

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

Executive Summary (延長審査用)

ホスト機関名	東京大学	ホスト機関長名	濱田純一
拠点名	カブリ数物連携宇宙研究機構	拠点長名	村山斉

A. 拠点形成報告書

I. 概要

カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) は相互に関連し根源的でしかも野心的な、宇宙に関する次のような疑問に答えるために提案された。

- ・宇宙はどうやって始まったのか？
- ・宇宙は何でできているのか？
- ・宇宙に終わりはあるのか？
- ・宇宙の基本法則は何か？
- ・宇宙にどうして我々がいるのか？

過去数千年にわたって人類が抱いてきたこれらの疑問は、この 10 年から 20 年の進展によってやっと科学的な方法で対処することが可能になった。

Kavli IPMU は数学、理論物理学、実験物理学、天文学を組み合わせた世界でもユニークな学際的研究機関として 2007 年 10 月 1 日に WPI 補助金によりゼロから発足した。その後、およそ 150 名を擁する国際的研究拠点到成長した。当機構は明確に「made in Kavli IPMU」ブランドを持つインパクトが大きく重要な論文を発表してきた。論文被引用数や多被引用論文数では世界一流機関と同等ないし優位を保つ。毎年平均 800 名のビジターがあり、その半分は海外からである。毎年 700 件の研究職への応募があり、その 90 パーセント以上が海外からである。約 90 名の博士号保有常勤研究者の半数以上が外国籍である。当機構から転出した博士研究員の 3 分の 1 以上が既にファカルティーポジション(テニュア(終身在職権)を有する教員およびテニュアトラックの教員の職)に就いている。我々は数学と物理学の密接な相互触発や予想しなかった天文学と数学の相乗効果、さらには物性物理学とのつながりを生む環境を作り上げた。加速器、地下実験室、望遠鏡を用いた実験と観測を提案して、HSC、XMASS、カムランド-禅などの大型実験の立ち上げに成功した。学際的環境からは SuMIRe や LiteBIRD などの新たな取り組みが生み出され、国際的に大きな注目を集めている。我々が行ってきたアウトリーチ活動は大成功を収めていて 22,000 名以上の参加を得ている。メディアからも大きな注目を浴びていて、国際的に取り上げられた事例が 1,000 件近くとなっている。スプリット・アポイントメント(報酬を分担する 2 つの組織に同時に所属し、報酬の割合に応じた貢献をする任用形態)、能力と実績に基づいた報酬、外国財団からの基金の贈与など、多くの前例のない東京大学の組織改革を先導して達成した。

II. 各論

1. 拠点形成の全体像

総体的にあって当機構は提案の通りに実現された。我々のユニークな研究棟は数学者、物理学者、天文学者が同じ屋根の下で共に過ごしセミナーや毎日のティータイムを共有することを可能にする。学際的な議論が日常的に行われている。当機構は非常に国際的である。いくつかの注目度の高い論文や国際的に高い認知度のおかげで、我々のメンバーは「超弦理論国際会議」、「レプトン・フォトン国際会議」、「ニュートリノ国際会議」、「国際数学会議」、「ノーベルシンポジウム」など主要な国際会議の基調講演やサマリートークのスピーカーとして招待されている。また、多くの教員(ファカルティーメンバー)が主要なレビュー論文執筆の依頼を受けている。

目的や文化や言語が大きく異なるにもかかわらず数学者と物理学者の間の相互触発を育ててきた。数学者と物理学者の間の障壁を克服するための鍵となる「通訳」の発掘と採用を積極的に進めてきたが、彼らが学際的研究の実現で決定的な役割を果たした。これは「宇宙の基本法則は何か？」に答えるために極めて重要である。

予想しなかった相乗効果も生まれた。想定していなかった天文学者と数学者の交流や現象論研究者と数学者の共著論文執筆が実際に起こった。異分野の研究者を混ぜ合わせるように特別に設計された研究棟とインフォーマルな議論のための毎日のティータイム参加の「義務付け」が非常に成功している。

元々の提案にあった大型プロジェクトは順調に進んでいる。XMASS は建設を終え、いくつか

の暗黒物質候補に関して世界で最も良い制限を与えた。「宇宙は何でできているのか？」の疑問に答えようとするものである。カムランド-禪は物質と反物質の間の転換の有無に世界で最も良い制限を与えた。「我々はなぜ存在するのか？」に答えようとするものである。新しい 870 メガピクセル、重さ 3 トンのデジタルカメラ HSC は設計、建設、始動を終えた。先例のない 300 夜の観測が承認され、開始された。「宇宙はどのような運命をたどるか？」に答えようとするものである。

2. 研究活動

拠点形成報告書にまとめてあるように、我々の研究活動は純粋数学や理論物理学から実験物理学や天文学にわたる非常に広い領域にわたる。ここでは 1,500 以上にわたる論文すべてを網羅しようとするよりは、むしろ少数の厳選された結果に焦点を絞る。

「宇宙は何でできているのか？」

2003 年以降、宇宙の物質の 80% 以上は原子からできているのではなく謎の暗黒物質であるということが知られている。それが現在我々が見る星や銀河の形成を担ったにもかかわらず、正体はまったく分かっていない。もしそれがなかったら、我々は現在ここに存在していない。

望遠鏡では直接観測できないにもかかわらず、我々は宇宙の暗黒物質の分布図を作った。アインシュタインの重力理論によると暗黒物質からの重力が光に作用して、背後にある銀河の画像を歪める（重力レンズ効果）。この画像の歪みを解析して、暗黒物質の 2 次元分布を再構成することができる。つまり、「見えないものを見る」わけである。高田教授と彼の共同研究者は 30 個の銀河団をすばる望遠鏡を使って詳しく調べ、暗黒物質の分布が数値シミュレーションに基づいた予想と一致することを証明した。加えて、それらの分布が丸い形状ではなく、どちらかというラグビーボール状であることを初めて示した。この業績は現在までに 112 回引用されている。我々はこの手法を発展させ、SuMIRe によって暗黒物質の 3 次元分布図を作る計画であり (B.1 参照)、高田はこの研究チームの共同代表者である。

暗黒物質は未だ見つかっていない微小粒子からできていると考えられている。鈴木主任研究員は XMASS 実験を主導して、神岡地下施設の超精密装置を使った暗黒物質の直接測定を試みている。この装置が多くの異なる反応を探索できる融通性に富んでいることは証明済みで、暗黒物質の幾つかの候補に世界で最も良い制限を与えている。

「宇宙の基本法則は何か？」

これは理論物理学のアイディアと数学の新しい発展が交差する領域である。すべての物質と力を統一する最良の物理理論は超弦理論であるが、この理論では宇宙は 3 次元ではなく 9 次元であり、6 つの余剰次元はカラビ-ヤウ多様体と呼ばれる特別な空間としてコンパクト化され小さくなっている。可能なカラビ-ヤウ多様体の一つ一つが超弦理論の解になり得て、それぞれの宇宙になり得る。従って、何故宇宙が今ある姿なのかを説明するためにそれらが幾つあるかを理解することが必要である。我々はトポロジカル不変量と呼ばれる量を使ってこれらの多様体を識別する。

若手の准教授、戸田は物理学からの着想を使って、カラビ-ヤウ多様体の様々なトポロジカル不変量の同値に関するフィールズ賞受賞者 Okounkov の予想を証明することができた。当時物理学の大学院生で現在は当機構の助教である山崎が、ある物理学の論文がその数学課題と関係があるかもしれないと彼に指摘した。トロント大学で物理と数学の両学部にポストを持っていた堀教授は、当機構で物理学と数学の間で鍵となる「通訳」の役割を果たしているが、彼のおかげで戸田はその物理学の論文からの着想を使うことができ、この予想を証明することができた。これにより、2014 年夏に戸田は 4 年に一度開催される国際数学会議での講演に招待され、日本数学会から 2 つの賞を受賞した。

幾つかの全く異なる形状の多様体から不思議なことに同じ宇宙が導かれる。堀教授は、この双対性と呼ばれる現象の新しいタイプを発見した。我々は数学と物理学のこのような結果の組み合わせにより、可能性のあるすべての宇宙の一覧表を創り出したいと考えている。

「宇宙にどうして我々がいるのか？」

どうして我々がいるのかを理解しようとするには、星がどのようにして生まれたのかを理解する必要がある。東京大学理学系研究科で最も若い教授になった吉田は、一番最初の星が宇宙でどのように形成されたかの、仮定のない第一原理からのシミュレーションに成功した。この論文は Science 誌に掲載されて 106 回引用され、彼は国際純粋・応用物理学連合からの賞を受賞した。

星はどのようなタイプの銀河で最も効率よく生まれるのであろうか？星だけに限らず暗黒物質も調べる観測の組み合わせから、Leauthaud と Bundy の両助教は最も効率的に星を形成させるちょうどよい銀河のサイズがあることを発見した。この論文は 94 回引用され、2012 年に天体物理学で最も多く引用された論文の第 9 位タイとなった。

生命が出現するためにはヘリウムより重い元素が必要になる。それらは星の内部で創られ超新星と呼ばれる爆発によってばらまかれる。それはどのように起こるのであろうか？前田准教授と野本主任研究員は多くの超新星を爆発から 1 年後に観測して、放出された物質が見通せるようになった後に“内部”を見ることができた。彼らはほとんどの超新星爆発は球状ではなく、双極ジェット状にガスが飛び散ることを世界で始めて発見した。この論文は 85 回引用された。

この疑問に答えるためのもう一つの重要な要素は、何故反物質が消滅して物質だけが残ったのかを理解することである。我々のメンバーが提唱した理論では、素粒子の中で唯一電荷を持たない物質素粒子であるニュートリノがこの魔法のような芸当を担っている。Kozlov 助教はカムラ

ンドグループに働きかけて、ニュートリノを介した物質・反物質間の転換の可能性を探索した。その結果、カムランド-禅は世界で最も良い制限を与えた。

加えて、超巨大ブラックホールがどのようにして成長するかを解明し、暗黒物質を伴った宇宙塵の分布を決定した。Vagins 教授はスーパーカミオカンデにガドリニウムを溶解させて宇宙論的距離からやってくる超新星ニュートリノの検出ができることを示した。

「宇宙はどうやって始まったのか？」

我々の宇宙はインフレーションと呼ばれる爆発的な膨張で始まったと考えられている。インフレーション以前、現在我々が見ている宇宙全体は原子一個よりずっと小さかったはずである。しかしながらこの考え方の決定的な実験証拠はない。一方、向山准教授はインフレーションを必要としない代替理論を見出した。もしこれがうまくいくなれば、全く新しい考え方を与えることになる。この勇敢なアイデアは大きなインパクトを与える可能性があるため 96 回引用された。我々は LiteBIRD でこの興味深いプログラムに挑む (B.1 参照)。

2012 年のヒッグズボゾン発見が活発な研究に火をつけた。それはビッグバンから 10 億分の 1 秒後の宇宙の状態を示す。これをもっと初期まで外挿するためには、測定されたヒッグズボゾン質量を説明できる首尾一貫した理論が必要であるが、これは難しいことが分かった。柳田主任研究員たちは、当機構メンバーの重要な貢献を組み合わせ、純粋な重力伝達機構と呼ばれる超対称性理論にたどり着き、新しいタイプの暗黒物質を予言している。これは近い将来検証されるかもしれない。この理論に関する一連の論文は高い引用数を得ている。

「宇宙に終わりはあるのか？」

1998 年の宇宙の加速膨張の発見は大変大きな驚きで、既にノーベル物理学賞が与えられた。宇宙のエネルギー密度の約 70% は謎に包まれた暗黒エネルギーであり、宇宙膨張を引き起こす反重力を及ぼし、宇宙の運命を決める役割を果たすと考えられている。しかしながら、この発見は Ia 型と呼ばれるタイプの超新星が持つ特性に対する仮定に依存している。我々は現在入手できる宇宙全体の銀河観測データを使って、超新星に依存せずに加速膨張を確認する新しい方法を見出した。この論文は The Astrophysical Journal の 2013 年ハイライトコレクションに選ばれた。

3. 異分野融合

我々は毎日のティータイムや合同セミナーや分野間にまたがるワークショップを通じて学際的交流を促しており、これがなければ可能にならなかったような多くの論文につながった。物理学と数学を一つの学間に融合させることはできないが、相互の触発は非常にうまくいっている。数名の鍵となる「通訳」が数学と物理学の間の交流が根付くことを助けた。超対称性をもつ物理学理論で幾つかの厳密解を見出したが、それが異なる幾何学間の関係の理解に応用できることがわかった。数学者との交流は量子物理学の理解を深めた。

アインシュタインの重力理論では宇宙の進化の説明に微分幾何学の手法が使われることから、天文学と数学の間に予想しなかった相乗効果が生まれた (図 1 参照)。同じキャンパスの隣人である物性研究所と共同開催した学際的ワークショップが、物性物理学や材料科学の研究を触発した。大栗主任研究員は物性研究者との共同研究で、暗黒物質候補の類似物が磁性系に不安定性を作り出し、これは実験室で研究することができることを示した。また、我々は数学のゲーム理論を使った生物学の論文も発表した。

超高輝度超新星と呼ばれる最も明るいタイプの超新星を発見した博士研究員の Quimby は、アメリカを主体とした Pan-STARRS グループの、彼らが発見した PS1-10afx 超新星の方がもっと明るい新しいタイプである、という主張に疑問を持った。彼はすぐに、PS1-10afx は 30 倍も明るく見えるが、その特性は Ia 型と呼ばれるよく知られているタイプに似ていることに気づいた。彼はティータイムでこのパズルを話した。数学の博士研究員の Werner が、もし正確にこの超新星の視線方向に沿って未発見の物体があれば、重力レンズによるこのような増光率が数学的に可能であると指摘した。そのような可能性は現実には受け入れがたいように思われた。しかし、大量のデータセットを使った研究の経験を持つ物理学者の大栗助教は、直ちに Pan-STARRS データセットの中にこのような可能性が約 1 回ある、と推定した。彼らはこのティータイムの議論で始まった解釈を、機構の他の超新星専門家と共に論文として発表した。ハーバード大学が主導する Pan-STARRS グループが自分たちの最初の主張に固執したため、しばらくの間論争が続いた。我々のグループは、この超新星の光が弱まったずっと後にそのホスト銀河を観測して、視線方向に沿って正確にその前方に、分離観測されていなかった暗い銀河があることを証明することができた。この結果は Science 誌に掲載され、「東京大学の理論は正しく、ハーバード大学の理論は間違いだった」など、50 件以上の国際的メディアで報道された。

基本法則の研究は通常の磁性体、氷結晶、超流動液体、中性子星にも応用される。南部陽一郎が提唱した自発的対称性の破れの概念は、これらの系では正しくない予言を与えるように見え

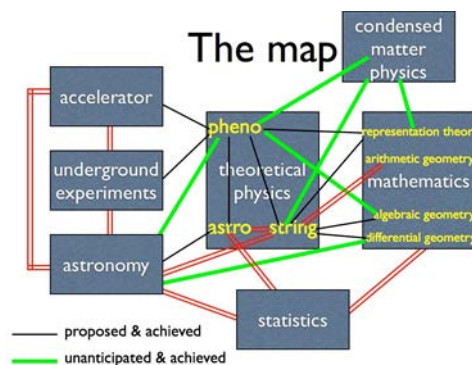


図 1 Kavli IPMU における 3 種類の相乗効果: 提案され達成済; 予想しなかったが達成済; 延長期間中に達成予定

た。村山機構長は数学者の助言を得て、物性物理学者と共に南部の理論を一般化した。それによって、一つの理論がこれらすべてのケースに適用され、50年にわたる問題を解決した。この一連の研究は4回にわたって Physical Review Letters に掲載され、編集者推薦 (Editor's Suggestion) と物理学概要 (Physics Synopsis) に選ばれた。

4. 国際的な研究環境の実現

当機構には世界レベルの国際的な主任研究員がいて、日常の研究活動に深く関わっている。当機構へ、また機構の外への双方向で活発な研究者の流れを作ること成功している。海外から優秀な研究者を惹きつける一方、我々のメンバーの多くが海外の研究機関により採用されている。ビジターの出入りは大変活発で、当機構のアメリカ人博士研究員たちによると、アメリカやヨーロッパの典型的な大学にいるよりもここにいる方が分野のリーダーたちに簡単に会えるとのことである。これまでに77回の国際ワークショップを開催したが、約半数の参加者は海外からであった。

我々のメンバーの質は非常に高い。毎年約18人の博士研究員募集に対して約700件の応募がある。発足以来当機構を離れた63名の博士研究員のうち、28名がすでにテニュアまたはテニュアトラックの教員職についている。当機構はYale大学の上級の教授の採用に成功し、アメリカやヨーロッパの有名な研究機関からの採用通知を辞退して当機構を選んだ研究者もいる。我々は他の一流機関からの勧誘に対抗して教員や優秀な博士研究員の引き留めに成功してきた。

我々は「博士課程教育リーディングプログラム」のワークショップを通して東京大学の大学院生に国際的、学際的な環境を提供している。また、約110名を越える東大大学院生に科学用英作文の授業を行った。

外国人研究者が日本で生活と研究に入り込めるための手厚い支援体制を作り上げた。我々のウェブサイトは日本での生活に関して役に立つ広範な情報を提供しているが、それらは後に他の学部や研究機関で模倣されている。新任者を助けるために我々のスタッフが市役所、銀行、不動産業者、携帯電話販売店に同伴する。各種オリエンテーション、「生き抜くための日本語」教室、オンライン安全教育、それに急病と妊婦に対する24時間サービスも提供する。このような取り組みの結果、我々は2度にわたり東京大学業務改革総長賞を受賞した。

5. システム改革

我々は次のような東大内組織改革を達成した。

- ・メリットベース（能力と実績に基づく）給与
- ・ジョイント（スプリット）アポイントメント（報酬を分担する2つの組織に同時に所属し、報酬の割合に応じた貢献をする任用形態）
- ・従来の制度とは異なる、外部資金によるテニュア教員職
- ・年俸制（通常のボーナスや退職金がないかわりにそれを補償する高い給与レベルと異動のし易さが特徴）
- ・融通が利くポストの運用
- ・バイリンガル事務スタッフによる（外国人研究者に対する）手厚い支援
- ・国外の財団からの寄付による基金

実際のところ、村山機構長がジョイント（スプリット）アポイントメントとメリットベースに基づく給与基準が適用された最初の例であった。東京大学はKavli IPMUに対して次のような力強い支援も提供した。

- ・学際的交流を育むように特別に設計された研究棟の建設
- ・外国からのメンバーを支援するためのインターナショナルロッジの建設
- ・Kavli IPMUを恒久機関として存続させるための東京大学国際高等研究所（TODIAS）と呼ばれる新しい組織形態の創設
- ・Kavli IPMUを高度の自主性を有する“特区”に指定
- ・伝統的な本部事務組織とのインターフェースを務める有能な事務スタッフを配置
- ・将来の持続可能性を保障するための恒久教員職と資源の提供

我々の事務スタッフの中にはコンピューター、金融、美術、音楽に詳しい者もいるが、思いがけなく機構運営に非常に役立っている。

6. その他特筆すべき事項

Kavli IPMUは外国からの寄付による基金を受け入れ、寄付者の名前をとって命名された日本で初めての研究機関である。これは国際的に高い注目度を得ている証拠である。我々の国際的注目度を示すもう一つの尺度は発表論文の引用数である。トムソン・ロイター社のウェブ・オブ・サイエンスによれば2007年以降我々の117編の論文が50回以上引用され、平均で1論文あたり24回の引用があった。これらの数値は我々と同じような研究分野をカバーしている、高等研究所（プリンストン）、カブリ理論物理学研究所（サンタバーバラ）、基礎物理学研究所（京都）、ペリ

メタ研究所（カナダ）、国際理論物理学センター（トリエステ）などの世界一流研究機関の同時期の数値と比べて、同等かあるいは優れている。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

拠点形成報告書 (延長審査用)

ホスト機関名	東京大学	ホスト機関長名	濱田 純一
拠点名	カブリ数物連携宇宙研究機構	拠点長名	村山 斉

全様式共通の注意事項:

※特に指定のない限り、平成26年3月31日現在の内容で作成すること。

※添付様式を除き30ページ以内で記載すること。また各項目に記した頁数を守る。

※文中で金額を記載する際は円表記とすること。この際、外貨を円に換算する必要がある場合は、使用したレートを併記すること。

1. 形成拠点の全体像 (このページを含め2ページ以内)

現在の拠点のアイデンティティなど全体像について記述すること。また、拠点長が交代した拠点では、その経緯と効果も記述すること。

・主任研究者、構成員員数、運営組織、拠点施設配置、事業費について[添付様式1]に記載すること。

カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) は宇宙についての5つの根源的な疑問、すなわち「宇宙はどうやって始まったのか?」、「宇宙は何でできているのか?」、「宇宙に終りはあるのか?」、「宇宙の基本法則は何か?」、そして「宇宙にどうして我々がいるのか?」に答えるべく提案された。我々はまさにその名称が示唆するように数学と物理学と天文学を組み合わせ、加速器実験、地下実験、望遠鏡による天文観測を行い、これらの疑問に答えることを提案した。当機構はWPIによる資金援助以前は存在せず、まさにゼロから始まったが、7年間で大学院生や支援職員を含め、約150名が常駐する規模に成長した。

総体的にあって当機構は提案どおりに実現された。ユニークな研究棟は数学者、物理学者、天文学者が共に過ごす場としてセミナーやティータイムを共有することを可能にしている。分野の垣根を越えた学際的議論が普通のこととして行われている。非常に国際的であり、半数以上のメンバーが日本以外の国籍を持つ。2007年以前、当機構は存在しなかったため、全てのメンバーが機構長のリーダーシップのもとで雇用された。Kavli IPMUで任期を終えた博士研究員のおよそ90%が他の一流研究機関に職を得て、そのうち現在までに20名以上が教員の職 (ファカルティポジション) を得ていることから研究者雇用の高い水準は明らかである。当機構のファカルティメンバーは常に国内外の研究機関から誘いを受けている。その一方、我々も他機関との競争を制して多くの研究者の獲得に成功している。

当初の提案では数学者は駒場キャンパス、その他は柏キャンパスに常駐することとされていたが、並々ならぬ努力で鍵となる重要な研究者の採用に成功し、数学者を物理学者および天文学者とともに柏キャンパスに常駐させることができた。数学者と物理学者の相互の触発から多くの論文が執筆された。それを実現するために、数学者と物理学者の間の言語障壁を克服するための鍵となる「通訳」が決定的な役割を果たした。これは「宇宙の基本法則はなにか?」の疑問に答えるために重要である。

我々の研究からはっきりとした「メード・イン・Kavli IPMU」のブランドを持つインパクトの大きい論文が生まれた。我々の論文の被引用数は、類似の研究を行う世界一流の研究機関と同等である。いくつかの注目度の高い論文と国際社会での高い認知度のおかげで、我々のメンバーは「超弦理論国際会議」、「レプトン・フォトン国際会議」、「国際数学会議」、「ニュートリノ国際会議」、「ノーベル・シンポジウム」など主要会議の基調講演やサマリートークのスピーカーとして招待されている。多くのファカルティメンバーが主要なレビュー論文の執筆を依頼されてきた。研究者公募の宣伝は国際的に行われ、毎年ほぼ1,000件の応募がある。

当初提案された大型プロジェクトは順調に進行している。暗黒物質の直接検出実験「XMASS」は建設を終え、いくつかの暗黒物質となり得る候補に関して世界で最も良い制限を与えた。「宇宙は何でできているのか?」の疑問に答えようとするものである。「カムランド-禅」は努力の末、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊に関して世界で最も良い制限を与えた。水チェレンコフ検出器へのガドリニウム溶解はR&Dプロジェクト「EGADS」でテストされ、実行可能であると証明された。スーパーカミオカンデ検出器全体への導入が近づきつつある。ハイパー・シュプリーム・カム (HSC) は設計、建設、始動を終え300夜の測定がすばる諮問委員会で承認された。初めての数夜のデータの解析が行われている。当機構のメンバーによる理論研究と組み合わせられて、「宇宙にどうして我々がいるのか?」の疑問に答えようとするものである。

加えて、分野間にまたがる学際的環境が新しいアイデアを育み、新しいプロジェクトを立ち上げた。2009年に提案された主焦点超広視野多天体分光器 (PFS) は採択され、設計を終え、建設中であり、2017年にファースト・ライト (試験観測) が予定されている。同じ口径8.2メートルの望遠鏡を使うHSCを用いた撮像観測と、PFSを用いた分光観測の組み合わせは世界を主導する観測

プログラムとなり、「宇宙に終わりはあるのか?」の疑問に答えると期待される。Kavli IPMUは2011年に提案されたSDSS-IVのうちのMaNGA計画の主導研究機関である。この計画は設計、建設、始動を終え、すでにデータを取り始めている。また、Belle-II実験への参加を提案し、実験の心臓部であるシリコン崩壊点検出器の建設で最も大きな責任が与えられた。さらに現在、宇宙のインフレーションの証拠となる原始重力波探索のための衛星実験LiteBIRDを提案中である。これは「宇宙はどうやって始まったのか?」の疑問に答えようとするものである。

予期しなかった研究の方向も生まれている。物性物理学者との共同研究が非常に活発になり、インパクトの大きい多くの論文が出版された。数学者と天文学者との間の親密な交流は期待していなかったが、それが実際に起こり、認知度の高い論文出版につながった。また、ビッグデータ解析の段階に入りつつあるため、現在、統計学者を巻き込むように特段の努力を払っているところである。

Kavli IPMUは東京大学だけでなく国立大学全般のシステム改革をも進めた。機構長を手始めに、国内外の研究機関とのスプリットアポイントメント（報酬を分担する2つの組織に同時に所属し、報酬の割合に応じた貢献をする任用形態）を可能にした。また、能力と実績に基づく給与を提示している。当機構は、メンバーの異動が容易になる、いわゆる「年俸制」を採用している。外国から来るメンバーが日本に住居を定め生活を始めるにあたって、支援スタッフが手厚い援助を行う。今では年俸制に基づいたテニユア職を幾つか与えられており、国家公務員制度から受け継がれた古い制度からの制約を受けていない。機構名は寄付を頂いたフレッド・カブリ氏の名前から付けられたが、これは日本の大学では初めてのことであり、当機構の国際的な認知度を高めるのに役立った。大学もKavli IPMUを学内の恒久機関として存続させるために、東京大学国際高等研究所 (TODIAS) と呼ばれる新しい枠組みを創設した。これらの改革の多くが東京大学内に浸透しており、また、最近の文部科学省の国立大学改革の取組みは我々の努力を取り入れている。

我々は東京大学の大学院プログラムにもインパクトを与えた。当機構の教授陣は大学院生指導と講義を通して、すでに物理学教室と数理科学教室の大学院プログラムに貢献してきた。また、2つの「博士課程教育リーディングプログラム」と提携した。この提携により、当機構が持つ国際的環境を通して、東京大学の大学院生に分野にまたがる学際的研究の機会を提供している。加えて、当機構の外国人教員による物理教室での英文での科学論文作成の講義は、大学院生の中で大変評判がよかった。しかし、全てのメンバーが大学院教育への参加を許されているわけではなく、これは今後に残された課題である。

Kavli IPMUは当初から非常に積極的にアウトリーチ活動を進めてきた。当機構は毎年合計で数千人を一般向け講演会や催しに集めている。高校生のためのスクールも企画され、そのいくつかは女子生徒向けのものである。我々のメンバーが出版した数編の一般科学書は非常に大きな反響を呼び、総販売部数は100万部に迫る勢いである。我々は若い知性を科学に惹きつけ、次世代の担い手を形成することによって国家に貢献していると信じる。

我々は研究対象を絞っており、興味を引く全ての対象を追求することはしなかった。当機構の限られた規模でできることに集中する必要があるため、いくつかの最新の研究領域については意識的に追求しなかった。例えば、当初は大型ハドロン加速器 (LHC) 実験への参加を想定したが、2007年の機構発足当時LHCはすでに準備が着々と進んでおり、我々が大きなインパクトを与えることができるか不明だった。代わりに当機構はBelle-II実験に方向を転換し、そこで大きなインパクトを及ぼしている。数学の研究分野をもっと広げることも可能であったが、我々の努力が薄まらないように代数幾何、微分幾何、数論幾何および表現論に集中した。すばる望遠鏡が使えるため、太陽系外惑星の研究を敢行することも可能であったが銀河系外の研究、特に宇宙論に焦点を定めている。

課題もまだ幾つか残っている。当機構はWPIプログラムの期限付き補助金によりゼロからスタートしたため、メンバー全員が不安定な状態の任期付き雇用で始まった。そのため、6名のファカルティメンバーがテニユアを提示されて他の研究機関に移った。しかし東京大学から9つのテニユア職が約束された。また、TODIASにより当機構の運営費を文部科学省に予算要求することができるようになり、それによって4つのテニユア職が与えられた。当機構の将来を持続可能で安定したものにしていけるため、さらなる努力が続けられている。

2. 研究活動 (15 ページ以内)

2-1. 研究成果

拠点が挑戦した世界的な課題とその成果について記述すること。成果の記述に際しては、2007~2014年3月までの代表的研究成果20件を挙げ、それぞれ解説すること。なお各成果には [1]~[20]までの通し番号を付すこと。さらにWPI拠点をなくしては不可能であった研究成果には通し番号の前にアスタリスク (*) を付して示すこと。

・上記の研究成果を裏付ける論文一覧 (40編以内) とその解説を[添付様式2]に記載すること。

2-1.0 全体像

我々は宇宙に関する5つの基本的かつ相互に関係する疑問に取り組むことを提案した。

- (1) 宇宙はどうやって始まったのか?
- (2) 宇宙は何でできているのか?
- (3) 宇宙に終わりはあるのか?
- (4) 宇宙の基本法則は何か?
- (5) 宇宙にどうして我々がいるのか?

これらの疑問が完全に解明されるには明らかに数千年の時間スケールが必要である。当機構は初期の段階で、これらの大問題を数学、理論物理学、実験物理学、天文学の組み合わせに基づき、数十年という比較的短い時間スケールで対処可能な、明確に定義された特定の科学的問題に還元する方法に集中した。従って、初期の段階では種々の方向を試みるため、理論的研究と小規模なプロジェクトを強調したが、そこから徐々に主要な実験計画及び観測計画についての明確に定義された戦略へと方向が定まってきた。最初に考えられたプロジェクトは今やデータを出しており、一方、今後2~3年のうちにはさらに多くのプロジェクトがその段階に達する。以下、我々はこの文脈で研究成果を記述する。添付様式2に記載した論文を引用する場合は[2]のように角括弧（ブラケット）を用い、添付様式3に記載した論文を引用する場合は{3}のように波括弧（ブレース）を用いる。また、Kavli IPMUのメンバー、主任研究員、教員、博士研究員、併任メンバーを示すために、名前にアンダーラインを施す。

2-1.1 宇宙はどうやって始まったのか?

これは最も難解な問題の一つであるが、重要な進展もあった。初期の研究に基づき、この問題は次の3つの部分に分けられることが明らかになった。

- (a) 「ビッグバン」自体、つまりアインシュタインの重力理論に従えば、宇宙全体がエネルギー密度無限大の一点に落ち込んだ時について。それはスペースライク（空間的）な特異点であって、滑らかな時空に関するアインシュタインの理論では記述できない。従って、特異点の幾何とその解消という数学と密接に関わりながら超弦理論のような量子重力理論を構築することが必要である。疑問の(4)と重なり合う面がかなりある。
- (b) インフレーションについて。インフレーションは開闢直後の微視的な宇宙を巨視的宇宙に拡大させ、同時に、量子ゆらぎにより、今日我々が見る銀河分布の大構造となる種を創り出したと信じられている。問題は、何がインフレーションの原因であったか、それを観測的に証明するにはどうすれば良いかということである。同時に、我々はインフレーションに代わり得るものも考えなければならない。
- (c) 初期宇宙のその後の進化について。それは素粒子によって支配されるが、現在受け入れられている素粒子の標準モデルには多くの拡張の可能性がある、特に、時空の余剰次元あるいは超対称性をもつような拡張の場合、宇宙の進化について異なる振る舞いを予言する。

研究成果 1: 修正重力理論

量子重力理論を構築することを目指した試みで直面する大きな困難の一つは、一般相対論が繰り込み可能でないことである。これは、近距離（高エネルギー）での重力の量子化において、有効な理論的な処方箋がないことを意味する。2009年1月にP. Hořavaは、高エネルギーにおいてLifshitz型の非等方スケールリングを導入することによりこの困難を回避する新しい重力理論を提案した。この理論は、Lifshitz点における重力理論またはHořava-Lifshitz重力理論と呼ばれ、(Kavli IPMUのメンバーであるD. Orlando と S. Reffertにより学術誌Classical and Quantum Gravityで注目論文に選ばれた論文で証明されたように)繰り込み可能かつユニタリーである。この量子重力理論の候補に基づき、向山信治は宇宙論的原始ゆらぎを生成する新たな機構を提案した[1]。この機構は、インフレーション膨張を仮定しなくても、地平線問題を解決し、また（観測で強く示唆される）スケール不変な原始ゆらぎを生成することができ、また理論的な自由度も大きい（つまり理論的な微調整を必要としない）。また、同じ機構が、インフレーション無しでも、ほとんどスケール不変な原始重力波を生成可能であることも示した。さらに最近では、向山は共同研究者と共に、U(1)で拡張した理論において、ポスト・ニュートニアン重力形式の全てのパラメータを計算し、この理論が太陽系の重力場の全ての制限に矛盾しないことを示した。超弦理論の観点からは、ビッグバン宇宙の始まりの特異点を研究するためには、自発的に時間発展する時空解を含む理論が必要である。S. HellermanとM. Klebanは、幾つかの時間依存性を持つ時空の厳密解を求めた。一方、幾何学における特異点はT. Milanov、斎藤恭司、その他による活発な研究分野となっている。

研究成果 2: 宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光

W. Huと杉山直により始まった宇宙マイクロ波背景放射の異方性の研究は、理論的な曖昧さ・不定性がなく、その物理過程を実験で詳細に検証することが可能である。特に、宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏極は、宇宙初期の指数関数的な加速宇宙膨張を予言するインフレーションシナリオを検証する決定的な手段と考えられている。佐藤勝彦は、インフレーションを最初に提案した理論家の一人である。最近のBICEP2実験は、Bモードの検出を報告し、前景放射（天の川銀河内のダストによる放射）の問題がまだ残っているが、関連する研究者コミュニティに大きな興奮を巻き起こし、村山 齊、高橋史宜、柳田勉を始めとする多くの理論的研究を誘発した。この背景の下、

Kavli IPMUは、この研究者コミュニティの将来の方向の実行可能性を調査するために、規模は大きくないものの、宇宙背景放射の地上実験POLARBEARに参加することにした。これらの研究活動が、羽澄昌史 (KEK[高エネルギー加速器研究機構]とのジョイントアポイントメント) が責任者であるLiteBIRD衛星計画を提案する結果に至り、Kavli IPMUの研究者は宇宙航空研究開発機構(JAXA)、KEK、国立天文台(NAOJ)と共に積極的に検討を進めている。これらの研究成果は学術論文のかたちでは表せないが、この提案の概念設計はKavli IPMUの重要な成果の一つと考える。この宇宙背景放射の研究は、来る5年間に進むべき研究の方向性を決定した。

研究成果 3: Pure Gravity Mediationとヒッグスボソンの理論

2012年のヒッグスボソンの発見はKavli IPMUにおいて活発な研究活動を促した。この結果、Kavli IPMUは、初期宇宙の振る舞いを支配する素粒子のより自然でより基本的な理論を提案する研究、いわゆる、「模型構築」の研究で世界における主要な研究センターの1つとして知られるに至った。柳田勉がKavli IPMUで見出し、今や世界から標準模型の拡張の最有力候補の1つとして受け入れられているpure gravity mediation (PGM) 模型 [2, 3]はその主要な研究の1つである。PGM 模型は標準模型(SM)に超対称(SUSY)を導入した模型の1つであり、以下の非常に重要な過去の研究に基づき構築された: ヒッグスボソンの質量に対する輻射補正 [T. Yanagida, et al. (1991), J. R. Ellis, et al. (1991), and H. E. Haber, et al. (1991)], アノマリーを介した超対称性の破れ伝達機構 [H. Murayama et al. (1998) and L. Randall et al. (1998)], 宇宙のバリオン数非対称性を説明するレプトジェネシス機構 [M. Fukugita and T. Yanagida (1986)], 及び暗黒物質の対消滅断面積を増幅させるSommerfeld機構 [J. Hisano, S. Matsumoto, and M. Nojiri (2004)]である。これらの重要な研究の著者の多くがKavli IPMUのメンバーであることに鑑みると、本模型はWPIプログラムなくしては構築され得なかったと言える。

現在PGM模型は、超対称性の破れを媒介する機構を含む最もシンプルな模型として知られており、超対称パートナー粒子の質量スペクトルとして、スプリット型のスペクトルを予言する: ほとんど全ての超対称パートナー粒子は0(10-100) TeVの質量をもつが、SMゲージボソンの超対称パートナーであるゲイジーノの質量は0(0.1-1) TeVに留まる。この模型は、ヒッグスボソンの質量についてLHCで観測した値を正しく予言し[2]、LHCの初期段階で新しい物理のシグナルが観測されなかった事実とも矛盾せず、また、フレーバーの変換を引き起こす中性カレントへの超対称性からの寄与が大きすぎる問題をも改善する。またこの模型は、宇宙論的な観点からも以下の理由で非常に魅力的である。一つには、多くの超対称模型にとって悩みの種である危険な宇宙論的問題(グラビティーノ問題とポロニー問題)が全く存在せず、従って「宇宙にどうして我々がいるのか?」という疑問に対して第一義的な答を与えるレプトジェネシス機構と矛盾しない。加えて、弱い相互作用の中性ゲージボソンの超対称パートナーである中性ウィーノが暗黒物質粒子であると予言する[3]。この中性ウィーノは、重くて相互作用が極めて弱い粒子(WIMP)としての条件を全て満足しており、「宇宙は何でできているのか?」という疑問に対する答の大部分を与える。更に加えて、最近のBICEP2の結果が示唆するように、もしインフレーションのエネルギースケールが高いことが確認されたならば、PGM模型はこのような高いスケールのインフレーションと矛盾しない数少ない超対称模型の一つであるため、その背後にある物理(UV completion)の研究において、超弦理論や数学の研究者との共同研究を必要とする。このことはKavli IPMUにおける重要な学際的研究の可能性を新たに開くものとなる。

ヒッグスボソンの発見及びその質量の測定は、Kavli IPMUにおける松本重貴、村山齊、野尻美保子及び多くの博士研究員と大学院生らの一層活発な研究活動を引き起こした。

2-1.2 宇宙は何でできているのか?

WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の異方性の研究から得られた結果により、我々は2003年になって初めて宇宙の組成を定量的に知った。宇宙の物質の80%以上は暗黒物質と呼ばれる未知の何物かで、それが宇宙のインフレーションによって仕込まれた種から星や銀河を形成する役割を果たすと共に、「どうして我々がいるのか?」という疑問にも関係している。暗黒物質の性質を理解することはこの疑問の焦点に位置することとなった。特に、我々が目指すものは

- (a) 暗黒物質の分布とその時間的发展を理解すること
- (b) 天文観測データ、地下における直接検出実験、宇宙線を用いる間接的検出、および粒子加速器による実験を組み合わせて用いることにより、暗黒物質の性質を解明すること

である。上記の問題のいずれに対しても、理論的、観測的、実験的研究の組み合わせが極めて重要である。しかし、我々は意識的に宇宙線実験には関わらないことを決定した。それは、我々が他の研究対象に対して、より大きな影響を与えることができるであろうと確信したことによるものである。

研究成果 4: 暗黒物質の空間分布

アインシュタインの一般相対性理論の予言である重力レンズ効果は、暗黒物質の空間分布の復元を可能にする強力な手段である。宇宙最大の自己重力天体である銀河団は、自身の巨大な重力ポテンシャルにより、背景銀河の像に対して、相関した歪み効果を引き起こす。これは、弱い重力

レンズ効果（シアー効果）と呼ばれる。口径8.2mのすばる望遠鏡は、その広視野とシャープな結像性能のために、弱い重力レンズ効果の精密測定を可能にし、銀河団の領域全体の暗黒物質の分布を復元することができる。

高田昌広と岡部信広が率いた研究チームは、現存のX線銀河団のカタログから、最大質量級の銀河団のサンプルについて、すばる望遠鏡の観測データを収集した。すばる望遠鏡から観測可能な天域にあり、その広視野の威力を発揮できる赤方偏移 $z=[0.15, 0.3]$ の範囲に存在し、またX線光度である閾値より明るい全てのサンプルである、50個の銀河団のすばるデータを取得することに成功した。すなわち、この銀河団サンプルは、他の研究にあるような重力レンズの観測に依らない、X線光度のみに基づく、バイアスのない銀河団サンプルである。この研究プロジェクトは国際共同研究Local Cluster Substructure Survey (LoCuSS)の一部として行われた。

本研究チームは、論文[4]において、上記の銀河団サンプルのうち30個の銀河団のすばるデータを用い、弱い重力レンズ効果を測定し、銀河団領域における質量分布を調べた。その結果、得られた平均的な質量分布は、宇宙項（暗黒エネルギー）および冷たい暗黒物質が、支配的な宇宙構造形成モデル（ Λ CDMモデル）に基づくN体数値シミュレーションの理論予言と極めて良い一致を示すことを見つけた。特に、異なる銀河団の重力レンズ測定を組み合わせることにより、銀河団の質量の平均的動径方向分布を数%の精度で測定できることを実証した。

さらに、一連の研究論文において、同じすばるデータを用い、天球上の重力レンズ効果の2次元情報を最大限活用することにより、銀河団領域における暗黒物質の空間分布の「形状」を制限する新たな方法を開発した。その結果、このユニークな銀河団サンプルを用いて、暗黒物質の空間分布の形状の楕円率を 7σ の統計的有意性で検出することに成功した(M. Oguri et al. MNRAS 83, 3008, 2011)。得られた楕円率（楕円の長軸と短軸の比）は $e=0.46\pm 0.04$ （68%信頼範囲）で、 Λ CDMモデルの理論予言と極めて良い一致を示した[5]。この大きな楕円率は、暗黒物質（例えば未発見の素粒子）が重力でのみ相互作用し、銀河団の形成過程においては無衝突粒子として振る舞うことに起因する。つまり、この重力レンズの結果は Λ 例えばモデルに新たな確証を与えた。これら銀河団の弱い重力レンズ効果の一連の研究は、すばる望遠鏡新カメラHSCサーベイのための完璧な準備研究である。

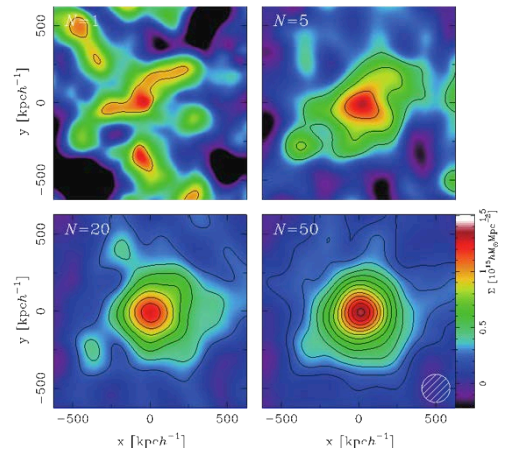


図1 X線光度で明るい、最大質量級の銀河団領域分布の弱い重力レンズ測定から復元した、平均的な質量分布（大部分が暗黒物質）の測定結果。左上から右下図の順に、図中に示されるように1個から50個の銀河団の測定結果を組み合わせた結果を示す (N. Okabe et al. 2013)。

研究成果 5：暗黒物質の検出

鈴木洋一郎は共同研究者と共に暗黒物質の直接検出のためのXMASS実験を立案し、装置を完成させた。XMASSは標的全質量835 kgの単相液体キセノン検出器で、現在のところ世界最大である。光電子増倍管632本が使用され、検出器の内部の表面の62%をカバーしている。その結果、 ~ 14 光電子(pe)/keVという、同種検出器の中で最大の光電子収率が得られ、 0.3 keV_{ee} という世界で最も低い検出エネルギー閾値を実現した（ ee はelectron equivalentの意味）。解析はXMASSの立ち上げ調整段階で取得したデータを用いて行われた。僅か6.8日分のデータを用い、解析の閾値を 0.4 keV_{ee} とし、光電子増倍管の石英窓中で発生した特徴的なチェレンコフ光のみを除去する簡単なカットを適用した結果、得られた上限はDAMA/LIBRAグループが彼らの年変化の観測から（暗黒物質が存在し、そのパラメータとして可能であると）主張した領域のかなりの部分を排除した[6]。この結果は、大きな標的質量と低いエネルギー閾値がもたらす高感度を実証するものである。

XMASSは電子及び光子、並びに原子核反跳も検出できる。暗黒物質の非弾性散乱の信号は、 ^{129}Xe の励起状態の脱励起で発生する γ 線（39.6 keV）である。この信号エネルギーは十分高く、事象の発生点を精度良く決められる。最も中心部の41 kgに限れば、バックグラウンドレベルは $3 \times 10^{-4} \text{ ev/keV/kg/day}$ であった。その場合、50 GeVのWIMP (Weakly Interacting Massive Particles、重くて相互作用が極めて弱い粒子)の非弾性断面積に対する上限値として3.2 pbが得られた。この結果は、この種の解析法でこれまでに得られた最も良い上限値である。

ここでXMASSはkeV領域でボゾン粒子のSuper-WIMPとよばれる粒子を探索した。これは暖かい暗

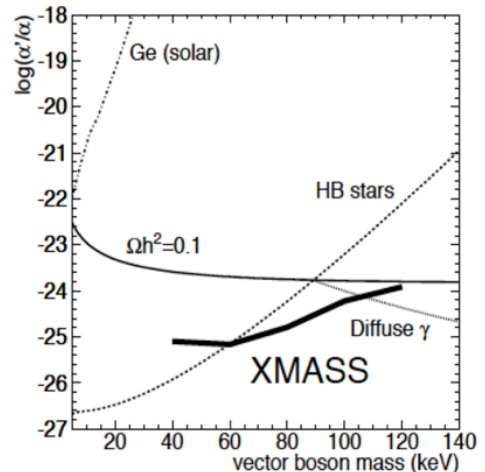


図2 電子とベクター・ボゾンの間の結合定数の上限。細い実線は観測された暗黒物質の存在量を再現するために必要な結合定数。点線と破線は天体物理学的な制限に対応する。実験からの制限（一点鎖線）は太陽中での生成を仮定している。

黒物質であり、冷たい暗黒物質のシナリオに基づく宇宙の大構造の発展のシミュレーションに見られる、好ましくない小さい銀河スケールでの塊りの問題を緩和できるかもしれないことから興味を持たれている。ボゾン粒子が標的中で吸収されると、単一エネルギーのピークを生じる。XMASSが用いたのは、非弾性散乱の解析法で使ったものと同じデータセットと非弾性散乱の解析法である。得られた上限は、図2に示すように現在の天体物理学的制限を凌駕して新しい領域に踏み込んでいる。

アクシオン類似の粒子は、測定器中の電子及び γ 線事象を探索することにより観測できる。暗黒物質としてのQCDアクシオンの質量は 10^{-6} から 10^{-3} eVの間となり、全く検出できない。しかし、アクシオン類似の粒子は、例えば太陽中で生成される可能性があり、電子との反応(axio-electric効果)によりXMASSで検出可能である。この場合の生成率、エネルギー分布、及び検出機構は分かっている。XMASSはこのような太陽アクシオンを探索し、電子とアクシオンの結合定数の上限値としてこれまでで最も良い $|g_{aee}| < 5.4 \times 10^{-11}$ (90%信頼限界)を得た[7]。

現在、鈴木と共同研究者は、1トンの有効質量とWIMP-核子のスピンの依存しない断面積 σ_{SI} に対する感度 $< 10^{-46}$ cm²をもつXMASS1.5を設計している。

ウィーノ(Wボゾンの超対称パートナー)が暗黒物質の場合、天体物理学的な γ 線の観測による間接的検出も重要である。このことは野尻美保子と松本重貴と久野純治により初めて指摘された、ウィーノ暗黒物質の消滅反応に対するSommerfeld効果により非常に強い信号が期待できるためである。論文[3]のPGM模型はウィーノ暗黒物質を予言する。一方、この模型をしっかりと検証するためには、我々の銀河系における暗黒物質の分布を正確に知ることが必要である。そのため、素粒子物理学者と天体物理学者を巻き込む融合的な研究活動が現在展開されている。

2-1.3 宇宙に終わりはあるのか?

1998年に宇宙の膨張が加速していることが発見された。その原因は暗黒エネルギーと呼ばれる、宇宙のもう一つの不思議な成分に帰せられた。宇宙の運命は暗黒エネルギーの性質によるため、その性質を知ることがこの疑問に対する中心課題となった。我々は

- (a) 現在の加速膨張の起源について理論的可能性を考えること
- (b) 天文観測の結果を用いて、異なる理論的可能性を区別すること

を要するが、これに加えてスーパーカミオカンデにおける陽子崩壊の探索がこの問題に対するもう一つのアプローチとなる。

研究成果 6: 暗黒エネルギーの理論と修正重力

暗黒エネルギーの影響を重力理論に取り入れる通常の方法は、アインシュタインの宇宙定数を仮定することである。しかし、観測が示唆する値は、場の量子論で自然であると期待される値に比べて120桁も小さくなければならない。暗黒エネルギーの代わりに、有限距離においてアインシュタインの重力理論を修正し、結果として見かけ上宇宙の加速膨張が現れるという考えが必要なのかもしれない。理論的な観点では、重力子の質量項を加えることによって、一般相対論を無矛盾に拡張できるか否かは、古典的な場の理論における重要な問題である。FierzとPauliによる1939年の先駆的な試み以来、この問題は多大な関心を惹きつけてきており、massive重力理論はこの方向での最も興味深い試みの一つである。A. E. Gümrükçüoğluと向山信治はA. D. Feliceとともにmassive重力理論における新しいタイプの非線形不安定性を、1972年のBoulwareとDeserによる類似の発見以来、初めて見出した。それ以来、向山は国際的な共同研究者と共に、無矛盾なmassive重力理論とそれによる宇宙解を探す新たな研究を始め、Gümrükçüoğlu、C. Linおよび向山による非等方的宇宙解、A. D. Feliceと向山によるquasi-dilaton massive重力理論理論の拡張[8]、D. Langlois、向山、難波亮、成子篤による回転不変なmassive重力理論における安定なドジッター解、等を得た。また、これらの研究成果について、国際的学術誌に招待レビューを執筆している。

研究成果 7: 暗黒エネルギーに対する新たな観測的制限

スローン・デジタル・スカイサーベイ(SDSS)は、現在、高精度の宇宙論を可能とする最も規模の大きな銀河サーベイであり、Kavli IPMUはパートナー研究機関として参加している。これについて、我々は下記のSuMIReサーベイの先行かつ準備研究と位置づけている。大栗真宗の率いる研究チームは、大量のSDSSデータセットの中から重力レンズクエーサーの候補天体を探索する系統的な研究を遂行し、10万個のクエーサーのサンプルから約50個の新しい重力レンズクエーサーを発見することに成功した[9]。この稀少な、強い重力レンズクエーサーは、クエーサー、観測者、およびレンズの役割をする前景銀河が視線方向にほぼ一直線に並ぶ場合に起こる。この偶然の整列の確率は、時間進化、膨張する宇宙の体積に直接比例し、従って、暗黒エネルギーを検証することが可能

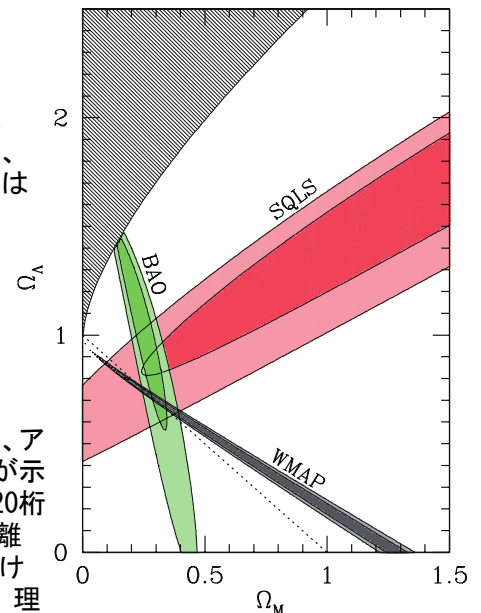


図3 SDSS のデータ中の強い重力レンズ効果を受けたクエーサーのサンプル(SQLS)の統計解析から得られた、非平坦モデルに対する Ω_M と Ω_A についてのマージナライズされた制限。

になる。大栗らは、宇宙マイクロ波背景放射からの制限と組み合わせ、この強い重力レンズクエーサーの1つが世界最大のサンプルから暗黒エネルギーの存在の証拠を得ることに成功した。

研究成果 8 : SuMIRe

Subaru Measurements of Images and Redshift (SuMIRe=すみれ) プロジェクトは、これから数年のうちに宇宙物理学および宇宙論の研究を飛躍的に進展させ、Kavli IPMUを観測的宇宙論の研究の最前線に導くことを約束する。SuMIReプロジェクトの第一の柱は、視野の直径が 1.5 度角の新しい広視野カメラHSCによる宇宙のイメージング(撮像)による宇宙探査(サーベイ)である。国立天文台、Kavli IPMU、および国際共同研究の協力研究機関である台湾の中央研究院天文及天体物理研究所(ASIAA)とプリンストン大学のリーダーシップのもと、HSCの建設は完了し、2013年8月に成功裏にファーストライト(試験観測)を行った。HSCは、計8億7000万画素を有し、高さ3m、重さ3トンの世界最大のデジタルカメラである。HSCの持つ広い視野により、アンドロメダ銀河(M31)のほぼ全体を1視野で捉えることに成功した。安田直樹とプリンストン大学およびNAOJの共同研究者は、HSCデータを自動的に処理し解析するソフトウェアの開発を進めてきた。このHSCのM31の画像のプレスリリースは、各新聞、テレビ、さらにNature(2012, Nature, 489, 190)をはじめとする学術誌で大きく取り上げられ、世界中の関心を集めた。

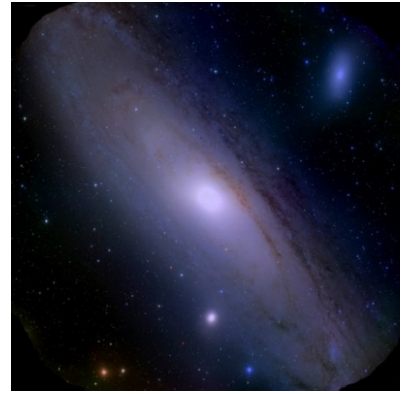


図4 HSCの初期試験観測によるM31の画像。Kavli IPMUの研究者らで開発されたデータ解析ソフトウェアによって得られた。

HSCサイエンスチーム(高田昌広が委員長)のリーダーシップのもと、すばる望遠鏡の300晩を費やす、観測提案書「ハイパー・シュプリーム・カムによる広天域イメージングサーベイ:宇宙論と銀河の進化」が提出され、すばるコミュニティによる厳正な審査を経て、2013年5月に正式に承認された。このHSCサーベイは、すばる望遠鏡史上最大の宇宙探査(銀河サーベイ)であり、HSCの強力な性能により5年間で遂行することができる。ハッブル宇宙望遠鏡では、1,000年以上を必要とする銀河サーベイである。その科学目標は、弱い重力レンズ効果により暗黒エネルギーの性質を解明し、また138億年の宇宙史における様々な種族の銀河の起源・進化、暗黒物質分布を解明することである。

SuMIReプロジェクトのもう一つの柱は、すばる超広視野多天体分光装置Prime Focus Spectrograph (PFS)計画である。PFS計画の提案は、すばる望遠鏡の将来の主要装置計画の一つとして、2011年1月に日本の研究者コミュニティによって承認された。さらに、2011年12月にはNAOJとKavli IPMUの間でPFSプロジェクトに関する合意書(MOU)が取り交わされた。この合意に基づき、NAOJは、国際共同研究で進められているPFSプロジェクトを、その設計、建設、観測運用について支援することを約束した。PFSは、可視光及び近赤外の波長領域を一度にカバーする多天体分光装置であり、2,400本の各々のファイバー自動ポジショナーが、2段構成の回転式モーターにより、瞬時にターゲットの天体を捕らえ、一度に2,400の天体の分光を可能にする。このPFSは、HSCのために開発した広視野補正光学系を共有し、直径1.3度の広視野を有する。

Kavli IPMUの強力なリーダーシップ(PI:村山 齊、プロジェクトマネージャー:菅井肇、システムエンジニア:田村直之、プロジェクトサイエンティスト:高田)のもと、PFS国際共同研究チームが提出した詳細設計案は、2013年2月の外部評価委員会で承認され、現在各々の装置が建設中である。PFSプロジェクトは、Kavli IPMU、NAOJ、ブラジルのサンパウロ大学/国立天体物理学研究所、アメリカ合衆国のカリフォルニア工科大学/ジェット推進研究所、プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学、フランスのマルセイユ天体物理学研究所、台湾の中央研究院天文及天体物理研究所、ドイツのマックス・プランク天体物理学研究所を含む国際共同研究で進められている。

PFSは、そのユニークな性能により、大統計に基づく天文学および宇宙論に大きな進展を約束する。PFSチームは、暗黒物質と暗黒エネルギーの性質の解明、また天の川銀河をはじめとする様々な種族の銀河の起源の解明を目的とする、すばる望遠鏡の300晩の分光宇宙探査(サーベイ)の研究プロジェクトを計画している。[10; H. Sugai et al. SPIE, 8446, 2012も参照]。日本の天文学コミュニティの最大のプロジェクトであるTMTが活躍する2020年代に入っても、HSCとPFSの組み合わせは、TMTと相補的であり、世界第一線の望遠鏡としてその役割を維持することができる。我々は、2017年半ばからすばるで最初の技術的観測を計画している。

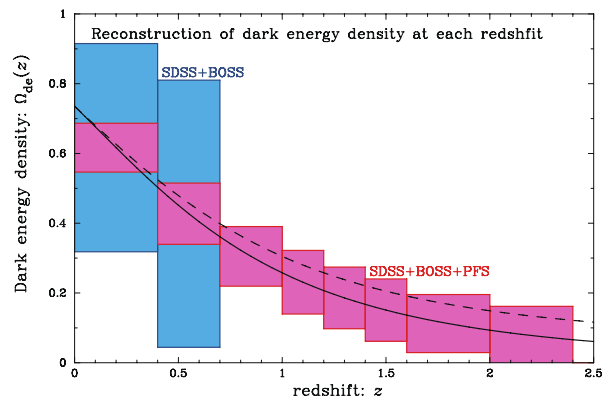


図5 赤方偏移 $z=2.4$ までのバリオン音響振動の測定によるハッブル宇宙膨張率および角径距離の測定を想定し、暗黒エネルギーの密度パラメータ $\Omega_{de}(z)$ の時間進化を復元した予想結果。実線は宇宙定数モデル、点線はDoran & Robbers, JCAP 6 (2006) 26の時間進化する暗黒エネルギーモデル $\Omega_{de}(z)$ を示す(M. Takada et al., 2014)。

2-1.4 宇宙の基本法則は何か?

この疑問は明らかに他の全ての疑問と関連している。この点における我々の関心事は超弦理論のような、数学と物理理論の間の緊密な関係である。物理学者と数学者が同じ研究棟にいて日常的に活動を共にするKavli IPMUの珍しい仕組みの故に、我々は互いに刺激し合い新しい数学と新しい物理理論の開発を進めている。同時に、この活動から得られた教訓が物性物理学やさらには生物学のような他分野のサイエンスに応用されている。

伝統的に物理学と数学の交わる点は、解析を中心とするものであったが、アインシュタインの重力理論、量子力学、ゲージ理論、および超弦理論の発明により、幾何学及び表現論に重点が移り、従って、それが現在の中心分野となっている。それに加えて、我々は超対称性が宇宙の究極理論の探求において決定的な役割を果たすものと信じている。長い間、物理理論における無限個の自由度は数学的に厳密な取り扱いが不可能であった。超対称性はこの状況を劇的に変えるものである。物理的に意味のある観測可能量の幾つかに対しては、ボゾンとフェルミオンの自由度の厳密な打ち消し合いが起こり、その残りはしばしば数学的に厳密に扱うことが可能である。実際、これがグロモフ-ウィッテン (GW) 理論及びその類似物の定式化、並びにWPIプログラムへのIPMUの提案書の中で言及した「1990年以來のフィールズ賞の40%」のような数学における最近の発展の相当部分の裏に潜んでいることは、良く知られた秘密である。従って、超対称ゲージ理論、および(複素)3次元カラビ-ヤウ多様体と関連する代数幾何学を必要とする、超対称性を保存する超弦理論のコンパクト化が特に重要な分野である。

見かけ上全く異なる理論的記述が実は同じ問題を扱っているという双対性の概念は重要な手段である。複素幾何学およびシンプレクティック幾何学におけるミラー対称性は超弦理論における双対性に由来する。さらに、ウィッテンは最大の超対称性を持つ4次元のゲージ理論のリーマン面上でのコンパクト化におけるS双対性は、数論幾何学と数論に対するラングランズ・プログラムの検証の場である幾何学的ラングランズ・プログラムに関連していると指摘した。

研究成果 9: 接続層の導来圏と数え上げ不変量

代数幾何学は数学の一分野であり、多変数連立多項式系の解空間として定義される代数多様体と呼ばれる幾何学的対象を研究する。特に、3次元カラビ-ヤウ多様体は超弦理論において余剰次元として現れる。代数多様体上の接続層の導来圏は、代数多様体上の正則ベクトル束の有界な複体からなる圏である。これは抽象的な概念であるが、II-B型超弦理論におけるDブレーンの数学的定式化を与えるため、近年注目を集めている。超弦理論からのアイディアを基に、導来圏を含む興味深い対称性が幾つか発見されている。その一つはコンセピッチのホモロジカル・ミラー対称性予想で、カラビ-ヤウ多様体上の接続層の導来圏を、そのミラー対称なシンプレクティック多様体上の深谷圏の導来圏と関連付ける。これは代数幾何学とシンプレクティック幾何学という異なる種類の幾何学を関係付ける驚くべき予想である。

2002年にBridgelandが導来圏の安定性条件を導入した。これは超弦理論における Π 安定性の数学的定式化であり、導来圏における半安定な対象の概念を与える。導来圏の安定性条件の集合は複素多様体を構成することが知られており、そのミラー多様体上の複素構造のモジュライ空間と関連付けられると期待される。従って、これはミラー対称性を調べる上で重要な研究課題である。しかし、この空間の研究は極めて困難である。特に、3次元カラビ-ヤウ多様体上の安定性条件の存在は知られていない。

一方、1998年にThomasがDT不変量と呼ばれる、3次元カラビ-ヤウ多様体上の安定な接続層を数え上げる不変量を、代数曲面上のDonaldson不変量を高次元化したものとして導入した。DT不変量は超弦理論におけるBPS状態の数え上げに対応し、数学者だけでなく弦理論研究者にも興味をもたれている。階数1の安定な層を数え上げるDT不変量は3次元カラビ-ヤウ多様体上の曲線を数え上げる。2003年にMaulik-Nekrasov-Okounkov-Pandharipande (MNOP)は階数1のDT不変量は、超弦理論における世界面を数え上げる不変量であるGW不変量と同値であると予想した。また、この予想が意味を成すために、MNOPは階数1のDT不変量の生成関数が、ある種の保形性をもつ有理関数であると予想した(有理性予想と呼ばれる)。MNOP予想は、2006年の国際数学者会議でのOkounkovのフィールズ賞講演で提案され、多くの数学者の興味を惹きつけた。さらに2007年にPandharipande-Thomas (PT)が3次元カラビ-ヤウ多様体上の安定対の概念を導入し、安定対を数え上げる不変量は階数1のDT不変量と同値であると予想した。

戸田幸伸はBridgelandの安定性条件のアイディアをDT不変量、特にMNOP予想の研究に応用した。彼は導来圏の半安定な対象のモジュライ理論を発展させ、導来圏の半安定な対象を数え上げるDT型の不変量を構成した。彼は、安定性条件の変化に対するこれらの不変量の依存性を調べることにより、DT不変量に関する予想(の一つのバージョン)、例えばDT/PT予想、MNOP有理性予想、その他を証明した[11]。また、彼の安定性条件の研究は、ある種の2項複体のチャーヌ標数に対するBogomolov-Gieseker型不等式予想へと導いた[12, 13]が、この予想は代数幾何学の古典的問題と現代的問題を結びつけることが判明した。

研究成果 10: Langlands 対応と p 進コホモロジー論

数論幾何学の歴史は Weil の予想から始まったとすることができる。彼の予想は、我々の住む世界とは全く異なるように見える有限体上の世界が、馴染みの位相幾何的な構造をもつことを示唆していた。それに触発され、Grothendieck は有限体上の多様体に対するコホモロジー論を構築した。それらは、有限体の標数 p とは異なる任意の素数 ℓ に対する ℓ 進エタール・コホモロジーとクリスタリン・コホモロジー (p 進論) と呼ばれている。 ℓ 進コホモロジー論は特異コホモロジー論の類似物と見なせ、多様体の位相的な性質を反映していると言える。複素幾何学では、特異コホモロジーは微分形式を用いることによって計算されるド・ラーム・コホモロジーと同等であることが知られている。この幾分微分幾何学的な手法の有限体上の類似物が p 進コホモロジー論である。

無限に多くのコホモロジー論があるならば、その間の関係を知りたくなるのは自然なことである。ラングランズ対応 (LC) の哲学に影響され、Deligne は、数学で最も影響力のある論文の一つである、いわゆる “Weil II” の中で、「 ℓ 進同志」および「クリスタリン小同志」の存在についての予想を提起した。この予想は、大まかに言えば、どのコホモロジー論を用いるかにかかわらず、コホモロジーの情報は本質的には同じであることを主張している。曲線の場合の ℓ 進同志の存在については、関数体に対する LC を確立することにより、Drinfeld が部分的に、Lafforgue が完全に示した。この功績で彼らはフィールズ賞を受けている。後に、この結果を用いて Deligne と Drinfeld は、取り扱えない場合もあるものの、より一般的な多様体に対して ℓ 進同志を構成した。阿部知行の主な成果は、 p 進論に対する LC の類似物を確立し、曲線の場合のクリスタリン小同志の存在を示したことである [14]。このためには p 進コホモロジー論における基礎的で困難な一連の研究、即ち、epsilon 因子の積公式、重さの理論の構築、 p 進論のある種のスタックに対する 6 つの関手の枠組みを構築すること、が必要とされた [14, 15]。これらの成果は、いずれも p 進論においては達成困難とされていたものである。彼は Berthelot によって導入された数論的 D 加群の理論を系統的に用いたが、これは理論の複雑性の故に専門家が回避しがちであったものである。彼の結果は、 p 進コホモロジー論の基礎を完成させると同時に、 ℓ 進係数の圏より遙かに広い p 進微分方程式の圏を用いて有限体上の多様体の「モチヴィックな特性」を研究する途を開くものである。

研究成果 11：原始形式とミラー対称性

オイラーが創始し、アーベル、ヤコビ、ガウス、リーマンが発展させた、楕円曲線及びそれより種数の大きなリーマン面上の周期積分の研究は、数学における古典である。原始形式は、関数 F の孤立臨界点における消滅サイクルに対する高次元の周期積分論として導入された (齋藤恭司 1983)。関数 F に対する原始形式の理論は、 F をスーパーポテンシャルとしてもつ、物理学の $N=(2, 2)$ 超対称 LG (ランダウ-ギンツブルグ) 理論の複素幾何学的側面 (B モデル) を記述することが分かった。従って、原始形式の理論は、Kavli IPMU での Math-String セミナーで、物理学者と数学者の共通のテーマとなった。

物理学において、異なる超弦理論の間の双対性は分配関数を非摂動的に計算する強力な方法を与える。例えば、ウィッテンは LG モデルとカラビーヤウ多様体上のシグマ・モデルが同じ物理の異なる相 (phase) を与えることを示した。物理学者の堀健太郎、Vafa らにより考察されたミラー対称性は双対性の一種で、複素幾何学とシンプレクティック幾何学の間での双対性を予言し、数学には予想外の事実として強いインパクトを与えている。下に述べるように、昨年、Kavli IPMU を舞台として、原始形式を用いて LG-LG ミラー対称性を確認するという、この研究課題に関する新たな発展があった。

堀と齋藤は Math-String セミナーで、原始形式の理論は、コンパクト・ケーラー多様体上に定まる GW 理論や LG orbifold の Fan-Jarvis-Ruan-Witten (FJRW) 理論 (2013) のようなシンプレクティック幾何学的理論 (A モデル) と双対であることを明らかにした。LG-LG ミラー対称性予想の数学的に厳密な定式化は、関数 F に対する原始形式から得られプレポテンシャル関数と、双対な関数 F^T の FJRW 不変量の生成関数が一致することを主張する。より厳密には、原始形式は F の変形のパラメータ空間上に平坦 (フロベニウス) 構造とその (種数 0 の) プレポテンシャルを定める。そのデータから、パラメータ空間の一般点 (generic point) で高次の種数のポテンシャルが再構成される (Givental, Teleman)。その段階ではまだ次のような難しい問題があった。1. Givental が与えた高次の種数のポテンシャルを全変形パラメータ空間に拡張することが必要であった。2. ADE 型特異点あるいは単純楕円型特異点を除き、原始形式を解析する明確な公式と手段を持ち合わせていなかった。しかし、昨年 Kavli IPMU においてこれら 2 つの問題を解決した。

T. Milanov は半単純フロベニウス構造が局所 Eynard-Orantin (EO) 漸化式を満足することを証明した。彼はその応用として、total ancestor potential の全変形パラメータ空間への解析的拡張可能性に関する Givental の予想を証明した [16]。これが問題 1 に対する解答である。彼は、更に、頂点作用素代数 (VOA) 表現と可積分系の方法を通じて GW 不変量の特徴付けるために原始形式の周期を用いる方向を追求している。B. Bakalov との共同研究により、彼は VOA 表現の構成に成功し、それが単純特異点に対する FJRW 不変量の生成関数の特徴付けに使えることを証明した [18]。

Kavli IPMU で 2012 年に開催された研究会で、S. Li は熱核により高次の種数の公式に取り組みアイデアについて話した。これは齋藤と S. Li および C. Li との共同研究を促し、彼らは多重ベクトル場を用いて原始形式に取り組み新たな方法を発展させた。彼らは、更に、Barannikov-Kontsevich のアイデアを用いて摂動的に原始形式を構成する方法、特に全ての重み付き斉次特異点 (weighted homogeneous singularities) に対する明示的な公式を与えた (arXiv:1311.1659)。

これが問題 2 に対する最終的解答である。その後 Kavli IPMU における FJRW 理論の専門家、Y. Shen との共同研究により、彼らは LG-LG ミラー対称性が、変形パラメータが負の重みをもつ場合も含み成り立つことを確認した[17]。これは、また、FJRW 理論の 4 点相関関数に対応するプレポテンシャルの 4 次微分が全体の構造を定めることを示す。この方法は非常に一般的であり、全ての可逆多項式に対する LG-LG ミラー対称性を確認する研究が進展中である。

研究成果 12：有限群とカラビ・ヤウ・ジオメトリの間の新しい関係の発見

大栗博司の長期的な研究目的の一つは、超弦理論のコンパクト化において、厳密な結果を発見することである。彼は1989年の博士論文で、 $K3$ と呼ばれる4次元カラビ・ヤウ空間上の超弦理論のコンパクト化を研究し、粒子のスペクトルがいわゆる楕円種数にまとめられることを示した。驚くべきことに、楕円種数を $N=4$ の超共形代数の指標で展開すると、その展開係数が正の整数になることがわかった。しかし、これが何を意味するのかを見出すには、その後20年の年月がかかった。2010年に、大栗は江口徹、立川裕二と共に、これらの整数が最大マッシュー群 M_{24} の表現の次元であることを発見した[19]。このことから彼らは $K3$ の楕円コホモロジーは M_{24} の表現であると予想した。彼らの予想の弱いバージョンはマッシュー・ムーンシャインと名付けられ、これはその後、アルバータ大学の数学者Terry Gannonによって、2013年に証明された。

マッシュー・ムーンシャイン予想の本質的な要素の一つは、ラマヌジャンによって発見された、擬モジュラー形式である。ここで、1987年に開催された、ラマヌジャン生誕百周年記念の会議でのフリーマン・ダイソンの講演記録から引用しよう。「擬テータ関数は今後発見されるであろう壮大な統一像がどんなものかについてワクワクするようなヒントを与える。私の夢は、生きているうちに、超弦理論の予言を自然界の事実と一致させようという若手物理学者の努力の末、解析的な手法が擬テータ関数を含むように拡張されるのを見ることだ。」マッシュー・ムーンシャインは、擬モジュラー形式、マッシュー群、カラビ・ヤウ多様体と超弦理論のコンパクト化の壮大な統一像を示すことにより、ダイソンの夢を実現するものである。過去数年、大栗博司の発見は物理学者、数学者の双方により精力的に研究されている。それが世界的にインパクトを与えた証拠として、マッシュー・ムーンシャインに関する国際会議がチューリッヒのETH、ストーニーブルックのサイモンズ・センター、ロンドンのインペリアル・カレッジで開催されていることを指摘したい。

[20]において、大栗と山崎雅人(当時は学生、現在は教員)は、カラビ・ヤウ多様体の滑らかな幾何学が、結晶溶解の統計力学的モデルの熱力学的極限から得られることを示した。彼らは、特に、結晶溶解のモデルの特性多項式のロンキン関数を、対応するカラビ・ヤウ多様体の正則3形式に関連付けることによって、溶けた結晶の熱力学的分配関数が、トポロジカルな超弦理論の分配関数の古典的極限に等しいことを示した。

研究成果 13：超対称ゲージ理論

2009年に立川裕二はL. F. Alday及びD. Gaiottoと共に、いわゆるAlday-Gaiotto-Tachikawa予想を提起した。当初、この予想は理論物理学の言葉で表現されたが、すぐに数学的に正確な予想に再定式化された。それ以来、その予想の大部分は厳密に証明された。当初は制限されたクラス群に対して考察されたが、論文[21]は、一般的な場合について理解する方向に向けて大きく前進する内容を含んでいる。

物理学と数学の相互作用のもう一つの例として、論文[22]において、立川はO. Aharony及びN. Seibergと共に、一般的ゲージ理論で従来は無視されていた離散的パラメータを発見した。これらの新しいパラメータを記述する最も良い方法は、代数的トポロジーで盛んに研究されており、1980年代に多くの日本人数学者が貢献したテーマである分類空間のコホモロジーを用いることである。しかし、分類空間のコホモロジーはこれまで物理学ではほとんど使われていなかった。従って立川がKavli IPMUの連携研究員であることから、直接数学者に質問することが可能であったことと共に、全数学分野を広く網羅するKavli IPMUの図書室で図書を参照することができたことが非常に役だった。

研究成果 14：場の量子論と超弦理論における方法—双対性

場の量子論と超弦理論は、究極の宇宙の法則のための理論的枠組みを与えると期待されているが、ある理論が与えられた時にその物理を理解することは一般には困難である。この困難を克服する手がかりが「双対性」である。双対性とは、異なる理論が同じ物理的観測可能量を与える現象である。ある理論の強結合領域はしばしば双対な理論の弱結合領域に写像される。双対性は、摂動論的超弦理論、低エネルギーでの超重力理論、各種のブレーン上の場の量子論といった異なる手法を結びつけて研究を行う超弦理論において特に重要である。過去7年間、Kavli IPMUは新たな双対性の発見や、場の量子論及び超弦理論における新たな方法の発展に多大な貢献を行った。これらは物理学者と数学者の継続的な相互作用により得られたものであり、Kavli IPMUの存在無くしては為し得なかったであろう。

この相互作用の始まりは、数学における「圏」の言葉が弦理論において「Dブレーン」と呼ばれる一群の対象を記述する上で適しているという認識に遡る。Dブレーンは弦の世界面の境界上の相互作用であり、ある種の圏を構成するが、これは接続層の導来圏のように以前から数学において調べられていたものと一致する場合がある。この関係を通じて、超弦理論における幾つかの事実が、

例えば導来圏の同値関係のような、証明されるべき数学的予想をもたらす、一方、数学的結果が超弦理論を理解するためのヒントを与える。このような相互作用の口火を切った堀健太郎は、2次元超対称ゲージ理論における新たな種類の双対性を発見した[23]。これは4次元におけるSeiberg双対性の2次元版と考えられる。それは、球、半球、およびトーラス上の分配関数についての厳密な結果に関して最近開発された方法[23,24]を用いてテストされているところである。また、それは新しい種類のカラビ-ヤウ多様体を含む新しい種類の超弦理論の真空の構成に用いられる。この発見は当機構の研究目標「宇宙の統一的記述に必要な数学の創造」に向けての進展を示すものであろうと思われ、また「明確に定義され、テスト可能な予言を有する新しい物理学理論を定式化するための数学的基礎」を確立する途を与えるであろう。

上述のように、堀は、2次元超対称ゲージ理論における新たな種類の双対性を発見した[23]。このような理論は、赤外固定点に現れる超共形場の理論がスーパーストリングの世界面上の理論として使えるため、特に重要である。この双対性により、新しい種類のカラビ-ヤウ多様体を含む新しい種類の超弦理論の真空を構成することが可能になる。数学的側面では、この双対性は導来圏の同値に関する最近の数学的発見を理解する統一的な枠組みを与え、更に証明すべき新たな予想を生み出す。この双対性が動機となって、2次元球面上の分配関数の厳密な計算(Benini *et al.* 2012, Doroud *et al.* 2012)、およびそのモジュライ空間上のケーラーポテンシャルとの関係(H. Jockers *et al.*, {5})など、多くの重要な研究が始まった。更に、これらの研究が動機となって、堀とKavli IPMUにおける共同研究者がこの方法を更に発展させ、半球[24]及びトーラス[10]上の厳密な分配関数を計算した。この結果は、Dブレーンの中心電荷と楕円種数の一般的公式を与える。

また、Kavli IPMUでは超対称性をもたない系における双対性も研究された。杉本茂樹は、ゲージ/ストリング双対性、つまりDブレーン上の場の量子論と超弦理論の低エネルギー極限の超重重力理論の間の双対性を酒井・杉本模型と呼ばれるD4/D8ブレーン配位において用いることにより、バリオンの性質といったようなQCDについての情報を引き出した(K. Hashimoto, T. Sakai and S. Sugimoto, *Prog. Theor. Phys.* **120** (2008) 1093)。また、杉本は弦理論を起源とする電磁双対性を解析し、それを超対称性をもたない4次元ゲージ理論における閉じ込めと力学的対称性の破れを理解するために用いた(S. Sugimoto, *Prog. Theor. Phys.* **128** (2012) 1175)。

研究成果 15: F 理論: 現象論的応用と双対性

渡利泰山は2006年に発表した論文 (*Nucl. Phys.* **B747**, 212) 以来、 F 理論と呼ばれる超弦理論の定式化の一つを用いて基本法則に立ち向かってきた。しかし、 F 理論の研究における本質的な部分は特異点の幾何学や層係数コホモロジーのような数学を扱うことであり、2008年までこの方向の進歩が非常に遅かったのは、これが理由であった。

2008年初めにはこの問題に取り組むために物理と数学の共同研究が世界で幾つか始まった。このようなチームの一つがKavli IPMUでも物理学者と数学者によって形成され、論文[25, 26]、その他の成果を生み出した。Kavli IPMUの研究チームは、特異点のある幾何に伴う F 理論の物理を研究するため、 F 理論とヘテロティック超弦理論の間のストリング双対性を採用した。ヘテロティック・ストリングを用いた数学的計算に基づき、また、ストリング双対性を精緻化することにより、 F 理論では幾何に特異点が存在するにも関わらず、クォークとレプトンが直線束の滑らかな切断により記述されることが示された[25]。ひとたび理論的定式化が明らかになると、右巻きニュートリノの質量スケールが既に測定されたパラメータにより与えられることが信頼できる結果として示された[26]。このようにして得られた質量スケールは、スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの振動を丁度良く説明する値となっている。

研究成果 16: 物性物理学への応用

弦理論のもっとも注目すべき驚くべき成果の一つがAdS/CFT (反ドジッター/共形場理論) 対応である。AdS/CFT対応とその一般化された理論は、ある時空の量子重力理論 (弦理論) はその境界に存在する量子場の理論と同等であると主張する。これから、重力理論を、重力なしの理論として書き直すことができるという、ホログラフィック原理と呼ばれ、最近大いに注目を浴びている事実が明らかになった。これによって重力と時空に対する考え方が根本的に変えられた。この理論は、我々の宇宙の起源の原因であるプランクスケールの物理を理解するのに極めて重要である。

高柳匡は、もしCFTが境界のある多様体(BCFTと呼ばれる)上で定義されていたらどうなるかを研究し、(AdS/BCFTと呼ばれる)その美しいホログラフィック双対を発見した[16]。この新しいホログラフィーの対応関係により、c定理に境界を持たせた場合への拡張に相当するg定理を証明した。この結果により、高柳は超弦理論国際会議で招待講演を行った。

AdS/CFT対応は、強い相互作用をする量子多体系を研究するのに非常に有効である。AdS/CFT対応によれば、量子重力の効果が抑制された場合に重力理論が強結合したゲージ理論と等価となる。これは固体物理学における様々な問題にAdS/CFTを適用することができることを示している。例えば、固体物理学における最も興味深い問題の一つは高温超伝導体の問題である。異常金属相と呼ばれる、超伝導体を熱すると特別な金属相が存在することが良く知られている。この相は通常の金属(LandauのFermi液体と呼ばれる)と異なる、異常な比熱と電気伝導度などの特異な性質を持つ。小川軌明、宇賀神知紀、高柳はAdS/CFTを用いて異常金属相の系統的な研究に成功した[37]。彼ら

はエンタングルメントエントロピーを量子力学系の新しい秩序変数として導入することにより、強結合のラージN（自由度が大きい）のゲージ理論において、金属相はいつでも異常金属相になることを証明した。本論文により、ホログラフィックエンタングルメントエントロピーの固体物理学への応用が始まり、国際的に評価され、120回以上の引用されている。実際、彼らの手法はハーバード大学の著名な固体物理学理論研究者Subir Shchdevによって隠れたフェルミ面と呼ばれる奇抜な現象を研究するために何度も使用された。

対称性が破れた場合、宇宙の全ての現象は、南部陽一郎がノーベル賞を受賞した理由となった、自発的対称性の破れと呼ばれる一般的な概念によって特徴づけられている。最近LHCで発見された有名なヒッグスポソンは標準模型のゲージ対称性が破れた際に宇宙に凝縮した。多くの超新星は粒子数対称性が破れている中性子星となる。同様に、並進対称性が格子対称性に破れると水が凍り、電子のスピンの整列して回転対称性が破れると鉄片が磁石となる。これらの現象は半世紀も前から知られていたが、村山斉は、固体物理学者の渡辺と共に、初めてこれら全ての現象に適用できる一般的な理論を発見した[28]。ここで用いるべき正しい数学が等質空間上のプレシンプレプティク構造であることが分かり、この数学によって、可能な場合を分類し、南部-ゴールドストーン・ボゾンと呼ばれるギャップ励起の数を正確に予言することができた。この結果は4編のフィジカル・レビュー・レターズの論文を含む7編の論文となり、一編はEditor's suggestionおよびPhysics Synopsisに選ばれた。また、この結果は非線形偏微分方程式の解であるトポロジカルなソリトンの予想外の振舞いを予言した[29]。Witten-Oliveが発見した、磁荷によって超対称性の代数が中心拡大されることに似た中心拡大により、運動量演算子が非可換になることである。

2-1.5 宇宙にどうして我々がいるのか？

これは複雑で深い疑問である。この問題に以下の様に具体的に迫っていく。

- (a) 物質と反物質の対称性の破れの起源。ニュートリノかクォークのいずれかに起源をもつかもしれない。
- (b) 星と銀河の誕生とその後の進化
- (c) より小さいものからの銀河の形成
- (d) 惑星の形成

これらの課題はどれも魅力的であるが、全てをカバーすることはできないため、意識的に(d)は選択しなかった。当初、(c)は予期しなかったが、初期の研究の結果、既に述べたSuMIRe計画のような大規模サーベイ機器を使って(b)と(c)は同時に研究できることがわかり、(c)も追及することとした。

物質と反物質の非対称性を作り出したものはニュートリノであるという理論を提案したのは当機構の主任研究員の福来正孝と柳田勉であった。従ってニュートリノの性質の更なる理解が非常に重要である。地下実験、加速器実験、および天文学的探査によってこれに迫る。

研究成果 17: ニュートリノの性質

ニュートリノは、既知の物質粒子の中で唯一、粒子・反粒子の区別がつかないものかもしれない。この性質が物質優勢の宇宙という、素粒子・宇宙物理学の大きな謎を解く鍵かもしれないと考えられている。これまでのところ、この性質に迫る唯一現実的な実験的手法が、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)の探索である。 ^{76}Ge 測定器を使ったハイデルベルク・モスクワグループの実験において、 $0\nu\beta\beta$ 信号を発見したとのKlapdor-Kleingrothausらによる指摘(KK指摘)を検証することが最初の目標である。

カムランド-禅は、カムランドが実現した大型極低放射能環境を活用し、世界最大量の二重ベータ崩壊核(90%に同位体濃縮した ^{136}Xe を320kg)を含む液体シンチレータをミニバルーンに内包して吊り下げている。2012年には、世界最大の統計量(^{136}Xe で89.5 kg yr)を達成して世界最高の感度に到達した。現在得られている ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 半減期の下限値は90%の信頼度で 1.9×10^{25} 年であり、EXO-200実験との統合解析では 3.4×10^{25} 年となり、有効マヨラナ質量に換算して120~250meVの上限值が得られる[30]。上限値に幅があるのは原子核行列要素(NME)の理論的な不定性による。現代のどのNME計算も、統合解析の ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ 半減期の下限值と、KK指摘における有限の ^{76}Ge $0\nu\beta\beta$ 半減期を同時に説明することができない。これにより、KK指摘は97.5%の信頼度で否定され、最初の目標が達成された。

カムランドは、約180kmの有効距離の多数の原子炉に囲まれており、第一世代と第二世代間

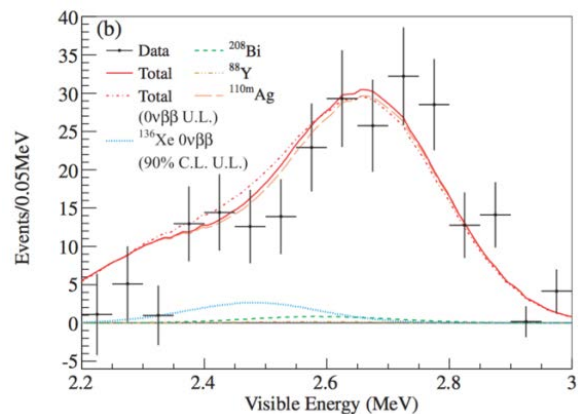


図6 選定されたイベント候補のエネルギースペクトルを、ベストフィットの残存バックグラウンド、90% C.L. の $0\nu\beta\beta$ 崩壊上限値とともに示す。

のニュートリノ振動を測定するのにうってつけのユニークな環境を有している。原子炉からは反電子ニュートリノしか発生せず、カムランドは水素原子を標的とした逆ベータ崩壊反応を使って特徴的な反電子ニュートリノ信号を検出することができる。反電子ニュートリノはニュートリノ振動と呼ばれる量子力学の効果によって、カムランドでは検出できないタイプのニュートリノ（反ミューや反タウニュートリノ）に変化し、また元の反電子ニュートリノに戻る。カムランドは、ニュートリノ振動の決定的な証拠となる2周期に亘るニュートリノの消失・復元をはっきりととらえ、その周期の測定からニュートリノの質量二乗差に対して2.4%という精密な測定を実現した[31]。これは、ニュートリノ質量に関する世界で最も高精度な測定である。

齋藤俊・高田昌広・樽家篤史は、冷たい暗黒物質と質量のあるニュートリノとを含む混合暗黒物質のモデルに対して、大規模構造の生成の摂動論を初めて開発した(S. Saito, M. Takada & A. Taruya *Phys. Rev. Letters* **100** (2008) 191301; *Phys. Rev. D* **80** (2009) 083528)。熱的なビッグバン理論の帰結として、質量のあるニュートリノは大きなフリーストリーミングスケールを持つため、銀河のクラスティングの特徴に、特定の痕跡を残す。SDSSで観測された銀河のパワースペクトルと摂動論モデルとを比較して3種のニュートリノの質量和に対して $m_{\nu, \text{tot}} < 0.81 \text{ eV}$ (95% C.L.)という制限を得た[32]。この解析では、非線形の銀河バイアスの効果をモデル化するニュイサンパラメータ(迷惑変数)をマージナライズ(積分して消去)した。混合暗黒物質モデルのN体シミュレーションはまだ難しく、弱い非線形の範囲では、摂動論が正確なモデルを提供することが知られており、彼らの制限は最も強い質量の制限の一つであると考えられる。齋藤は現在SDSSコラボレーションの中心的メンバーである。彼と彼の共同研究者はSDSS-III BOSSのリリース11のデータを使って更に改善されたニュートリノ質量の上限値を得た(F. Beutler, T. Saito *et al.*, arXiv:1403.4599)。

研究成果 18: 銀河の進化

Kevin Bundyと鈴木尚孝は国際共同研究プロジェクトであるSDSS-IV銀河サーベイをリードしている。Bundyは、SDSS-IVの3つのコアプロジェクトの1つである、近傍銀河サーベイMaNGAのPI(主任研究者)であり、鈴木は高赤方偏移までの輝線銀河の宇宙論分光サーベイeBOSSの大規模データを自動解析するためのパイプラインソフトウェアの開発に関わっている。SDSS-IV探査は既に開始しており、エキサイティングな研究成果がKavli IPMUメンバーにより間もなく報告されると期待される。

望遠鏡で直接見ることのできる天体、銀河などの天体は、階層的構造形成のパラダイムである Λ CDM(宇宙項入り、冷たいダークマターモデル)の枠組み内で、どのように形成してきたのだろうか?これは宇宙論における重要な問題であるにも関わらず、未だ説明されていない。銀河の形成史、その進化史を理解するためには、銀河の住処であるダークマターハローの質量、形状を調べる必要があり、またこれらダークマターハローの特性が、星、ガスなどの観測できる物質の成長・集積過程に如何に影響を与えてきたかを理解する必要がある。A. Leauthaud, Bundyと共同研究者らは、 Λ CDMモデルに基づくN体シミュレーションも有機的に用いながら、COSMOSデータから得られた全ての観測量、具体的には重力レンズ効果、銀河のクラスティング統計量、また個々の銀河について推定した星全質量を組み合わせ、この問題を調べた[33]。その結果、ダークマターと星質量の比(M_{DM}/M_*)が、低質量から高質量の銀河について変化すること、さらに星質量が $M_* = 4.5 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ あたりの銀河について、その質量比が $M_{\text{DM}}/M_* \sim 27$ で最小になることを見出した。すなわち、その銀河で星質量の累積成長率が最も効率的であることを意味している。この論文は2012年の天体物理分野で9番目に引用数が高い論文である。

J. D. Silvermanと共同研究者は、この暗黒物質とバリオンを、もっと小さいスケールまで拡張した。COSMOSのデータを使って赤方偏移空間で近接した、(従って物理的に近接した)銀河ペアのサンプルを構築し、相互作用している銀河ではAGNの活動を示す銀河の比率が、同様の星質量の孤立した銀河のサンプルと比べて、有意に高いことを見出した。AGNの活動については、

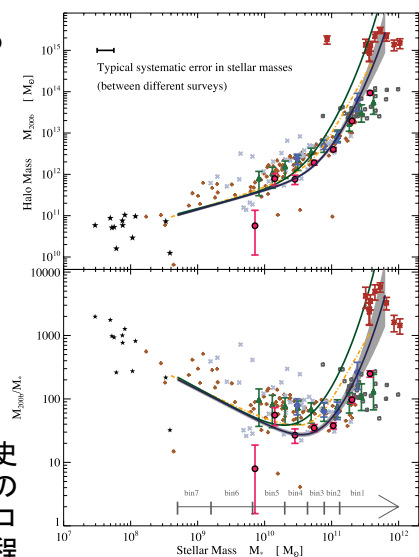


図7 $z=0.2$ から $z=1$ までの星質量とダークマターハロー質量の関係。実線とそのまわりの灰色の領域は、今回のCOSMOSの研究の結果を示す。

Chandra衛星のデータを使用して同定した[34]。この結果は、kpc（キロパーセク）スケールの銀河の近接相互作用が銀河中心の1天文単位（ $\sim 10^{13}$ cm）スケールの巨大質量ブラックホールへのガスの質量降着を誘発することを示している。これは、10の10乗ほども距離のスケールの異なる二つの物理過程が関連していることを示す。

B. Ménard、福来正孝と共同研究者らは、SDSSのデータを用い、赤方偏移で $z > 1$ にある85,000個のクエーサーと $z \sim 0.3$ にある2,400万個の前景銀河の相関関数を測定し、重力レンズによる背景クエーサーへの増光効果とダストによる赤化効果を同時に検出することに成功した[35]。重力レンズ効果は波長に依らないという事実に着目することで、相関関数の強度における波長依存性から赤化効果（青い波長ほど吸収が大きい効果）を検出することに成功し、前景銀河を取り巻くダストの存在量を明らかにした。このダストは、銀河まわりに付随する、あるいは銀河間の宇宙大規模構造に存在する全てのダストである。宇宙ダストは天文学における最難解問題の一つであるが、Ménardらはその空間分布を明らかにする新しい方法を開発することに成功した。さらに、銀河まわりの宇宙ダストの動径プロファイルは、10kpcから10Mpcという広い範囲にわたり、ダークマターの分布と同様であることも示した。この結果は、宇宙全エネルギーに対しての宇宙ダストの全質量が、 $\Omega_{\text{dust}} \sim 5 \times 10^{-6}$ であることを意味し、この存在量は典型的な明るい（ $\sim L$ ）銀河内に存在するダストの全質量のおよそ半分程度である。これらの結果は、宇宙の歴史における、平均的なダストの生成史に強い制限を与える結果である（B. Ménard & M. Fukugita, *ApJ*, **754**, (2012) 116も参照のこと）。

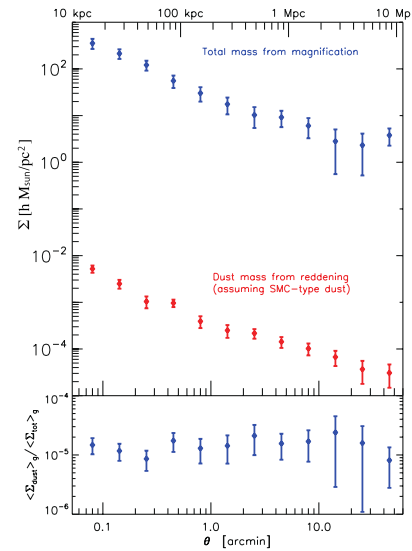


図8 i (i バンド) < 21 を満たす銀河のまわりのダストと全質量の平均表面質量密度。下図はダスト質量と全質量の比

研究成果 19: 初代星の形成とブラックホール

宇宙塵だけでなく我々のまわりの全ての物質（地球や我々の体）を含む、リチウムより重い全ての元素は星の内部や超新星爆発の際に生成された。Kavli IPMUでは初期宇宙での星形成および銀河形成の物理の理論的・観測的研究を行ってきた。最も重要な問題の一つは宇宙の第一世代の星の形成である。吉田直紀と共同研究者は物理の第一原理に基づき最先端のスーパーコンピュータシミュレーションを行い、熱いビッグバン以来存在した始原的組成の星間ガスから最初の星が形成される過程を明らかにした[36]。薄く広がった始原ガスから、熱核反応によって燃焼する巨大星が形成されるに至るまでの全過程を、基礎物理過程を取り入れた一続きのシミュレーションとして初めて遂行した。

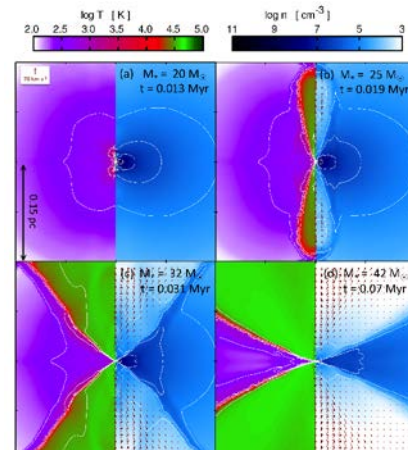


図9 初代星からの紫外線放射のフィードバック。ガス温度の空間分布(左)、数密度(右)、速度(右、矢印)をそれぞれの図に示す。4つの図はそれぞれ星質量が20太陽質量(a)、25(b)、35(c)、42(d)の時のもの。初代星誕生からの経過時間は、図中に示されている。(T. Hosokawa et al. 2011)

研究成果 20: 超新星と化学進化

ある種の星の一生の最後の現象、超新星爆発は豊富な観測的特徴を示す。しかし超新星爆発の物理機構はまだ未解決の問題である。野本憲一が率いる研究チームは長年にわたって超新星研究で世界をリードしてきた。前田啓一、野本と共同研究者はすばる望遠鏡の観測から超新星のサンプルを慎重に選び、数値的なシミュレーションと組み合わせ超新星爆発の物理を研究した[37]。タイプIa型の超新星(Ia型超新星)は観測的にほぼ一様な爆発現象であり、明るいものほどゆっくり減光するという性質を持つ。このように一つのパラメータで本来の明るさが記述できるため、Ia型超新星は宇宙論における標準光源として使われ、その観測結果は宇宙の加速膨張の発見につながった。しかし、Kavli IPMUの研究者はIa型超新星の物理はもっと複雑であることを明らかにした。Ia型超新星の観測から非対称な爆発であることがわかり、白色矮星の中心から離れた場所で爆発的核反応が生じることが示唆された。

ビッグバン元素合成の後、宇宙における最初の重元素の生成は、種族IIIの初代星の超新星爆発によってもたらされた。宇宙初期の元素の増加の歴史は、宇宙の初期に銀河系のハローで形成された長寿命の小質量金属欠乏星の元素組成に記録されている。最近行われた、いくつかの大規模探査によって多数の金属欠乏星が発見された。

野本と共同研究者は、鉄の含有量が極端に少ない星で観測された元素組成のパターンを解析して、宇宙の初代星の超新星爆発の理論モデルによって予測された元素組成と比較する研究を行っ

た[38]。この方法は、宇宙の初代星がどのような星であるかを解明する上で、大きな成功をおさめた。鉄の含有量が極端に少ない星では、炭素・酸素・窒素の鉄に対する存在比が非常に大きいという特徴を示すものが多い。この論文は、このような特徴は宇宙の初代星が太陽の20-50倍という質量を持ち、合成された元素の大部分が放出されずにブラックホールに落ち込んでしまうような超新星爆発を起こせば、よく説明することができることを示した。

超新星起源残存ニュートリノ (SNR) の信号は、過去の全ての超新星から発生した拡散背景ニュートリノである。この信号は未だ検出されていないが、原子炉からのニュートリノのエネルギーと大気ニュートリノのエネルギーの間隙、10 MeVから30 MeVのエネルギー範囲に存在すると期待されている。スーパーカミオカンデ (SK) を使って超新星起源残存ニュートリノを探索し、陽電子の全エネルギーが16MeV以上のフラックスの上限値、 $2.8 \sim 3.1/\text{cm}^2/\text{sec}$ を得たが、これは理論的モデルの予想の2~5倍以内である [39]。

この探索は、宇宙線によるバックグラウンドのために16MeV以上に限られている。さらに、16MeV以上には、大気ニュートリノによって生成された、チェレンコフ閾値以下のエネルギーをもつミュオン粒子の崩壊からの電子による、「見えないミュオン粒子のバックグラウンド」が多く存在する。現在SKは (SNRの信号としては) 陽電子のみ効率よく検出できる。しかし、もし中性子が検出できれば、SNR探索を制限しているバックグラウンドを大きく低減させることができる。これは中性子と陽電子の同時計数ができれば可能である。ガドリニウムは陽子よりおよそ5桁大きい49,000バーンの熱中性子断面積を持ち、SKで容易に観測できる8MeVのガンマ線を放出するため、0.2%のガドリニウム塩 ($\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$) を水タンクに入れることでこれは可能になる。

ガドリニウムをSKタンクに溶かし込んだ際の影響を調べるために、EGADS (測定器系のガドリニウムに対する反応の評価) と呼ばれるR&DプロジェクトがKavli IPMUの研究者によって、神岡鉱山で開始された[40]。2009年に開始されたこのプロジェクトでは、200 m^3 のステンレスの水タンクとその付属装置が建設された。このシステムには、ガドリニウムを残したまま、不純物を取り除く選択的な水のろ過装置、15 m^3 のプラスチック製の前置混合器と前置処理器と水による減衰率を計測する装置が装備されている。2013年2月6日から4月20日まで、この200 m^3 のタンクに0.2%まで段階的にガドリニウムを溶かし込んだ。 $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ が均一に溶解したのち、純水と比較して85%のチェレンコフ光生成率が得られ良好な水質が維持された。この溶解試験は、ステンレスのタンクに光電子増倍管を設置してガドリニウムの影響を測定する以前に行われた。2013年の夏、200 m^3 のタンクに240個の光電子増倍管を設置した。光電子増倍管のほとんどは、SKのタンクに設置されている直径20インチのものと同型の光電子増倍管である。SKと同じ防水措置と配線が行われた。光電子増倍管に対するガドリニウムの影響の試験は2014年の4月から開始された。

2-2. 拠点の施設・設備等の研究環境

「世界トップレベル研究拠点」としてふさわしい施設・設備、必要な研究支援体制等の研究環境の整備および機能状況について記述すること。

Kavli IPMUのための新研究棟 (5,900平方メートル) が大野秀敏教授によって設計され、2010年1月に柏キャンパスに建設された。この研究棟は我々の分野間にまたがる学際的研究の達成に大きく貢献した。全ての研究室が3階から5階まで螺旋状に繋がっていて、3つのフロアがあたかもひとつのフロアのようになっている。これによって、異なるフロアの人たちが互いに滅多に会わないという、よくある問題が回避される。研究室の割り当てに際しては、意図的に異なる分野の研究者が隣り合うようにしている。全研究者が同一の螺旋に沿って配置されているという意味で平等である。第53回BCS (建築業協会) 賞が大野教授と建築主に、2011年日本建築学会賞が大野教授に授与された。研究棟内の実験室スペースはBelle-II実験のシリコン崩壊点検出器の組み立てと、将来のニュートリノ実験の設計のための光電子増倍管のテストに使用されている。2009年3月から使用可能になったKavli IPMU神岡分室 (500平方メートル) はスーパーカミオカンデ、カムランドおよびXMASSで研究するKavli IPMU研究者の拠点として機能している。Kavli IPMU分室とサテライトはもとより、全ての連携機関はビデオ会議システムで繋がっていて、日常的にセミナーや議論に使われている。当機構はNAOJ、プリンストン大学、天文及天文物理研究所 (台湾) と共同

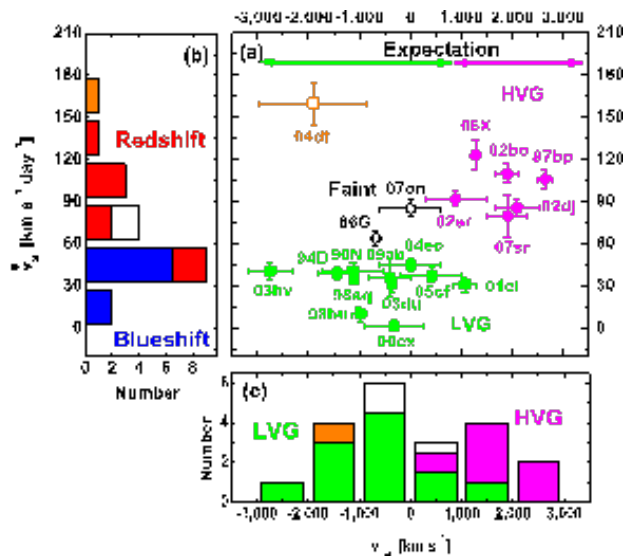


図10 Ia型超新星の初期と後期の特徴間の関係。初期の速度勾配 (縦軸) と後期の輝線の速度シフト (横軸) の比較。観測されたSN Iaの特徴には、低一高速度勾配 (それぞれLVGとHVG) と赤一青赤方偏移との間の違いがある。(K. Maeda et al. 2010)

で、大掛かりな宇宙論的観測のためのハイパー・シュプリーム・カムと呼ばれる870メガピクセルを持つ重さ3トンのデジタルカメラを製作した。

2008年3月に神岡に地下実験室を建設して、ゲルマニウム検出器、GC-MASSスペクトロメーター（ガス・クロマトグラフ質量分析装置）、API-MASSスペクトロメーター（大気圧イオン化法質量分析装置）などを設置した。これらは放射性不純物の評価や検出器構成要素のバックグラウンドの理解に大切な装置であり、地下実験を進めている研究者がよく使っている。

390平方メートルのKavli IPMU図書室は書籍とジャーナルを合わせて15,000冊以上の蔵書を有し、そのうちの90%が数学のあらゆる分野のものである。数学では100年前のジャーナルが今でも役立っている。物理学者が自分たちの問題を記述する『言葉』を見出すために数学の文献を読んでいる姿を図書室ではよく見かける。

2-3. 競争的資金等

拠点の研究者による競争的資金等研究費の獲得実績について記述すること。

・研究プロジェクト費の獲得実績の推移、および特筆すべき外部資金について[添付様式2]に記載すること。

村山齊は内閣府総合科学技術会議により選定された最先端研究開発支援プログラム(FIRST)と呼ばれる研究資金を獲得した。「SuMIRe」(Subaru Measurement of Images and Redshifts)と呼ばれるこの計画は、宇宙の起源と将来を解明するため国際協力で行われている大型観測プロジェクトである。鈴木洋一郎は数回にわたって研究資金を獲得し、暗黒物質を実験室実験で観測するため世界最大の液体キセノン検出器(XMASS)製作を成し遂げた。井上邦雄はカムランド測定器の中に小型バルーンを製作するための研究資金を獲得して、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の崩壊寿命に制限を与えた。中畑雅行はEGADS(Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems、つまり「ガドリニウムの測定器に及ぼす影響を評価する」ための試験装置の略)を製作するための研究資金を獲得し、50センチ光電子増倍管240本を使用する200トンサイズのスーパーカミオカンデ型測定器と新型の選択的水濾過装置を建設した。Mark Vaginsは近傍の超新星からのニュートリノを検出するためにEGADSを改造する研究資金を獲得した。

2-4. 共同研究の状況

国内外の研究機関との共同研究実績について記述すること。

Kavli IPMUのメンバーは広く他研究機関の研究者と共同研究をしている。例えば添付資料2に載せた最重要論文40篇のうち24篇が国外機関の共同研究者を著者として含んだものである。

当機構は幾つかの大型プロジェクトを主導している。SuMIReプロジェクトは村山齊(中心研究者)、菅井肇(プロジェクトマネジャー)、田村直之(プロジェクトシステムエンジニア)、高田昌広(プロジェクト研究者)の主導のもとでおこなわれているが、彼らは全員Kavli IPMU所属である。このプロジェクトには中央研究院天文及天文物理研究所(台湾)、NASAジェット推進研究所、カリフォルニア工科大学、プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学、マルセイユ天文物理研究所、サンパウロ大学、天体物理学国立研究所(ブラジル)、マックスプランク天体物理研究所から物理学者と天文学者の両方が加わっている。地下実験のカムランド(井上邦雄が主導)、XMASS(鈴木洋一郎が主導)、スーパーカミオカンデ(鈴木洋一郎、中畑雅行が主導)、加速器実験のBelle-II、加速器を使った長基線ニュートリノ振動実験T2K(東海から神岡の意味)、および宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測実験のPOLARBEARは全て大きな国際共同研究グループによって運営され、これら全てが既に世界レベルの科学的結果を得ている。

欧州連合の国際研究員交換計画UNIFYには2つの主たる科学目標がある。つまり、重力相互作用の量子力学的記述に関して新しい洞察を得ることと、宇宙論、ブラックホールの物理、ゲージ理論の分野における超弦理論と量子重力に関する最近の進展を探ることである。UNIFYにはパリのフランス国立科学研究センターの研究所群、ベルリンのフンボルト大学とアルバート・アインシュタイン研究所、スペインのサンティアゴ・デ・コンポステーラ大学、ポルトガルのポルト大学、カナダのペリメーター理論物理学研究所、アメリカのストーニーブルック大学ヤン理論物理学研究所とカリフォルニア工科大学、それにKavli IPMUが参加している。UNIFY参加の研究機関は多くのテーマを絞った作業プログラムを企画し、次世代の理論物理学者のトレーニングのための研究員交換を行い、提携メンバー間の長期にわたる共同研究を確立した。また、国立台湾大学のLeCosPA(Leung宇宙素粒子天文物理学センター)とKavli IPMUが素粒子天体物理学と宇宙論の分野で協力するための覚書に署名した。双方は弦理論に基づく宇宙論や暗黒エネルギー・暗黒物質の理論と観測などのトピックスで協力してきた。

2-5. 社会・学会からの評価

科学的成果に対する社会・学会からの評価について記述すること。

・主要な賞の受賞・招待講演・基調講演等を[添付様式2]に記載すること。

Kavli IPMUのメンバーにはアメリカ数学会、フンボルト財団、アメリカ芸術科学アカデミー、国際純粋・応用物理学連合などを含む国際的科学機関から認知を得てフェローなどに就任し

ている者がおり、また、ほぼ全員が主要な国際会議から講演を行うため招待を受けている。

Kavli IPMU研究者が次のような重要なレビュー論文の執筆を依頼されたことは特筆に値する。野本憲一（小林千晶、富永望と共著）「星内部の元素合成と銀河の化学的濃縮」Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **51** (2013) 457-509; 川崎雅裕、中山和則「アクシオン：理論と宇宙論的役割」Annual Review of Nuclear and Particle Science, **63** (2013) 69-95; 吉田直紀（V. Brommと共著）「最初の銀河」Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **49** (2011) 373-407、大栗博司（北野龍一郎、大河内豊と共著）「超対称性の破れとゲージ伝播」Annual Review of Nuclear and Particle Science, **60** (2010) 491-511; S. Petcov、中村健蔵「ニュートリノ質量、混合および振動」Review of Particle Physics, Physical Review, **D86** (2012) 010001。

日本学術振興会が2011年4月から6月にかけて行った調査によると関連分野の論文著者および調査事務局が選んだ著名科学者からの有効な回答（313名）の64パーセント以上が当機構の名前を、また39%以上が機構長の名前を知っていた。回答者の70パーセント以上がKavli IPMUの研究に加わることに「大変興味を持っている」あるいは「おもしろそうだ」と回答した。

2-6. 研究成果の社会還元

2-6-1. 研究成果の実用化など

成果の実用化、Innovationへの効果、IP実績、企業との共同研究等について記述すること。

我々の科学研究に使われる装置には前例のない要求が課されるため、産業を助ける突破口となるような機器開発につながる。世界最大のカメラと分光器の製作は多くの分野で技術面でのブレイクスルーを必要とした。キャノンは高精密非球面レンズを使って視野を0.5度から1.5度に広げる新しい補正レンズを開発した。これは半導体の新しい製作工程を可能にする。キャノンはさらに大幅な軽量化と宇宙技術に適した低熱膨張率を達成した京セラ製のセラミック素材を使いレンズ鏡筒を製作した。（赤方偏移の大きい遠方の銀河を観測する上で重要な）近赤外域で特にすぐれた感度を持つセンサーの開発は浜松ホトニクスとNAOJが共同でおこなった。これらの精密装置は宇宙空間に配備する機器などへの応用で極めて重要になるに違いない。

2-6-2. アウトリーチ活動

特色のあるアウトリーチ活動実績や特記すべき事項があれば記述すること。

・メディア報道掲載等の実績を[添付様式2]に記載すること。

Kavli IPMUは一般市民や高校生へのアウトリーチ活動に非常に熱心に取り組んできている。なぜなら我々の研究は一般社会の興味をそそり、科学リテラシーを改善し、若い知性を国の将来にとってきわめて重要な科学や技術、工学および数学に惹きつけると信じるからである。我々のアウトリーチイベントはこれまで22,000名以上の参加者を集め、高校生のためのスクール、特に女子生徒向けも企画した。さらに国内外のメディアから熱い注目を浴びている。これまでにメディアに取り上げられた数は1,000件を越える。当機構メンバーが執筆した一般向け科学書の販売部数は、計百万部に達しようとしている。

Kavli IPMUはスペースワーププロジェクト（Space Warps project）に参加している。これは誰でもインターネットを通じて実際の研究に加わることができる市民科学プロジェクトである。アインシュタインは、星のような重い物体がその近傍の空間を曲げて、通過する光の軌跡がカーブを描く、と予言した。これは「強い重力レンズ」と呼ばれている。この重力レンズの特徴を、重力レンズのように見えるが別のもので選別するには、現在のところ人間の目が最適である。宇宙観測が大々的になってきているので、市民科学者にこの重力レンズ探索の手伝いをお願いした。プロジェクト発足後1週間で5,000名を越える登録参加者の助けを得て、100万件以上の選別の通知を受け取った。大陸間にまたがって広がる51,000人以上の市民科学者からこれまでに1,800万件以上の選別の通知が届いた。彼らの助けを得て我々はいくつかの新しい重力レンズを発見した。強い関心を持つ一部の市民科学者たちは、重力レンズモデルを構築して重力レンズの理解をさらに深めるための手法をマスターした。

3. 異分野融合（3ページ以内）

3-1 拠点融合領域創出へ向け戦略的に行った取組み

毎日午後3時に研究棟3階の藤原交流広場で開かれるティータイムへの参加は拠点研究者のただ一つの「義務」である。ビジターも含めて、全ての研究者はティータイムに参加することを求められている。研究者が他の研究者と会い、他の分野の研究者と話しをし、リラックスした雰囲気の中でサイエンスを議論し、新しいアイデアを思いつく、大切な機会である。セクション2-2に記されたように、分野融合的な活動を推し進めるために研究棟自体、新たに設計された。

新たに教員を採用する際には全ての分野の教員全員が関わる。すなわち、候補者と面談し、候補者の講演を聞き、候補者が適当か議論する。これは候補者にとっても重要である。すなわち自分

の分野だけでなく、拠点の全ての分野の全ての教員を知ることができる。候補者が融合的なやり方で研究ができるかが、採用時の最も大切な判断基準の一つである。新しく着任した教員と博士研究員は、全員参加の会議で自己紹介をする。Kavli IPMUには分野ごとの組織はなく、機構の運営は縦割り主義を排除している。

3-2 研究者からの融合領域創出を促進するための取組み

日頃から、融合研究を促進するため異なった分野の共同セミナーが行われている。この種の共同セミナーとして、拠点全体のコロキウム、数学-超弦理論セミナー、天文-宇宙物理学-素粒子物理学セミナーの3つがある。数学-超弦理論セミナーでは、講演のはじめの25分は非専門家にもわかる入門編とし、5分の休憩を挟み、最後に60分の専門的な講演という独創的な方式を編み出した。この方式で、相互の理解が非常に深まった。我々は常にこの方式を改善したいという意欲を持っており、その有効性を常時モニターしている。さらに、融合的課題を研究する特定の領域を強化するために、インフォーマルなセミナーシリーズがある。堀健太郎と齋藤恭司が世話役を務める位相的超弦理論セミナー、戸田幸伸と上原北斗が世話役を務めるDMM(導来圏、ミラー対称性、McKay対応)セミナーなどである。2011年の秋には、数学者と天文学者が協力して重力レンズの解析における新しい数学的手法を開発し、データから最大量の情報を引き出すため、数学-天文学セミナーを始めた。

当機構全体のために、精選されたコロキウムを「融合的」として特に位置付けている。これは、機構の研究者全員に重要な話題に関して共に語る場を用意しようという、数年にわたる試行錯誤の結果である。例えば、2012年7月4日、天文学者と数学者を含む当機構の研究者の大部分がヒッグスポゾン発見をアナウンスするウェブキャストを見た。2013年3月14日にヒッグスポゾンが確認された後の2013年4月24日に、この進歩に刺激されて柳田勉がヒッグスポゾンについて解説し、全ての研究者から感謝された。

Kavli IPMUは融合分野のワークショップを数多く開催した。2010年2月に、当機構と物性研究所が共同で開催した「物性と素粒子の対話」というフォーカスウィーク・ワークショップから、当機構の超弦理論研究者(大栗博司)と、物性研究所の物性物理学者(押川正毅)の共同研究が始まった。その結果「*Instability in Magnetic Materials with a Dynamical Axion Field*」というタイトルの論文がPhysical Review Letters誌に発表された。「ホモロジー的射影対と量子ゲージ理論」というワークショップにおいて、ホモロジー代数と代数幾何学という数学の分野と、2次元量子ゲージ理論という物理学の分野の間の興味深く実り多い交流があった。「ランダウ-ギンツブルグモデルの幾何と物理」というワークショップでは、超対称量子場の理論と超弦理論の研究における重要なモデルを扱った。素粒子物理学と宇宙論との間で共通な問題を扱ったワークショップも幾つか開催した。例えば「フォーカスウィーク：重力とローレンツ対称性の破れ」、「超新星、暗黒エネルギーと宇宙物理学」ワークショップである。「幾何学と物理学における曲線と圏」ワークショップは幾何学者と超弦理論研究者とのフォーラムとなった。「暗黒宇宙の素粒子物理学」は、素粒子物理学と宇宙論の共通の問題である暗黒物質を扱った。2009年5月に開かれた「フォーカスウィーク：新しい不変量と壁越え」には32人の数学者と34人の物理学者が参加した。2011年2月に開催されたブラックホールに関するワークショップの参加者は、天文学的な観測から超弦理論とループ量子重力理論における量子的な性質まで、ブラックホールに関する広範囲の話題を議論した。ブラックホールの様々な側面について、多くの一流研究者が集まって十分な時間を使った議論であった。

HSCとPFSの探査で大規模のデータの生成が予定されていることを考えれば、統計学と天文学の共同研究は成功するであろうと信じている。我々は「宇宙物理学の統計的最先端」ワークショップを開催してこの連携を模索し始めた。さらに、我々は最近、統計数理研究所の統計学者と共同でJSTのCRESTプログラムに研究提案を行った。

3-3 異分野融合による研究成果

異分野融合研究の実績と成果の概要について記述すること。

- ・異分野融合研究についての主要な論文(20編以内)とその解説を[添付様式3]に記載すること。

拠点の目標の一つは、数学者と物理学者を結集し、共に自然界の根本原理の新しい定式化の方法を開発することである。しかし、物理学と数学の目指すものが大きく異なっていることは重要な事実である。言語だけではなく考え方が深いレベルで極めて異なっている。拠点に集結した研究者は、当然その違いに気づいており、その違いから生じる困難を克服するべく、常に努力を続けている。このような次第で、数学と物理学は「融合」されることにはならない。WPI作業部会は2011年の現地視察の報告書で、ノーベル物理学賞受賞者C. N. Yangのニュートン研究所における講演から次のように引用した。「数学と物理学は双葉のようなものである。二つは重なっている。成長するとその共通部分は大きくなる。それはそれぞれの葉が育ったからで、決して二つが一つの葉になることはない。」我々は全く同意見である。我々は実験物理学、理論物理学、天文学、そして数学の境界を取り去ることは試みないが、別々の学問分野の間で相互に刺激し合うために、常に意思の疎通をはかることを強く働きかけ、追求している。その結果、次第に数学者と物理学者の間に活発な

交流が生まれ、論文として実を結んだものもある。そのリストの一部が添付様式3に示されている。加えて、予期していなかったタイプの融合的な活動が生じている。宇宙論に欠かせないアインシュタインの相対論における微分幾何学の重要性に鑑みれば、純粋な微分幾何と位相幾何学が望遠鏡による観測からのデータの理解に強い影響を与えることは納得できる。更にHSCとPFSから予想される大規模データを解析するのに必要な統計の観点からも、天文学と数学の連携をより強化するよう努力する。

外から見れば理論物理学と数学は一見同じように見えるかもしれない。例えば、どちらも数式を用いる。しかし現実には、二つの分野の研究者はそれぞれの分野における過去200年の発展の間、別の道を辿って離れてしまい、今ではかなり異なるそれぞれの言語を話す。従って、物理学の予想をうまく定式化された数学の予想に翻訳するには、あるいは数学の証明を物理の理論に逆に翻訳するには、極めて大きな努力が必要となる。互いに理解し合うことに熱心な理論物理学者と数学者がいつでも一緒にいるKavli IPMUは、この翻訳を行うには理想的な環境である。

このために、立川裕二、堀健太郎、大栗博司など数名の鍵となる「通訳」がいる。2012年の春学期に、立川は当機構で物理学者と数学者の間の議論が促進されるようにAlday-Gaiotto-Tachikawa予想の初歩についてのインフォーマルなレクチャーシリーズを行った。レクチャーの途中、講師と聴衆の間で、ある物理の概念を数学の言語に最適な形で翻訳するにはどうすれば良いか、活発な議論が頻繁に起こった。このレクチャーシリーズのおかげで、立川は数学の言葉話すことのできる物理学者として、拠点の数学者だけでなく、数学コミュニティー一般に知られるようになった。このため、彼は他大学の数学科での講義や数学の研究集会での講演を数多く頼まれるようになった。とはいえ、まだこの活動から直接的に査読付論文として出版されたものはない。このタイプの融合的なやり取りの結果が学術的論文となるためには何年にも渡る準備期間が必要であるが、少なくとも拠点がホストする立川のウェブページから、査読出版されていないレクチャーノートを手に入れることは可能である。

「超対称局所化」、すなわち、ボゾン変数とフェルミオン変数の経路積分間の相殺を使って、曲がった多様体上の超対称場の理論の分配関数を厳密に計算することが、最近再び盛んになっている。Kavli IPMUの研究者は2次元超対称ゲージ理論において厳密結果を得る上で指導的な役割を果たした。赤外固定点として現れる超共形場の理論が超弦の世界面上の理論として使えることから、これらの厳密結果は非常に重要である。[5]で、M. Romoと共同研究者は、F. BeniniらとDoroudらによって計算された2次元球面上の分配関数が超弦理論の真空のモジュライ空間上のケーラーポテンシャルを決定することを発見した。この論文は数学者と物理学者の共著である。堀とRomoは引き続いて半球面上の分配関数を計算し、その結果、境界に置かれたDブレーンの中心電荷に対する厳密な一般式が得られた[24]。[10]で、R. Eager、堀と立川はBeniniと共に2次元トラス上の分配関数を計算し、楕円種数の一般的な式を得た。堀とJ. Knappはこれらの結果を使って双対性を調べ[23]、この理論の有用な情報を得た[13]。これらの結果はKavli IPMUがなければ得られなかった。実際、BeniniとDoroudらの2次元球面上の分配関数の計算は、部分的に堀の仕事[23]に動機付けられている。一方で、超弦理論の手法を使ってA. P. Braun, 木村裕介と渡利泰山はピカル数の大きなK3曲面上の楕円曲面の構造の分類を行った[14]。

物理に動機付けられた数学の論文もある。戸田幸伸は、Gepnerがカラビ-ヤウ多様体上で世界面上の共形場理論を構成したことに動機づけられて、三角圏のGepner型Bridgeland安定性条件の概念を導入した[6]。この論文は、物理の論文を多数引用し、堀と大栗に謝辞が述べられている。斎藤恭司は、物理におけるイジング模型に基づいた不連続群の幾何学理論への新しいアプローチを提案した[7]。

また、我々は現地視察ワーキンググループに励まされて固体物理学者との融合研究に踏み込んだ。同じキャンパスに隣接する研究所である物性研究所と共同で開催したワークショップを契機として、大栗は固体物理学者の押川正毅と共著の論文[15]を書いた。アクシオンは理論的に提案されている粒子で宇宙の暗黒物質の候補の一つである。彼らは磁性体の中のアクシオンの励起がおき、電場をかけるとそれが不安定性を起し、かけた電場を遮蔽することを指摘し、この効果をいかにして実験的に観測するかを示した。村山は固体物理学者の渡辺悠樹（と原子核物理学者のBrauner）と共著で4本のフィジカル・レビュー・レターズ[18]を含む一連の論文を書いた。連続的な対称性が自発的に破れると、南部ゴールドストーンボゾン（NBG）と呼ばれるギャップレス励起が起こることは半世紀以上も前から知られていたが、これらの励起の数と振舞いを一般的に説明する理論は存在しなかった。村山らがこの問題を解決した[28]後に、多くの応用が生まれた。例えば、内部対称性と空間的な対称性の組み合わせでは、彼らがネーター拘束と名付けた演算子の従属性のために、生ずるNGBの数が減ってしまうことを明らかにした。回転するポーズ・アインシュタイン凝縮体中の渦格子は、明らかにこの現象を示す。超対称性ゲージ理論のBPS状態と同様にギャップのある状態も厳密に調べられる[17]。高柳匡は境界上の共形場の理論のホログラフィック双対を使ってエンタングルメントエントロピーを計算する強力な手法を開発した[16]。これを使って、量子ホール効果のAdS/GFT対応を用いた記述や[27]を含むその他多くの研究成果を生み出すに至った。

天文学と数学の融合においては、予想もしなかった研究が生まれた。当機構は、弱い重力レンズ効果を使って宇宙論を研究するために、すばる望遠鏡に搭載されるHSCカメラによる撮像サーベイに重点的に取り組んでいる。重力レンズは、(主として)暗黒物質の質量分布の存在によって、

空間が歪むために起こる。前景の質量分布によって、背景のイメージがどのように歪むかは、微分幾何学の明確に定義された問題であり、ガウス-ボンネの定理により、像の数については厳密な解さえ得られている。M. Wernerは、これまで天文学と数学の研究歴があり、ガウス-ボンネの定理を使ってカー解の赤道面上の光の屈折を決定する幾何学的方法を発見した{1}。さらに、天体物理学者とともに、宇宙のポイド（銀河をほとんど含まない領域）の分布に関する新しい数学のモデルを開発した{2}。最近の広域銀河探査によれば、銀河分布の大規模構造は様々な大きさの複雑な糸状の構造とポイドのように見える。Wernerらはユークリッド3次元空間の球に4次元ドジッター計量の幾何の概念を適用して、観測された宇宙ポイドのサイズと数の分布を再現できると提案した。幾何学の先進的手法のブラックホール{19}や暗黒物質への応用は非常に重要である。

分野融合的活動の最も良い実例が当機構定例のティータイムから生れた。R. Quimbyは、新しい種類の超新星で「超高輝度超新星」と呼ばれる最も明るいものを発見した天文学者である。彼は米国主体のPan-STARRSグループが観測した超新星PS1-10faxが更に明るい新しい種類の超新星であるとの主張に当惑したが、直ちに観測された光度曲線とスペクトルが標準のIa型超新星に似ているが、明るさが30倍であることに気づいた。Wernerは、観測された超新星の視線方向に、観測されていない物体があれば、重力レンズによる増光で30倍明るくなることは数学的に可能であることを指摘したが、実際問題としてそのような可能性は信じがたいように思われた。しかし、SDSSの大規模データセットを使った研究の経験を有する物理学者、大栗真宗は、Pan-STARRSのデータセットの中に一つ位はそういうことが起きる可能性があることを素早く概算してみせた。彼らはKavli IPMUの他の超新星の専門家も交えて、このティータイムでの議論に基づいた解釈を論文として発表した{3}が、Pan-STARRSグループが自説に固執したため、しばらくは議論の的となった。超新星が十分暗くなった約1年後、Quimbyらは、10mのKeck-I望遠鏡を使って、母銀河を観測し、正確に視線方向の前景に、以前は分離できていなかった暗い銀河があることを示した{4}。この結果はサイエンス誌に掲載され、国際的に50以上のメディアに取り上げられた。

加えて、当機構の融合的環境から、予想もしなかった方向への展開があった。S. J. DeDeoはKavli IPMU在職時、宇宙物理学の研究中に身につけた数学的手法を他の分野に応用し、数学のゲーム理論を使ってサル社会の闘争の研究をした{20}。このようなスピノフは計画し予想することが困難であるが、Kavli IPMUにおける基礎研究が広い科学の分野へ幅広く影響を与え得ることの実際の証拠である。

4. 国際的な研究環境の実現 (4 ページ以内)

4-1 国際的頭脳循環

4-1-1 海外で活躍する世界トップレベルの研究者の拠点滞在実績

海外世界トップレベル研究者の主任研究者としての参加、共同研究者としての滞在について記述すること。

・全研究者中の外国人研究者数とその年次推移を[添付様式4]に記載すること。

我々は機構の立ち上げ当初から国際的に認知されるための鍵は、世界中から第一級の研究指導者と才能に恵まれた若手研究者を招へいし、異なる分野の研究者が互いの「言葉」を理解し、共通の目標に向かって研究を行う環境を構築することであるという固い信念をもっていた。我々はそうした魅力的な研究環境を Kavli IPMUに創り上げている。まさに「頭脳循環」の核として機能しているものである。2013 年度において機構には18名の主任研究者（内28%にあたる4名は外国籍）がおり、全員世界トップレベルの研究者である。A. Bondalは導来圏理論の提唱者であり分野をリードしている。この理論は数学、数理物理学、弦理論といった広い範囲にわたって、大きな影響を及ぼしている。彼は（ロシア・Steklov数学研究所との）ジョイントアポイントメントによる教授で、年に6ヶ月間、Kavli IPMUに滞在している。S. Katsanevasはニュートリノ物理、宇宙素粒子物理などを研究している。現在、彼はパリ第7大学宇宙素粒子物理及び宇宙論研究所（APC）の所長を務めており、Kavli IPMUと欧州関係研究機関との橋渡しにおいて非常に大きな貢献をしている。D. Spergelは世界で最も優れた宇宙物理の理論家の一人で、HSCやPFSの執行委員会のメンバーになっており、またKavli IPMUの科学諮問委員でもある。彼はプリンストン大学宇宙物理学科長であり、管理運営面でも協力していただいております。年に数回、当機構を訪れている。H. Sobelはニュートリノ物理の世界的リーダーの一人であり、スーパーカミオカンデ、T2K実験に積極的に参加して、年に数回神岡分室を訪れている。

当機構の研究者の大多数は外国人であり、多数のメンバーが世界レベルであると考えられる。ファカルティメンバー、博士研究員、長期ビジター、大学院生を含む研究者245名の所属メンバーの内、99名（41%）は外国籍である。WPI補助金から給与を支給されている研究者に限定すれば、92名の内、外国籍は55名（60%）となる。年平均で約800名のビジターが当機構を訪れる。それぞれの年のビジター数は以下の表の通りである（同一研究者の年度内複数回の訪問は1回と計算）

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
全数*	168	372	432	862	630	835	1017
外国人	65	103	345	478	392	497	544

(*公開版作成時修正)

ビジターの多くは世界レベルである。Kavli IPMUが活発な知的交流のハブであるために、当機構は若手研究者を刺激する世界的に著名な研究者の招へいを行ってきた。ノーベル物理学賞受賞者ではGeorge Smoot (2010年)、Jerome Friedman (2011年)、David J. Gross (2009年、2011年)、Brian P. Schmidt (2012年)らが、またフィールズ賞受賞者ではShin-Tung Yau (2009年)、Maxim Kontsevich (2010年)らが来訪し、講演やセミナーを行っている。特筆すべきこととして、CERNのLHC実験におけるATLASグループ前代表者である Fabiola Gianottiが2013年に、また2014年にはワープする異次元の理論家として一般にもよく知られているハーバード大学のLisa Randallが来訪、研究者向けセミナーとともに、女性の科学研究への参加を呼びかける一般講演会などのアウトリーチ活動にも携わった。

当機構は一流の研究者を惹き付けている。一例だが、Yale大学の正教授であったM. Kapranovを最初のテニユアポストの一つに呼ぶことができたことを我々は非常に誇りに思っている。彼は高次圏論の第一人者であり、また最近の多くの重要な数学的概念の陰の推進者であることから当機構の国際的位置を大幅に高めるものとなっている。M. Hartzはニュートリノの研究者で、米国フェルミ国立研究所のWilson Fellowというアメリカの素粒子実験では最も名高いものの一つであるポストのオファーがあったにもかかわらず、当機構で採用することができた。また当機構はK. BundyとA. Leauthaudの天文学者カップルへのポーツマス大学からテニユア講師職のオファーに対抗し、また同じく天文学者のS. Moreへのインドからの二つのテニユアトラックのオファーに対抗して、彼らを引き留めることに成功した。Moreは当初、アメリカの天文学で最も名声の高い博士研究員ポストであるHubble Fellowshipのオファーを断って当機構の5年間の博士研究員として着任したことに留意されたい。これらは、世界の他の場所ではできない、当機構の素晴らしい研究プログラムの証しとなっている。さらに言えば、当機構はファカルティメンバーである戸田幸伸、高田昌広、阿部知行への国内の他研究機関からのオファーに対抗して、彼らを引き留めた。

4-1-2 若手研究者の採用・就職状況

ポスドクを含む若手研究者の採用・就職の状況について記述すること。

・ポスドクの国際公募の実施と応募・採用状況、外国人ポスドク比率、ポスドクの就職先の実績を[添付様式4]に記載すること。

世界の最優秀な頭脳を動かし、循環させるための我々の方針は次のとおりである。すなわち、Kavli IPMUに優秀な若手研究者を博士研究員として雇用し、最良の研究環境を提供することで3年間の任期中に傑出した成果を挙げて、ファカルティポジションあるいは世界中の名高い研究機関の博士研究員の有力な候補者となるようにすることである。毎年、平均して700名近い博士研究員候補の応募があり、そのほとんど(90%)が海外からの応募である。WPI経費で毎年新規に採用する博士研究員は平均18名で、海外からの採用が80%に上っている。2013年度末までに採用した博士研究員総数107人のうち、82人(80%)が外国人である。常に40名程の博士研究員がKavli IPMUでの研究生活を行なっている。

これだけ多くの応募者、新人採用があることには幾つか重要な要素がある。まずは採用時期等のタイミングを欧米と同じとしていることである。つまり秋に公告、冬に採用の打診、次の初秋に採用というサイクルである。academicjobsonline.orgという世界公募ウェブが使えるようにしたが、米国以外の機関がこのウェブを利用できるようにしたのは我々が最初である。また、独自のオンライン応募用データベースシステムも開発し、今では他の国内機関でも使われている。我々の採用条件通知には米国のトップレベルの研究機関と競合し得る給与条件に加え、機構の基本ポリシー、外国人サポートシステムなどの詳細が記述されている。

ファカルティを採用する場合は、米国のやり方を踏襲している。できるだけ多くの応募者の目に留まるように、出版物、ウェブ、世界中のシニア研究者たちとの個人的関係を駆使して四方八方手を尽くす。候補者は「買い手市場ではなく売り手市場で売りに出ている」ので、特別待遇をしている。つまり、我々の候補者リストに載る人たちは、同時に他の一流研究機関の候補者にもなっているわけであるから、歓迎され、必要とされていると汲み取ってもらうことが採用する上での非常に重要な要素だということである。リストに載った候補者は Kavli IPMUに招待され、研究発表を行い、ファカルティメンバーと個別にそれぞれ30分から60分程度の面接を行う。このとき我々は候補者を評価する一方、候補者に当機構の研究環境が優れていること、また当機構に勤務している間、手厚い職務上の支援を受けることについても確信を持ってもらうことに努める。契約期間は協議により決められる。さらにパートナーがいる場合には、できる限り職を見つけれられるよう力を貸す。

今やKavli IPMUに所属することがキャリアパスとして申し分ないことは明白である。これまで採用した107名の博士研究員のうち63名がKavli IPMUを去っており、中には3年間の任期終了以前に移った者もいる。当機構は世界中の数多くの研究機関から博士研究員を採用できており、彼らの多くは次のようなトップレベルの研究機関から採用された。即ち、米国ではハーバード大学、プリンストン大学、MIT、カリフォルニア州立大学バークレー校、カリフォルニア工科大学、シカゴ大学、欧州ではユニバーシティ・カレッジ・ロンドン、アムステルダム大学、ロードビッチマクシミリアン大学、ETH、それ以外の地域ではソウル国立大学、チリ大学、サンパウロ大学やインドのタタ研究所などである。Kavli IPMUを去った63名の博士研究員のうち、28名は既に

次のような研究機関のファカルティ職に就いている。即ち、マギル大学、アリゾナ州立大学、アイオワ州立大学、全南国立大学、浙江大学、香港大学、横浜国立大学、神戸大学、九州大学、東北大学、京都大学、筑波大学、東京農工大学、NAOJ（国立天文台）、などである。30名は著名な研究機関、例えばCERN、プリンストン大学、ケンブリッジ大学、カリフォルニア工科大学、マックスプランク研究所などで次の博士研究員ポストに就いている。

Kavli IPMUの若手ファカルティメンバーに関しては、高橋史宜が東北大学准教授に、前田啓一が京都大学准教授に、A. MikhailovがブラジルサンパウロのEstadual Paulista大学理論物理学研究所の助教に、吉田直紀が東京大学理学系研究科の最年少教授に、高柳匡が京都大学基礎物理学研究所の最年少教授に、杉本茂樹が同じ基礎物理学研究所の教授に、そして立川裕二が東京大学理学系研究科の准教授にそれぞれ就任している。

4-1-3 国外サテライトおよび連携機関等

・国外サテライト、連携機関等との協定締結状況について[添付様式4]に記載すること。

Kavli IPMUのカリフォルニア大学バークレー校サテライトは、村山機構長により仲介され東京大学とカリフォルニア大学バークレー校との間で締結された全学国際学術交流協定に基づいて、2009年12月にバークレー・キャンパスに設置された。このサテライトはKavli IPMUとバークレー校物理学科の間で素粒子物理学、宇宙論、数学を含む幅広い分野での共同研究を行うための枠組みを提供する。最初の活動は超弦理論と現象論の両方を含む素粒子論の分野において行われている。スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) においては、さらなる共同研究がバークレー校サテライトで進められている。またこのサテライトがKavli IPMUの研究スタッフ候補者のアメリカでの発掘を容易にする役割を果たしている。

村山がバークレー滞在中（年30%）は半分の時間をサテライトで過ごし、サテライトの2名の研究リーダー（IPMUから柳田 勉、バークレーからL. Hall）の補助を得てサテライトの研究活動全体の指導を行う。グループには他に7名のファカルティメンバー、10名程の博士研究員と20名程の大学院生がいる。野村泰紀、L. Hall、村山とS. Rajendranは柳田 勉、松本重貴、野尻美保子と素粒子現象論で、また M. Aganagic、R. Bousso、O. Ganor、P. Hořavaは大栗博司、堀 健太郎、S. Hellermanと弦理論でそれぞれ共同研究を行う。

サテライトにおける研究活動の結果として年に2、3件の共同研究論文が発表される。さらにKavli IPMUとサテライトの10名以上の研究者が相互訪問してさらに共同研究を進めている。

他に15の連携機関と数学、物理、天文分野における協定締結を行っており、その中にはプリンストン大学（米）、DESY（独）、TRIUMF（カナダ）、精華大学（中国）などが含まれる。特にTRIUMFとKavli IPMU間で2012年に、将来性のあるジョイントポジションに関する新しく独創的な合意を取り交わした。この合意に基づき、2013年にトロント大学の非常に優秀な博士研究員がKavli IPMUのテニユアトラック職である助教に就き、自身のニュートリノ物理実験をスタートさせた。その他にも、国際共同研究プロジェクトに関する多くの合意を結んでいる。例えば、SDSS-IIIとIV、インタリム・パロマ・トランジェント・ファクトリー (iPTF)、Kavli IPMUのリーダーシップで進められるすばる望遠鏡搭載の主焦点超広視野多天体分光器 (PFS) 等々である。

4-2 国際シンポジウム、ワークショップ、研究会、講習会等の実績

・主な国際的研究集会の開催実績について[添付様式4]に記載すること。

Kavli IPMUはWPIプログラム開始当初から、毎年多くの研究会、ワークショップ、セミナーを主催してきた。それぞれの年にKavli IPMUで開催された国際研究集会は以下の通りである。2007年4件、2008年7件、2009年12件、2010年16件、2011年12件、2012年11件、そして2013年15件である。2013年に注目してみると計15回の会議の参加者総数867名のうち45%にあたる389名は海外の研究機関からの参加である。こうした研究集会のテーマと講演者はその時々ホットな内容を中心に、参加者による議論が活発で質の高いものになるよう注意深く選んでいる。こうした国際研究集会の中でも、“物性と素粒子の対話”（2010年、40名の海外参加含む総数200名の参加）、“CLJ2010: 巨大銀河の形成から暗黒エネルギーまで”（2010年、107名の海外参加含む総数160名の参加）や“原始形式とそれに関連する諸課題”（2014年、41名の海外参加を含む総数81名の参加）といった研究集会は特に質の高い、活発な議論がなされた例である。

同時に、Kavli IPMUの研究者は国内外の研究機関や研究集会において多くのセミナーや講演を行っている。それは国際的研究者コミュニティにおけるKavli IPMUの存在感、注目度を高める結果につながっている。

さらに我々の活動は東京大学の大学院プログラムの国際化に大きなインパクトを与えている。我々のファカルティメンバーは、既に理学系研究科と数理科学研究科の大学院教育に大学院生の指導、並びに講義により貢献している。また、我々は2つのリーディング大学院プログラムに関与している。“数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP)” と “フォトンサイエンス・リーディング大学院 (ALPS)” である。このプログラムでは東京大学の大学院生に当機構の国際的、融合的な環境下で融合的研究の機会を提供する。例えば、Kavli IPMU-FMSPの“幾何学と数

理物理学”の教育的(チュートリアル)ワークショップには約50人が参加し、その大部分は若手研究者と大学院生であった。また別のKavli IPMU-FMSPによる“物理と数学におけるミラー対称性”では幾何学と場の理論における例外特異点の原始形式と関連する諸課題に関する講義が行われた。講義は全て英語で行われており、それは若手研究者と大学院生にとって重要なトレーニングになっている。さらに当機構の外国人教員が物理学科において英語論文の執筆講座を行っており、大学院生の間でとても評判になっている。これまで110名を超える学生が受講している。

4-3 外国人研究者への研究生活支援体制

例えば多言語による生活支援、家族の生活支援等、外国人研究者が研究に専念できる環境を整備する取組みについて記述すること。

Kavli IPMUは外国人研究者が日本で研究生活をする上での支援を積極的に行っており、彼らが学術的研究を開始し、集中できるように務めている。支援は日本における生活を始めるにあたって必要となる次のようなことである。

- ・到着前に在留資格認定証明書と教授ビザを取得すること。
- ・日本におよびKavli IPMUにおける生活のための詳細なオリエンテーションを行う。日本の慣習である敷金・礼金、研究費補助金の申請システムなど。
- ・役所での住民登録には、当機構のスタッフが付き添い外国人住民登録を手助けする。
- ・住居探しにあたっては英語を話せるスタッフが不動産業者と段取りをつけ、また当機構のスタッフがしばしば物件の下見や契約に同行する。
- ・銀行口座の開設やクレジットカードの取得。多くの銀行は英語での申請書類を用意していない。
- ・携帯電話の契約の際、当機構のスタッフが協力。
- ・キャンパスでの保育に対する説明を行なう。特に授乳が必要となった時の電話連絡等。
- ・急病、妊娠等を含む日常生活に必要な様々な事態への対応、支援。
- ・新任者、その家族への日本で生活して行くための無料日本語教室。さらに日本語を深めたい研究者向けの上級クラスも用意されている。

常勤研究者には、インターナショナルスクールに通う子女の学費を半分補助している。これは日本の公立校のシステムでは子供達が大変な困難に苦しむためである。外国人研究者支援を行なっているモデルとして、多くの研究機関が当機構のスタッフを訪問している。

ビジターについては、滞在中に起こる平凡ではあっても自明ではない問題を助けることが必要である。我々は 機構のウェブサイトで、英語、日本語両方によりビジターおよび被雇用研究者向けに、安全を含む専門的活動および日常生活に関する事項について役に立つ情報を提供している。こうした試みは大学に高く評価され、Kavli IPMU事務部門として東京大学業務改革総長賞を2008年、2013年の2回受賞している。上に述べたこと以外にも、大学はKavli IPMU研究者への住居確保について特別な対応をしている。2010年3月に利用を開始した柏インターナショナルロッジにはKavli IPMUに16室が割り当てられた。我々はさらに外国人支援24時間サービスセンターとも契約を結び、より充実した生活支援を行なっている。

Kavli IPMUの事務スタッフは、外国人研究者の外部研究資金の応募書類作成を助けていることに留意されたい。応募書類をどのように書けばうまくゆくのか講習会を行い、日本語での記入が必要な場合は支援を行なう。こうした努力は外国人研究者が特段の障害なしに科研費等の外部研究資金獲得を目指すことにつながり、その結果2013年度には応募した29名の外国人研究者のうち8名の若手研究者が科研費を獲得している。採択率はおよそ30%で、Kavli IPMUの日本人若手研究者とほとんど同じレベルである。

4-4 その他

日本人研究者への国際経験の促進策や、世界的な頭脳循環を背景として当該拠点が研究者のキャリアパスに組み込まれている好例があれば記述すること。

Kavli IPMUでは、全ての常勤研究者が毎年1ヶ月から3ヶ月は海外で過ごすことを義務付ける方針をとっている。この方針は研究者、特に若手研究者に、海外での国際会議やセミナーで講演をすることにより自分の注目度を上げる機会を十分に与えるものである。これは彼らにとって国際研究者コミュニティからの認知度を高めること、並びに今後のキャリア向上のためのチャンスを得る機会を増すことに大きく資する。当機構はスタートアップ研究費として年間50万円を供与するが、意図的に旅費の全てをまかなうには不十分な額としている。若手研究者は自ら先方の研究機関と交渉して講演のための旅費の援助と機会をアレンジすることになっている。そうでなければ先方から単に“お客さん”として扱われることになり、十分な注目を得られないであろう。このやり方は、当機構の博士研究員が他の研究ポストに職を得る割合から見て、明らかに効を奏している。外国からのビジターが非常に多いことも若手研究者が顔を売る機会になっている。アメリカ人の博士研究員の中には、著名な研究者に会う機会はアメリカの典型的大学よりもKavli IPMUの方がはるかに多いと言う者もいる。

こうした環境は、若手の研究者が研究の国際的情勢および将来のキャリアパスについて学ばせて役に立っている。一例を挙げると、Kavli IPMUの若手博士研究員がプリンストン高等研究所に移って研究成果を挙げ、数年後にKavli IPMUのファカルティとして戻ってきている。その後、彼はKavli IPMUに在籍のまま、再びプリンストン高等研究所に行き、共同研究をさらに発展させている。

Kavli IPMUを通じた研究者の循環の好例を二つ挙げる。

1. 一人の数学者がカリフォルニア大学バークレー校で学位を取得し、MITで講師として教育経験を積んだ後、Kavli IPMUに博士研究員として着任した。Kavli IPMUで2年間研究した後、彼は筑波大学のテニュア助教として採用された。
2. もう一例は、Kavli IPMUとTRIUMFとの取り決めに基づき研究者の循環を促すという新しいアイデアである。応募者は、最初の5年間はある比率で分けたエフォートに従い双方の研究機関でテニュアトラックとして研究を行う。5年後、応募者がどちらかの研究機関のパーマネントポジションに就くか選ぶことができる。2013年に優秀な博士研究員がこの新しいポストに就き、75%をKavli IPMUで、残りをTRIUMFでという条件で研究を開始した。

当機構は、若手研究者が海外で経験を積み、注目される機会を得るように支援するため、ファンディング・エイジェンシーからの資金獲得を積極的に競っている。日本学術振興会のあるプログラムで8,600万円を獲得し、88人の若手研究者を海外に送り出し、その内16人は2ヶ月以上海外に滞在した。

5. システム改革 (3 ページ以内)

5-1 意思決定機構

拠点長の強いリーダーシップによる拠点運営とその効果、ホスト機関側の権限の分担との関係について記述すること。

機構長は世界中から最も優秀な研究者を雇用するとともに、研究者コミュニティ、一般社会の双方に対して当機構で行われている研究の情報発信に努めることにより、機構の地位を高める努力を続けている。この目標達成のため、機構長は執行部会、運営委員会、科学諮問委員会、外部諮問委員会からそれぞれ異なるレベルでの助言を得ている。

執行部会は機構長、参与、2人の副機構長、事務部門長から構成され、月1回程度の頻度で定期的に開催され、日常的事項の円滑な執行および迅速な意思決定を確実に行う。また、執行部会のメンバーは機構長が直接大学総長室と連絡、協議する際に重要な役割を果たす。

科学諮問委員会は参与、2人の副機構長、5人の主任研究員で構成されている。新しいファカルティの採用、研究資金の配分およびKavli IPMUの研究戦略の策定に関して機構長に助言する。外部諮問委員会は国際的に著名な優れた専門家7人で構成され、年に少なくとも1回は会議を開き、Kavli IPMUの研究活動と成果に関して、大学総長に貴重な助言を行っている。

2011年1月に東京大学国際高等研究所 (TODIAS) が設立され、Kavli IPMUが最初の研究機構となった (「5-3. WPIにより進めたシステム改革と波及効果」参照) が、これによるKavli IPMUの意志決定システムの変更はなかった。運営委員会は執行部会のメンバーと数人の主任研究員で構成され、ファカルティの人事委員会として機能する。議決事項はTODIASの運営委員会に報告される。

2014年2月1日には、東京大学の支援のもと、研究戦略室を立ち上げた。外部資金獲得により研究活動を強化するため、直接機構長に報告する。研究戦略室の活動を開始するため新たにリサーチ・アドミニストレーターを採用した。

5-2 事務支援スタッフの配置および適切な支援体制の整備

英語その他必要な専門性を有する事務支援スタッフの配置並びに適切な体制の確立への取組みとその効果について記述すること。

機構設立当初から機構長は、国際的な研究者たちが研究だけに没頭できる環境、すなわち“研究者天国”を作ることを強く望んだ。多くのバイリンガルが事務部門スタッフとして採用され、研究者たちが日本で研究生活を始めるための十分な支援ができるようにした。

2013年の時点で事務部門職員数は40名で、そのうち30名がKavli IPMUで直接採用された研究支援職員、9名が東京大学事務部門に所属する職員である。日常の事務的事項は事務長の補佐を得た事務部門長の統括のもとで事務部門が執り行う。構成は総務人事係に11名 (広報担当2名、リサーチ・アドミニストレーター1名、秘書1名を含む)、経理係3名、国際交流係9名 (シンポジウム担当1名、日本語教師1名を含む)、予算管理係3名、契約係4名、神岡分室事務室3名、計算機およびネットワーク担当2名、図書担当1名、企画評価担当2名である。

40名の職員のうち半数の20名がバイリンガル (内2名は3ヶ国語に対応)、3名が素粒子物理学のバックグラウンドを持つ。このチームが新採用者や訪問者、特に外国人の受け入れの全ての手配を行う。また国際会議やワークショップの開催、研究資金の応募書類などの書類作成を支援

する。さらに公開講座、あるいはKavli IPMUニュース発行、様々な情報が掲載されているホームページの更新などの広報活動も行う。

広報グループは、東京大学本部広報室と連携を取って、報道発表、記者会見を適時行っている。海外発信の手段も確立している。我々は世界の主要な素粒子物理研究所が組織し、世界中の報道機関に発信する interactions.org というネットワークの一員になっている。また、カブリ財団を通して、米国で AAAS によるユーレカアラート、欧州ではアルファガリレオに記事を投げ込むことができる。

職員の中には、サーバー管理等、コンピュータ関連の専門家が3名いる。内1名はアーティストで、研究者が論文を発表したり報道発表を行う際の、映像、画像作成をアシストしている。また別の職員は音楽に長け、Kavli IPMU オーケストラを組織している。さらに、財務感覚があり、かつ対人関係の良さから個人寄付者の方々の信頼を得た職員もいる。

当初からの機構長の提案であった毎日午後3時のティータイムは、今やKavli IPMUの健全な習慣となっており、研究者間の分野を越えた、気楽な議論の場として機能している。事務部門の職員たちが毎日のティータイムの組織的運営を支えている。しばしばティータイムでの議論によって領域を越えた論文の出版が促されている。

5-3 WPIプログラムにより進めたシステム改革と波及効果

WPI拠点による研究運営上若しくは組織運営上のシステム改革事項とその背景・効果について簡潔に箇条書きで記載すること。またホスト機関全体への波及効果を記述すること。（他機関への波及効果もあれば記述すること）

TODIAS（東京大学国際高等研究所）がWPIプログラムの刺激によって実現できた極めて重要なシステム改革であることは強調されるべきである。2011年1月、東京大学はTODIASを新たに設立し、IPMUをこの新しい恒久的組織の最初の研究機関として承認した。これは1949年以来となる、東京大学が行った大きな組織改革である。全学組織として設立されたTODIASは、それぞれが世界を担う知の拠点として機能することを実証した研究機関から構成され、東京大学全体の学術の卓越性の向上および国際化を強力に推進する。

学内組織の構造上、TODIASを通じてKavli IPMUは文部科学省に運営費を要求することができる。従って、Kavli IPMUを恒久的に支えるための資金を得る手段が確保されたことになる。2014年度にはTODIASは卓越した研究、教育活動を確実にを行うための4つのテニュアポストを得た。

2007年10月にWPIプログラムによって設置された際、Kavli IPMUにはトップダウンの運営体制や柔軟な雇用システム、能力・実績に応じた俸給制度を可能にする東京大学内の「特区」としての位置づけが与えられた。WPIプログラムで触発され、Kavli IPMU内での実施経験を経て、東京大学はKavli IPMUを世界をリードする研究所として機能させるために、以下に示すようなシステム改革を強力に推し進めてきた。

- ・能力、実績を配慮した（メリットベース）給与体系
- ・ジョイント（スプリット）アポイントメント
- ・従来の制度とは異なる、外部資金によるテニュア教員職
- ・年俸制（通常のボーナスや退職金がないかわりにそれを補償する高い給与レベルと異動のし易さが特徴）
- ・融通が利くポストの運用
- ・バイリンガル事務スタッフによる（外国人研究者に対する）手厚い支援

実際、村山機構長は、海外機関とのスプリットアポイントメント、メリットベース給与適用の最初の事例である。一例であるが、ある教授は理学部とKavli IPMUでエフォート60%/40%のスプリットアポイントメントを開始した。また別の教授はKEKとKavli IPMUとのエフォートが80%/20%のジョイントアポイントメントを適用した。4-4で既述したように、テニュア・トラックの助教1名がTRIUMFとKavli IPMUの間で新しく取り決められたジョイントアポイントメントの合意に基づき、雇用されている。

こうした改革は全てファカルティメンバーに対して、より動きやすい環境を与えるものであり、東京大学の教員人事の縦割り主義を打破する触媒となり得る可能性がある。この変革のインパクトは東京大学だけでなく国内の他の研究機関にも影響を与え、それらが同様の変革を行うこととなるかもしれない。

5-4 ホスト機関による支援

申請の際あるいは中間評価時等の更新の際にホスト機関からコミットした事項を含め、ホスト機関による支援について、拠点構想の実現・持続のために機能的に措置されているかを以下の項目に沿って記述すること。

5-4-1 ホスト機関による支援の実績と効果

- ・具体的措置については[添付様式5]に記載すること。

当初の提案の時点で、東京大学はKavli IPMUを大学内の「特区」として位置づけ、多くの例

外措置を適用した。それらは、柔軟な給与体系、特任教職員について従来の契約期間を超える雇用、数名の主任研究員が従来の部局を退職して当機構に異動する際の優遇措置、定年年齢を超えた特例雇用措置などである。東京大学はさらにKavli IPMUのための研究棟及び柏キャンパス近くの新しいインターナショナルロッジの建設を約束した。このロッジはKavli IPMUに赴任、あるいは短期間滞在する外国人研究者たちの主要な宿泊施設となっている。また、東京大学はKavli IPMUの設置後、主任研究員がKavli IPMUの研究に専念できるように、所属する部局の仕事を代替する助教ポストを提供した。濱田総長は学内である程度の懸念や反対があったにもかかわらず、カブリ財団の寄付を受けることを決断した。

5-3で前述したように、2011年のTODIASの創設は、Kavli IPMUに学内で恒久的な場を与えるという傑出した支援策である。そして2013年には、この構造の下でTODIASは研究教育活動を支えるために文部科学省に概算要求を行ない、4つのテニユアポストを得た。WPIの中間評価を受け、東京大学はKavli IPMUを支えるためにさらに幾つかの手段を講じている。すなわち、東京大学は2016年度末までに9つの総長裁量ポストをKavli IPMUに提供することに合意し、既に5つのポストが確保されている。また大学として本部事務職員9名をKavli IPMUに確保している。

更に詳しい具体的内容については添付様式 5で述べられている。

5-4-2 ホスト機関の中長期的な計画への位置付け等

- ・「中期目標」・「中期計画」等の表紙とWPI関連箇所を[添付様式5]に添付すること。

2007年、東京大学は第1期中期目標の中で、“中核的研究施設の設置・整備を積極的に推進していく”と述べている。この実現のための中期計画として、“世界トップレベル研究拠点「数物連携宇宙研究機構」において、数学、物理、天文学の連携により宇宙の起源と進化の解明を目指すための組織整備等を重点的に行う”と述べている。

2010年、同じく第2期中期目標と中期計画が発表（2014年に一部改訂）されている。目標を達成するための措置はより一般化されて、“特に、世界レベルの研究者を招へいし、先端宇宙理学研究領域における国際共同研究を推進するとともに、教育環境の整備を図る”と表現している。

さらに総長による東京大学行動シナリオ2015に基づき、大学は2011年部局を超えた組織として学術の卓越性の向上および研究環境の国際化を目指すためにTODIASを設立し、Kavli IPMUを傘下に置いた。この行動シナリオの下で東京大学はKavli IPMUを支援するために必要な措置を取っている。

毎年行われるWPIプログラム委員会のレビューに加えて、東京大学は外部諮問委員会によるKavli IPMUのレビューを毎年行っている。委員会メンバーは世界トップクラスの科学者で、現メンバーは委員長のSteve Kahn（スタンフォード大学、元SLAC国立加速器研究所Particle and Particle Astrophysics部門Director）始め、John Ellis（キングスカレッジ・ロンドン）、Young-kee Kim（シカゴ大学、前Fermi国立加速器研究所副所長）、小島定吉（東京工業大学）、David Morrison（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）、岡村定矩（法政大学、元東京大学研究担当理事・副学長）、Nigel Smith（Snolab所長）である。外部諮問委員会のレビュー報告は東京大学総長、研究担当副学長に提出される。

5-5 その他

若手研究者の活躍促進（スタートアップ経費や自律的な研究環境）、女性研究者の登用等に関する独自の取組について記述すること。

- ・女性研究者の人数については[添付様式5]に記載すること。

全ての特任研究員（博士研究員）には、IPMUから年間50万円の研究費が配分される。助教以上のランクの研究者には必要に応じてスタートアップ経費が配分される。効果的なスタートアップにより、早期に科研費を獲得して研究を抜本的に発展させることが期待されている。Kavli IPMUでは科研費獲得のため、特に外国人研究者向けのガイダンスを行っている。

女性研究者の採用を促進するため、機構長、副機構長、主任研究員、ファカルティメンバーはあらゆる機会にKavli IPMUにおける優れた研究環境と将来性をアピールする努力をしている。2013年度には、それまで機構の博士研究員だったAlexie Leauthaudを最初の女性助教として採用した。さらに現在5名の女性博士研究員と1名の学術支援職員（A. More、M. Bersten、石垣美歩、C. Lackner、B. Vulcani、岩下友子）および1名の大学院生（新倉広子）が在籍している。日本学術振興会特別研究員のA. Moreのケースでは、夫のS. MoreもKavli IPMUのファカルティメンバーとして雇用された。しかし、女性主任研究員は依然として1名のみである（野尻美保子）。女性研究者を増やすとともに、新しい女性主任研究員、女性のファカルティメンバーを増やす努力は、国際会議、ワークショップ、研究会等、あらゆる機会を通じて機構の素晴らしい知的環境と研究活動を示すことにより継続的に行う。

6. その他特筆すべき事項

- ・1. ~5. 以外に「世界から目に見える拠点」に相応しい先導的な取組や、見出される特質等の特に優れた点が

ある場合は、記述すること。

2012年、IPMUは米国のカブリ財団からの寄付を受け、基金を創設したことに伴いフレッド・カブリ氏の名前を冠とするKavli IPMUとなった。この名前をつけた理由は2つある。基金を受けたということに加え、カブリという名が持つ高いステータスである。基金の運用による収益金は毎年確実に入り、年度制限がない柔軟性の高い収入であって、既にこれを利用して博士研究員の採用や、研究を資金的により広範に展開することができた。更にそれを担保に東京大学から研究プロジェクトのために資金を借りることもできる。高いステータスという点は、数値にすることは難しいが、この寄付を受けたことで、当WPI拠点が国際的に認知されたと研究者コミュニティをあとと言わせたことは明らかである。寄付による冠研究所は日本では初めてであり、システム改革のシンボルとなっている。TODIASは、2014年度に運良く卓越した研究、教育を保証するための4つのポストを獲得しており、カブリ財団はこの進展を東京大学の強い支援と認め、これに見合う寄付の増額を決定した。

東京大学にとって、外国の財団から基金の寄付を受けることは勿論初めてであり、大学にとっても寄付金の運用について再考し、改革するための良い機会となった。

さらにもう一つ、Kavli IPMUの国際的注目度を強めた事例がある。東京大学は2012年度に、オンライン教育のプロバイダー、コーセラを通じて講義を配信する契約を結んだ。急速に発展している大規模公開オンライン講座(MOOC: Massive Open Online Course)のプロバイダーで、誰でも無料で受講できるようにオンラインで講義を提供するというものである。村山機構長は東京大学が提供するMOOCコースの最初の講師に選ばれた。村山の講義は人気を集め、世界140カ国以上から50,000人以上が受講登録をした。

当機構の国際的注目度を示す指標として、論文被引用数を調査した。トムソンロイターのウェブオプサイエンスのデータによれば、Kavli IPMUが発足時から現在まで(2007から2013年度)に発表した科学および技術に関する論文は、50回以上引用を受けた数が117(114:括弧内に示す数字は著名なReview of Particle Propertiesを含めない場合)編、論文あたりの被引用数は24.35(17.77)回となっている。この数字は我々と同じ分野で世界をリードする研究機関であるプリンストン高等研究所(Princeton)、カブリ理論物理研究所(Santa Barbara)、基礎物理学研究所(京都)、ペリメーター研究所(Canada)、国際理論物理学センター(Trieste)などの同じ期間の数字に比べて遜色ないかあるいは上回るものである。

7. 平成25年度フォローアップ結果(現地視察報告書を含む)への対応

※平成25年度フォローアップ結果への対応を記述すること。ただし、既に記載済みの場合は〇〇ページ参照、などと記載箇所を明示することに代えて良い。

- ・Kavli IPMUは10~15年という期間の先を見据えるべきであり、宇宙に関する数学と物理において、世界トップレベル研究所から世界をリードする研究所へと脱皮するためには、科学と組織において何を行うのかを真剣に考えるべきである。(フォローアップ)

当機構は、独自の重要な成果を出し始めていると確信する。幾つか例を挙げると: 物理学者との交流に触発された戸田幸伸の代数幾何の結果; 我々のメンバーによる多くの過去の業績の上に立って頂点に達した柳田勉の純粋な重力伝達機構の提案; 数学者との交流に触発された堀健太郎と大栗博司の超弦理論の成果; 高田昌広、Alexie Leauthaud、大栗真宗による重力レンズを用いた暗黒物質研究の重要な成果; カムランド-禅とXMASSによる世界をリードする実験的制限; 物性物理学者の触発と数学者の助けで得られた村山斉の物性物理に関する結果、などである。Mark Vaginsによる水チェレンコフ検出器へのガドリニウム溶解のR&Dも大いに期待される。SuMIRe計画は関連研究者コミュニティでよく知られた世界をリードするサーベイであり、最近の将来計画スノーマス会議(アメリカ)で脚光を浴びた。これらはまさに「メード・イン・Kavli IPMU」であり、それぞれの分野の研究をリードし、当機構の分野間の刺激によって可能になったものである。現在、大型プロジェクトがデータ収集段階に入りつつあるので、さらに多くの世界をリードする成果が期待される。

- ・Kavli IPMUの歴史において枢要なときであるからこそ、Kavli IPMUのステータスを強固なものとする、幾つかの特色ある科学的課題分野に資源を集中することが重要である。(フォローアップ)
- ・Kavli IPMUは世界クラスから世界のリーダーになっていくために分野を絞るべきだと指摘されてきた。プレゼンテーションではそれに対する回答がなかった(現地視察)

我々は根源的で広範な疑問、つまり「宇宙はどうやって始まったのか?」「宇宙は何でできているのか?」「宇宙に終わりはあるのか?」「宇宙の基本法則は何か」そして「宇宙にどうして我々が

いるのか?」、の研究を提案した。この疑問の幅の広さのため、最初は広い範囲を探りどの方向の研究が最も成果が大きいかを理解する必要があった。当機構の初期段階にこれらの疑問はいくつかの柱として明確化してきたため、延長期間ではそれらに集中する。つまり

- (1) 根源的理論と数学の進展
 - (2) 暗黒物質、暗黒エネルギー、インフレーションの実験および観測による根源的理論の検証
 - (3) 将来の可能性への準備
- である。

我々が取り組む研究分野ではプロジェクトの立案、建設、遂行には長い時間を要する。従って、複数のプロジェクトのデータ収集、建設、立案の段階が重ならないようにする必要がある。機構の初期には、SuMIRe計画のような大型プロジェクトはこれから建設あるいは立案という段階であらざるを得なかった。従って、データ収集段階にあるプロジェクトに迅速に参加し、将来の方向を描くことを学ぶ必要があった。

当機構の初期段階で、関連プロジェクトの研究目標は何かははっきりしてきた。これまでに学んだことをもとに研究課題を大幅に収束させ、新たな課題にも直面し、将来の可能性への準備を行う。

すばる望遠鏡の撮像 (HSC) と分光 (PFS) を組み合わせるSuMIRe計画には3つの大きな科学目標がある。すなわち、(1) 宇宙論 (暗黒エネルギー、重力の検証、ニュートリノ質量)、(2) 銀河の進化 (星の形成、化学的進化、ブラックホール)、(3) 銀河考古学 (暗黒物質の分布と特性)、である。当機構はこれまでこれらの課題に収束するいくつかのプロジェクトを並列させてきた。SDSS-III/BOSSとSDSS-IV/eBOSSは(1)へ、iPTFは(2)へ、そしてSDSS-IV/MaNGAは(3)へと導く。従って、これら全てのプロジェクトが延長期間ではSuMIRe計画に収束する。この計画は暗黒物質と暗黒エネルギー研究の主要部分をカバーする。一方、XMASSについては進展を見直して、将来当機構がどれだけの資源を投入し続けるか判断する。

新たな興味深い課題も見出した。POLARBEARへ小規模ながら参加したことから生まれた新たなプロジェクトLiteBIRDでは、インフレーションの枠組みを検証し、量子重力の基本的理論に結びつける。KEKおよびJAXA/ISASと密接に協力して、延長期間あるいはその先で実現される可能性が高いと考えられる科学的課題を検討し、取り纏めた。BICEP2データの現状を見ると全天サーベイを実施することが極めて重要である。

その一方で、さらに先にある重要で新しい可能性にも目を向ける必要がある。それらは結果に繋がるかどうかかわからないため、比較的小さなエフォートにとどめて、近隣の研究機関と密接に交流しつつ相乗効果を狙う。ハイパーカミオカンデは日本における大きな可能性であり、東京大学宇宙線研究所と密接に協力して、加速器ビームを用いる物理 (T2K) とガドリニウム溶解

(EGADS) に戦略的に関わっている。国際リニアコライダーは日本におけるもうひとつの大きな可能性であり、KEKおよび本郷の物理教室と密接に協力してBelle-II実験のシリコン崩壊点測定器 (SVD) で大きな責任を持っている。

我々は、何にでも手を出して希薄化し過ぎないように研究目標を注意深く選んだことに留意されたい。広範な数学の分野では、代数幾何、微分幾何、数論幾何および表現論に集中した。すばる望遠鏡の使用が可能であるにもかかわらず太陽系外惑星の探索には挑まなかった。暗黒物質と関連しているが宇宙線実験には踏み込まなかった。その当時の段階では我々が与えるインパクトがほとんど無いため、LHC実験とは距離をおく決断をした。代わりに、自らの知的好奇心を保つために、これらの分野に取り組んでいる他機関との共同研究の枠組みを展開した。

- ・ 特に、SuMIReプロジェクトにおいて、データパイプラインソフトウェアを超え、宇宙論データ解析と宇宙論シミュレーションのためのソフトウェア分野において集中することが重要である。既に類似の努力をしている研究者との全面的な共同研究を追求すべきである。Kavli IPMUは、国立天文台とともに、Kavli IPMU以外の計算機科学者や統計学者と共同研究することで、データマイニングやインフォマティクスにおける研究の進展に影響力を発揮できるであろう。(フォローアップ)
- ・ 2011年の報告書でテラスケールデータ解析能力の緊急性が指摘された。そのような大量(大規模)データの処理(扱い)についてははっきりした戦略を聞いていない(現地視察)

HSCとPFS用のデータパイプラインソフトウェアではRobert Luptonが率いるプリンストン大学の取組みと密接な共同研究をおこなっている。彼はLSST用ソフトウェアも開発している。当機構で新たに採用した鈴木尚孝がSDSS-IV/eBOSS用のパイプラインを開発している。これがPFS宇宙論プログラムのための先駆けになると見なせる。また、統計数理研究所(東京立川市)と話し合いを始めていて、共通の興味範囲で行う大々的で新しい開発を提唱しようとしている。

- ・ 常駐の主任研究者を増加させるべきである。特に数学と理論物理学の主任研究者について、他の日本の研究所の主任研究者とのjoint appointmentがさらに進むことを期待する。(フォローアップ)
- ・ もし本人たちが望むなら准教授に指導的役割と権限が与えるべきであると指摘された。プレゼンテーションではKavli IPMU側からの返答がなかった。(現地視察)

- ・機構の発足当初から理論家と数学者で兼任の数は減らすべきだと指摘されてきた。ジョイントアポイントメント制度の確立により、この数を減らす努力が幾分なされてきている。しかし数学者の東京大学とKavli IPMUの間のジョイントアポイントメントについては進んでいない。(現地視察)

明らかにKavli IPMUは若い研究者にとって素晴らしいキャリアパスとなった。京都大学基礎物理学研究所と東京大学物理学科の最近の採用者はKavli IPMUからであった。同時に、中心メンバーの定着が必要である。これまで我々に与えられた5つの総長裁量ポストと4つの文部科学省からのポストを考慮すると我々は前進していると言える。

不安定な雇用と当機構への責任という矛盾を避けるため、常勤研究者の主任研究員への任命を控えてきた。現在では何人かは恒久職に移っているため、彼らを主任研究員に任命できる。

ジョイントアポイントメントの取り決めは相手機関の同意が必要なため、簡単ではない。東京大学では2013年にやっとジョイントアポイントメントを制度に取り入れたばかりである。しかし日本の他のほとんどの機関は同じような制度を取り入れていないため、これが大きな障害になっている。東京大学は2014年に国際高等研究所に限って学内とのジョイントアポイントメントを可能にした。当機構では既に、吉田直紀に物理教室から40%のエフォートで戻ってきてもらうことができた。当機構は天文教室および数学教室とも同様の雇用法を追求する。

- ・初めての女性ファカルティーメンバーAlexie Leauthaudの採用を高く評価する。しかし、女性の数は非常に少ないままである。博士研究員が3人、ファカルティーが1人、それに主任研究員が1人だけである。20の短いポスタートークで女性の発表は1人もなかった。サイトビジット中Alexie Leauthaudがただ1人の女性の発表者だった。(現地視察)

日本に限らず世界中で数学と理論物理学の女性研究者の数は特に少ない。当機構が求める分野でキャリアの初期にいる研究者をカップルで採用する戦略を取った。これがうまくいっている。4組のカップルを採用したが、そのうちの1組はイギリスからのテニュアを与えるというオファーと競争したものである。しかしながら一層の努力が必要である。

- ・以前からレポートで繰り返し言及されてきた学生の少なさは心配である。この類の拠点は多くの助教、准教授、教授の指導のもとで博士論文に取り組む大学院生で満ちているのが理想である。この点では、例えば学生が大勢いるドイツのマックスプランク研究所とは決定的に違う。そこでの「学位授与」問題の解決方法は、形式的には学生は「正規のアドバイザー」（そのメンバーであるとは限らないが学生を持つことが許されている、つまり大学の正規の教授）に配属されるが、実際は若手スタッフ（公式には学生を持たない）が指導するというものである。Kavli IPMUと東京大学がこのようなスキームを作って、大学院生のための予算獲得を目指し、もうひとつ大切なことだが、彼らのオフィススペースを提供することを強く要望する。自分たちでジャーナルクラブや学生セミナーを組織して恐れずに質問できるようになるには、学生達にはクリティカルマスが必要である。毎日のティータイムは学生、拠点の教員、エキスパートビジターが集う最適な場所である。(現地視察)

成功している研究機関にとって大学院生と一緒に働くことは欠くことができない側面であることに完全に同意する。大学院生へのアクセスは学位授与と誰が学生を指導するかを決定できる伝統的な学部委ねざるを得ない。これまでのところ、当機構からは物理では4名、数学では3名のファカルティーがこれを許されている。

大きな困難のひとつは、当機構にはテニュアをもつ教員が少ないことである。伝統的な学部は当機構の任期付き教員が大学院生を指導することが適切だとみなさないことによる。濱田総長の約束と文部科学省から国際高等研究所への追加措置のおかげで当機構の多くの教授と准教授がテニュア職に移動するため、この観点は変わっていくものと信じる。

我々は自分たちの大学院設立に真剣に取り組んでいく。初期的調査ではそれが可能のようである。多くの障壁を克服する必要があるが、不可能のようには思えない。延長期間中に当機構はもっと恒久的組織になっていくと思われるので、カブリ数物連携宇宙研究科の設立に向けての試みを大々的に行う提案をする。我々が思い描くその姿は、アメリカの大学のシステムに倣って、完全に国際的な、厳選された学生群である。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

1. 平成25年度主任研究者一覧

作成上の注意:

- ・「氏名」欄で、海外の機関に所属する研究者には下線を付すこと。また、世界トップレベルと考えられる研究者氏名の右側には* (アスタリスク) を付すこと。
- ・平成24年度拠点構想進捗状況報告書に名前がなかった研究者が参加した場合には、新規主任研究者個人票を添付すること。

【平成25年度実績】									
主任研究者 計 18 名									
氏名 (年齢)	所属機関・部局・職	学位 専門	作業時間 (全仕事時間:100%)				拠点構想 参加時期	拠点構想への参画状況 (具体的に記入)	海外の機関に 所属する研究者の 拠点構想への貢献
			拠点関連		拠点以外				
			研究	研究以外	研究	研究以外			
拠点長 <u>村山 齊</u> (50) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・ 機構長・特任教授 カリフォルニア大学バークレー 校・物理学科・教授	博士 素粒子 論、宇宙 論	45%	40%	0%	15%	10/1/2007	拠点到70%、カリフォルニア大学 バークレー校に30%滞在(その半 分は拠点サテライト)して参画。 週に4回TV会議により参画。	若手研究者2名を各2 週間、上級研究者2名 を各1週間派遣。若手 研究者5名を各2週間 受入。
鈴木洋一郎 (64) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・ 副機構長 東京大学・宇宙線研究所・教授	博士 ニュー トリノ 物理学、 素粒子 物理学	70%	5%	5%	20%	10/1/2007	神岡分室に常駐して参画。 TV会議(週1回)により参画。	
相原博昭 (58) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・ 参与 東京大学・理学系研究科・教授	博士 高エネ ルギー 物理学	45%	5%	0%	50%	10/1/2007	拠点到月1回滞在して参画。 TV会議(週1回)により参画。	
<u>Alexey Bondal</u> (52) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構 ・特任教授 ステクロフ数学研究所・教授	博士 数学	40%	0%	40%	20%	10/1/2007	拠点到年6ヶ月滞在して参画。 残る6ヶ月はTV会議(週1回) により参画。	上級研究者1名を2週 間派遣

井上邦雄 (48) (*)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・センター長・教授	博士 ニュートリノ物理学	45%	0%	5%	50%	10/1/2007	神岡分室に週1回滞在して参画。	
梶田隆章 (55) (*)	東京大学・宇宙線研究所・所長・教授	博士 ニュートリノ物理学	40%	0%	0%	60%	10/1/2007	神岡分室に月1回滞在して参画。 拠点に隣接する宇宙線研究所に ほぼ常駐して参画。	
Stavros Katsanevas (60) (*)	パリ第7大学・物理学部・教授	博士 天体素粒子物理学	20%	0%	10%	70%	10/1/2007	拠点到年1回滞在し参画。 TV会議（月1回）により参画。	若手研究者1名を3週間派遣
小林俊行 (51) (*)	東京大学・数理科学研究科・教授	博士 数学	70%	0%	8%	22%	6/1/2011	拠点到月1回滞在し参画。 TV会議（月1回）により参画。	
河野俊丈 (58) (*)	東京大学・数理科学研究科・教授	博士 数学	70%	0%	8%	22%	10/1/2007	拠点到週1回滞在し参画。 TV会議（週1回）により参画。	
中畑雅行 (54) (*)	東京大学・宇宙線研究所・教授	博士 ニュートリノ天体物理学	85%	0%	9%	6%	10/1/2007	神岡分室に常駐して参画。	
野尻美保子 (51) (*)	高エネルギー加速器研究機構・教授	博士 素粒子論	40%	0%	40%	20%	10/1/2007	拠点到週2回滞在し参画。	
野本憲一 (67) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・教授	博士 天文学	70%	0%	12%	18%	10/1/2007	拠点到常駐し専任教員として参画。	

大栗博司 (52) (*)	カリフォルニア工科大学・数学物理学・教授	博士 超弦理論	66%	0%	3%	31%	10/1/2007	拠点に年3ヶ月滞在し参画。残る9ヶ月はTV会議(週1回)により参画。	若手研究者1名を2週間派遣、若手研究者2名を各2週間受入
斎藤恭司 (69) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・教授	博士 数学	80%	20%	0%	0%	10/1/2007	拠点に常駐し専任教員として参画。	
David Spergel (53) (*)	プリンストン大学・天体科学部・教授	博士 観測宇宙論	55%	0%	5%	40%	10/1/2007	拠点に年1回滞在し参画。TV会議(週1回)により参画。	教授1名を1ヶ月派遣 若手研究者4名を各2週間派遣
Henry Sobel (70) (*)	カリフォルニア大学アーバイン校・物理天文学部・教授	博士 ニュートリノ物理学	50%	0%	13%	37%	10/1/2007	神岡分室に年4回滞在し参画。TV会議(週1回)により参画。	若手研究者7名を各3週間派遣
杉山直 (52) (*)	名古屋大学・理学研究科・教授	博士 観測宇宙論	47%	0%	3%	50%	10/1/2007	拠点に月1回滞在し参画。TV会議(週1回)により参画。	
柳田勉 (65) (*)	東京大学・数物連携宇宙研究機構・教授	博士 素粒子論	90%	0%	0%	10%	10/1/2007	拠点に常駐し専任教員として参画。	

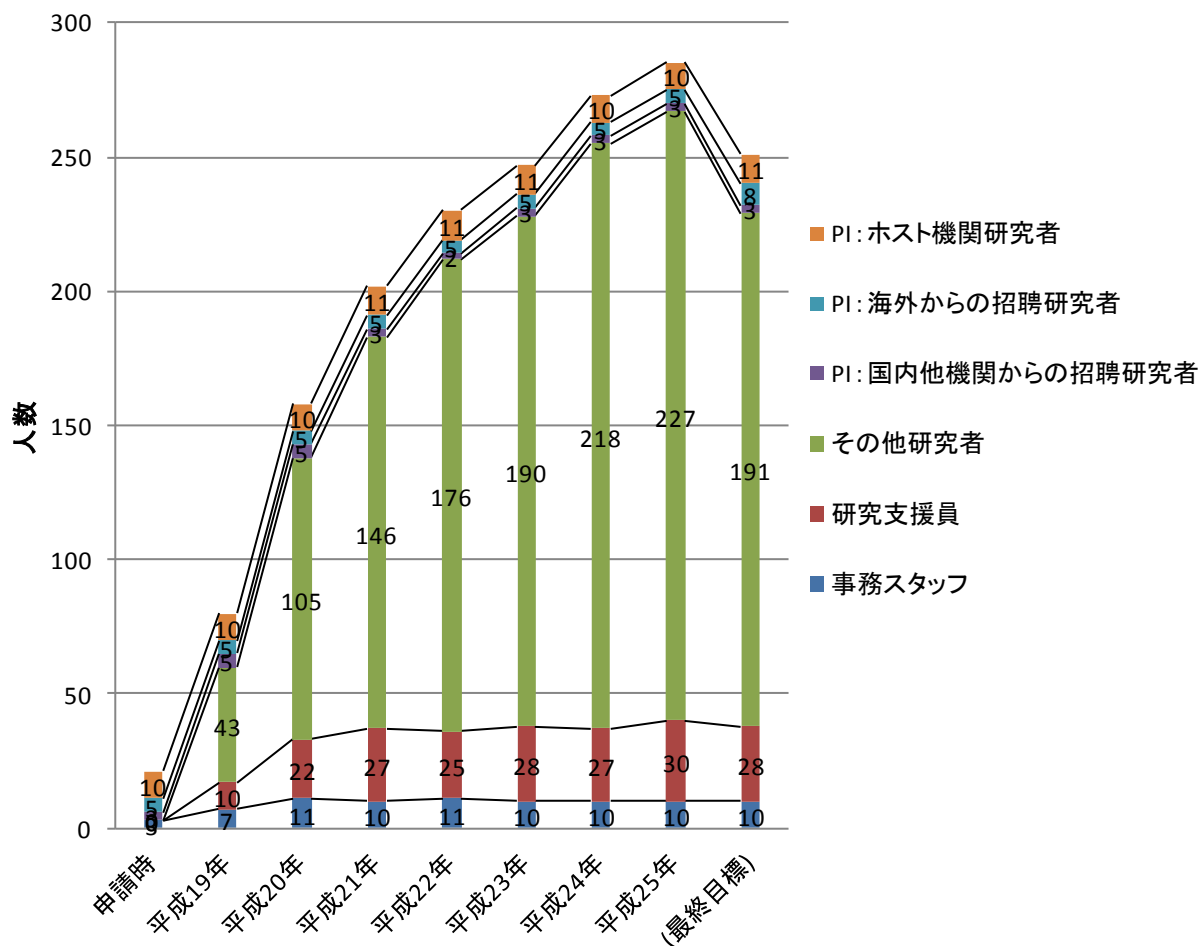
平成25年度に拠点構想に不参加となった研究者

氏名	所属機関・部局・職	拠点構想参加時期	理由	対応
該当なし				

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

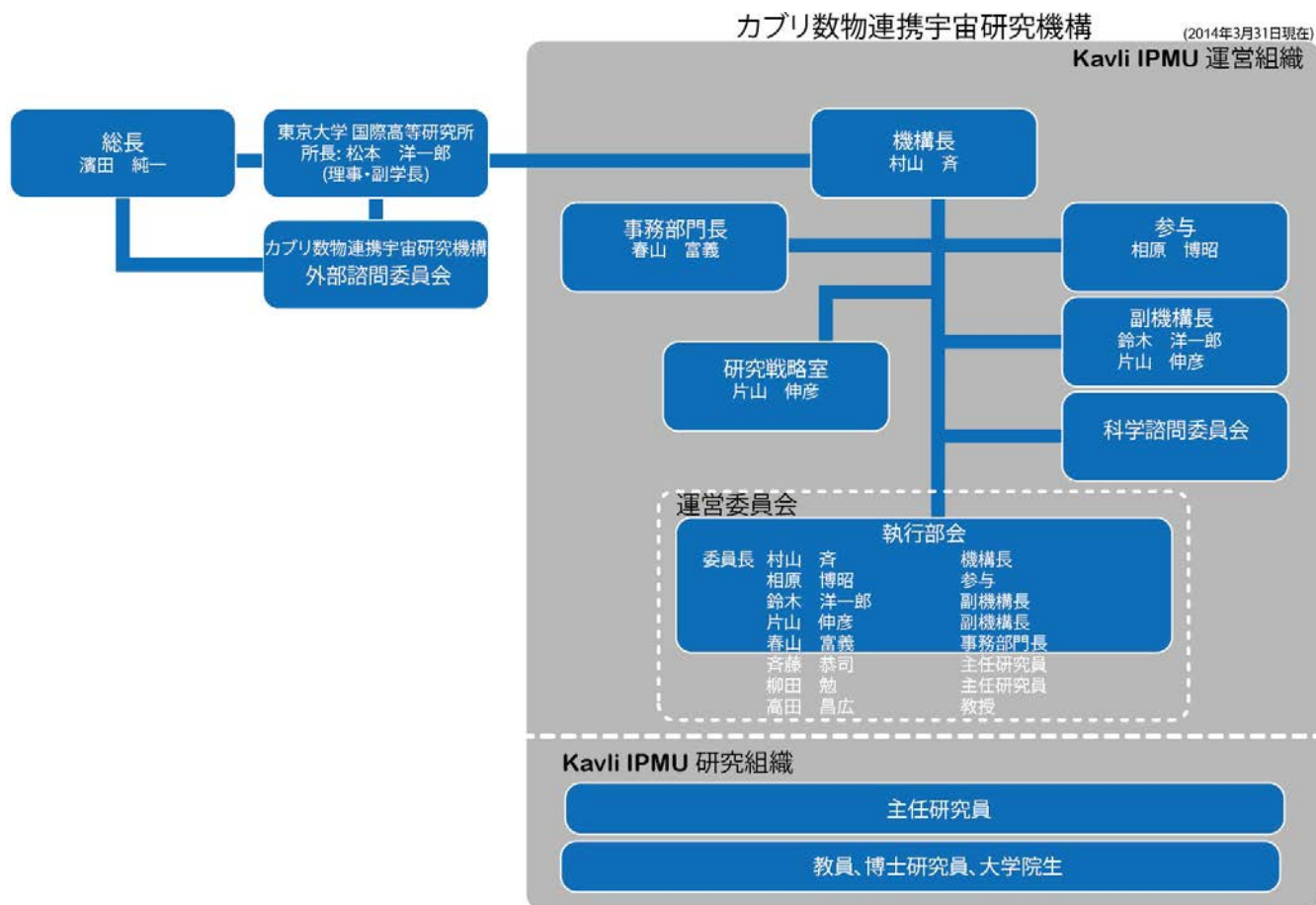
2. 構成員員数の推移

※申請時及び発足時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。



世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

3. 運営組織図



世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

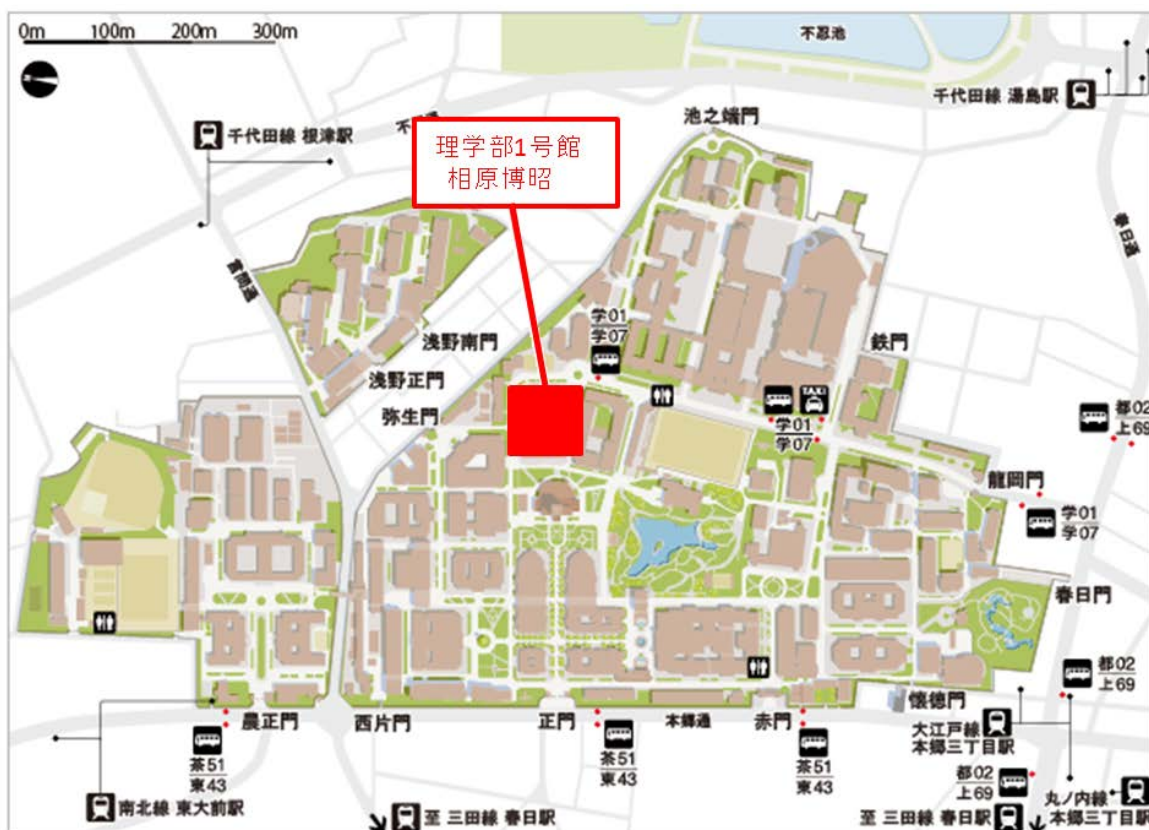
4. 拠点施設配置図



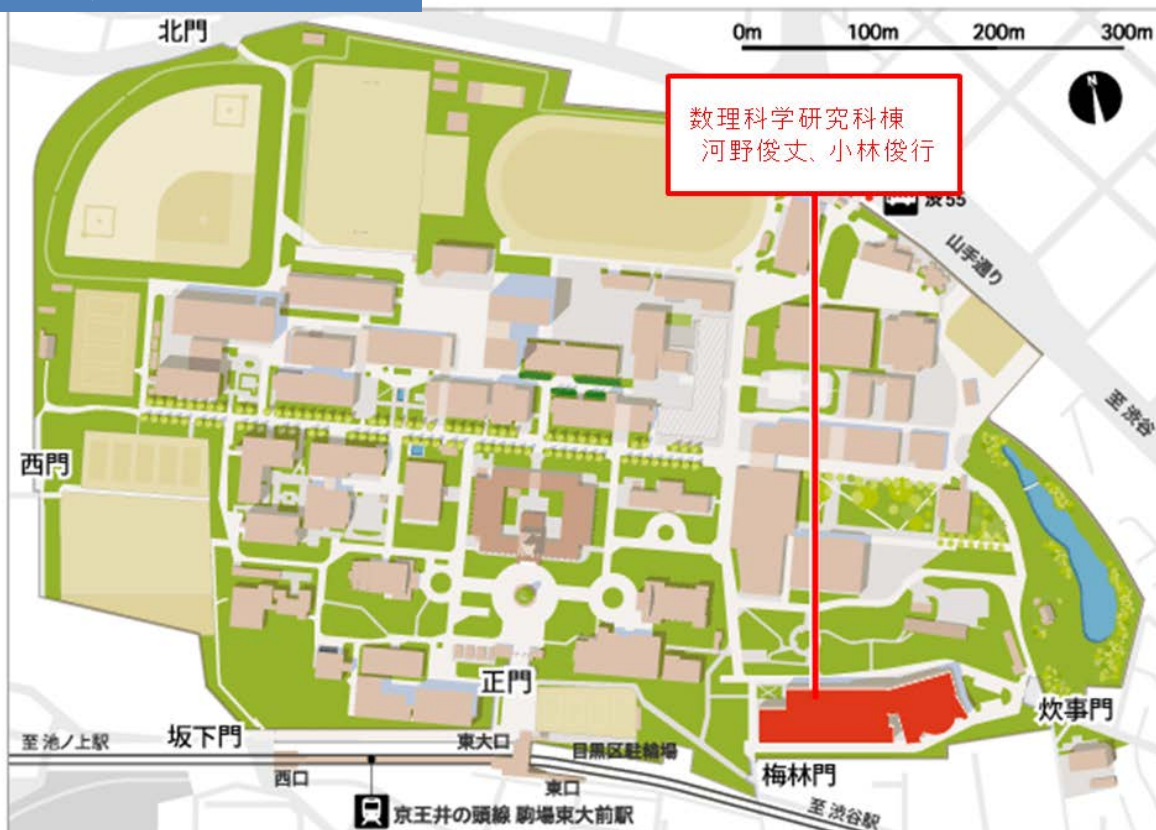
柏キャンパス



本郷キャンパス



駒場キャンパス

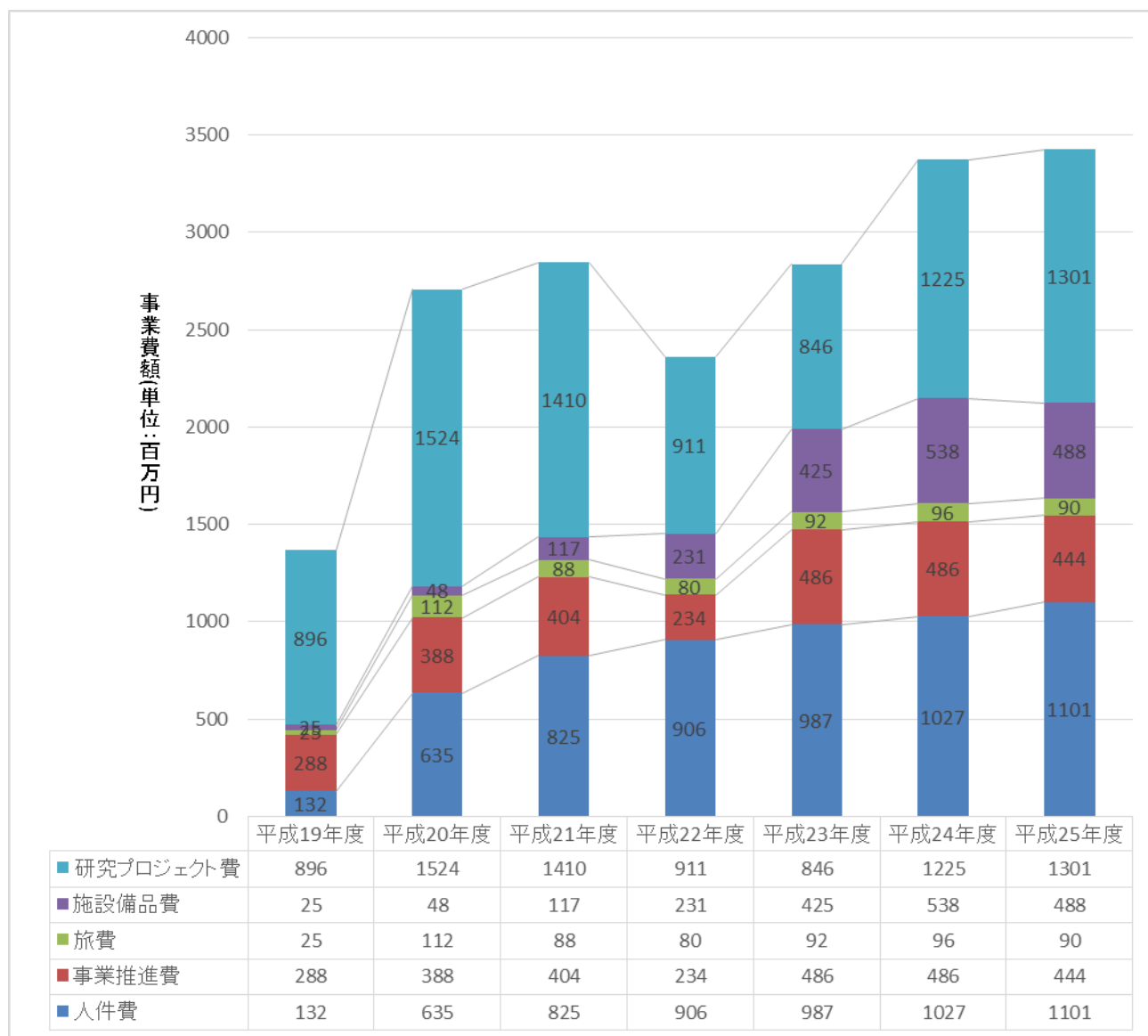




世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

5. 事業費の推移

※拠点活動全体の事業費額の推移を棒グラフで表すこと。



6. 平成25年度事業費

○拠点活動全体

(単位：百万円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・ 拠点長、事務部門長	30
	・ 主任研究者 10人	98
	・ その他研究者 126人	799
	・ 研究支援員 30人	101
	・ 事務職員 9人	73
	計	1101
事業推進費	・ 招へい主任研究者等謝金 19人	26
	・ 人材派遣等経費 1人	2
	・ スタートアップ経費 57人	35
	・ サテライト運営経費 1ヶ所	10
	・ 国際シンポジウム経費 16回	2
	・ 施設等使用料	223
	・ 消耗品費	60
	・ 光熱水料	30
	・ その他	56
	計	444
旅費	・ 国内旅費	10
	・ 外国旅費	35
	・ 招へい旅費 国内38人、外国174人	35
	・ 赴任旅費 国内1人、外国21人	10
	計	90
設備備品等費	・ 建物等に係る減価償却費	43
	・ 設備備品に係る減価償却費	445
	計	488
研究プロジェクト費	・ 運営費交付金等による事業	483
	・ 受託研究等による事業	0
	・ 科学研究費補助金等による事業	818
	計	1301
合 計		3424

(単位：百万円)

平成25年度WP I 補助金額	0
平成25年度施設整備額	0
平成25年度設備備品調達額	12
・ Ge半導体検出器 1台	8
・ 液体窒素補給装置 1台	1
・ その他	3

○サテライト等関連分

(単位：百万円)

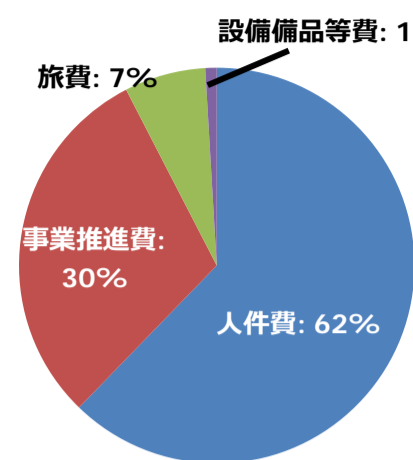
経費区分	内訳	事業費額
人件費	・ 主任研究者 0人	/
	・ その他研究者 2人	
	・ 研究支援員 0人	
	・ 事務職員 0人	
	計	
事業推進費		0
旅費		1
設備備品等費		1
研究プロジェクト費		0
合 計		10

7. 平成25年度WPI補助金支出

○総額

(単位：百万円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・拠点長、事務部門長	31
	・主任研究者 (4人)	53
	・その他研究者 (83人)	574
	・研究支援員 (30人)	100
	・事務職員 (9人)	73
	計	831
事業推進費	・招へい主任研究者等謝金 (19人)	25
	・人材派遣等経費 (1人)	2
	・スタートアップ経費 (57人)	35
	・サテライト運営経費 (1ヶ所)	10
	・国際シンポジウム経費 (15回)	2
	・施設等使用料	223
	・消耗品費	56
	・光熱水料	3
	・その他	46
	計	402
旅費	・国内旅費	10
	・外国旅費	35
	・招へい旅費 (国内：38人) (外国：168人)	35
	・赴任旅費 (国内：1人) (外国：21人)	9
	計	89
設備備品等費	・設備備品調達額	12
	計	12
合計	合計	1334



○サテライト等関連分

(単位：百万円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・主任研究者 (0人)	/
	・その他研究者 (2人)	
	・研究支援員 (0人)	
	・事務職員 (0人)	
	計	
事業推進費		1
旅費		1
設備備品等費		0
合計	合計	10

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

1. 代表的な研究成果を裏付ける論文一覧

※「2. 研究活動」の「2-1. 研究成果」で挙げた代表的な研究成果[1]~[20]を裏付ける論文を挙げ（全部で40編以内）、それぞれについてその意義を10行以内で解説すること。

※それぞれの論文は箇条書きとし、著者名・発行年・雑誌名・巻号・掲載ページ・タイトルを記載すること。（記載順番は様式中で統一してあればこの限りではない）なお、著者が複数ある場合には、拠点の研究者に下線を記すこと。

※著者が多数（10名以上）の場合は、全著者名を記載する必要はない。

※WPI拠点なくしては不可能であった研究論文にはアスタリスク（*）を付すこと。

研究成果 1：修正重力理論

[1]. S. Mukohyama, "Scale-invariant cosmological perturbations from Hořava-Lifshitz gravity without inflation", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 0906 (2009) 001
DOI: 10.1088/1475-7516/2009/06/001

本論文は、Hořavaによって提案された繰り込み可能な重力理論に基づき、スケール不変な曲率揺らぎを生成する新しいシナリオを提唱した。動的臨界指数 $z=3$ の非等方スケーリングにより、初期宇宙におけるスカラー場の量子揺らぎの振幅は宇宙膨張率に依存せず、従って、スケール不変になる。生成されたスカラー場の揺らぎは、その後カーバトン機構によって、あるいは重い粒子や振動する場の崩壊を変調することによって、曲率揺らぎに変換される。このシナリオは、インフレーションを必要とはしない。また、非等方スケーリング以外の性質に依存しないため、Hořava理論のどのバージョンにも適用できる。INSPIREデータベースによると、本論文は190回以上引用されている。

*研究成果 2：宇宙マイクロ波背景放射のBモード偏光

LiteBIRD衛星ミッションの目的は、コズミックインフレーション宇宙仮説と量子重力理論を、これまでにない精度で検証することである。ミッションが完全に成功した場合には、「ラージ場」と呼ばれる広い範囲のモデルによるコズミックインフレーションの直接的な証拠を発見することができ、原始重力波が重力場の量子揺らぎに起因することを証明できる。日本学術会議は、LiteBIRD計画を、「重要大型研究計画のマスタープラン2014」の27計画の一つに選んだ。文部科学省が選定した大型研究計画推進のための「ロードマップ2014」において重要性と緊急性に関してaの評価を得た。このわくわくするミッションを実現するために Kavli IPMU、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、JAXAはプロジェクト・マネージャーを置き、LiteBIRD衛星プロジェクト全体を取りまとめ、Kavli IPMUがサイエンスチームを主導し、ミッション機器の建設を取りまとめることを合意した。

*研究成果 3：Pure Gravity Mediationとヒッグスボゾンの理論

*[2] M. Ibe and T. T. Yanagida, "The Lightest Higgs Boson Mass in Pure Gravity Mediation Model", *Physics Letters*, **B709** (2012) 374-380
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.02.034

PGMモデル (PGMはPure Gravity Mediationの略) は、2011年12月に大型ハドロン加速器実験でヒッグス粒子発見の強い証拠が報告された直後に提案されたモデルである。本論文はPGMモデルについて議論した初めての論文であり、観測されたヒッグス質量 (125GeV) がモデル内において自然に説明されることが述べられた。また同時に、本モデルは素粒子現象論及び宇宙論に対して無矛盾で整合性があることも強調された。本モデルは単純かつきれいな超対称性の破れ及び伝達機構に基づいて構成されており、かつこれまで行われてきた実験全てと無矛盾であるため、素粒子論の分野では最も魅力的な素粒子標準模型を超える新物理モデルとして広く受け入れられている。実際に数多くのフォローアップ論文 (例えば米国プリンストン研究所グループの論文、N. Arkani-Hamed et al., arXiv:1212.6971等) が存在し、欧州CERN研究所で真剣に議論されている100TeVハドロン加速器実験計画の大きな動機の一つとなっている。

(註) この論文の著者のうち、T. T. Yanagida (柳田 勉) の所属がICRRとなっているが、これは誤りで、正しい所属はKavli IPMUである。

*[3]. M. Ibe, S. Matsumoto, and T. T. Yanagida, "Pure Gravity Mediation with $m_{3/2} = 10\text{-}100\text{ TeV}$ ", *Physical Review D*, **85** (2012) 095011
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.095011

本論文はPGM模型を議論した2番目の論文であり、本模型が暗黒物質として中性ウィーノを予言することが述べられている。また同時に、PGM模型が予言する0(1)TeVの質量を持つ中性ウィーノ暗黒物質が将来ガンマ線観測を用いて検出可能であるという重大な指摘がなされた。(宇宙のバリオン数の起源として熱的レプトン数生成シナリオが正しいとすると、中性ウィーノの質量は1TeV以下と予言される。) 現在Kavli IPMUの松本重貴は、同機構の天体物理学グループとの共同研究を通じて、ガンマ線観測手法の発展をも含んだ中性ウィーノ暗黒物質検出の更なる研究を行っており、これは同機構が主導する重要な学際的研究の一つとなっている。

*研究成果 4 : 暗黒物質の空間分布

*[4]. N. Okabe, M. Takada, K. Umetsu, T. Futamase, G. P. Smith, "LoCuSS: Subaru Weak Lensing Study of 30 Galaxy Clusters", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62** (2010) 811-870
DOI: 10.1093/pasj/62.3.811

直径 8.2m の主鏡を持つすばる望遠鏡の主焦点カメラは極めて高い撮像性能と広視野を持ち、弱い重力レンズ効果の測定に最も適した観測装置である。本論文では、赤方偏移 $0.15 < z < 0.3$ にある X 線で明るい銀河団 30 個のすばる望遠鏡の撮像イメージを用い、銀河団質量分布に関する詳細な弱い重力レンズ研究を行った。本論文は銀河団の平均的質量プロファイルが、暗黒エネルギー優勢宇宙での冷たい暗黒物質モデルに基づく N 体数値シミュレーションの予言と良く一致することを明らかにした。本論文に関する一連の論文では、X 線やスニアエフ・ゼルドビッチ効果の観測量といった他の観測量と弱い重力レンズ質量を比較した結果、他観測量から銀河団質量を推定することができる確固たる相関関係を導き出す新しい方法を開発した。本論文の結果はすばるのデータが、銀河団の質量密度プロファイルの精密測定に強力であることだけでなく、銀河団に基づく宇宙論に決定的に重要であることを示した。

*[5]. M. Oguri, M. Takada, N. Okabe, G. P. Smith, "Direct measurement of dark matter halo ellipticity from two-dimensional lensing shear maps of 25 massive clusters", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **405** (2010) 2215-2230
DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16622.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16622.x)

すばる望遠鏡の高い撮像性能のイメージから得られた、二次元の弱い重力レンズシグナルを最大に利用した銀河団質量分布の測定方法を新しく開発し、25 個の X 線銀河団にその方法を適用した。測定されたレンズ信号のパターンと楕円分布モデルを直接比較するこの方法は、個々の銀河団の、質量ハローの楕円率や質量中心といった、質量分布の新しい情報に制限を加えることを可能にした。18 個のサブサンプルの 2 次元フィッティングの結果を組合わせて、暗黒物質ハローの楕円形を有意に探知した。平均の楕円率は $e=0.46 \pm 0.04$ (68% の信頼限界) で、標準的な無衝突系の冷たい暗黒物質モデルに基づく予言と極めて良く一致することが分かった。この結果は銀河団スケールの暗黒物質の特性に対して独立かつ定量的な情報をもたらした。

*研究成果 5 : 暗黒物質の検出

*[6]. K. Abe et al. (XMASS collaboration including K. Hiraide, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Ogawa, H. Sekiya, Y. Suzuki, A. Takeda, M. Yamashita, J. Liu, K. Martens, Y. Takeuchi), "Light WIMP search in XMASS", *Physics Letters*, **B719** (2013) 78
DOI: [10.1016/j.physletb.2013.01.001](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.01.001)

軽いWIMPが衝突したときには、検出器に非常にわずかなエネルギーしか落とさない。世界でもっとも低いエネルギー閾値を持つXMASSは、それらの観測に有利である。XMASSは632本ある光センサーのうち4本が光を検出するとトリガーがかかる。それに対応するエネルギーは300eVである。光センサーの窓でおこるチェレンコフ事象を取り除いただけのデータを用いて、事象の再構成をせずに全質量 (835kg) で起こった事象を用いて解析を行った。有意な信号はみられず、得られたエネルギースペクトルと、予想されるWIMPのスペクトルを比較して、ダークマターの可能なパラメータ領域を排除した。13年にわたり観測を続けたDAMA/LIBRAグループが、存在を主張している領域のかなりの部分を、XMASSの結果が、6日あまりのデータで排除した。これは、XMASSの大質量、低閾値であるという特徴の優位性を強く示すものである。

*[7]. K. Abe et al. (XMASS collaboration including K. Hiraide, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Ogawa, H. Sekiya, Y. Suzuki, A. Takeda, M. Yamashita, J. Liu, K. Martens, Y. Takeuchi),

"Search for solar axions in XMASS, a large liquid-xenon detector", *Physics Letters*, **B724** (2013) 46
[DOI: 10.1016/j.physletb.2013.05.060](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.05.060)

強い相互作用 (QCD) におけるCP問題は長い間解決されていない。アクシオンは、この問題を解決するためにPeccei-Quinnによって導入された仮説の素粒子である。太陽がアクシオンやそれに類する粒子の生成源となっている可能性があり、太陽から来るそのような粒子の探索をおこなった。太陽の中心で生成されるアクシオンなどの持つエネルギーは、太陽の中心温度で規定される。それらの粒子は、電子と反応し (axio-electric効果) 粒子の持つ全エネルギーを測定器に落とす。この探索には、軽いWIMP探索と同じデータを使った。有意な信号は見つからなかったが、期待値との比較から電子とアクシオンの結合定数の上限値を得ることができた。これまでの地上実験と比べて最良の結果が得られた。

*研究成果 6 : 暗黒エネルギーの理論と修正重力

*[8]. A. D. Felice and S. Mukohyama, "Towards consistent extension of quasidilaton massive gravity", *Physics Letters*, **B728** (2014) 622-625
[DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.041](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.12.041)

本論文は、ローレンツ不変でユニタリーなmassive重力理論を構成し、一様等方なドジッター解上で全ての物理的自由度に有限の運動項を持たせることに初めて成功した。この理論は、quasidilaton理論の簡単な拡張となっている。元の理論の持つ対称性を尊重しつつ、massive重力子とquasidilatonスカラー場の間の新しい相互作用を許しているからである。それまでのmassive重力理論では安定な一様等方解が存在しないことが知られていたが、拡張されたquasidilaton理論は、この問題を回避する最初の例を示した。

*研究成果 7 : 暗黒エネルギーに対する新たな観測的制限

*[9]. M. Oguri, N. Inada, M. A. Strauss, C. S. Kochanek, J. Kayo, M-S. Shin, T. Morokuma, G. T. Richards, C. E. Rusu, J. A. Frieman, M. Fukugita, D. P. Schneider, D. G. York, N. A. Bahcall, R. L. White, "The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. VI. Constraints on Dark Energy and the Evolution of Massive Galaxies", *The Astronomical Journal*, **143** (2012) 120
[DOI: 10.1088/0004-6256/143/5/120](https://doi.org/10.1088/0004-6256/143/5/120)

この論文はスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) から重力レンズクエーサーを探索する大規模サーベイSQLSの宇宙論の結果の最終報告である。チームは最終的に約50個の新しい重力レンズクエーサーをおよそ10万個のSDSS分光クエーサーから発見した。クリーンな統計サブサンプルとして50, 836個のクエーサー内の19個の重力レンズクエーサーを用いて統計解析から暗黒エネルギーに制限を与えた。平坦な宇宙を仮定した場合、正の宇宙項は6シグマの有意度で検出された。銀河の速度関数の赤方偏移進化を考慮しても暗黒エネルギーの必要性は有意であり、このことからIa型超新星の観測とは独立に宇宙の加速膨張を確認した。この論文は'2013 AJ highlight collection' に選ばれた。

*研究成果 8 : SuMIRe

*[10]. M. Takada, *et al.* (including H. Aihara, K. Bundy, S. More, H. Murayama, J. D. Silverman, D. N. Spergel, H. Sugai), "Extragalactic science, cosmology, and Galactic archaeology with the Subaru Prime Focus Spectrograph", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **66** (2014) 1
[DOI: 10.1093/pasj/pst019](https://doi.org/10.1093/pasj/pst019)

この論文では、すばる多天体分光装置Prime Focus Spectrograph (PFS) を用いた、すばる望遠鏡300晩のサーベイで可能になるサイエンスを議論した。特に、以下の3つのサイエンスについて着目した。(1) 赤方偏移 $0.8 < z < 2.4$ の範囲における輝線銀河のサーベイによる、暗黒エネルギーの性質を制限することを目的とした宇宙論。これは、バリオン音響振動および赤方偏移歪み効果からの宇宙の構造形成の成長率の高精度測定で可能になる。(2) 約100万個の星の視線速度および元素組成を測定することにより、我々の天の川銀河およびアンドロメダ銀河の形成史および暗黒物質ハローの構造の解明を目的とした銀河考古学。(3) 銀河進化の研究では、約16平方度の領域に渡り、 $J=23.4$ 等までの色-等級で選択された、赤方偏移 $1 < z < 2$ の範囲の銀河および活動銀河核を持つ銀河をサーベイすることにより、赤方偏移 $z \geq 2$ で星質量 $10^{10} M_{\odot}$ 以上の貴重な銀河分光カタログを提供する。このように、この論文では、大型装置が建設される前に、可能なサイエンスを議論した。このような準備研究は、素粒子物理学の分野では良くなされることであるが、天文学では非常に稀である。これも、PFSに関わる研究者の大きな期待、関心の表れである。

*研究成果 9 : 接続層の導来圏と数え上げ不変量

[11]. Y. Toda, "Curve counting theories via stable objects I. DT/PT correspondence", *Journal of the American Mathematical Society*, **23** (2010), no. 4, 1119-1157
[DOI: 10.1090/S0894-0347-10-00670-3](https://doi.org/10.1090/S0894-0347-10-00670-3)

この論文において、戸田幸伸は3次元カラビ-ヤウ多様体上の階数1のDT不変量と安定対不変量を関連付ける Pandaripande-Thomas予想 (のオイラー数版) を証明した。PT予想は2種類の曲線数え上げ理論を関連付けており、彼らが2007年にその予想を提出した際には大きな関心を集めた。PT予想は、3次元カラビ-ヤウ多様体上の弱安定性条件の空間を導入し、Joyceの壁越え公式を適用することで証明された。この論文はDT理論の壁越え理論の更なる進展へ向けての先駆的論文であった。この論文における議論は更に発展され、DT理論における様々な性質の証明、例えばMNOPによる階数1のDT不変量の生成関数の有理性予想、DT不変量のフロップ公式等、が導かれた。

*[12]. Y. Toda, "Bogomolov-Gieseker type inequality and counting invariants", *Journal of Topology*, **6** (2013), no. 1, 217-250
[DOI: 10.1112/jtopol/jts037](https://doi.org/10.1112/jtopol/jts037)

山崎雅人は、Denef-Mooreによる弦理論の論文「Split states, Entropy Enigmas, Holes and Halos, hep-th/0702146」が戸田のDT不変量の仕事と関連するかもしれないと戸田に教えた。更に堀健太郎は、戸田がこの論文を理解する手助けをした。最終的に戸田は、Denef-Mooreによる論文を数学の言葉に翻訳することに成功し、彼らが3次元カラビ-ヤウ多様体上の2次元振れ層を数えるDT不変量と、曲線を数える階数1のDT不変量を関連付ける非常に興味深い数学的予想を主張していることを見出した。この論文において、戸田は「Bridgeland stability conditions on 3-folds I: Bogomolov-Gieseker type inequalities, A. Bayer and E. Macri and Y. Toda, *J. Algebraic Geom.* **23** (2014), 117-163」において提唱したBogomolov-Gieseker型不等式予想がDenef-Moore予想を導くことを証明した。上記の不等式予想は純数学的議論より導かれ、そのDenef-Moore予想との関連は想定されていなかったため、これは驚きであった。戸田は2014年国際数学者会議において招待講演を行った。

*[13]. A. Bayer, E. Macri and Y. Toda, "Bridgeland stability conditions on 3-folds I: Bogomolov-Gieseker type inequalities", *Journal of Algebraic Geometry*, **23** (2014) 117-163
[DOI: 10.1090/S1056-3911-2013-00617-7](https://doi.org/10.1090/S1056-3911-2013-00617-7)

Bridgeland安定性条件はミラー対称性の研究において重要な概念であるが、射影的3次元カラビ-ヤウ多様体上に安定性条件が存在するか否かは、現在でも未解決の問題である。この論文で戸田は、Bayer及びMacriと共同で、任意の3次元射影的代数多様体上に接続層の圏の2重傾斜を用いて、Bridgeland安定性条件の候補を構成した。彼らの構成は3次元射影的代数多様体上のある種の2項複体の3次元チャーチン標数を評価する不等式予想へと導いた。この不等式は代数曲面上の古典的なBogomolov-Gieseker不等式の一般化と解釈できるが、この様な一般化は代数幾何学者が30年以上追いついてきたものであった。彼らの不等式予想は、古典的な代数幾何学の未解決問題である3次元射影的代数多様体上の藤田予想を導くことも判明した。

研究成果 10 : Langlands対応と p 進コホモロジー論

[14]. T. Abe, "Langlands correspondence for isocrystals and existence of crystalline companion for curves", [arxiv.org:1310.0528](https://arxiv.org/abs/1310.0528), Preprint

この論文では p 進係数のラングランズ対応が構築され、クリスタリン小同志の存在に関するDeligneの予想が曲線の場合に示されている。これにより阿部知行が数年前に提起した計画が完成されたことになる。最も難しいのは p 進コホモロジー論の構築にある。既にBerthelotによるリジッド・コホモロジーと呼ばれる“良い”コホモロジー論は存在していたが、その“変動理論”が必要であり、十分ではなかった。これは例えば数々の応用においてホッジ理論ではなくホッジ加群の理論が必要になってくると似た状況である。そのため20年ほど前にBerthelotは数論的 D 加群の理論を導入した。Berthelot, Caro, Kedlayaらの貢献により準射影的多様体に対してはほとんど良い理論が構築されていた。この論文で阿部知行はさらに広く、ある種の代数的スタックに対しても理論を広げることで、Lafforgueのテクニックを p 進コホモロジーでも使えるようにし、証明に成功した。

[15]. T. Abe and D. Caro, "Theory of weights in p -adic cohomology", [arxiv.org:1303.0662](https://arxiv.org/abs/1303.0662) Preprint

この論文では p 進コホモロジー論における“重さの哲学”を構築している。重さの哲学はヴェイユ予想に関する考察の過程でGrothendieckにより提唱されたものである。これまでにエタール・コホモロジー論とホッジ理論の主に2つの理論で体现されていた。エタール・コホモロジーに関してはDeligneのいわゆる“ Weil II ”で構築されたものであり、ホッジ理論にはこのDeligneの理論にならって斎藤盛彦により、そして後に望月拓朗によりさらに一般化されている。この論文で阿部知行は p 進コホモロジーに対して新たに重さの理論を構築した。これはラングランズ対応の観点から当然期待されるべきものであり、上記の論文のラングランズ対応の構成でも用いられることとなる。副産物として、 p 進コホモロジーにおいては定義すら困難だった交叉コホモロジー論を構築することができる。

*研究成果 11 : 原始形式とミラー対称性

*[16]. T. Milanov, “Analyticity of the total ancestor potential in singularity theory”, *Advances in Mathematics*, **255**, no. 1 (2014) 217-241
DOI: [10.1016/j.aim.2014.01.009](https://doi.org/10.1016/j.aim.2014.01.009)

特異点論におけるtotal ancestor potentialはGiventalの高種数再構成の定式化を齊藤恭司の平坦（あるいはフロベニウス）構造に適用することで定義される。アプリオリにこの定義は半単純な点においてのみ意味をもつ。しかし、Giventalは、特異点論の枠組みにおいて、彼の定義が全変形空間に解析接続可能であると予想した。定義によりtotal ancestor potentialはビラソロ制限に類似したいくつかの制限を満足する。T. Milanovは過去の研究で、ビラソロ制限はEynardとOrantinの提唱したEynard-Orantinの位相的漸化式として知られている方法により解けることを証明した。本論文における主な結果は、その漸化式をジェネリックな非半単純点に解析接続したことである。Hartogの拡張定理も用いることで、その系としてGivental予想の証明が得られた。

[17]. C. Li, S. Li, K. Saito, Y. Shen, “Mirror Symmetry for Exceptional Unimodular Singularities”, [arXiv:1405.4530](https://arxiv.org/abs/1405.4530), Preprint

この論文では、繰り込み群の作用によりirrelevantな方向（高エネルギーで発散し、低エネルギーで収束する方向）を含む様な負のウェイト方向の変形を含むようなスーパーポテンシャル関数 F に対するLG-LG-鏡像対称性予想に対して証明を与える。著者達のこれに先立つ共同研究(arXiv:1311.1659)に基づき、C. Li, S. Li, K. Saito, Y. Shen等は例外型ユニモジュラー特異点に対して、摂動的にその原始形式と平坦座標系を決定した。更にWitten-Dijkgraaf-Verlinde-Verlinde-方程式を用いることにより、彼らは4点の相関係数のみで対応する平坦構造のプレポテンシャル関数は決定されることを示した。一方、関数 F に対する平坦変形パラメータ空間から、Berglund-Huebsch 双対多項式 F に対するFJRW (Fan-Jarvis-Ruan-Witten) 理論の状態空間へのKrawits鏡像射を一般化して定義することにより、彼らはプレポテンシャル関数の平坦座標系によるテイラー展開の係数を対応するFJRW 不変量と次数4まで比較を行い、両者が一致し、従って、鏡像対称予想が成立することを示した。

*[18]. B. Bakalov and T. Milanov, “W-constraints for the total descendant potential of a simple singularity”, *Compositio Mathematica*, **149** (2013) 840-888
DOI: [10.1112/S0010437X12000668](https://doi.org/10.1112/S0010437X12000668)

*[18] 「単純特異点のtotal descendant potentialに対するW制限」

本論文は原始形式の周期積分を用いて特異点論のミルナー格子に対応する格子頂点代数の捩れ表現を構成する。さらに、本論文はW代数を、消滅サイクルに対応する一組のスクリーニング作用素によって定まる頂点部分代数として定義する。単純特異点の場合は、本論文の定義はADE型単純リー代数に対するW代数の定義と一致する。本論文の主な結果はtotal ancestor potentialがW代数の最高ウェイトベクトルであることである。単純特異点に対して、W代数の構造がある程度まで理解された。特に、本論文の制限がtotal descendant potentialを一意的に定めることが、最近S. Q. LiuとY. Zhangによって証明された。一般的に、本論文の構成が一般化されるかどうかは、スクリーニング作用素の核を決定することは非常に困難であるという意味で、未だに分かっていない。

*研究成果 12 : 有限群とカラビ・ヤウ・ジオメトリの間の新しい関係の発見

*[19]. T. Eguchi, H. Ooguri and Y. Tachikawa, “Notes on the $K3$ Surface and the Mathieu Group M_{24} ”, *Experimental Mathematics* **20** (2011) 91-96
DOI: [10.1080/10586458.2011.544585](https://doi.org/10.1080/10586458.2011.544585)

この論文において、大栗博司、江口徹、立川裕二は、 $K3$ 曲面の楕円種数が、マシュー群 M_{24} の既約表現の

次元を用いて自然に分解できることを示した。これらの次元は、楕円種数を、 $K3$ 曲面上の非線形 σ 模型が自然にもつ $N=4$ 超共形代数の指標によって展開したときの係数として現れる。この発見は、のちに2013年に Terry Gannon によって厳密に証明された。この結果は、 M_{24} が楕円コホモロジーの対称性として作用することを示唆している。

*[20]. H. Ooguri and M. Yamazaki, "Emergent Calabi-Yau Geometry", *Physical Review Letters*, **102** (2009) 161601

[DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.161601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.161601)

本論文において、大栗博司と山崎雅人は、結晶溶解の統計模型の熱力学極限からカラビ-ヤウ多様体の滑らかな幾何が見れることを示した。特に、結晶溶解の特性多項式のロンキン関数を対応するカラビ-ヤウ多様体の正則 3 形式に関係づけることにより、溶けた結晶の熱力学分配関数がトポロジカル弦理論の分配関数の古典極限と等価であることが示された。

*研究成果 13 : 超対称ゲージ理論

*[21]. O. Chacaltana, J. Distler and Y. Tachikawa, "Nilpotent orbits and codimension-two defects of 6d $N=(2,0)$ theory", *International Journal of Modern Physics*, **A28** (2013) 1340006

[DOI: 10.1142/S0217751X1340006X](https://doi.org/10.1142/S0217751X1340006X)

L. F. Alday, D. Gaiotto, 立川裕二の三人による予想は、もともと $SU(N)$ に対するものだったが、それを一般の群に拡張するには、 $SU(N)$ の場合はなかった様々な微妙な点が生ずる。 $SU(N)$ の場合は、箱が N 個のヤング図で名前がつけられる、ある物体が重要な役割を果たしたが、一般には、ヤング図はベキ零軌道で置き換えられる。このベキ零軌道は、数学では重要であると長らく知られていたが、理論物理ではこれまで表立ってはそれほど現れなかった。この論文では、立川は共著者の Chacaltana と Distler とともに、ベキ零軌道の数学的振る舞いがどのようにこの物理的状況で現れるかを調べた。ベキ零軌道に付随して、数学において自然に現れる概念はいろいろあるが、教科書に載っているような概念のみならず、この十年で見つかったような新しい性質までが、ほぼすべてこの物理的状況でも現れることが示された。

*[22]. O. Aharony, N. Seiberg, and Y. Tachikawa, "Reading between the lines of four-dimensional gauge theories", *Journal of High Energy Physics*, **1308** (2013) 115

[DOI: 10.1007/JHEP08\(2013\)115](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2013)115)

ゲージ理論は平らな時空においては、ゲージ結合定数と、 θ 角という、二つの連続パラメータがあることは長らく知られている。しかし、時空のトポロジーが複雑になると、それだけでは捉えられない効果があり、長らく研究者を混乱させてきた。この論文では、一般の時空においては、ゲージ理論は上記の二つの連続パラメータだけでなく、いくつかの離散的なパラメータを持つことが示された。これらの離散的なパラメータは、理論がどのような線演算子を持つかを決め、このパラメータを記述するには、群の分類空間のコホモロジーを用いるのが良い。群の分類空間のコホモロジーは数学では長らく研究されていた対象であるが、物理ではこの論文までは散発的に使われていただけだった。この論文の執筆には、Kavli IPMU の数学者との議論、および、Kavli IPMU の古典から最新までの数学の文献を揃えた図書館の存在は不可欠であった。

*研究成果 14 : 場の量子論と超弦理論における方法—双対性

*[23]. K. Hori, "Duality In Two-Dimensional (2, 2) Supersymmetric Non-Abelian Gauge Theories", *Journal of High Energy Physics*, **1310** (2013) 121

[DOI: 10.1007/JHEP10\(2013\)121](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2013)121)

この論文は、2次元(2, 2)超対称ゲージ理論の低エネルギーでの振る舞いについてである。物質場の個数が少ない場合は超対称性が自発的に破れることを示し、多い場合はゲージ群や物質場が相異なる理論の間に成り立つと思われる双対性を発見した。それは4次元 $N=1$ 超対称ゲージ理論におけるサイバーク双対性の2次元版と呼べるものである。この結果を幾つかの線形シグマ模型に応用し、赤外固定点として現れる超共形場の理論を調べた。これらは超弦理論のコンパクト化に用いることができるが、そのモジュライ空間が3次元カラビ-ヤウ多様体に対応する極限を含むことが分った。この研究は導来圏の間の圏同値に関する最近のいくつかの数学的発見に動機づけられている。研究結果はそれらの発見を統一的に理解する枠組みを与え、系統的に一般化する方法を提示している。この研究においては著者とA. ボンダルとのやり取りが不可欠であった。ある二重被覆に関する数学的質問をボンダルにしたこと自体が双対性を発見する引き金となったのである。

*[24]. K. Hori and M. Romo, "Exact Results In Two-Dimensional (2,2) Supersymmetric Gauge Theories With

Boundary",
[arXiv:1308.2438](https://arxiv.org/abs/1308.2438), Preprint

ゲージ化された線形シグマ模型を含む2次元(2, 2)超対称ゲージ理論における半球面上の分配関数を超対称局所化の方法により計算した。計算結果は境界に置かれたDブレーンの中心電荷に対する厳密な一般表式を与える。それはメラン・バーンズ積分の形を取り、その収束条件から相境界の近傍におけるDブレーンに対する「次数制限則」が導かれる。様々な相における表示が得られ、幾何学的な相においては「ガンマ類」と呼ばれる特性類が表示の中に現れることを示した。球面上の分配関数が二つの半球面分配関数をシリンダー分配関数の逆でつないだ形の分解表示を持つことも示された。結果はミラー対称性の研究においてよく出てくる形にも書き表すことができ、Dブレーンのミラー対応を具体的に見つける方法を示唆している。

*研究成果 15 : F 理論 : 現象論的応用と双対性

*[25]. H. Hayashi, R. Tatar, Y. Toda, T. Watari and M. Yamazaki, "New Aspects of Heterotic- F theory duality", *Nuclear Physics*, **B806** (2009) 224-299
[DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2008.07.031](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2008.07.031)

弦理論にはいくつかの異なる定式化があって、 F 理論はそれらの中では、標準模型の粒子のフレーバー構造の期限を研究する上ではもっとも有望なものである。しかしながら、 F 理論の定式化には、高度な数学が必要とされる未解決問題がいくつか残されたままになっていて、そのために十年以上もの間、その先の進歩が阻まれ続けていた。Kavli IPMU所属の物理学者・数学者を含む共同チームはこれらの問題を解決し、この論文は2008-10年の当該分野の飛躍的發展を可能にする基礎的論文の一つとなった。また、 F 理論の定式化に関する理論的問題を解決しただけでなく、この論文では物質場が内部空間上で滑らかな波動関数によって記述することも発見した；そこからは陽子の崩壊率を大きくする因子の値について直接的な帰結が導かれる。

*[26]. R. Tatar, Y. Tsuchiya and T. Watari, "Right-handed Neutrinos in F -theory Compactifications", *Nuclear Physics*, **B823** (2009) 1-46
[DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2009.07.020](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2009.07.020)

この論文は、論文[25]やその他の文献で開発された F 理論の定式化を用いて、 F 理論のコンパクト化における複素構造モジュライ場がヒッグス場や荷電レプトン場とともに3点相互作用を持つことを示した。この結果から、いくつかの重要な帰結が導かれる。I) 複素構造モジュライ場は、右巻きニュートリノであるとみなせる、II) おそらくは数多くの右巻きニュートリノが存在する、III) 右巻きニュートリノの典型的な質量の大きさは複素構造モジュライ場のそれであり、すなわち、大統一理論のエネルギースケールよりも数桁下、といったところである。この(III)の帰結は、大気ニュートリノ振動の実験から示唆されている質量次元5のニュートリノ質量項の、エネルギースケール 10^{15} GeV に対して説明を与えている。

*研究成果 16 : 物性物理学への応用

*[27]. N. Ogawa, T. Takayanagi and T. Ugajin, "Holographic Fermi Surfaces and Entanglement Entropy", *Journal of High Energy Physics*, **1201** (2012) 125
[DOI: 10.1007/JHEP01\(2012\)125](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2012)125)

*[27]高温超伝導体の異常金属相のように、相互作用が強い状況におけるフェルミ面の性質の解明は、物性物理学の重要な未解決問題の一つである。本論文では、AdS/CFT対応を用いた解析にエンタングルメント・エントロピーの計算という新たな要素を初めて取り入れて、強結合理論のフェルミ面の一般的性質を明らかにした。興味深いことに、AdS/CFTのエンタングルメント・エントロピーの解析から重力双対の計量に対して非常に強力な制限を得ることができる。そのおかげで、強結合でラージ N （自由度が大きい）の量子系にフェルミ面が存在する場合は、必ず比熱が異常の振る舞いを示すことが初めて明らかになった（言い換えると必ず異常金属になり、ランダウのフェルミ液体とは異なる）。また、重力双対の計量に対してフェルミ面が存在する条件を見出した。

*[28]. H. Watanabe and H. Murayama, "Unified Description of Nambu-Goldstone Bosons without Lorentz Invariance", *Physical Review Letters*, **108** (2012) 251602
[DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.251602](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.251602)

南部・ゴールドストーン粒子とは自発的対称性の破れという概念から導かれるもので、この概念は物理学の全分野だけでなく、化学や生物学にも通用する。しかし、半世紀を越えて普遍的で矛盾のない理論はなかった。村山齊は物性物理学の研究者である渡辺悠樹とともに、自由度の個数、その分散関係、そしてその間の相互

作用を正確に記述できるそうした統一的な記述を発見した。数学では比較的知られていない分野であるプリシンプレクティック幾何学を使い、理論的な可能性の完全な分類も可能にした。この論文は新しい研究分野を切り拓き、下の論文を含め同著者による3本のフィジカル・レビュー・レターズが続いた。本論文はEditor's suggestionに選ばれ、アメリカ物理学会による Synopsis of Physicsで紹介された。

*[29]. H. Watanabe and H. Murayama, "Noncommuting Momenta of Topological Solitons", *Physical Review Letters*, **112** (2014) 191804
DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.191804](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.191804)

ローレンツ対称性のない系での南部・ゴールドストーン粒子の理解を進めたことにより、トポロジカルなソリトン解の性質に応用を行った。トポロジカルな量子数により、その運動量演算子が非可換になることを証明した。これはWitten-Oliveが発見した、磁荷によって超対称性の代数が中心拡大されることとそっくりである。このすぐさまの実験的帰結は、外力を働かせた際に、力と直交した方向にソリトンが進むことである。この点は標的空間として任意のケーラー多様体に一般化できる。最初のレフェリーは本論文はフィジカル・レビュー・レターズには数学的すぎると批判したが、別のレフェリーは「著者らは洗練された数学を使っているが、近年では物性物理学の標準的な道具となっている」と論文の出版を支持した。

*研究成果 17 : ニュートリノの性質

*[30]. A. Gando *et al.* (KamLAND-Zen Collaboration including K. Inoue, M. Koga, K. Nakamura, A. Kozlov, S.J. Freedman, B.K. Fujikawa, Y. Efremenko, S. Enomoto, M.P. Decowski), "Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ^{76}Ge ", *Physical Review Letters*, **110** (2013) 062502
DOI: [10.1103/PhysRevLett.110.062502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.062502)

ニュートリノは反粒子との区別が無いかもしれない唯一既知の物質粒子である。この性質は宇宙・素粒子の大問題（特に、軽いニュートリノ質量の謎、宇宙物質優勢の謎）を解き明かす鍵と考えられている。この性質を実験的に調べることができる現在唯一現実的な手法が、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索である。カムランド禅は、カムランドが実現した大型極低放射能環境を利用し、世界最大量の二重ベータ崩壊核 (90%に同位体濃縮した ^{136}Xe を320kg) を含む液体シンチレータをミニバルーンに内包して吊り下げている。現在得られている $0\nu\beta\beta$ の半減期の下限値は90%の信頼度で 1.9×10^{25} 年であり、EXO-200実験との統合解析では 3.4×10^{25} 年の下限値が得られ、有効マヨラナ質量に換算して120-250meVの上限値が得られる。この結果は、 ^{76}Ge を使った検出器で過去に指摘があった $0\nu\beta\beta$ 信号の検出を97.5%の信頼度で否定する。

[31]. A. Gando *et al.* (KamLAND Collaboration including K. Inoue, M. Koga, K. Nakamura, A. Kozlov, A. Piepke, B.K. Fujikawa, B.E. Berger, Y. Efremenko, W. Tornow, S. Enomoto, M.P. Decowski), "Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND", *Physical Review D*, **88** (2013) 033001
DOI: [10.1103/PhysRevD.88.033001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001)

カムランドは、約180kmの有効距離の多数の原子炉に囲まれており、第一世代と第二世代間のニュートリノ振動を測定するのにうってつけのユニークな環境を有している。原子炉からの反電子ニュートリノは、水素原子での逆ベータ崩壊反応によって検出され、ニュートリノ振動を決定づける2周期に亘るニュートリノの消失・復元がはっきりと観測された。この周期測定からニュートリノの質量二乗差に対して2.4%という精密測定が実現し、これは、ニュートリノ質量に関する世界で最も高精度な測定である。最近では日本の原子炉が停止していることから、反ニュートリノの観測レートが原子炉の運転と完全に相関していることを確認し、精密測定を支えるバックグラウンド描像の正当性を実証できた。

*[32]. S. Saito, M. Takada, A. Taruya, "Neutrino mass constraint from the Sloan Digital Sky Survey power spectrum of luminous red galaxies and perturbation theory", *Physical Review D*, **83** (2011) 043529
DOI: [10.1103/PhysRevD.83.043529](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.043529)

本研究では、ニュートリノ質量のロバストな制限を得るため、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) のデータリリース7 (DR7) における明るく赤い銀河 (LRG) サンプルで測定された銀河クラスターリング分布のパワースペクトルと、摂動論による予言を比較した。本研究のモデルは重力の非線形進化・非線形銀河バイアスを、摂動論的アプローチに基づき物理的に自然な形で取り入れたものである。本研究では、まずモデルの正当性をN体シミュレーションで確認した上で、実際のSDSS DR7 LRGサンプルに適用し、WMAPによるマイクロ波背景放射の温度・偏光ゆらぎと組み合わせることで0.81eV (95% C.L.) という上限値を得ることに成功した。なおこの結果は、暗黒エネルギーパラメータや非線形銀河バイアスパラメータの不定性を考慮したものである。この結果は、WMAPのみの結果 (1.5eV) に比べて1.85倍厳しい制限である。

*研究成果 18 : 銀河の進化

*[33]. A. Leauthaud, J. Tinker, K. Bundy, *et al.*, "New Constraints on the Evolution of the Stellar-to-dark Matter Connection: A Combined Analysis of Galaxy-Galaxy Lensing, Clustering, and Stellar Mass Functions from $z = 0.2$ to $z=1$ ", *The Astrophysical Journal*, **744** (2012) 159
DOI: [10.1088/0004-637X/744/2/159](https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/2/159)

本論文は COSMOS サーベイから得られたデータを用い、 Λ CDM モデルの N 体シミュレーションを用いて、初めて銀河の弱い重力レンズ、銀河の空間的クラスタリング、銀河の数密度の同時解析を行った。この同時解析により、銀河とその周囲にあるダークマターハローの間の関係について制限を与えることが可能になる。さらに、この制限を独立に測定された銀河について推定した全星質量の結果と組み合わせることにより、 $z = 0.2$ から $z = 1$ における銀河の全星質量とダークハロー質量の関係 (SHMR) の形-質量依存性と赤方偏移の進化に対する強い制限を導くことができる。本論文は、ダークマターと星質量の比 M_h/M_* が (星質量 M_* が) 低質量から高質量になるにつれて変化し、 $M_* = 4.5 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ および $M_h = 1.2 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$ で最小値 $M_h/M_* \sim 27$ となることを示した。この最小値は、(ハローの) 中心の銀河で星質量の累積成長が最も効率的であった質量を示すため、銀河形成のモデルにとって重要である。この論文は天体物理学分野で 2012 年に (他の論文と同等で) 引用数 9 番目にランクされた。

*[34]. J. D. Silverman, *et al.* (including M. Tanaka), "The Impact of Galaxy Interactions on Active Galactic Nucleus Activity in zCOSMOS", *The Astrophysical Journal*, **743** (2011) 2
DOI: [10.1088/0004-637X/743/1/2](https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/2)

数値シミュレーションが示唆するように、異なる銀河間の近接相互作用は、銀河中心に存在する巨大質量ブラックホールへの質量降着を誘発する有力なメカニズムの一つと考えられている。このシナリオを検証するために、赤方偏移の範囲で $0.25 < z < 1.05$ にある、星質量で $M_* > 2.5 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ にある 562 個の銀河からなる、空間的に近接した、つまり相互作用していると考えられる銀河サンプルを構築した。このサンプルは、zCOSMOS の 2 万個の分光銀河の代表サンプルと比較しても、有意に相互作用の兆候を示している。一方で、銀河活動核 (AGN) を有する銀河については、独立な Chandra 衛星のデータの X 線光度 ($L_{0.5-10 \text{ keV}} > 2 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$) から同定した。これらのサンプルを比較することで、同等の星質量の銀河を比較して、相互作用している銀河では AGN の活動を示す銀河の比率が有意に高いことを見つけた。

*[35]. B. Ménard, R. Scranton, M. Fukugita, R. Gordon, "Measuring the galaxy-mass and galaxy-dust correlations through magnification and reddening", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **405** (2010) 1025-1039
DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16486.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16486.x)

銀河ハロー及び大規模構造に起因する重力レンズ増光とダストによる赤化効果の検出を報告する。測定は SDSS 探査により得られた赤方偏移 $z > 1$ を有する 85,000 個のクエーサーと $z \sim 0.3$ 程度にある 2,400 万個の銀河の相関解析を行い銀河と質量及び銀河とダストの相互相関を調べることによってなされた。その結果、銀河より数 M_{pc} に及ぶダストの存在とその射影密度が $\Sigma_{\text{dust}} \sim r_p^{-0.8}$ と振る舞うことが明らかにされ、これはダークマターの分布と同様である。導かれた赤化現象の波長依存性を記述する径数 $R_V = 4.9 \pm 3.2$ は星間ダストのものと同様性を有する。従って、光線赤化は宇宙空間に存在するダストによるものと解釈され、宇宙平均質量密度は $\Omega_{\text{dust}} \sim 5 \times 10^{-6}$ と推定される。このうち、約半分は L^* 銀河のハロー内に存在しているものと推測される。

*研究成果 19 : 初代星の形成とブラックホール

*[36]. T. Hosokawa, K. Omukai, N. Yoshida, H. W. Yorke, "Protostellar feedback halts the growth of the first stars in the universe", *Science*, **334** (2011) 1250-1253
DOI: [10.1126/science.1207433](https://doi.org/10.1126/science.1207433)

研究チームは多次元輻射流体力学シミュレーションを行い、第一世代星 (ファーストスター) の形成過程を明らかにした。中心原始星の進化と周辺ガスの熱進化を同時に解くことにより、明るいファーストスターは大量の紫外光を放出することでガス降着と自身の質量増加を抑制するという機構を明らかにした。銀河系内の古い星の観測から示唆されているファーストスターの質量は太陽の数十倍程度であり、従来考えられていたような、ファーストスターが太陽の数百倍にもなる可能性は小さいことが理論的に示された。

*研究成果 20 : 超新星と化学進化

*[37]. K. Maeda, et al. (including K. Nomoto, M. Tanaka), "An asymmetric explosion as the origin of spectral evolution diversity in type Ia supernovae", *Nature*, **466** (2010) 82-85
[DOI: 10.1038/nature09122](https://doi.org/10.1038/nature09122)

Ia型超新星は観測的に一様な（個性のない）爆発現象であり、明るいものほどゆっくりと減光するという性質を持つ。このように一つのパラメータで観測事実が記述できるため、Ia型超新星は宇宙論における標準光源として使われ、その観測結果は宇宙の加速膨張の発見につながった。しかし、最近の研究により、Ia型超新星の性質はもっと複雑であることがわかってきた。本論文では、Ia型超新星におけるスペクトル進化の多様性が非対称な爆発に起因し、そのような爆発を視る方向がランダムであることから発生しているという発見を報告する。この結果によると、スペクトル進化の多様性は一つのパラメータで表されないにも関わらず、Ia型超新星を標準光源として用いることに問題は無いということが帰結される。さらに、Ia型超新星爆発において、一般に中心からずれた場所で核反応爆発が生じることが示唆される。

[38]. N. Tominaga, N. Iwamoto, and K. Nomoto, "Abundance Profiling of Extremely Metal-Poor Stars and Supernova Properties in the Early Universe", *The Astrophysical Journal*, **785** (2014) 98
[DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/98](https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/98)

暗黒物質と暗黒エネルギーの研究と並行して、暗黒物質でない通常の物質の起源を探ることは、Kavli IPMUにおける重要な研究課題の一つである。この課題達成のために、この論文では、鉄の含有量が極端に少ない星で観測された元素組成のパターンを解析して、それを、宇宙の初代星の超新星爆発の理論モデルによって予測された元素組成とを比較する研究を行った。この方法は、宇宙の初代星がどのような星であるかを解明する上で、大きな成功を収めた。鉄の含有量が極端に少ない星では、炭素・酸素・窒素の鉄に対する存在比が非常に大きいという特徴を示すものが多い。この論文は、このような特徴は、宇宙の初代星が太陽の20-50倍という質量を持ち、合成された元素の大部分が放出されずにブラックホールに落ち込んでしまうような超新星爆発を起こせば、よく説明することができることを示した。この結果によって、宇宙の初代星の典型的な質量と超新星爆発の性質を解明する上で重要な手がかりが得られた。

*[39]. K. Bays et al. (Super-Kamiokande Collaboration including Y. Hayato, S. Moriyama, M. Nakahata, M. Shiozawa, Y. Suzuki, T. Kajita, K. Kaneyuki, K. Martens, M. Vagins, E. Kearns, J.L. Stone, M.B. Smy, H.W. Sobel, K. Scholberg, C.W. Walter, K. Nakamura, Y. Takeuchi, T. Nakaya), "Supernova relic neutrino search at Super-Kamiokande", *Physical Review D*, **85** (2012) 052007
[DOI: 10.1103/PhysRevD.85.052007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.052007)

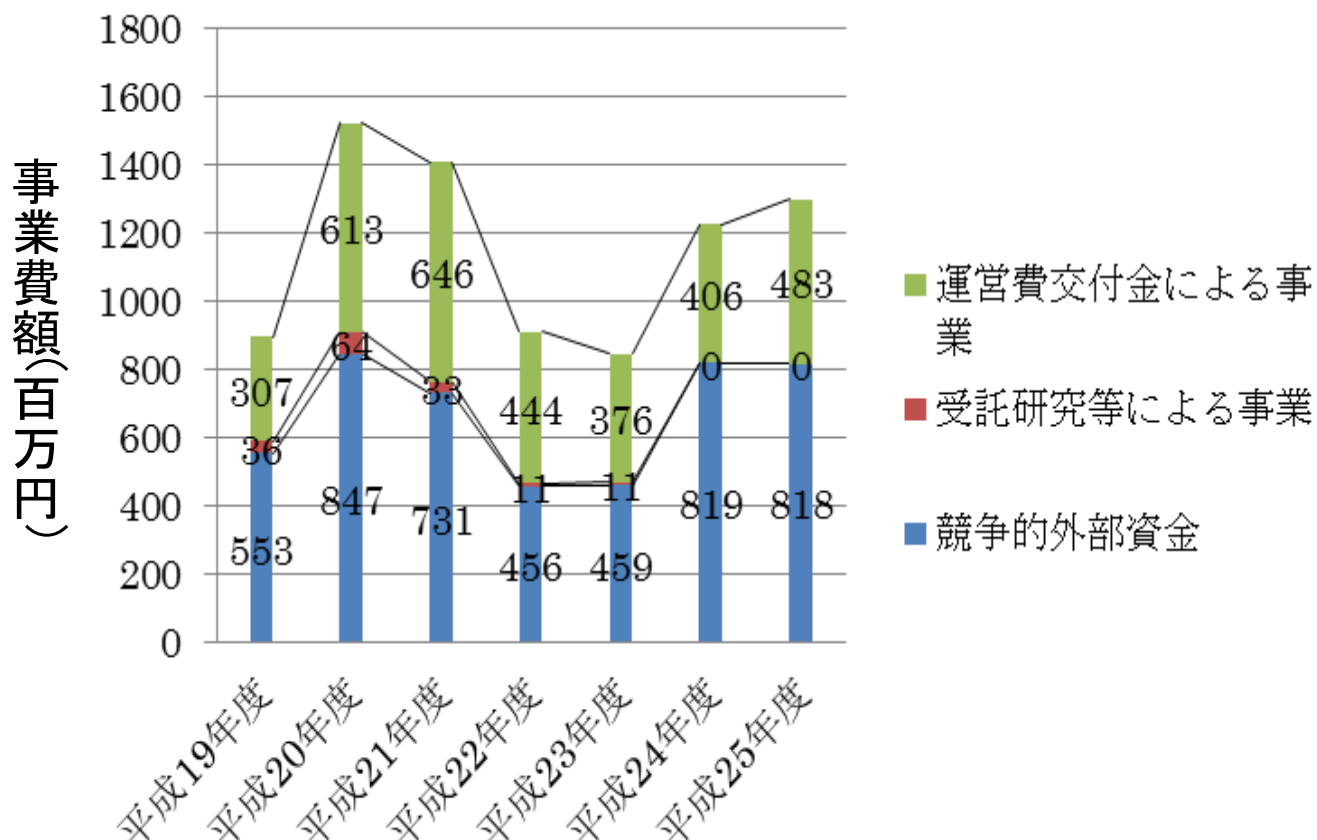
スーパーカミオカンデ (SK) 検出器を用いて超新星起源残存ニュートリノの探索を行った。超新星起源残存ニュートリノの信号は、過去のすべての超新星から発生した拡散背景ニュートリノである。この信号は未だ検出されていないが、原子炉からのニュートリノのエネルギーと大気ニュートリノのエネルギーの間隙、10 MeVから30 MeVのエネルギー範囲に存在すると期待されている。本論文においては、反ニュートリノ反応からの陽電子の信号を探索したが、（反ニュートリノ反応の）標識となる中性子は検出していない。このような場合、このエネルギー範囲において最も多いバックグラウンドは、核破碎のバックグラウンドと太陽ニュートリノである。これらを可能な限り低減するため、たとえば核破碎バックグラウンドに対して（その原因となる）ミュー粒子（の飛跡に沿った核破碎発生点と考えられるエネルギー損失最大の点）とベータ崩壊生成物の間の縦方向（ミュー粒子飛跡方向）相関を考慮する等、解析方法を改善した。その結果、解析のエネルギー閾値は16 MeVに下がった。探索はSKにおいて1996年から2008年までに収集された有効日数2,853日分のデータを用いて行われたが、バックグラウンドを超える有意な信号は観測されず、（超新星起源残存ニュートリノのスペクトルを与える）種々のモデルの予測に対してフラックスの上限値を得た。

*[40]. S. M. Adams, C.S. Kochanek, J. F. Beacom, M. R. Vagins, and K.Z. Stanek, "Observing the Next Galactic Supernova", *The Astrophysical Journal*, **778** (2013) 164
[DOI: 10.1088/0004-637X/778/2/164](https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/2/164)

本論文は銀河系内の重力崩壊型超新星の距離と減光と等級の確率分布、衝撃波が表面に到達した時に発する放射、および爆発した大質量の親星のモデルを作った。銀河系内に次に出現する超新星は、非常に高い確率（~100%）で近赤外で容易に見出されるであろうということと、2MASSサーベイによりその親星の近赤外測光のデータが既に得られている可能性が非常に高い（~92%）ことを見出した。ほとんど（~98%）の重力崩壊型超新星は、可視光でも容易に観測されるであろう。ニュートリノ検出実験は、早期に（超新星の）およその位置（~3 deg）を情報提供する。その利点について、銀河系内の重力崩壊型超新星からのニュートリノが検出され通報される過程のレビューと共に議論する。そして、Kavli IPMUの新たに稼動したガドリニウムを用いるEGADS検出器について述べる。この検出器は、世界に向けて、瞬時に、独立に、信頼性の高い超新星ニュートリノ警報を提供するという、現時点では唯一の能力を持っている。

2. 研究プロジェクト費獲得実績の推移

※研究プロジェクト費獲得実績の推移を棒グラフで表示すること。また特筆すべき研究資金について記載すること。



[特筆すべき研究資金]

- ・科学研究費・基盤研究(A)「ダークマターの探索」(6.4百万円)/学術創成研究「宇宙暗黒物質の研究」(225.2百万円)
- ・科学研究費・基盤研究(S)「超新星背景ニュートリノの探索」(51.2百万円)
- ・科学研究費・特別推進研究「ニュートリノ観測装置カムランドを用いたニュートリノレス二重 β 崩壊の研究」(567百万円)
- ・最先端研究開発支援プログラム「宇宙の起源と未来を解き明かす-超広視野イメージングと分光によるダークマター・ダークエネルギーの正体の究明-」(2,161百万円)
- ・科学研究費・新学術領域研究「超新星爆発によるニュートリノ信号と重力波信号の相関の研究」(15百万円)

3. 主な受賞・招待講演・基調講演等一覧(2ページ以内)

1. 主要な賞の受賞

※既に受賞したあるいは内定している国際的に認知されている賞について新しいものから順に記載すること
 ※それぞれの受賞について、賞の名前、受賞年、受賞者名を記すこと。なお、共同受賞の場合には、拠点関係者に下線を記すこと

1. ヘルマン・ワイル賞、2014年、立川 裕二
2. 数学会春季賞、2014年、戸田 幸伸
3. ユリウス・ヴェス賞、2013年、梶田 隆章
4. 日本数学会幾何学賞、2013年、河野 俊文
5. ジュゼッペ・ヴァンナ・コッコーニ賞、2013年、鈴木 洋一郎
6. アメリカ芸術科学アカデミー会員、2013年、村山 斉
7. ランスット M. バークレー賞、2013年、小松 英一郎
8. アメリカ数学会初代フェロー、2013年、大栗 博司
9. 仁科記念賞、2012年、井上 邦雄
10. 幾何学賞、2012年、戸田 幸伸
11. 米国グルーバー賞、2012年、David Spergel、小松 英一郎等 WMAP(ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機)実験研究チーム
12. サイモンズ研究賞、2012年、大栗 博司
13. 日本学士院賞、2012年、梶田 隆章
14. スローンリサーチフェローシップ、2012年、Brice Ménard
15. 日本数学会幾何学賞、2011年、斉藤 恭司
16. 日本数学会武部賞、2011年、阿部 知行
17. ブルーノ・コンテコルボ賞、2011年、Serguey Petcov
18. ブルーノ・コンテコルボ賞、2011年、鈴木 洋一郎
19. 井上學術賞、2011年、小林 敏文
20. パリ天体物理学研究所メダル、2010年、野本 憲一
21. ショウ賞、2010年、David Spergel、Charles L Bennett、Lyman A Page Jr
22. 日本学士院賞、2010年、佐藤 勝彦
23. ブルーノ・コンテコルボ賞、2010年、Henry Sobel
24. 井上學術賞、2009年、中畑 雅行
25. 仁科記念賞、2009年、大栗 博司
26. 湯川・朝永奨励賞、2009年、杉本 茂樹
27. フンボルト賞、2008年、大栗 博司
28. IUPAP 計算物理学若手科学者賞、2008年、小松 英一郎

29. IUPAP 計算物理学若手科学者賞、2008年、吉田 直紀
 30. アメリカ数学会アイゼンバッド賞、2008年、大栗 博司、

2. 国際会議・国際研究集会での招待講演・基調講演等

- ・主要なもの20件以内について新しいものから順に記載すること
 - ・それぞれの講演等について、講演者名、発表タイトル、国際会議等名、開催年を記載すること
1. 中畑 雅行, “Neutrino Physics”, the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), July 2–9, 2013
 2. 野尻 美保子, “Theoretical Results on Physics Beyond the Standard Model 30’”, 2013 Lepton Photon Conference, June 24–29, 2013
 3. 村山 斉, “Future Experimental Programs”, Invited lecture at Nobel Symposium on the LHC results, May 13–17, 2013
 4. Mark Robert Vagins, “Astrophysical Neutrino Forecast – Mostly Sunny, with a Good Chance of Supernovas”, American Association for the Advancement of Science (AAAS) 2013 Annual Meeting, February 16, 2013
 5. 杉本 茂樹, “Holographic QCD –Status and perspectives for the future–”, Xth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, October 8–12, 2012
 6. 大栗 博司, “Conference Summary”, Strings 2012 Conference, July 23–28, 2012
 7. 河野 敏文, “Homological representations of braid groups and KZ connections”, 6th European Congress of Mathematics, July 2–6, 2012
 8. 向山 信治, “Modified Gravity”, The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting, July 1–7 2012
 9. 井上 邦雄, “Results from KamLAND-Zen”, The 25th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2012), June 3–9, 2012
 10. 高田 昌広, “Weak lensing: Gaussianity and non-Gaussianity”, Astronomical Data Analysis VII IESC, May 14–18, 2012
 11. 齊藤 恭司, “On primitive forms and associated period maps”, 2011 Geometry Prize, The Mathematical Society of Japan, March 28, 2012
 12. 柳田 勉, “The Origin of Matter”, HERTZ LECTURE (DESY Lecture on Physics 2011), September 2011
 13. 高柳 匡, “Holographic Entanglement Entropy and its New Developments”, Strings 2011, June 27–July 1, 2011
 14. 堀 健太郎, “Duality in Two-dimensional (2, 2) Supersymmetric Non-Abelian Gauge Theories”, String-Math 2011, June 6–11, 2011
 15. 戸田 幸伸, “Curve counting invariants via stable objects I, II, III”, Derived categories of Algebro-Geometric Origin and Integrable Systems, December 19–24, 2010
 16. 吉田 直紀, “Chemistry in the Early Universe”, 41st Annual Conference on Atomic, Molecular, and Optical Physics of the American Physical Society, May 27, 2010
 17. 鈴木 洋一郎, “Solar and Atmospheric Neutrinos”, XXIV International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies (LP09), August 17–22, 2009
 18. 梶田 隆章, “Status and prospect of atmospheric neutrinos and long baseline studies”, The eleventh international conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2009), July 1–5, 2009
 19. 野本 憲一, “The Cosmic Explosions: The Violent Supernovae”, The Opening Ceremony of the International Year of Astronomy, January 15–16, 2009
 20. 渡利 泰山, “Heterotic–F Theory Duality Revisited”, String Phenomenology 2008, May 29, 2008

4. アウトリーチ活動一覧

※以下の表を用いて、平成23～25年度のアウトリーチに関する活動実績（件数、回数）を整理すること。

種 別	H23年度実績 (件数、回数)	H24年度実績 (件数、回数)	H25年度実績 (件数、回数)
広報誌・パンフレット	6	7	6
一般向け講演会・セミナー	11	13	12
小・中・高向けの授業・実験・実習	8	7	6
サイエンスカフェ	4	3	3
一般公開	1	1	1
イベント参加・出展	2	3	4
プレスリリース	25	33	33

5. 平成23～平成25年度の主な研究成果等に係るメディア報道一覧(2ページ以内)

※プレスリリース・取材などの結果、平成25年度中に報道された記事（特に海外メディア）等について主なものを精選すること

1) 国内

番号	日時	媒体名 (新聞、雑誌、テレビ等)	内容概略
1	2014.3.27	毎日(新聞)	「原始重力波」って何？ * POLARBEAR/LiteBIRDに言及
2	2013.12.10	ニュートン別冊(雑誌)	膨張する宇宙空間、高次元時空 *協力：向山信治
3	2013.10.9-13	毎日/産経/朝日/読売(新聞)	ノーベル物理学賞：ヒッグス粒子 *村山斉コメント
4	2013.7.19	NHK(テレビ)	T2K実験の最新結果について *村山斉コメント
5	2013.6.6	NHK(テレビ)	コズミックフロント：「西暦775年のミステリー 宇宙謎の大事件」 *Marcus Werner
6	2013.5.30	NHK(テレビ)	東大大規模オンライン授業(MOOC)について *村山斉インタビュー
7	2013.4.24-5.20	日経/Denki/毎日/朝日(新聞) 時事.com/日経 Web/アストロアーツ/ 毎ナビニュース/エキサイトニュース (web)	超新星の明るさが30倍になる重力レンズ 効果を解明
8	2013.4.11	NHK(テレビ)	コズミックフロント：「宇宙の終わりに迫れ」 *村山斉コメント
9	2013.3.14	NHK(テレビ)	コズミックフロント：ファーストスター *吉田直紀とKavli IPMUが登場
10	2012.9	ニュートン別冊(雑誌)	ヒッグス粒子 素粒子の世界 *監修：村山斉
11	2012.7.19	NHK(テレビ)	クローズアップ現代：「世紀の発見」フィッ グス粒子 *村山斉出演
12	2012.7.5	毎日/朝日/産経/日経/読売(新聞)	村山斉 ヒッグズボゾン粒子発見について 語る
13	2012.5.10	毎日/朝日/産経/日経/読売(新聞)	村山斉とMr. Fred Kavli 野田佳彦総理大臣を 訪問
14	2012.4.5	読売(新聞)	探求-宇宙の運命予測する- 暗黒物質に素粒 子理論で挑む *村山斉コメント
15	2012.2.9	NHK(テレビ)	爆問学問：「宇宙の果てまで連れてって」 *村山斉出演、Kavli IPMUティータイムの紹介
16	2011.11.26	NHK(テレビ)	サイエンスゼロ：爆発迫る!?赤色超巨星・ ベテルギウス
17	2011.10.9	テレビ朝日(テレビ)	奇跡の地球物語：「ニッポンの頭脳～宇宙に 挑む天才達」 *村山斉、高田昌広 他出演

18	2011.9	Newton (雑誌)	大宇宙 - 宙の章- 宇宙創成から超未来まで *村山斉監修
19	2011.6.28	NHK (テレビ)	コズミックフロント: 「爆発直前? 赤い巨星・ベテルギウス」 * 野本憲一・鈴木洋一郎出演
20	2011.4.19	NHK (テレビ)	コズミックフロント「ダークマターの謎に挑む」

2) 海外

番号	日時	媒体名 (新聞、雑誌、テレビ等)	内容概略
1	2014.2.24-26	中国科学院高エネルギー物理学研究所 ニュース/中国科学院ウェブ/Lailook/ 中国光学/清華大学ネット新聞 (web)	世界の物理学のトップリーダーが清華大学にて基礎物理学の未来について討論
2	2013.8.6	Science Daily/マイナビニュース (web)	すばる望遠鏡HSCデータ解析ソフトウェアで作成した画像を公開
3	2013.7.31 -8.3	NHK (テレビ) 日経/毎日/朝日/読売/産経/福井/愛媛/ 南日本/中国(新聞) CNET/BruDirect/Telegraph/SPACE.com/ Gizmag/SEPA MAS/Pijama Surf (Mexico)/RIA (Russia)(web) 赤旗/マイナビニュース/アストロアーツ/ 47ニュース(web)	すばる望遠鏡HSC ファーストライト画像を初公開 *村山斉コメント
4	2013.6.13-14	Pacific News/Newtalk/ Business Standard/ Economic Times/ Youth Daily News (台湾) (web) マイナビニュース/Yahoo! News/JAPAN HERALD/アストロアーツ (web news)	銀河団内のダークマターの分布はCDMモデルの予言と一致 * 高田昌広コメント
5	2013.5.9-10	Kexue.com/eNews parkForest/SEN (web) アストロアーツ/マイナビニュース (web)	宇宙観測画像から重力レンズ像を探すプロジェクト「Space Warps」、参加者募集
6	2013.4.6-8	Red Orbit/Science World Report (web)	黄色超巨星の超新星爆発、観測により証明される
7	2012.9.13	Hawaii Tribune Herald (新聞) 読売/日経産業(新聞) Phys.org/Nature News/Space Daily (web)	すばる望遠鏡、新型の超広視野カメラ、ハイパーシュプリームカム、始動へ
8	2012.8.3	Hindustantimes(インド)/redOrbit/mail Online/Phys.org (web) 日経/産経/読売/科学(新聞)	超新星爆発の形、実はでこぼこ?--すばる望遠鏡で迫る超新星爆発のメカニズム-- *前田・野本コメント
9	2012.7	Highlighting Japan (雑誌)	Nurturing global talent (世界レベルの才能を育む) *村山斉コメント
10	2012.2.9	朝日/読売/毎日/産経/日経/日刊工業 (新聞) Astrocast.tv/Nonotech-Now/Newwise/ spaceREF/Science Insider/Nature News/Phys.org/Physics World (web)	米国カブリ財団による基金設立および数物連携宇宙研究機構がカブリ研究所になることについて

11	2011.11.11	NHK (テレビ) 産経/日経 (新聞) 日経サイエンス (雑誌) Space.com/Clarksville Online/ La Canada Flintridge Patch (web)	ファーストスターは太陽の40倍の重さ
----	------------	--	--------------------

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

主要な融合研究論文の一覧

※融合研究の成果を裏付ける論文のうち代表的なもの20編以内を挙げ、それぞれについて10行以内で解説すること。

※それぞれの論文は箇条書きとし、著者名・発行年・雑誌名・巻号・掲載ページ・タイトルを記載すること。(記載順番は様式中で統一してあればこの限りではない)なお、著者が複数ある場合には、拠点の研究者に下線を記すこと。

※著者が多数(10名以上)の場合は、全著者名を記載する必要はない。

天文学と数学の融合

- {1} M. C. Werner, "Gravitational lensing in the Kerr-Randers optical geometry", *General Relativity and Gravitation*, **44** (2012) 3047-3057
DOI: [10.1007/s10714-012-1458-9](https://doi.org/10.1007/s10714-012-1458-9)

光学的形状がRanders型のFinsler計量を持つことに着目し、カー解の赤道面における光の屈折を決定する、新しい幾何学的手法を示した。Nazimによる構成法を採用して、ガウス・ボネの定理を適切な接触リーマン多様体に適用することにより、重力レンズ効果の漸近的な屈折角の主要な2項を計算できることを明らかにした。M. C. Wernerは天文学と幾何学の研究歴があり、この融合的な研究が可能となった。

- {2} G. W. Gibbons, M. C. Werner, N. Yoshida and S. Chon, "On de-Sitter geometry in cosmic void statistics", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **438** (2014) 1603-1610
DOI: [10.1093/mnras/stt2298](https://doi.org/10.1093/mnras/stt2298)

数学者と天体物理学者が共同で、宇宙の泡構造のサイズ分布を記述する手法を考案した。最近の広域銀河観測から、銀河分布はフィラメント状の構造やボイドとよばれる空洞領域から構成されることが発見された。Kavli IPMUの研究チームは、幾何学の知見を応用し、4次元ドジッター計量を用いて3次元空間に分布するボイドのサイズを計算した。観測領域の有限性などを加味した現実的なモデルも構築し、観測されたボイドサイズ分布を再現することに成功した。宇宙の構造にしばしばあられる自己相似的な構造を幾何学により記述する新たな方向性が期待できる。

- {3} R. M. Quimby, M. C. Werner, M. Oguri, S. More, A. More, M. Tanaka, K. Nomoto, T. J. Moriya, G. Folatelli, K. Maeda, and M. Bersten, "Extraordinary Magnification of the Ordinary Type Ia Supernova PS1-10afx", *The Astrophysical Journal*, **768** (2013) L20
DOI: [10.1088/2041-8205/768/1/L20](https://doi.org/10.1088/2041-8205/768/1/L20)

アメリカのPan-STARRSチームは非常に明るい新しいタイプの超高輝度超新星PS1-10afxを発見したと報告した。超高輝度超新星という新しい種族の発見者として知られるR. M. Quimbyは、この超新星のスペクトルと光度曲線がよく知られたIa型超新星のものとよく一致することを直ちに見抜いたが、通常のIa型よりは30倍明るかった。天文と数学の幾何の研究に明るいM. C. Wernerは、手前の銀河による重力レンズの増光でこの現象を説明できることを指摘したが、これには超新星の母銀河のちょうど視線上手前の銀河が重なることが必要であった。大規模データ解析の経験をもつ物理学者の大栗真宗はPan-STARRSのデータでそのような手前の銀河の重なりが確率的に十分起こりうることを速やかに見積もった。これらの議論は毎日行われるティータイムの場で行われたものである。このシナリオは次の{4}の論文で正しいことが最終的に確認された。

- {4} R. M. Quimby, M. Oguri, A. More, S. More, T. J. Moriya, M. C. Werner, M. Tanaka, G. Folatelli, M. C. Bersten, K. Maeda, and K. Nomoto, "Detection of the Gravitational Lens Magnifying a Type Ia Supernova", *Science*, **344** (2014) 396
DOI: [10.1126/science.1250903](https://doi.org/10.1126/science.1250903)

超新星PS1-10afxが消えたあとの母銀河のスペクトルを観測することで、上記の{3}の論文の解釈が正しいことを証明できるはずである。Pan-STARRSチームはすでに分光観測で超新星の赤方偏移を1.39と測定していた。この論文ではケックI望遠鏡のLRISで長時間分光観測を新たに行い、手前の赤方偏移1.117に新たな[O II]輝線を検出した。これは手前の重力レンズ源となる銀河に由来するものであり、重力レンズの解釈を裏付けるものである。この結果は日本国内28件及び国外59件と多くのメディアで報道された。

理論物理研究者と数学者の共著論文

- {5} H. Jockers, V. Kumar, J. M. Lapan, D. R. Morrison and M. Romo, "Two-Sphere Partition Functions and Gromov-Witten Invariants", *Communications in Mathematical Physics*, 325 (2014) 1139
DOI: [10.1007/s00220-013-1874-z](https://doi.org/10.1007/s00220-013-1874-z)

最近、BeniniらとDoroudらによって、 $N=(2, 2)$ 超対称ゲージ理論の2次元球面上の分配関数が超対称局所化の方法で計算された。本論文では、ゲージ化された線形シグマモデルにおける分配関数が、赤外固定点として現れる超共形場の理論のモジュライ空間の厳密なケーラーポテンシャルを与えることを観測した。超対称共形場の理論がタイプII超弦理論のコンパクト化に使われる場合、これは、モジュライ場のケーラーポテンシャルを□' 補正に関して厳密に計算する直接的な方法を与える。低エネルギー理論が3次元カラビヤウ多様体に対応するような幾何学相においてこの結果を用いると、その多様体の種数0のGromov-Witten不変量を計算することができる。5次超曲面とRodlandのPfaffian多様体に対しこれらの量を計算し、それらが知られている結果と一致することをみた。

物理に動機付けられた数学

- {6} Y. Toda, "Gepner type stability conditions on graded matrix factorizations",
[arXiv:1302.6293](https://arxiv.org/abs/1302.6293), Preprint.

戸田幸伸は、三角圏の自己同値と複素数に依存するGepner型Bridgeland安定性条件の概念を導入した。更に戸田は重み付き同次多項式の次数付き行列因子化のなす三角圏にGepner型安定性条件が存在すると予想した。その様な安定性条件はLandau-Ginzburg B-ブレインの自然な安定性条件を与えると考えられ、また3次元5次超曲面の弦理論的ケーラーモジュライ空間のGepner点に対応する。戸田は、重み付き同次多項式で定義される代数多様体が、2次元以下のカラビヤウ多様体の完全交差で与えられる時にGepner型安定性条件の存在予想を証明した。Gepnerはカラビヤウ多様体をターゲットとする世界面を用いた弦理論の定式化を行った物理学者であり、戸田の論文は大栗博司を含む物理の論文を多く引用しており、堀健太朗に謝辞が述べられている。

- {7} K. Saito, "Limit Elements in the Configuration Algebra for a Cancellative Monoid", *Publications Of The Research Institute For Mathematical Sciences*, **46** (2010) 37-113
DOI: [10.2977/PRIMS/2](https://doi.org/10.2977/PRIMS/2)

平方格子上の最隣接相互作用イーシング模型の古典的理論に於いて、格子を一般の被約可能なモノイド (Γ, G) のケイレイ・グラフに置き換え、ボルツマン定数を抽象的なラベルに置き換えてそのコンフィグレーション和を考察する事により同氏は無限生成ホップ代数を導入した。すると、すべてのヘルムホルツ自由エネルギーの全体の集合 $\Omega(\Gamma, G)$ はその代数のコンパクト部分集合になる。主結果は i) モノイド (Γ, G) に対する増大関数を $P\Gamma, G$ とし、その逆転級数の空間を $\Omega(P\Gamma, G)$ と置くと (それもコンパクト空間)、 Z 作用と同変なファイブレーション $\pi: \Omega(\Gamma, G) \rightarrow \Omega(P\Gamma, G)$ が存在する。ii) $\Omega(\Gamma, G)$ が有限の時 (例えばハイパボリック群)の時ファイバー和を有理関数の剰余表示ができる。これは、物理に影響された不連続群の研究に分配関数などの不変量を導入する全く新しいアプローチで、その方向の研究が生まれつつある (e. g. <http://de.arxiv.org/abs/1311.4450>, MR3049573 *J. Algebra* 385 (2013), 314- 332)。

最新の数学のおかげで可能になった物理の論文

- {8} Y. Tachikawa and K. Yonekura, " $N=1$ curves for trifundamentals", *Journal of High Energy Physics* 1107 (2011) 025
DOI: [10.1007/JHEP07\(2011\)025](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2011)025)

この論文の目的は Gaiotto の構成を超対称性の少ない状況に拡張することにあった。当時 Kavli IPMU で大学院生をしていた米倉と、当時特任助教であった立川裕二は、この物理的問題を解決するには、数学の代数幾何におけるある特定の問題を解けばよいということを見出した。幸い、Kavli IPMU の数学者に、まさに関連する分野の世界的専門家である A. Bondal がおり、立川は Bondal とともにその問題を数学的に解くことができた。米倉は一方物理的アプローチでその解を見出した。このように独立に見出された二つの解は、見事に一致し、理論物理と数学の相補的な利点を表している。Bondal は論文の謝辞で感謝されている。

- {9} C. A. Keller, N. Mekareeya, J. Song and Y. Tachikawa, "The ABCDEFG of instantons and W-algebras", *Journal of High Energy Physics* 1203(2012)045

DOI: 10.1007/JHEP03(2012)045

この論文に至る共同研究が始まったのは、Kavli IPMU がアジア太平洋地域における物理と数学の中心的な研究所であるおかげである。Mekareeya はタイ人、Song は韓国人であるが、彼らは偶然 Kavli IPMU に同時期に滞在中であった。この時、Mekareeya は最近得られた不思議であるがまだ完全ではない結果を立川裕二に説明したが、立川は、まさにその内容は Song が世界でも最も専門家であることに気づいた。それによって、インスタントのモジュライ空間と無限次元代数の間の新たな関係を確認することができるだろうとわかったのである。Song の所属していた研究所の同僚の Keller を加え、さらなる研究を行った結果、実際にその新たな関係が見つかった。これは Alday-Gaiotto-立川関係式の拡張である。Kavli IPMU の数学者の Bondal と Carnahan の助けは、この研究の途中で、重要な数学的な点を解決する際に不可欠であって、彼らは論文の謝辞で感謝されている。

- {10} F. Benini, R. Eager, K. Hori and Y. Tachikawa, "Elliptic genera of 2d $N=2$ gauge theories", to appear in *Communications in Mathematical Physics*, arXiv:1308.4896, Preprint

一般の2次元 $N=(2, 2)$ 及び $(0, 2)$ 超対称ゲージ理論の楕円種数を超対称局所化の方法により計算した。各々の場の1ループ行列式から2次元トーラス上の平坦接続のモジュライ空間における有理微分形式が得られ、楕円種数はそのジェフリー・カーワン留数の和となる。得られた表式を説明するため、ゲージ群が可換な例と非可換な例の両方、また、超弦理論のコンパクト化に用いられる超共形場の理論を赤外固定点として持つ理論、などにおいて計算を具体的に実行してみせた。この結果を用いて [23] で発見した双対性の一部を検証した。この研究は超弦理論のコンパクト化やDブレーンの力学において、有効理論のスペクトルやBPS状態の縮退度など、有益な情報を引き出すのに役立つものである。

- {11} H. Ooguri, P. Sulkowski, M. Yamazaki, "Wall Crossing As Seen By Matrix Models", *Communications in Mathematical Physics*, **307** (2011) 429-462
DOI: 10.1007/s00220-011-1330-x

数学におけるドナルドソン・トーマス不変量に、物理における超対称場の理論を用いた解釈を与えたのが本論文である。カラビ・ヤウ多様体のDブレーンの束縛状態の数はBPSチャージと安定性条件という二つのデータに依存している。カラビ・ヤウ多様体 X に巻き付いた一枚のD6ブレーン及び（一般には複数枚の）D0ブレーン・D2ブレーンからなる束縛状態を考えると、両者は自然にケーラーモジュライの空間 $M(X)$ に関係付けられる。著者らはあるクラスのトーリック・カラビ・ヤウ多様体に対し、そのBPS状態をト・フーフト結合定数が無限の極限において数え上げるユニタリ行列模型を構成した。 X のBPS状態を数え上げる行列模型は別のカラビ・ヤウ多様体 Y のトポロジカル弦理論の分配関数を与え、 Y のケーラーモジュライ $M(Y)$ は二つの $M(X)$ のコピーを含む。このうち一つはBPSチャージに、もう一つは安定性条件に関係しており、この二つのデータは $M(Y)$ において統一される。更にこの行列模型はリモデリング予想に関連したスペクトル曲線及びミラー写像を与える。

- {12} H. Ooguri and M. Yamazaki, "Crystal Melting and Toric Calabi-Yau Manifolds", *Communications in Mathematical Physics*, **292** (2011) 179-199
DOI: 10.1007/s00220-009-0836-y

任意のトーリックカラビ・ヤウ多様体に巻き付いた一枚のD6ブレーンと、それとBPS束縛状態をなすD0ブレーン・D2ブレーンを数え上げる結晶溶解の統計模型が構成された。3次元の結晶構造は、Dブレーンの低エネルギー有効理論を記述するデータ、つまり箎及びブレーン・タイリングによって決定される。結晶は複数の色を持つ原子からなり、各色は箎の頂点に対応する。また、原子間の結合は箎の矢印から決定される。BPS状態は結晶から原子を取り除くことによって構成される。この結果はBPS状態の数え上げに関する先行研究を一般の非コンパクト・トーリック・カラビ・ヤウ多様体へ一般化したものである。この論文において、トポロジカル弦理論と結晶溶解の正確な理解にはドナルドソン・トーマス理論の壁超え現象が必要であることが指摘された。謝辞においては偏屈層のカテゴリーに基づいた戸田幸伸による明快な説明に感謝が示されている。

数学を進化させた物理の論文

- {13} K. Hori and J. Knapp, "Linear sigma models with strongly coupled phases - one parameter models", *Journal of High Energy Physics*, **1311** (2013) 070
DOI: 10.1007/JHEP11(2013)070

[23] で発見した双対性に基づいて、ゲージ群の連続部分群が破れずに残る「強結合相」を持つ線形シ

グマ模型を系統的に構成した。また、[23, 24]で開発した方法を適用することにより、理論の重要な性質を調べ上げた。この構成により、Dブレーンの圏の同値関係についての新たな数学的予想が提示され、過去の例が系統的に一般化された。別の種類の驚きもあった。ホッジ数の相異なる二つのカラビ-ヤウ多様体(一つは $h^{2,1}=23$ もう一つは $h^{2,1}=59$)に対応する相異なる超共形場の理論が完全に同一の量子ケーラー・モジュライ空間を持つ、というものである。(1)の強弱双対性は、この驚くべき事実を確かめるのに用いられ、同時にモジュライ空間の計量を計算するのにも有効であることが分かった。この研究は拠点の研究目標として掲げた「弦理論の解を列挙・分類し、新しい幾何学を発展させる」を部分的にはあるが実行するものである。

- {14} P. Braun, Y. Kimura and T. Watari, "On the classifications of elliptic fibrations modulo isomorphism on K3 surface with large Picard number", arXiv:1312.4421, Preprint

この論文は純粋に数学の問題を論じていて、ただしそれらの問題は弦理論のコンパクト化の研究において大事であることが分かった(論文* : JHEP 1404 (2014) 050, 同じ著者による; この論文*は、数学者塩田徹治への謝辞を含む)。問題のひとつは、K3曲面の可能な楕円曲線ファイバー構造に対するモジュラー群を正確に決定することであり、完全な解答がこの論文で与えられた。この数学的問題を解決することが、論文*において混合弦理論とF理論との双対性を追及する上で必要に迫られていたのである。もうひとつの問題は、「楕円曲線ファイバー写像の同型による分類」が「楕円曲線ファイバー写像の特異ファイバーの幾何による分類」にくらべてどの程度に細かい分類なのか、を評価することである。前者の分類学は物理の真空解の分類に相当する一方で、後者の分類学は物理の真空解のゲージ群の違いによる分類に当たる(論文*)。ある特異ファイバーの幾何を与えたとき、それに該当するファイバーの同型類で異なるものが幾つあるか、その上限値がこの論文で得られた。

物性物理と素粒子物理/超弦理論

- {15} H. Ooguri, M. Oshikawa, "Instability in magnetic materials with dynamical axion field", *Physical Review Letters* **108** (2012) 161803
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.161803

大栗博司は、物性物理学者の押川と共同で、暗黒物質の候補とされるアクシオンの粒子について研究した。素粒子物理学に登場するアクシオン粒子の観測は実験的に難しい問題とされているが、彼らは物性系におけるアクシオンの励起を考えた。大栗は、この以前に、アクシオンと電磁場からなる物理系が、電場をかけると不安定性を示すことを指摘していた。大栗と押川は、ある臨界電場以上の電場は、不安定性の効果により完全に遮蔽され、そのエネルギーは磁場に変換されることを示した。また、この遮蔽効果の物理的起源を明らかにし、磁性体において磁場の変動がアクシオン場のように振舞う場合にこの効果を実験的に観測する可能性についても議論した。この論文は、*Physical Review Letters*の"Editor's Suggestion"に選ばれた。

- {16} T. Takayanagi, "Holographic Dual of Boundary Conformal Field Theory", *Physical Review Letters*, **107** (2011) 101602
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.101602

AdS/CFT対応は、ある空間における共形場理論(CFT)が、反ドジッター空間(AdS空間)上で定義された超弦理論と等価であるという主張を意味し、超弦理論の分野で大変有名で重要な考え方である。通常のAdS/CFT対応では、共形場理論が定義されている空間は境界がない多様体が想定されている。この論文では、境界を持つ多様体上で定義された共形場理論を考えた場合に、AdS/CFT対応がどのように拡張されるのかを明らかにした。一言で結果をまとめると、共形場理論が定義された空間に境界があることは、AdS空間にも新たに境界を導入することに相当し、その境界ではノイマン境界条件を課すべきであることも明らかになった。この新しい対応関係を用いると、自由エネルギー、エンタングルメント・エントロピー、そして相関関数などを計算することができる。さらには、この手法を用いることで、g定理の証明や量子ホール効果のAdS/CFT対応を用いた記述も実現された。

- {17} H. Watanabe, T. Brauner, and H. Murayama, "Massive Nambu-Goldstone Bosons", *Physical Review Letters*, **111** (2013) 021601
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.021601

対称性を顕わに破る項で摂動を加えた際、いわゆる「擬南部・ゴールドストーン粒子」は質量を得る。この際その質量は見積もることはできるものの、一般には厳密には計算できない。この論文では化学ポテンシャルのように、摂動が対称性の生成子で書かれる場合に、リー代数のみを用いて質量の厳密

な公式を発見した。この公式は物性物理学から原子核物理学まで、多くの系に応用できることがわかった。この論文は物性物理学者と原子核物理学者との共著である。

- {18} H. Watanabe and H. Murayama, "Redundancies in Nambu-Goldstone Bosons", *Physical Review Letters*, **110** (2013) 181601
DOI: [10.1103/PhysRevLett.110.181601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.181601)

物性・原子核・天文・宇宙物理学での多くの系では、時空の対称性が自発的に破れる。この場合に、南部・ゴールドストーン粒子の個数が減ることが知られていた。逆ヒッグス機構として知られる経験的な方法で南部・ゴールドストーン粒子の個数を調べることが知られていたが、なぜ個数が減らなくてはいけないのかが明らかでなく、また並進対称性が破れる場合にはこの方法は使えなかった。本論文では、対称性のカレントの線形結合が基底状態を消滅させるということ（これをネーター拘束と名付けた）に起因して、個数の減少が起きることを明らかにした。この理解の驚くべき応用としては、回転する冷却原子や超流動体のボーズ・アインシュタイン凝縮体に起きる量子渦の格子である。この場合、二つの並進、一つの回転、そして一つの内部U(1)対称性という四つの対称性が破れている。しかし、A型でありながら期待に反して二乗の分散関係を持つ南部・ゴールドストーン粒子が一つだけ現れるのである。

数学の宇宙論への応用

- {19} B. Aazami, G. Cox, "Blowup solutions of Jang's equation near a spacetime singularity", *Classical and Quantum Gravity* (2014, accepted)
DOI: [10.1088/0264-9381/31/11/115007](https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/11/115007)

最大限に拡張されたシュヴァルツシルト時空中の漸近的に平坦、球対称なコーシー超表面の1母数族上のJangの式を調べた。これらの超平面は見かけの地平面を含み $r=0$ の特異点への近接度によってパラメータ化される。特異点に十分近いこれらの超平面上でJangの式のすべての球対称解が発散することを示した。証明は特異点の任意の近傍の形状にのみ依存し、Jangの式は実際に特異点を発見していることを示唆する。弱い宇宙検閲官仮説への応用も可能であると述べている。

数学の生物学への応用

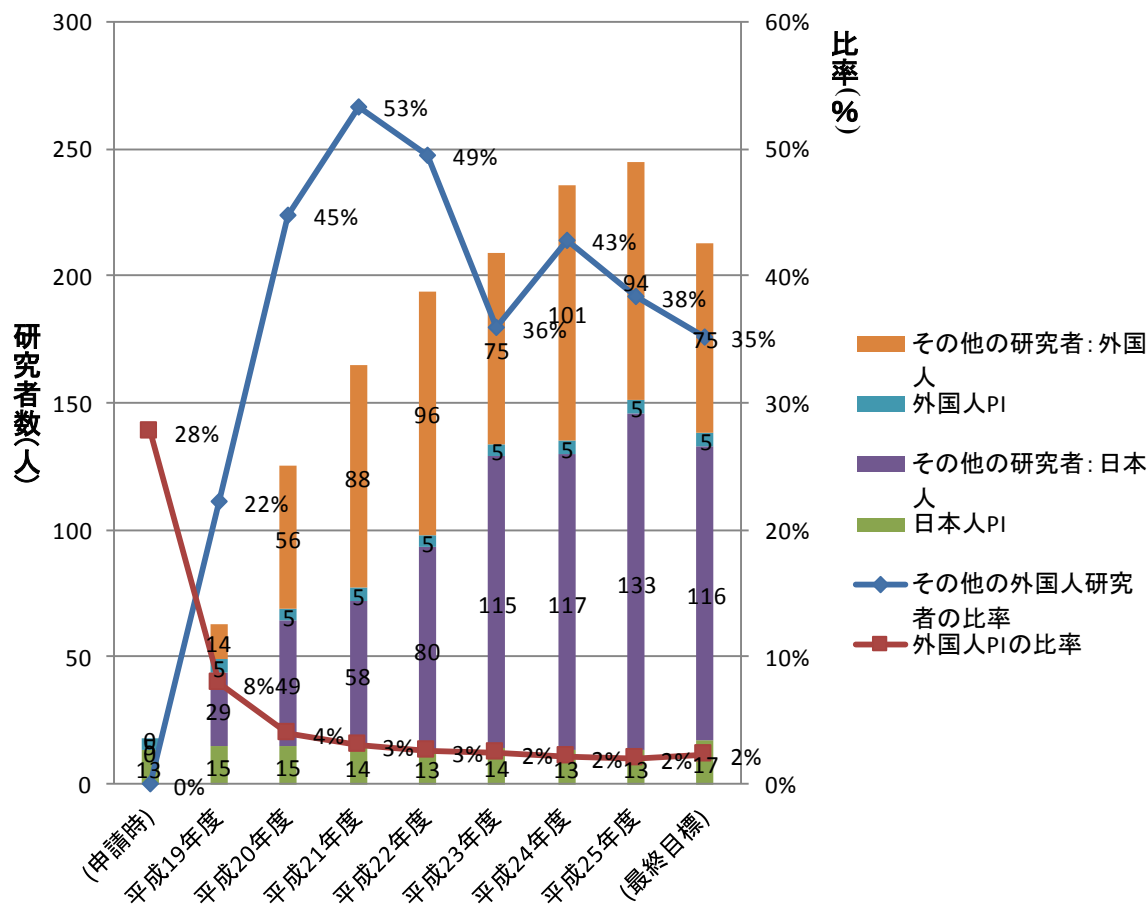
- {20} S. Dedeo, D. C. Krakauer, J. C. Flack, "Inductive Game Theory and the Dynamics of Animal Conflict", *Public Library Of Science COMPUTATIONAL BIOLOGY*, **6** (2010) e1000782
DOI: [10.1371/journal.pcbi.1000782](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000782)

闘争は社会的相互作用を不安定化し、生物組織の様々なスケールでの協調を阻害するものであり、闘争の激動期の原因を理解する必要がある。この論文で著者は、サル社会のモデルシステムにおける闘争の力学を分析した。彼らは帰納的ゲーム理論という技法を開発し、モンテカルロシミュレーションを使って、時系列データから直接的に個体と個体群に使用される意思決定の戦略を引き出した。そして、個体は戦う意志決定を、短期的な生態学的資源競争ではなく、社会的要因の記憶に基づいて行うこと、更に、決定のもとになる社会アセスメントは二個体間ではなく、三個体間で行われることを発見した。彼らは、この三個体間の意思決定は長い闘争のカスケードを引き起こし、これらのカスケードに伴う戦いの数が大きいことにより集団の損失が大きいこと、また、複雑な集団の社会的発展において、これまで個体の作用が強調され過ぎていること、個体対による定式化は不十分であることを示した。

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

1. 全研究者中の外国人研究者数とその比率の推移

※申請時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。



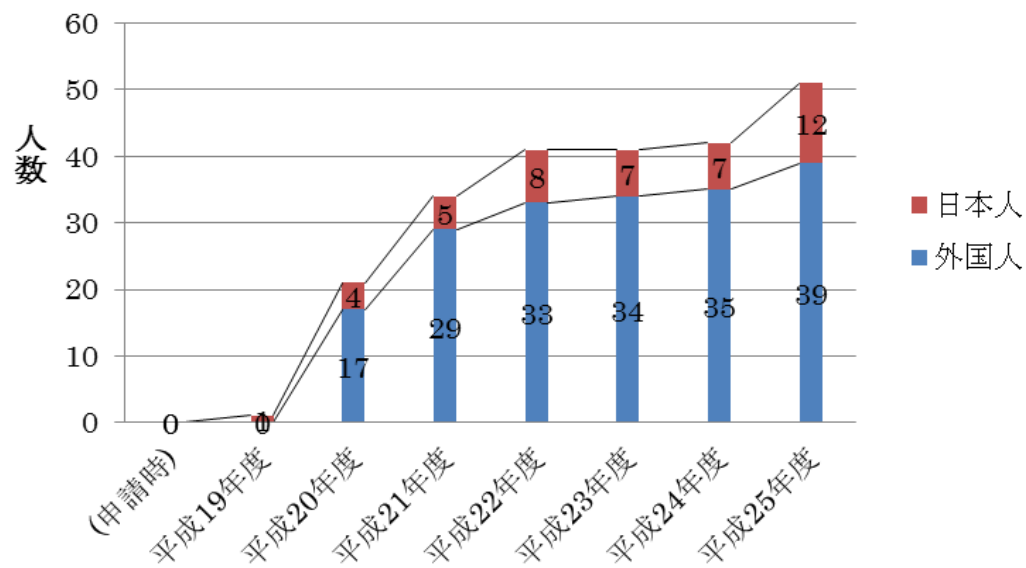
2. ポスドクの国際公募の実施と応募・採用状況

・応募人数、採用人数の欄の下段に〈外国人研究者数, %〉としてそれぞれ内数を記載すること。

年度	応募人数	採用人数
平成19年度	481 < 372, 77%>	1 < 0, 0%>
平成20年度	527 < 452, 86%>	22 < 16, 73%>
平成21年度	726 < 679, 93%>	20 < 16, 80%>
平成22年度	794 < 751, 95%>	14 < 10, 71%>
平成23年度	811 < 738, 91%>	15 < 14, 93%>
平成24年度	664 < 615, 93%>	16 < 15, 94%>
平成25年度	661 < 607, 92%>	19 < 11, 58%>

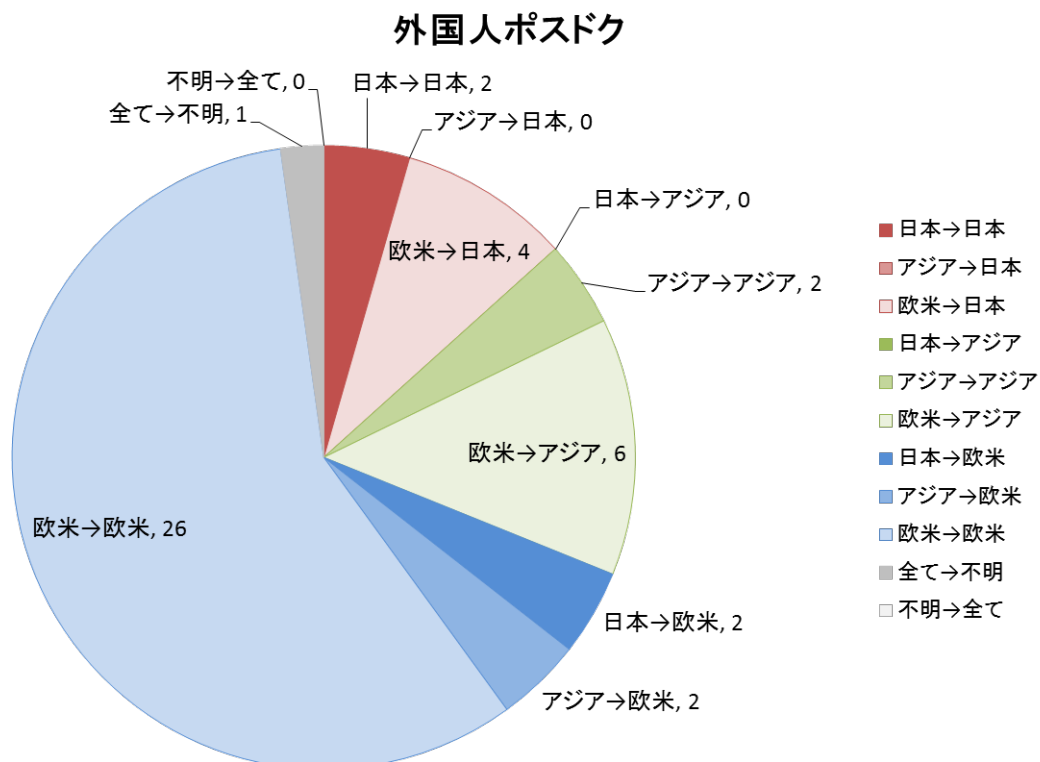
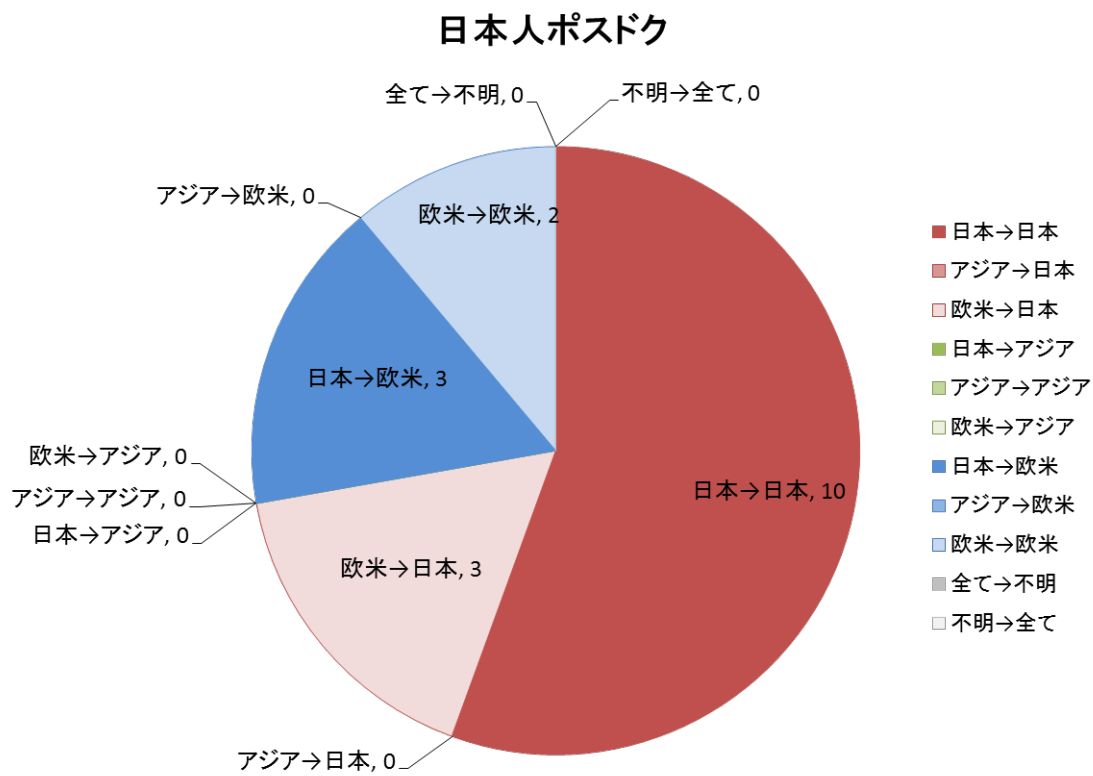
3. 外国人ポストク比率の推移

※申請時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。



4. ポスドクの国際的就職状況

- ・〇〇→△△は、〇〇にある研究機関からWPI拠点に移動したのち、△△にある研究機関に移動したことを意味する。
- ・n/aは、所属機関が不明や出産等による退職を意味する。



5. 国外共同研究協定等締結一覧

1. 協定の相手方：天体物理研究コンソーシアム
 協定の名称：スローン・デジタル・スカイ・サーベイIVに係る覚書
 締結時期：平成26年2月17日
 協定の概要：スローン・デジタル・スカイ・サーベイは、1998年から、3つの先行フェーズ、（SDSS、SDSS-II、及びSDSS-III）にわたり運用されている。これは、天体物理研究コンソーシアム（ARC）が運用し、ニューメキシコ州サンズポットのアパッチポイント天文台で、イメージングと分光計測機器を備えた専用の2.5m望遠鏡を使用している。SDSSのハードウェア及び、ソフトウェアのシステムは、今後数年間は、大規模なサーベイ観測のための他のいかなる装置の追従も許さないであろう。科学に対して重要な影響を与え続けていること、天体物理学の多様な分野に対して貢献する能力、及び、現在と将来の運用の有効性の組み合わせが、SDSS-IVと呼ばれる新たな局面に続く基盤を提供する。

2. 協定の相手方：インターメディアイト・パロマー・トランジェント・ファクトリー(iPTF)
 協定の名称：インターメディアイト・パロマー・トランジェント・ファクトリー(iPTF)共同研究契約
 締結時期：平成25年12月23日
 協定の概要：PTF（パロマー・トランジェント・ファクトリー）の成功を受け、この契約（CA）では、インターメディアイト・パロマー・トランジェント・ファクトリー（iPTF）として知られるコンソーシアムを成文化する。iPTFは、多くの同じ資産（広視野MOSAICカメラ及び関連ソフトウェア等）を継承するPTFの後続観測であるが、新しい探査手法を採用することによりPTFの成功を基礎に構築し、PTFの測定では不十分であったトランジェント（過渡的）現象を研究する。
 *iPTFコンソーシアムに関するマネージメントの仕組みは、iPTFボード会議(the Board)である。The Boardは、主なパートナー機関からの代表1名ずつに加え、官職指定により投票権を有するカリフォルニア工科大学光学天文台(Caltech/C00)台長から構成される。

3. 協定の相手方：ロシア科学アカデミー ステクロフ数学研究所
 協定の名称：MOU（覚書）
 締結時期：平成25年9月15日
 協定の概要：Kavli IPMUとステクロフ数学研究所は、共通の学術的興味により連携し、共通の興味と専門知識を有する分野における共同研究の発展と研究者の交流を目標に努力する。数理科学における教育と研究の進歩のためイノベーションと共同研究を原則とする。

4. 協定の相手方：北京清華大学数学科学中心(MSC)
 協定の名称：MOU（覚書）
 締結時期：平成25年5月29日
 協定の概要：清華大学(MSC)による「2011プロジェクト」の提案にある以下の活動の発展を促進する。
 - ・ 特定分野の教育、研究及び、アウトリーチ活動において学生、教員及び研究者の相互訪問および交換。
 - ・ 共通して興味を有する課題に関して合同で会議、シンポジウム、または、その他の科学的会合を組織し、実施すること。
 - ・ 共同研究プログラム及び協力を促進すること。
 - ・ 学術情報及び資料を交換すること。
 - ・ その他、両当事者が合意する交換・協力プログラムを実施すること。

5. 協定の相手方：天体物理研究コンソーシアム
 協定の名称：スローン・デジタル・スカイ・サーベイ AS3 (SDSS-III後継) MOU（覚書）
 締結時期：平成25年5月25日

協定の概要：スローン・デジタル・サーベイ (SDSS) は、宇宙の広範囲を調べて大規模構造、銀河の特性、天の川銀河の構造及び、恒星の天体物理学の問題を研究しようとするプロジェクトである。SDSSは、SDSS-IIIプロジェクトとして、平成26年6月30日まで延長するものである。

6. 協定の相手方：タタ基礎科学研究所
 協定の名称：「Belle II実験におけるシリコン崩壊点検出器 (SVD) 層の組立」共同研究契約書
 締結時期：平成25年5月25日
 協定の概要：Kavli IPMUとインド・タタ基礎科学研究所の共同研究実施

7. 協定の相手方：トライアンフ研究所[カナダ国立素粒子原子核物理研究所] (アルバータ大学、ブリティッシュコロンビア大学、カールトン大学、サイモン・フレーザー大学の理事会、トロント大学、ビクトリア大学、およびその他正式メンバーとなる大学の運営協議会が、TRIUMFとして知られる共同事業を運営する、ブリティッシュコロンビア州の法律に準拠した契約に従って設立された。)
 協定の名称：Kavli IPMUとTRIUMFにおける共同研究職ポストのジョイントアポイントメントに関する覚書
 締結時期：平成24年10月
 協定の概要：このジョイントアポイントメントに関する条件の文書化と、両機関の協力及び本覚え書きに基づいて特定された被雇用者の効果的な交換を促進するために必要な管理運営要素の保証。

8. 協定の相手方：サンパウロ大学、カリフォルニア工科大学、NASAジェット推進研究所、プリンストン大学、ジョンズホプキンス大学、マルセイユ天文物理研究所、台湾中央研究院天文及び天文物理研究所
 協定の名称：Prime Focus Spectrograph (PFS) 国際共同研究に係る研究機関間のMOU (覚書)
 締結時期：平成24年8月11日
 協定の概要：PFSプロジェクトは、人類がこれまで達成したことのない遠方までの、宇宙の大規模広域探査を目指すものである。PFSは、数千にも及ぶ光ファイバーを用いるが、その一つ一つを10分の1秒角の確度で、関心のある特定の銀河や星にロボット制御で向けることができる。PFSは、大きな視野を確保できるハワイのすばる望遠鏡に搭載される予定である。PFS建造に貢献することにより、国際共同メンバーは、すばる戦略プログラムの下、日本の天文学コミュニティの全面協力で、すばる望遠鏡の観測時間を利用することができる。ここでは、各々の機関、もしくは、プロジェクトコンソーシアムの貢献とコミットメントを規定する。

9. 協定の相手方：国際高等研究大学院大学 (SISSA)
 協定の名称：国際高等研究大学院大学 (SISSA) と数物連携宇宙研究機構 (IPMU) との間の合意書
 締結時期：平成24年2月24日
 協定の概要：SISSA並びにIPMUは、国際研究機関間での教育的、文化的、並びに学術交流の価値を認識し、教員、研究者並びに大学院生の交流を促進させる公式な協力関係を構築する。

10. 協定の概要協定の相手方：プリンストン大学
 協定の名称：東京大学とプリンストン大学間の学術交流に関する合意
 締結時期：平成22年12月21日
 協定の概要：以下のように、双方の関心にある学術研究の分野における交流と他の活動を実施する。
 - (1) 教員、事務職員、研究者の人材交流
 - (2) 学生の交流
 - (3) 共同研究の実施
 - (4) 共同講義やシンポジウムの開催

(5) 学術的情報と装置等の相互利用

11. 協定の相手方：基本的な力と応用の統一 (UNIFY交換プログラム)

協定の名称：EU第7次研究枠組み計画 (FP7) マリー・キュリー・アクションに基づく国際研究スタッフ交換スキーム

締結時期：平成22年9月15日

協定の概要：UNIFY交換プログラムは、2つの主要な科学的な目的を持っている。1つの目的は、重力相互作用の量子力学的描写や理論物理学で優れた基本的問題、宇宙とその基本組成の間に生じる力に関する極めて重要な理解における新しい知見を得ることである。他の主な目的は、最近の宇宙論やブラックホール物理学そしてゲージ理論の分野における弦理論や重力場の量子論における最新の発展を探ることである。今後数年は、これらの研究分野での前例のない実験的な発見が期待され、新しい解釈を求め、そして、すべての相互作用の統一理論を構築するために私たちの試みが形になる。UNIFYは、世界有数の大学と研究所(ポルトガル・ポルト大、ドイツ・フンボルト大学、フランス・サクレー研究所、カナダ・ペリメター研究所、日本・京都大学基礎物理学研究所、IPMU)を含む挑戦的な交換プログラムを設定することにより、その目標を達成するだろう。UNIFY傘下研究機関は、まさに限られた自然法則の現在の知見を推し進めるため、様々な主題の研究プログラムを体系付ける。UNIFYは、これらのパートナーとの間で長期的な協力関係を確立するよう、次世代理論物理学研究者の育成という強力な局面を交換プログラムの中に含んでいる。

12. 協定の相手方：カリフォルニア大学バークレー校

協定の名称：東京大学とカリフォルニア大学バークレー校との学術交換協定書

締結時期：平成21年12月17日

協定の概要：相互に関心ある学術分野での以下の情報交換と活動手段

- (1) 教員、スタッフ及び研究者の交流
- (2) 学生の交流
- (3) 共同研究の実施
- (4) 共同講義、シンポジウムの開催
- (5) 学術情報及び資料の交換

13. 協定の概要協定の相手方：国立台湾大学・宇宙論並びに粒子天体物理学研究センター (LeCosPA)

協定の名称：東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (IPMU) と国立台湾大学・宇宙論並びに粒子天体物理学研究センター (LeCosPA) との間の「宇宙論ならびに粒子天体物理学」に関する覚書

締結時期：平成21年6月24日

協定の概要：宇宙論並びに粒子天体物理学に関係する下記研究トピックスに協力する合意。

- (1) 宇宙マイクロ波背景放射、並びに関連する諸現象の測定並びに解析
- (2) ダークエネルギー並びにダークマターの理論と観測
- (3) 弦宇宙論
- (4) 大規模構造の形成とその進化
- (5) 超高エネルギー宇宙線並びにニュートリノ、及びこれらを生み出す宇宙の加速作用
- (6) ガンマ線バースト

14. 協定の相手方：ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY)

協定の名称：ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) と東京大学数物連携宇宙研究機構 (IPMU) との協力協定

締結時期：平成21年6月24日

協定の概要：

・DESYは、年次フェローシッププログラムの枠組みにおいて2年任期の博士研究員ポストを提供する

- ・ DESYは、IPMUに照会し合意に達した場合にのみ、下記の博士研究員のオファーを行う。当該博士研究員は、共通の関心分野の一分野で研究し、オプションとして1-2年の延長も可能で、その間東京大学IPMUで過ごすこととする（従って任期が3-4年となる）。
- ・ 1-2年の延長期間は、DESYおよびIPMUの理論グループとの合意の上、博士研究員自身が選択できる。IPMUでの滞在は、DESYでの初年度の終了後から始めることができ、DESYにおける2年間の任期を完了するため、DESYに戻るオプションがある。
- ・ IPMU滞在中、博士研究員はDESYとの雇用は継続するものとする。IPMU滞在中の1-2年間、給与はDESYに代わりIPMUが直接博士研究員に支払う。
- ・ DESYとIPMUは、研究スタッフ、博士研究員、大学院学生の交流を増やすことにより、既に存している協力を強化する。

15. 協定の相手方：ガルヒンク/ミュニーヒ・クラスター・オブ・エクセレンス
 協定の名称：ドイツ連邦共和国ガルヒンク/ミュニーヒ・クラスター・オブ・エクセレンス (COE)と日本国数物連携宇宙研究機構との間の「宇宙の起源とその構造」に関する覚書
 締結時期：平成21年2月29日
 協定の概要：ガルヒンク/ミュニーヒ・クラスター・オブ・エクセレンス、並びにIPMUは、共同研究上並びに教育上で両当事者が協力することが望ましいという共通の原則と目標があることを認識するものであり、以下を合意する。
- ・ 宇宙の構造並びにその進化、物質・時空の最深部構造、及び基本的四つの力の本質に関連する諸問題における強固な共同研究の構築を模索すること。
 - ・ 本協定の相手方のプロジェクトに参加する見通しとその可能性を模索すること。
 - ・ 国際会議、ワークショップ並びにスクールを計画すること。
 - ・ ジョイント・アポイントメントの可能性を含む人材交流並びに相互訪問。
16. 協定の概要協定の相手方：天体物理研究コンソーシアム
 協定の名称：東京大学と天体物理研究コンソーシアムとのスローン・デジタル・スカイ・サーベイIIIに係る覚書
 締結時期：平成21年2月2日
 協定の概要：スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) は、宇宙の広範囲を観測的に研究するプロジェクトで、大規模構造、銀河の特性、その他のトピックスを含む銀河系外の問題を主要な動機としている。SDSSは平成17年6月まで天体物理研究コンソーシアム (ARC) により運営されており、平成20年6月30日まではSDSS-IIにより引き継がれた。この2つのSDSSプロジェクトには東京大学の多数の参加者を含む日本チームが含まれていた。SDSS-IIIは、初期のSDSSプロジェクトによって得られた新しい科学成果を含むSDSSとSDSS-IIを引き継ぐ新しいプロジェクトである。天体物理学の様々な分野へ貢献する能力とともに重要な科学的な影響力の継続が、SDSS-IIIを実施する正当な理由となる。

6. 国際研究集会の開催実績

※これまでに開催した主な国際会議等(20件程度)を以下に記載すること。

開催日時	会議名称・開催地	参加人数
平成26年3月10-20日	Kavli IPMU-FMSP Workshop: Supersymmetry in Physics and Mathematics・ レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 17 国内: 25
平成26年2月10-14日	Primitive forms and related subjects・ レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 41 国内: 40
平成26年1月27-28日	4th Open Meeting for the Hyper-Kamiokande Project・ レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 64 国内: 40
平成25年12月2-4日	SUSY: Model-building and Phenomenology・ レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 12 国内: 49
平成25年11月18-22日	Workshop: Homological Projective Duality and Quantum Gauge Theory・Kavli IPMU	海外: 25 国内: 21
平成25年5月20-24日	MaNGA Focus Week・ レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 22 国内: 9
平成25年2月18-22日	Kavli IPMU focus week on Gravity and Lorentz violations・Kavli IPMU	海外: 13 国内: 18
平成24年11月12-16日	Workshop: Homological Projective Duality and Quantum Gauge Theory・Kavli IPMU	海外: 25 国内: 21
平成24年8月13-16日	PFS 3rd General Collaboration Meeting・ Kavli IPMU	海外: 51 国内: 17
平成24年6月25-29日	Workshop: Geometry and Physics of the Landau Ginzburg Model・Kavli IPMU	海外: 21 国内: 37
平成24年3月12-16日	IAU Symposium 279: Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-ray Bursts・日光	海外: 100 国内: 59
平成23年10月31日-11月4日	Curves and Categories in Geometry and Physics・ IPMU	海外: 15 国内: 33
平成22年9月27日-10月1日	Horiba International Conference on Cosmology and Particle astrophysics (COSMO/CosPA 2010)・ 弥生講堂一条ホール他, 本郷キャンパス	海外: 159 国内: 135
平成22年6月28日-7月2日	CLJ2010: from Massive Galaxy Formation to Dark Energy・メディアホール, 柏キャンパス	海外: 107 国内: 53
平成22年2月8-12日	Focus Week: Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics・レクチャーホール, IPMU	海外: 40 国内: 160
平成21年9月28日-10月2日	Focus Week: Statistical Frontier of Astrophysics・ IPMU	海外: 19 国内: 21
平成21年6月22-26日	IPMU International Conference Dark Energy: Lighting up the Darkness!・メディアホール, 柏キャンパス	海外: 55 国内: 79
平成21年5月18-22日	Focus Week: New Invariants and Wall Crossing・ 柏キャンパス	海外: 17 国内: 61

平成21年3月16-20日	Focus Week: Determination of Masses and Spins of New Particles at the LHC・ 総合研究棟 633号室, 柏キャンパス	海外: 33 国内: 27
平成20年3月11-12日	IPMU Opening Symposium・メディアホール, 柏キャンパス	海外: 18 国内: 119

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

1. ホスト機関による支援の実績

1-1. ホスト機関からのリソース供与

(1) 資金、人員

(平成19年～平成26年)									
<資金>									(百万円)
年度	19	20	21	22	23	24	25	26	計
人件費	94	258	235	278	229	257	271	295	1,917
教員(研究職員)	68	150	160	201	229	257	271	295	1,631
うち専任	0	0	10	10	10	24	33	60	147
うち併任	68	150	150	191	219	233	238	235	1,484
ポストク	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0	0	0	0	0
研究支援者	0	0	0	0	0	0	0	0	0
事務職員	26	108	75	77	0	0	0	0	286
事業推進費	3	18	113	7	23	8	42	15	229
旅費	1	1	2	6	1	1	1	1	14
設備備品等費	0	0	7	0	3	0	0	0	10
研究プロジェクト費	290	536	645	503	675	675	560	661	4,545
合計額	388	813	1,002	794	931	941	874	972	6,715
<人員>									(人)
年度	19	20	21	22	23	24	25	26	計
総人員	16	38	42	52	44	48	49	52	341
教員(研究職員)	10	28	31	41	44	48	49	52	303
うち専任	0	0	1	1	1	3	3	5	14
うち併任	10	28	30	40	43	45	46	47	289
ポストク	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0	0	0	0	0
研究支援者	0	0	0	0	0	0	0	0	0
事務職員	6(6)	10(10)	11(11)	11(11)	0	0	0	0	38(38)

※ <資金> については、交付要綱第12条による実績報告書の区分に基づいて記入すること。

※ 研究者等が獲得した競争的資金(研究プロジェクト経費に当たるもの)は含まない。

※ <人員> について、事務職員のうち常勤職員の数を()に記入すること。

(2) 土地建物・研究スペース等の現物供与

東京大学はKavli IPMUの建物用の土地、約1600m²を無償で提供している。

1-2. 人事・予算面での拠点長による執行体制の確立

設立当初から東京大学は、Kavli IPMUを従来の大学組織と有機的に連携した総長室直属の組織に位置づけることを可能とする革新的な制度を新たに整備した。東京大学は、2011年1月に国際高等研究所(TODIAS)を設立し、Kavli IPMUをその最初の所属研究機関とした。この制度により、Kavli IPMU機構長は研究者の選考を含めたあらゆる組織運営の決定権を有している。

1-3. 機関内研究者集結のための、他部局での教育研究活動に配慮した機関内における調整

Kavli IPMUに集結した研究者が所属している学内部局の教育研究活動に支障が生じず、滞りなく発展できるよう、東京大学本部として当該部局に対し、代替教員の人件費等、必要な財政的支援を行った。これにより、当該部局は代替教員の確保などの措置が可能であり、学内研究者の流動性をさらに高めることが期待される。

1-4. 新たな運営制度の導入に向けた制度整備

(例: 英語環境、能力に応じた俸給システム、クロスアポイントメント、トップダウン的な意志決定システム等)

上述したように東京大学は、TODIASの中にKavli IPMUを置くという革新的な制度を整備した。この制度により、Kavli IPMUは研究者の選考を含めたあらゆる組織運営が可能となった。さらに、Kavli IPMUを特区と位置づけ、拠点に参画する研究者や支援スタッフに対し、通常学内で適用されている就業上の制約を限定的に解除する特別な規則を新たに制定した。こういった措置として、バイリンガルの能力を持った職員を容易に採用できること、世界的に著名な研究者を世界標準の給料で招へいできること、Kavli IPMUと海外の大学等とジョイントアポイントメントができること等が挙げられる。

1-5. インフラ利用における便宜供与 (※1以外で)

東京大学は優秀な外国人研究者が安定して研究できる環境整備を重要視している。海外からKavli IPMUに招へいする研究者に、利用を開始した施設(インターナショナル・ロッジ)の優先的入居枠を既に割り当てている。また、IPMU研究棟建設のために必要な土地の確保、費用に関し最大限の便宜を図った。2011年、東京大学は意匠を凝らした5階建ての「融合研究棟」をKavli IPMUのために建設した。全体が螺旋状になっていて各階毎の明確な区分けがない。研究者、スタッフはそれまでの不便なプレハブ棟からこの新しい快適な研究棟に移転した。

1-6. その他

東京大学は、WPIプログラムにより国際的に競争力のある研究拠点の形成を支援するため、担当理事を長とする委員会を設置した。この委員会は、Kavli IPMUを全学としてサポートするとともに、グローバルCOEプログラムや博士課程教育リーディングプログラムなどとの緊密な連携を図り、最大限の相乗効果をあげるために機能してきている。また、2007年に、Kavli IPMUなどを強力に支援するため、本部事務組織を改編した。このような体制によってKavli IPMUの拠点構想の着実な推進に東京大学全体として最大限かつ安定的に支援してきている。

(抜粋)「東京大学 中期目標、中期計画」

【第1期(平成16年4月1日～平成22年3月31日)】

- 研究実施体制等の整備に関する目標
 - ・中核的研究施設の設置・整備を積極的に推進していく
- 研究実施体制等の整備に関する目標を達成するための措置
 - ・全国連携・国際連携の拠点となる研究施設の整備に関する具体的方策
 - ・附置研究所、全国共同利用施設、学内共同教育研究施設等を中心として、全国規模・国際規模での連携研究のための拠点を学内に整備する。
 - ・世界トップレベル研究拠点「数物連携宇宙研究機構」において、数学、物理、天文学の連携により宇宙の起源と進化の解明を目指すための組織整備等を重点的に行う。

【第2期(平成22年4月1日～平成28年3月31日)】

- 国際化に関する目標
 - ・教育研究の国際化を推進し、我が国の世界的存在感を高めるとともに、国際協力関係を醸成し、人類社会に貢献する。
- その他の目標を達成するための措置
 - 国際化に関する目標を達成するための措置
 - ・国際化をより一層推進するために、国際化推進の中長期的戦略を不断かつ総合的に見直し、これを具現化するための組織を整備・活用する。
 - ・特に、世界レベルの研究者を招へいし、先端宇宙物理学研究領域における国際共同研究を推進するとともに、教育環境の整備を図る。

2. 女性研究者数の推移

※平成23年度～平成25年度の女性研究者数及び総数に対する割合を上段に、総研究者を下段に記入すること。

(単位：人)

		平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	最終目標
研究者		10, 5%	4, 2%	12, 5%	12, 5%	12, 6%
		194	209	236	250	195
内 訳	主任研 究者	1, 6%	1, 5%	1, 6%	1, 6%	2, 9%
		18	19	18	18	22
	その他 の研究 者	9, 5%	3, 2%	11, 5%	11, 5%	10, 6%
		176	190	218	232	173