B で用いるアプリケーション及びターゲットアプリケーションを理化学研究所計算科学研究センターとコードデザインにより開発した。

・サブ課題 B に対して H28 年度から開発を続けているウィルソンクォークソルバーに対して、本年度は引き続きポスト京向きのチューニングを施すとともに、ポスト京で利用可能な半精度実数を用いた前処理の検証、隣接通信のレイテンシ削減に関するアルゴリズムの検証を行った。

・サブ課題 A に対してはドメインウォールクォークソルバーには H29 年度にチューニングしたウィルソンクォークカーネルを実装済みであるが、本年度は H30 年度にチューニングを行った版に置き換える作業をおこなった。

・コードデザインに関しては、上述の半精度実数とレイテンシ削減に関する機能についての提案を行った。また、数値計算ライブラリについて機能改善の提案を行った。

4-3. 活動（研究会等）

1) 運営委員会

- 第 41 回：2018 年 5 月 23 日（水）17:00-18:10 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室
- 第 42 回：2018 年 7 月 17 日（火）17:00-18:00 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室
- 第 43 回：2018 年 10 月 3 日（水）17:00-18:10 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室
- 第 44 回：2018 年 12 月 10 日（月）17:00-18:00 筑波大学計算科学研究センター 会議室 A
- 第 45 回：2019 年 3 月 6 日（水）17:00-18:00 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室

2) 研究報告会

- 第 4 回：2018 年 5 月 23 日（水）14:00-16:30 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室
- 第 5 回：2018 年 10 月 3 日（水）14:00-16:30 筑波大学計算科学研究センター ワークショップ室

3) 諮問委員会

- 第 6 回：2019 年 1 月 10 日（木）12:25～13:30 筑波大学東京キャンパス文京校舎 337 会議室

4) 研究会、セミナー等

研究を進めるうえで、研究会やセミナーへの参加は研究分野の進捗を知るのみならず、自身の研究との関係性や今後の発展を考えるためにも必要不可欠なものである。また、研究手法の異なる理論や実験・観測の研究者と協力してサイエンスを進めていくことは重要なことである。素粒子・原子核・宇宙分野を中心とした研究者が交流して情報交換する場を設けるため、セミナーや研究会を開催した。特に、今年度から開催した HPC-Phys 勉強会は業界内で話題となっており、今後異分野を巻き込んで大きく発展していくことが期待される。これを含め、今年度は 10 件を実施し、参加者は計 394 名であった。

●第 3 回 HPC-Phys 勉強会

参加者：43 名

日時：平成 31 年 3 月 18 日

場所：広島大学

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）、ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの 3 回目。

●CfCA 流体学校

参加者：33 名

日時：平成 31 年 2 月 19 日～2 月 21 日

場所：立天文台三鷹キャンパス すばる棟 1F 大セミナー室

主催：国立天文台天文シミュレーションプロジェクト

共催：ポスト「京」重点課題 9 「宇宙の基本法則と進化の解明」

自然科学研究機構「自然科学研究における機関間連携ネットワークによる拠点形成」

概要：流体シミュレーションに関する講習会。今年度は有限差分法と並び天文分野でポピュラーなメッシュフリー法、SPH法を取り上げ、数値流体の基礎に関する講演とメッシュフリー法 GIZMO を用いた実習が行われた。

●素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム 2018

参加者：63名

日時：平成31年1月9日～1月10日

場所：筑波大学東京キャンパス

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)、ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」

概要：2016年度から本格実施が始まったポスト「京」重点課題9、プロジェクト遂行最終年度を目前にしてアプリ開発・研究成果を中心とした全20講演が行われた。

●第2回 HPC・Phys 勉強会

参加者：29名

日時：平成30年12月1日(水)

場所：理化学研究所和光 統合支援施設2階会議室

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)、ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの2回目。

●第二回 ポスト「京」時代の天体形成シミュレーション研究会

参加者：24名

日時：平成30年10月12日

場所：神戸大学統合研究拠点

共催：ポスト「京」重点課題9 「宇宙の基本法則と進化の解明」

萌芽的課題3「太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」

概要：重点・萌芽に関連する話題を提供して分野横断的に議論を行うことを目的とした第二回研究会。

●第5回ポスト「京」重点課題9研究報告会

参加者：16名

日時：平成30年10月3日

場所：筑波大学計算科学研究センター

主催：計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)、ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」

概要：ポスト「京」重点課題9の研究報告会。各サブ課題担当から研究報告が行われた。

●宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションセミナー2018

参加者：15名

日時：平成30年8月20日～8月22日

場所：千葉大学総合校舎 1 号館

主催：千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター

共催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）、ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明

概要：文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」の支援を受けて開発・公開した 2 つのシミュレーションコードパッケージを教材として、シミュレーション経験者向けに行われたもの。前身のサマースクールから初心者向けと経験者向けを 1 年おきに開催している。

●HPC-Phys 勉強会

参加者：26 名

日時：平成 30 年 8 月 22 日

場所：京都大学基礎物理学研究所 パナソニックホール

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）、ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明

概要：物理に軸足を置きつつ数値計算を活発に行っている研究者が集まり、計算の技術的な側面を議論する集まりの 1 回目。

●重力波観測時代の r プロセスと不安定核

参加者：119 名

日時：平成 30 年 6 月 20 日～6 月 22 日

場所：理化学研究所（和光キャンパス）RIBF 棟 2 階大会議室

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）、ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明、理研 RIBF 理論研究推進会議、理研仁科センターRIBF 研究部門

概要：「中性子星合体における r プロセス」を主題に、関連する天文・天体物理と原子核物理の幅広い分野の専門家を集め、 r プロセス研究の現状を確認することを目的とした研究会。

●第 4 回ポスト「京」重点課題 9 研究報告会

参加者：26 名

日時：平成 30 年 5 月 23 日

場所：筑波大学計算科学研究センター

主催：計算基礎科学連携拠点（JICFuS）、ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明

概要：ポスト「京」重点課題 9 の研究報告会。各サブ課題担当から研究報告が行われた。

5) 研究成果の情報発信

ポスト「京」重点課題 9 の研究成果の普及、社会への情報発信は、計算基礎科学連携拠点（JICFuS）におけるパブリックリレーションズ（Public Relations : PR）の一環として捉えている。PR は、組織と社会のより良い関係づくりを目指す情報流通システムであり、情報発信（狭義の広報）だけでなく情報受信（広聴）をも意識した双方向のコミュニケーション活動である。PR 活動は、科学と社会の共創に資するものである。

1. PR コンセプトおよび広報室体制

計算基礎科学連携拠点、ポスト「京」重点課題9の趣旨、運営方針に則ったPRコンセプトを策定した。

- ・計算基礎科学の重要性に対する理解度、計算基礎科学連携拠点への信頼度を上げる。
- ・計算基礎科学と計算基礎科学連携拠点の知名度を上げる。

PRの対象は、分野内研究者、分野外研究者、政府・納税者、国民である。計算基礎科学連携拠点のアピールポイントは、連携拠点を構成する8機関がこれまで行ってきた計算科学と計算機科学の融合による開発・運用、人材養成の実績等である。

計算基礎科学連携拠点、ポスト「京」重点課題9のPR体制は、代表機関の筑波大学計算科学研究センターに1人のPRマネージャーをおき、適宜、重点課題9プロジェクトマネージャーおよび事務部門と協力して業務を行うこととした。

2. 活動内容

●組織内外の情報収集

組織内では、PRマネージャーが運営委員会に常時出席するとともに、組織内の主要なメーリングリストに登録して情報を収集している。組織外では、各種メディアをウォッチし、学会等のメーリングリストに登録して情報収集を行っている。

●ウェブサイトの制作・更新管理

ポスト「京」重点課題9ウェブサイト（日・英）を制作し、2016年3月25日から公開している。

計算基礎科学連携拠点（JICFuS） <http://www.jicfus.jp/jp/>

ポスト「京」重点課題9 <http://www.jicfus.jp/postk9/jp/>

平成30年度（平成30年4月1日～平成31年3月31日）

JICFuS 日本語サイト 65,736 ページビュー（1日平均180 ページビュー）

JICFuS 英語サイト 3,345 ページビュー（1日平均9.2 ページビュー）

重点課題9 日本語サイト 8,875 ページビュー（1日平均24 ページビュー）

重点課題9 英語サイト 337 ページビュー（1日平均0.9 ページビュー）

●Twitter 運用

計算基礎科学連携拠点の代表機関である筑波大学計算科学研究センター広報・戦略室の公式アカウント（@CCS_PR）にて、情報発信を行っている。平成30年4月10日時点でフォロワー数1,897。

●メディア対応

1) プレスリリースおよびニュースリリース

- ・新粒子「ダイオメガ」ースパコン「京」と数理で予言するクォーク6個の新世界ー

発表日：平成30年5月24日情報解禁

発表主宰者：理化学研究所，京都大学，大阪大学

メディア掲載：マイナビニュース（5/24）、日本経済新聞（5/24）、PC Watch（5/24）、財経新聞（5/25）、fabcross for エンジニア（5/25）、大学ジャーナルオンライン（6/3）、JBpress（6/14）

・原子核形状の2次相転移をスパコンシミュレーションで発見

発表日：平成30年8月11日情報解禁

発表主宰者：東京大学 大学院理学系研究科，理化学研究所

・水銀原子核はハムレット

発表日：平成30年10月2日情報解禁

発表主催者：東京大学 大学院理学系研究科，理化学研究所

・磁気モーメントから分かる銅同位体の新たな姿

発表日：平成31年1月30日情報解禁

発表主催者：理化学研究所，東京大学大学院理学系研究科

メディア掲載：日本経済新聞（1/30）、OPTRONICS（2/1）

2) メディア掲載等

・サイエンス view 「使い勝手けた違い」読売新聞 2018年7月8日

・画像化で探る 星の死に際を再現（サブ課題 B・滝脇知也助教）産経新聞 2018年7月23日

●ウェブマガジン「月刊 JICFuS」製作

若手研究者を中心にインタビュー記事を掲載。平成30年度は34号から37号まで4本制作した。

・第34号「Getting to the Bottom of Matter」（平成30年6月27日）高エネルギー加速器研究機構 Brian Colquhoun 研究員

・第35号「ボルツマン輻射流体計算コードを駆使して、超新星爆発の真実に迫れ」（平成30年8月31日）京都大学基礎物理学研究所／早稲田大学理工学術院 大川博督 客員研究員

・第36号「殻模型の可能性を広げる KSHELL—原子核の未知に挑む大規模計算」（平成31年2月27日）東京大学理学系研究科 附属原子核科学研究センター 清水則孝 特任准教授

・第37号「「HAL QCD 法」による核力研究の正しさを証明」（平成31年3月4日）理化学研究所仁科加速器研究センター 入谷 匠 特別研究員

●「月刊 JICFuS ムービー」制作

若手研究者を中心にインタビューとスーパーコンピュータの紹介をメインとしたムービーを作成した。

平成30年度は13号、14号を制作。

・第13号「X線で非常に明るく輝く星の謎」（平成30年11月29日）国立天文台 高橋博之 特任助教
YouTube 再生 589回（4/10現在）

・第14号「QCD相図の完成を目指して」（平成31年3月14日）KEK 素粒子原子核研究所 青木保道 特任准教授
YouTube 再生 101回（4/10現在）

●リーフレット

A3 判変形四つ折り。日・英。各種イベントで配布した。30 年度は最終年度を見据えて、これまでに得られた主要な結果をリーフレットに入れ込み再構成を行った。

● イベント企画・運営

大小 5 つのイベントを行い、計 1649 名を集めた。

・ 科学技術週間一般公開（平成 30 年 4 月 16 日～4 月 22 日）
筑波大学計算科学研究センター一般公開：参加者 79 名（高校生以下 31 名）
理化学研究所和光本所一般公開（初田量子ハドロン物理学研究室）：参加者 300 名
理化学研究所和光本所一般公開（東京大学原子核科学研究センター）：参加者 150 名

・ 量子色力学カードゲーム『クォーク・カード・ディーラー（QCD）』
「量子色力学（QCD：Quantum Chromodynamics）」理解増進のための広報グッズ。カード版とウェブ版がある。

ウェブ特設ページ <http://www.jicfus.jp/jp/promotion/pr/quark-card-dealer/>

出展イベント：参加者 計 761 人。

J-PARC 施設公開（平成 30 年 8 月 19 日）参加者 60 人

KEK 一般公開（平成 30 年 9 月 2 日）参加者 280 人

R-CCS 一般公開（平成 30 年 11 月 23 日）参加者 421 人

・ KEK×JICFuS コラボサイエンス・カフェ

「ダークマター(暗黒物質)とは何か?－はじめに－」 郡和範（KEK 理論センター）
（平成 30 年 10 月 5 日）

「ダークマターを捕まえる!」 広島渚（東京大学/KEK 理論センター）
（平成 30 年 10 月 12 日）

「スーパーコンピュータとダークマター」 石山智明（千葉大学統合情報センター）
（平成 30 年 10 月 19 日）

「計算基礎科学とアクシオンダークマター」 北野龍一郎（KEK 理論センター）
（平成 30 年 10 月 26 日）

参加者：来場者合計 173 名

場所：Bivi つくば

概要：KEK 広報室が定期的に行っている KEK サイエンスカフェとのコラボイベント。ダークマターをテーマに講演を行った。サブ課題 C メンバーの石山智明が講演者として参加。

主催：KEK 広報室

共催：計算基礎科学連携拠点、ポスト「京」重点課題 9

・ 見える化シンポジウム 2019

開催日：平成 31 年 3 月 2 日（土）

参加者：122名

場所：秋葉原UDXシアター

主催：ポスト「京」重点課題7

共催：ポスト「京」重点課題1、ポスト「京」重点課題9、理化学研究所 計算科学研究センター (R-CSS)

概要：近年発展が目覚ましい様々なバーチャル技術とそれを利用した科学データの可視化に関して様々な立場から講演が行われた

・KEK×JICFuS コラボサイエンス・カフェ第2弾

「Quantum Kate で始める素粒子物理！」橋本省二 (KEK 理論センター)

(平成31年3月1日)

「新粒子！？ダイオメガの秘密にせまる！」佐々木健志 (京都大学基礎物理学研究所)

(平成31年3月22日)

参加者：来場者合計64名

場所：Bivi つくば

概要：KEK 広報室が定期的に行っている KEK サイエンスカフェとのコラボイベント。QCD をテーマに講演を行った。サブ課題 A メンバーの橋本省二とサブ課題 B メンバーの佐々木健志が講演者として参加。

主催：KEK 広報室

共催：計算基礎科学連携拠点、ポスト「京」重点課題9

4-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
①サブ課題 A「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」	筑波大学計算科学研究センター	数理物質系／計算科学研究センター客員教授 青木慎也
②サブ課題 B「物質創成史の解明と物質変換」	筑波大学計算科学研究センター	数理物質系／計算科学研究センター客員教授 青木慎也
③サブ課題 C「大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明」	筑波大学計算科学研究センター	数理物質系／計算科学研究センター客員教授 青木慎也
④素粒子分野のサブ課題 A の研究推進およびアプリケーション開発の取りまとめ	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	素粒子原子核研究所教授・橋本省二
⑤サブ課題 B 全体の統括および量子色力学・数値相対論研究の実施	国立大学法人京都大学	基礎物理学研究所教授・柴田大
⑥エキゾチック原子核の量子多体構造の研究	東京大学理学系研究科	原子核科学研究センター准教授・清水則孝
⑦格子 QCD 計算によるバリオン間相互作用の精密決定	国立研究開発法人理化学研究所	仁科加速器科学研究センター専任研究員・土井琢身
⑧格子 QCD によるハドロン間力の研究開発	国立大学法人大阪大学	核物理研究センター教授・保坂淳
⑨大規模宇宙論的シミュレーション遂行と広域銀河サーベイ観測データの解析	国立大学法人東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構	教授・吉田直紀
⑩一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによるブラックホール降着流および噴出	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	理論研究部教授・富阪幸治

<p>流の研究</p> <p>⑪巨大ブラックホールの成長と銀河中心核活動機構、降着円盤やジェット中での磁気リコネクション及び高エネルギー粒子加速機構の研究、超高解像度重力 N 体シミュレーションの遂行</p> <p>⑫大規模粒子系コード等の最適化、粒子系コードによる宇宙構造形成の研究</p> <p>⑬ターゲットアプリケーションのコーデザイン・開発</p> <p>⑭プロジェクトの総合的推進</p>	<p>国立大学法人千葉大学</p> <p>国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター</p> <p>国立大学法人広島大学</p> <p>筑波大学計算科学研究センター</p>	<p>理学研究院教授・松元亮治</p> <p>粒子系シミュレータ研究チーム 研究員・似鳥啓吾</p> <p>理学研究科准教授・石川健一</p> <p>数理物質系／計算科学研究センター客員教授 青木慎也</p>
---	--	--

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「宇宙の基本法則と進化の解明」

機関名 国立大学法人筑波大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

サブ課題A

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Lattice QCD and Hadron Structure、口頭	Yasumichi Aoki	DIS2018	2018/4/16	国内
Inclusive processes from lattice QCD、口頭	Shoji Hashimoto	Workshop "Challenges in semileptonic B decays"	2018/4/20	国外
Fate of axial U(1) symmetry at two flavor chiral limit of QCD in finite temperature、口頭	Yasumichi Aoki	XQCD2018	2018/5/21	国外
Dynamical generation of 4d space-time in nonperturbative superstring theory、口頭	Jun Nishimura	Numerical approaches to holography, quantum gravity and cosmology	2018/5/24	国外
Complex Langevin simulation of finite density QCD、口頭	Jun Nishimura	New Frontiers in QCD 2018 - Confinement, Phase Transition, Hadrons, and	2018/6/5	国内

		Hadron Interactions -		
Axial U(1) symmetry in lattice QCD at high temperature, 口頭	Hidenori Fukaya	Recent Developments in Quark-Hadron Sciences	2018/6/11	国内
Space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model, 口頭	Jun Nishimura	Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory	2018/7/9	国外
Exploring the phase diagram of finite density QCD at low temperature by the complex Langevin method, 口頭	Yuta Ito, Hideo Matsufuru, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki, Asato Tsuchiya, Shoichiro Tsutsui	Lattice2018	2018/7/23	国外
Can the complex Langevin method see the deconfinement phase transition in QCD at finite density?, 口頭	Shoichiro Tsutsui, Yuta Ito, Hideo Matsufuru, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki, Asato Tsuchiya	Lattice2018	2018/7/23	国外
Topological Susceptibility in Nf=2 QCD at Finite	Yasumichi Aoki, Sinya Aoki, Guido Cossu,	Lattice2018	2018/7/24	国外

Temperature -- Volume Stud, 口頭	Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Kei Suzuk (JLQCD collaboration)			
Hints and challenges in heavy flavor physics, 口頭	Shoji Hashimoto	Lattice2018	2018/7/24	国外
Inclusive decay structure function for $B \rightarrow X_c \ell \nu$: a comparison of a lattice calculation with the heavy quark expansion, ポスター	Shoji Hashimoto, Brian Colquhoun, Paolo Gambino, Takashi Kanko	Lattice2018	2018/7/24	国外
Axial $U(1)$ symmetry and Dirac spectra in high-temperature phase of $N_f=2$ lattice QCD, 口頭	Kei Suzuki from JLQCD Collaboration: Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto	Lattice2018	2018/7/24	国外
Heavy quark scaling of $B \rightarrow \pi \ell \ell \nu$ form factors	Brian Colquhoun, Shoji Hashimoto,	Lattice2018	2018/7/26	国外

with Mobius domain wall fermions, 口頭	Takashi Kaneko for the JLQCD Collaboration			
Test of factorization for the long-distance effects from charmonium in $B \rightarrow K11$, 口頭	Katsumasa Nakayama, Shoji Hashimoto for JLQCD Collaboration	Lattice2018	2018/7/27	国外
有限温度QCD: 相転移、トポロジー、axion, 口頭	青木保道	素粒子物理学の進展2018	2018/8/9	国内
複素ランジュバン法による符号問題の解決とその適用範囲について, 口頭	西村淳	理研シンポジウム「熱場の量子論とその応用」2018	2018/8/28	国内
Topology and axial U(1) symmetry in 2-flavor hot QCD Topology and axial U(1) symmetry in 2-flavor hot QCD, 口頭	Yasumichi Aoki	Lattice and Functional Techniques for Exploration of Phase Structure and Transport Properties in Quantum Chromodynamics	2018/9/5	国外
Axial U(1) Anomaly at High Temperature, 口頭	H. Fukaya	Workshop "Quantum Chromodynamics and Its Symmetries"	2018/9/11	国外
Space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model, 口頭	Jun Nishimura	Discrete Approaches to the Dynamics of	2018/9/12	国内

		Fields and Space-Time		
有限密度2次元NJL模型の格子シミュレーションとカイラル非一様相の出現, 口頭	平沢光昭, 西村淳, 島崎信二	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/14	国内
ローレンツ型IIB行列模型における初期宇宙の時空構造, 口頭	青木俊紘, 伊藤祐太, 土屋麻人, 西村淳, 平沢光昭	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/16	国内
有限温度2フレーバーQCDのトポロジカル感受率 - 有限体積効果, 口頭	青木保道, 青木慎也, Guido Cossu, 深谷英則, 橋本省二, 鈴木溪, (JLQCD Collaboration)	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/16	国内
2フレーバー格子QCDの高温相におけるディラックスペクトルと軸性U(1)対称性, 口頭	鈴木溪, 青木慎也, 青木保道, Guido Cossu, 深谷英則, 橋本省二 (JLQCD Collaboration)	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/16	国内
ローレンツ型IIB行列模型の古典解におけるディラック演算子の固有スペクトル, 口頭	畠山洗太, 土屋麻人, 西村淳, 松本祥, Yosprakob Atis	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/16	国内
ローレンツ型IIB行列模型の古典解における時空構造の解析, 口頭	松本祥, 土屋麻人, 西村淳, 畠山洗太,	日本物理学会2018年秋季大会	2018/9/16	国内

	Yosprakob Atis			
New idea for calculating inclusive semileptonic decays on the lattice, 口頭	Shoji Hashimoto	10th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle	2018/9/19	国外
Axial U(1) symmetry, topology, and Dirac spectra at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD, 口頭	Kei Suzuki	The Ninth International Workshop on Chiral Dynamics (CD18)	2018/9/18	国外
ポスト「京」で進む宇宙の理解～重点課題9の挑戦, 口頭	橋本省二	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム	2019/1/9	国内
QCD相転移 - 現状と解明に向けて, 口頭	青木保道	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム	2019/1/9	国内
格子QCDの素粒子現象論への応用, 口頭	金児隆志	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム	2019/1/9	国内
超弦理論の数値シミュレーションの現状と展望, 口頭	西村淳	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム	2019/1/10	国内
QCD phase transition, 口頭	Yasumichi Aoki	International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019	2019/1/15	国内

よく知られている理論の不思議な性質 --- 大規模数値計算によるQCDの相境界近傍の解析, 口頭	青木保道	2018年度第2回計算科学フォーラム	2019/2/22	国内
Novel features of a familiar theory --- QCD near phase boundary analyzed through large scale numerical simulation, 口頭	青木保道	R-CCS Cafe	2019/3/1	国内
複素ランジュバン法に基づく有限密度QCD低温領域における相転移の研究, 口頭	伊藤祐太, 松古栄夫, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人, 筒井翔一朗	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/14	国内
複素ランジュバン法に基づくローレンツ型タイプIIB行列模型における時空構造の研究, 口頭	西村淳, 土屋麻人	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/14	国内
有限密度4フレーバーQCDの非閉じ込め相転移近傍における複素ランジュバン法の適用可能性について, 口頭	筒井翔一朗, 伊藤祐太, 松古栄夫, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内
B → K11崩壊における因子化近似の検証, 口頭	中山勝政, 橋本省二, (JLQCD Collaboration)	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内
インクルーシブ崩壊構造関数からの $B \rightarrow D^{**}0$	橋本省二, 金児隆志	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内

vモードへの制限, 口頭				
2点相関関数とそのモーメントを用いた繰り込み定数の決定, 口頭	石川力, 中山勝政, 橋本省二	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内
2フレーバー格子QCDにおける高温相のメソン相関関数と軸性U(1)対称性, 口頭	鈴木溪, 青木慎也, 青木保道, Guido Cossu, 深谷英則, 橋本省二, (JLQCD Collaboration)	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内
Complex Langevin analysis of the spontaneous rotational symmetry breaking in the Euclidean type IIB matrix model, 口頭	Konstantinos N. Anagnostopoulos, 東武大, 伊藤祐太, 西村淳, 大久保敏之, Stratos Kovalkov Papadoudis	日本物理学会第74回年次大会	2019/3/15	国内

サブ課題B格子QCD

発表した成果（発表 題目、口頭・ポスタ ー発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表した 時期	国内・ 外の別
Nuclear Physics from Lattice QCD	T. Doi, for HAL QCD Collaboration(RIKEN)	workshop on “EFTs and ab initio methods”	2018年4 月	国外
Nuclear Physics from Lattice QCD	T. Doi, for HAL QCD Collaboration(RIKEN)	workshop on “Recent Developments in Nuclear and Hadron Physics (RDNHP 2018)”	2018年5 月	国外
Baryon interactions at physical quark masses in Lattice QCD	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018)	2018年7 月	国外
HAL QCD method and Nucleon-Omega Interaction with Physical Quark Masses	Takumi Iritani(RIKEN)	Lattice 2018 The 36th International Symposium on Lattice Field Theory	2018年7 月	国外
Nuclear Physics from Lattice QCD	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	workshop on “High Performance Computing in High Energy Physics (HPCHEP)”	2018年9 月	国外

Lattice QCD study for the YN and YY interactions	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018)	2018年10月	国外
Recent progress on Lattice QCD calculation of Nuclear Forces	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018)	2018年10月	国外
From Quarks to Nuclei and Cosmos	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019 (MPPQCP2019)	2019年1月	国外
Hadron Interactions from Lattice QCD	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	Kickoff Symposium on “Clustering as a window on the hierarchical structure of quantum systems”	2018年11月	国内

Lattice QCD and Baryon Interactions	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	iTHEMS-Kyushu Workshop – from particles and nuclei to cosmos –	2018年11月	国内
Nuclear Physics from Lattice QCD : Current status and Future prospects	T. Doi, for HAL QCD Collaboration (RIKEN)	RIBF “Hodan-kai” meeting by Young Researchers on “Future of Exotic nuclear physics”	2019年2月	国内

サブ課題B原子核

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Recent advances of the no-core Monte Carlo shell model (oral)	Takashi Abe	GANIL Workshop on Nuclear Structure and Reactions for the 2020s, GANIL, Caen, France	2018年7月	国外
Large-scale computation of the no-core Monte Carlo shell model for nuclear many-body problems (oral)	Takashi Abe	5th joint meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hawaii, USA	2018年10月	国外
Recent results and implications of no-core MCSM calculations for nuclear structure	Takashi Abe	5th joint meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hawaii, USA	2018年10月	国外
No-core Monte Carlo shell model calculations with Daejeon16 NN interaction (oral)	Takashi Abe	International Conference "Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2018" (NTSE-2018), IBS, Daejeon, Korea	2018年11月	国外

Recent advances in the no-core Monte Carlo shell model for the alpha clustering nature in light nuclei (oral)	Takashi Abe	International workshop on "Recent advances in nuclear structure physics 2018" (RANSP2018), YITP, Kyoto, Japan	2018年11月	国内
Alpha-cluster structure from no-core Monte Carlo shell model (oral)	Takashi Abe	The 50th Reimei workshop on Universal Physics in Many-Body Quantum Systems -- From Atoms to Quarks --, JAEA, Ibaraki, Japan	2018年12月	国内
Alpha-cluster structure from no-core Monte Carlo shell model (oral)	Takashi Abe	TRIUMF Theory Workshop on "Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics", TRIUMF, Vancouver, Canada	2019年3月	国外
Alpha-cluster structure from no-core Monte Carlo shell model (poster)	Takashi Abe	The 1st R-CCS International Symposium on K and Post-K: Simulation, Big Data and AI supporting	2019年2月	国内

		Society 5.0, Kobe, Japan		
大規模数値計算の現在と未来（口頭発表）	阿部 喬	RIBF若手放談会： エキゾチック核物理の将来、理研神戸、日本	2019年2月	国内
Alpha-cluster structure from no-core Monte Carlo shell model（ポスター発表）	阿部 喬	新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」キックオフシンポジウム、東工大、日本	2018年11月	国内
Large-scale shell model calculations and chiral doublet of 128Cs（口頭発表）	Noritaka Shimizu	International Conference, “Nuclear Theory in the Supercomputing Era 2018 (NTSE-2018)	2018年11月	国外
Double Gamow Teller transition and its relation to neutrinoless double beta decay matrix element（口頭発表）	N. Shimizu,	American Physical Society, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hawaii, USA	2018年10月	国外
Shell-model study in $A \sim 130$ nuclei and chiral doublet of 128Cs（口頭発表）	N. Shimizu	The 9th international workshop “Quantum Phase Transitions in	2018年5月	国外

		Nuclei and Many-body Systems”		
制限ボルツマンマシンによる殻模型波動関数の記述（口頭発表）	清水則孝	日本物理学会第73回年次大会	2019年3月	国内
殻模型計算による中重核高スピン状態の記述とカイラル二重項バンド（口頭発表）	清水則孝	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム	2019年1月	国内
”Shapes of Medium-mass Nuclei Studied by Monte Carlo Shell Model Calculations”、招待講演	角田佑介	Nuclear Structure 2018 (NS2018), Michigan State University, Michigan, USA	2018/08/07	国外
”Large-scale shell model calculations for structure of Ni and Cu isotopes”、招待講演	角田佑介	Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII 2018), Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA	2018/10/23	国外
「モンテカルロ殻模型による中重核の構造の研究」、口頭発表	角田佑介	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム、筑波大学東京キャンパス文京校舎	2019/01/10	国内
Physics in neutron-rich nuclei with the effective interaction for the	Naofumi Tsunoda	日本物理学会第73回年次大会、福岡大学	2019年3月	国内

shell model based on nuclear force				
原子核殻模型の統計力学的理解	角田直文	若手放談会:エキゾチック核物理の将来、理研神戸、日本	2019年2月	国内
中性子過剰原子核の存在限界とその新しい原理 ~核力に基づく大規模計算による解析	角田直文	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム、筑波大学東京キャンパス文京校舎	2019年1月	国内
Physics in the island of inversion starting from the first principle	Naofumi Tsunoda	Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (SSNET' 18 conference), Gif-Sur Yvette, France	2018年10月	国外
Study of neutron-rich nuclei via nuclear force and microscopic theory	Naofumi Tsunoda	Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Waikoloa village, Hawaii, USA	2018年10月	国外
Underlying mechanism of shape evolution and the quantum phase transition, and its manifestation	Takaharu Otsuka	9th international workshop: Quantum Phase Transitions in Nuclei and Many-body Systems	2018年5月	国外

Ab initio description of clustering phenomena in atomic nuclei by the Monte Carlo shell model	Takaharu Otsuka	Fourth International Workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics”	2018年5月	国外
Structure of medium-mass neutron rich nuclei with the MCSM -two recent topics-	Takaharu Otsuka	3rd Workshop of the Nuclear Spectroscopy Instrumentation Network of ENSAR2 (NuSpIn), NUSPIN 2018	2018年6月	国外
Quantum self-organization and its manifestation	Takaharu Otsuka	フランス米国原子核理論ワークショップ	2018年7月	国外
Nuclear shapes made up by nucleons and nuclear forces	Takaharu Otsuka	第17回原子核構造中国全国討論会	2018年7月	国外
Structure evolution in Sn isotopes and their densities	Takaharu Otsuka	ect* worshop “Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering”	2018年7月	国外
Evolutions in nuclear theory	Takaharu Otsuka	Euroscholl 25th anniversary symposium	2018年8月	国外
Collective Mode and Single-Particle Motion, an Eternal Question with Atomic Nuclei	Takaharu Otsuka	Symposium on the Paths of Nuclear Physics from 1950’ s towards 2020’ s	2018年9月	国外

Single-particle states vs. collective modes, an eternal agenda for atomic nuclei	Takaharu Otsuka	Int. Symp. On Simplicity, Symmetry and Beauty of Atomic Nuclei in honor of Professor Akito Arima's 88 year-old birthday	2018年9月	国外
Atomic Nucleus Loves Symmetries	Takaharu Otsuka	Symposium SYMMETRIES AND ORDER: Algebraic Methods in Many Body Systems	2018年10月	国外
Quantum phase transitions and self-organization in atomic nuclei, and the role of the tensor force	Takaharu Otsuka	Physics Division Colloquium, Argonne National Laboratory	2018年10月	国外
Quantum self-organization and nuclear collectivity	Takaharu Otsuka	第5回 日米物理学会 合同核物理分科会	2018年10月	国外
Maria Goeppert Mayer and the magicity of atomic nuclei	Takaharu Otsuka	Historic Site Designation Honoring the Work of Maria Goeppert-Mayer	2018年11月	国外
Quantum phase transitions and shape evolution in nuclei	Takaharu Otsuka	Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory	2018年11月	国外

Nuclear Shell Model Calculations	Takaharu Otsuka	Summer School for Nuclear Shell Model	2018年11月	国外
Self-organization of atomic nuclei and prospect for stable superheavy nuclei	Takaharu Otsuka	13th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions	2018年12月	国内
The structure of heavy nuclei - a challenge to Bohr-Mottelson's beta/gamma vibration with the self-organization mechanism -	Takaharu Otsuka	NUSTAR Annual meeting 2019	2019年2月	国外
計算核物理の展望	Takaharu Otsuka	日本物理学会年会「計算物理学への誘い」シンポジウム	2019年3月	国内
電荷密度分布と核構造理論計算の発展	Takaharu Otsuka	「電子散乱による原子核研究 -陽子半径、不安定核の電荷密度分布を中心に-」	2019年3月	国内
Structure of heavy nuclei and monopole-quadrupole correlations	Takaharu Otsuka	54 th ASRC International Workshop Sakura-2019 "Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei"	2019年3月	国内

サブ課題B宇宙

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Binary Neutron Star Merger（招待講演）	木内建太	Workshop on Jet and Shock breakout in Cosmic transient	2018年5月	国内
連星中性子星合体からの重力波と電磁波で制限する核密度状態方程式（招待講演）	木内建太	Workshop on r-Process and Unstable Nuclei in Multi-messenger Astronomy	2018年6月	国内
Frontiers in Numerical Relativity（招待講師）	木内建太	2019 YITP Asia-Pacific Winter School and Workshop on Gravitation and Cosmology	2019年2月	国内
Impact of GW170817 on the NS-matter equation of state（招待講演）	関口雄一郎	YKIS2018b Symposium : Recent Developments in Quark-Hadron Sciences	2018年6月	国内
Numerical relativity: generating space-time on computers（招待講演）	関口雄一郎	The 11th Mathematical Society of Japan Seasonal Institute	2018年7月	国内
連星合体からの重力波で探る高密度天体（招待講演）	関口雄一郎	第31回 理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」	2018年12月	国内
Mass ejection from neutron-star mergers in numerical relativity (invited talk)	柴田 大	Physics at neutron-star mergers at GSI/FAIR	2018年6月	国外 ドイツ Darmstadt
GW170817 and neutron-star merger (invited talk)	柴田 大	CTA consortium meeting	2018年9月	国外 ドイツ Berlin

Variety of kilonovae of neutron-star mergers (invited talk)	柴田 大	Physics and astrophysics at extreme: Multimessenger transients	2019年2月	国外 USA Penn State
Coalescence of neutron-star binaries (invited lecture)	柴田 大	School on Multimessenger physics and astrophysics with compact binaries	2019年3月	国外 ドイツ Jena
ボルツマンハイドロコールドによる空間三次元計算の進捗状況（口頭）	岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム（筑波大学東京キャンパス文京校舎）	1月9日	国内
重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算（ポスター）	岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	CfCAユーザーズミーティング（国立天文台三鷹キャンパス）	1月15日-16日	国内
重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算（口頭）	岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	天文学会年会2019年春季年会（法政大学小金井キャンパス）	3月16日	国内
Core-collapse Supernova Simulations with the	原田了, 岩上わかな, 大川博督, 長	RIKEN-RESCEU Joint Seminar	2019/3/19	国内

Boltzmann-neutrino-transport (口頭)	倉洋樹, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	(東京大学本郷キャンパス)		
The Rotating Core-Collapse Supernova Dynamics and Neutrino Distributions by Full Boltzmann Neutrino Transport (口頭)	原田了, 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	高エネルギー宇宙物理学研究会2018 (東京大学本郷キャンパス)	2018/9/5	国内
The Neutrino Distributions in the Rotating Core-Collapse Superanova (ポスター)	Harada, A., Yamada, S., Iwakami, W., Okawa, H., Nagakura, H., Sumiyoshi, K., Furusawa, S., Matsufuru, H.	Deciphering multi-dimensional nature of core-collapse Supernovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (富山国際会議場)	2018/10/8-10	国際
ボルツマン輻射輸送による超新星シミュレーションの核物質状態方程式依存性 (ポスター)	原田了, 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	天文学会年会2019 年春季年会 (法政大学小金井キャンパス)	2019/3/14-17	国内
ボルツマン輻射輸送による超新星シミュレーション	原田了, 岩上わかな,	第31回理論天文学宇宙物理学懇談会	2018/12/19-21	国内

シヨンの核物質状態方程式依存性 (ポスター)	大川博督, 長倉洋樹, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一	シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」		
Explosion mechanism (口頭)	K. Sumiyoshi	Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan	2018. 10. 8-10	国際
Hot dense matter in core-collapse supernovae and heavy ion collisions(招待、口頭)	K. Sumiyoshi	The 52th Reimei Workshop “Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments”, Ibaraki Quantum Beam Research Center (IQBRC), JAEA Advanced Science Research Center, Tokai, Ibaraki, Japan	2019. 1. 9-11	国際

ボルツマン方程式による超新星のシミュレーション計算(口頭)	住吉光介	第1回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会、京都大学基礎物理学研究所	2018.8.22	国内
Physics of core-collapse supernovae explored by nuclei(招待、口頭)	K. Sumiyoshi	International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2018), Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Osaka, Japan	2018.8.1-3	国際
Numerical methods of fully special and general relativistic Boltzmann neutrino transport (招待、口頭)	H. Nagakura	Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) conference on computational science and engineering, February 25-March 1 2019, Spokane, Washington, USA	February 25-March 1, 2019	国際
Asymmetric neutrino emissions associated with neutron star	H. Nagakura	Physics and Astrophysics at the eXtreme (PAX), MM19-	February 7-9, 2019	国際

kicks in CCSN (招待、口頭)		Multimessenger Transients, February 7-9, Penn State University, Pennsylvania, USA		
Neutrino signals in CCSNe simulations with full Boltzmann neutrino transport (招待、口頭)	H. Nagakura	SNeGWv2018, October 8-October 10, 2018, Toyama International Conference Center, Toyama prefecture, Japan	October 8-October 10, 2018	国際
Radiation-Hydrodynamic Simulations of Core-collapse Supernovae with 6 Dimensional Boltzmann Neutrino Transport (招待、口頭)	H. Nagakura	Astronom 2018, June 25-June 29, 2018, Panama City Beach, Florida, USA	25-June 29, 2018	国際
On the requirements for first-principles modeling of core-collapse supernovae (招待、口頭)	H. Nagakura	CSQCD VII, June 11-June 15, 2018, Advance Science Research Center CUNY, NewYork, USA	June 11-June 15, 2018	国際
Supernova simulations with	H. Nagakura	American Physical Society	April 14-17, 2018	国際

variational principle EOS, consistent treatment of nuclear electron capture rates and Boltzmann neutrino transport (口頭)		(APS) April meeting 2018, April 14-17, 2018, Columbus, Ohio, USA		
重力崩壊型超新星の爆発機構と原子核物理 (招待、口頭)	長倉 洋樹	宇核連研究会、2019年3月6~8日、北海道大学学術交流会館	2019年3月6~8日	国内
Nuclear Weak Interactions in Core-Collapse Supernovae (ポスター)	Shun Furusawa	Neutrino2018, Kongresshaus, Heidelberg, Germany	2018/6/6	国際
Equations of state of hot and dense nuclear matter for gravitational wave physics(口頭)	Shun Furusawa	Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan	2018/10/10	国際
Equations of state of hot and dense	Shun Furusawa	Gravitational Wave Physics and	2018/11/27	国際

nuclear matter for gravitational wave physics(口頭)		Astronomy: Genesis, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan		
Nuclear Physics Uncertainties in Core-Collapse Supernovae (招待、口 頭)	Shun Furusawa	Tsukuba-CCS workshop on “microscopic theories of nuclear structure and dynamics, Center for Computational Sciences, Tsukuba, Japan	2018/12/12	国際
Nuclei in Core- Collapse Supernovae (口頭)	Shun Furusawa	WORKSHOP ON QUANTUM MANY- BODY PROBLEMS IN PARTICLE, NUCLEAR, AND ATOMIC PHYSICS, Universi ty of Khanh Hoa, Nha Trang, Vietnam	2019/3/9	国際
天体物質の核統計平衡 における原子核物理の 不定性 (口頭)	古澤峻	九大理研ワークシ ョップ、理化学研 究所iTHEMS SUURI Cool Kobe	2018/11/22	国内

天体物質の核統計平衡における原子核物理の不定性（招待、口頭）	古澤峻	ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用、高エネルギー加速器研究機構 東海キャンパス	2019/2/19	国内
天体物質の核統計平衡における原子核物理の不定性（口頭）	古澤峻	日本物理学会年会 2019年春季年会、九州大学	2019/3/15	国内
ボルツマン輻射輸送コードを用いた3次元重力崩壊計算へ向けて（口頭）	大川博督	第4回ポスト「京」重点課題9研究報告会	2018/5/23	国内
ボルツマン輻射輸送コードを用いた回転大質量星の重力崩壊計算（ポスター）	山田章一	第5回HPCI成果報告会	2018/11/2	
Neutrinos and multimessenger signatures for a galactic supernova（口頭）	Kei Kotake	The 19th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN18), University of British Columbia (UBC) Vancouver, Canada	2018	国外
Gravitational-wave and Neutrino Signatures from core-collapse supernovae（口頭）	Kei Kotake	GW-genesis workshop on "Deciphering multi-dimensional nature of core-	2018	国外

		collapse SuperNovae via gravitational- wave and neutrino signatures” (SNeGWv2018)		
Gravitational-wave and neutrino signatures from core-collapse supernovae: review and perspectives (口頭)	Kei Kotake	Gamma-ray bursts and supernovae: from the central engines to the observer	2018	国外
Neutrino and Gravitational-wave Signatures from Core-Collapse Supernovae (口頭)	Kei Kotake	Gravitational- waves, ElectroMagnetic and Dark-Matter, Physics (GEMMA2018)	2018	国外
Exploding and Non- Exploding Core- Collapse Supernova Models in 3D and the Multi-messenger Analysis (口頭)	Kei Kotake	TDLI Workshop on the Exploding Universe	2018	国外
Status of the supernova simulations with 3DnSNe-IDSAs: Impact of EoS and Rotation (口頭)	Tomoya Takiwaki	XIXth Workshop on Nuclear Astrophysics	2019	国外
Signature of Collective Neutrino Oscillation in 8.8M _⊙ star (口頭)	Tomoya Takiwaki	Revealing the history of the universe with underground	2019	国外

		particle and nuclear research 2019		
Neutrino Radiation Hydrodynamic Simulation of an Ultra-stripped Type Ic Supernova (ポスタ ー)	Tomoya Takiwaki	10th DTA symposium Stellar deaths and their diversity	2019	国外
超新星爆発の長時間計 算と元素合成に向けて (口頭)	滝脇知也	「京からポスト京 に向けて」シンポ ジウム	2019	国内
ニュートリノ振動を考 慮した. ニュートリノ スペクトルの系統的研 究 (口頭)	滝脇知也	新学術地下素核研 究会	2019	国内
Chiral Magnetic Effect in Proto- Neutron Stars (口 頭)	滝脇知也	Spintronics: from electrons to quarks	2018	国内
Recent Status of Core-collapse supernova Simulations from viewpoint of the microphysics (口頭)	Tomoya Takiwaki	APS symposium Hawaii2018	2018	国外
Supernova dynamics uncovered by three dimensional simulations (口頭)	Tomoya Takiwaki	SNeGWv2018	2018	国外
Three-dimensional simulations of rapidly rotating core-collapse supernovae (ポスター)	Tomoya Takiwaki	IWARA2018	2018	国外

On supernovae in binary systems (口頭)	Yudai Suwa	XIXth Nuclear Astrophysics workshop	2019	国外
On the minimum mass of neutron stars (口頭)	Yudai Suwa	10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity"	2019	国外
Importance of late-time neutrino light curves (口頭)	Yudai Suwa	Deciphering multi-dimensional nature of core-collapse SuperNovae via gravitational-wave and neutrino signatures	2018	国外
Supernovae from binary systems (口頭)	Yudai Suwa	GAMMA-RAY BURSTS AND SUPERNOVAE: FROM THE CENTRAL ENGINES TO THE OBSERVER	2018	国外
Multi-D long-term simulations of core-collapse supernovae (口頭)	Ko Nakamura	XIXth Nuclear Astrophysics workshop	2019	国外
Systematic features of neutrino from core-collapse supernovae (口頭)	Ko Nakamura	Revealing the history of the universe with underground particle and	2019	国内

		nuclear research 2019		
core-collapse simulations for a binary evolution model of SN 1987A progenitor (口頭)	Ko Nakamura	10th DTA symposium "Stellar deaths and their diversity"	2019	国内
Multi-messenger Signal Predictions from Multi- dimensional Core- collapse Supernova Simulations (ポスタ ー)	Ko Nakamura	SNeGWv2018	2018	国内
"Core collapse of massive stars (11.2- 70Msun) and black- hole formation with 3DGR spectral neutrino transport" (口頭)	Takami Kuroda	660. Wilhelm und Else Heraeus- Seminar, Germany	2018	国外
"Various GW emission mechanisms inside the SN core" (口頭)	Takami Kuroda	GWASNe2018	2018	国外
Correlation Between GWs and Neutrinos from Core-Collapse Supernovae" (口 頭)	Takami Kuroda	Fifteenth Marcel Grossmann Meeting	2018	国外

サブ課題C

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
An empirical model for the spatial distribution of cluster galaxies (ポスター)	大木 平	愛媛大学	2018/6/6	国内
ダークハロー形成史に基づく銀河の星形成率のモデル化（口頭）	大木 平	国立天文台	2018/8/27	国内
経験的銀河モデルで探る銀河団銀河の星形成停止過程（口頭）	大木 平	兵庫県立大学	2018/9/21	国内
Clustering of optical and X-ray AGNs in a semi-analytic model (ポスター)	Taira Oogi	Tohoku University	2018/11/2	国内
Modeling galaxy quenching and spatial distributions of star-forming and quenched galaxies (口頭)	Taira Oogi	KIAS	2018/11/8	国外
準解析的モデルによるAGN自己相関（ポスター）	大木 平	京都大学	2018/12/19	国内
銀河と活動銀河核の準解析的モデルとすばるHSCサーベイ（口頭）	大木 平	筑波大学東京キャンパス	2019/1/10	国内
Modelling galaxy quenching and spatial distributions of star-forming and	Taira Oogi	ASIAA	2019/3/11	国外

quenched galaxies (口頭)				
準解析的モデルによるAGN自己相関の研究 (口頭)	大木 平	法政大学	2019/3/16	国内
準解析的モデルによるAGN自己相関の研究 (口頭)	大木 平	鹿児島大学	2019/3/26	国内
Statistical Computational Cosmology with Big Astronomical Data	吉田直紀	理研計算科学研究機構	2019/2/20	国内
Flux Emergence and Eruptions in Accretion Disks and Galactic Gas Disks (招待講演)	Ryoji Matsumoto, Takuma Tomiyoshi	東京大学 (Flux Emergence Workshop 2019 (FEW2019))	2019年3月	国内
天体活動と宇宙進化の大規模数値シミュレーション (口頭発表)	松元亮治	九州大学 (日本物理学会第74回年次大会)	2019年3月	国内
Revealing the nature of dark matter by ultralarge cosmological simulations and next generation wide-field spectroscopy observations (口頭発表)	Tomoaki Ishiyama	京都大学基礎物理学研究所 (Why does the Universe accelerate?- Exhaustive study and challenge for the future)	2019年3月	国内
大規模宇宙論的シミュレーションを用いた銀河古成分の研究 (口頭発表)	石山智明	国立天文台 (2018年度天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング)	2019年1月	国内

初代星由来の銀河間物質重元素汚染（ポスター発表）	桐原崇亘，梅村 雅之，長谷川 賢二，石山 智明，森 正夫，鈴木 尚孝，大内 正己	京都大学 基礎物理学研究所（第31回理論懇シンポジウム）	2018年12月	国内
Observability of low mass Pop III survivors in the Milky Way and dwarf galaxies（口頭発表）	Tomoaki Ishiyama	Kavli IPMU, University of Tokyo (Stellar Archaeology as a Time Machine to the First Stars)	2018年12月	国内
相対論的衝撃波の Particle-In-Cellシミュレーション（招待講演）	松本洋介	宇宙線研究所（宇宙線研小研究会「高エネルギー天体現象の多様性」）	2018年11月	国内
Where are the low mass Pop III stars？（口頭発表）	Tomoaki Ishiyama	Shanghai, China (The life and Times of the Milky Way)	2018年11月	国外
Magnetic field saturation of the ion Weibel instability in interpenetrating relativistic plasmas（招待講演）	Yosuke Matsumoto, Makoto Takamoto, Tsunehiko N. Kato	金沢商工会議所会館，石川県文教会館（2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP)）	2018年11月	国内
Hierarchical formation of dark matter halos near the free streaming scale and implications for	Tomoaki Ishiyama	Tainan, Taiwan (The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018))	2018年10月	国外

annihilation signals (口頭発表)				
イオンワイベル不安定の飽和過程と磁場生成 (口頭発表)	松本 洋介, 高本 亮, 加藤 恒彦	成蹊大学 (H30年 度名古屋大学宇宙 地球環境研究所お よび国立極地研究 所 共同研究集会 「STEシミュレー ション研究会: プ ラズマ-大気複合 システムのシミュ レーション研 究」)	2018年9月	国内
ダークマターシミュレーション、最近の進展 (招待講演)	石山智明	国立天文台 (第9 回DTAシンポジウ ム ダークマター ハロー研究会)	2018年8月	国内
Global Magnetohydrodynamic Simulations of Coexisting Hot and Cool Disks in Black Hole Candidates (ポ スター発表)	Ryoji Matsumoto	Vienna, Austria (XXXth General Assembly of the International Astronomical Union)	2018年8月	国外
Formation of soft X- ray emitting regions in Seyfert galaxies (口頭発表)	R. Matsumoto	Sigtuna, Sweden (Time for Accretion)	2018年8月	国外
Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Black Hole Accretion Disks (招待講演)	Ryoji Matsumoto	Chungnam National Univ., Korea (8th East- Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and	2018年7月	国外

		Astrophysical Plasmas (EASW8))		
3D PIC simulations of high-Mach-number shocks and associated electron accelerations (口頭発表)	Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino	Kurashiki Kokusai Hotel (12th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA))	2018年5月	国内
Cole-Kärkkäinen電磁場数値解法を用いた数値チェレンコフ放射の抑制特性 (ポスター発表)	松本洋介、細谷周平	幕張メッセ(日本地球惑星科学連合連合大会2018年大会)	2018年5月	国内
Magnetohydrodynamic Simulations of Disk Dynamo and State Transitions (口頭発表)	R. Matsumoto	Princeton Univ., USA (MPPCワークショップ Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics Workshop 2018)	2018年4月	国外
High Performance Cosmological Simulations for Next Generation Wide and Deep Surveys (招待講演)	Tomoaki Ishiyama	Madrid, Spain (SIMULATED SKIES FOR NEW-GENERATION SPECTROSCOPIC SURVEYS)	2018年4月	国外
Effects of magnetic field on active galactic nuclei (accretion disk), 口頭発表(招待)	大須賀健	東京 (高エネルギー宇宙物理学の最前線と2020/30年代のロードマップ)	2019年3月	国外

ブラックホール降着円盤の理論と観測への期待, 口頭発表(招待)	大須賀健	東京 (Polarimetry in the ALMA era: A New Crossroads of Astrophysics)	2019年3月	国内
ボルツマン方程式を解く一般相対論的磁気流体コードによる超臨界降着流シミュレーション, 口頭発表	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
超臨界降着流を伴うブラックホール・中性子星の輻射スペクトルの質量降着率依存性, 口頭発表	川島朋尚、大須賀健、高橋博之	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
X線連星のハード状態における熱駆動型円盤風, 口頭発表	都丸亮太、大須賀健、Chris Done、高橋忠幸	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
中性子星への超臨界降着柱モデルによる超高光度 X 線源のX線パルスの計算, 口頭発表	井上壮大、大須賀健、川島朋尚	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
偏光の一般相対論的輻射輸送計算による活動銀河核ジェットの構造解明, 口頭発表	恒任優、嶺重慎、大須賀健、川島朋尚、中村雅徳	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
超臨界降着流の大域計算、ポスター発表	北木孝明、嶺重慎、大須賀健、高橋博之、川島朋尚	東京 (日本天文学会)	2019年3月	国内
ブラックホール・中性子星への超臨界降着流	川島朋尚	京都 (高感度・広帯域X線観測で探	2019年3月	国内

の輻射スペクトル計算, 口頭発表(招待)		るブラックホール 降着現象の物理)		
超臨界降着流・噴出流 のダイナミクス ~ブラ ックホール vs 中性子 星~, 口頭発表(招待)	大須賀健	京都 (高感度・広 帯域X線観測で探 るブラックホール 降着現象の物理)	2019年3月	国内
Accretion onto isolated BHs and its observational signatures, 口頭発表	大須賀健	新潟 (Area workshop 2019)	2019年2月	国内
一般相対論的輻射輸送 コード” RAIKOU” の開 発と中性子星・恒星質 量ブラックホール・超 大質量ブラックホール への適用, 口頭発表	川島朋尚	千葉 (ブラックホ ール降着流ミニワ ークショップ)	2019年2月	国内
ボルツマン方程式を解 く降着円盤のGR-RMHDシ ミュレーション, 口頭 発表	朝比奈雄 太、高橋博 之、大須賀 健	千葉 (ブラックホ ール降着流ミニワ ークショップ)	2019年2月	国内
円盤風の噴出による円 盤構造の変化について, 口頭発表	大須賀健	千葉 (ブラックホ ール降着流ミニワ ークショップ)	2019年2月	国内
Development of a GR- RMHD code based on solving the Boltzmann equation, 口頭発表	朝比奈雄 太、高橋博 之、大須賀 健	筑波 (Radiation Hydrodynamic Approaches to the Study of Black Hole Accretion and Outflows)	2019年2月	国内
Radiative spectra of super-Eddington accretion flows onto BHs and NSs, 口頭発表	川島朋尚、 大須賀健、 高橋博之	筑波 (Radiation Hydrodynamic Approaches to the Study of Black Hole	2019年2月	国内

		Accretion and Outflows)		
General relativistic radiation magnetohydrodynamic simulations of accretion flows, 口頭発表	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	東京 (Max Planck Princeton Center Workshop 2019)	2019年2月	国内
GR- ν RMHD: 振動数依存型の一般相対論的輻射磁気流体コード開発、ポスター発表	高橋博之、大須賀健	東京 (CfCAユーザーミーティング)	2019年1月	国内
ボルツマン方程式を解く一般相対論的磁気流体コードの開発, 口頭発表	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	東京 (CfCAユーザーミーティング)	2019年1月	国内
振動数依存の一般相対論的輻射輸送コードの開発と中性子星・ブラックホール超臨界降着流への適用, 口頭発表(招待)	川島朋尚、大須賀健、高橋博之	東京 (CfCA ユーザーミーティング)	2019年1月	国内
一般相対論的輻射輸送コードの開発およびブラックホール・中性子星の超臨界降着流研究への適用, 口頭発表	川島朋尚、大須賀健、高橋博之	東京 (素粒子・原子核・宇宙 「京からポスト京に向けて」 シンポジウム)	2019年1月	国内
ボルツマン方程式を解いた一般相対論的輻射MHDコードの開発, ポスター発表	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	京都 (理論懇シンポジウム)	2018年12月	国内
Development of a general relativistic radiation magnetohydrodynamical code based on solving	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	石川 (AAPPS-DPP)	2018年11月	国内

Boltzmann equation, 口頭発表				
Global Radiatin Hydrodynamic Simulation of Hard- to-Soft Transition in Black Hole Accretion Flows	五十嵐太 一、加藤成 晃、高橋博 之、大須賀 健、松元亮 治	石川 (AAPPs-DPP)	2018年11月	国内
一般相対論的輻射磁気 流体シミュレーション の進展と今後の課題, 口頭発表	大須賀健	兵庫(第二回 ポス ト「京」時代の天 体形成シミュレー ション研究会)	2018年10月	国内
Numerical simulations of super-critical accretion flows onto BHs and NSs with application to ULXs, 口頭発表(招待)	川島朋尚	ポーランド (Slim accretion disks workshop)	2018年10月	国外
ブラックホール降着流 の輻射磁気流体シミュ レーション、口頭発表	五十嵐太 一、加藤成 晃、高橋博 之、大須賀 健、松元亮 治	大阪 (日本流体力 学会)	2018年9月	国内
ボルツマン方程式を解 いた一般相対論的輻射 磁気流体コードの開発, 口頭発表	朝比奈雄 太、高橋博 之、大須賀 健	大阪 (日本流体力 学会)	2018年9月	国内
X線連星における降着円 盤風の放射流体シミュ レーション、口頭発表	都丸亮太、 大須賀健、 Chris Done、高橋 忠幸	兵庫 (日本天文学 会)	2018年9月	国内
スリム円盤モデルは正 しかったのか?、口頭 発表	北木孝明、 嶺重慎、大	兵庫 (日本天文学 会)	2018年9月	国内

	須賀健、川島朋尚			
活動銀河核におけるシンクロトン偏光輻射輸送計算、口頭発表	恒任優、嶺重慎、大須賀健、川島朋尚	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
ラインフォース駆動型円盤風の金属量依存性：銀河-SMBH共進化への影響、口頭発表	野村真理子、大向一行、大須賀健	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
円盤スペクトルが超臨界降着に与える影響、口頭発表	竹尾英俊、稲吉恒平、大須賀健、高橋博之、嶺重慎	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
ボルツマン方程式を解いた一般相対論的輻射磁気流体コードの開発、口頭発表	朝比奈雄太、高橋博之、大須賀健	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
ブラックホール降着流におけるハード・ソフト遷移の大局的輻射磁気流体シミュレーション、口頭発表	五十嵐太一、加藤成晃、高橋博之、大須賀健、松元亮治	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
一般相対論的輻射輸送計算で探る超臨界降着ブラックホール・中性子星の輻射スペクトルの差異とその起源、口頭発表	川島朋尚、大須賀健、高橋博之	兵庫（日本天文学会）	2018年9月	国内
輻射抵抗下のリコネクションと天体-磁気圏角運動量輸送、口頭発表	高橋博之	東京（STEシミュレーション研究会-プラズマ-大気複合システムのシミ	2018年9月	国内

		ユレーション研究 -)		
Super-Eddington accretion onto neutron stars and black holes, 口頭発表 (招待)	川島朋尚	ドイツ (TeVPA2018)	2018年8月	国外
Radiation-MHD simulations of super-Eddington accretion flows and outflows, 口頭発表 (招待)	大須賀健	スウェーデン (time for accretion)	2018年8月	国外
Supercritical Accretion Flows in ULXs, 口頭発表 (招待)	川島朋尚	スウェーデン (time for accretion)	2018年8月	国外
Numerical simulations of super-Eddington accretion flows and outflows around black holes and neutron stars, 口頭発表 (招待)	大須賀健	アメリカ合衆国 (42nd COSPAR Scientific Assembly)	2018年7月	国外
Super-Eddington flows and spectra, 口頭発表 (招待講演)	大須賀健	スペイン (Ultra-luminous X-Ray Pulsars)	2018年6月	国外
Radiation hydrodynamic simulations of super-critical accretion columns onto neutron stars, 口頭発表	川島朋尚、大須賀健、嶺重慎、小川拓未	スペイン (Ultra-luminous X-Ray Pulsars)	2018年6月	国外
活動銀河核アウトフローによる星間空間フィードバック, 口頭発表	朝比奈雄太、野村真理子、大須賀健	愛知 (銀河系中心部研究会2018)	2018年6月	国内

On a spin signature in black hole shadow of M87, 口頭発表	川島朋尚、 紀基樹	宮崎 (The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields)	2018年5月	国内
Numerical Study of Supercritical Accretion onto Black Holes and Neutron Stars, 口頭発表	高橋博之、 大須賀健	宮崎 (The Power of Faraday Tomography: towards 3D Mapping of Cosmic Magnetic Fields)	2018年5月	国内
Radiation-MHD simulations of accretion flows and outflows around black holes and neutron stars, 口頭発表(招待講演)	大須賀健	アメリカ合衆国 (Max-Planck/Princeton Center for Plasma Physics Workshop)	2018年4月	国外
Higher-order Vlasov-Poisson Simulation for Large-Scale Simulation with Massive Neutrino (口頭)	S. Tanaka, K. Yoshikawa, N. Yoshida	UC Davis (XXX IUPAP Conference on Computational Physics)	2018年 7月 29日～8月2 日	国外
ブラソフ方程式の高精度数値解法 (口頭)	田中 賢	成蹊大学 (宇宙地球環境研究所および国立極地研究所共同研究集会 STE シミュレーション研究会)	2018年9月3 日-5日	国内
Vlasovシミュレーションによる宇宙大規模構	田中 賢	国立天文台 (天文シミュレーションプロジェクト)	2019年1月 16日	国内

造形成におけるニュートリノの影響（口頭）		2018年度ユーザーミーティング)		
ニュートリノによる宇宙大規模構造への力学的影響（口頭）	吉川 耕司	兵庫県立大学（日本天文学会・2018年秋季年会）	2018年9月19日	国内
SIMD命令を用いた重力多体計算とSPH計算の高速化（口頭）	吉川 耕司	国立天文台（天文シミュレーションプロジェクト2018年度ユーザーミーティング）	2019年1月16日	国内
Vlasov-Poisson simulation of cosmic neutrinos in the large-scale structure formation（口頭）	K. Yoshikawa	National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan (The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018))	2018年10月24日	国外
Numerical simulation of cosmic relic neutrinos in the large-scale structure formation（口頭）	K. Yoshikawa	YITP, Kyoto University（新学術領域研究「加速宇宙」研究会）	2019年3月4日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

サブ課題A

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・ 外の別
Topological susceptibility of QCD with dynamical Möbius domain-wall fermions	S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko	PTEP 2018 043B07	2018/4/21	国外
Testing the criterion for correct convergence in the complex Langevin method	Keitaro Nagata, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki	JHEP05(2018)004	2018/5/2	国外
Lattice computation of the Dirac eigenvalue density in the perturbative regime of QCD	Katsumasa Nakayama, Hidenori Fukaya Shoji Hashimoto	Phys. Rev. D 98, 014501 (2018)	2018/7/3	国外
Nucleon charges with dynamical overlap fermions	N. Yamanaka, S. Hashimoto and T. Kaneko, H. Ohki, (JLQCD Collaborat ion)	Phys. Rev. D 98, 054516 (2018)	2018/9/25	国外
Complex Langevin calculations in finite density QCD at	Keitaro Nagata, Jun	Phys. Rev. D 98, 114513 (2018)	2018/12/26	国外

large $\mu = T$ with the deformation technique	Nishimura, Shinji Shimasaki			
Observation of approximate SU(2)CS and SU(2nf) symmetries in high temperature lattice QCD	Christian Rohrhofer, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Leonid Glozman, Shoji Hashimoto, Christian B. Lang, Sasa Prelovsek	Nucl. Phys. A982 (2019) 207-210	2019/1/22	国外

サブ課題B格子QCD

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Most Strange Dibaryon from Lattice QCD	Gongyo, Shinya; Sasaki, Kenji; Aoki, Sinya; Doi, Takumi; Hatsuda, Tetsuo; Ikeda, Yoichi; Inoue, Takashi; Iritani, Takumi; Ishii, Noriyoshi; Miyamoto, Takaya; Nemura, Hidekatsu (RIKEN, Nishina Ctr, Wako, Saitama 3510198, Japan), Sasaki, Kenji; Aoki, Sinya; Miyamoto, Takaya (Kyoto Univ, Ctr Gravitat Phys, Yukawa Inst Theoret Phys, Kyoto 6068502, Japan), Aoki, Sinya (Univ Tsukuba, Ctr Computat Sci, Ibaraki 3058571, Japan), Doi, Takumi; Hatsuda, Tetsuo (RIKEN,	PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol. 120 (2018)	英語	国外

	iTHEMS Program, Wako, Saitama 3510198, Japan), Ikeda, Yoichi; Ishii, Noriyoshi; Nemura, Hidekatsu (Osaka Univ, RCNP, Osaka 5670047, Japan), Inoue, Takashi (Nihon Univ, Coll Bioresource Sci, Fujisawa, Kanagawa 2520880, Japan)			
--	--	--	--	--

サブ課題B原子核

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Advances in the Monte Carlo Shell Model for Understanding Nuclear Structure	Takashi Abe	JPS Conf. Proc. 23 (2018) 012009	2018年10月	国内
Uncertainty quantification in the nuclear shell model	S. Yoshida, N. Shimizu, T. Togashi, and T. Otsuka	Physical Review C 誌 (Phys. Rev. C 98, 061301 (R) (2018))	2018年12月 6日	国外
Systematic shell-model study of beta-decay properties and Gamow-Teller strength distributions in $A \sim 40$ neutron-rich nuclei	S. Yoshida, Y. Utsuno, N. Shimizu, and T. Otsuka	Physical Review C 誌 (Phys. Rev. C 97, 054321 (2018))	2018年5月 18日	国外
g-factor measurement of 2738 keV isomer in ^{135}La	Md. S. R. Laskar, ... N. Shimizu, Y. Utsuno, ...	Phys. Rev. C 99, 014308 (2019).	2018年7月	国外
Variational Monte Carlo method for shell-model calculations in odd-mass nuclei and restoration of symmetry	N. Shimizu, and T. Mizusaki	Phys. Rev. C 98, 054309 (2018)	2018/11/15	国外
Why does the sign problem occur in evaluating the	T. Mizusaki, M. Oi, and N. Shimizu	Phys. Lett. B 779, 237 (2018).	2018/4/10	国外

overlap of HFB wave functions?				
Is it possible to study neutrinoless decay by measuring double Gamow-Teller transitions?	J. Menendez, N. Shimizu and K. Yako	Conf. Ser. 1056, 012307 (2018). 8.	2018年7月	国外
Investigating the large deformation of the 5/2+ isomeric state in ^{73}Zn : An indicator for triaxiality	X. F. Yang, Y. Tsunoda, ..., T. Otsuka, ...	Phys. Rev. C 97, 044324	2018/04/30	国外
Is seniority a partial dynamic symmetry in the first $\nu g_{9/2}$ shell?	A. I. Morales, ..., T. Otsuka, Y. Tsunoda, ...	Phys. Lett. B 781, 706	2018/06/10	国外
Novel Shape Evolution in Sn Isotopes from Magic Numbers 50 to 82	T. Togashi, Y. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, and M. Honma	Phys. Rev. Lett. 121, 062501	2018/08/10	国外
Characterization of the shape-staggering effect in mercury nuclei	B. A. Marsh, ..., Y. Tsunoda, ..., T. Otsuka, ...	Nature Physics 14, 1163	2018/10/01	国外
Evidence for Coexisting Shapes through Lifetime Measurements in ^{98}Zr	P. Singh, ..., T. Otsuka, ..., T. Togashi, Y. Tsunoda, ...	Phys. Rev. Lett. 121, 192501	2018/11/09	国外

Enhanced Quadrupole and Octupole Strength in Doubly Magic ^{132}Sn	D. Rosiak, ..., Y. Tsunoda, T. Togashi, ..., T. Otsuka, ...	Phys. Rev. Lett. 121, 252501	2018/12/18	国外
β -decay study of the ^{66}Mn - ^{66}Fe - ^{66}Co - ^{66}Ni decay chain	M. Stryjczyk, Y. Tsunoda, ..., T. Otsuka, ...	Phys. Rev. C 98, 064326	2018/12/28	国外
Revised B(E3) transition rate and structure of the 3-level in ^{96}Zr	L. W. Iskra, ..., T. Otsuka, T. Togashi, Y. Tsunoda, ...	Phys. Lett. B 788, 396	2019/01/10	国外
Interplay between nuclear shell evolution and shape deformation revealed by magnetic moment of ^{75}Cu	Y. Ichikawa, ..., Y. Tsunoda, ..., T. Otsuka, ...	Nature Physics 15, 321	2019/01/21	国外
Enhanced Electric Dipole Strength for the Weakly Bound States in ^{27}Ne	C. Loelius, ... T. Otsuka, ..., N. Tsunoda,	Phys. Rev. Lett. 121, 262501	2018/12/28	国外
Structure of ^{31}Mg : Shape coexistence revealed by β - γ spectroscopy with spin-polarized ^{31}Na	H. Nishibata, ..., N. Tsunoda, and T. Otsuka	Phys. Rev. C 99, 024322	2019/02/26	国外

<p>Nuclear moments of the low-lying isomeric 1^+ state of ^{34}Al: Investigation on the neutron $1p1h$ excitation across $N = 20$ in the island of inversion</p>	<p>Z. Y. Xu, ... T. Otsuka, ..., N. Tsunoda, Y. Utsuno, ... ,</p>	<p>Phys. Lett. B 782, 619</p>	<p>2018/06/06</p>	<p>国外</p>
<p>Structure of exotic nuclei based on nuclear force</p>	<p>N. Tsunoda, T. Otsuka, N. Shimizu, ...</p>	<p><i>Proceedings of the Ito International Research Center Symposium "Perspectives of the Physics of Nuclear Structure"</i> 012014.</p>	<p>2018/04/01</p>	<p>国内</p>

サブ課題B宇宙

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Global simulations of strongly magnetized remnant massive neutron stars formed in binary neutron star mergers	Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi and Masaru Shibata	PRD, 97, no. 12, 124039 (2018)	2018年6月	国外
Repeating and non-repeating fast radio bursts from binary neutron star mergers	Shotaro Yamasaki, Tomonori Totani and Kenta Kiuchi	PASJ, 70, 39 (2018)	2018年4月	国内
Mass Ejection from the Remnant of Binary Neutron Star Merger: Viscous-Radiation Hydrodynamics Study	Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi, Nobuya Nishimura, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata	ApJ, 860, 64 (2018)	2018年6月	国外
Synchrotron radiation from the fast tail of dynamical ejecta of neutron star mergers	Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata, Ehud Nakar, Tsvi Piran	ApJ, 867, 95 (2018)	2018年11月	国外

Nothermal afterglow of the binary neutron star merger GW170817: a more natural modeling of electron energy distribution leads to a qualitatively different new solution	Haoxiang Lin, Tomonori Totani, Kenta Kiuchi	MRNAS, 453, 2155 (2019)	2019年2月	国外
Radiative-transfer simulation for the optical and near-infrared electromagnetic counterparts of GW170817	Kyohei Kawaguchi, Masaru Shibata, Masaomi Tanaka	Astrophys. J. 865, L21 (2019)	2018年9月	国外
On the minimum mass of neutron stars	Yudai Suwa, Takashi Yoshida, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Hideyuki Umeda	Monthly Notice of Royal Astronomical Society	2018年8月	国外
Black hole formation and explosion from rapidly rotating very massive stars	Haruki Uchida, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Takashi Yoshida	Astrophys. J. 870, 98 (2019)	2019年1月	国外

Gravitational waves from very massive stars collapsing to a black hole	Haruki Uchida, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Takashi Yoshida	Physical Review D 99, 041402 (2019)	2019年2月	国外
On the Neutrino Distributions in Phase Space for the Rotating Core-collapse Supernova Simulated with a Boltzmann-neutrino-radiation-hydrodynamics Code	Akira Harada, Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, and Shoichi Yamada	The Astrophysical Journal, 872, 181	2019 February 25	国外
Comparing treatments of weak reactions with nuclei in simulations of core-collapse supernovae	H. Nagakura, S. Furusawa, H. Togashi, S. Richers, K. Sumiyoshi and S. Yamada	Astrophysical Journal Supplement Series 240 (2019) 38 (32 pages)	2019 February 13	国外
宇宙の大イベント超新星爆発とその鍵を握るニュートリノ—ニュー	住吉光介・千葉敏	日本原子力学会誌「アトモス」、第	2018年12月号	国内

トリノ輸送計算が明かす物質創生の筋道—		60巻第12号p. 30-34		
On the importance of progenitor asymmetry to shock revival in core-collapse supernovae	Hiroki Nagakura, Kazuya Takahashi and Yu Yamamoto	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 483, Issue 1, p.208-222. 2018	2019 February	国外
Linear Analysis of Fast-Pairwise Collective Neutrino Oscillations in Core-Collapse Supernovae based on the Results of Boltzmann Simulations	<i>Milad Delfan Azari, Shoichi Yamada, Taiki Morinaga, Wakana Iwakami, Hiroki Nagakura and Kohsuke Sumiyoshi</i>	Physical Review D Accepted		国外
Characterizing the Gravitational Wave Signal from Core-Collapse Supernovae	<i>David Radice, Viktoriya Morozova, Adam Burrows, David Vartanyan and Hiroki Nagakura</i>	The Astrophysical Journal Letter accepted		国外
Sensitivity of nuclear statistical equilibrium to	Shun Furusawa	Physical Review C 98, 065802 (2018)	2018年12月	国外

nuclear uncertainties during stellar core collapse				
Importance of ^{56}Ni production on diagnosing explosion mechanism of core-collapse supernova	Suwa, Yudai; Tominaga, Nozomu; Maeda, Keiichi	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 483, Issue 3, p.3607-3617		国外
A Linear and Quadratic Time-Frequency Analysis of Gravitational Waves from Core-collapse Supernovae	Kawahara, Hajime; Kuroda, Takami; Takiwaki, Tomoya; Hayama, Kazuhiro; Kotake, Kei	The Astrophysical Journal, Volume 867, Issue 2, article id. 126, 13 pp. (2018).		国外
Global comparison of core-collapse supernova simulations in spherical symmetry	O' Connor, Evan et al.	Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 45, Issue 10, pp. 104001 (2018).		国外
Broad-band emission properties of central engine-powered supernova ejecta interacting with a circumstellar medium	Suzuki, Akihiro; Maeda, Keiichi	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 478, Issue 1, p.110-125		国外
Circular polarization of	Hayama, Kazuhiro;	Monthly Notices of the Royal		国外

gravitational waves from non-rotating supernova cores: a new probe into the pre-explosion hydrodynamics	Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya	Astronomical Society: Letters, Volume 477, Issue 1, p.L96-L100		
A full general relativistic neutrino radiation-hydrodynamics simulation of a collapsing very massive star and the formation of a black hole	Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Thielemann, Friedrich-Karl	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 477, Issue 1, p.L80-L84		国外

サブ課題C

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
The New Numerical Galaxy Catalogue ($v2GC$): properties of active galactic nuclei and their host galaxies	Hikari Shirakata et al. (incl. Taira Oogi)	MNRAS, 482, 4846	2019	国外
ALMA 26 Arcmin ² Survey of GOODS-S at One Millimeter (ASAGAO): Average Morphology of High-z Dusty Star-forming Galaxies in an Exponential Disk ($n \approx 1$)	Seiji Fujimoto et al. (incl. Taira Oogi)	ApJ, 861, 7	2018	国外
Acceleration of the tree method with a SIMD instruction set	Kodama Tetsushi, Ishiyama Tomoaki	Publ. Astron. Soc. Japan	2019年	国外
The New Numerical Galaxy Catalogue ($v2GC$): properties of active galactic nuclei and their host Galaxies	Shirakata Hikari, Okamoto Takashi, Kawaguchi Toshihiro, Nagashima Masahiro, Ishiyama Tomoaki, Makiya Ryu, Kobayashi Masakazu A R,	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	2019年2月	国外

	Enoki Motohiro, Oogi Taira, Okoshi Katsuya			
SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly α emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data	Inoue, A. K., Hasegawa, K., Ishiyama, T., Yajima, H., Shimizu, I., Umemura, M., Konno, A., Harikane, Y., Shibuya, T., Ouchi, M., Shimasaku, K., Ono, Y., Kusakabe, H., Higuchi, R., Lee, C.-H.	Publ. Astron. Soc. Japan	2018年6月	国外
Modeling evolution of dark matter substructure and annihilation boost	Hiroshima Nagisa, Ando Shin' ichiro, Ishiyama Tomoaki	Physical Review D	2018年6月	国外
Magnetic Field Saturation of the Ion Weibel Instability in Interpenetrating Relativistic Plasmas	Makoto Takamoto, Yosuke Matsumoto, Tsunehiko N. Kato	The Astrophysical Journal Letters	2018年6月	国外
Precursor Wave Emission Enhanced by Weibel Instability in Relativistic Shocks	Masanori Iwamoto, Takanobu Amano, Masahiro Hoshino, and	The Astrophysical Journal	2018年5月	国外

	Yosuke Matsumoto			
Systematic two-dimensional radiation hydrodynamic simulations of super-Eddington accretion flow and outflow: Comparison with the slim disk model	T. Kitaki, S. Mineshige, K. Ohsuga, T. Kawashima	Publication of the Astronomical Society of Japan	31-Oct	国外
Magnetohydrodynamic Simulations of a Plunging Black Hole into a Molecular Cloud	M. Nomura, T. Oka, M. Yamada, S. Takekawa K. Ohsuga, H. R. Takahashi, Y. Asahina	The Astrophysical Journal	19-May	国外
Phantom-GRAPe: A Fast Numerical Library to Perform N-body Calculations	K. Yoshikawa, A. Tanikawa	Research Notes of the American Astronomical Society	2018/12/13	国外

「重点課題⑨宇宙の基本法則と進化の解明」
実施計画

令和元年 5 月 31 日
国立大学法人筑波大学
青木慎也

【改訂履歴】

版	項目	ページ	主な改訂内容（概要）
1.0 (2015. 5. 29)			額の確認後、制定
2.0 (2017. 12. 22)	—	—	中間評価指摘事項を受け、版数変更して対応。
	改訂履歴	—	新規追加
	目次	—	「中間評価における指摘事項への対応状況」目次項目追加。
	1.（2）（3）	1-2	指摘事項に対応し修正。
	1.（4）	3	今後の関連実験・観測スケジュールを追記。
	1.（5）（6）	4-5	指摘事項に対応し追記。
	2－1.（2）	10-22	指摘事項に対応し修正。
	4.	33-38	中間評価における指摘事項への対応状況を追記。
2.1 (2019. 5. 31)	2-2.（3）	19	平成 29 年度終了時の内容を修正。

目次

1. 実施概要	1
(1) 目的・意義	1
(2) 研究開発内容	1
(3) 目標・期待される成果.....	1
(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ	3
(5) 年次計画	4
(6) 実施体制	7
(7) 必要計算資源.....	8
2. 研究開発内容詳細.....	9
2-1. サブ課題A. 究極の自然法則と宇宙開闢の解明.....	9
(1) 目的・意義	9
(2) 実施内容	10
(3) 目標・期待される成果.....	13
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと.....	15
(5) 実施体制	15
2-2. サブ課題B. 物質創成史の解明と物質変換.....	17
(1) 目的・意義	17
(2) 実施内容	17
(3) 目標・期待される成果.....	18
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと.....	22
(5) 実施体制	22
2-3. サブ課題C. 大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明	24
(1) 目的・意義	24
(2) 実施内容	24
(3) 目標・期待される成果.....	25
(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと.....	27
(5) 実施体制	28
2-4. サブ課題共通：分野振興および普及.....	29
3. 採択時の留意事項への対応状況	31
4. 中間評価における指摘事項への対応状況	33

1. 実施概要

(1) 目的・意義

素粒子から宇宙までの異なるスケールにわたる現象の精密計算を実現し、大型実験・観測のデータと組み合わせて、多くの謎が残されている素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史を解明することが、計算的手法を用いた素粒子・原子核・宇宙分野の最終的な目標である。その実現のため、本重点課題では、超弦理論による宇宙開闢のシミュレーションから原子核の構造計算、爆発的天体のシミュレーション、宇宙の大規模構造形成に至るサブ課題の研究を推進し、各課題で世界最先端の成果創出を目指す。HPCI 戦略プログラム分野5で行ってきた量子色力学による核力計算、中性子星合体のシミュレーション、ダークマター密度揺らぎの生成などの研究に加えて、SuperKEKB, J-PARC, RIBF, KAGRA, すばるなどの大規模実験・観測と連携した精密計算やデータ生成、および実験データの解析にも重点を置き、計算科学により素粒子・原子核・宇宙分野全体の発展に寄与する。

(2) 研究開発内容

宇宙の基本法則と進化の解明につながる、素粒子、原子核、宇宙分野の様々な研究テーマに関わる大規模シミュレーションをポスト「京」で実行するため、計算規模や時間の検討、コード開発やチューニングなどを実施すると同時に、ポスト京時代の研究に備えて、それぞれの研究分野における最先端の研究を継続的に実施し成果創出を目指す。

具体的な研究内容は、SuperKEKB と連携して標準理論を超える物理を探索するために必要な物理量の高精度計算（サブ課題 A）、宇宙初期に起こった QCD 相転移を含む QCD 相図の確定（サブ課題 A）、ゲージ重力対応の数値的検証による重力の本質の探求（サブ課題 A）、核力、ハイペロン力の格子 QCD による決定（サブ課題 B）、原子核変形メカニズムや不安定核の新奇な構造の核力に基づく探究（サブ課題 B）、クラスター形成などの第一原理的記述（サブ課題 B）、超重元素合成過程の探索や原子核変換技術の開発に必要な重い原子核構造計算（サブ課題 B）、 r 過程超重元素の起源の解明に繋がる超新星爆発や中性子星連星合体過程の高精度シミュレーション（サブ課題 B）、重力波観測に必須の重力波理論波形の導出および重力波テンプレートの開発（サブ課題 B）、広域サーベイ観測データ解析に必要な統計量を得るための構造形成シミュレーション（サブ課題 C）、残存ニュートリノ質量決定のための理論シミュレーション（サブ課題 C）、巨大ブラックホールの形成および進化過程解明のための磁気流体シミュレーション（サブ課題 C）、などである。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

（サブ課題 A） SuperKEKB と連携した標準理論を超える物理の探索を目指し、それに必要となるハドロン形状因子の精密決定を行う。具体的には、必要な計算精度を実現するためのパラメタ設定、コード開発及びチューニングの完了、予備的な準備計算によるパラメタ探索とその詳細な決定、などである（本格実施フェーズ終了時）。さらに、小林益川行列要素 $|V_{ub}|$ の決定に関わる B 中間子の崩壊定数と $B \rightarrow \pi l \nu$ 崩壊形状因子の 2% 程度の精度での計算の実現を目指す（ポスト「京」運用開始 5 年後）。

（サブ課題 A） ビッグバン過程で起こった相転移現象を定量的に解明する。そのために、フレーバー数 2 および 3 の QCD の相構造を明らかにする。

(サブ課題 A) 超弦理論の重要な予言であるゲージ重力対応を精密に検証する。具体的には、指数関数的膨張の持続期間 (e-folding) を決定し (本格実施フェーズ終了時)、初期宇宙の密度ゆらぎの計算にまで進めて、宇宙背景放射の観測結果と直接比較する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。

(サブ課題 B) バリオン間相互作用を定量的に決定する。具体的には、奇パリティ核力・ハイペロン力とスピン軌道力の計算の実現及び、3 バリオン力計算への準備をして (本格実施フェーズ終了時)、バリオン 2 体力の高統計計算を完了し、バリオン 3 体力計算を実行する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。

(サブ課題 B) 質量数 180 位までの鉛などの重い不安定核の構造計算を世界で初めて核力に密着させて行う。不安定核での殻進化や、原子核変形への核力の特徴的な効果を数値的に検証し、元素合成計算や核変換技術に必須の原子核構造・反応データとしての利用にも備える (本格実施フェーズ終了時)。新コードを開発してさらに重い原子核にも進み、ウラン、超ウラン元素の構造や反応の研究を進めつつ、超重元素探索にむけての研究に着手する。元素合成や核変換に必要な基礎データの取得を推進する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。

(サブ課題 B) 中性子星連星の合体による重元素合成に関する半定量的理解、ニュートリノ放射/磁気流体効果/一般相対論など爆発的天体現象解明に重要な効果を取り入れたシミュレーションコード整備、連星中性子星からの重力波観測に必須の重力波理論波形の導出、などを行う (本格実施フェーズ終了時)。観測的に多様性が示されている超新星爆発現象の再現、中性子星連星の合体過程の定量的理解および重力波・電磁波放射の予言、大型望遠鏡による観測結果との直接比較、観測と数値計算の協働による高エネルギー宇宙の新たな理解、などを実現する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。

(サブ課題 C) 高い並列化効率で 6 次元ボルツマンコードの数値シミュレーションを実現する。計算規模は、 128^6 格子数 (本格実施フェーズ終了時)、 256^6 格子数 (ポスト「京」運用開始 5 年後) である。

(サブ課題 C) 相対論的放射磁気流体コードの作成と最適化、放射輸送方程式の 6 次元計算により直接解くスキームの実装、相対論的な 3 次元電磁粒子コード及び 6 次元ブラソフコードの実装と最適化、巨大ブラックホール降着流の磁気流体・放射磁気流体シミュレーションの実施によるブラックホールの成長と降着円盤の時間発展の解明、銀河中心核活動による放射やジェットの影響の解明、などを行う (本格実施フェーズ終了時)。さらに、降着円盤の時間発展に対する磁気乱流の影響の解明、銀河中心核活動の統一的な理解、活動銀河で観測される高エネルギーガンマ線放射機構の解明、などを実現する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。

アウトカム成果

(サブ課題 A) 現代の素粒子物理学の大目標である標準模型を超える物理法則の発見に貢献する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。究極の自然法則の理解や宇宙開闢、特に空間 3 次元の宇宙創世やインフレーション前後の宇宙の理解が進展する (ポスト「京」運用開始 10 年後)。

(サブ課題 B) 必要な原子核反応計算データが出揃い、核変換技術への応用が進展する (ポスト「京」運用開始 5 年後)。核変換技術への応用を実現する (ポスト「京」運用開始 10 年後)。

(サブ課題 B) 2020 年代に本格稼働予定の重力波望遠鏡や大型光赤外望遠鏡での観測結果の理解および新しい天体現象発見 (超新星爆発の観測的多様性の解明、中性子星連星合体の初の発見、ガンマ線バーストの起源解明、キロノバと呼ばれる突発的天体起源の解明、ブラックホール形成過程の初観測、重力波観測とシミュレーション結果の協働による中性子星物理の理解) につながる (ポスト「京」運用開始 5 年

後、ポスト「京」運用開始10年後)。

(サブ課題C) 大規模銀河サーベイ観測の観測と数値シミュレーションとの比較によるニュートリノ質量の絶対値の決定に寄与する(ポスト「京」運用開始5年後)。大規模サーベイ観測と天体疑似カタログの直接比較による銀河や銀河中心ブラックホールの進化過程や宇宙再電離の描像の解明につながる(ポスト「京」運用開始10年後)。

(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ

素粒子・原子核・宇宙物理領域においては、計算科学はすでに欠かせない研究手法となっている。実験・観測で得られたデータの解析、通常の理論では計算できない現象の計算、地上実験では実現できない現象のシミュレーションなどを通じて、計算科学はこれらの分野を進展させる牽引役を果たしている。

研究対象や計算手法で共通点の多い物性科学の分野とは相互に研究情報を交換する連携が進みつつある。重点課題を通じてこうした取り組みをさらに進展させる。

今後の関連実験・観測スケジュール

	2018	2019	2020	2022		2025
サブ課題A	SuperKEKB Phase3 実験開始 (年末)					
サブ課題B	RIBF 加速器サイクロトロン改造 (年度末) J-PARC 実験 (含ハトロンホール拡張計画) CERN ISOLDE 加速器増強 CANDLES 実験進行中 LIGO, Virgo 新観測開始 (秋)	KAGRA 観測開始 (年末)			米ミシガン州立大 FRIB 加速器稼働	独重研 FAIR 加速器稼働
サブ課題C	すばる HSC サーベイ進行中		すばる PFS サーベイ開始 次期 X 線代替衛星観測開始 ESA Euclid サーベイ開始	LSST サーベイ開始		

(5) 年次計画

課題全体	中間目標 (平成29年度)	既存の計算資源を用いて各サブ課題での最先端の研究を続け、ポスト京での研究を視野に入れた中間的目標を達成すると同時に、ポスト京で実行するアプリの計算手法を確立する。
	最終目標 (平成31年度)	既存の計算資源を用いた各サブ課題での最先端の研究を継続してポスト京での研究につなげる。アプリの本格的な最適化を実施し、ポスト京で実行する準備を完了する。また現行の実験・観測と連携して、新たな科学的謎の解明に資する。

サブ課題名 (分担機関・責任者)	調査研究・準備研究フェーズ		本格実施フェーズ			
	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度
サブ課題A 究極の物理法則と宇宙開闢の解明 (高エネルギー加速器研究機構・橋本省二)	(目標) 関連分野の現状を調査、検討すべき点を整理する。 (実施内容) 関連する研究と実験プロジェクト等の現状・計画を調査し、具体的研究計画策定に向けて関係者で検討を進める。	(目標) ・各課題について、現状の問題点を整理して研究開発課題をまとめる。 ・研究体制を確立。 ・実験グループ等との連携体制を確立。 (実施内容) ・研究会等を通じて研究分野の最新情報を収集、課題を整理。 ・次年度に向けて研究組織等の体制を検討。人事公募を開始。 ・実験グループ等とのワークショップ等を開催。	(目標) ・ $D_{(s)}$ 中間子の形状因子計算における高精度計算手法の開発。 ・ミューオン異常磁気能率計算に必要な真空偏局の基礎計算。 ・有限温度 QCD 相転移における量子異常効果の研究。 ・一次元超対称ゲージ理論シミュレーション高速化。 (実施内容) ・統計精度を上げるための確率的評価手法の検証。 ・量子電磁力学効果を取り入れる手法の調査研究。 ・量子異常に対する擬ゼロモードの寄与を精密評価。 ・一次元シミュレーションアルゴリ	(目標) ・ $D_{(s)}$ 中間子から $B_{(s)}$ 中間子への外挿手法確立。セミレプトニック崩壊の高精度計算手法確立。 ・ミューオン異常磁気能率計算に必要な真空偏局の本格計算。 ・有限温度 QCD 相転移解明で必要となるカイラル対称性の精度を同定。 ・一次元超対称ゲージ理論シミュレーション実行。 (実施内容) ・計算手法の開発と予備的シミュレーションの実行および解析。 ・量子電磁力学効果を取り入れる手法の調査研究。	(目標) ・(平成 31 年度にかけて) $B_{(s)}$ 中間子崩壊定数およびセミレプトニック形状因子の決定。 ・(平成 31 年度にかけて)カイラル対称性をもつ有限温度相転移の小規模計算実行。 ・(平成 31 年度にかけて)一次元超対称ゲージ理論のさらに低温領域でのシミュレーション実行。 (実施内容) ・予備的シミュレーションの実行および解析。最適化作業。 ・ポスト京等さまざまな計算プラットフォームで性能の出る計算コードの開発	(目標) ・ $B_{(s)}$ 中間子崩壊定数およびセミレプトニック形状因子の決定。 ・カイラル対称性をもつ有限温度相転移の小規模シミュレーション実行。 ・一次元超対称ゲージ理論のさらに低温領域でのシミュレーション実行。 ・ポスト京向け最適化完了。 (実施内容) ・予備的シミュレーション実行および解析。最適化作業。 ・ポスト京等さまざまな計算プラットフォームで性能の出る計算コードの開発

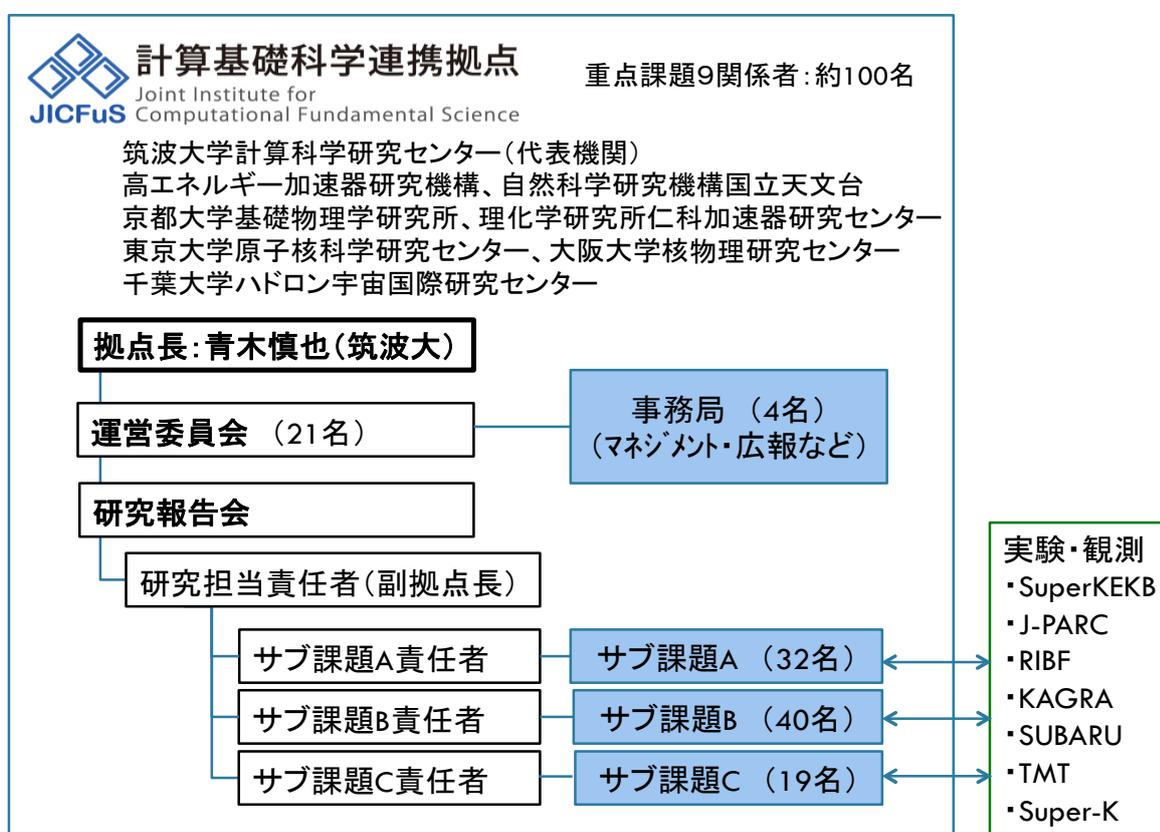
			ズムの改良。			
サブ課題B 物質創生史の解明と物質変換 (京都大学・柴田大)	(目標) 鉄より重い元素の起源解明という最終的な目標に向かってポスト京において実施すべき課題を調査し、QCD、原子核、宇宙分野それぞれで課題の絞り込みを行う。 (実施内容) 京での成果を鑑みながら、ポスト京で特に推進すべき計算内容を議論し、調査研究を進める。	(目標) ポスト京で実行する計算の規模とそのために用いるコードの物理的概要、アルゴリズムを決める。 (実施内容) ・QCD と宇宙分野に関しては、京での成果を鑑み、ポスト京で実行すべき研究課題、計算規模、およびそのために開発すべきコードを決定する。 ・原子核分野に関しては、核構造計算に必要な有効相互作用理論を構築し、最新の実験データとの比較・検証を行う。また AICS とのコードデザイン作業を開始する。	(目標) ポスト京で用いる新たなコードの開発を進めるとともに、元素合成計算や核変換研究に必要な原子核データを段階的に得る。 (実施内容) ・QCD 分野に関しては、京で未解明のバリオン間力の計算に向け統計精度の向上手法の開発を進める。 ・原子核分野に関しては、元素合成の理解に重要なエキゾチック核や、二重ベータ崩壊核の構造計算を始める。並行して軽い核のクラスター構造の第一原理計算を進める。 ・宇宙分野に関しては、一般相対論的輻射磁気流体コード、ボルツマンコード、超新星爆発用の輻射流体コードの開発を進める。 ・同時に京などを用いて科学的成果を段階的に創出する。	(目標) ポスト京で用いる新たなコードの開発と最適化を進めると同時に、元素合成計算や核変換技術研究に必要な原子核データを段階的に得る。 (実施内容) ・QCD 分野に関しては、京で未解明のバリオン間力の計算を進める。 ・原子核分野に関しては、核力に基づいた第一原理計算の対象領域を中重核領域へ進めるとともに、核変換技術に必要な長寿命核分裂生成物の一部核種の光吸収断面積計算を開始する。 ・宇宙分野に関しては、一般相対論的時輻射磁気流体コード、ボルツマンコード、超新星爆発用の輻射流体コードのチューンを進める。同時に京などを用いて科学的成果を段階的に創出する。	(目標) ポスト京で用いるコードの最適化を行うと同時に、京などを用いて科学的成果の創出も同時進行で行う。 (実施内容) ・QCD 分野に関しては、昨年度の研究を継続するとともに、3体力計算コードの開発と最適化に着手する。 ・原子核分野に関しては、より重い質量領域の有効相互作用理論を構築し検証するとともに、二重ベータ崩壊やエキゾチック核の構造計算を進める。 ・宇宙分野に関しては前年度までに開発したコードを用いて超新星爆発と中性子星連星の合体に対するテスト計算を京や第二階層 HPCI マシンで実行し、チューンを進めると同時に段階的に成果を創出する。特に重力波観測およびその対応電磁波観測と連動し、中性子星の状態方程式の解明やキロノバ現象の解明を進める。	(目標) ポスト京で用いるコードを完成させる。 (実施内容) ・QCD 分野に関しては、昨年度に引き続き、京で未解明の2体バリオン力の計算を進めると共に、3体力についても開発した計算コードを用い、テスト計算により半定量的な結果を得る。 ・原子核分野に関しては、中性子過剰核に現れるエキゾチックな構造とそれを引き起こすメカニズムの解明をおこなう。 ・宇宙分野に関しては30年度に引き続き、開発したコードを用いて超新星爆発と中性子星連星の合体に対するテスト計算を京や第二階層 HPCI マシンで実行し、段階的に成果を創出する。特に重力波観測およびその対応電磁波観測と連動し、中性子星の状態方程式の解明やキロノバ現象の解明を進める。

<p>サブ課題C 大規模数値計算と 広域宇宙観測デー タの融合による宇 宙進化の解明 (東京大学・吉田直 紀)</p>	<p>(目標) 科学成果を選定し、研究体制を構築する (実施内容) 計算コード開発と最適化を行う。</p>	<p>(目標) 重力N体、無衝突ボルツマン、一般相対論的流体、プラズマ計算各コードについて最適化を進める (実施内容) 宇宙大構造形成のN体計算およびBH降着流の一般相対論的流体計算を行う</p>	<p>(目標) 開発した各計算コードにより「京」上で天体形成進化のシミュレーションを行う。 (実施内容) ・超高解像度N体計算、ボルツマンコードによる構造計算を行う。また一般相対論的輻射流体計算によりBH降着流進化を追う。 ・一般相対論的4次元輻射磁気流体力学スキームを開発する。相対論的衝撃波のプラズマ粒子計算を行う。</p>	<p>(目標) 「京」上で構造形成および天体形成進化のシミュレーションを行う。 (実施内容) ・超高解像度N体計算、ボルツマンコードによる構造計算を行う。また一般相対論的輻射流体計算によりBH降着流進化を追う。 ・一般相対論的4次元輻射磁気流体力学スキームを開発する。相対論的衝撃波のプラズマ粒子計算を行う。</p>	<p>(目標) 各シミュレーションから宇宙観測データと比較する量を導き出す。また、多数のリアライゼーションを蓄積し、統計解析に必要な統計量を求める (実施内容) ・超高解像度N体計算、ボルツマンコードによる構造計算を行う。 ・一般相対論的輻射(電磁)流体計算によりBH降着流進化を追う。 ・相対論的衝撃波の長時間プラズマ粒子計算を行う。</p>	<p>(目標) 各シミュレーションから宇宙観測データと比較する量を導き出す。模擬観測カタログを作成し、観測データの統計解析を行う。 (実施内容) ・構造計算のアウトプット解析を行い、シミュレーションデータベースを構築する。 ・一般相対論的輻射(電磁)流体計算によりBH降着流進化を追う。 ・プラズマブラゾフコードを開発する。</p>
---	---	--	--	--	--	--

(6) 実施体制

本重点課題は、計算基礎科学連携拠点（筑波大学等8機関の連携拠点）がその中心的事業として実施する。国立大学法人筑波大学が中核機関として、分担機関である大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人京都大学、国立大学法人東京大学、独立行政法人理化学研究所、国立大学法人大阪大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台、国立大学法人千葉大学、国立大学法人広島大学、学校法人東邦大学と連携し、研究開発を推進する。

本重点課題は、サブ課題A、B および C からなる。これらが独立に研究を進めつつ、問題解決の手法や最適化などについて相互に協力して研究を進める体制をとる。このためサブ課題間の定期的な研究報告会を設けて連携を密にする。ポスト京でのアプリ開発ではポスト京開発主体と連携してコデザインの一翼を担う。従来のHPCI戦略プログラム分野5での体制と同様に計算機科学者、数学者、統計学者を含む計算基礎科学連携拠点(JICFuS)がこれらの多重的連携の核となり、運営委員会において、拠点に参加する各研究所等の「京」以外の計算資源を活用する研究活動と協調してプロジェクトを進めていく。



上記のうち、重点課題経費による研究員等雇用人数

全体	4名(筑波大で事務2名、マネジメント・広報各1名)
サブ課題A	4.5名(KEK3名のほか事務1名。場合によっては他機関で雇用、広大0.5名:サブ課題Bと共同)
サブ課題B	QCD: 4.5名(阪大1名、理研、阪大、京大で計3名、広大0.5名:サブ課題Aと共同) 核構造4名(東大4名)、宇宙4名(京大4名)

サブ課題 C	5名（東大、筑波大、千葉大各1名、天文台2名）
--------	-------------------------

(7) 必要計算資源

「京」の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H27年度	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度
2,400,000	58,000,000	60,000,000	60,400,000	60,400,000

「京」以外の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H27年度	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度
47,500,000	61,250,000	128,000,000	307,450,000	312,800,000

※ 「京」以外の計算資源量には高エネルギー加速器研究機構、国立天文台等で利用している分を含む。これらのマシンの性能は異なるため、「ノード時間」の定義も異なる。それらを単純に足しているため、詳細な数値を問題にするときには注意が必要である。

※ 将来の時間については、共同利用研の計算機更新や東大・筑波大等に導入予定の新しいマシンが使えることを想定しているが、実際には導入されるマシンの性能とそこで得られる計算時間（審査によって決定される）は現状ではわからないため、不定性が大きい。本計画は、上記の計算資源が得られることを仮定して計画したものである。

2. 研究開発内容詳細

2-1. サブ課題A. 究極の自然法則と宇宙開闢の解明

(1) 目的・意義

ミクロの世界での究極の物理法則の解明は、宇宙開闢の理解へとつながる。ヒッグス粒子の発見により、素粒子の標準模型は TeV スケール以下のエネルギーでは確実なものとなったが、一方でダークマターを含んでいないなど、究極の物理法則としては不完全である。SuperKEKB 実験などの大規模精密実験・観測と呼応する精密計算を実現し、標準模型を精密に検証することで、これを超える理論の兆候をつかむことを目指す。また、標準理論から予想される初期宇宙での相転移現象の詳細な解明や、究極の理論と期待される超弦理論の解析を行い、サブ課題全体として、究極の自然法則と宇宙開闢の謎に対して数値シミュレーションというアプローチで迫る。

SuperKEKB 実験は、小林益川理論の証明に成功した KEK B ファクトリー実験のアップグレード計画で、従来の 50 倍の積分ルミノシティ（データ量）を蓄積する計画である。KEK B ファクトリーは大きな成果をあげたが、小林益川行列要素 $|V_{ub}|$ の決定では互いに 20% 程度も矛盾する二つの測定結果が得られるなど、標準模型の精密検証には足りない点も多い。SuperKEKB では、 $|V_{ub}|$ については 2% 程度の精度を目指しており、これに対応する理論計算が必要となる。

J-PARC ではいくつかの実験が進行あるいは計画中だが、精密な理論計算が必要となる量としてはミューオンの異常磁気能率 $g-2$ があげられる。この量はこれまでの精密実験で 100 万分の 1 を超える精度で測られており、同様に精密な理論計算との比較により標準偏差の 3 倍を超える矛盾があることが知られている。J-PARC で計画されている実験では精度を数倍向上することを目指しており、理論計算もこれに対応できるだけの精度を達成する必要がある。

上記の 2 つの例は、格子 QCD 計算が今後精密計算に向かう必要性を示す。ポスト京世代の計算は、素粒子のビッグプロジェクトが目指している標準模型の検証とそれを超える理論の発見に対して大きく貢献することができる。

我が国における格子 QCD 計算の研究分野は、TOP500 で 1 位を獲得した CP-PACS の例にもある通り、国際的にも強い競争力を持ってきた。現在でも大規模シミュレーションの分野で JLQCD collaboration, PACS collaboration, HALQCD collaboration などが国際的にも主要なグループの一つに位置づけられている。現在では計算資源量で欧米にやや差を付けられているが、研究上のアイデアでカバーする状況にある。同分野では国際的な共同研究が広がりを見せつつあり、今後は我が国の研究も国際共同プロジェクトの一部として推進することを積極的に検討する必要がある。

宇宙開闢の謎解明への道筋は一通りではない。宇宙初期の相転移現象の詳細な解明は、宇宙誕生の過程を既知の素粒子理論を基にシミュレーションで明らかにすると同時に、相転移によって生ずる微細なゆらぎを宇宙背景放射の観測などと比較することで素粒子模型に対する知見が得られる可能性もある重要な研究である。現状の理解では QCD の相転移は物理量の非連続な飛びをもたないクロスオーバーであると信じられているが、その理論的基盤は盤石ではない。相転移時のバリオン数密度によっては 1 次相転移である可能性も残されており、その場合には以後の宇宙構造形成に影響を与える可能性もある。こうした QCD 相転移の詳細を明らかにすることが求められる。

宇宙開闢をその最初まで遡ると、宇宙創世は時空の創出と深く関係していると想定される。そこでは重力の量子効果が重要になり、現在の素粒子の標準模型では解析できない。重力の量子論を与えると期待

されている超弦理論にもとづく解析によってその様子を明らかにすることは、なぜ宇宙が始まったのかを理解するという人類の長年の夢に大きく近づくことにつながる。現状では断片的な理解にとどまっているが、より大規模な計算によって時空創出の謎に迫ることができる。また、未だ確立していない超弦理論の基礎を固めるため、重力の量子効果が重要になるブラックホールの解析などさまざまな場面でその検証を行うことも数値計算を通じて貢献できる一つの道である。

これらの研究全体を通じて究極の自然法則と宇宙開闢の解明という素粒子・宇宙物理全体の課題解決に計算科学の立場から寄与することがサブ課題Aの目的である。

(2) 実施内容

サブ課題Aにおいては、分担機関は(当面)高エネルギー加速器研究機構(KEK)のみとしているため、分担機関ごとの実施内容は記載せず、サブ課題A全体の実施内容について述べ、協力機関の参加についても触れる。

[素粒子現象論] ポスト京での目標は、量子色力学(QCD)の大規模数値シミュレーションにより、素粒子反応における標準模型からの寄与を精密に求め、精密実験の結果とつきあわせることで素粒子標準理論からの微細なずれを探索し、未知の粒子・相互作用の徴候を見つけることである。具体的には、格子間隔(時空間の解像度)を従来の0.1 fmから0.03 fmまで削減した高精細格子での格子QCDシミュレーションを実行し、重いbクォークの直接計算を実現する。誤差は格子間隔の2乗に比例するため、従来よりも格段に精密な計算が可能になる。KEKを中心として大阪大、筑波大、東北大などが協力機関として参画する。

目標実現のためには、理論および計算の側に量子色力学(QCD)の精密計算によって理論的インプットにおける不定性を十分小さく抑えることが求められる。格子QCD計算の精度を高める上では、高精細かつ大体積の格子データを生成するステップと、個別の物理量ごとに物理量計算を行うステップがあり、ポスト京に向けて両方が新たなチャレンジとなる。ポスト京以前の研究では、物理量計算の手法開発を進めると同時にデータ生成のための最適化コード開発を行う。

平成26、27年度に行ったB中間子レプトニック崩壊、D中間子セミレプトニック崩壊の研究により、格子QCDにおいてカイラル対称性を保つ定式化を用いた理論的にクリーンな計算手法を確立し、B中間子の物理の精密研究に取り組む準備を整えた。計算の基礎となる格子データとして、以前の研究で蓄積した3つの格子間隔($a=0.081, 0.056, 0.044$ fm)での大規模なデータセットを用い、その上での物理量計算のコード開発・試験を行った。これらの成果を元に、今後 $B \rightarrow \pi l \nu$, $D l \nu$, $D^* l \nu$ セミレプトニック崩壊形状因子の本格的な計算を実行し、Belle II 実験と協力して新物理の探索を行う計画である。平成30、31年度は、現実世界よりも軽いボトムクォーク質量を用いて大規模計算を行い、その外挿によって形状因子を5%精度で計算する。これまでに開発した計算手法により、格子間隔・クォーク質量・運動量遷移についての内外挿の不定性を制御・理解し、小林・益川行列要素の矛盾の問題の解決を図る。B中間子崩壊に関してポスト「京」においてさらに高精度の計算を実現するには、現在よりも格段に細かい格子($a=0.03$ fm)を用い、現実世界のボトムクォーク質量直上でのシミュレーションを行う必要がある。一方で、有限体積効果を制御するには、大体積(最大で10 fm)の格子データによって体積依存性を検証する必要がある。いずれの方向にも $128^3 \times 256$ クラスの大規模格子シミュレーションの実行が必要で、ポスト京ではそのデータ生成が最大の鍵となる。この格子データは、格子QCD計算のあら

ゆる応用計算に利用可能であり、例えば、大体積格子が重要になるミューオン g-2 の精密計算などに適している。このように多目的に使える基礎データの生成には、一国のプロジェクトではなく、国際的な研究協力によってデータを生成することで効率を高める必要があると思われる。平成 30～31 年度においては、そのための国際協力の枠組みを構築すると同時に、さまざまな計算プラットフォームで性能の出せるシミュレーションコードの開発に取り組む。

ポスト京では、上記のデータ生成と物理量計算の両方を行い、計算精度を Belle II の最終目標精度（2%）まで高めることを目指す。微分崩壊率などの精密検証を Belle II と協力して行い、新物理の探索・解明を目指す。

[QCD 相転移] ビッグバンの過程で起こった相転移現象を定量的に解明する。QCD は宇宙初期にプラズマ相からハドロン相への転移が起こったと考えられており、その相転移はこれまでの格子 QCD シミュレーションによれば物理量の発散を伴わないクロスオーバーだとされている。しかしながら、残った理論的不定性のために、相転移における臨界指数は確立しておらず、QCD のカイラル対称性をより精密に扱った計算によって詳細に検討する必要がある。求められる技術開発はコード作成やその最適化などであり、上記の[素粒子現象論]のものと重なる部分が多いため、合わせて推進することが合理的である。

以前の格子 QCD シミュレーションの結果によれば、有限温度の QCD 相転移は物理量に飛びのないクロスオーバーであったと認識されている。ところが、最近の研究により、QCD の基本的な性質であるカイラル対称性を保つシミュレーションでは以前の理解とは異なる性質が見つかってきている。すなわち、フレーバー数 2 の QCD では、クォーク質量ゼロの極限では量子異常が高温相で消失し、トポロジ感受率に一次転移的な飛びが見られる。この著しい特徴は、フレーバー数 2 の QCD が、これまで一般的に考えられていた 2 次転移ではなく、1 次転移である事を強く示唆する。現実世界の良い近似となるモデルは 3 フレーバー QCD の相図(コロンビアプロット)の一つの点で表現されるが、2 フレーバーの結果は、その相図の境界の変更を示唆し、現実世界の相転移の理解にも影響を及ぼす可能性がある。ただし、感受率の飛びが確認されているのは相転移温度より高い $T > 1.3T_c$ 程度 (T_c はカイラル対称性の回復する温度)であり、有限サイズ効果の確認も始まったばかりなので、より相転移に近い温度と系統的な体積効果の追跡が必要である。

平成 30、31 年度は 2 フレーバー QCD の相転移の解明のため、有限体積効果の系統的な研究を、より相転移温度に近い領域まで拡張する。これにより、計算手法の改善、相転移の特徴を捉える物理量の選定を行い、最終的に 2 フレーバー QCD の相転移次数を確立することが目標である。また、並行して、3 フレーバー QCD の数値計算の準備を始める。

ポスト京が稼働する 2021 年度以降は、これまでの研究による知見を踏まえ、現実世界のモデルを含んだ 3 フレーバー QCD の数値シミュレーションを行って、相図を確定させることを目指す。小さな格子間隔 ($a=0.075$ fm) で大体積格子 643×16 のシミュレーションを数点のクォーク質量で実行する必要がある。

[超弦理論] 究極理論の候補とされる超弦理論とそれに基づく宇宙開闢の理解を目指したシミュレーション研究を行う。具体的には、超弦理論の定式化の有力候補とされる行列模型のシミュレーションによるインフレーション宇宙の理解を目指す研究や、超対称理論の非摂動的計算に向けた研究、超弦理論が予想する重力理論と場の量子論の等価性を数値的に検証する研究などを多角的に行う。KEK を中心として、静岡大、慶応大、九州大などが協力機関として参画する。

超弦理論のもたらす一つの大きな予想に、ゲージ重力対応と呼ばれるものがある。これは、素粒子理論の基礎となっているゲージ場の量子論と、時空の力学を表す重力の理論が、実は同じものの2つの現れ方にすぎないという驚くべきものだが、その検証はこれまでのところごく限られた場合にとどまっている。格子 QCD の研究を通じて培われた様々な数値的手法を使って超対称ゲージ理論のシミュレーションを実現し、重力理論との比較を行うことができれば、この検証がさらに進展し、超弦理論の新たな進展にもつながる可能性があるだけでなく、ブラックホールの内部構造の理解やクォーク・グルーオン・プラズマの性質を理解にもつながることから、サブ課題 A で目指す「宇宙開闢の解明」においても重要なテーマとなっている。

過去には、1次元超対称ゲージ理論の数値シミュレーションにより、IIA型超重力理論におけるブラックホール時空との間の対応が調べられた。重点課題9・サブ課題Aでは、最大超対称な2次元ヤンミルズ理論において計算を進め、ゲージ理論の熱力学量が双対なブラックホールの振る舞いを再現することを確かめた。今後の2年間は、ポスト京で実施予定の計算の準備として、最近理論的に完成した0(a)改良された超対称ヤンミルズ格子理論のコード開発を行う。このコードを用いて、 $N_c=12$ で格子サイズを数点変えた計算から連続極限をとり、これまでに得られている結果を精密化する。さらに、 N_c を変えた計算を行い、重力の量子効果を表す補正項を求める。

ポスト京においては、上記の研究を発展させることにより、AdS/CFT対応の最も典型的な例とされる4次元の超共形不変な $N=4$ ヤンミルズ理論の数値的な研究を行う。まず、今後2年間で開発するコードに超対称2次元ヤンミルズ理論の時空の次元を2つ増やすために必要な新しい項を導入する。このコードを用いて正しく $N=4$ ヤンミルズ理論が得られていることを確認するため、対称性に付随した恒等式(ウォード高橋恒等式など)を数値的に調べる。次に、数点の格子間隔と N_c で計算を進め、内部エネルギーなどの物理量を評価し、対応する重力側の解析解と比較することでAdS/CFT対応を精密に検証する。これにより、ブラックホールの情報喪失問題といった重力の量子的な振る舞いに対して、ブラックホール熱力学の微視的な理解などの新しい知見を得る。

超弦理論は重力を含む統一理論として多くの研究がなされてきたが、場の量子論における格子ゲージ理論に相当するような非摂動的計算手法は確立していない。1996年に石橋・川合・北澤・土屋が提唱したタイプIIB行列模型は、超弦理論の非摂動的定式化の有力候補である。最近ではその数値的研究により、微視的な9次元空間から膨張する3次元宇宙が出現、また指数関数的な宇宙膨張を示唆する振る舞いなど、興味深い結果が得られている。重点課題9・サブ課題Aのこれまでの準備的な研究では、フェルミオンの効果を無視した場合について、行列サイズ 512×512 までの数値シミュレーションを行い、初期宇宙における膨張則に関する知見を得た。さらに、 $N \times N$ の行列に対する結果を、 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 程度の行列で得ることができる新しい手法の開発に成功した。さらに、フェルミオンの効果を取り入れた並列コードの開発に取り組んでおり、完成に近づいている。これらの成果をもとに、今後2年間、フェルミオンの効果を取り入れた計算を行列サイズ 128×128 程度行い、初期宇宙における膨張則およびインフレーションの継続期間(e-folding)を決定する。

ポスト京においては、行列サイズを 512×512 まで拡大した計算を行うことにより、インフレーション後の時空の構造を解明することを目指す。具体的にはウィルソン・ループの2点関数を計算し、その運動量依存性と宇宙背景輻射のゆらぎとの整合性を検証する。これと平行して、さらに時間発展が進んだ状況で標準模型もしくはそれを超える理論が現れるかどうか、ということも追究する。時間発展が進

んだ状況下では、宇宙の膨張に伴い古典近似が良くなると考えられるため、これまで行ってきた経路積分に基づく計算をするのではなく、古典運動方程式の解を数値的に求めることにより研究を進めることが可能になる。特に、余剰次元方向に非自明な構造が現れることが予想されており、その構造をもとに、4次元時空上にどのような場の理論が現れるかを明らかにする。さらに、これまでの量子論的な計算の結果と比較することにより、実際に IKKT 行列模型の経路積分に支配的な寄与を与える古典解を特定する。

(3) 目標・期待される成果

[素粒子現象論]

アウトプット成果

- 平成29年度終了時：これまでに生成した格子切断 2.4 GeV および 3.6 GeV (それに加えて一部 4.5 GeV) のデータを活用して、チャームクォークのかかわる $D_{(s)}$ 中間子崩壊定数およびチャームクォーク質量の精密決定を行う。それぞれ 2% 程度および 1% 程度の計算精度が実現できる見込みである。さらに、ボトムクォーク質量に向けた外挿により、 $B_{(s)}$ 中間子崩壊定数およびボトムクォーク質量を、それぞれ 5% 程度および 2% 程度の精度で計算することを目指す。同時に、セミレプトニック崩壊の精密計算に必要な高統計計算手法に関するテストを行い、実現にメドをつける。ミューオン異常磁気能率に対する真空偏局の効果については、量子色力学の範囲内で 2~3% 程度の精度をもつ計算を行うことは現状持っているデータと技術でも可能と考えられる。基礎となる計算を行うと同時に、量子電磁力学の効果を取り入れるための手法に関する調査研究を行う。光子光子散乱の寄与の計算について手法の開発を進め、本格的な計算の準備を行う。
- 本格実施フェーズ終了時：それまでに開発した手法を用いて、 $D_{(s)}$ 中間子および $B_{(s)}$ 中間子のセミレプトニック崩壊形状因子について、それぞれ 5% 程度および 10% 程度の精度で計算することを目指す。関連するその他の形状因子についても同程度の精度で計算する。さまざまな物理量に対してポスト京でさらに高精度の計算を行うための基礎格子データ生成に向け、計算コード開発のための国際協力の枠組みを構築する。
- ポスト「京」運用開始5年後：ポスト京を利用して、 $B_{(s)}$ 中間子のセミレプトニック崩壊形状因子について、2~4% 程度の精度で計算することを第一の目標とする。同時に関連するその他の形状因子についても同程度の精度で計算する。

アウトカム成果

- ポスト「京」運用開始5年後：SuperKEKB, J-PARC 実験の結果と合わせて、素粒子標準模型を超える現象の存在が明らかになり、素粒子物理学のブレークスルーとなる。
- ポスト「京」運用開始10年後：その他の素粒子実験や宇宙観測の成果と合わせて、素粒子標準模型を超える模型が形成される。

[QCD 相転移]

アウトプット成果

- 平成29年度終了時：相転移を支配する長距離相関モードのうち、軸性量子異常のかかわるモードが相転移の前後でどのように変化するかを明らかにするため、カイラル対称性を非常に高い精度で保ったシミュレーションのデータを解析し、今後の大規模シミュレーションで必要と

なるカイラル対称性の精度を同定する。

- 本格実施フェーズ終了時：十分なカイラル対称性をもつ格子定式化を用いた予備的計算を小規模格子(48³x12)で実行し、相転移のサーベイに必要なパラメタを同定する。3フレーバーQCDの予備的シミュレーションを小規模格子で実行し、想定される1次相転移の起こる領域を絞り込む。
- ポスト「京」運用開始5年後：ポスト京において大規模な2フレーバーおよび3フレーバーQCDシミュレーションを実行し、相転移の次数および臨界指数を定量的に明らかにする。

アウトカム成果

- ポスト「京」運用開始5年後：QCD相転移とその高温相に対する理論的基礎が固まり、アクシオン暗黒物質に対する制限など、宇宙論に対する有用な情報が得られる。
- ポスト「京」運用開始10年後：QCD相転移のシミュレーションで得られた手法を応用することにより、電弱相転移やその他の素粒子標準模型を超える理論から予想される相転移についても詳細な解析が可能になる。全体として宇宙初期における相転移の理解が進む。

[超弦理論]

アウトプット成果

- 平成29年度終了時：一次元の超対称ゲージ理論の数値シミュレーションを実行し、タイプIIA超重力理論におけるブラックホールに関連する物理量を測定する。これにより、これまでなされてきた「ゲージ/重力対応」の検証を低温領域まで拡張し、より精密に検証につながる。IKKT行列模型の数値シミュレーションを実行し、宇宙初期の膨張の様子を測定する。特に、インフレーション仮説の示唆する指数関数的膨張が現れるかどうかを明らかにする。
- 本格実施フェーズ終了時：この研究の最終目標は、同じ一次元の超対称ゲージ理論のさらに低温領域でのシミュレーションにより、M理論から予言される11次元のシュバルツシルト・ブラックホールが実現するかどうかを検証することである。このためには、温度軸方向の格子点数を100以上にする必要がある。この計算がポスト京で可能になるよう、アルゴリズムの改良を進め、本格計算に備える。IKKT行列模型の数値シミュレーションをさらに大きな行列サイズで行い、指数関数的膨張の持続期間(e-folding)を決定する。またインフレーション後の時間発展を追うことにより、輻射優勢宇宙の膨張則への転移が起こるかを明らかにする。
- ポスト「京」運用開始5年後：一次元超対称ゲージ理論の大規模シミュレーションを実行し、ゲージ・重力対応の精密検証を実現する。IKKT行列模型の研究をさらに大規模計算に発展させ、初期宇宙の密度ゆらぎの計算にまで進めて、宇宙背景輻射の観測結果と直接つき合わせる。

アウトカム成果

- ポスト「京」運用開始5年後：重力の量子論は未だに確立されていない難問である。ゲージ・重力対応を用いて重力の量子効果をゲージ理論により計算することができれば、この歴史的難問に大きなブレークスルーをもたらすことにつながる。宇宙初期のインフレーション模型にはいくつかの観測的状況証拠があり、多くの研究者が信じる標準的な模型になっているが、その背景となる理論的基礎に関しては何もわかっていない。超弦理論から出発する計算でインフレーションを導き、観測と比較することで検証できれば、宇宙創世を理解する上で大きなブレークスルーになる。

- ・ ポスト「京」運用開始 10 年後：ゲージ・重力対応には、ゲージ理論の新しい計算手法としての側面と、量子重力理論の新しい計算手法としての側面があり、分野を超えた様々な応用が考えられる。この対応に明白な証拠を与えることで、新たな非摂動的計算手法が確立する。超弦理論には今のところ定まった非摂動的定義が存在しない。IKKT はその一つの定式化ではあるが、その非摂動的計算手法が確立すれば、万物の最終理論としての超弦理論を確立する上で大きなステップとなる。

サブ課題全体としてのアウトカムは、現代の素粒子物理学の大目標である、標準模型を超える物理法則の発見に貢献することである。実験を通じたボトムアップと超弦理論からのトップダウンの両方のアプローチにおいて計算科学的手法が必要な役割を果たす。標準模型を超える物理法則は、もし見つければ自然界の理解のパラダイムを変革する大きな変化が生まれる可能性もある。超弦理論の研究では、究極の自然法則の理解や宇宙開闢、特に空間 3 次元の宇宙創世やインフレーション前後の宇宙の理解が進む可能性もあり、いずれも人類の自然観を大きく変える可能性を秘めている。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

最も計算時間を要するのは[素粒子現象論]の研究である。基本となる小林益川行列要素の検証では、もっとも難しい行列要素 $|V_{ub}|$ に関係する形状因子に対して、現在 KEK の Blue Gene /Q (1.2PFlops peak) で進めているプロジェクトでは 10%程度の不定性が見込まれる。これは主に重いボトムクォーク質量に関する外挿から生ずるもので、ポスト「京」(の 10 分の 1 の規模)ではこの問題は解消して誤差 2 ~ 4 %程度での計算が可能になると見込んでいる。その他の物理量においても、誤差を格段に削減して、実験の解析に不可欠な情報を得ることができる。

[QCD 相転移]は相転移を調べるという計算コストを要する研究であり、京世代の計算機では 2 および 3 フレーバー QCD の相構造の研究は断片的に行われているにすぎない。相転移の詳細を調べる本格的な研究はポスト京世代の課題となる。

[超弦理論]におけるゲージ重力対応の研究は、京を用いた研究で数値的アプローチが有用であることが初めて示された。ポスト京世代ではこれをさらに進め、理論的により興味深い重力の量子効果が重要になる場合についても研究が進むと期待できる。宇宙開闢のシミュレーションは、現状は 3 次元空間の創世やインフレーションに関してヒントが得られた段階であり、系の規模に対して爆発的に増える計算時間を考えると、本格的な解明にはポスト京あるいはそれ以上の計算が必要となると見込まれる。

(5) 実施体制

高エネルギー加速器研究機構(KEK)および広島大学が分担機関となって推進する。[素粒子現象論]については、KEK のスパコンを大規模に使用して格子 QCD シミュレーションを行ってきたグループが中核となり、他大学の研究者と協力して研究を進める。KEK で進められている大規模実験プロジェクトのメンバーを含む連携組織を構築する。[QCD 相転移]については、上記の研究組織を基盤としつつより多くの研究者と協力して研究を進める予定であり、その体制についてはさらに調整する。[超弦理論]については KEK の研究者が取りまとめを行い、大学等の多くの研究者が協力して実施する。

サブ課題A「究極の自然法則と宇宙開闢の解明」

分担機関：高エネルギー加速器研究機構(KEK)

サブ課題責任者 橋本省二

[素粒子現象論] 取りまとめ 金児隆志

[QCD 相転移] 取りまとめ 橋本省二

[超弦理論] 取りまとめ 西村淳

実験プロジェクトとの
インターフェース

・ SuperKEKB (B2TIP)

・ J-PARC (調整中)



分担機関：広島大学

[ポスト京向けコード最適化] 取りまとめ 石川健一

協力機関：大阪大学、名古屋大学、東北大学、筑波大学、新潟大学、理研 BNL センター、静岡大、慶応大、摂南大、九州大、岡山光量子研

2-2. サブ課題 B. 物質創成史の解明と物質変換

(1) 目的・意義

バリオン間相互作用、原子核の構造および核子同士の多体反応、核物質の状態方程式という極微の物理的謎を数値計算により解き明かすとともに、数値的に得られたそれらの知見を可能な限り取り入れて、超新星爆発や中性子星連星合体という爆発的天体現象を数値シミュレーションにより解明する。そしてその成果を宇宙における爆発的天体現象によって生成されたとされる重元素合成の謎の解明につなげる。同時に、日本の誇る稼働中の大型実験・観測施設(J-PARC、RIBF、SUBARU)や2020年代に本格稼働予定の大規模望遠鏡計画(KAGRA、TMTなど)に必要な原子核や天体物理学の理論的予言を与え、これら大型計画のポテンシャルを最大限に引き出す。さらに原子核多体反応計算は核廃棄物処理に必須の核変換技術のための基礎データの取得に応用するなど、周辺分野へ幅広く貢献する。

(2) 実施内容

当課題は、量子色力学(QCD)、原子核構造論、爆発的天体物理学の3つの異なる階層に対する研究に大別される。目標ではまず、それぞれが以下の課題を遂行しベースとなる成果を創出する。

[量子色力学] QCD理論に基づく第一原理数値計算により、陽子、中性子、ハイペロン間に働くいわゆるバリオン間力を世界最高精度で求め、素粒子間に働く力の謎を解明すると同時に、原子核物理学や宇宙物理学研究の理論的基盤を強固にする。特に、ポスト京で初めて精度良い計算が可能になる奇パリティ核力・ハイペロン力および3体相互作用の研究を推進する。この研究は、理研、京大基研、阪大RCNP、広大の研究者が協力して進める。格子QCDによるハドロン間相互作用の研究全体をリードする人材として、阪大と共同で准教授1名、格子QCDによるハドロン間相互作用の研究・およびポスト京に向けたコード開発のため、理研、阪大、京大において研究員計3名を雇用する。ポスト京に向けた格子QCDコードの開発を担当する研究員1名を広大においてサブ課題Aと共同で雇用する。

[原子核構造論] ポスト京でのみ可能となる大規模量子力学的原子核構造計算に基づき、質量数の大きな原子核構造を精密、かつより第一原理的に求める。基本的核力から出発し、最新の量子色力学や摂動理論により核子間有効相互作用を、2体力に加え3体力効果まで含めて改良、構築する。それを用いた大規模量子多体シミュレーションにより、原子核の量子多体構造で計算の困難さゆえにこれまで未踏であったものを中心に解明を進める。特に、重い原子核の構造解明コードを新たに開発して、京による大型計算により検証された第2種殻進化など新奇な量子多体原理と新たな発現形態などを探求する。それらの原子核は、中性子星合体での元素合成過程で中間生成物として作られる多様なエキゾチック原子核でもあり、それらの物性の計算をおこなう。さらに、強く関連した状態からの電磁励起やベータ遷移のスペクトルを重い原子核で計算する計算コードを開発し、爆発的宇宙過程や原子力工学、さらには素粒子の基本的対称性の研究に必要なデータを計算する。重い原子核への展開としては、水銀近傍核種の予備的計算を遂行して、超重核構造研究に備える。この研究は、東大原子核科学研究センターが中心になり、会津大、筑波大、原子力研究開発機構が協力して進める。大規模原子核殻模型計算による核構造研究、さらにポスト京に向けたコード開発の推進には、東京大学原子核科学研究センターにて特任准教授1名を雇用する。さらに、エキゾチック核の構造研究、核変換研究のための核構造研究、核構造計算に用いられる微視的有効相互作用の構築を各々担当する特任助教を3名雇用する。

[爆発的天体物理学] ニュートリノ過程、磁気流体過程、一般相対論的強重力などの多様な効果を考慮し

ながら、重力崩壊型超新星爆発と中性子星連星合体過程を高精度シミュレーションで再現し、これらの現象の解明および高エネルギー天体现象(ガンマ線バーストやキロノバ)との関連の理解を目指す。そのために、一般相対論的輻射磁気流体コード、ボルツマン輻射流体コード、さらには多様な物理的素過程を取り入れた超新星爆発用輻射流体コードを開発し、またそれらに対して超並列計算用のチューニングを進める。さらに重元素合成計算を行い、特に未だ謎とされる r 過程重元素の起源の解明を目指す。重力波や光赤外線観測研究者とも連携し、シミュレーション結果と観測結果の比較から、超新星爆発や中性子星連星合体の定量的解明に導く研究を推進する。この研究は京大基研と理研および協力機関である早稲田大学、福岡大学、沼津高専、東邦大の研究者が協力して進める。ボルツマン方程式あるいは近似的輻射流体方程式を解きながら超並列輻射流体計算を行い、さらにポスト京に向けたチューニングも進めながら重力崩壊型超新星爆発研究を進める研究員を 2 名、相対論的ボルツマン方程式の解法探求およびポスト京に向けたチューニングを進める研究員を 1 名、完全に一般相対論的な輻射磁気流体超並列計算を進め、中性子星合体の研究を進める研究員を 1 名雇用する。十分な業績があると見做した場合には、特任助教待遇で雇用する予定である。4 名とも雇用は京大で行うが、超新星爆発研究を遂行する研究者は早稲田大、福岡大、東邦大のいずれかに派遣する予定である。

実施内容の変更について：

2017 年 8 月 17 日、連星中性子星からの重力波(GW170817)とその合体に対応した電磁波が、初めて、重力波望遠鏡と光学望遠鏡で同時に観測された。重力波望遠鏡 advanced LIGO と advanced VIRGO は、さらに感度を向上させ、2018 年の秋から一年以上にわたる長期観測を計画している。したがって、2018 年秋以降、連星中性子星やブラックホール・中性子星連星からの重力波が、複数観測されることが予想される。このことを踏まえ、高精度の数値相対論計算を行い、中性子星連星の幅広いパラメータに対する重力波テンプレート構築を急ピッチで進める。なお、テンプレート構築は、重力波観測から中性子星の状態方程式を決定するのに必須であり、重力波天文学分野において数値相対論研究者に強く期待されている仕事である。

さらに今回の観測では、光学望遠鏡による観測によって、合体過程、重元素合成過程、中性子星の状態方程式に対して大量のヒントが得られた。ただし、観測を解釈し、物理的アウトプットに焼きなおすには、数値相対論によるシミュレーションが必要不可欠である。そこで、考えられる多様な場合(特に連星の質量と状態方程式の多様性を考慮)を想定したシミュレーションを行い、来たる観測に備える。

一方、重力波望遠鏡による連星ブラックホールの観測が急ピッチで進んだ。これまでに連星ブラックホールは 5 例観測されたが、その結果、宇宙には太陽質量の 20~30 倍の質量を持つ大質量ブラックホールが多数存在することが分かってきた。しかしその起源は現段階では謎に包まれている。もっとも標準的なシナリオに従えば、そのような大質量ブラックホールは、恒星進化の結果が誕生したと考えられている。そこで、超新星爆発計算用コードを転用し、大質量ブラックホールの形成過程の解明を調べることを新たな目標に加える。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果：

- ・平成 29 年度終了時：

[QCD分野] (a) 奇パリティ核力・ハイペロン力の計算に向けて、京における偶パリティ核力・ハイペロン力計算コードから大幅な改良・変更を行い、ポスト京で予想されるハードウェア構成にも適合したコードを作成する。三体力については、一般に極めて大きな計算コストを要するため、これまで開発してきた三核子力コードについて、更にハイレベルのチューニングを行う。(b) 京やHPCI計算資源を用いて、奇パリティ核力・ハイペロン力について、スピン軌道力も含め、フレーバーSU(3)極限でパイオン質量 400MeV以上での計算を行う。三体力については、パイオン質量 500MeV以上において三核子力計算を行うと共に、ハイペロンが入った三バリオン力計算のためのコード開発を進める。必要資源量については次のように想定している。

- (1) 奇パリティ核力・ハイペロン力の計算において、SU(3) 極限での計算について、平成27～29年度に合計で30M node. hr。
- (2) SU(3) を破った場合での計算について、平成29～31年度に合計で150M node. hr。
- (3) 三体力について、三核子力の計算について 平成27～29年度に合計で30M node. hr。
- (4) SU(3) 極限における三バリオン力の計算について、平成29～31年度に合計で150M node. hr。

[原子核構造計算分野] 質量数100を超えるような質量領域の量子多体計算を京やHPCI資源を用いて進める。中性子過剰核については、ニッケル近傍からジルコニウム周辺の原子核の殻構造や形を求め、励起エネルギーの精密な計算により、それらの急激な変化や変形共存現象の解明を進め、理研RIBFを始め、世界の先端の実験研究と協力する。r 過程解明に重要な中性子数82近傍核種に関わる結合エネルギーやベータ崩壊遷移の計算を遂行する。核廃棄物の核変換については、 ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd の3つの長寿命核分裂生成物の光吸収断面積計算を例として、原子核殻模型に基づいた様々な多体相関効果を含めた計算手法による原理実証計算にとりかかる。炭素同位体における3アルファクラスター構造の解析を第一原理的な計算により進め、ホイル状態の解明をおこなう。

必要資源量については平成27-31年度全体で次のように想定している。

- (1) 25M node. hr: 軽い核の第一原理計算
- (2) 41M node. hr: エキゾチックな中重核の大規模構造計算
- (3) 30M node. hr: 核変換研究のための大規模核構造計算

[爆発的天体計算分野] (a) 一般相対論的輻射磁気流体コードを完成させ、さらにチューニングを施し、連星中性子星の合体に対して、適合格子9段、グリッド数 $500 \times 500 \times 500$ 、京で約2000ノード用いた計算を実行効率約10%で可能にする。そして、特に、質量放出現象と電磁波放射現象に注目しながら重力波源対応天体観測計画に資する初期成果を導出する。放出物質内における元素合成計算も試験的に行う。(b) 京で用いたコードよりも多様な物理素過程(ニュートリノ散乱など)を取り入れた実空間3次元、運動量空間1次元の超新星爆発用輻射流体コードを完成させ、京でグリッド数 $1024 \times 64 \times 128$ (球座標) \times 20(エネルギー空間)に対して約4000ノード用いた計算を実行効率約10%で可能にする。(c) 空間3次元、運動量空間3次元を完全に取り入れたボルツマン輻射流体コードの大枠を完成させ、京でグリッド数 $256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ (球座標)に対して約3000ノード用いた計算を実行効率約10%で可能にし、特に重力崩壊後誕生する原始中性子星内部の対流運動に伴うニュートリノ輻射輸送過程を明らかにする。必要資源量については平成27-31年度全体で次のように想定している。

- (1) ボルツマンコードを用いた超新星爆発計算に対して50M node. hr。
- (2) 近似的ニュートリノ輻射流体計算による空間3次元の長時間超新星爆発計算に対して、20M node. hr。

(3) 一般相対論的輻射磁気流体計算による中性子星合体に対して、35 M node. hr。

・本格実施フェーズ終了時：

[QCD分野] 奇パリティ核力・ハイペロン力について、ポスト京に向けたコードチューニングを行う。三体力について、ポスト京で計算ターゲットとする主要チャンネルを決定し、そのためのコードを開発する。計算効率はポスト京の詳細に依存するが、5%以上の効率を目標にする。さらに、フレーバーSU(3)対称性を破った結合チャンネル形式での奇パリティ核力・ハイペロン力の計算を、パイオン質量400MeV以上で行う。フレーバーSU(3)極限との比較等を通して、物理的描像を解明する。三バリオン間力について、フレーバーSU(3)極限における幾つかの既約表現に対して、パイオン質量400MeV以上での計算を行う。

[原子核構造計算分野] 平成29年度までに中性子過剰なエキゾチック原子核の研究を進め、量子相転移の発見などの成果を挙げてきた。それらの、及び、最終年度までに研究される原子核には中性子星合体で中間生成物として現れるものが多く含まれるが、中性子星合体が観測されたことにより、最大で1万種あると言われるエキゾチック原子核のどこに狙いを定めるべきかがより明確になる。それらに相応の重点を置きつつ研究を進める。得られる成果は元素合成や核変換技術にも関わるものでもある。また、元素合成r過程の出発点近傍であるニッケル78周辺の原子核の構造解明は、最近の実験研究の主要テーマでもあるので、重点的に進め、魔法数の変貌やベータ崩壊の速さなどを明らかにする。以上の研究の多くは内外の先端実験研究と連携して行う。

世界各地で建設、あるいは、改造中の大型先端加速器の運転が相次いで開始される。例えば、理研のRIBF加速器は2018年度にビーム強度の大幅な向上があり実験対象が拡大し、スイスCERNのHIE ISOLDEは2018年度に第1段階が終わり、米国の新鋭加速器FRIBは2022年に開始予定である。それらによって行われる実験は質量数100位までの、これまでよりもさらにエキゾチックでドリフラインに近いものであり、それらで見える新たな物理的性質の予言を行い、実験計画の策定にも協力する。また、神岡に設置のCANDLESによる二重ベータ崩壊の実験も進行しており、そのための核行列要素のより高精度の計算を進める。

さらに、ポスト京での安定超重元素探索のための原子核構造計算を視野に入れ、核内相互作用の高精度化や、鉛や水銀などの重い原子核で予備的計算をおこない、最近の理論的な成果である「量子自己組織化」に基づいた関連計算を行う。人工知能で使われているような技法の量子多体計算への応用をおこない、ポスト京に備える。

[爆発的天体計算分野] (a)一般相対論的輻射磁気流体コードを用いた連星中性子星合体のシミュレーションに対して、適合多層格子9段、グリッド数1000×1000×1000の計算をポスト京に対して実行効率5%以上で実行可能にするようなチューニングを進め、ポスト京の運用に備える：(b)多様な重要物理素過程のみならず一般相対論的効果や多層格子法を実装した実空間3次元、運動量空間1次元の超新星爆発用輻射流体コードを完成させ、グリッド数2048×128×256(球座標)×20(エネルギー空間)に対して約4000ノード用いた計算を実行効率約5%で可能にするようチューニングを行いポスト京の運用に備える。またこれまでにない長時間計算(重力崩壊後数秒)を試験的に行い、爆発放出物から電磁波放射現象を調べるとともに、ブラックホールへの重力崩壊現象の特徴を半定量的に解明する：(c)空間3次元、運動量空間3次元を完全に取り入れた超新星爆発用ボルツマン輻射流体コードをポスト京用にチューニングを

進めるとともに、一般相対論的効果の取り入れと中心近傍の多層化格子化を進め、原始中性子星の進化も含めた超新星爆発計算を実行可能にし、ポスト京の運用に備える。なお目標とする計算効率についてはポスト京の詳細に依存するため、変更する可能性もある。

・ポスト「京」運用開始5年後：

[QCD 計算] バリオン2体力の高統計データとバリオン3体力データが得られ、バリオン間相互作用の理解が飛躍的に進む。

[原子核構造計算] ウランまで到達する広範囲な原子核の構造や反応が計算できるようになり、現在のところ未解明な部分がある、重い原子核の量子多体原理を明らかにする。原子核物理学の大目標である安定な超重元素の探索にも資する計算を行うことができるようになる。それに至る過程で、元素合成計算や核変換技術に必要な原子核構造・核反応の基礎データの取得が飛躍的に進む。

[爆発的天体現象] 観測的に多様性が示されている超新星爆発現象の再現や、中性子星連星の合体過程の定量的理解が進み、電磁波、重力波、ニュートリノ放射に対する光度曲線などが理論的に導出される。その結果、大型宇宙観測計画に必須の予言を行えるようになるとともに、大型望遠鏡による観測結果との直接比較が可能になり、観測と数値計算の協働により高エネルギー宇宙の姿を鮮明にできる。

アウトカム成果：

・ポスト「京」運用開始5年後：

中性子星合体で生成される不安定核のほとんどすべてが守備範囲に入り、中性子捕獲断面積の計算などを通じて、元素合成シナリオの作成に大きく寄与できるようになる。特に、アメリカのFRIB (2022年)、ドイツのFAIR (2025年)、などのように大型で高性能の加速器が相次いで投入され本格運用に入り、我が国に於いてもRIBFで新たな測定器のデータが得られるであろう。それらの実験に先駆けての予言や、得られたデータの解析において、ポスト「京」による大型シミュレーションは世界に並ぶものがない貢献をするのは確実である。原子核反応計算データが出揃うので、核変換技術への応用が期待される。また、爆発的天体シミュレーションや元素合成計算で得られた重力波波形や電磁波の光度曲線に対する理論的予言は、2020年代に本格稼働予定の重力波望遠鏡や大型光赤外望遠鏡における観測結果の理解および新しい天体現象発見に資する。具体的には、超新星爆発の観測的多様性の解明、観測による中性子星連星合体の初の発見、ガンマ線バーストの起源解明、キロノバと呼ばれる突発的天体起源の解明、ブラックホール形成過程の初めての観測に資する。

追加：数値シミュレーションで得られる重力波の理論波形やニュートリノの光度曲線データは公開し、実験・観測研究者の計画立案やデータ解析を側面から支援する。

・ポスト「京」運用開始10年後：

原子核に関しては、上記の研究はさらに進んでいると見込まれ、特に、安定超重元素の研究は具体性が高まり、ポスト「京」による計算に重要性はさらに増している。

10年後も上述したような観測は実施されており同様の成果が期待できる。大型望遠鏡がどのような観測結果をもたらすかにも依存するが、一般相対論の破れや新たな爆発的天体現象の発見に資する可能性もある(後述)。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

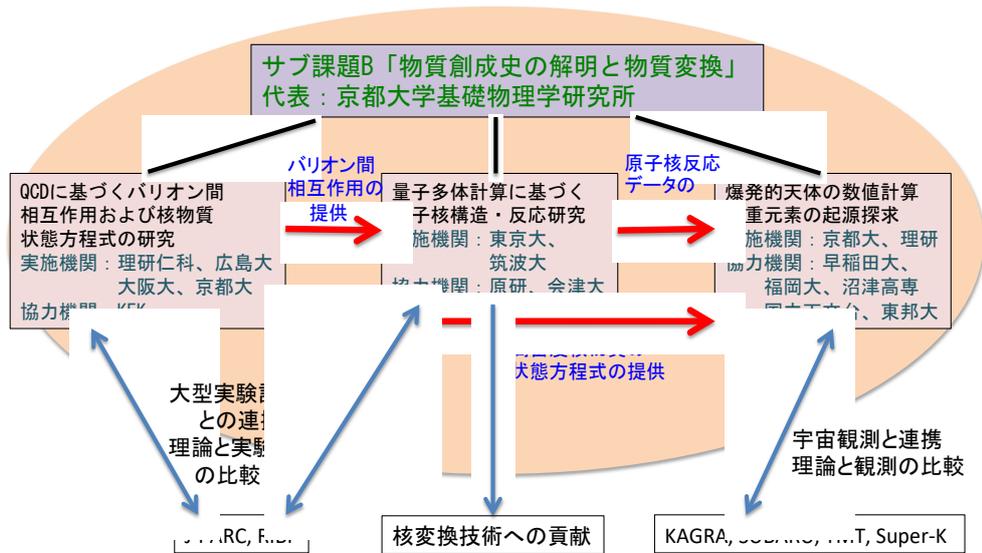
[QCD 計算] 京では、核力・ハイペロン力（2体力）を偶パリティセクタで求めているが、ハイペロン間力以外に対しては揺らぎが大きく統計精度が低い。奇パリティセクタやスピン軌道力までを含め高統計で精度よく計算するにはポスト「京」が不可欠である。またバリオン間3体力の導出には、2体力計算の最低1000倍の計算資源が必要となるが、これにはポスト「京」が必須である。

[原子核構造] 波及効果に関しては、京では元素合成過程での中間生成物核種の本格的な計算開始と、一部核種の核変換に関連する核種の構造計算を実現した。さらに重い原子核に関する構造計算を遂行するには、量子多体計算において考慮すべき理論空間の自由度を大幅に拡張する必要がある。現在は質量数130前後までの原子核殻モデルによる微視的計算が可能であるが、ポスト「京」を用い、適したコードを開発することにより、質量数の大きい原子核の構造計算が可能となる。それにより、宇宙での元素合成に関わる核種の広範囲にわたる系統的な計算が初めて実現され、RIBFなどこれから世界各地で運用される先端実験施設による大規模実験結果の予言や検証も可能になる。同時に、多様な質量数を持つ長寿命核廃棄物の必要な基礎データを計算、データベース化し、核変換技術の開発に資することもポスト「京」で初めて可能になる。特に、マイナーアクチノイドの計算にはポスト「京」が必要であり、応用に関わる基礎データの取得や精度向上に大きな波及効果が期待される。

[爆発的天体] 京では、3次元輻射流体計算が初めて実行され、ニュートリノ加熱過程に基づく超新星爆発現象が初めて再現された。また、中性子星連星合体がr過程重元素合成の生成源になりうる可能性が定性的に初めて示唆された。観測されている多様な超新星爆発現象の定量的再現や観測的予言、および中性子星連星の合体による重元素合成の定量的な理解には、一般相対論、磁気流体、輻射流体などあらゆる効果を取り入れた高解像度かつ長時間にわたるシミュレーションが必須であり、そのためにはポスト「京」が必要になる。

(5) 実施体制

HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」を中心的に推進してきた京大、東大、筑波大、広大などの教員および若手研究者がコアメンバーとなっており、専門的知識が十分にあると同時に、コードの構築・改良に対して強固な開発体制がすでに構築されている。また戦略課題5の運営を通して組織体制が確立しており、業務管理を適切に遂行できる体制はすでに構築されている（人員約60人）。



2-3. サブ課題 C. 大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明

(1) 目的・意義

2000年以降の宇宙観測により宇宙進化の概要が明らかになり、一方でダークマターやダークエネルギーとよばれる正体不明の要素の重要性も認識された。また、銀河やブラックホールなどの天体は、膨張宇宙の中で互いに影響し合いながら生まれ進化してきたことも観測的に明らかとなった。宇宙進化と天体形成を統一的に理解するためには、現実的な宇宙論的設定のもとでダークマターの密度揺らぎの非線形成長を追い、さらに流体力学や輻射輸送などの、天体形成に関わる基礎物理を取り入れたマルチフィジクスシミュレーションが必要である。一方で、計算科学の観点からは、様々な長さスケールで起こる多様な現象を取り扱うことができる計算コード開発が理想的である。例えば基礎方程式のレベルでは、プラズマ現象と重力多体系はともに無衝突ボルツマン方程式で記述されるため、多次元ボルツマンソルバーを開発すれば基礎過程から天体形成まで多様な用途に適用することができる。

今後10年の間には世界中で広域宇宙探査計画が進められる。日本が主導するすばる HSC サーベイでは、5億個の銀河、50万個の巨大ブラックホールを含む活動銀河、さらには2万4千個の超新星が検出されると期待されている。このような天文ビッグデータを統計解析するためには物質分布や時間変動天体の光度など様々な観測量に対して理論テンプレートを準備することが必須である。本研究ではこれらの観測データと大規模計算を融合したビッグデータ宇宙論を展開し、宇宙進化と天体形成の歴史を解明する。

(2) 実施内容

東京大学では、多次元パラメータ空間内で宇宙理論モデルを変動させた構造形成シミュレーションを多数実行し、物質分布パワースペクトルの共分散行列など、広域サーベイ観測データを解析するための必要な統計量を直接計算する。宇宙論的構造形成シミュレーションを遂行する研究員を雇用し、**理研 AICS** と共同で、1兆個以上の粒子を用いた粒子間相互作用計算を高速で行う並列コード最適化を行う。千葉大学では大規模な構造形成シミュレーションを実行し、準解析的銀河形成モデルと組み合わせ、銀河やブラックホールの広域サーベイ観測データと直接比較可能な天体疑似カタログを作成する。また初代星や初代銀河のような比較的小さい天体が、数億光年にわたる大領域の宇宙論的な進化に与える影響を調べる。

目標とする宇宙論パラメータ測定の一つに残存ニュートリノの質量がある。ニュートリノの存在により物質密度の揺らぎの振幅が抑制される効果を通して三代ニュートリノの質量和が測定可能であり、このための理論シミュレーションには無衝突ボルツマン方程式ソルバーが適している。**筑波大学では研究員を雇用し、東京大学と連携して、6次元相空間上でボルツマン方程式を直接積分する計算コードを開発する。**

国立天文台では空間3次元、光の方向2次元、振動数1次元の計6次元の一般相対論的輻射磁気流体コードを作成する。輻射磁気流体シミュレーションを行う研究員を雇用し、ブラックホール周辺領域の構造やダイナミクスを調べ、巨大ブラックホールの形成および進化過程を解明する。一般相対論的輻射輸送計算によってブラックホールの観測的性質を明らかにする。さらに、千葉大学と連携して、プラズマ電磁粒子シミュレーションを実行し、3次元磁気再結合の運動論効果を含む大規模過程を調べる。千葉大学では磁気流体・プラズマシミュレーションを遂行する研究員を雇用し、巨大ブラック

ホール成長過程と銀河中心核活動が銀河の進化に及ぼす影響を明らかにする。また、ブラックホール降着円盤の時間発展に磁気乱流が及ぼす影響を明らかにするため、高解像度磁気流体・輻射磁気流体シミュレーションを行う。そして、これらの計算結果をすばる HSC サーベイや 2016 年打ち上げ予定の日本の X 線天文衛星 Astro-H による活動銀河の観測と比較して銀河中心核の活動性を統一的に理解するモデルを構築する。さらに、降着円盤中や銀河中心核から噴出するジェット中での磁気リコネクションや高エネルギー粒子加速機構のプラズマ電磁粒子シミュレーション、6 次元ボルツマンシミュレーションを実施し、活動銀河で観測される高エネルギーガンマ線放射機構等を明らかにする。

筑波大学、東京大学、千葉大学は連携して 6 次元ボルツマン方程式の数値解法アルゴリズムを確立し、超並列計算を効率よく行える数値計算コードの開発を行う。コードは宇宙論・プラズマ・輻射輸送シミュレーション分野から使える共通のライブラリとして整備する。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果

- ・ 平成 29 年度終了時：
 - ・ 重力 N 体計算コードの最適化を行うとともにデータ圧縮技術を開発し、80 億個の粒子を用いた構造形成シミュレーションを 1000 個遂行する。京コンピュータの 100 万ノード時間を使用し、他の国内の大型計算機も使用する。データはライブラリとして保存し、それらのデータから重力レンズ歪みのパワースペクトルとその共分散行列を求める。
 - ・ 宇宙論的共動座標系での時間積分と空間 5 次精度差分法を実装した 6 次元ボルツマンコードを開発し、宇宙論的構造形成シミュレーションを遂行する。
 - ・ 一般相対論的 4 次元輻射磁気流体力学スキーム（空間 3 次元および振動数 1 次元）を開発する。ここでは光の方向は分割せずに輻射場を解く。空間を $64 \times 64 \times 32$ 、光の振動数を 32 に分割し、テスト計算を行う。京コンピュータの 20 万ノード時間を使用する。
 - ・ 一般相対論的輻射輸送方程式を空間 3 次元、振動数 1 次元、光線方向 2 次元の 6 次元計算によって直接解く計算スキームを開発する。
 - ・ 3 次元電磁プラズマ粒子 (PIC) コードを用いて、粒子数 1 兆個程度の相対論的衝撃波計算を実行する。10 イオン旋回周期程度の比較的短い時間スケールで完了する電子加速機構について明らかにする。この計算に京コンピュータの 600 万ノード時間を使用する。
- ・ 本格実施フェーズ終了時：
 - ・ 5500 億個の粒子を用い、大領域を設定した構造形成シミュレーションを 20 個遂行してデータを保存する。計算には京コンピュータの 900 万ノード時間を使用し、その他の国内の大型計算機を使用する。それらのデータから銀河 (ダークハロー) 分布のパワースペクトルとその共分散行列を計算する。また、サーベイ観測領域に適合した模擬銀河カタログを作成する。
 - ・ 6 次元ボルツマンコードを用いて 128 の 6 乗格子点で構造形成シミュレーション遂行する。これにより、宇宙の残存ニュートリノの大域的分布が理論的に明らかになる。京コンピュータの 900 万ノード時間を使用する。
 - ・ 空間と光の振動数を合わせて 10^8 に分割した一般相対論的 4 次元輻射磁気流体シミュレーションを遂行する。ブラックホール降着円盤およびジェットの構造、観測される輻射スペクトルが

明らかになる。

- ・空間 3 次元、光の方向 2 次元での輻射輸送方程式を直接解く一般相対論的輻射磁気流体スキームを開発し、コードの最適化を行う。
 - ・PIC コードの最適化をさらに進め、実行効率を現状の約 15%から 20%まで上げる。また、現状の 2 次元領域分割による並列化を 3 次元領域分割化にすると同時に、プロセス間のロードバランサーの実装を行う。3 次元領域分割化+ロードバランサーの実装により、強スケーリングで効率的なコードを開発し、系の長時間発展を追うことを可能にする。
 - ・実空間 3 次元速度空間 3 次元電磁ブラソフコードの開発を完了させる。これまでは実空間を領域分割し、速度空間は同一プロセスで共有するハイブリッド並列化を行っていたが、ポスト京では非常に多数のプロセス間通信が予想されることから、速度空間も含めた高次元領域分割化の技術の実装を行う。これにより、プロセス間の通信量を抑えることができ、強スケーリングに対して効率的なコードの実装を行う。
- ・ポスト「京」運用開始 5 年後：
- ・5500 億個の粒子を用いた重力 N 体シミュレーションを 100 個行い、ダークハロー（銀河）分布のパワースペクトルとその共分散行列を精密に計算する。
 - ・6 次元ボルツマンコードを用いて 256 の 6 乗格子点を用いた構造形成シミュレーションを遂行し、準非線形領域でのダークマターおよびニュートリノの位相空間分布を明らかにする。
 - ・空間と光の振動数を合わせて 8×10^9 に分割した 6 次元一般相対論的輻射磁気流体コードで、ブラックラックホール降着円盤およびジェットシミュレーションを遂行する。これにより円盤のダイナミクスおよびジェットの加速メカニズムを明らかにする。観測角度ごとの輻射スペクトルを求める。
 - ・開発したロードバランサー実装の 3 次元領域分割 PIC コードを用いて、相対論的衝撃波の長時間発展を追う。電子加速だけでなく、イオン加速についても明らかにする。粒子数はこれまでと同じく 1 兆個程度である一方、これまでの 10 倍の時間スケールであるイオン旋回周期の 100 倍程度まで計算を解き進める。複数の衝撃波角に対する、イオン・電子加速効率の違いを明らかにする。
 - ・6 次元電磁ブラソフコードを用いて、無衝突磁気リコネクションの大規模計算を行う。電子スケールからイオンスケール、流体的スケールまでのスケール間結合を明らかにする。さらに、実空間 3 次元計算を行うことで、磁気リコネクションと電流方向の別の不安定モードとの共存や競合、その結果生じる非線形発展と磁気エネルギー解放の違いを明らかにする。

アウトカム成果

- ・ポスト「京」運用開始 5 年後：
- ・すばる HSC サーベイの観測結果から得られる、1250 平方度にわたる宇宙のダークマター分布を解析し、宇宙の物質密度やダークエネルギーの状態方程式などを決定する。高精度の統計解析のために、6 次元ボルツマンシミュレーションのデータを含めた宇宙論的シミュレーションデータベースを用いる。

- ・高エネルギー天体のエネルギー源である降着円盤の構造や重力エネルギーの転換メカニズムを解明する。ジェット加速メカニズムおよび収束メカニズムを明らかにする。
 - ・ブラックホールへの質量降着率を定量的に求めることで、巨大ブラックホールの形成シナリオを解明する。
 - ・大規模 PIC シミュレーションにより高エネルギー電子の生成効率を明らかにし、2015 年度に打ちあげ予定の X 線観測衛星 Astro-H のデータを解析することにより、宇宙物理学の最大の謎の一つである宇宙線電子の生成について理論・シミュレーション・観測の三位一体で解決を目指す。
- ・ポスト「京」運用開始 10 年後：
 - ・6次元ボルツマンコードを用いて 512 の 6 乗格子点を用いた構造形成シミュレーションを遂行する。ダークマター、ニュートリノに加えて銀河間ガスの進化も追い、星生成やブラックホール降着を取り入れた宇宙論的銀河形成シミュレーションを遂行する。
 - ・6次元一般相対論的輻射磁気流体コードを用いて、降着円盤およびジェットの高時間シミュレーションを遂行する。円盤やジェットの高時間変動や進化を解明する。
 - ・ブラックホールの表面から遠方にわたる大ダイナミックレンジでの一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションを遂行する。降着円盤から噴出する高速ガス流や輻射のエネルギーと運動量を定量的に求め、超巨大ブラックホールの成長過程における母銀河への影響を解明する。
 - ・相対論的衝撃波の PIC シミュレーションによって電子のみならず、イオン加速も同時に扱うことにより、超高エネルギー宇宙線ができる様子を明らかにする。IceCube による高エネルギーニュートリノ観測、その他人工衛星によるガンマ線観測と相補的に解析を行うことにより、宇宙における最高エネルギー粒子の起源に迫る。

(4) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

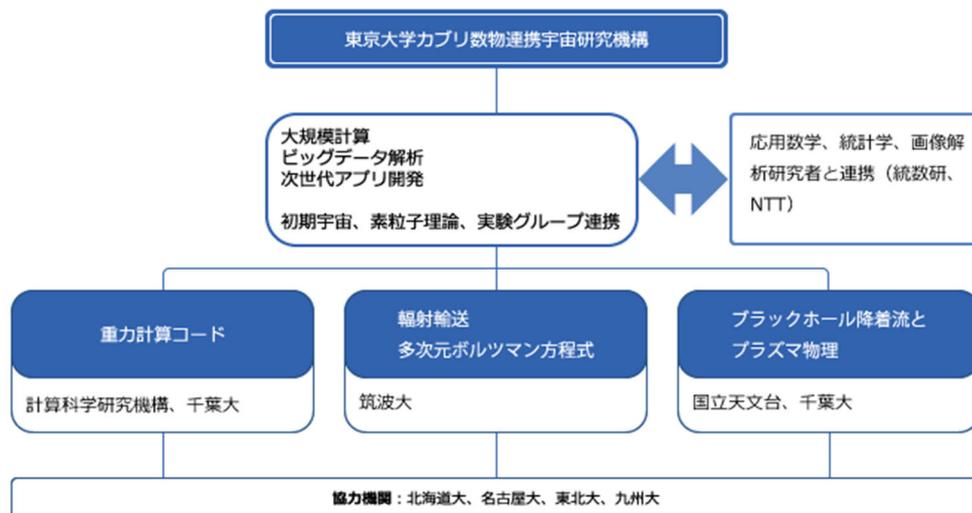
京では筑波大(現千葉大)グループにより開発された GreeM コードで 2 兆個の粒子を用いて初期宇宙の小構造形成、および 5500 億個の粒子を用いて 50 億光年の領域を初期宇宙から現在まで追う計算を行った(後者は 1 ランあたり約 138 万ノード時間)。ポスト京では、同数の粒子を用いて差し渡し数億光年以上という大領域を設定し、その中で星団サイズの天体を解像できるシミュレーションを多数回実行し、世界で初めて、宇宙論統計の共分散行列を高解像度非線形シミュレーションから直接求める。また世界最大の数十兆粒子規模のシミュレーションを少数実行し、世界最高分解能の天体疑似カタログを作成する。これはポスト「京」ではじめて可能となる計算で、数百時間を要する。6次元ボルツマンコードは京での利用実績はないが、後継機種 of FX10 で 64^6 個の格子数での実行を確認している。また、国立天文台の Cray XC30 では $128^3 \times 64^3$ 個の格子数での実行実績がある。ポスト京では、 256^6 個の格子数で宇宙大規模構造形成に対するニュートリノの影響を計算する。これにより、ニュートリノの分布を個々の銀河や銀河団のサイズ程度の長さスケールまで詳しく計算することができ、観測結果との直接比較が可能になる。

ブラックホール周辺現象解明には、ポスト京で一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションを用い、空間を $256 \times 256 \times 128$ 、方向と振動数を 1000×100 以上に分割した計算を実行する。また、1000 兆個

の粒子を用いたプラズマ電磁粒子シミュレーションを適合細分化格子上で実施し、3次元磁気再結合の運動論効果を含む大規模過程を明らかにする。「京」を用いた相対論的3次元輻射磁気流体シミュレーションにより、512×128×512メッシュ程度を用いたブラックホール降着流のシミュレーションが可能になった。しかしながら、円盤中で成長する磁気乱流が降着円盤の進化に及ぼす影響を明らかにするためには2048×512×2048メッシュ程度を用いた高解像度計算が必要であり、ポスト「京」を必要とする。ブラックホール降着流の6次元輻射輸送シミュレーションのため、メッシュ数256×256×128(空間)×1000(方向)×100(振動数)で、ステップ数2000万の計算にポスト「京」を用いて120時間を要する。これはポスト「京」を用いて初めて可能になる計算である。電磁粒子コードを用いた粒子加速計算は、「京」を用いて空間2次元の計算が可能になっているが、本格的な3次元計算にはポスト「京」を必要とする。また、磁気リコネクション領域等を捉えることができる高解像度の6次元プラズマシミュレーションにもポスト「京」を必要とする。

(5) 実施体制

国内の大学、計算科学研究機関、国立天文台で宇宙進化と天体形成に関する研究を進めるとともに、統計数理研究所や企業研究所の数学者、統計学者、計算科学研究者と協同し、大規模観測データを効率良く解析する手法を開発する。大規模数値計算と観測ビッグデータの融合により宇宙進化の謎に迫る。



2-4. サブ課題共通：分野振興および普及

(1) 目的・意義

本重点課題の研究計画を実施する上で、サブ課題間の連携を密にすると同時に若い世代の研究者を育成することは、特に本課題のように分野を広くカバーする研究課題においては、研究自体と不可分で重要なものである。研究の中心戦力として活躍する大学院生やポストドクが初期の段階から近隣分野の研究に目を向けて幅広い視野を養うには個別の大学・研究室における教育だけでなく、本課題のように多くの機関が連携して行う活動が必要がある。HPCI 戦略プログラム分野5でも実施した、スクール等を通じた人材育成を本重点課題でも継続して実施したい。

全国の研究者がかかわる本重点課題では、計算で得られたデータの管理・移動が重要な課題になる。HPCI 戦略プログラム分野5では、HPCI 共用ストレージだけでなく独自のデータグリッドである JLDG (Japan Lattice Data Grid)を整備運用して、このニーズに答え、関連する技術を開発・蓄積してきた。管理するデータ量は年を追って増大しており、それに応じて新たな開発課題も生じてきている。本重点課題でも JLDG の整備運用を継続して行い、研究を進める上での基盤を整える必要がある。

研究内容と成果を広報して国民の理解を得ることは、本重点課題としても重視していきたい。HPCI 戦略プログラム分野5では専属の広報担当者を置いて広報企画の立案・実施に当たったが、同様の体制なしに十分な広報機能を確保することは不可能である。本重点課題でも専属の広報担当者を置き、新たな広報企画等を立案・実施するとともに、ポスト京および重点課題全体の広報活動にも協力して取り組む。

(2) 実施内容

それぞれのサブ課題の研究分野ごと、あるいは分野横断的なスクールを応用数学や計算機科学との連携のもと、定期的で開催する。プログラム講習など、サブ課題に共通する講習会なども必要に応じて実施する。

現在国内の9拠点が参加して運用している JLDG の開発・整備・運用を行う。新たな機能の導入とともに、需要の増大に対応して資源の拡大を図り、HPCI 共有ストレージと連携する研究基盤として整備する。

広報活動に関しては、HPCI コンソーシアム「今後の計算科学技術振興のあり方に関する提言」3(3)人材育成及び広報・広聴、の項目にあるように、広聴機能の強化をめざす。また、HPCI 戦略プログラム分野5で行ってきた広報活動を、費用対効果をベースに厳選して実施するとともに、クォークカードに続く素核宇宙を身近に感じられる新規コンテンツを制作する。

広聴機能を強化するために、他の重点課題実施機関、AICS、RIST とも協力のうえ、社会の課題を HPCI にフィードバックする仕組みを構築する。重点課題が終了するまでに、可能であれば試験運用を行う。構築した広報・広聴体制は、ポスト「京」が運用される平成32年度以降に引き継ぐ。

(3) 目標・期待される成果

人材育成のために行うスクールでは、各分野で2年に1回の全国的なスクール開催を目指す。参加した大学院生・ポストドクが一定数以後の重点課題の研究に参加できるようになることが目標である。

JLDG の整備・運用は、容量を増強しながら安定運用を継続することが目標となる。

広報活動に関しては、ホームページを通じて成果の公表、イベント等での一般普及活動など、HPCI 戦略プログラム分野5で行ってきた通常の広報活動に加えて、一般向け新規コンテンツを平成29年度終了

時までに開発して以後の広報イベント等に活用することを目標とする。

(4) 実施体制

人材育成の活動は、計算基礎科学連携拠点の企画運営チームが中心となり、重点課題全体の取り組みとしてそれぞれのサブ課題の参加者がかかわる形で行う。

JLDG の整備・運営は、参加 9 機関からそれぞれ担当者が参加し、筑波大学計算科学研究センターが中心となって進める。

広報活動については、筑波大学計算科学研究センターに広報担当者を置き、重点課題に参加する研究者らが協力して実施する。

3. 採択時の留意事項への対応状況

(1) 課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、報告書（※）の別添1にある重点課題⑨の概要の記載内容を踏まえ、課題全体から見た各サブ課題の位置付けと関係を明確にするとともに、ポスト「京」ならではの成果について一般に訴求力のある説明も明確にすること。

※ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会報告書

課題全体として達成すべき成果を、最終目標「既存の計算資源を用いた各サブ課題での最先端の研究を継続してポスト京での研究につなげる。アプリの本格的な最適化を実施し、ポスト京で実行する準備を完了する」とするなど定性的に記述した。目的・意義には、「超弦理論による宇宙開闢のシミュレーションから原子核の構造計算、爆発的天体のシミュレーション、宇宙の大規模構造形成に至るサブ課題の研究を推進し、各課題で世界最先端の成果創出を目指す素粒子から宇宙までの異なるスケールにわたる現象の精密計算を実現」し、「大型実験・観測のデータと組み合わせて、多くの謎が残されている素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史を解明する」と各サブ課題を位置づけている。

(2) 相乗効果が期待される他プロジェクト等と密に連携して取り組むとともに、役割分担を明確にすること。その際、提案されている実験・観測プロジェクトとの連携体制を具体化するとともに、連携によって達成されるアウトプット及びアウトカムを明確にすること。また、海外との連携の進め方について明確にすること。

SuperKEKB（サブ課題A）、J-PARC（サブ課題A,B）、RIBF（サブ課題B）、KAGRA（サブ課題B）、すばるHSCサーベイ（サブ課題C）の実験・観測プロジェクトとの連携に関しては、役割分担、アウトプット、アウトカムの明確化などは既に計画に反映している。それ以外の実験や観測との連携に関して可能性は準備研究フェーズで検討を進める。海外との連携の進め方については、サブ課題Bに関して既に反映済み。他のサブ課題における海外との連携の可能性は準備研究フェーズで検討を行う。

(3) 基礎科学のプレゼンス向上ならびに計算科学が果たす役割を一般にアピールする観点から、実験・観測プロジェクト等と連携した成果発信の方策を示すこと。

実験・観測プロジェクトと連携した情報発信に関しては、研究面での連携を行う中で、今後、具体的にどのように行うかの摺合せを、先方の広報担当と重点課題の広報担当を中心に行う。

(4) ポスト「京」以外の計算資源を活用する研究活動と協調したプロジェクトの進め方を明確にすること。

共同利用研の計算機更新や東大・筑波大等に導入予定の新しいマシンが使えることを想定して、ポスト「京」以外の計算資源を別紙4のように活用する予定であり、計算基礎科学連携拠点の運営委員会におい

て、拠点に参加する各研究所等の計算資源を活用する研究活動と協調してプロジェクトを進めていくことを実施体制に反映している。

(5) 人件費の占める割合が大きいが、本プロジェクトで雇用する研究者（ポスドク等）の人員計画を明確にするとともに、将来のステップアップまで見据えた登用、人材育成の取組の計画を明確にすること。

研究者（ポスドク等）の人員計画の明確化は反映済み。将来のステップアップまで見据えた登用に留意して実際の人員採用を行う。目的が重点課題の実行である本プログラムで行うことが可能な人材育成に関しての検討を行う。

4. 中間評価における指摘事項への対応状況

- (1) 課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、各サブ課題の進捗状況、問題点に基づいて、新しい理論体系に迫る等、新たな課題設定をより選択的・戦略的に推進することを検討すること。

課題全体では、既存の計算資源を用いた各サブ課題での最先端の研究を継続してポスト京での研究につなげることを目標とする。最終的な目標として、アプリの本格的な最適化を実施し、ポスト京で計算を実行する準備を完了する。また現行の実験・観測と連携して、新たな科学的謎の解明に資する。

【サブ課題 A】

- ① 平成28、29年度に行った研究の結果、重いクォークに対する QCD シミュレーションの系統誤差の制御に関する理解が進んだ。これを基礎として当初からの計画通りセミレプトニック崩壊の本格的な計算に進む。
- ② 一方、国際的な研究の進展によりミューオン異常磁気能率のための計算を現在のセットアップで進めることは効率が悪いと考えられるため、計画から一旦外すこととした。その代わりに、(ミューオン異常磁気能率も含む) 将来の応用を視野に入れて、ポスト京の時代の基礎格子データ生成に向けた国際協力の枠組みを構築し、さまざまな計算プラットフォームで性能の出る計算コードの開発に取り組むこととした。
- ③ QCD 相転移に関しては、平成28、29年度の研究の結果、2フレーバーQCD の相転移の性質に関して新たな知見が得られたことから、有限体積効果を含むより詳細な調査を行い、ポスト京での本格研究に向けた準備とする。
- ④ 超弦理論に関しては、計算手法の開発において新たな進展が得られており、フェルミオンの効果も含んだ行列模型のシミュレーションなど、ポスト京での本格的な計算に向けた準備に移行する。

【サブ課題 B】

- ① 高密度核物質状態方程式の微視的計算が決定的に重要になっている状況に鑑み、QCD に基づく核物質系の性質、という世界初となる研究を行う。特に、従来大きな不定性をもたらしてきたハイペロン力について、本課題で計算された物理点における格子 QCD ハイペロン力を用いることで大きな進展を目指す。
- ② 格子 QCD ハイペロン力と実験との新たな連携を基盤に、RHIC や LHC で行われている重イオン衝突における $N\Omega$ 、 $N\Xi$ などの2粒子相関を格子 QCD ハイペロン力に基づき計算することで、理論・実験両輪となった研究の進展を目指す。
- ③ これまで進めてきた物理点バリオン間力計算と相補的な計算として、クォーク質量 270MeV 近傍で大体積・大統計のゲージ配位を生成し、バリオン間力を計算する。これは、物理点ではないがその代わり計算精度が大幅に向上することが見込まれる。また、これまでの物理点計算と比較することで、バリオン間力のクォーク質量依存性を明らかにできる。
- ④ これまで中性子過剰なエキゾチック原子核の研究を進め、量子相転移の発見などの成果を

挙げてきた。それらの中性子過剰な原子核には中性子星合体によって起こる爆発的現象で生成されるものが多く含まれるが、中性子星合体の観測により、どのエキゾチック原子核が重要であるかが明確化されるので、そこに重点を置き研究を進める。中性子星合体のような中性子が潤沢にある環境下では、極めて中性子過剰な原子核が関わるために、核構造や核反応の未知の性質や事象が関わる一方で、まだ励起状態にあるうちに次の中性子捕獲が起こるなど従来にはなかった形で中性子捕獲が起こることも予想されるが、それらの未知の現象を明らかにする。

- ⑤ 近年飛躍的に進化している人工知能研究で用いられている技法を原子核構造研究に試行的に応用し、ポスト京のコンピュータでは実装できる技法にまで持っていくことを目指す。試験的な研究は行っており、成果も出ている。
- ⑥ 2017年8月17日、連星中性子星からの重力波(GW170817)とその合体に対応した電磁波が、初めて重力波望遠鏡と光学望遠鏡で同時に観測された。重力波望遠鏡 advanced LIGO と advanced VIRGO は、さらに感度を向上させ、2018年の秋から一年以上にわたる長期観測を計画している。したがって、2018年秋以降、連星中性子星やブラックホール・中性子星連星からの重力波が、複数観測されることが予想される。このことを踏まえ、高精度の数値相対論計算を行い、中性子星連星の幅広いパラメタに対する重力波テンプレート構築を急ピッチで進める。テンプレート構築は、重力波観測から中性子星の状態方程式を決定するのに必須であり、重力波天文学分野において数値相対論研究者に強く期待されている仕事である。
- ⑦ 今回の観測では、光学望遠鏡による観測によって、合体過程、重元素合成過程、中性子星の状態方程式に対して大量のヒントが得られた。ただし、観測を解釈し、物理的アウトプットに焼きなおすには、数値相対論によるシミュレーションが必要不可欠である。そこで、考えられる多様な場合(特に連星の質量と状態方程式の多様性を考慮)を想定したシミュレーションを行い、来たる観測に備える。
- ⑧ 一方、重力波望遠鏡による連星ブラックホールの観測が急ピッチで進んだ。これまでに連星ブラックホールは5例観測されたが、その結果、宇宙には太陽質量の20~30倍の質量を持つ大質量ブラックホールが多数存在することが分かってきた。しかしその起源は现阶段では謎に包まれている。もっとも標準的なシナリオに従えば、そのような大質量ブラックホールは、恒星進化の結果が誕生したと考えられている。そこで、超新星爆発計算用コードを転用し、大質量ブラックホールの形成過程の解明を調べることを新たな目標に加える。

【サブ課題C】

- ① X線観測衛星 Swift や硬 X 線観測衛星 NuSTAR を用いた最近の観測により、ブラックホール降着天体の時間変化の詳細が明らかになるとともに、従来の降着円盤モデルでは説明できない「明るいハードステート」状態などが発見された。高解像度の3次元磁気流体シミュレーションを用いて高温円盤と低温円盤が共存する状態の維持機構の解明や X 線輝線放射領域の決定、X線光度の絶対値の決定等を新たな目標に加える。国際宇宙ステーションに搭載された高時間分解能 X 線観測装置 NICER を用いた観測との直接比較を目指す。
- ② 活動銀河中心核の多波長観測結果、特にすばる望遠鏡の Hyper Suprime Cam による可視光

光度変動観測と Swift 衛星による紫外-X 線観測とを組み合わせ、巨大ブラックホール降着流における降着率と光度変動の関係、ジェット・アウトフローの生成条件等を明らかにし、宇宙初期におけるブラックホール成長の研究と連携する。

- (2) 情報科学技術分野における研究開発の論文数、学会発表数は、事業の成果を議論する上で1つの指標となりうるため、分野の特性を考慮の上、論文数、学会発表数の達成目標値を設定すること。

中間評価後の論文数、学会発表数の達成目標をサブ課題等ごとに以下のように設定する。

【サブ課題 A】

査読付き論文 6 件、学会等発表 20 件を目標とする。

【サブ課題 B】

査読付き論文 32 件 (QCD 分野 6 件、原子核分野 16 件、宇宙分野 10 件)、学会等発表 180 件 (QCD 分野 60 件、原子核分野 40 件、宇宙分野 80 件) を目標とする。

【サブ課題 C】

査読付き論文 20 件、学会等発表 40 件を目標とする。

- (3) 予備計算などを通じて、サイエンス的な目標を明確にすること。その目標に対して、ポスト「京」でいつまでに何をどこまで明らかにすることを目指すのかを明確にすること。その時点でポスト「京」で初めてできる画期的な利活用について具体的に説明すること。

【サブ課題 A】

B 中間子のセミレプトニック崩壊について 2~4% の精度で標準模型の予言を計算することが目標であり、ポスト「京」での計算開始から約 2 年後にその目標を達成することを目指す。この目標を達成することにより、SuperKEKB 実験 (Phase 3 が 2018 年末から開始。2024 年まで) と連携して、素粒子の標準模型を超える現象が存在すれば、それを発見することが可能になる。

【サブ課題 B】

2017 年 8 月に連星中性子星の合体現象 (GW170817) が、重力波・電磁波で同時観測された。2019 年以降の LIGO, Virgo での新たな観測開始、2020 年以降に始まる KAGRA での観測により、今後中性子星合体現象が大量に観測されると予想され、中性子星と高密度核物質の研究は飛躍的に進むことが考えられている。この状況において、サブ課題 B では、特に以下の 2 つの目標を研究に中心に据える。

① 中性子星の内部構造の決定

② 連星中性子星の合体における重元素合成

どちらのテーマも、観測 (重力波、電磁波など)、地上実験 (ハイパー核、不安定核など)、理論計算 (ポスト「京」による大規模計算など) の三者が連携して研究を進めることが重要になる。

① 中性子星の内部構造の決定: 中性子の内部構造は核物質の状態方程式により決定される。バリオン間力が分かればクラスター変分法などの量子多体計算より核物質の状態方程式を決定することができる。核力は実験的によくわかっている一方、中性子内部は高密度になるためハイペロンが存在し、状態方程式にはハイペロンを含めたバリオン間力が必要になるが、実験的に決定することは難しい。そこで格子 QCD の計算でバリオン間力を理論的に決定する

ことを目標とする。ポスト「京」での計算開始から約3年後に必要なバリオン間の2体力を決定することを目指す。決定された2体力は J-PARC などでのハイパー核実験や散乱実験などによりその精度を検証することができる。また、中性子星の質量と半径がわかると状態方程式の1点の情報を得ることができるので、連星中性子星の合体による重力波や電磁波の観測と数値相対論によるシミュレーションを組み合わせることで、質量や半径、さらには、状態方程式そのものを決めることができる。そこで、一般相対論、磁気流体现象、ニュートリノ輻射輸送などを観測データの解釈に必要な精度で取り入れたシミュレーションを行い、重力波観測から中性子星の状態方程式を決定することを目指す。ポスト「京」での計算開始から約2年後に状態方程式の半定量的な決定を目指す。このように2通りの実験／理論の組み合わせで結果を相互チェックして中性子内部の状態方程式を決定することは、ポスト「京」でしか成し得ない画期的な成果である。

- ② 連星中性子星の合体における重元素合成：宇宙進化のどの時点で重元素が合成されたかは自然科学の大きな謎の1つである。近年は、連星中性子の合体が重元素合成の場ではないかという考えが注目を集めている。そこで、連星中性子星の合体に付随する重力波や電磁波の詳細な観測データと数値相対論による精緻なシミュレーションを組み合わせ、重元素合成の起源を明らかにすることを目指す。ポスト「京」での計算開始から約3年後に連星中性子の合体が重元素合成の場になり得るのかを明らかにすることを目指す。重元素合成をより精密に理解するには、不安定核の性質を知ることが必須である。そのために超ウラン領域近くまでの領域の中性子過剰な不安定原子核の構造や反応を量子多体計算で決定し、重元素合成のシナリオ解明に役立てることを目標にする。ここでは、理研の RIBF などの世界での先端的不安定核実験と比較することでその精度を検証しつつ、実験がすぐには実現しない極めて中性子過剰な領域では宇宙物理での検証、検討から、場合によっては逆に原子核物理へのフィードバックを行うなどの双方向の連携を行う。ポスト「京」での計算開始から約2年後には超ウラン領域の原子核の構造や反応の計算を開始し、数値相対論による元素合成シミュレーションに活用することを目指す。それらの成果を安定な超重元素の探求に結びつける。

【サブ課題 C】

最大 55 兆粒子を用いた宇宙の構造形成シミュレーション（「京」を用いて行った最大の計算の約100倍の規模）を行うことを目標とし、ポスト「京」での計算開始から約2年後にその目標を達成することを目指す。この計算により、宇宙の構造形成シミュレーションを用いて銀河内部構造を解像することができる。

高精度ブラソフ方程式ソルバーによる格子数 256 の 6 乗（「京」での最大の格子数は 128 の 6 乗）という世界最大のシミュレーションを実行することを目指す。この計算により、実空間、運動量空間ともに高解像度のシミュレーションで宇宙の残存ニュートリノの分布と、ニュートリノが大規模構造形成に及ぼす影響が明らかにされる。

- (4) 基礎科学のプレゼンス向上ならびに計算科学が果たす役割を一般にアピールする観点から、実験・観測プロジェクト等と連携した成果発信の方策を示すこと。

【サブ課題 A】

特に SuperKEKB プロジェクトと連携した成果発信に注力する。実験と理論合同のワークショップなどを通じて互いに災禍発信のアイデアや情報を交換する。また、両者が合同して行う一般向け講演会などの企画・実行を検討する。

【サブ課題 B】

格子 QCD のハイペロン力を基盤に、J-PARC 実験と連携し、H-dibaryon などの新粒子探索や Ξ ハイパー核の系統的研究などを進め、実験グループと協力してその成果の発信に努める。また、格子 QCD により計算されたバリオン間力を RHIC/LHC 重イオン衝突における二体バリオン相関と比較する研究の成果を実験グループと協力して発信する。

本課題で行っている大規模原子核構造計算を基盤に、理化学研究所 RIBF 加速器施設などの世界中の加速器施設による実験プロジェクトと共同研究をさらに進め、記者発表や一般向け雑誌の記事などによりその成果を発信する。

重力波観測グループ KAGRA に重力波テンプレートを提供し、それを用いたデータ解析の成果を一般向けに発信する。日本の光学観測チーム JGEM と協力し、GW170817 の光学対応天体の理論的解釈などの成果を発信する。

【サブ課題 C】

2020 年頃まで継続されるすばる HSC サーベイから得られる銀河データと、本研究で行う大規模シミュレーションの結果から作成した模擬銀河カタログを組み合わせ、銀河分布などを 3 次元的に表示するなどの方法を活用して観測成果の意義を一般向けに分かりやすく伝える。

- (5) 成果の利活用について、社会、研究コミュニティにおける取組の具体的な方針・成果を明確にすること。

【サブ課題 A】

格子 QCD の基礎データを分野内で共有する International Lattice Data Grid (ILDG) の取り組みに協力し、データの公開を進める。

【サブ課題 B】

格子 QCD で計算したバリオン間力は広く公開し、ハイパー核や核物質の多体計算、重イオン衝突における 2 体相関計算などに供する。これまでもクォーク質量が重いところでの計算データを提供してきたが、本課題により得られた物理点でのデータを提供することで、より大きなインパクトを与えることができる。また、バリオン間力計算の過程で生成した格子 QCD ゲージ配位については、データグリッド (ILDG) を通じて世界に公開する。本課題で生成されるゲージ配位は、特に大体積・大統計という点に特徴があり、バリオン間力計算に留まらず幅広い物理量の計算に利用されることが期待される。

理研 RIBF 加速器を始めとする世界の多くの実験の研究グループに、必要となる核構造データや知見の提供を続け、また、共同して新たな構造様式や現象の解明などを行う。ポスト「京」計算機で得られる成果を、元素合成解明、核廃棄物処理への応用に必要となる基礎データとして提供を行う。原子核を用いて行うニュートリノ質量決定実験のための二重ベータ崩壊核行列要素の精密計算など、素粒子物理での基本的対称性研究にも寄与する。

数値相対論で計算した中性子星連星により放射される重力波の高精度波形モデルを、順次公開していく予定である。これらのデータは、advanced LIGO や VIRGO に所属するデータ解析研究者には非常に有用である。実際に、GW170817 の検出時には、advanced LIGO のデータ解析チームから波形の提供の依頼があり、高精度波形を一例提供した。

本課題で得られる 3D 超新星計算に基づく重力波波形データ、さらにはニュートリノ光度、平均エネルギーなどのデータを整備、公開し、今後のマルチメッセンジャー観測 (Super-Kamiokande, LIGO, Virgo, KAGRA 等) に備える。また、輻射流体計算の技術は広く物理・工学にわたり必要なものであり、ニュートリノ輻射輸送のポスト京で実現する初めての 3 次元輻射流体計算シミュレーションによる計算技術を他分野での応用にも役立てるように成果を広める。

【サブ課題 C】

宇宙の構造形成シミュレーションの出力から作成した銀河ダークマターハローの各種物理量や形成史をデータベース化し、再利用しやすい形で公開し、その整備を続ける。

<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~ishiytm/db.html>

これは、データベースシステムと WEB アプリの連携により、個々のユーザが必要なデータのみをダウンロードできるシステムだが、その改良も続ける。このデータベース化により、公開予定のすばる HSC サーベイ (2020 年頃まで継続) の銀河データとの比較が容易になる。

また、磁気流体コード CANS+ を開発・公開し、サマースクールなどを通して大学院生や若手研究者の研究、教育に役立てて貰う。

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/cans/doc/cans.html>

(別紙 1) 実施機関一覧

	実施機関	備考
	筑波大学	代表機関 (課題責任者)
サブ課題 A	高エネルギー加速器研究機構	分担機関 (サブ課題責任者)
	広島大学	分担機関
	大阪大学	協力機関
	名古屋大学	協力機関
	東北大学	協力機関
	筑波大学	協力機関
	新潟大学	協力機関
	理化学研究所	協力機関
	静岡大学	協力機関
	慶應義塾大学	協力機関
	摂南大学	協力機関
	九州大学	協力機関
	岡山光量子科学研究所	協力機関
	サブ課題 B	京都大学
東京大学		分担機関
大阪大学		分担機関
広島大学		分担機関
理化学研究所		分担機関
早稲田大学		協力機関
東邦大学		協力機関
福岡大学		協力機関
沼津高専		協力機関
会津大学		協力機関
日本原子力研究開発機構		協力機関
国立天文台		協力機関
筑波大学		協力機関
サブ課題 C		東京大学
	千葉大学	分担機関
	筑波大学	分担機関
	国立天文台	分担機関
	理化学研究所	分担機関
	北海道大学	協力機関
	名古屋大学	協力機関
	東北大学	協力機関
	九州大学	協力機関