

令和元年度 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

令和元年度

「宇宙の基本法則と進化の解明」

成果報告書

令和2年5月29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令和元年度「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. 令和元年度（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）	5
4－3. 活動（研究会等）	5
4－4. 実施体制	41

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（60 歳） ※2020 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
		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. 令和元年度（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」

素粒子現象論に関しては、DおよびB中間子のセミレプトニック崩壊の形状因子の最終解析を行い、崩壊率の実験データとの比較により、関連する小林益川行列要素を決定する。また、標準理論を超える相互作用の効果を記述する形状因子へと計算を拡張する。QCD相転移に関しては、2フレーバーQCDの有限温度相転移の高温相で発見された大きな体積効果の理解に向けた計算を行い、さらに、相転移温度に近づけた計算により、相転移とトポロジー、量子異常の解明につな

げる。また、3フレーバーQCDの相転移研究のためのコード開発を進め、ポスト京での本格的な実行に必要な予備計算を行う。超弦理論に関しては、超対称ゲージ理論の計算の最終解析を行うとともに、ローレンツ型IIB行列模型に複素ランジュバン法を適用した計算を行い、ポスト京で利用する計算手法を最終的に確認する。また複素ランジュバン法を応用することにより、有限密度QCDの相図の探索を進める。

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、中性子星の状態方程式の構築、重元素合成計算、及び核変換研究に必要な数値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、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、非弾性散乱状態に起因する系統誤差抑制手法の研究や、微分展開の高次項研究、そのためのコード開発などを進めると共に、一般のハドロン共鳴状態を扱うための計算手法の拡張に向けた研究開発を行う。
- ・ 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、ポスト「京」で本格計算が可能となる質量数200近傍の原子核の試行計算をすすめると共に、中性子過剰核の大規模核構造計算を進めてエキゾチックな構造や存在限界の解明をおこなう。
- ・ 宇宙分野に関しては、まず一般相対論的輻射磁気流体コードを用いて連星中性子星の合体、重元素合成、及び電磁波放射過程について調べる。なお今年度に連星中性子星の合体が観測された場合、その観測結果を説明するためのシミュレーションを系統的に行う。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」などのHPC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行う。

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る。また宇宙論統計解析コードを開発する。

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の研究内容のうち、素粒子現象論および超弦理論の研究、ならびにQCD相転移研究のうちシミュレーションデータの解析を担当する。

⑤格子QCD計算によるQCD相転移の解明

(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所)

サブ課題Aで、2フレーバーQCDの有限温度相転移の高温相で発見された大きな体積効果の理解に向けた計算を行い、さらに、相転移温度に近づけた計算により、相転移とトポロジー、量子異常の解明につなげる。また、3フレーバーQCDの相転移研究のためのコード開発を進め、ポスト京での本格的な実行に必要な予備計算を行う。

⑥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の活動として、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、離散データから部分波を構成することにより系統誤差を抑制しより多くの成分を取り出す手法の研究を進める。宇宙分野は、まず一般相対論的輻射磁気流体コードを用いて連星中性子星の合体、重元素合成、及び電磁波放射過程について調べる。なお今年度に連

星中性子星の合体が観測された場合、その観測結果を説明するためのシミュレーションを系統的に行う。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。

⑦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)

サブ課題Bで、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、ポスト「京」で本格計算が可能となる質量数200近傍の原子核の試行計算をすすめると共に、中性子過剰核の大規模核構造計算を進めてエキゾチックな構造や存在限界の解明をおこなう。

⑧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、非弾性散乱状態に起因する系統誤差抑制手法の研究や、コード開発などを進める。

⑨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、ストレンジネスを多く含むハドロンや、チャームクォークを含むハドロンに関する相互作用を格子QCDにより計算する。この相互作用を用いた散乱振幅の解析を通して、これらのハドロンの束縛状態や共鳴状態の探索を行う。

⑩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コードの最適化を進める。また広域銀河観測データの統計解析手法を開拓し、解析コードを開発する。

⑪一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、昨年度までに開発したボルツマン方程式に基づく一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコードを最適化し、ブラックホール降着流のシミュレーションを実施する。一般相対論的輻射輸送計算を実行して輻射スペクトルと偏光分布の質量降着率依存性と観測角度依存性を計算し、理論と観測の両面から中心天体および周囲の構造を解明する。

⑫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、コンプトン散乱を考慮した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実装と最適化を進め、状態遷移・ジェット噴出シミュレーションを実施する。衝撃波における粒子加速について、引き続き動的領域分割可能なプラズマ粒子コードの開発を続け、イオン加速まで長時間発展を追うことができるスケラブルなコードを完成させる。さらに、ポスト京CPUに向けたスカラチューニングを行い、レジスタが少ないCPUでも高効率に実行できるコードを作成する。

超高解像度重力N体シミュレーションを遂行し、それをベースに宇宙最初期からはじまる宇宙の天体形成史をモデル化する。初代天体と銀河中心巨大ブラックホールの関係を宇宙論的文脈で理解する。

⑬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)

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。

⑭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実施したカーネル部の実装とチューニングを実際のテスト機で検証するとともに、ネットワークによる通信部分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。

⑮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

標準理論を超える新物理の探索に向けて、B 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子の計算を高精度化するとともに、昨年度までに開発した新しい応用をより現実的なシミュレーションへと拡張した。

$B \rightarrow \pi l \nu$ セミレプトニック崩壊は新物理の有望なプローブと期待され、我が国の SuperKEKB/Belle II 実験は測定精度を格段に向上させようとしている。しかし、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 10 年以上に渡り未解決のままである。この決定の理論的不定性を制御するため、その要因である形状因子を格子 QCD のシミュレーションによって第一原理から計算した。2019 年度は、特に、重いハドロンの精密研究でしばしば問題となる励起状態の寄与を制御する解析手法を開発し、本格実行フェーズの目標である 10% 精度を達成した。富岳では、この研究をより細かい格子での高統計計算へと発展させ、Belle II 実験の最終精度に見合う理論計算精度を達成する。

$|V_{ub}|$ のずれを解決するためには、インクルーシブ崩壊からの決定の理論的不定性を理解・制御することも不可欠である。既に、インクルーシブ崩壊率を記述する構造関数を QCD シミュレーションによって計算する手法を開発し、計算コストの小さい Bs 中間子崩壊の研究に応用した。2019 年度は、これを、 $|V_{ub}|$ の決定に用いられている B 中間子崩壊へと拡張した。重クォーク展開と摂動展開を用いた従来の解析的計算との比較により、これらの展開の高次補正の重要性を指摘した。

インクルーシブ崩壊率から基底状態への崩壊の寄与を差し引くことにより、 D^{**} 励起状態への崩壊の研究を可能にした。 D^{**} には軽い自由度の角運動量が $1/2$ と $3/2$ の状態があるが、それぞれへの分岐比が理論と実験で大きく異なっているという未解決問題がある。Bs 中間子崩壊を例にとった試験的な計算を行い、重クォーク展開を用いた理論計算への高次補正がこの問題を引き起こしている可能性を示唆する結果を得た。

新物理を幅広い崩壊モードで探るため、標準理論からのずれが欧州の LHCb 実験によって報告されている $B \rightarrow K11$ 希崩壊へと研究を拡張した。この崩壊へのチャーモニウム共鳴の寄与は、QCD の長距離効果を無視する因子化近似を用いて評価されてきた。関連する相関関数を格子 QCD によって計算して検証を行い、この因子化近似が有意に破れることを示唆する結果を得た。また、この崩壊を記述する相互作用演算子の非摂動くり込みを行い、定量的研究の準備を整えた。

以上の研究成果について、4 件の招待講演を含む 10 件の口頭発表を国際研究会で行い、そのうち 4 件を査読付きの会議録にまとめた。また、日本物理学会を含む国内研究会で 6 件の口頭発表を行った。

2) QCD 相転移

これまでの当重点課題の研究により、フレーバー数 2 の QCD の有限温度相転移の高温相における物理が、カイラル対称性を保つ初めての系統的なシミュレーションによりあきらかになりつつある。それらは、カイラル相転移より高温側での軸性量子異常の消失、クォーク質量を増大させたときの(擬)相転移点近傍でのトポロジカル感受率の急激な変化、その変化に伴いフレーバー重項の量子数のチャンネルでの軽い粒子の出現であった。昨年度まで、これらの物理描像の確定のため、体積を変えたシミュレーションを多数実行し、特に温度 $T=220\text{MeV}$ 近傍での系統的な解析を実行してきた。今年度はこれらの物理量の他に、カイラル感受率の測定を追加し、相構造の理解を進めた。これにより、カイラル対称性の自発的破れとその回復、量子異常とその消失との間の関係が明瞭になった。

これらの成果に基づき 1 件の国際会議発表と、2 件の国内学会発表、2 件のプロシーディングス出版を行っている。ここで得られた物理描像の普遍性の確認、さらには最も興味深いカイラル相転移点近傍の調査のため、温度を下げたシミュレーションも行った。高温における対称性の研究はハドロンに関連関数を調べることから進めてきた。特にフレーバーSU(2)対称性が高温で拡大する可能性について、2 件の論文にまとめ出版した。また、関連する国際会議発表 1 件。プロシーディングス 2 件を出版した。

さらに、2020 年度以降スーパーコンピュータ富岳で開始する予定の、ほぼ現実世界のシミュレーション: フレーバー数 2+1 の QCD 研究のプロトタイプとして、温度 $T=220\text{MeV}$ 近傍で、2 フレーバーと同じ格子作用を用いた小規模のシミュレーションを行い、初期解析を行った。これにより現在用いているコード(Grid)で、少なくとも汎用 CPU でのシミュレーションが効率的に行えることが確認できた。

富岳におけるシミュレーション準備として、重点課題 9 が参加し開発している QCD ソルバ:QWS(QCD wide SIMD)ライブラリの更なる効率化のため、通信オーバーヘッドを削減する double buffering の実装とチューニングを行った。また、大体積カイラルフェルミオンシミュレーションの高速化手法の一つとして、マルチグリッドアルゴリズムの基礎研究を行った。これらの成果は、国際会議発表 1 件、物理学会講演 1 件、3 件の研究会ポスター発表として公表されている。

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次元を天下一り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きた。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。

2019 年度には、ローレンツ型 IIB 行列模型の大規模シミュレーションで起こる符号問題を克服するため、複素ランジュバン法を適用した。この問題に対してこれまでの研究においては、ある種の近似を行う

ことによって計算を実行してきたが、その結果として行列で表される時空が特異な構造をもつことが前年度の計算により明らかになった。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。2019年度の研究ではこうした近似をせず、複素ランジュバン法を用いることにより、符号問題のない計算を行った。海外の研究チームとも協力し、行列サイズ $N=128$ までの計算により、超弦理論から創発する(3+1)次元の膨張宇宙の微細構造を調べられることが確認できた。今後、調べるパラメタ領域を拡大するとともに、行列サイズをさらに大きくすることにより、(3+1)次元の膨張宇宙が滑らかな時空として実現するかどうかを明らかにするための基礎が確立した。以上の結果は、2019年7月と9月に行われた国際会議や、2019年9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。

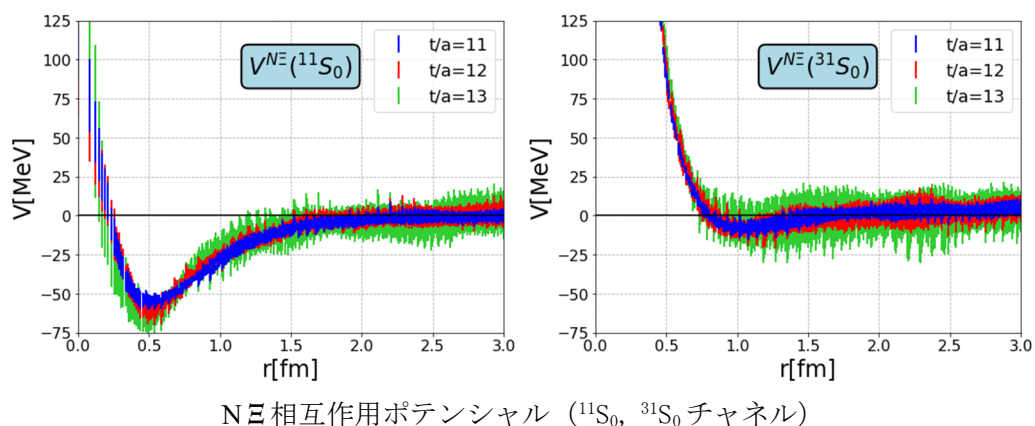
また同じ手法を応用することにより、低温高密度領域で QCD の計算を行った。比較的小さい格子サイズの準備的計算により、摂動論から予想される結果を再現することに成功し、今後非摂動的領域で計算を行うための礎を築いた。この結果については、2019年6月に行われた格子場理論国際会議において口頭で発表し、会議録も出版されている。また、2019年9月に行われた日本物理学会年次大会においても口頭で発表し、2019年6月と8月に行われた国際研究会においても、関連する招待講演を行った。

②サブ課題 B「物質創成史の解明と物質変換」

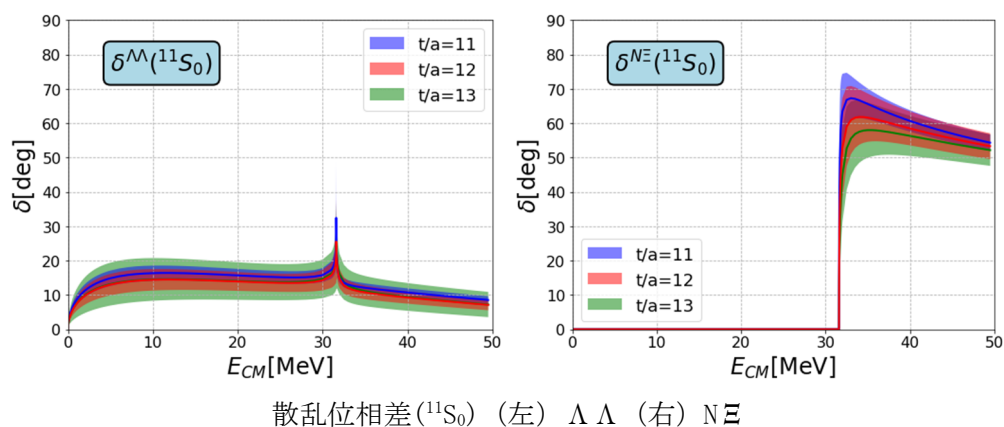
実施計画に従い、本年度は、格子 QCD、原子核、宇宙分野の研究者が、それぞれ独自に研究を進めた。以下では、別個に活動内容を記載する。

1) 格子 QCD

格子 QCD 分野では、HAL QCD 法を用いて物理的クォーク質量近傍におけるバリオン間相互作用の研究を行い、 $N\Xi$ 相互作用 ($S=-2$ チャネルのハイペロン力) について最終的な結果を論文として出版した[L1]。これは京における大規模計算で初めて可能となった研究である。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(偶パリティチャネル)を対象に系統的計算を行ったが、 $N\Xi$ 相互作用はこの中でも特に重要な相互作用である。本年度の研究により、スピン(S)・アイソスピン(I)について $^{11}S_0$, $^{31}S_0$, $^{13}S_1$, $^{33}S_1$ チャネル ($^{2I+1, 2S+1}L_J$ で定義) 全てを決定することに成功した。下図に、中でも特徴的な $^{11}S_0$, $^{31}S_0$ チャネルにおける結果を示す。前者では強い引力となっている一方、後者では斥力になっているなど、複雑なスピン・アイソスピン依存性があることが解る。この結果は、従来現象論的に構築されてきたポテンシャル、例えば Nijmegen ポテンシャル (ESC08c) などとはかなり異なっており、格子計算による決定のインパクトは非常に大きい。



このポテンシャルを基に散乱位相差を計算すると、例えば $^{11}S_0$ チャネルにおける $N\Xi$ 位相差(およびそれと結合する $\Lambda\Lambda$ 位相差)は下のようになる。

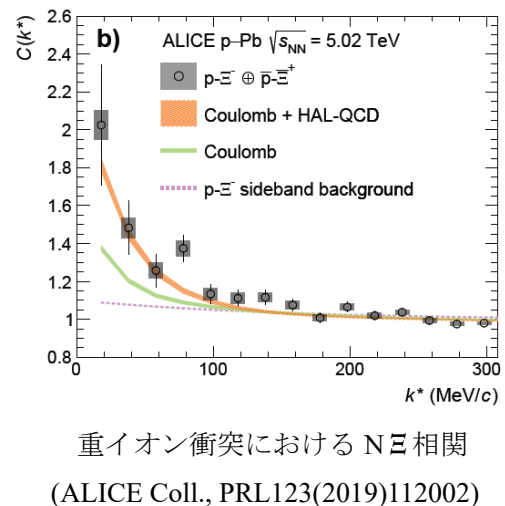
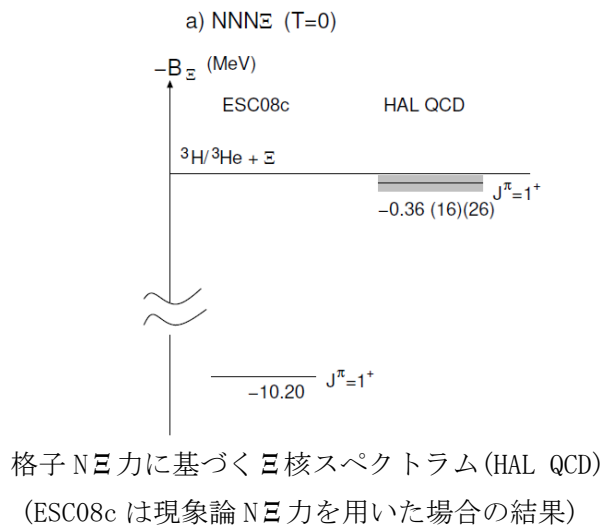


この結果は、 $N\Xi(^{11}S_0)$ の強い引力と対応する特徴的振る舞いとなっていると共に、($\Lambda\Lambda$ 閾値以下の)束縛 H ダイ

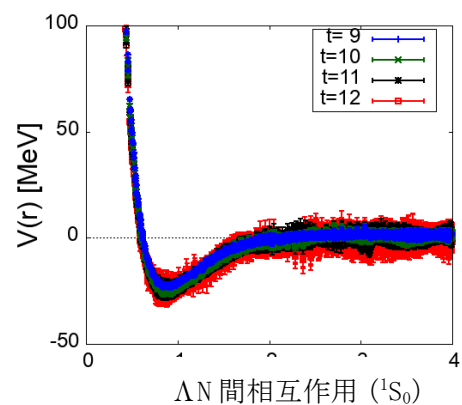
バリオンが存在しないことも示しており、ハイパー核物理における長年の課題であった H ダイバリオン研究に大きなインパクトを与えた。

さらに得られた $N\Xi$ 相互作用を基に、J-PARC や LHC など、世界各地の大規模加速器におけるハイパー核実験、重イオン衝突実験への予言を行った。ハイパー核については、量子少数多体系の専門家と共同研究を行い、どのような軽い Ξ ハイパー核が存在するのかを計算した。その結果、 $\Xi + 3$ 核子系について Ξ ハイパー核「グザイ・テトラバリオン」(アイソスピン 0, $J^P=1^+$) が存在することを予言した(下図(左)) [L2]。これはまさに QCD に基づき原子核物理を構築するという目標を実現する研究となっており、プレスリリースも行った。今後の実験的発見が期待される。

また、重イオン衝突実験では、バリオン間相関観測からバリオン間相互作用の情報を取り出すことができる。我々は得られた $N\Xi$ 相互作用を基に、LHC ALLICE 実験グループとの共同研究を進めた。下図(右)が、格子 QCD の $N\Xi$ 相互作用から導出された予言を、実験結果と比べたものである。結果が良く一致しており、格子 QCD 計算の予言能力が大きなインパクトをもって受け止められている。

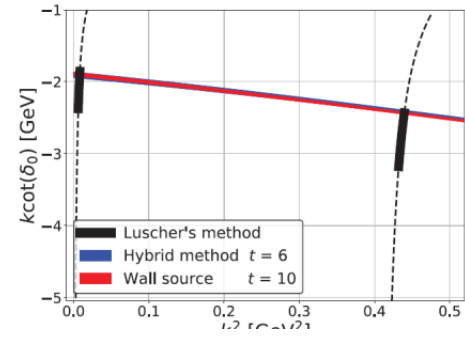


一方、格子 QCD におけるバリオン間力においては、ストレンジネス $|S|$ がより小さいチャンネル、特に $|S|=1$ の ΛN 、 ΣN 間相互作用や $|S|=0$ の核子間相互作用(核力)については統計誤差が大きくなることが知られている。これらの相互作用の決定に向けて、クォーク質量がやや大きい、パイオン質量 270MeV における大統計計算を行った。右に示すのが 1S_0 チャンネルにおける ΛN 間相互作用 ($|S|=1$) の計算結果である。相関関数の時間 t が比較的大きい領域でも統計揺らぎが抑えられた結果を得ることに成功した。



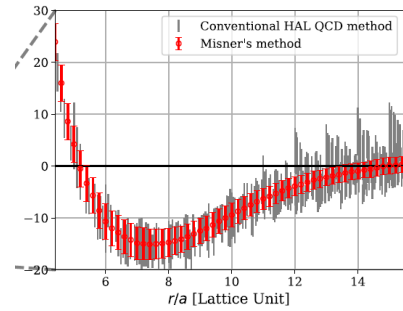
また、これまでの研究では二体バリオン間の S/D 波相互作用を主な研究対象としていたが、メソン・メソン、メソン・バリオン間相互作用、特に共鳴状態に研究対象を拡張するにはクォーク対生成消滅ダイアグラムを取り扱えるようにする必要がある。そのために有力な方法は all-to-all 伝搬関数を用いた計算であり、この手法は二体バリオン間の P 波相互作用の計算にも応用できる可能性がある。

そこで本年度は、all-to-all 伝搬関数を用いてまず $I=2$ $\pi\pi$ 相互作用を計算した。その具体的な計算においては hybrid 法を用い、dilution の取り方を工夫するなどすることで、散乱位相差について信頼性ある計算が可能なことを示した (右図) [L3]。さらにこの手法を拡張して $I=1$ $\pi\pi$ 相互作用の計算を行い、 ρ メソン共鳴状態の研究を行った。



$I=2$ $\pi\pi$ 散乱位相差

P 波バリオン間相互作用の研究においては、部分波の取り出し手法の研究開発も重要である。そこで格子上のデータから (近似的に) 部分波展開を行うミスナー法の格子 QCD 計算への適用を初めて行った。右に示すのが Λc -N 間相互作用について、通常の HAL QCD 法とミスナー法 (と HAL QCD 法を組み合わせたもの) との結果を比較したものである。ミスナー法により格子データにおける部分波の混合をコントロールすることができ、より精度の良いポテンシャル計算に成功していることがわかる[L4]。



Λc -N 間相互作用

参考文献

- [L1] K. Sasaki et al. (HAL QCD Coll.), Nucl. Phys. A998, 121737 (2020).
- [L2] E. Hiyama et al., Phys. Rev. Lett. 124, 092501 (2020).
- [L3] Y. Akahoshi et al. (HAL QCD Coll.), Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 083B02 (2019).
- [L4] T. Miyamoto et al. (HAL QCD Coll.), Phys. Rev. D101, 074514 (2020).

2) 原子核

原子核研究分野に関しては、量子多体計算手法の開発をすすめ、大規模量子多体計算の実行により、中性子過剰核に現れるエキゾチックな構造を求め、それを引き起こすメカニズムの解明をおこなった。成果を個別に記す。

2-1) 大規模量子多体計算によるコード開発

ランチョス法による大規模殻模型計算コード「KSHELL」のコード開発による機能拡充をおこなった(N. Shimizu, T. Mizusaki, Y. Utsuno and Y. Tsunoda, Comp. Phys. Comm. 244, 372 (2019))。並行して、独自に開発したモンテカルロ殻模型を鉛周辺領域の同位体の計算を進めた。また、準粒子真空基底を用いたモンテカルロ殻模型コードの開発を進め、原子核の換算遷移確率を求めるなど機能を拡充し、富岳運用開始に備えた。

2-2) 軽い核の核構造の第一原理的な研究

これまでモンテカルロ殻模型に基づく第一原理計算手法により 20 体系までにわたる基底状態の物理量の計算を京コンピュータ上で実現し、核力に基づく第一原理計算の原理実証研究を主に行ってきた。また、軽い核で特徴的に発現する原子核物理学固有の現象である α クラスター構造に着目し、その物理的性質の第一原理計算による理解へ向けて、これまでベリリウム同位体における 2α クラスター構造や価中性子における分子軌道構造をモンテカルロ殻模型手法で用いる波動関数の利点を活かし可視化してきた。本年度ではこれらの実績を踏まえ、本課題研究の中心課題の一部として元素合成過程において重要な役割を果たす炭素 12 の Hoyle 状態を含む励起構造の第一原理計算に焦点を絞って研究を行った。

図 2 に本年度の成果の一部として炭素 12 の低励起状態の計算結果と実験値との比較を示す。図の右側が計算結果(MCSM)、左側が実験値(EXP)である。計算で用いた二体核力はカイル有効場の理論に基づく Daejeon16 NN 相互作用である。図中の計算結果は有限の基底空間でなおかつエネルギー分散による外挿を行っていないものであるが、各状態の励起エネルギーだけでなく各状態間の遷移強度についても計算結果と実験値でよい一致を示している。他の基底空間のサイズでの計算もすでに終了しており、エネルギー分散による外挿および基底空間無限大への物理量の外挿を行い、最終的な第一原理解を得ることができる。

さらに、図 3 に示すように、これまでのベリリウム同位体でのクラスター構造の解析手法を応用して炭素 12 の基底状態と Hoyle 状態の候補である第一励起 0^+ 状態の密度分布を求めた。図の密度

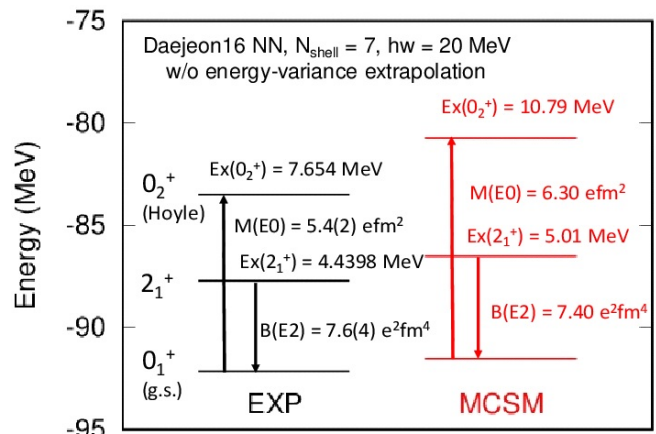


図 1 炭素 12 の基底状態と低励起状態

分布からわかるように、基底状態は比較的コンパクトな形状をしている一方、励起状態は三つの α クラスターが空間的に広がった形状を示唆している。また、基底状態と励起状態の点陽子半径(r_{pp})の計算結果もその傾向を示している。基底状態については実験値が存在し、計算結果とよい一致を示している。

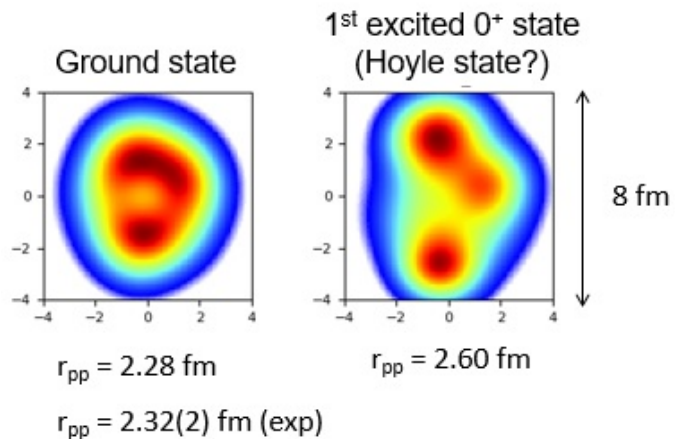


図 4 炭素 12 の基底状態と第一励起 0^+ 状態の密度分布

2-3) マグネシウム近傍の中性子過剰同位体の核構造と存在限界

大規模原子核殻模型計算によって、マグネシウム近傍の同位体の中性子過剰核の構造を求めた。この領域は、「反転の島」と呼ばれ強い興味をもたれている。理化学研究所 RI ビームファクトリ加速器施設による最新の実験結果と、本事業による研究成果を比較検討することによって、原子核の中性子過剰存在限界（ドリップライン）について議論をまとめ、原著論文を投稿した。

最近の加速器実験結果によってフッ素 31 とネオン 34、ナトリウム 39 が最も中性子過剰な同位体であることが判明している。この情報を用いて、本研究成果による理論模型において、不定性をもつパラメーターに制約を与えることによって模型を高精度化した。図 6 の縦軸 ΔE が、理論模型において最も不定性をもつパラメーターである。フッ素 31、ネオン 34、ナトリウム 37 が中性子ドリップライン核であることから、 ΔE が許される範囲は、図の濃いピンク色で示された 0.82MeV から 0.87MeV までの狭い範囲であることがわかる。これにより、マグネシウム 42 が中性子ドリップライン核であることが、高い確度で宣言できる。

旧来、ドリップラインを決定するメカニズムとして、球対称な平均ポテンシャルから作られる一粒子軌道を陽子・中性子が下から占有していき、束縛しない一粒子軌道に到達する一歩手前がドリップライン核であるような単純な殻模型的描像が考えられてきた。しかしながら「反転の島」領域では原子核が球からずれてラグビーボール型の変形をおこし、変形によって得られる束縛エネルギーへの寄与が大きく、変形がドリップラインを決める重要な役割を果たしていることを本研究成果によって示した。

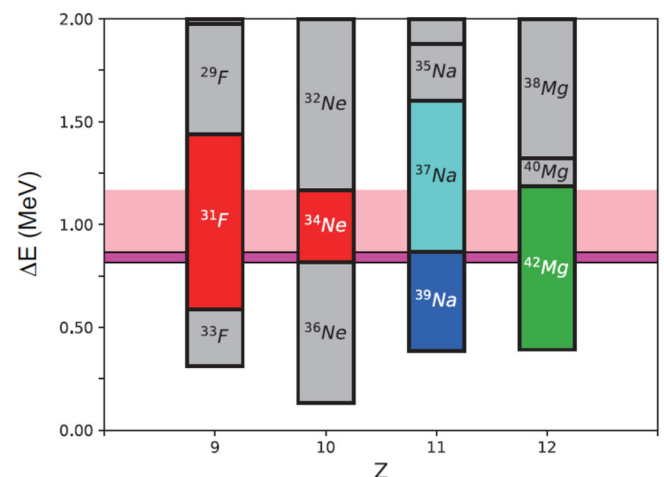


図 5 ドリップライン原子核の理論宣言。縦軸に理論模型のパラメーターの一つを示し、交わる核種が理論で宣言されるドリップライン核となる。

2-4) カルシウム 40 周辺核における変形共存の統一的記述

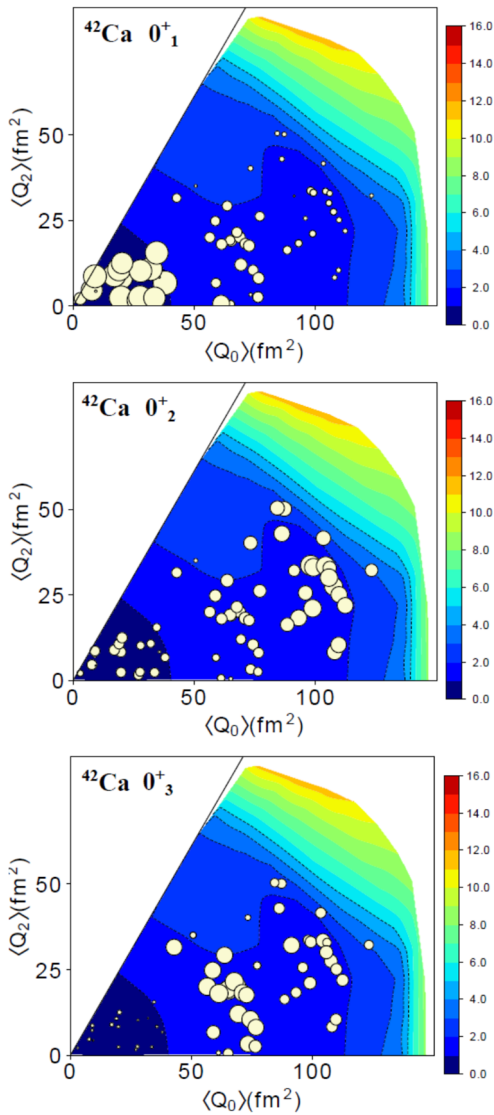


図 4 カルシウム 42 の 0^+_{1} , 0^+_{2} , 0^+_{3} 状態に対する T-plot。

変形バンドの存在を明らかにした。このように、カルシウム 40 領域では、それぞれの原子核に個性的な変形バンドが存在し、大規模殻模型計算によってよく説明できることがわかった。

陽子数あるいは中性子数が魔法数となる原子核の基底状態は、中性子過剰核マグネシウム 32 などのいくつかの例外を除き、球形であることが知られている。しかし、これらの原子核でも比較的低い励起エネルギーに、閉殻から複数の核子が励起してできる変形した状態が出現することが知られており、その統一的記述とメカニズムの解明は原子核構造における重要な課題となっている。本研究課題では、その代表的な例として知られているカルシウム 40 領域の変形状態に対する微視的記述を目指した。

今年度は、sd 殻に $f_{7/2}$ 軌道、 $p_{3/2}$ 軌道を加えた大きな模型空間を用いた大規模殻模型計算により、陽子数、中性子数が 18, 20, 22 の偶偶核で知られる変形状態の統一的記述に成功した。特に、 ^{42}Ca において、これまで実験でははっきりとしなかった、三重変形共存現象を、KSHELL を用いた厳密対角化計算と、モンテカルロ殻模型計算で用いられている T-plot を組み合わせることによって明らかにした。

図 4 は、カルシウム 42 の 0^+_{1} , 0^+_{2} , 0^+_{3} 状態に対する T-plot を表している。 0^+_{1} は球形、 0^+_{2} は大きく変形した波動関数のウェイトが大きく、これまで知られていた知見と一致する。 0^+_{3} はその中間の変形が主であるが、こうした弱い変形状態に対し、バンド構造があるかどうかはこれまで議論されてこなかった。図 5 に計算で得られた準位およびそのバンド構造を、実験の準位と比較した。従来、実験からは、図 5 の黒で描かれている球形準位と赤で描かれている変形準位は知られていたが、本研究では、それらに加え、緑で描かれた準ガンマバンド（非軸対称変形に伴うバンド構造）および、青で描かれた 0^+_{3} 状態から始まる弱い

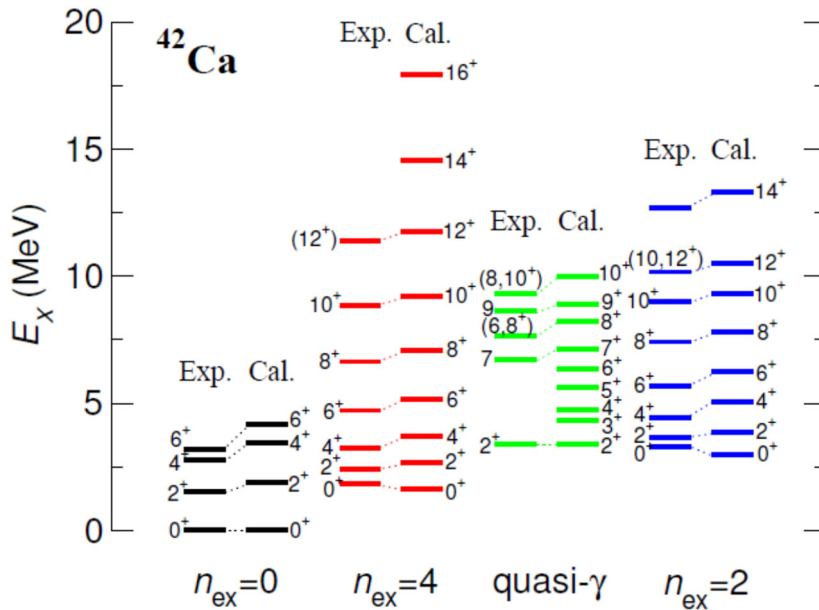


図 5 カルシウム 42 に対する、計算で得られた変形バンド (Cal.) を実験の準位 (Exp.) と比較したもの。緑、青で描いた準位は、励起エネルギーは知られていたが、バンド構造が確かめられていなかった。

2-5) 大規模核構造計算による中重核の核構造研究

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を中心に用い、ニッケル (陽子数 28)、サマリウム (陽子数 62)、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。ニッケル領域では二重魔法数のニッケル 78 について実験グループと共同研究を行い、R. Taniuchi *et al.*, Nature 569, 53 (2019) を発表した。質量数 130 近傍の原子核については、バリウム 133 やランタン 133、銀 97 原子核についての核構造研究を進め、各々実験研究との共著論文を発表した。およそ質量数 200 近傍の重い核種では odd-odd のタリウム、ビスマス同位体の 10⁺ アイソマー状態について計算を行った。

特にサマリウム領域ではサマリウム同位体、エルビウム 166 の計算結果に基づいて自己組織化という観点から原子核の構造を議論する論文を発表した (T. Otsuka, Y. Tsunoda, T. Abe, N. Shimizu, and P. Van Duppen, Phys. Rev. Lett. 123, 222502 (2019))。図 6 にサマリウム 154 の準位図を示す。(a) の実験値は (b) の計算値によって再現されており、赤、緑で示した状態はそれぞれプロレート変形、三軸非対称変形の異なる形状の状態となっている。核子の各軌道の有効一粒子エネルギーの計算値はプロレート変形、三軸非対称変形の状態で異なっており、それぞれの変形状態に対して有効一粒子エネルギーが最適化されていると考えることができる。この効果を検証するため、核子間の有効相互作用のうち有効一粒子エネルギーを変化させる成分であるモノポール相互作用を 0 にした計算を行った。(c)、(d) は有効一粒子エネルギーをそれぞれプロレート変形、球形の状態の値に固定した計算の結果である。(c) では有効一粒子エネルギーがプロレート変形状態に最適化されているため、三軸非対称変形状態に比べてプロレート変形状態のエネルギーがより低くなっている。また、(d) では有効一粒子エネルギーがそれぞれの状態に最適化されていないため、プロレート変形状態と三軸非対称変形状態の順番が異なっている。このことから、核子間の有効相互作用によってそれぞれの変形状態に対し有効一粒子エネルギーが最適化され、よりエネルギーが低く安定した状態になっていると考えられる。この有効一粒子エネ

ギーの最適化を自己組織化とみなすことができる。

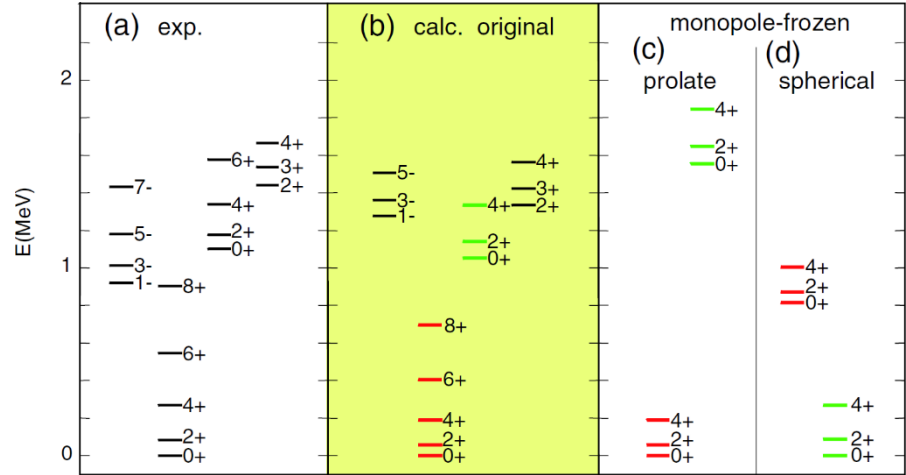


図 6 サマリウム 154 の準位図。T. Otsuka *et al.*, Phys. Rev. Lett. 123, 222502 (2019) より引用。

3) 宇宙

3-1) 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

重力崩壊型超新星の爆発メカニズムは未だ完全に解明されていない。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という結果が得られている[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、空間の多次元性が注目され、様々な軸対称計算や三次元計算が行われ、球対称計算では爆発しなかったモデルが爆発するようになった[e.g. Janka, H.-T., ARNPS, 62, 407 (2012); Burrows, A., RvMP, 85, 245 (2013)]。しかし、多次元計算を実行するため、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が、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輻射流体コード(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。

令和元年度は、解像度 $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times N_{v_\theta} \times N_{v_\phi} = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ 、並列数 $3072\text{MPI} \times 8\text{OpenMP}$ 、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満たしている最新の Furusawa-Togashi EOS [S. Furusawa et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 094001 (2017)] を使った空間3次元+運動量空間3次元のニュートリノ輻射流体計算を、重力崩壊からコアバウンス発生後 20 ms まで実行した。また、結果の信頼性向上のため、これまでよりも高解像度の計算を進めた。Fig. 1 は時刻 $t = 10\text{ ms}$ における様々な物理量の赤道面の断面図であり、エントロピー、物質密度、Ye、ニュートリノ数密度分布について、原始中性子星内部に成長した対流により三次元的な複雑な構造が形成されることを示している。Fig. 2 は時刻 $t = 15\text{ ms}$ における同様の図であり、エントロピー等値面においてオレンジと黒の境界に位置する衝撃波が $t = 10\text{ ms}$ より外側に位置しており、対流の成長が飽和して減衰している様子が示されている。また、運動量空間におけるニュートリノ分布についても調べ、空間に球対称性がある場合には軸対称性が、空間軸対称の場合には面对称性が、3次元計算で対称性が消えることを確かめた。

これらの得られた結果について、エディントンテンソルの固有値・固有ベクトル解析を行い、近似法の一つである M1 closure 近似法の検証を行った。エディントンテンソルは実対称テンソルであり、重複を含む3つの実固有値と互いに直行する3つの固有ベクトルが存在する。それらの固有値を係数とし、固有ベクトルを軸の方向とする楕円体として可視化し、ボルツマン方程式から直接計算される楕円体と M1 closure 近似法により得られる楕円体でその特徴がどのように異なるかを調べた。一般的に、光学的に厚い極限では、楕円体は球体に (Fig. 3(a))、光学的に薄い極限では楕円体は線分になる (Fig. 3(c))。光学的に厚くも薄くもない領域では状況によってさまざまな楕円体形状を示すが (Fig. 3(b))、

全体的な傾向として、平均自由行程の増加に伴い「ほぼ球体」から「エネルギーフラックス方向に垂直な方向に長い楕円体」となり、やがて「エネルギーフラックス方向に平行な方向に長い楕円体」となることを示した。そして、M1 closure 近似法では平均自由行程が半径の 10%程度になる場合に生じる「エネルギーフラックス方向に垂直な方向に長い楕円体」を再現することができないことを明らかにした。また、対流の影響によって、エネルギーフラックスの方向と楕円体の軸方向が中途半端にずれるような複雑な状況が発生することもわかった。

さらに、結果の信頼性向上のために、 $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times N_{v_\theta} \times N_{v_\phi} = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 12 \times 6$ と $256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 12$ の 2 モデルの高解像度計算を行った。オリジナル解像度 $N_r \times N_\theta \times N_\phi \times N_\epsilon \times N_{v_\theta} \times N_{v_\phi} = 256 \times 48 \times 96 \times 16 \times 6 \times 6$ の時刻 9.5ms の結果を補間して初期値とし、境界条件についても同様に補間を行って時々刻々与えた。その結果、オリジナル解像度と高解像度計算結果との間に定量的な違いが確認されたものの、エディントンテンソルの固有値・固有ベクトル解析による結果に対しては影響を及ぼさないことがわかった (Fig. 4)。

以上の成果について、学会等で口頭やポスター発表を行い、解析結果を論文にまとめて英文雑誌 The Astrophysical Journal に投稿した([arXiv:2004.02091](https://arxiv.org/abs/2004.02091))。

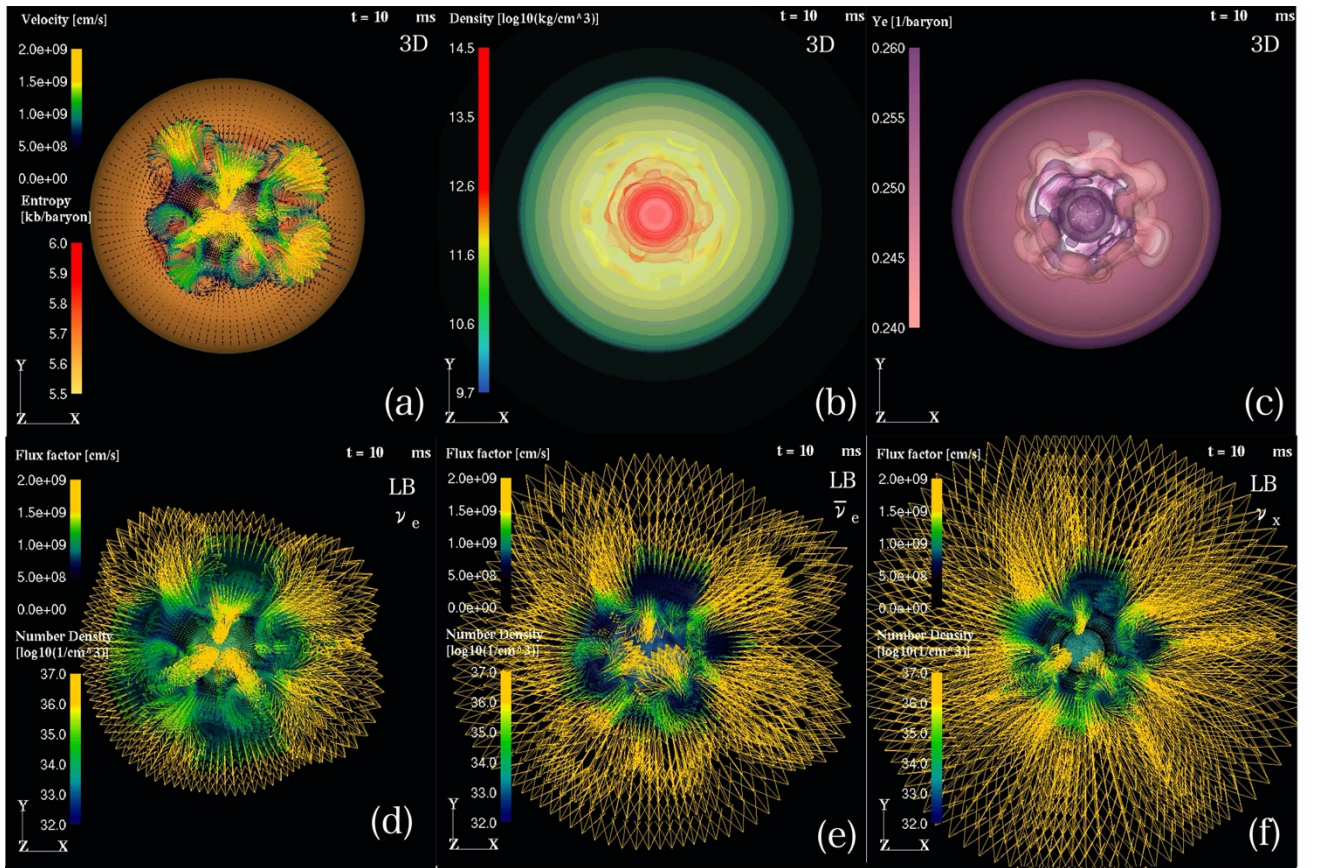


Fig. 1 時刻 $t=10$ ms における様々な物理量の赤道面の断面図: (a) エントロピー等値面と速度ベクトル, (b) 密度等値面, (c) Y_e 等値面, (d-f) ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_x ニュートリノの数密度の等値面と平均速度ベクトル.

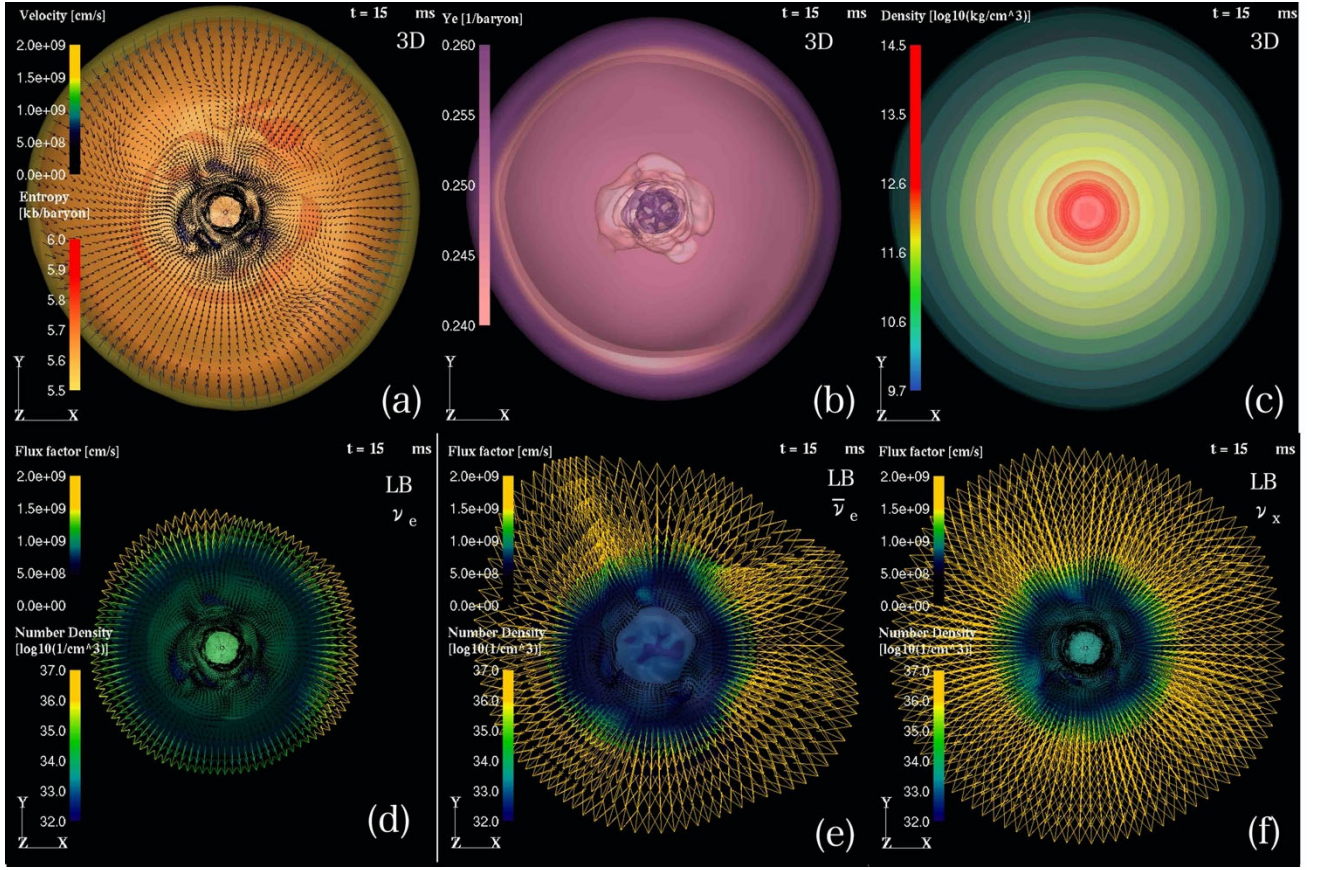


Fig. 2 時刻 $t=15\text{ms}$ における様々な物理量の赤道面の断面図 (Fig. 1 と同様)

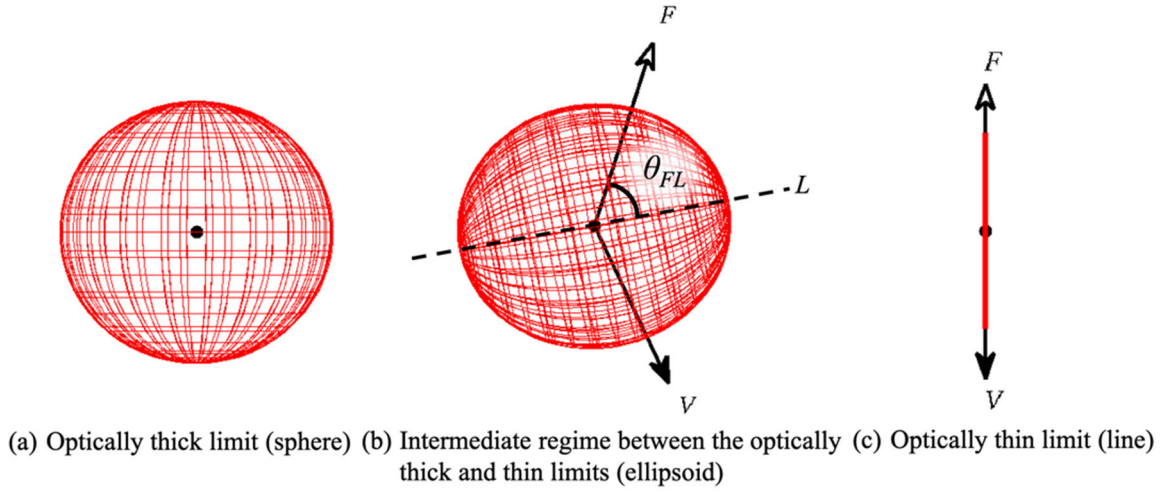


Fig. 3 エディントンテンソルの固有値を係数とし固有ベクトルを軸の方向とした楕円体の分類. F はニュートリノのエネルギーフラックス、 V は物質の速度ベクトル、 L は楕円の長軸である.

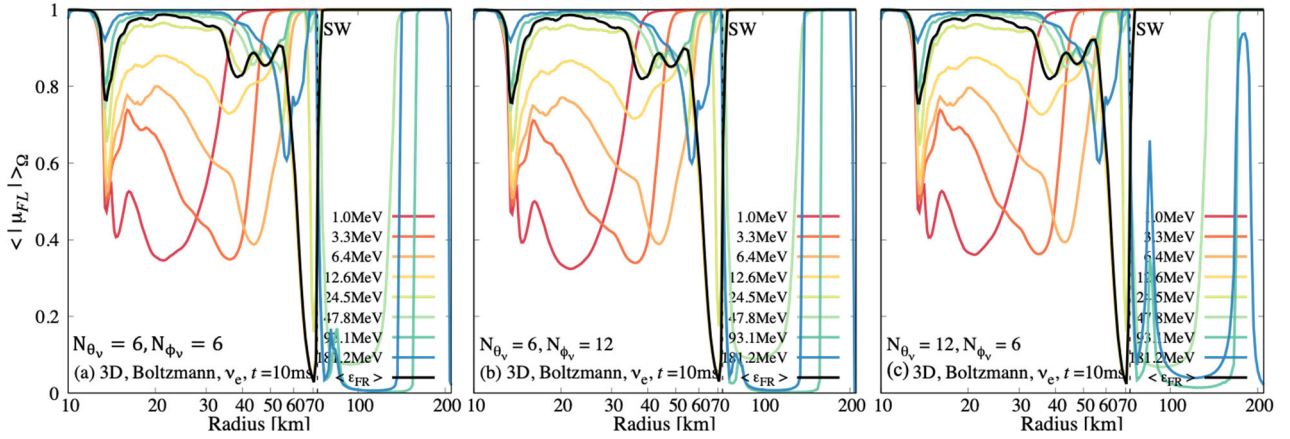


Fig. 4 $\langle |\mu_{FL}| \rangle_\Omega$ の動径方向分布。(a)がオリジナルの解像度で、(b)と(c)がそれぞれ θ_v を2倍、 ϕ_v を2倍にした高解像計算の結果である。 $\mu_{FL} = \cos \theta_{FL}$ であり、 θ_{FL} はニュートリノのエネルギーフラックス F とエディントンテンソルの楕円の長軸方向 L がなす角度 (Fig. 3 (b)) である。その μ_{FL} の絶対値の立体角平均値が $\langle |\mu_{FL}| \rangle_\Omega$ である。 $\mu_{FL}=1$ だと F と L が平行であり、値が小さくなるほど F と L のなす角度が大きくなり、 $\mu_{FL}=0$ だと F と L が垂直になる。

3-2) 空間 3 次元+運動量 1 次元ニュートリノ輻射輸送コードを用いた重力崩壊型超新星の長時間 3 次元計算

超新星爆発のシミュレーションにおいて、衝撃波復活が起きるのか？観測量を再現できるのか？という疑問に答えるためには、少なくとも 500 ms 程度の時間、系の発展を追わなければならない。対流などの性質を現実に合わせて 3 次元計算では、計算資源の要求が大きく、現状はニュートリノ輻射輸送を簡易化してニュートリノのエネルギー空間だけグループ別に解くしかない。近似ニュートリノ輻射輸送を用いた長時間計算班の研究結果について報告する。

まず、これまで報告してきたメッシュ-コア-スニング入り超新星爆発の計算を論文にまとめた (Nakamura+2019, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 5, id.98)。Fig. 5 の左パネルのように極めて非球対称な物質分布が得られることを示した。空間解像度は、球座標 ($r, \dots$) に対して (648, 64, 128)、エネルギー空間の解像度は 20 で計算を行った。天文観測によって、中性子星の運動速度 (キック速度) と質量に大まかに相関があることが知られているが、シミュレーションでそれを再現し、その理由を明らかにした。具体的には、中性子星の質量が大きいほど、ニュートリノ光度が高く、爆発エネルギーが大きくなるためである。つまり、爆発エネルギーが大きければ、中性子は大きな運動速度を持てるのである。その様子を Fig. 5 の右パネルに示した。

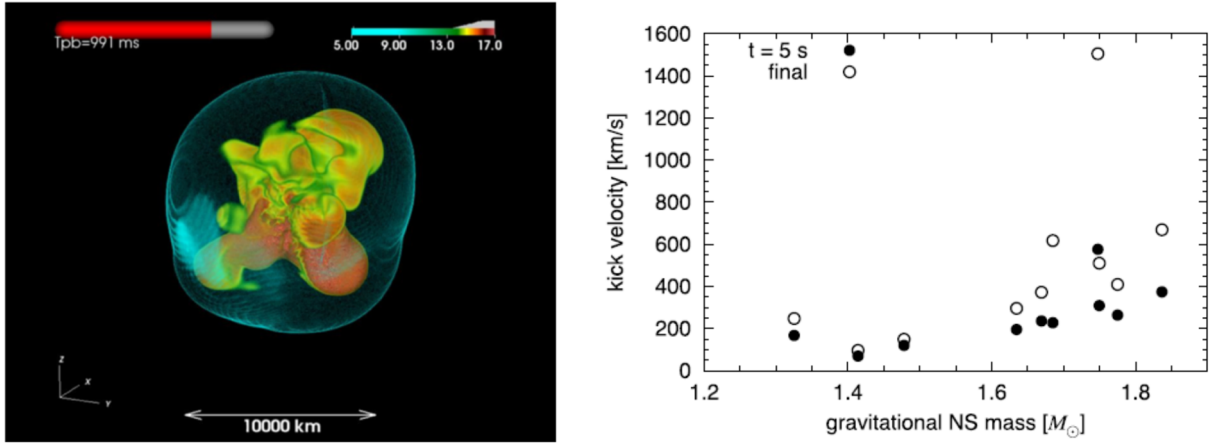


Fig. 5 左は超新星爆発の3次元シミュレーションのイメージ。熱さの指標であるエントロピーを色で表現。右はシミュレーションで得られた中性子星の質量とキック速度の相関。Nakamura+2019 から。

その他にも、最新の核物理、ニュートリノ反応に基づいた状態方程式を用いて 20 太陽質量の親星を初期条件にした超新星爆発の 3 次元計算を行い、衝撃波が復活することを確認した。状態方程式は Togashi+2017、ニュートリノ反応は Kotake+2018 のものを用いている。どちらも最新のものである。空間解像度は(512, 64, 128)を採用し、ニュートリノのエネルギーを 20 分割して計算を行った。現象論的な一般相対論効果も取り入れており、衝撃波が定在する位置はこれまでより小さい 160km となるが、強いニュートリノ放出と強い対流により爆発が駆動される。その様子を示したのが Fig. 6 である。対流の様子は左パネルからわかり、衝撃波の復活の様子は右パネルからわかる。このモデルから生じる重力波の特徴についても、論文にまとめ、投稿した (Sotani+ arXiv:2004.09871)。

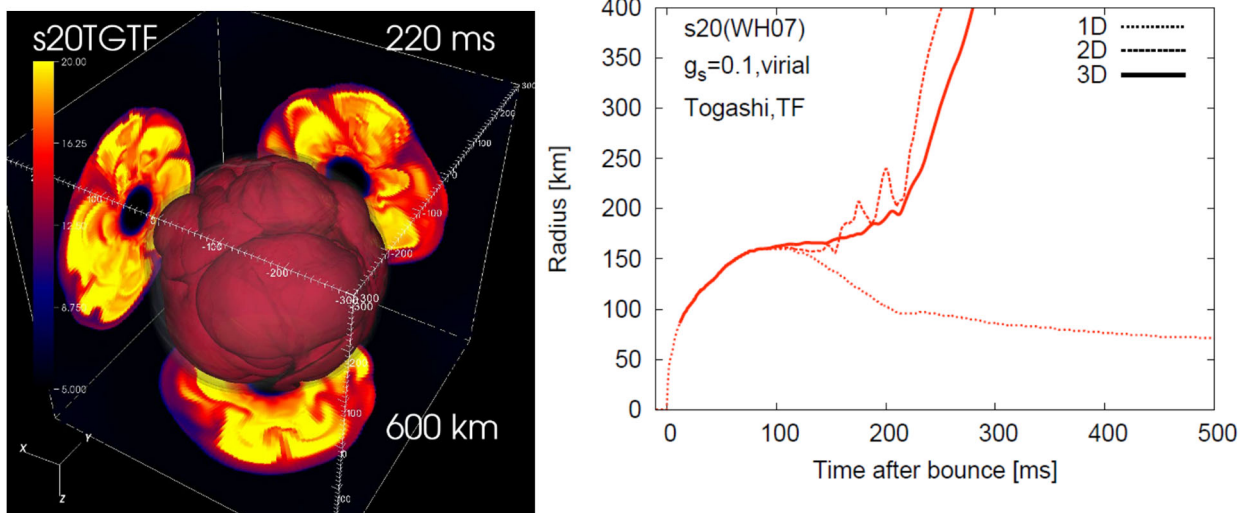


Fig. 6 左は最新の状態方程式を用いた3次元シミュレーションの結果。右は平均衝撃波半径の時間発展。衝撃波が大きくなっており3次元シミュレーションで爆発が得られている。

さらに、連星中性子星を作る現象と考えられるいわゆる「ウルトラストリップド超新星」のモデリングも行った。連星相互作用により外層が著しくはがされた星を初期条件にし、3次元計算を行った。この星がどの程度のニッケルを放出できるのか議論になっているが、本計算ではこれまでの計算より観測

に近い量のニッケルが得られた。

3-3) ニュートリノ輻射磁気流体—数値相対論シミュレーションコードの開発と連星中性子星合体への応用

連星中性子星合体やブラックホール・中性子星連星合体の全容を理論的に解明することを目標として、ニュートリノ輻射輸送、磁気流体、有限温度の原子核状態方程式を実装した数値相対論コードの開発を行った。具体的には、前年度までにコードの基礎部分の開発と最適化を行った（2019 年度成果報告書参照）。本年度は本格計算に向け、コード開発をさらに進めた。連星中性子星合体の長時間シミュレーション（典型的には物理時間 1 秒程度のタイムスケール）を実行する場合、数値エラーの蓄積に起因する重心のずれが問題となる。例えば 2018 年度までに開発したコードでは、空間対称性を課さないシミュレーションを実行した場合、連星合体後約 0.1 秒の間に重心が軌道面に垂直な方向（以下、 z 方向と呼ぶ）に移動し、最終的には $z=0$ の初期軌道面から格子境界に達してシミュレーションが破綻することが判明した。数値エラーに起因する z 方向の運動量保存の破れが $10^{-2}-10^{-3} M_{\odot} c$ 程度であるのに対し、本コードで実装している静的多層格子の最細格子の空間サイズは典型的に $(70\text{km})^3$ である。これは物理時間 1 秒のシミュレーションを実行する場合、運動量保存の破れを少なくとも $10^{-4}-10^{-5} M_{\odot} c$ 以下に抑える必要があることを意味する。ここで、 $M_{\odot}$ は太陽質量、 c は光速、典型的な連星質量は $2.7 M_{\odot}$ である。そこで運動量保存の破れを極力抑えるため、空間対称性を課さずとも系の対称性を精度よく保持するようコードのアップデートを行った。以下に概要を示す。

3-3-1) 対称性を尊重するよう差分演算の順序変更

Fig. 7 は $z=0$ 面（軌道面）の上下で物理量 Q の差分を行う場合の模式図である。 l は z 方向の格子点番号であり、簡単のために 2 次精度中心差分を例として示す（コードでは 4 次および 6 次精度差分を実装）。また、 Q は $z=0$ 面を挟んで完全に面対称なデータであると仮定する。旧コードでは $z=\mp l$ において 1 階微分を計算する場合、旧とラベルされた差分演算を行っていた。この表現は符号を除いて $z=\mp l$ で数学的に等価であるが数値計算では丸め誤差に起因して、 $z=\mp l$ で 1 階微分は等価でなくなる。そこで $z=-l$ での差分表現を新とラベルされた表現へ変更し、符号を除いて 1 階微分の値が等価であるように保証する。すべての差分演算について同様の変更を行った。

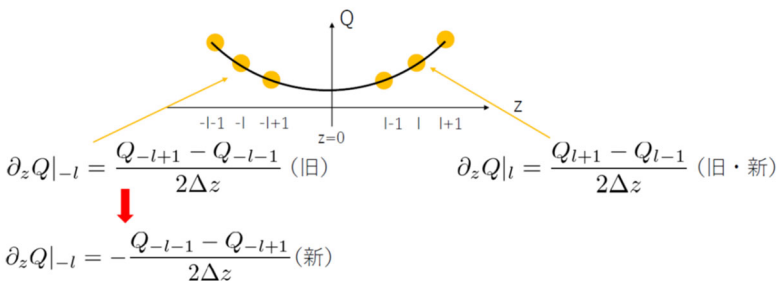
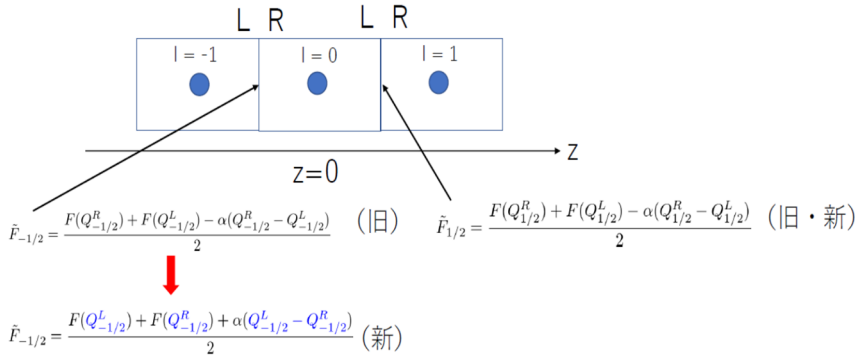


Fig. 7: $z=0$ （軌道面）を挟んだ物理量 Q の差分表現模式図。 l は z 方向の格子番号。旧（新）は 2018 年度（2019 年度）のコードの実装

3-3-2) 対称性を尊重するよう数値流速ソルバーの演算順序変更

数値流体を保存形式で解く場合、格子セル境界での数値流速を評価する必要がある。Fig. 8 に $z=0$ 面を挟んだ数値流速演算の模式図を示す。 $l=0$ のセルの流体量をアップデートするために、格子セル境界

$I=1/2$, $I=-1/2$ での数値流速を計算する。本コードでは Local Lax-Friedrich scheme を実装しているため、数値流速の表現は旧とラベルされたものになる。ここで F は物理流速、 Q は保存量、 α は特性速度である。一般に物理流速は保存量の関数である。演算の順序としてはセル境界の左／右 (L/R) に



における保存量 Q^L / Q^R を求め、最終的に数値流速 (チルダ付き F) を評価する。

Fig. 8: $z=0$ (軌道面) の数値流速の演算法模式図。 I は z 方向の格子番号。セル境界は $1/2$, $-1/2$, L/R はセル境界の左／右を表す。保存量 Q 、特性速度 α 、流速 F から数値流速チルダ付き F を計算する。旧 (新) は 2018 年度 (2019 年度) のコードの実装

昨年度までのコードでは旧とラベルされた演算順序を実装していた。流体量が軌道面を挟んで完全に対称なデータを持つ場合、1) と同様この表現は符号を除いて数学的に等価であるが、計算機上では丸め誤差のため等価とならない。本コードでは新とラベルされた表現に書き換えることで、符号を除いて計算機上でも等価になることを保証している。同様の演算順序の変更を流体ソルバー、輻射場ソルバー、磁気ソルバーに対して行った。

3-3-3) 対称性を尊重するよう prolongation の演算順序変更

本コードでは静的多層格子を実装しているため、流体や計量に関して解像度の荒い格子から細かい格子への内挿、prolongation、が生じる。Fig. 9 に prolongation の模式図を示す。 I は z 方向の格子番号。 $z>0$ の荒い解像度を持つ格子層の格子点 ($I-1$, I , $I+1$) のデータから細かい解像度を持つ格子層の格子点 $I+1/2$ のデータを生成する例を示している。同様に $z<0$ では格子点 ($-I-1$, $-I$, $-I+1$) のデータから $-I-1/2$ のデータを生成する。簡単のため、2 次精度の Lagrange 内挿を例として示す (コードでは 5 次精度の Lagrange 内挿を実装)。旧コードでは旧とラベルされた演算を行っていたが、1), 2) 同様、 Q が $z=0$ を挟んで完全に対称なデータであっても、丸め誤差のため $z=I+1/2$, $z=-I-1/2$ のデータは等価にならない。但し、符号は除く。新とラベルされた演算順序に変更することで、符号を除いて等価となることが保証される。

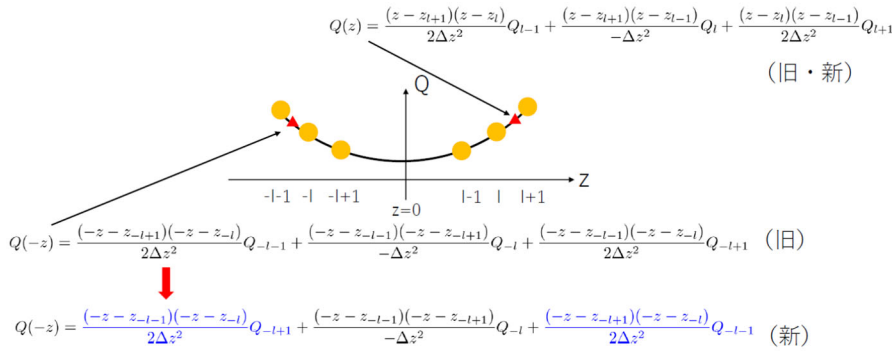


Fig. 9 $z=0$ (軌道面) を挟んだ prolongation の模式図。 l は z 方向の格子点番号。荒い解像度を持つ格子層の格子点 $(l-1, l, l+1)$ のデータから細かい解像度を持つ格子層の格子点 $l+1/2$ のデータ生成を 2 次 Lagrange 内挿で行う例を示している。同様に格子点 $-l-1/2$ は格子点 $(-l-1, -l, -l+1)$ のデータから生成される。旧 (新) は 2018 年度 (2019 年度) のコードの実装

以上のアップデートを行った上でテスト計算を行った。コンパイラーで丸め誤差の影響を受けないオプションを指定し (例えば、Intel Fortran では `-fp-model strict`)、 z 面に関して完全に対称な初期条件から計算を始めた場合、 z 方向の運動量は厳密に 0 となるべきである。Fig. 10 に連星中性子星合体のニュートリノ輻射輸送磁気流体シミュレーションのテスト計算の結果を示す。最高解像度 200m、グリッド数 340^3 、静的多層格子数 10 と設定。連星モデルは質量 $1.35 M_\odot - 1.35 M_\odot$ 、原子核状態方程式として SFHo モデルを用いたものである。 z 方向の運動量 P^z の時間発展を示す。横軸は時間 (単位はミリ秒) で、合体は約 7 ミリ秒で起き、ブラックホールは約 16 ミリ秒で誕生する。

旧コード (old とラベル) では、ブラックホール形成時に P^z が $10^{-2} M_\odot c$ 程度になり約 100 ミリ秒で計算が破綻した (Fig. 10 では 100 ミリ秒までデータを載せていないが 16-17 ミリ秒以後時間とともに増大)。アップデートしたコードで丸め誤差による影響を許容しない場合 (new w -fp-model とラベル)、ブラックホール形成後 20 ミリ秒経過しても z 方向の運動量は厳密に 0 であることが確認できた。

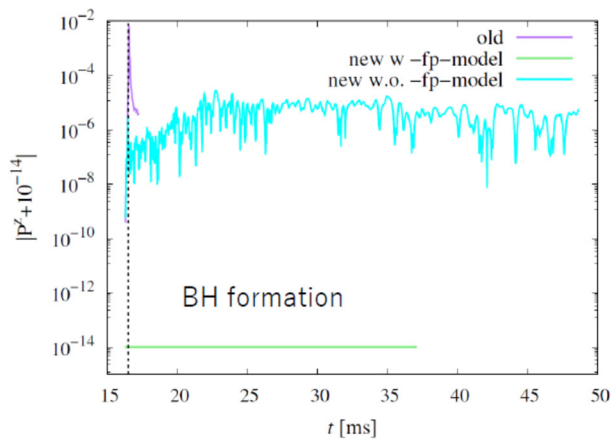


Fig. 10 : z 方向の運動量の時間発展。縦軸単位は $M_\odot c$ 。横軸は時間 (単位はミリ秒)。このテスト計算では連星は約 7 ミリ秒で合体し、約 16 ミリ秒でブラックホールに崩壊する。縦の黒点線はブラックホール形成時間を表す。旧コード (old) では、ブラックホール形成時に運動量保存の破れが顕著になり、やがて計算が破綻する。新コード (new) では、丸め誤差の影響を受けない場合 (w -fp-model)、運動量は厳密に 0 となっている。丸め誤差の影響を許容する場合 (w.o. -fp-model)、運動量保存の破れは $10^{-6} M_\odot c$ 程度に収まっている。

最適化の観点からは丸め誤差の影響を受けないオプションは望ましくないため、オプションを外したシミュレーションを実行した結果 (new w. o. -fp-model とラベル)、ブラックホール形成後、運動量保存の破れが $10^{-6}M_{\odot}/c$ 程度に収まっていること、時間と共に増大しないことが確認できた。以上のアップデートにより長時間シミュレーションを実行する準備が整った。

2019 年度後半ではアップデートをしたコードを用いて、本格計算を開始した。設定は以下のとおりである。

連星モデル：総質量 $m_0=2.7M_{\odot}$ 、質量比 1，低密度側に Timmes EOS をつないだ有限温度の原子核状態方程式 SFHo、初期軌道角運動量 $Gm_0\Omega/c^3=0.028$ 、 G は重力定数、 Ω は軌道角速度。

シミュレーション設定：最細解像度 200m、静的多層格子 13 段

パルサーの観測からインスパイラル時の磁気エネルギーは連星の運動エネルギーに比べてはるかに小さいことが示唆される。また、合体時に星の接触面でケルビン - ヘルムホルツ不安定性によって平均強度が $10^{15}G$ を超える乱流磁場が生成される可能性が先行研究により指摘されている。そこで本計算では連星の合体までは磁気流体効果を考えないニュートリノ輻射流体計算を行った。また、軌道面对称性を仮定した。この連星モデルでは合体後に大質量中性子星が形成されるので、形成後 5 ミリ秒程度が経過した時点で星内部に平均強度 $10^{15}G$ 程度を持った乱流磁場を付与し、ニュートリノ輻射輸送磁気流体シミュレーションを行う。また大局的な磁場生成の可能性を勘案し、磁場を付与した後は軌道面对称性を緩和した。

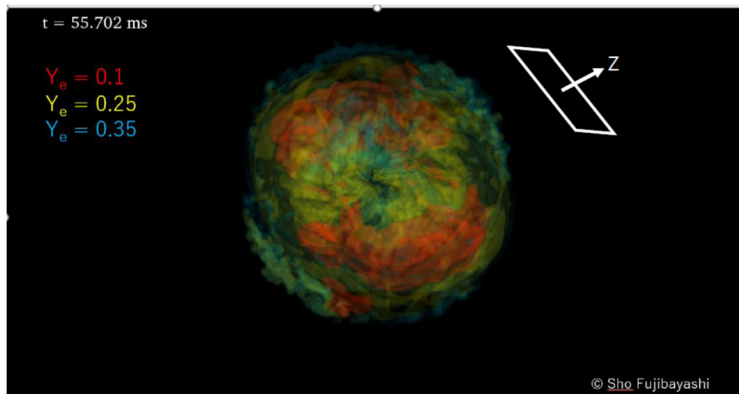


Fig. 11: 合体後約 50 ミリ秒での電子存在比 (Y_e) の等値面 (赤: $Y_e=0.1$, 黄色: $Y_e=0.25$, 青: $Y_e=0.35$)。右上に軌道面と軌道角運動量軸の模式図を示す。中心部にはブラックホールが存在する

Fig. 11 に合体後約 50 ミリ秒における電子存在比 (Y_e) の等値面を示す。軌道面方向に電子存在比の低い成分 (赤: $Y_e=0.1$) が放出され、軌道角運動量軸の方向に電子存在比の高い成分 (黄色: $Y_e=0.25$, 青色: $Y_e=0.35$) が放出されていることが分かる。前者は潮汐力によって駆動されている成分であり、後者は合体時の衝撃波加熱で駆動されている成分である。この時点で既に中性子星はブラックホールへ崩壊し、中心部のブラックホール周りに $0.01M_{\odot}$ 程度の降着円盤が形成されている。これらの結果は磁気流体効果を考えていない先行研究の結果と定性的に一致する。

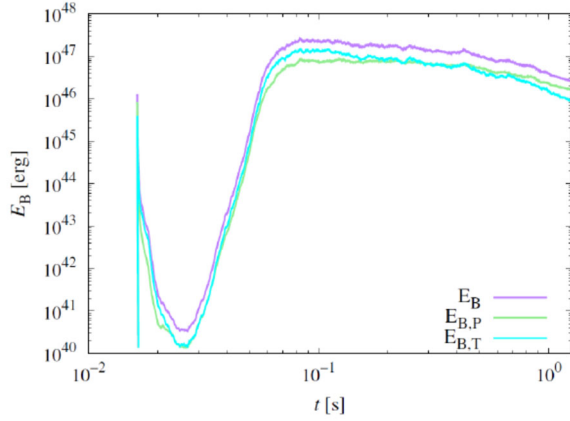


Fig. 12: 磁気エネルギーの時間発展。ポロイダル成分（緑）、トロイダル成分（青）、磁場全エネルギー（紫）を表す。このモデルでは合体が 0.008 秒、ブラックホール形成が 0.017 秒に起きる。ブラックホール崩壊後形成される降着円盤内で磁場が増幅され（0.03–0.04 秒以降）、0.08–0.09 秒程度で磁気エネルギーの増幅は飽和する。

Fig. 12 に磁気エネルギーのポロイダル／トロイダル成分および総エネルギーの時間発展の様子を示す。シミュレーション開始後約 0.008 秒で合体が起こり、大質量中性子星が形成される。この星は約 0.017 秒でブラックホールへ崩壊し、周囲に降着円盤が形成される。

0.03–0.04 秒以降に見られる磁気エネルギーの増幅は磁場の巻き込みと非軸対称の磁気回転不安定性によるものである。0.08–0.09 秒程度で磁気エネルギーの増幅は飽和する。磁気回転不安定性について詳細に解析したところ、磁場増幅開始時には磁気回転不安定性の完全な解像には至っていないが、磁場増幅に伴い最大成長率を持つ不安定モードの波長が長くなるため、やがて解像可能な領域に入る。磁気エネルギーが飽和した時点で磁気回転不安定性の最大成長モードの波長は 10 格子点以上で解像出来ていることから、磁気回転不安定性によって駆動された磁気乱流状態が実現している可能性が高いと考えている。但し、単一解像度のシミュレーションであるため、解像度を変えた計算を行い収束性の確認をすることが富岳を用いた計算における課題である。

降着円盤内の角運動量輸送効果を調べるため、マックスウェル応力とレイノルズ応力をシミュレーションデータより評価し、 α 粘性の強度を得た。マックスウェル応力起源の粘性については、磁気乱流状態が生じた後、その強度は 0.04–0.1 程度であり時間変動する。レイノルズ応力起源の粘性も時間変動を示し、0.04–0.1 程度の強度である。 α 粘性の解像度に関する収束性についても富岳を用いた計算における課題である。

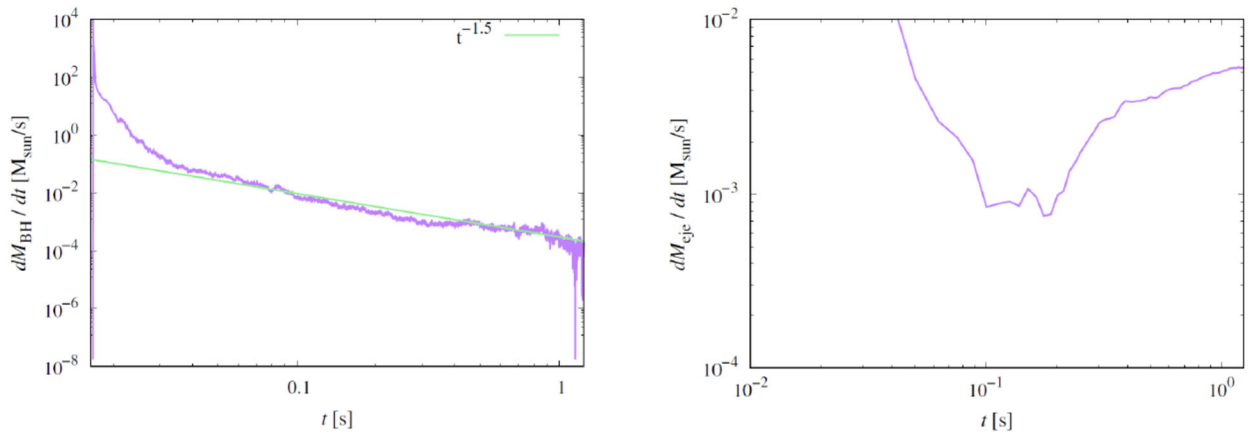


Fig. 13: ブラックホールへの質量降着率（左）と質量放出率（右）の時間発展。

Fig. 13 にブラックホールへの質量降着率と質量放出率の時間発展を示す。ブラックホール崩壊後（約 0.017 秒）から質量降着率は時間とともに減少し、0.1 秒以後は $10^{-2} - 10^{-4} M_{\odot}/s$ 程度で準定常的に進化する。また、合体後約 0.01 秒までには動的質量放出が起こり（Fig. 11 参照）、約 0.2 秒後から新たな質量放出が起きていることが分かる。これは降着円盤起源の質量放出であり、磁気回転不安定性起源の乱流粘性が駆動したものと推察されるが、数値解像度に対する収束性の確認が富岳を用いた計算における課題である。

以上まとめると、2019 年度は本格計算始動に向け、コードのアップデートを行った。その結果、対称性を課さずとも連星中性子星合体を物理時間 1 秒程度シミュレートすることが可能となった。本年度後半からは本格計算の一部を開始した。数値解像度の対する収束性の確認、初期磁場形状の依存性、状態方程式依存性、初期連星モデル依存性の探査は富岳を用いた計算における課題である。

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」

残存ニュートリノを含む宇宙モデルにおける構造形成シミュレーション、ブラックホール降着流、プラズマ物理の計算コードを「富岳」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 HPCI により提供された並列計算機群上で大規模シミュレーションを実施し、残存ニュートリノの相空間上での分布、ブラックホールシャドウ、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。宇宙の大規模構造形成の研究では、ブラソフシミュレーションで最も計算時間がかかる6次元移流方程式計算部分に「富岳」のA64FXプロセッサ向けのSIMD演算命令のScalable Vector Extension最適化を施し、さらに連続したメモリ空間を扱えるようレジスタ内で転置を行うことにより、高い実行効率とほぼ理想的なウィーク/ストロングスケーリングを達成することに成功した。

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銀河形成進化の準解析モデルを組み合わせ、活動銀河核の模擬観測カタログを作成した。活動銀河核の2点相関関数と空間分布バイアスを計算し、これまでのX線による観測から得られた活動銀河核種族との詳細な比較を行い、赤方偏移1以下、すなわち近傍宇宙で測定された相関関数を再現することを確認した。

ブラックホール降着流の研究では、一般相対論的磁気流体計算のデータを用いてM87銀河中心にある巨大ブラックホールのシャドウを求めた。シャドウ形状や放射強度のブラックホールスピン依存性と、周辺プラズマの密度依存性や温度依存性を明らかにした。輻射輸送計算コードRAIKOUによるブラックホールシャドウの計算は、イベントホライズンテレスコープによって得られた観測データの解釈に貢献した。

R1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 の研究内容のうち、素粒子現象論および超弦理論の研究、ならびに QCD 相転移研究のうちシミュレーションデータの解析を担当した。具体的には、B 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子の計算において本格実行フェーズの目標精度を達成した。この崩壊は小林益川行列要素の決定を与えるが、異なる解析方法が矛盾する結果を与えることが長年の問題となっていた。そこで、励起状態の寄与を取り除く解析手法を開発し、理論研究の最大の不定性の源である形状因子を目標精度で計算した。微分崩壊率の実験データとの比較検証を行い、力学パラメタ依存性が実験と無矛盾であることを確認するとともに、長年の矛盾を解消する小林益川行列要素の結果を得た。有限温度 QCD 相転移のシミュレーションにおいて、高温の擬相転移近傍でのカイラル感受率と量子異常との関係を明らかにすると共に、カイラル相転移温度により近い新たなシミュレーションを実行した。その結果、有限なクォーク質量では温度の低下と共に量子異常が増大するものの、カイラル極限では消失するという、より高い温度と同様の振る舞いを確認した。超弦理論の研究においては、ローレンツ型 IIB 行列模型の大規模シミュレーションで起こる符号問題を克服するため、複素ランジュバン法を適用した。海外の研究チームと協力して行った比較的小さい行列サイズ (128x128) の複素ランジュバン法に基づく準備的計算により、超弦理論から創発する (3+1) 次元の膨張宇宙の微細構造を調べられることが確認できた。また複素ランジュバン法を応用することにより、低温高密度領域で QCD の計算を行った。比較的小さい格子サイズ ($8^3 \times 128$) の準備的計算により、摂動論から予想される結果を再現することに成功し、今後非摂動的領域で計算を行うための礎を築いた。

具体的な研究内容の詳細は①に記載。

⑤格子 QCD 計算による QCD 相転移の解明

(再委託先：国立研究開発法人理化学研究所)

サブ課題 A で、2 フレーバー QCD の有限温度相転移の高温相で発見された大きな体積効果の理解に向けた計算を行い、さらに、相転移温度に近づけた計算により、相転移とトポロジ、量子異常の解明につなげた。また、3 フレーバー QCD の相転移研究のためのコード開発を進め、富岳での本格的な実行に必要な予備計算を行った。コード開発は Grid をベースとし、Intel Knights Landing (KNL) 及び Skylake-SP 上でのチューニングを行った。また、⑭の研究開発と関連して富岳の環境におけるチューニングも行った。このコードを用いて KNL 上で 3 フレーバー QCD の高温相での予備計算を実行し、トポロジー励起の質量依存性が、2 フレーバー QCD の同等温度の結果をほぼトレースする事を確認した。

具体的な研究内容の詳細は①に記載。

⑥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、富岳で初めて計算可能となるハドロン間相互作用の解明・高精度化に向け、物理点近傍でのハイペロン力計算や、その原子核への適用計算を行った。また、クォーク対生成消滅ダイアグラムの計算手法や、格子データについて部分波の混合を取り扱う手法の研究を進めた。具体的には、QCD 分野に関しては、物理的クォーク質量近傍において $N_f=3$ 相互作用を決定し、それに基づい

た量子少数多体系計算を行うことで Ξ ハイパー核「グザイ・テトラバリオン」の存在を予言した。重イオン衝突実験への予言も行い、実験結果はそれと一致した。また、all-to-all クォーク伝搬関数をポテンシャル計算に用いる手法を研究し、パイ中間子の散乱位相差について信頼性のある計算が可能なことを示した。また、ミスナー法+HAL QCD 法の研究開発を進め、格子上のデータに対して精度の良い部分波展開をすることに成功した。

宇宙分野に関しては、まず一般相対論的輻射磁気流体コードおよび一般相対論的輻射粘性流体コードを用いて連星中性子星の合体、合体後の長時間進化、重元素合成、及び電磁波放射過程について調べた。また 2019 年に、中性子星連星の合体の候補現象(GW190425 および GW190814)が重力波望遠鏡で観測されたが、それらの電磁波対応天体に対しては観測的に光度の上限が与えられたので、その観測結果を解釈するための数値計算を行い、現象に対する制限・解釈を与えた。さらに、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。特に強調すべきは、実空間 3 次元、運動量空間 3 次元のボルツマン方程式を解きながら、超新星爆発の輻射流体シミュレーションを世界で初めて、原始中性子星誕生後の最初の 20 ミリ秒間実行した点である。これは、富嶽を用いれば 1 秒程度のシミュレーションが可能なことを示しており、近い将来画期的な成果創出に対して重要な一歩となった。

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。

⑦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)

サブ課題 B で、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、富岳で本格計算が可能となる質量数 200 近傍の原子核の試行計算をすすめると共に、中性子過剰核の大規模核構造計算を進めてエキゾチックな構造や存在限界の解明を行った。具体的には、質量数 200 近傍のタリウム、ビスマス同位体の試行計算をおこなうとともに、サマリウム同位体やエルビウム同位体の原子核の中性子数増加に伴う形状変化とエキゾチックな構造を大規模原子核構造計算によって求め、それを引き起こすメカニズムとして有効相互作用におけるモノポール成分の果たす役割を明らかにした。さらに、マグネシウム近傍の中性子同位体の第一原理的な核構造計算を遂行し、存在しうる最大中性子数の同位体(中性子ドリップ線)と、それを決めるメカニズム、特に原子核の変形が束縛エネルギーに与える寄与を定量的に解明した。

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。

⑧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、富岳で初めて計算可能となるハドロン間相互作用の解明・高精度化に向け、物理点近傍でのハイペロン力計算や、その原子核への適用計算を行った。さらにクォーク質量がやや大きい領域での高精度計算を行った。また、格子データについて部分波の混合を取り扱う手法の研究を進めた。具体的には、物理的クォーク質量近傍において $N\Xi$ 相互作用を決定し、それに基づいた量子少数多体系計算を行うことで Ξ ハイパー核「グザイ・テトラバリオン」の存在を予言した。重イオン衝突実験への予言も行い、実験結果はそれと一致した。また、パイオン質量 270MeV において大統計計算を行い、 ΛN 相

相互作用を高精度で決定した。ミスナー法+HAL QCD 法の研究開発を進め、格子上のデータに対して精度の良い部分波展開をすることに成功した。

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、ハドロン間相互作用の計算を行った。物理的クォーク質量近傍においてストレンジネスを多く含むハドロンや、チャームクォークを含むハドロンに関する相互作用を格子 QCD により計算し、この相互作用を用いた散乱振幅の解析を通して、これらのハドロンの束縛状態や共鳴状態の探索を行った。

具体的には、複素エネルギー平面上へ格子 QCD 計算により得られた散乱振幅を解析接続することで、束縛状態および共鳴状態の探索が可能となることを見出し、 Ξ バリオン-核子とそれに結合する Λ - Λ のチャンネル結合相互作用をフルに用いた共鳴状態探索を行った。その結果、このチャンネルにおいて、状態は、 Λ - Λ の束縛状態としては存在せず、 Ξ バリオン-核子の閾値近傍に現れる共鳴状態または仮想状態であることが解明された。また、擬スカラー D 中間子とベクトル D* 中間子の間に強い引力が存在し、閾値近傍に束縛状態または仮想状態があることが解明された。さらに、国内外の様々な実験施設で得られた・今後得られる結果に対して、格子 QCD から物理的意味づけを可能にするため、深層学習を用いて、ハドロン間相互作用を分類することのできる人工知能の構築を行った。その結果、単チャンネル S 波散乱振幅の解析(実験データから束縛状態・共鳴状態を見つける)を行うことが可能となった。

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。

⑩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、銀河形成および活動銀河核進化の理論モデルを検証するために、これまでに構築した準解析的モデルをさらに改訂し、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。改訂版のモデルでは新たに銀河核周辺の角運動量輸送効率と中心ブラックホール質量の増大率を関係づけた。活動銀河核の 2 点相関関数と空間分布バイアスを計算するコードを開発し、作成した活動銀河核の模擬観測カタログに適用した。これまでに X 線による観測から得られた活動銀河核種族との詳細な比較を行い、本年度に考案したモデルが赤方偏移 1 以下、すなわち近傍宇宙で測定された相関関数を再現することを確認した。

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明らかにした。令和元年度は、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。ブラソフシミュレーションと N 体シミュレーションでのニュートリノの分布関数の振る舞いの直接比較を行い、N 体シミュレーションでは離散ノイズが多きく出現する結果に対し、ブラソフシミュレーションは滑らかな分布関数を表現でき、しかも一般的に考えられているフェルミ・ディラック分布から場所によっては大きく異なることを発見した。さらに、N 体シミュレーションでは達成困難な解像度での計算もブラソフシミュレーシ

ョンでは短時間で計算可能であることを示した。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。また、ブラソフシミュレーションで最も計算時間がかかる 6 次元移流方程式計算部分に「富岳」の A64FX プロセッサ向けの SIMD 演算命令の SVE (Scalable Vector Extension) 最適化を施し、さらに連続したメモリ空間を扱えるようレジスタ内で転置を行うことにより、高い実行効率とほぼ理想的なウィーク、ストロングスケーリングを達成することに成功した。

⑪一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コードの最適化を進め、ブラックホール降着流のシミュレーションを実施した。1 次モーメント法に基づく一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコード (UWABAMI) を用いて、自転するブラックホール周囲の超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体計算を実施した。ブラックホールのスピンの影響でジェットが強化され、スピンパラメータが 0.9 の場合には放射の光度よりもジェットパワーが上回ることを示した。また、ボルツマン方程式に基づく一般相対論的輻射磁気流体力学コード (INAZUMA) を最適化し、シミュレーションを実施した。超臨界円盤のテスト計算では、UWABAMI と同等の結果が得られることが確かめられた。ただし、円盤の表面から回転軸付近では、UWABAMI よりも INAZUMA の方がより正確な輻射場を示すことが判明した。

一般相対論的輻射輸送計算を実行して輻射スペクトルと偏光分布の質量降着率依存性と観測角度依存性を計算し、理論と観測の両面から中心天体および周囲の構造を解明した。最適化した一般相対論的輻射輸送計算コード (RAIKOU) を駆使し、一般相対論的磁気流体計算のデータを用いて M87 中心の巨大ブラックホールのシャドウを求めた。シャドウのブラックホールスピン依存性や周辺プラズマの密度依存性や温度依存性も示した。RAIKOU によるブラックホールシャドウの計算は、イベントホライズンテレスコープの観測データを解釈するために作成された計算コードの検証に用いられた。これにより、イベントホライズンテレスコープがブラックホールを撮像したとする結果がより強固なものとなった。加えて、ブラックホール降着円盤とブラックホールシャドウの組み合わせによる、ブラックホールスピンの新たな決定法を示した。偏光の一般相対論的輻射輸送計算にも成功し、ブラックホールシャドウや、ブラックホールジェットの直線偏光分布や円偏光分布を求めた。これにより、直線偏光と円偏光の観測データを組み合わせることで、ブラックホール周辺の磁場構造が解明できることがわかった。

⑫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

高次精度磁気流体コード CANS+ (Matsumoto et al. 2019) を、M1 クロージャ関係を仮定した輻射輸送モジュールと結合した円筒座標系 3 次元輻射磁気流体コード CANS+R を巨大ブラックホール降着流に適用し、エディントン降着率の 10% 程度の降着がある場合のシミュレーションを実施した。その結果、ブラックホール近傍の光学的に薄く高温 (イオン温度 10^{11}K) の降着流と、遠方の 10^7K 程度の温度かつトムソン散乱に対して光学的に厚い円盤が共存することが示された。高温領域からは硬 X 線が放射され、低温領域からは軟 X 線が放射される。このときの光度はエディントン光度の 0.1-1% になった。このシミュレーション結果は、セイファート銀河の増光時に軟 X 線放射領域が出現するという観測結果と合致する。また、広輝線を持たない 2 型セイファート銀河と広輝線が観測される 1 型セイファート銀河の間を数年の時間スケールで遷移する Changing Look AGN が降着率変動に起因することを示唆した。巨大ブラックホール降着流では恒星質量ブラックホールの場合にくらべて輻射圧が優勢な領域が広がり、この領域で円盤振動が励起されることも示された。この振動により、Changing Look AGN で観測される数日の短時間変動を説明することができる。以上の計算により、光学的に厚く低温 (10^5K) な標準降着円盤モデルでは説明が困難だったセイファート銀河やキューサーの中心核エンジンの構造と時間変動機構を解明する糸口が掴めた。また、シミュレーション結果に基づいて逆コンプトン散乱による冷却効果を評価するとともに、コンプトン散乱を近似的に組み込んだ輻射磁気流体コードの実装を進めた。

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 シミュレーションによって、幅広い上流磁化強度 σ においてシンクロトロンメーザー不安定による電磁場放射が高強度で起きることを明らかにしてきた。本年度はイオン・電子系における相対論衝撃波の研究を進めた。高強度の電磁波が引き起こす航跡場を通じて電子が加速され、その結果、陽電子・電子系で生じる電磁波放射よりさらにイオン・電子質量比倍の振幅の電磁波放射が起きることを明らかにした (Iwamoto et al, Astrophys. J., 2019)。

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について引き続き研究を進めた。「京」の 16,384 ノード (131,072 コア) を用いた超大規模 3 次元 PIC シミュレーションの実施を中心に、多数のパラメタ (イオン・電子質量比、ビームのローレンツ因子) の下での飽和過程の違いを示した。飽和過程との競合が予想されたキンク不安定に打ち勝って長時間磁場生成を維持できることを示した (Takamoto et al., Astrophys. J., 2019)。

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、富岳では多数の計算コアを使って強スケールリング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。本年度は引き続き、自己重力系 N 体計算で実績のある recursive multi-section 法 (Ishiyama et al. 2009) を採用することで、動的負荷バランスを取ることができる独自の PIC シミュレーションコードの開発を行った。2 次元コードへの実装が完了し、上記ワイベル不安定 や相対論的衝撃波シミュレーションによる検証を行い、正しく動作していることを確認した。

3) 大規模宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた、宇宙天体形成史の研究

以下の研究を行い、査読付欧文論文出版などの成果を挙げた。

(1) 冷たいダークマターモデルを採用した高分解能宇宙論的 N 体シミュレーションの解析を進め、宇宙大規模構造とダークマターハローの構造の関係を調べた。赤方偏移 0 におけるホストハローの構造はサブハローのフィラメント降着の強さに依存して変化し、降着が強いホストハローでは (i) 軸比が小さく

なり、よりつぶれた形状を示す(ii)長軸の向きがフィラメント方向に揃いやすい(iii)角運動量ベクトルはフィラメント方向に垂直になりやすい、といった傾向があることを明らかにした。一方、等方的なサブハロー降着により形成されたホストハローは、より丸い形状を示す。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて受理された。

(2) 2018 年度に引き続き、高赤方偏移における銀河形成と近傍宇宙で観測されている恒星ストリーム構造を比較した。恒星ストリームの統計的空間分布は、宇宙大規模構造と関連し、コズミックフィラメントからのサブハロー降着が強いハローほど、ストリームの向きとハロー長軸が揃いやすい傾向にあることがわかった。またこの研究の先駆けとなる、恒星ストリームの統計的分布に関する論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて出版された。

(3) 恒星間天体との衝突による低質量初代星への金属汚染の効果を調べた。高解像度の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて、初代星の軌道を従来よりも精密に取り入れた。太陽近傍では、100m 以上のサイズの恒星間天体との衝突は、典型的には 1000 年に 1 回程度の頻度で起こることがわかった。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて出版された。

(4) 初代星由来の金属が赤方偏移 3 の宇宙でどのように分布しているか、高解像度の宇宙論的 N 体シミュレーションを用いて調べた。低密度領域で重元素が銀河由来のものと比べ卓越して存在すること明らかにした。次世代望遠鏡による分光観測で、キューサーのスペクトルを通してこれらの重元素を検出できる可能性がある。結果をまとめた論文が Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌にて出版された。

⑬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)

富岳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、富岳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おり、昨年度までで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の最適化をおこなった。今年度は、さらに、長距離相互作用に対して大域的な通信が起こり、1 プロセスが受け取るデータ量にプロセス数に比例する部分がある、という問題の根本的な解決のため、長距離相互作用を PM^3 法により実現する拡張の実装を進めた。この方法では、ツリーのあるレベルより上での相互作用計算を、「多重極展開の係数の変換・総和を波数空間で行う」ことにより実現する。従来使われてきた P^3M 法 (Particle-Particle Particle-Mesh) 法とは異なり、連続的なカットオフ関数を必要としないため、高精度かつ高速である。実装はほぼ完成している。さらに、利用可能になった富岳向けの最適化を進めた。

差分法計算向けのフレームワークは、これまでの経験に基づいて言語仕様を改善し、実装を進めた。

⑭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。本年度はこれまでに実施したカーネル部の実装とチューニングを実際のテスト機で検証するとともに、ネットワークによる通信部分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った。具体的には、以下の作業を行った。

- ・ 富岳試作機環境及び計算科学研究センター導入中の実機環境にてサブ課題 B で用いるウィルソンクオークソルバーの複数ノードでの並列動作確認とチューニングを行った。
- ・ 通信の低レベルライブラリである uTofu を使った通信と計算を重ねることのできる隣接通信ライブラリを開発とチューニングを行った。これは、実機環境を用いることにより本年度から初めて開発可能となったものである。
- ・ 半精度単精度倍精度混合ソルバーの収束の確認を行った。
- ・ コードデザインの一環として、BLAS ライブラリと FFT ライブラリについて拡張インターフェイスの提言を行いサポートされる見通しとなった。
- ・ 2次元ポアソン方程式ソルバーを用いて通信と演算を重ねる機構を検証・評価するソフトウェアを公開した。

[http://theo.phys.sci.hiroshima-u.ac.jp/~ishikawa/APL9WG/stencil_double_buffering_mpi-1.0.tar.gz]。

これは上記隣接通信ライブラリを開発する際に作成したものである。

4-3. 活動（研究会等）

1) 運営委員会

第46回：2019年7月12日（金）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47回：2019年10月23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48回：2020年1月7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49回：2020年3月3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

2) 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、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ためにも必要不可欠なものである。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。昨年度から引き続き開催している HPC-Phys 勉強会は徐々に規模が大きくなり、AI や関連研究に関する勉強会は業界内でも評判で、事業終了後も継続してほしいとの声もあった。年度末は新型コロナウイルスの影響で多くの研究会が中止になったが、今年度は7件が実施され参加者は計221名であった。

●原子核物理でつむぐ r プロセス

日時：令和元年5月22日～5月24日

場所：京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館・パナソニック国際交流ホール

主催：京都大学基礎物理学研究所

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

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6回ポスト「京」重点課題9研究報告会

参加者：12名

日時：令和元年7月12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。

●第4回 HPC-Phys 勉強会

参加者：28名

日時：令和元年8月26日

場所：理化学研究所計算科学研究センター（サテライト会場：早稲田大学）

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」・理化学研究所計算科学研究センター(R-CCS)

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4回目。

●宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマーセミナー

参加者：30名

日時：令和元年8月26日～8月30日

場所：千葉大学総合校舎1号館

主催：千葉大学大学院理学研究院附属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。

●第5回 HPC-Phys 勉強会

参加者：29名

日時：令和元年11月7日

場所：早稲田大学（西早稲田キャンパス）（サテライト会場：理化学研究所）

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」・早稲田大学高等研究所

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5回目。

●基研研究会「シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて」

参加者：90名

日時：令和元年12月16日～12月19日

場所：基礎物理学研究所 湯川記念館 パナソニック国際交流ホール

主催：京都大学基礎物理学研究所

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：「富岳」が近く稼働することが分野に転機をもたらすことを鑑み、「京」で得られた成果の報告やシミュレーションを素粒子・原子核・宇宙分野で活用する研究を取り上げて議論が行われた。口頭発表は38件、ポスター発表17件。

●第6回 HPC-Phys 勉強会

参加者：32名

日時：令和2年1月31日

場所：京都大学基礎物理学研究所

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6回目。

3) 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/>

令和元年度（平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 3 月 31 日）

JICFuS 日本語サイト	103,318 ページビュー（1 日平均 283 ページビュー）
JICFuS 英語サイト	2,459 ページビュー（1 日平均 6.7 ページビュー）
重点課題 9 日本語サイト	5,525 ページビュー（1 日平均 15 ページビュー）
重点課題 9 英語サイト	394 ページビュー（1 日平均 1.1 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。令和 2 年 4 月 15 日時点でフォロワー数 1,963。

●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

- ・史上初、ブラックホールの撮影に成功

発表日：平成 31 年 4 月 10 日情報解禁

発表主宰者：自然科学研究機構 国立天文台、計算基礎科学連携拠点、工学院大学、情報・システム研究機構 統計数理研究所、総合研究大学院大学、東京大学大学院 理学系研究科、東北大学、広島大学
メディア掲載：時事通信(4/10), マイナビニュース(4/10), CNN(4/10), AFBP NEWS(4/10)...

- ・魔法数研究に金字塔

発表日：令和元年 5 月 2 日情報解禁

発表主宰者：理化学研究所，東京大学大学院理学系研究科

- ・原子核の形の基本原則と量子系での自己組織化

発表日：令和元年 11 月 26 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

- ・宇宙の大規模構造の複雑な統計パターンを高速予言する人工知能（AI）ツールを開発

発表日：令和元年 2 月 5 日情報解禁

発表主催者：東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構，京都大学

- ・新たなハイパー原子核「グザイ・テトラバリオン」

発表日：令和元年 3 月 5 日情報解禁

発表主催者：理化学研究所，九州大学，京都大学

2) メディア掲載等

サブ課題 C・大須賀 健教授（筑波大学）

読売新聞：4/9 9:00, 電話取材

日経新聞：4/9 10:00, 計算科学研究センター

朝日新聞：4/9 12:00, 電話取材

茨城新聞：4/18 9:00, 計算科学研究センター

日経新聞：「かがくアゴラ」11/27

-テレビ・ラジオ・ネット放送

NHK：4/10 15:00-17:00, 生放送出演

AbemaTV 報道番組 AbemaPrime：4/10 22:00-22:40 生放送出演

日本テレビ「シューイチ」：4/14 7:30-9:55, 生放送出演

NHK(NHK スペシャル)5/9,10

宇都宮の FM ラジオ"ミヤラジ" (マチコ先生のラジ勉！) 6/11

「BAYFM ベイエフエム・Love Our Bay」12/16-19

サブ課題 C・川島尚朋特任助教（国立天文台）

NHK（NHK スペシャル スペース・スペクタクル）5/21

日本経済新聞 9/10

Newton 12月号 10/1

ワック株式会社(BS フジ ガリレオ X 6/23 放送)5/22

●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 31 年度は 38 号と 39 号の 2 本制作した。

・第 38 号「プラズマ粒子は、宇宙で“サーフィン”して“ドリフト”して宇宙線になる」（令和元年 8 月 6 日）千葉大学大学院理学研究院 松本 洋介 特任准教授

・第 39 号「スーパーコンピュータを使ったクォークとグルーオンの運動方程式の計算」（令和 2 年 2 月 18 日）広島大学大学院理学研究科 石川健一 准教授

●「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 31 年度は 15 号を制作。

・第 15 号「究極のシミュレーションを目指して -ブラックホール を「富岳」で作る-」（令和元年 11 月 15 日）東邦大学理学部 関口雄一郎 准教授 YouTube 再生 1,502 回（4/15 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。

●イベント企画・運営

大小 3 つのイベントを行い、計 1324 名を集めた。毎年開催されている「見える化シンポジウム」は、今年は HPCI フォーラム中に「見える化セッション」として開催される予定であったが新型コロナウイルスの影響で中止され、WEB 上にて HPCI フォーラム「見える化セッション 2020」WEB 展示としてコンテンツを公開した。

・科学技術週間一般公開（平成 31 年 4 月 15 日～4 月 21 日）

筑波大学計算科学研究センター一般公開：参加者 161 名（高校生以下 79 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 200 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 Chromdynamics）」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。今年度はプレスリリース・新たなハイパー原子核「グザイ・テトラバリオン」の広報用に新キャラクター QCD ロボ・グザイ・テトラバリオンを制作。以下の見える化セッションで公開を行っ

た。

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 735 人。

KEK 一般公開（令和元年 9 月 1 日）参加者 355 人

R-CCS 一般公開（令和元年 11 月 9 日）参加者 380 人

・見える化セッション 2020

公開日：令和 2 年 3 月 31 日

場所：RIST、HPCI ホームページ内 https://www.hpci-office.jp/pages/mieruka_2020

概要：開催予定であった HPCI フォーラムにおけるポスト「京」重点課題・萌芽的課題のブース展示の WEB 展示。重点課題 9 からは「成果報告ポスター」「QCD ロボグザイ・テトラバリオンポスター」「月刊 JICFuS」「月刊 JICFuS ムービー」「Web 版 QCD カードゲーム」の 5 点を展示。

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格子 QCD 計算による QCD 相転移の解明	国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究センター	連続系場の理論研究チームチームリーダー・青木保道
⑥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
⑦エキゾチック原子核の量子多体構造の研究	国立大学法人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
⑧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
⑨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
⑩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
⑪一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによるブラ	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台	科学研究部教授・富阪幸治

ックホール降着流および噴出流の研究 ⑫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	国立大学法人千葉大学	理学研究院教授・松元亮治
⑬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	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	粒子系シミュレータ研究チーム 研究員・似鳥啓吾
⑭ターゲットアプリケーションのコーデザイン・開発	国立大学法人広島大学	理学研究科准教授・石川健一
⑮プロジェクトの総合的推進	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

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
Inclusive processes from lattice QCD (?), 口頭	Shoji Hashimoto	FLQCD 2019	2019/4/16	国内
B→D(*)ellu decays at non-zero recoils”, 口頭	Takashi Kaneko	FLQCD 2019	2019/4/23	国内
Axial U(1) symmetry in high temperature phase of two-flavor QCD、口頭	Kei Suzuki	FLQCD 2019	2019/4/16	国内
Renormalization of bilinear and four- fermion operators through temporal moments, 口頭	T. Ishikawa, K. Nakayama, S. Hashimoto	Lattice2019	2019/6/17	国外
Symmetries of the light hadron spectrum in high temperature QCD, 口 頭	C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, K. Suzuki	Lattice2019	2019/6/17	国外
B→ $\pi \ell \nu$ form factors and $ V_{ub} $	J. Koponen, B. Colquhoun, S.	Lattice2019	2019/6/17	国外

with Möbius domain wall fermions	Hashimoto, T. Kaneko			
Axial U(1) symmetry and mesonic correlators at high temperature in Nf=2 lattice QCD	K. Suzuki, S. Aoki, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, C. Rohrhofer	Lattice2019	2019/6/17	国外
Charmonium contribution to $B \rightarrow K l l^-$: testing the factorization approximation on the lattice, 口頭	K. Nakayama, T. Ishikawa, S. Hashimoto	Lattice2019	2019/6/18	国外
Study of intermediate states in the inclusive semi-leptonic $B \rightarrow X e l \nu$ decay structure functions, 口頭	G. Bailas, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Koponen	Lattice2019	2019/6/18	国外
Exploring the QCD phase diagram at finite density by the complex Langevin method on a $16^3 \times 32$ lattice	S. Tsutsui, Y. Ito, H. Matsufuru, J. Nishimura, S. Shimasaki and A. Tsuchiya	Lattice2019	2019/6/18	国外
Domain-wall fermion and Atiyah-Patodi-Singer index, 口頭	H Fukaya, M Furuta, S Matsuo, T Onogi, S Yamaguchi, M Yamashita	Lattice2019	2019/6/20	国外
Current status and perspectives of complex Langevin	J. Nishimura	XQCD2019	2019/6/24	国内

calculations in finite density QCD				
Complex Langevin simulation of the Lorentzian type IIB matrix model and the emergence of smooth (3+1)D expanding space-time, 口頭	Jun Nishimura	The OIST Workshop "Quantum and Gravity in Okinawa" 2019	2019/7/24	国内
Inclusive B decay structure functions and their decomposition into final states, 口頭	Shoji Hashimoto	Advances in Lattice Gauge Theory 2019	2019/7/31	国外
Perspectives of complex Langevin calculations in finite density QCD, 口頭	Jun Nishimura	RMT in Sub-Atomic Physics and Beyond	2019/8/6	国外
格子量子色力学におけるソルバーについて, 口頭	滑川裕介	第4回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会	2019/8/27	国内
複素ランジュバン法の様々な応用の可能性, 口頭	西村淳	離散的手法による場と時空のダイナミクス2019	2019/8/27	国内
B decays on the lattice, 口頭	Shoji Hashimoto	Lattice QCD workshop	2019/8/27	国外
New perspectives on the emergence of (3+1)D expanding space-time in the Lorentzian type IIB	J. Nishimura	Workshop on Quantum Geometry, Field Theory and Gravity	2019/9/19	国外

matrix model ， 口頭				
複素ランジュバン法 によるカラー超伝導 相の第一原理解析， 口頭	横田猛，浅野侑 磨，伊藤祐太，松 古栄夫，滑川裕 介，西村淳，土屋 麻人，筒井翔一朗	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/17	国内
Θ 項を含む2次元U(1) ゲージ理論の複素ラ ンジュバン解析，口 頭	松本祥，西村淳， 平沢光昭， Yosprakob Atis	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/17	国内
ローレンツ型タイプ IIB行列模型の複素ラ ンジュバン・シミュ レーション，口頭	平沢光昭， Konstantinos N. Anagnostopoulos， 青木俊紘，東武 大，伊藤祐太，西 村淳，Stratos Kovalkov Papadoudis，土屋 麻人	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/17	国内
Nf=2格子QCDにおける 高温領域の対称性， 口頭	青木慎也，青木保 道，深谷英則，橋 本省二， Christian Rohrhofer，鈴木 溪	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/17	国内
時間モーメントを用 いた格子上の双線型 演算子と4フェルミ演 算子のくりこみ，口 頭	石川力，中山勝 政，橋本省二	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/18	国内
ローレンツ型IIB行列 模型の古典解に関す る大規模計算，口頭	畠山洸太，土屋麻 人，西村淳，松本 祥，Yosprakob Atis	日本物理学会2019 年秋季大会	2019/9/18	国内

超弦理論の数値シミュレーションと時空形成、口頭	西村淳	QUCS2019	2019/12/16	国内
Activity of Lattice QCD common code "Bridge++" for manycore and GPU supercomputers, ポスター	滑川裕介	QUCS2019	2019/12/17	国内
$B \rightarrow \pi$ 1 nu form factors from lattice QCD, ポスター	橋本省二	QUCS2019	2019/12/17	国内
格子QCDシミュレーションとSuperKEKB, 口頭	金児隆志	QUCS2019	2019/12/18	国内
muon g-2 のための格子QCD計算, 口頭	出淵卓	QUCS2019	2019/12/19	国内
量子色力学の高温相におけるトポロジー励起、ポスター	深谷英則	HPCI第6回成果報告会	2019/11/1	国内
Simulation of the vacuum and matter in a femto-box ~ 10 reasons (not) to believe lattice QCD, 口頭	Shoji Hashimoto	Workshop on Determination of Fundamental QCD Parameters	2019/10/3	国外
Lattice QCD for Vcb, 口頭	Shoji Hashimoto	Lattice QCD at Fermilab	2019/11/8	国外
"Towards higher order numerical stochastic perturbation computation applied to the twisted	Antonio González-Arroyo, Issaku Kanamori, Ken-Ichi Ishikawa(発表者), Kanata Miyahana,	中国 武漢 (the 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019))	2019年6月	国外

Eguchi-Kawai model”、口頭発表	Masanori Okawa, Ryoichiro Ueno			
「格子量子色力学（格子QCD）における大規模並列計算と計算アルゴリズム」、口頭発表・招待講演	石川健一	広島大学千田キャンパス（STEシミュレーション研究会 -計算プラズマ物理の新潮流-）	2019年9月	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	Symposium on "Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2019)"	2019 年 12 月	国内
Baryon Interactions from Lattice QCD near the physical point	T. Doi	MOST-RIKEN workshop on "ab initio theory in nuclear physics"	2019年4月	国外
Consistency between Luscher's method and HAL method for two-baryon systems on the lattice	T. Doi	International Molecule-type Workshop "Frontiers in Lattice QCD and related topics" (FLQCD2019)	2019年4月	国外
Baryon interactions from Lattice QCD at $m(\pi) = 0.27 \text{ GeV}$	T. Doi	The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019)	2019年6月	国外

Recent progress on Lattice QCD of Two- and Three-Baryon Forces	T. Doi	Bethe Forum “Multihadron Dynamics in a Box”	2019年9月	国外
Recent progress on Lattice QCD calculation of Baryon Forces	T. Doi	Mini Workshop on “Few-body and cluster problems in nuclear systems”	2019年10月	国外

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
Level densities of pf-shell nuclei by large-scale shell-model calculations, 口頭発表	N. Shimizu	7th Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength, Oslo University, Oslo, Norway	2019年5月28日	国外
原子核殻模型計算と多様な変形バンド、口頭発表	清水則孝	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて（QUCS 2019）京都大学基礎物理学研究所	2019年12月19日	国内
現実的有効相互作用を用いた殻模型によるシッフモーメントの評価、口頭発表	清水則孝、柳瀬宏太	日本物理学会2019年秋の分科会、山形大学	2019年9月18日	国内
Self-organization of quantum systems and nuclear collectivity, 口頭発表	T. Otsuka	International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of	2020/01/24	国内

		Quantum Systems (CLUSHIQ2020), Beppu, Japan		
Perspectives of the Nuclear Structure, 口頭発表	T. Otsuka	Mini-workshop on Nuclear Structure, Seoul National University, Seoul, Korea	2020/2/18	国外
Nuclear Matrix Elements of neutrinoless double beta decay calculated by Monte Carlo Shell Model for ^{76}Ge and ^{136}Xe , 口頭発表	T. Otsuka	International Conference on Neutrino and Nuclear Physics 2020 (CNNP2020), Arabella Hotel and Spa in the Kogelberg Biosphere near Cape Town (South Africa)	2020/2/26	国外
Structure of F-Ne- Na-Mg isotopes and new mechanism of driplines, 口頭発表	T. Otsuka	The workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada	2020/3/3	国外
Self-organization in nuclear collective bands, 口頭発表	T. Otsuka	Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, BORMIO	2020/02/05	国外
Precision nuclear structure via the Monte-Carlo shell model, 口頭発表	T. Otsuka	Laser spectroscopy as a tool for nuclear theories, CEA, Orme des	2019/10/10	国外

		Merisiers Campus, 91191 Gif-sur- Yvette, France		
Nuclear matrix elements with advanced shell model methods, 口頭発表	T. Otsuka	Progress and Challenges in Neutrinoless Double Beta Decay, ECT*, Italy	2019/7/17	国外
Ab initio studies on the dripline of the Island-of-Inversion nuclei, 口頭発表	T. Otsuka	Ab Initio Nuclear Theory: From Breakthroughs to Applications, University of Surrey (Treetops, Wates House)	2019/7/25	国外
Self-organization in atomic nuclei and nuclear collectivity, 口頭発表	T. Otsuka	The 27th International Nuclear Physics Conference (INPC 2019), Glasgow, UK	2019/7/29	国外
Self-organization in nuclear structure and its impact to heavy nuclei, 口頭発表	T. Otsuka	LXIX International Conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High	2019/7/1	国外

		Technologies". Dubna, Russia		
Alpha clustering in nuclei and the shell model, 口頭発表	T. Otsuka	Theoretical Nuclear Physics in Padova, Padova, Italy	2019/05/21	国外
Self-organization of quantum systems and the structure of heavy nuclei, 口頭発表	T. Otsuka	Physics between lead and uranium: in preparation of new experimental campaigns at ISOLDE, KU Leuven, Bergium	2019/4/17	国外
Evolution of shape and shell of atomic nuclei and the self-organization, 口頭発表	T. Otsuka	XVII International Meeting on "Selected Topics in Nuclear and Atomic Physics", Padova University, Padova, Italy	2019/10/1, 4	国外
Olaf gets into shapes, 口頭発表	T. Otsuka	Symposium "Particles, Photons, and Fields: Messengers of Violent Events from the Nucleus, through the Sky, to the Cosmos", KVI, Groningen, Holland	2019/11/21	国外
原子核物理のパラダイムシフトと京コンピュータ, 口頭発表	大塚孝治	研究会 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進	2019/12/19	国内

		化の解明に向けて, 基礎物理学研究 所、京都大学		
Intrinsic structure of light nuclei from no-core Monte Carlo shell model, 口頭発表	T. Abe	TRIUMF Workshop on Progress in Ab Initio Techniques in Nuclear Physics, TRIUMF, Vancouver, Canada	2020/3/3	国外
Alpha-cluster structure from ab- initio no-core Monte Carlo shell model, 口頭発表	T. Abe	Pioneer Symposia on Various Manifestations of Nuclear Structure, KPS Fall Meeting 2019, Gwangju, Korea	2019/10/24	国外
Alpha-cluster structure from an ab-initio point of view, 口頭発表	T. Abe	RCNP Workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets, RCNP, Osaka University, Osaka, Japan	2019/10/20	国内
Alpha-cluster structure of light nuclei from no-core Monte Carlo shell model, 口頭発表	T. Abe	RIBF Users Meeting, RIKEN RIBF, Saitama, Japan	2019/9/3	国内
Alpha-cluster structure from ab- initio Monte Carlo shell model, 口頭発表	阿部喬	シミュレーション による宇宙の基本 法則と進化の解明 に向けて (QUCS 2019)、京都大学基 礎物理学研究所	2019/12/18	国内

Alpha-cluster structure from the ab-initio Monte Carlo shell model, 口頭発表	阿部 喬	日本物理学会2019年秋季大会、山形大学	2019/9/20	国内
Alpha-cluster structure from the ab-initio Monte Carlo shell model, ポスター発表	T. Abe	International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020), Ryoutiku Bettei, Oita, Japan	2020/1/23	国内
モンテカルロ殻模型によるベータ崩壊の研究, 口頭発表	角田 佑介	研究会「原子核物理でつむぐrプロセス」、京都大学基礎物理学研究所	2019/05/22	国内
モンテカルロ殻模型によるSm同位体の形状変化の研究, 口頭発表	角田 佑介、大塚孝治、清水則孝	日本物理学会2019年秋季大会、山形大学小白川キャンパス	2019/09/18	国内
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	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS2019)、京都大学基礎物理学研究所	2019/12/18	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
--------------------------	-------	--------------	--------	--------

The Core-Collapse Supernova Simulations with the Full Boltzmann Neutrino Transport in Three-Dimensional Space (口頭)	岩上わかな	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて(QUCS 2019)	2019/12/18	国内
The Core-Collapse Supernova Simulations with the Full Boltzmann Neutrino Transport in Three-Dimensional Space (ポスター)	Wakana Iwakami	The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave	2020/02/26	国内
重力崩壊型超新星の数値シミュレーションの現状と将来展望 (口頭)	岩上わかな	ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第4回 公開シンポジウム	2020/03/09	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	天文学会年会 2020 年春季年会	2020/03/18	国内
超新星爆発のボルツマン輻射流体計算で探る核物質の状態方程式 (ポスター)	大川博督	第6回「京」を中核とするHPCIシステム利用課題 成果報告会	2019/11/1	国内
ボルツマン輻射流体コードを用いた回転大質量星の重力崩壊計算 (ポスター)	大川博督	第6回「京」を中核とするHPCIシステム利用課題 成果報告会	2019/11/1	国内
Recent Progress of the Core-collapse Supernova Simulations under axisymmetry with the Boltzmann-radiation-	Akira Harada	The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave	2020/2/27	国内

hydrodynamics code (口頭)				
Supernova simulations with the Boltzmann Neutrino Transport (C02 theory report) (口頭)	Akira Harada	Joint symposium of MEXT innovative area x KONAN GAKUEN 100th Anniversary International Scientific Symposium Series Sponsored by The Hirao Taro Foundation of KONAN GAKUEN for Academic Research	2020/2/12	国内
Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulations of the stellar core-collapse under axisymmetry - status report of group C02 of GW-genesis- (part 2) (口頭)	Akira Harada	Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4M-COCOS)	2019/10/21	国内
Neutrino Distributions for a Rotating Core-collapse Supernova with a Boltzmann-neutrino-transport (口頭)	Akira Harada	TAUP2019 - 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics	2019/9/9	国内
Multi-dimensional core-collapse supernova simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics code (口頭)	Akira Harada	MICRA2019 - Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics	2019/8/13	国外
Stellar core-collapse simulations with the	Akira Harada	The 15th International Symposium on Origin	2019/7/4	国内

Boltzmann-radiation-hydrodynamics code under axisymmetry (口頭)		of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15)		
超新星のボルツマン輻射流体計算で探る核物質状態方程式の影響 (口頭)	原田了	日本天文学会2020年春季年会	2020/3/19	国内
超新星爆発の軸対称ボルツマン輻射流体シミュレーション (口頭)	原田了	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019)	2019/12/18	国内
ボルツマン輻射流体コードによる軸対称超新星爆発シミュレーション (口頭)	原田了	高エネルギー宇宙物理学会2019	2019/12/7	国内
Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics (口頭)	原田了	宇宙線研究所共同利用小研究会「高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論」	2019/11/20	国内
Neutrino Distributions for a Rotating Core-collapse Supernova with a Boltzmann-neutrino-transport (ポスター)	Akira Harada	F.O.E. Fifty-One Erg 2019	2019/5/20-24	国外
ボルツマン輻射流体コードによる軸対称超新星爆発シミュレーション (ポスター)	原田了	新学術「地下宇宙」第6回超新星ニュートリノ研究会	2020/1/6-7	国内
超新星のボルツマン輻射流体シミュレーションにおけるニュートリノ分布 (ポスター)	原田了	第32回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」	2019/12/25-27	国内

超新星物質とニュートリノ（口頭）	住吉光介	高塚さんを偲ぶ研究会—高密度ハドロン・クォーク物質の諸相と中性子星の構造・進化— 京都大学基礎物理学研究所	2019/5/25-26 (5/26)	国内
原子核から超新星爆発の世界を探る（口頭）	住吉光介	2019年度四国地区理論物理学セミナー、 スクール招待講義、 高知大学理工学部	2019.12.7-12.8	国内
超新星爆発の世界を探る ～原子核から星まで～（口頭）	住吉光介	物理学の最前線、 東北大学理学部物理学 学科（公開講座、招待講演）	2019.7.4	国内
Neutrino emission and equation of state in core collapse supernovae（口頭）	K. Sumiyoshi	Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics (MICRA) 2019 Theoretisch-Physikalisches Institut (TPI), Die Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany	2019.8.12-16 (8.14)	国外
Core collapse supernova simulations with full Boltzmann transport -status report of group C02 of GW-genesis- (part 1)（口頭）	K. Sumiyoshi	Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4M-COCOS), Fukuoka University, Fukuoka, Japan		国内

Fast Neutrino-Flavor Conversions in Core-Collapse Supernovae C02: Applications of Boltzmann Simulations (口頭)	S. Yamada	Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4M-COCOS), Fukuoka University, Fukuoka, Japan	2019.10.21-24 (10.22)	国内
A Recent Issue in Core-Collapse Supernova Simulations (口頭)	S. Yamada	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて(QUCS 2019)	2019.12.16-20 (12.19)	国内
ボルツマンソルバーによる超新星爆発シミュレーションとニュートリノ集団振動への応用 (口頭)	山田章一	新学術「地下宇宙」第6回超新星ニュートリノ研究会	2020.1.6-7 (1.6)	国内
Conversion of hadronic matter to quark matter in compact stars (口頭)	S. Furusawa	The 8th Huada QCD School	2019.5.8	国外
Nuclei in Core-Collapse Supernovae (口頭)	S. Furusawa	8th International Conference on New Frontiers in Physics (招待講演)	2019. 8.29	国外
Nuclear equations of state for supernova simulations (口頭)	S. Furusawa	Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae	2019.10.21	国内
Nuclear equations of state for supernova simulations (ポスター)	S. Furusawa	Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, The third symposium	2020.2.10	国内

重力崩壊型超新星爆発と原子核（口頭）	古澤 峻	第3回若手放談会：エキゾチック核物理の将来(招待講演)	2020.2.20	国内
重力崩壊型超新星爆発における軽原子核の役割と凝縮可能性（口頭）	古澤 峻	日本物理学会	2020.3.15	国内
Revisiting the lower bound on tidal deformability derived by AT 2017gfo	K. Kiuchi	FOE2019 (Invited speaker and panelist)	2019.5.20	国外
A theoretical modeling of EM and GW emission for binary neutron star mergers	K. Kiuchi	IGC at 25 Multimessenger Universe (Invited panelist)	2019.6.25	国外
Recent progress of a numerical modeling of binary neutron star mergers in numerical relativity	K. Kiuchi	CoCoNuT 2019 (Invited speaker)	2019.9.18	国外
Current status of a numerical modeling of binary neutron star mergers and short gamma-ray bursts	K. Kiuchi	GRB 2019 (Invited speaker)	2019.10.28	国内
Systematic error for the neutron star tidal deformability estimation in GW170817/AT2017gfo	K. Kiuchi	Gravitational wave searches and parameter estimation in the era of detections (Invited speaker)	2020.1.13	国外
連星中性子星合体と r プロセス元素合成	関口 雄一郎	原子核物理でつむぐ r プロセス（招待講演）	2019.5.23	国内
Compact binary coalescence physics	Y. Sekiguchi	16th International Conference on Topics in Astroparticle and	2019.9.9	国内

		Underground Physics (Invited)		
数値相対論：数値流体 計算と比較して	関口 雄一 郎	日本流体力学会 年 会 2019 (招待講演)	2019.9.14	国内
Constraining EOS of NS : achievements in GW170817 and future prospects	Y. Sekiguchi	Quarks and Compact Stars 2019 (Invited)	2019.9.27	国外
GW170817: Observations and Modelling	Y. Sekiguchi	The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (Invited)	2019.10.24	国内
GW170817: Multi- messenger Observations and Modelling	関口 雄一 郎	宇宙線研究所共同利 用小研究会「高エネ ルギー突発現象の多 波長・多粒子観測と 理論」(招待講演)	2019.11.19	国内
GW170817: Observations and Modelling	Y. Sekiguchi	Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big- Bang to Supernovae and Mergers	2019.11.27	国外
GW and Neutrino signals from core- collapse supernovae (oral)	Kei Kotake	The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Graves	2019	国外
Neutrino and GW signals from core- collapse supernovae (oral)	Kei Kotake	Neutrinos from the Lab to the Cosmos	2019	国外
SN Gravitational-waves at the crossroads:	Kei Kotake	ECT* workshop on 'SN neutrinos at the crossroads'	2019	国外

synergetic analysis with SN neutrinos (oral)				
Explosion physics of massive stars and the multi-messenger signals (oral)	Kei Kotake	IAU Symposium 350 on 'Laboratory Astrophysics: from Observations to Interpretation'	2019	国外
超新星とニュートリノ (口頭)	固武 慶	日本物理学会 2019 年秋季大会 宇宙と素粒子の残された謎の解明に向けた、次世代ニュートリノ観測・陽子崩壊実験, (オンライン発表)	2019	国内
Gravitational wave from core-collapse supernovae: C01 status (oral)	Tomoya Takiwaki	GWGENxKonan100th, Konan University	2020	国外
Turbulent driven explosions in core-collapse supernovae (oral)	Tomoya Takiwaki	Turbulence in all kinds 2, Osaka University	2020	国外
Characters and roles of hydrodynamic instabilities that appear in core-collapse supernovae (oral)	Tomoya Takiwaki	AAPPS-DPP2019, マレーシア	2019	国外
Neutrino and Gravitational Wave Signatures of Core-Collapse Supernovae (oral)	Tomoya Takiwaki	4M-COCOS, Fukuoka University	2019	国外
Neutrino and Gravitational Wave Signatures of Core-	Tomoya Takiwaki	TAUP, Toyama	2019	国外

Collapse Supernovae (oral)				
Gravitational wave from rotating and non-rotating core-collapse supernovae (oral)	Tomoya Takiwaki	KAGRA F2F Meeting, Toyama	2019	国外
Explosion mechanism of core-collapse supernovae and recent progress in nuclear physics (oral)	Tomoya Takiwaki	OMEG15	2019	国外
スーパーコンピューター「アテルイ II」で迫る宇宙の謎 (口頭)	滝脇知也	駿台学園天文講座	2019	国外
Neutrino radiation hydrodynamic simulation of an ultrastripped Type Ic supernova (oral)	Tomoya Takiwaki	FOE2019	2019	国外
Gravitational wave emitted from core-collapse supernovae (oral)	Tomoya Takiwaki	STARS2019	2019	国外
KHz gravitational waves from numerail relativity	Masaru Shibata	GWADW	2019	国外
Merger of neutron-star binaries	Masaru Shibata	Nuclear Physics in Astrophysics	2019	国外
Merger and mass ejection of neutron-star binaries	Masaru Shibata	6 th conference of the Polish Society on Relativity	2019	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	国内・
--------------------------	-------	--------------	-----	-----

			た 時 期	外 の 別
機械学習と宇宙論(口頭)	吉田直紀	国立天文台 (第32 回 理論懇シンポジ ウム)	201 9年 12 月 27 日	国 内
Cosmology and Fundamental Physics with AI	吉田直紀	Information Search, Integratio n Personalization 2019	201 9年 5月 10 日	国 外
AGNクラスタリングで探る超巨大 ブラックホールの成長過程	大木平	京都大学 (「超巨 大ブラックホール 研究推進連絡会」 第6回ワークショップ)	201 9年 5月 30 日	国 内
Exploring the AGN clustering using a semi-analytic model of galaxy formation	大木平	東京大学柏キャン パス メディアホー ル (第6回銀河進化 研究会)	201 9年 6月 5日	国 内
AGNクラスタリングで探るX-ray AGNの発現機構	大木平	熊本大学 (日本天 文学会2019年秋季 年会)	201 9年 9月 11 日	国 内
Clustering and halo occupation of AGNs using a semi-analytic model of galaxy formation	Taira Oogi	SHTU (The first Shanghai Assembly on Cosmology and Galaxy Formation)	201 9年 11 月8 日	国 外
Clustering and halo occupation of X-ray AGNs using a semi- analytic model	Taira Oogi	ASIAA (Galaxy Formation and	201 9年 12	国 外

		Evolution Across the Cosmic Time)	月9日	
準解析的モデルによるAGN空間統計	大木平	国立天文台（第32回理論懇シンポジウム）	2019年12月25日	国内
Semi-analytic modeling of AGNs: clustering and halo occupation	大木平	Kyoto University (HSC-AGN face-to-face meeting)	2020年1月23日	国内
X線連星における熱-放射駆動型円盤風からの輝線吸収線構造と観測との比較，口頭発表	都丸亮太，Chris Done，大須賀健，小高裕和，高橋忠幸	茨城（日本天文学会）	2020年3月	国内
多重コンプトン散乱込みの一般相対論的6次元輻射輸送計算コードの開発，口頭発表	小川拓未，大須賀健，川島朋尚，高橋博之	茨城（日本天文学会）	2020年3月	国内
ボルツマン方程式を解く超臨界降着流の一般相対論的 MHD 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	茨城（日本天文学会）	2020年3月	国内
順回転、逆回転ブラックホールをもつ超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション，口頭発表	内海碧人，大須賀健，高橋博之	茨城（日本天文学会）	2020年3月	国内
ARTIST コードを元にした空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発，口頭発表	高橋幹弥，高橋芳太，大須賀健，朝比奈雄太，梅村雅之	茨城（日本天文学会）	2020年3月	国内

Dusty-gas の輻射重力源への Hoyle-Lyttleton 降着；輻射場の 非球対称性と減光 の効果， 口頭 発表	細谷亮太郎， 大須賀健	茨城（日本天文学 会）	202 0年 3月	国 内
多波長の一般相対論的輻射輸送計 算：ブラックホール・シャドウと 電波か らX線・ガンマ線までの輻 射スペクトル， 口頭発表	川島朋尚，大 須賀健，高橋 博之	茨城（日本天文学 会）	202 0年 3月	国 内
M87ジェット根元の局所的な電子 陽電子対プラズマ注入領域からの 放射はEHTで観測されたリング・ イメージを再現するのか？， ポ スター発表	川島朋尚，當 真賢二，紀基 樹，秋山和 徳，中村雅 徳，森山小太 郎	茨城（日本天文学 会）	202 0年 3月	国 内
富岳で狙うBH周辺領域とジェット 形成， 口頭発表	大須賀健	兵庫（ポスト 「京」萌芽的課 題・計算惑星 第 4 回 公開シンポジウ ム）	202 0年 3月	国 内
Hoyle-Lyttleton Accretion of Dusty Gas onto Accretion Disks, ポスター発表	細谷亮太郎， 大須賀健	兵庫 (Gravitational Wave Physics and Astronomy)	202 0年 2月	国 外
Hoyle-Lyttleton Accretion of Dusty Gas onto Accretion Disks, 口頭発表	大須賀健	滋賀 (Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, Area workshop 2020 Winter)	202 0年 1月	国 外
General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-Eddington accretion disks around prograde and retrograde black holes, ポスター発表	内海碧人，大 須賀健，高橋 博之	仙台 (Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era)	202 0年 1月	国 外

BH high-power accretion & outflow, 口頭発表 (招待講演)	大須賀健	仙台 (Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era)	2020年1月	国外
Multiwavelength study of BH shadow, relativistic jet, and accretion flow via general relativistic radiative transfer, 口頭発表 (招待講演)	川島朋尚	仙台 (Active Galactic Nucleus Jets in the Event Horizon Telescope Era)	2020年1月	国外
ブラックホール降着円盤およびジェット的一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション, 口頭発表 (招待講演)	大須賀健	京都 (基研研究会「シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて」)	2019年12月	国内
一般相対論的輻射輸送コード:ARTIST の開発 の現状と今後の展望, ポスター発表	高橋幹弥, 高橋芳太, 大須賀健, 朝比奈雄太, 梅村雅之	東京 (理論懇シンポジウム)	2019年12月	国内
General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-Eddington accretion disks around prograde and retrograde black holes, ポスター発表	内海碧人, 大須賀健, 高橋博之	東京 (理論懇シンポジウム)	2019年12月	国内
Calculation for super-critical column accretion flows onto neutron stars : Modeling of ultraluminous X-ray pulsars, ポスター発表	井上壮大, 大須賀健, 川島朋尚	東京 (理論懇シンポジウム)	2019年12月	国内
多波長の一般相対論的輻射輸送コードRAIKOUで探るブラックホール降着流・噴出流および時空構造, 口頭発表 (招待講演)	川島朋尚	東京 (理論懇シンポジウム)	2019年12月	国内

Radiation magnetohydrodynamics simulations of accretion flows onto black hole, 口頭発表	大須賀健	茨城 (11th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences)	2019年11月	国外
Radiation Hydrodynamic/Magnetohydrodynamic Simulations of Super-Eddington Accretion Flows and Outflows, 口頭発表 (招待講演)	大須賀健	マレーシア (14th Asia-Pacific Physics Conference)	2019年11月	国外
Probing mass and spin of black holes via general relativistic radiative transfer in accretion flows and outflows, 口頭発表 (招待講演)	川島朋尚	マレーシア (14th Asia-Pacific Physics Conference)	2019年11月	国外
General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-Eddington accretion disks around prograde and retrograde black holes, ポスター発表	内海碧人, 大須賀健, 高橋博之	千葉 (The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation)	2019年10月	国外
Pulsed fraction of super-critical column accretion flows onto neutron stars: modeling of ultraluminous X-ray pulsars, ポスター発表	井上壮大, 大須賀健, 川島朋尚	千葉 (The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation)	2019年10月	国外
超臨界降着流におけるアウトフローのフラクタル次元解析, 口頭発表	古野雅之, 嶺重慎, 大須賀健, 北木孝明	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内

M87 ジェット地平面領域の構造解明 輻射輸送計算 による EHT 偏波イメージの 理論予測, 口頭発表	恒任優, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, 秋山和徳	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
降着円盤からのフィードバックが超臨界降着条件に与える影響, ポスター発表	竹尾英俊, 稲吉恒平, 大須賀健, 高橋博之, 嶺重慎	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
超臨界降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション, 口頭発表	朝比奈雄太, 高橋博之, 大須賀健	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
ULX Pulsar の超臨界降着柱モデル; Pulsed Fraction と磁軸、見込み角の関係, 口頭発表	井上壮大, 大須賀健, 川島朋尚	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
多重コンプトン散乱込みの一般相対論的 6 次元輻射輸送 計算コードの開発, 口頭発表	小川拓未, 大須賀健, 川島朋尚, 高橋博之	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
フレア状態のM87における三日月状シャドウ: 2020年代のEHTに向けた新しいブラックホール・スピン測定法, 口頭発表	川島朋尚, 紀基樹, 秋山和徳	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
ブラックホール・スピンが超臨界降着流の輻射スペクトルに与える影響, ポスター発表	川島朋尚, 大須賀健, 高橋博之	熊本 (日本天文学会)	2019年9月	国内
Probing signature of black hole spin in M87 shadow in flaring states, 口頭発表	川島朋尚, 紀基樹, 秋山和徳	イギリス (A Centenary of Astrophysical Jets: Observation, Theory, and Future Prospects)	2019年7月	国外
一般相対論的輻射輸送コード来光 (RAIKOU) で探るブラックホール, 口頭発表 (招待講演)	川島朋尚	京都 (超巨大ブラックホール研究推進連絡会「第6回ワークショップ」)	2019年5月	国内

Numerical Simulations of super/near Eddington accretion flows & radiatively-driven outflows around black holes, 口頭発表(招待講演)	大須賀健	アメリカ (Numerical Simulations of super/near Eddington accretion flows & radiatively-driven outflows around black holes)	2019年4月	国外
大規模シミュレーションを用いたフィラメント降着がハロー構造へ及ぼす影響(口頭)	Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki	日本天文学会 2020 春季年会	2020年3月	国内
宇宙論的シミュレーションで探る $z=3$ の銀河間物質における初代星起源重元素(口頭)	Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki	日本天文学会 2020 春季年会	2020年3月	国内
Discrimination of heavy elements originating from Pop III stars in $z=3$ intergalactic medium (口頭)	Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki	First Stars VI	2020年3月	国外
Constraint on the nature of dark matter by high-resolution cosmological simulations and next generation spectroscopy observations (口頭)	Ishiyama Tomoaki	Cosmic Acceleration	2020年2月	国内

ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成(口頭)	Ishiyama Tomoaki	令和元年度国立天文台 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	2020年 1月	国内
ダークマターの自己相互作用を考慮した宇宙の構造形成シミュレーション(ポスター)	Ebisu Toshihiro, Ishiyama Tomoaki	令和元年度国立天文台 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	2020年 1月	国内
宇宙論的N体シミュレーションを用いた恒星間天体の衝突による低質量初代星の重元素汚染(ポスター)	Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki	第32回理論懇シンポジウム	2019年 12月	国内
活動銀河中心核状態遷移の3次元輻射磁気流体シミュレーション(ポスター)	松元 亮治	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019)	2019年 12月	国内
ダークマターの密度揺らぎからはじまる宇宙の天体形成 (口頭)	Ishiyama Tomoaki	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019)	2019年 12月	国内
MHDシミュレーションへの機械学習の導入 (ポスター)	松本 洋介	シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019)	2019年 12月	国内
Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Intermittent Ejection of Jets during Hard-to-Soft State Transition in	Ryoji Matsumoto	The 14th Asia-Pacific Physics Conference 2019 (APPC14)	2019年 11月	国外

Black Hole Accretion Flows (口頭)				
Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model (口頭)	Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki	Subaru 20th Anniversary	2019年11月	国外
高解像度宇宙論的N体シミュレーションに基づいた準解析的初代星形成モデルの開発(口頭)	Ishiyama Tomoaki	初代星・初代銀河研究会2019	2019年11月	国内
宇宙論的シミュレーションで探る、恒星ストリームの構造形成(口頭)	Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki, Kirihara Takanobu	初代星・初代銀河研究会2019	2019年11月	国内
First star discrimination in the metal abundance of the $z=3$ intergalactic medium (口頭)	Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki	初代星・初代銀河研究会2019	2019年11月	国内
Magnetic Activities of Black Hole Accretion Disks (基調講演)	Ryoji Matsumoto	3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2019)	2019年11月	国外
pyCANS+コードの開発 (ポスター)	松本 洋介	地球電磁気・地球惑星圏学会 (2019年 秋学会)	2019年10月	国内

MHDコードCANS+への機械学習の導入（口頭）	松本 洋介	令和元年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会 「STEシミュレーション研究会：計算プラズマ物理の新潮流」	2019年9月	国内
大規模天体サーベイ観測に向けた模擬カタログの構築と公開（口頭）	Ishiyama Tomoaki, the Uchuu collaboration	日本天文学会2019年秋季年会	2019年9月	国内
宇宙論的シミュレーションで探る、恒星ストリームと銀河重力場の関係（口頭）	Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki, Kirihara Takanobu	日本天文学会2019年秋季年会	2019年9月	国内
宇宙論的シミュレーションを用いた恒星間天体の衝突による初代星の金属汚染（口頭）	Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki	日本天文学会2019年秋季年会	2019年9月	国内
Numerical study of accretion discs（口頭）	Ryoji Matsumoto, Mami Machida, Yosuke Matsumoto, Taichi Igarashi	Hinode-13/IPELS 2019	2019年9月	国内
First star discrimination in the metal abundance of the $z=3$ intergalactic medium（口頭）	Kirihara Takanobu, Kenji Hasegawa, Umemura	Galaxy-IGM workshop 2019	2019年8月	国内

	Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki			
高次精度 MHD コード CANS+:円筒座標系での高次精度化と降着円盤計算への応用 (口頭)	松本洋介	京都大学数理解析研究所 共同研究 (公開型)「宇宙惑星ジェットの数理」	2019年7月	国内
Stochastic electron acceleration in weakly magnetized high-M shocks: Weibel B-field generation & turbulent reconnection(招待講演)	Yosuke Matsumoto	10th Korean Astrophysics Workshop (KAW10) : Astrophysics of High-Beta Plasma in the ICM	2019年7月	国外
A new semi-analytic model of Pop III formation with ultralarge cosmological N-body simulations (ポスター)	Ishiyama Tomoaki, Hirano Shingo	The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies	2019年7月	国内
Effect of Interstellar Objects on Metallicity of Population III Survivors Formed in a Cosmological Model (ポスター)	Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru, Ishiyama Tomoaki	The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies	2019年7月	国内
A tutorial on cosmological N-body simulations databases (ポスター)	Ishiyama Tomoaki	第6回銀河進化研究会	2019年6月	国内
Effect of interstellar objects on metallicity of low-mass first stars formed in a cosmological model (口頭)	Kirihara Takanobu, Tanikawa Ataru,	第6回銀河進化研究会	2019年6月	国内

	Ishiyama Tomoaki			
Statistical properties of substructures around MW-sized halos and their implications for the formation of stellar Streams (口頭)	Morinaga Yu, Ishiyama Tomoaki, Kirihara Takanobu, Kinjo Kazuki	第6回銀河進化研究会	201 9年 6月	国 内
多層ニューラルネットワークを用いた高次精度数値流束の予測 (口頭)	松本洋介	日本地球惑星科学 連合2019年大会	201 9年 5月	国 内
Current Status of FDPS and Future plan (oral)	Makino Junichiro	The 2nd R-CCS Internatioal Symposium	Feb . 17, 202 0	国 内
大規模並列粒子シミュレーションコード開発用フレームワークFDPS上で演算加速装置を効率的に利用するためのアルゴリズムとそれを用いたアプリケーション性能 (ポスター)	行方大輔	JpGU Meeting 2019	201 9年 5月 28 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
Chiral-spin symmetry of the meson spectral function above T_c	C. Rohrhofer, Y. Aoki, L. Ya. Glozman. S. Hashimoto	Physics Letters B 802 135245	2020/3/10	国外
Charmonium contribution to $B \rightarrow K l l$: testing the factorization approximation on the lattice	K. Nakayama, T. Ishikawa, S. Hashimoto	PoS (LATTICE2019) 062	2020/1/29	国外
Axial U(1) symmetry and mesonic correlators at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD	K. Suzuki, S. Aoki, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, C. Rohrhofer	PoS (LATTICE2019) 178	2020/1/22	国外
Renormalization of bilinear and four- fermion operators through temporal moments	T. Ishikawa, K. Nakayama, S. Hashimoto	PoS (LATTICE2019) 135	2020/1/15	国外
Symmetries of the Light Hadron Spectrum in High Temperature QCD, 口頭	C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer,	PoS (LATTICE2019) 227	2020/1/15	国外

	L. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, K. Suzuki			
$B \rightarrow \pi \ell \nu$ form factors and $ V_{ub} $ with Möbius domain wall fermions	B. Colquhoun, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Koponen	PoS (LATTICE2019) 143	2020/1/4	国外
Study of intermediate states in the inclusive semi-leptonic $B \rightarrow X \ell \nu$ decay structure functions	G. Bailas, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Koponen	PoS (LATTICE2019) 148	2020/1/4	国外
Exploring the QCD phase diagram at finite density by the complex Langevin method on a $16^3 \times 32$ lattice	S. Tsutsui, Y. Ito, H. Matsufuru, J. Nishimura, S. Shimasaki and A. Tsuchiya	PoS (LATTICE2019) 151	2020/1/4	国外
Axial U(1) symmetry, topology, and Dirac spectra at high temperature in $N_f = 2$ lattice QCD	Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto	PoS CD2018 (2019) 085	2019/8/29	国外

Symmetries of spatial meson correlators in high temperature QCD	C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L. Ya. Glozman, S. Hashimoto, C. B. Lang, and S. Prelovsek	Phys. Rev. D 100, 014502 (2019)	2019/7/8	国外
Complex Langevin analysis of the space-time structure in the Lorentzian type IIB matrix model	Jun Nishimura, Asato Tsuchiya	JHEP 06 (2019) 077	2019/6/5	国外
Exploring the Finite Density QCD Based on the Complex Langevin Method	Shoichiro Tsutsui, Yuta Ito, Hideo Matsufuru, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki, Asato Tsuchiya	JPS Conf. Proc. 024012 (2019)	2019/3/31	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
N Omega dibaryon from lattice QCD	Takumi Iritani, Sinya Aoki,	Phys. Lett. B 792, 284-289 (2019)	2019 年 5 月	国外

near the physical point	Takumi Doi, Faisal Etminan, Shinya Gongyo, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Takaya Miyamoto, Kenji Sasaki			
Possible Lightest Xi Hypernucleus with Modern Xi N Interactions	E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto and Th. A. Rijken	Physical Review Letters, Vol.124 (2020)	2020 年 3 月	国外
"Numerical stochastic perturbation theory applied to the twisted Eguchi-Kawai model"	Antonio González-Arroyo, Issaku Kanamori, Ken-Ichi Ishikawa, Kanata Miyahana, Masanori	J. High Energ. Phys. (2019) 2019: 127 DOI: 10.1007/JHEP06(2019)127	2019 年 6 月	国外

	Okawa, Ryoichiro Ueno			
--	-----------------------------	--	--	--

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
Thick-restart block Lanczos method in nuclear shell-model calculations	N. Shimizu, T. Mizusaki, Y. Utsuno and Y. Tsunoda	Comput. Phys. Comm. 244, 372 (2019)	2019 年 6 月 21 日	国外
Isomer spectroscopy in ^{133}Ba and high-spin structure of ^{134}Ba	L. Kaya, 他 70 名、5 番目 N. Shimizu	Phys. Rev. C 100, 024323 (2019).	2019 年 8 月 14 日	国外
Structure of the $11/2^-$ isomeric state in ^{133}La	Md. S. R. Laskar 他 11 名、4 番目 N. Shimizu	Phys. Rev. C 101, 034315 (2020)	2020 年 3 月 31 日	国外
Isomer Studies in the Vicinity of the Doubly-Magic Nucleus ^{100}Sn : Observation of a New Low-Lying Isomeric State in ^{97}Ag	C. Hornung 他 34 名、6 番目 N. Shimizu, 17 番目 T. Otsuka, 34 番目 Y. Tsunoda	Phys. Lett. B 802, 135200 (2020).	2020 年 1 月 8 日	国外
Underlying structure of collective bands and self-organization in quantum systems	T. Otsuka, Y. Tsunoda, T. Abe, N. Shimizu, and P. Van Duppen,	Phys. Rev. Lett. 123, 222502 (2019).	2019 年 11 月 25 日	国外

Ground-state properties of doubly magic nuclei from the unitary-model-operator approach with the chiral two- and three-nucleon forces	T. Miyagi, T. Abe, M. Kohno, P. Navratil, R. Okamoto, T. Otsuka, N. Shimizu, and S. R. Stroberg	Phys. Rev. C 100, 034310 (2019).	2019 年 9 月 13 日	国外
beta decay of $T_z=+11/2$ isotopes ^{37}Al and ^{39}Si : understanding Gamow Teller strength distribution in neutron rich nuclei	B. Abromeit, V. Tripathi, H. L. Crawford, S. N. Liddick, Y. Utsuno, P. C. Bender, B. P. Crider, R. Dungan, P. Fallon, K. Kravvaris, N. Larson, R. S. Lubna, A. O. Macchiavelli, T. Otsuka, C. J. Prokop, A. L. Richard, N. Shimizu, S.	Phys. Rev. C 100, 014323 (2019).	2019 年 7 月 29 日	国外

	L. Tabor, A. Volya, and S. Yoshida,			
Shell evolution approaching the N=20 island of inversion: Structure of ^{29}Mg	A. Matta 他 38 名、11 番 目 N. Tsunoda, 12 番目 T. Otsuka	Phys. Rev. C 99, 044320 (2019)	2019 年 4 月 29 日	国外
Restoration of the Natural E (1/2+ ₁)-E (3/2+ ₁) Energy Splitting in Odd-K Isotopes Towards N= 40	Y. L. Sun 他 83 名、11 番 目 T. Otsuka, 14 番目 Y. Utsuno	Phys. Lett. B 802, 135215 (2020)	2020 年 3 月 10 日	国外
Nuclear charge radii of 62–80Zn and their dependence on cross- shell proton excitations	L. Xie 他 30 名、27 番目 T. Otsuka, 30 番目 Y. Tsunoda	Phys. Lett. B 797, 134805 (2019)	2019 年 10 月 10 日	国外
Quasifree Neutron Knockout from ^{54}Ca Corroborates Arising N=34 Neutron Magic Number	S. Chen 他 82 名、9 番 目 T. Otsuka, 12 番目 Y. Utsuno	Physical review letters 123, 142501 (2019)	2019 年 9 月 30 日	国外
Microscopic structure of coexisting 0+ states in ^{68}Ni probed via two-neutron transfer	F. Flavigny 他 38 名、21 番目 T. Otsuka, 32 番目 Y. Tsunoda	Physical Review C 99, 054332 (2019)	2019 年 5 月 31 日	国外
High-resolution study of the Gamow-Teller	F. Diel 他 16 名、13 番	Phys. Rev. C 99, 054322 (2019)	2019 年 5 月 21 日	国外

(GT-) strength in the $^{64}\text{Zn}(^3\text{He}, t)^{64}\text{Ga}$ reaction	目 T. Otsuka			
^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation	R. Taniuchi 他 70 名、25 番目 T. Otsuka, 38 番目 Y. Tsunoda	Nature 569, 53 (2019)	2019/5/1	国外
Shape staggering of mid-shell mercury isotopes from in-source laser spectroscopy compared with density functional theory and Monte Carlo shell model calculations	S. Sels 他 47 名、6 番目 Y. Tsunoda, 33 番目 T. Otsuka	Phys. Rev. C 99, 044306 (2019)	2019/4/12	国外
Evolution of shell structure in exotic nuclei	T. Otsuka, A. Gade, O. Sorlin, T. Suzuki, and Y. Utsuno	Rev. Mod. Phys. 92, 015002 (2020)	2020/3/27	国外

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
Spatiotemporal linear instability analysis for arbitrary dispersion relations on the Lefschetz thimble in multidimensional spacetime	Taiki Morinaga, Shoichi Yamada	Physical Review Research, 2, 013045	2020/01	国外

Linear analysis of fast-pairwise collective neutrino oscillations in core-collapse supernovae based on the results of Boltzmann simulations	Milad Delfan Azari, Shoichi Yamada, Taiki Morinaga, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi,	Physical Review D, 99, 103011	2019/05/20	国外
Fast collective neutrino oscillations inside the neutrino sphere in core-collapse supernovae	Milad Delfan Azari, Shoichi Yamada, Taiki Morinaga, Hiroki Nagakura, Shun Furusawa, Akira Harada, Hirotada Okawa, Wakana Iwakami, and Kohsuke Sumiyoshi	Physical Review D, 101, 023018	2020/01/31	国外
Three-Dimensional Boltzmann-Hydro Code for core-collapse in massive stars III. A New method for momentum feedback from neutrino to matter”	Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada	The Astrophysical Journal, Volume 878, Issue 2, article id. 160, 10 pp. 2019.	2019/06	国外
Possible early linear acceleration of proto-neutron stars via asymmetric neutrino	Hiroki Nagakura, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada	The Astrophysical Journal Letters, Volume 880, Issue	2019/08	国外

emission in core-collapse supernovae		2, article id. L28, 7 pp. 2019		
Fast-pairwise collective neutrino oscillations associated with asymmetric neutrino emissions in core-collapse supernova	Hiroki Nagakura, Taiki Morinaga, Chinami Kato and Shoichi Yamada	The Astrophysical Journal, Volume 886, Issue 2, article id. 139, 11 pp. 2019.	2019/12	国外
A new possibility of the fast neutrino-flavor conversion in the pre-shock region of core-collapse supernova	Taiki Morinaga, Hiroki Nagakura, Chinami Kato and Shoichi Yamada	Physical Review Research, Volume 2, Issue 1, article id.012046	2020/2	国外
Observing supernova neutrino light curves with super-Kamiokande: expected event number over ten seconds	Y. Suwa, K. Sumiyoshi, K. Nakazato, Y. Takahira, Y. Koshio, M. Mori and R. A. Wendell	Astrophysical Journal 881 (2019) 139 (16 pages)	2019/08	国外
On the occurrence of fast neutrino flavor conversions in multidimensional supernova models	S. Abbar, H. Duan, K. Sumiyoshi, T. Takiwaki and M. C. Volpe	Physical Review D 100 (2019) 043004 (7 pages)	2019/08	国外
Determination of properties of protoneutron stars toward black hole formation via	H. Sotani and K. Sumiyoshi	Physical Review D100 (2019) 083008 (12 pages)	2019/10	国外

gravitational wave observations				
Influence of density dependence of symmetry energy on supernova simulations	K. Sumiyoshi, K. Nakazato, H. Suzuki, Jinniu Hu and H. Shen	Astrophysical Journal 887 (2019) 110 (17 pages)	2019/12	国外
Nuclear equations of state for astrophysical simulations based on a Dirac-Brueckner-Hartree-Fock calculation	S. Furusawa, H. Togashi, K. Sumiyoshi, K. Saito, S. Yamada and H. Suzuki	Progress of Theoretical and Experimental Physics (2020) 013D05 (15 pages)	2020/01	国内
Fast neutrino flavor conversion modes in multidimensional core-collapse supernova models: The role of the asymmetric neutrino distributions	S. Abbar, H. Duan, K. Sumiyoshi, T. Takiwaki and M. C. Volpe	Physical Review D101 (2020) 043016 (12 pages)	2020/02	国外
Effects of symmetry energy on equation of state for simulations of core-collapse supernovae and neutron-star mergers	H. Shen, F. Ji, J. Hu and K. Sumiyoshi	Astrophysical Journal 891 (2020) 148 (10 pages)	2020/03	国外
New Neutron Star Equation of State with Quark-Hadron Crossover	Gordon Baym, Shun Furusawa, Tetsuo Hatsuda, Toru Kojo, Hajime Togashi	Astrophysical Journal, 885, 42, (2019)	2019/11	国外
Revisiting the lower bound on tidal deformability derived by AT 2017gfo	Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi	Astrophysical Journal 876 (2019) L31	2019/5	国外

Constraint on the maximum mass of neutron stars using GW170817 event	Masaru Shibata, Enping Zhou, Kenta Kiuchi, and Sho Fujibayashi	Physical Review D. 100 (2019) 023015	2019/7	国外
Discrepancy in tidal deformability of GW170817 between the Advanced LIGO twins	Tatsuya Narikawa, Nami Uchikata, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata and Hideyuki Tagoshi	Physical Review Research 1 (2019) 033055	2019/10	国外
On the possibility of GW190425 being a black hole—neutron star binary merger	Koutarou Kyutoku, Sho Fujibayashi, Kohta Hayashi, Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata and Masaomi Tanaka,	Astrophysical Journal 890 (2020) L4	2020/2	国外
A new gravitational-wave signature of low- $T/ W $ instability in rapidly rotating stellar core collapse	Shibagaki Shota , Kuroda Takami , Kotake Kei , Takiwaki Tomoya	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 493, Issue 1, p.L138-L142	2020/3	国外
Supernova Ejecta Interacting with a Circumstellar Disk. I. Two-dimensional	Suzuki, Akihiro; Moriya, Takashi J.; Takiwaki, Tomoya	The Astrophysical Journal, Volume 887, Issue 2, article	2019/12	国外

Radiation-hydrodynamic Simulations		id. 249, 27 pp. (2019).		
Long-term simulations of multi-dimensional core-collapse supernovae: Implications for neutron star kicks	Nakamura, Ko; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei	Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 5, id.98	2019/10	国外
One-, Two-, and Three-dimensional Simulations of Oxygen-shell Burning Just before the Core Collapse of Massive Stars	Yoshida, Takashi; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Takahashi, Koh; Nakamura, Ko; Umeda, Hideyuki	The Astrophysical Journal, Volume 881, Issue 1, article id. 16, 20 pp. (2019).	2019/8	国外
Dependence of the outer boundary condition on protoneutron star asteroseismology with gravitational-wave signatures	Sotani, Hajime; Kuroda, Takami; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei	Physical Review D, Volume 99, Issue 12, id.123024	2019/6	国外
Kompaneets equation for neutrinos: Application to neutrino heating in supernova explosions	Suwa, Yudai; Tahara, Hiroaki W. H.; Komatsu, Eiichiro	Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2019, Issue 8, id.083E04	2019/8	国外
Merger and mass ejection of neutron-star binaries	Masaru Shibata and Kenta Hotkezaka	Annual Review of Nuclear and Particle Sciences, 69, 41—64 (2019)	2019/10	国外

Diversity of kilonova light curves	Kyohei Kawaguchi, Masaru Shibata, and Masaomi Tanaka	Astrophysical Journal, 889, 171 (2020)	2020/02	国外
Sub-radian-accuracy gravitational waves from coalescing binary neutron stars II	Kenta Kiuchi, Kyohei Kawaguchi, Koutarou Kyutoku, Yu-ichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata	Physical Review D 101, 084006 (2020)	2020/04	国外
Mass ejection from disks surrounding a low-mass black hole	Sho Fujibayasi, Masaru Shibata, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, and Yu-ichiro Sekiguchi	Physical Review D 101, 083029 (2020)	2020/04	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
Dark Quest. I. Fast and Accurate Emulation of Halo Clustering Statistics and Its Application to Galaxy Clustering	Takahiro Nishimichi et al. (Incl. Taira Oogi)	ApJ, 884, 29	2019	国外
New constraints on red-spiral galaxies from their kinematics	Akinari Hamabata,	MNRAS, 488, 4117	2019	国外

in clusters of galaxies	Taira Oogi et al.			
Slowing down of cosmic growth of supermassive black holes: theoretical prediction of the Eddington ratio distribution	Hikari Shirakata, Toshihiro Kawaguchi, Taira Oogi et al.	MNRAS, 487, 409	2019	国外
Super-critical column-accretion onto strongly magnetized neutron stars in ULX pulsars	T. Kawashima, K. Ohsuga	Publication of the Astronomical Society of Japan	5-Feb	国外
The thermal-radiative wind in low-mass X-ray binary H1743-322: radiation hydrodynamic simulations	R. Tomaru, C. Done, K. Ohsuga, M. Nomura, T. Takahashi	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	3-Oct	国外
Super-Eddington growth of black holes in the early universe: effects of disc radiation spectra	E. Takeo, K. Inayoshi, K. Ohsuga, H.R. Takahashi, S. Mineshige	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	11-Jul	国外
Black Hole Spin Signature in Black Hole Shadow of M87 in Flaring State	T. Kawashima, M. Kino K. Akiyama	The Astrophysical Journal	10-Jul	国外
Magnetohydrodynamic simulation code CANS+: Assessments and applications	Y. Matsumoto, Y. Asahina, Y. Kudo, T. Kawashima, J. Matsumoto, H. R. Takahashi,	Publication of the Astronomical Society of Japan	10-Jul	国外

	T. Minoshima, S. Zenitani, T. Miyoshi, R. Matsumoto			
The Event Horizon General Relativistic Magnetohydrodynamic Code Comparison Project	O. Porth, et al. (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal Suppliment Series	1-Aug	国外
First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外
First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外
First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外
First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外
First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外

First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole	Event Horizon Telescope Collaboration (incl. T. Kawashima)	The Astrophysical Journal	10-Apr	国外
Observational Evidence for Stochastic Shock Drift Acceleration of Electrons at Earth' s Bow Shock	T. Amano, T. Katou, N. Kitamura, M. Oka, Y. Matsumoto, M. Hoshino, Y. Saito, S. Yokota, B. L. Giles, W. R. Paterson, C. T. Russell, O. Le Contel, R. E. Ergun, P.-A. Lindqvist, D. L. Turner, J. F. Fennell, J. B. Blake	Physical Review Letters	2020年2月	国外
The Abundance and Structure of Subhaloes near the Free Streaming Scale and Their Impact on Indirect Dark Matter Searches	Ishiyama, T., Ando, S.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	2020年1月	国外
Discrimination of heavy elements originating from Pop III stars in $z = 3$ intergalactic medium	Kirihara, T., Hasegawa, K., Umemura, M., Mori, M., Ishiyama, T.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	2019年12 月	国外

Kinetic simulations of nonrelativistic perpendicular shocks of young supernova remnants. II. Influence of shock-surfing acceleration on downstream electron spectra	Artem Bohdan, Jacek Niemiec, Martin Pohl, Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, and Masahiro Hoshino	The Astrophysical Journal	2019年10月	国外
Void Formation: Does the Void-in-Cloud Process Matter?	Chan, H. Y. J., Chiba, M., Ishiyama, T.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	2019年10月	国外
Precursor Wave Amplification by Ion-Electron Coupling through Wakefield in Relativistic Shocks	M. Iwamoto, T. Amano, M. Hoshino, Y. Matsumoto, J. Niemiec, A. Ligorini, O. Kobzar, and M. Pohl	The Astrophysical Journal Letters	2019年9月	国外
Magnetohydrodynamic simulation code CANS+: Assessments and applications	Yosuke Matsumoto, Yuta Asahina, Yuki Kudoh, Tomohisa Kawashima, Jin Matsumoto, Hiroyuki R Takahashi, Takashi Minoshima, Seiji Zenitani,	Publications of the Astronomical Society of Japan	2019年7月	国外

	Takahiro Miyoshi, Ryoji Matsumoto			
Halo Substructure Boosts to the Signatures of Dark Matter Annihilation	A Ando, S., Ishiyama, T., Hiroshima, N.	Galaxies	2019年7月	国外
Kinetic Simulations of Nonrelativistic Perpendicular Shocks of Young Supernova Remnants. I. Electron Shock-surfing Acceleration	Bohdan, Artem; Niemiec, Jacek; Pohl, Martin; Matsumoto, Yosuke; Amano, Takanobu; Hoshino, Masahiro	The Astrophysical Journal	2019年6月	国外
Evolution of Three- dimensional Relativistic Ion Weibel Instability: Competition with Kink Instability	Makoto Takamoto, Yosuke Matsumoto, and Tsunehiko N. Kato	The Astrophysical Journal Letters	2019年6月	国外
Statistical properties of substructures around Milky Way-sized haloes and their implications for the formation of stellar streams	Morinaga, Y., Ishiyama, T., Kiri-hara, T., Kinjo, K.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	2019年5月	国外
Effect of interstellar objects on metallicity of	Kiri-hara, T., Tanikawa, A., Ishiyama, T.	Monthly Notices of the Royal	2019年5月	国外

low-mass first stars formed in a cosmological model		Astronomical Society		
Acceleration of the tree method with a SIMD instruction set	Kodama Tetsushi、 Ishiyama Tomoaki	Publ. Astron. Soc. Japan	2019年4月	国外
Extreme-scale particle-based simulations on advanced HPC platforms	Iwasawa Masaki	CCF Transactions on High Performance Computing	Feb. 19, 2020	国外
Accelerated FDPS: Algorithms to use accelerators with FDPS	Iwasawa Masaki	Publications of the Astronomical Society of Japan	Feb. 06, 2020	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）ビッグバンの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、宇宙背景輻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、ニュートリノ輻射／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) 相対論的輻射磁気流体コードの作成と最適化、輻射輸送方程式の 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・輻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輻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

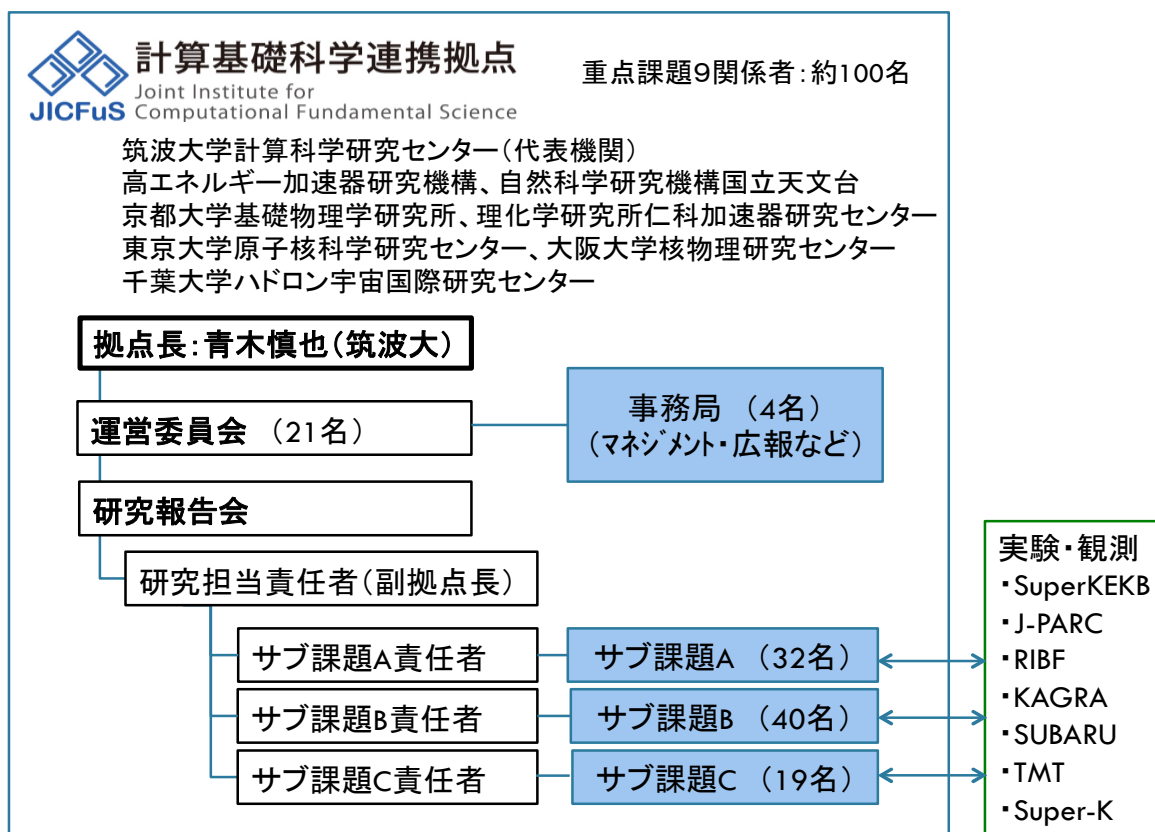
			ズムの改良。			
サブ課題B 物質創生史の解明と物質変換 (京都大学・柴田大)	(目標) 鉄より重い元素の起源解明という最終的な目標に向かってポスト京において実施すべき課題を調査し、QCD、原子核、宇宙分野それぞれで課題の絞り込みを行う。 (実施内容) 京での成果を鑑みながら、ポスト京で特に推進すべき計算内容を議論し、調査研究を進める。	(目標) ポスト京で実行する計算の規模とそのために用いるコードの物理的概要、アルゴリズムを決める。 (実施内容) ・QCD と宇宙分野に関しては、京での成果を鑑み、ポスト京で実施すべき研究課題、計算規模、およびそのために開発すべきコードを決定する。 ・原子核分野に関しては、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。

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)	(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。	(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	(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。	(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。	(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。	(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。
--	--	---	--	---	---	--

（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($48^3 \times 12$)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現象(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力学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ップ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 $1000 \times 1000 \times 1000$ 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 $2048 \times 128 \times 256$ (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、一般相対論的效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の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

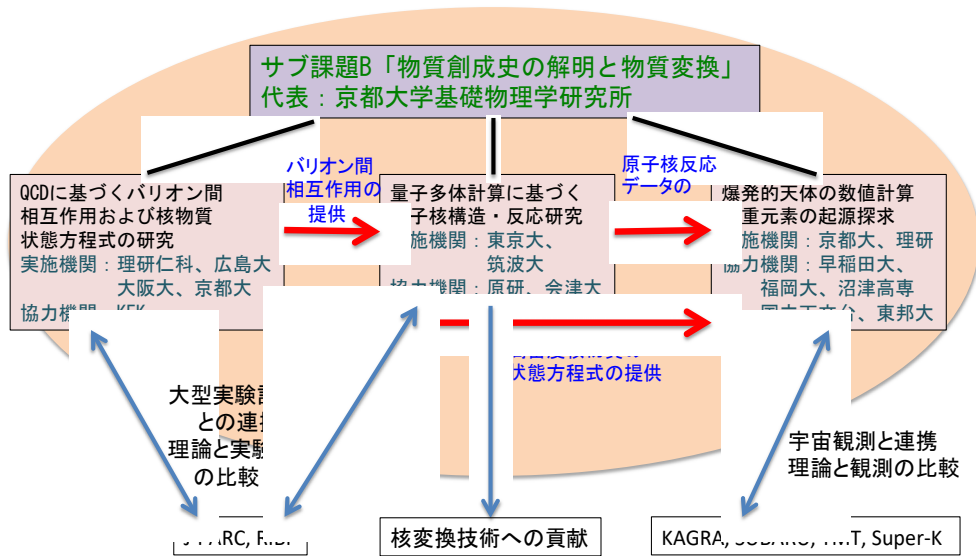
〔QCD 計算〕 京では、核力・ハイペロン力（２体力）を偶パリティセクタで求めているが、ハイペロン間力以外に対しては揺らぎが大きく統計精度が低い。奇パリティセクタやスピン軌道力までを含め高統計で精度よく計算するにはポスト「京」が不可欠である。またバリオン間３体力の導出には、２体力計算の最低 1000 倍の計算資源が必要となるが、これにはポスト「京」が必須である。

〔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模型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

ホールの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。ジェットの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長時間シミュレーションを遂行する。円盤やジェットの長期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

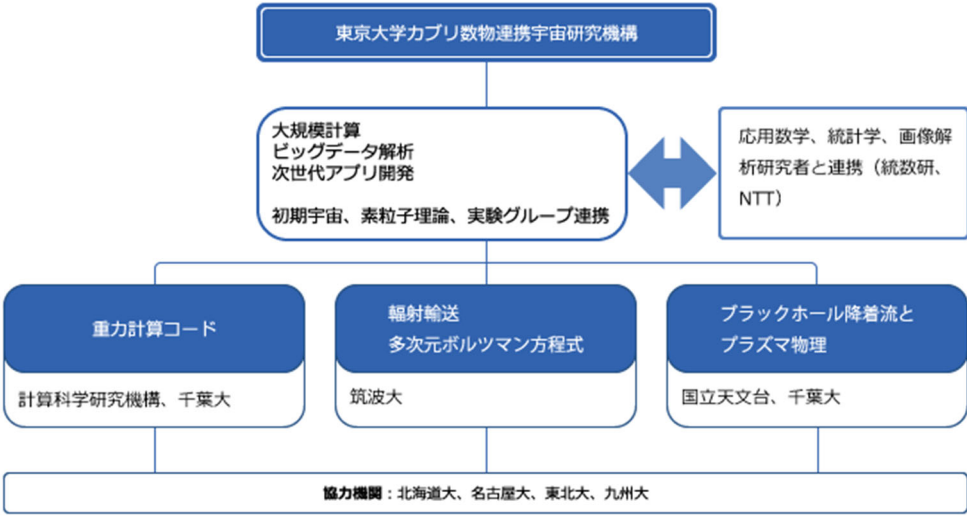
京では筑波大(現千葉大)グループにより開発された GreeM コードで 2 兆個の粒子を用いて初期宇宙の小構造形成、および 5500 億個の粒子を用いて 50 億光年の領域を初期宇宙から現在まで追う計算を行った(後者は 1 ランあたり約 138 万ノード時間)。ポスト京では、同数の粒子を用いて差し渡し数億光年以上という大領域を設定し、その中で星団サイズ为天体を解像できるシミュレーションを多数回実行し、世界で初めて、宇宙論統計の共分散行列を高解像度非線形シミュレーションから直接求める。また世界最大の数十兆粒子規模のシミュレーションを少数実行し、世界最高分解能の天体疑似カタログを作成する。これはポスト「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 of 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、 $512 \times 128 \times 512$ 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 $2048 \times 512 \times 2048$ 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 $256 \times 256 \times 128$ (空間) $\times 1000$ (方向) $\times 100$ (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、定期的に開催する。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・ポスドクが一定数以後の重点課題の研究に参加す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、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、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。

【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。そこでは、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) を通して世界に公開する。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
サブ課題 A	筑波大学	代表機関 (課題責任者)
	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	分担機関 (サブ課題責任者)
	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	分担機関 (サブ課題責任者)
	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