

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) エグゼクティブサマリー (10年次用)

ホスト機関名	東京大学	ホスト機関長名	五神 真
拠点名	カブリ数物連携宇宙研究機構	拠点長名	村山 斉

作成上の注意事項:

※このサマリーは、拠点形成報告書、進展計画に記載された内容に基づいて、以下の項目についての概要を6ページ以内の記述で作成してください。(添付資料は不用)

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40%以上が既にファカルティポジション(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)を見つけている。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33,000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. 形成拠点の全体像

総体的にい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」、「国際数学者会議」、「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んできた。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-禅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。この疑問解決の鍵となる、ニュートリノ振動を発見した功績により主任研究員の

梶田隆章は2015年ノーベル物理学賞を受賞した。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2,400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、どちらかというト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ら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者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り、現在は Kavli IPMU とのジョイント・アポイントメントである吉田は、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186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228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127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二

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（当時、現在は京都大学教授）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けば、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 190 回以上引用された。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。謎の起源を持つこの加速膨張は宇宙の運命を決めてしまう。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すか、一般相対性理論は宇宙スケールでは破れているのかもしれない。Kavli IPMU の研究者達はすばる望遠鏡の観測データを使って、赤方偏移が 1.2 から 1.5 の時代の銀河団の形成や銀河の移動速度を解析して、初めて、このスケールの宇宙において重力理論が正しいか検証している。これは、SuMIRe プロジェクトによる精密測定のための試験的な解析研究である。

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問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、80 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に成功している。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

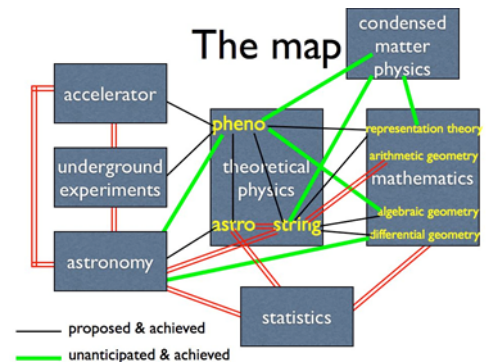


図 1 Kavli IPMU における 3 種類の相乗効果：提案され達成済；予想しなかったが達成済；延長期間中に達成予定

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 107 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 107 名の博士研究員のうち、44 名がすでにテニュアまたはテニュアトラックの教員職を見つけた。当機構は Yale 大学の上級の Kapranov 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 3 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、2015 年 4 月には UTIAS と改名された) 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 229(209) 編の論文(括弧内はレビュー論文を除いた値)が 50 回以上引用され、平均で 1 論文あたり 26.9(20.4)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）、ペリメター研究所（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。

B. 進展計画

我々は最初の 9 年間で世界トップレベルのステータスを得たと確信しており、今後の展望も非常にはっきりしている。数学、理論物理学、実験物理学、および天文学の間の学際的な相互触発に基づき、常に新しい理論を作り、新しいデータの収集に努めてゆきたい。暗黒エネルギー、暗黒物質、インフレーションで世界と競争できる結果を出してゆく。それらを解析して宇宙の新しい理論を構築する。これまで我々は、既に提案されていたもの、および予期されていなかったものの両方で多くの学際的な相乗効果を創り出してきたが、今後、従来は想像もできなかったような新しい相乗効果も創り出してゆく（図 1 参照）。

現在当機構は、当初の 10 年の期間後の次の段階として、堀、Martens、松本、森山、高田、戸田、Vagins、吉田を加えて主任研究員の布陣を若返らせ、再度我々の中核的研究プログラムを強調することを提案している。LHC 実験のリーダーとして Kim を加えて実験と理論の緊密な協力関係を作り、小松を加えて LiteBIRD のような新しい計画を立ち上げる。野村はパークレー・サテライトで活動して東大とパークレーの研究上の結びつきを強

める。Kapranov は次に述べるように数学研究に新しい局面を加える。東京大学はこれらの提案に対し責任を持って力強く支援し、WPI 補助期間以降の機構の継続を約束する。ただし、WPI 補助金により支援される研究拠点から東京大学が自前で運営する機関への移行は、提案されている 5 年の延長期間にわたって徐々に行われる必要がある。

1. これまでの成果に基づく中長期的な研究課題・戦略

我々の学際的環境は新しいアイデアを育み、幾つかの新しいプロジェクトを立ち上げたが、それらは 5 年間の延長期間が終了するまでに世界トップクラスの成果を出すことを約束する (図 2 参照)。2009 年に村山機構長が提案したプライム・フォーカス・スペクトログラフ (PFS、主焦点超広視野多天体分光器) は採択され、設計を終え、建設中である。2017 年にファースト・ライト (試験観測) を予定しており、5 年間データ収集を行なう。PFS と HSC を組み合わせる SuMIRe プロジェクトは、近い将来、暗黒エネルギーについての最も精密なデータを提供して、「宇宙に終わりはあるのか?」に答えようとしている。これは理論物理学者が天文学者と装置建設者のグループを主導するという学際的アプローチの具現である。

学際的組織のおかげで天文学者と実験物理学者と理論物理学者が一緒になって、インフレーションの枠組みを検証して「宇宙はどうやって始まったか?」に答えようとする衛星実験 LiteBIRD の概念設計を仕上げることができた。最近この提案が文科省の大型プロジェクト優先リストで最高点を獲得した。インフレーション時に量子ゆらぎによって発生した時空のさざ波を測定することによって、根拠のしっかりした「(インフレーション中のインフラトン場の変化量が大きな) ラージ場モデル」と呼ばれるタイプのモデルの是非を決するであろう。我々は 2024 年までに結果を出す計画であり、証拠を発見すれば恐らく一つないし二つのノーベル賞をもたらすであろう。

これらの新たな計画と初期期間の成果を考慮して次のような挑戦を行なう。

(1) 統計学

我々のプロジェクトで予想されるデータの量と種類は我々の能力を越えるので、意味のある解析結果を出せない。数学の一分野である統計学は Kavli IPMU の異なる分野を結びつける新たな座標軸をもたらしてくれる。同時に、我々の大規模なデータセットを利用することは、統計学者が実際のデータを使って自分たちのアイデアを検証し、理論を改良する助けとなるであろう。統計数理研究所と共同で統計と宇宙物理学を融合させる新しい JST の CREST プログラムを開始した。つまり、これは両者にとって利益のある関係である。ビッグデータの取り扱いを通して金融市場やビジネスにイノベーションをもたらすことさえあるかもしれない。

(2) 新しい相乗効果

我々は提案されていたもの、および予想されていなかったものの両方で分野間に相乗効果を創り出すことに成功した。今後さらにどのような相乗効果が起きるか、確信をもって予言することはできないが、次のような予想をすることはできる (図 1 参照)。加速器実験、地下実験、天文学、現象論: XMASS からの暗黒物質の信号、LHC の現象論、SuMIRe からの密度分布、そして高エネルギー宇宙線データが「宇宙は何でできているか?」に関連してこれらの分野間に相乗効果を創り出すであろう。ニュートリノの質量が地下実験カムランド-禅、加速器実験 T2K、そして SuMIRe による天文観測の組み合わせから決定されて、「どうして我々がいるのか?」に関するアイデアを確かめられるかもしれない。ガドリニウムをスーパーカミオカンデに加えることにより、数 10 億年昔の超新星から放出されたニュートリノを発見して、天文学と地下実験を結びつける。天文学、超弦理論: SuMIRe と LiteBIRD が量子重力理論を探り、天文学と超弦理論の間に新たな相乗効果をもたらす。

(3) 数学と物理学の新しい枠組み

我々の目標の一つは、物理学者と数学者の言語の融合に貢献する研究拠点を創ることである。我々は Yale 大学から Kapranov を採用した。彼は導来幾何学および非可換幾何学を支える洞察力に富んだ指導者である。数論と超弦理論の幾何の間には深淵な結びつきがあると予想されるが、我々は当機構の他の数学者や物理学者と共にその根本的な圏論的背景を発見するユニークな立ち位置にいる。

(4) 計画の遂行

新しい諸々の計画を非常に順調に実行あるいは準備してきているが、大型プロジェクトの遂行には大きな挑戦が待ち受けている。XMASS1.5 による暗黒物質検出、カムランド-禅と Belle-II による物質・反物質間の転換、SuMIRe による暗黒エネルギーの特質、そして LiteBIRD によるインフレーションの証拠、について世界と競合し得るデータを得ることを計画している。

(5) 卓越したメンバー

我々が持つ専門性のスペクトルで、直面する挑戦に十分対応できると考えられるが、さらにベストな才能の持ち主、特に広い視野を持って分野間を結びつけることのできる研究者を惹きつけ、また引き留め続けなければならない。国内外の研究機関とのジョイント・アポイントメントをさらに増やしていく。

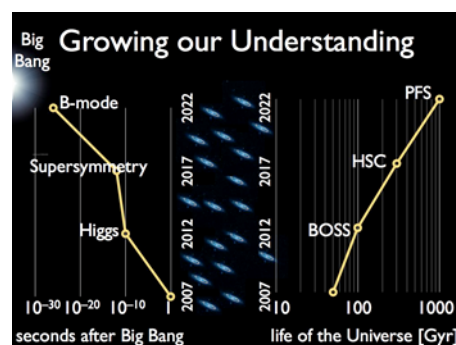


図 2 宇宙の始まりとその運命の探索で得られる我々の理解の 5 年延長期間終了までに予想される進展

2. 研究組織運営

現在の運営体制は、執行部が採用や引き留め、さらには研究活動を促進する時宜を得たワークショップ開催やビジター招へいを迅速に遂行することを可能とする。当機構の運営を将来に引き継ぐため、若手メンバーの間に機構への「当事者意識」を広めていく。当機構の組織は内部に「部門」を持たないフラットのままとする。

若手研究者育成には特別の配慮をしてきている。国際舞台における研究事情を習得するとともに自分たちのキャリアパスを確保できるように、十分に表舞台に立てるように努めている。年に1ヶ月から3ヶ月の間国外の研究機関で研究することを義務付けてプレゼンテーションや共同研究で自分たちの研究の促進を図るという方針と、多くのワークショップ開催やビジター招へいがこの目標の成功に大きく貢献してきた。我々は当機構の助教をテニュアトラックの職とすることを意図している。そのうちの一部は他機関とのジョイント・アポイントメントである。加えて次の挑戦を開始する。

(6) システム改革の波及

A.II-5 で述べたように、システム改革では多くの成果をあげた。その多くが改革のモデルとして文科省の「国立大学改革プラン」の中に記されている。我々は村山（カリフォルニア大学バークレー校）や Bondal (Steklov 研究所)の成功を受けて、当機構との間でスプリット（ジョイント）・アポイントメントを実現するべく他の日本の研究機関に働きかけ、これらの改革を組織に浸透させる伝道者の積極的役割を演じる。

(7) 新しい大学院プログラムの創設

世界的な研究拠点では大学院生とともに研究することは必須であると信じる。我々の教員の一部が既存の研究科の大学院生教育に参加できることは良いのであるが、全員が参加できるわけではない。我々は活発な学生の交換留学制度をもつ国際大学院プログラムの創設を図る。Oxford 大学との学生交流プログラムによって、今年の秋から3人、来年の秋からも少なくとも3人の学生が来る。東大の新しい国際大学院プログラム(GSGC)に参加することによって世界中の大学から素晴らしい学生を引き寄せる。

(8) 若い学生・生徒

次世代の研究者を確保するために若い学生・生徒を鼓舞することは決定的に重要である。我々のアウトリーチプログラムの成功に基づいて、研究者や高校教師の研修のためのワークショップを組織することにより、我々が直接コンタクトできない多くの若い学生・生徒たちへのアウトリーチ活動を広めることを提案する。

(9) 安定性と持続可能性

我々の分野のほとんどのプロジェクトには最低でも10年という長い準備期間があるため、安定した持続可能な組織が必要である。我々はWPI補助金に支えられるモデルから東京大学が運営する新しいモデルへ移行するため、東京大学本部と密接に協力する。

3. ホスト機関における位置付け及びリソース措置

東京大学は Kavli IPMU がすでに「世界トップレベルのステータス」を獲得したと認識している。2013年のWPIプログラム委員会の席上、濱田前総長は「Kavli IPMU は我々にとって宝である」との所見を述べた。彼は Kavli IPMU に9つの恒久教員職を約束した。東京大学は Kavli IPMU を学内の恒久機関として存続させるために TODIAS(現在は UTIAS)を設立した。UTIAS は大学を通して文科省に概算要求をすることができ、既に9つのテニュア教員職が追加された。五神総長は、基本理念：卓越性と多様性を元に、東京大学ビジョン 2020 を行動指針として設定した。Kavli IPMU はこのビジョンと行動計画の中心に位置付けられている。東京大学が5年間延長の提案とWPI補助期間終了後の Kavli IPMU の将来にわたる持続をしっかりと支持していることは明白である。カブリ財団が我々の基金を750万米ドルから1250万米ドルに増やしたが、これは我々の注目度の高さと当機構を持続させようとする大学の努力の結果である。カブリ財団から寄付を受けた基金やその他の財源により、Kavli IPMU には長期に渡る将来がある。

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 (10年次用)

ホスト機関名	東京大学	ホスト機関長名	五神 真
拠点名	カブリ数物連携宇宙研究機構	拠点長名	村山 斉

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ことを。

全様式共通の注意事項：

※特に指定のない限り、平成28年3月31日現在の内容で作成すること。

※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、事業費の推移、事業費、WPI補助金支出について[添付様式1-1~7]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、9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。

総体的にい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、およそ半数の研究者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40名以上が教員の職 (ファカルティーポジション) 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。当機構の教員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。多くの教員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。

Kavli IPMUの主任研究者である東京大学宇宙線研究所の梶田隆章所長が2015年ノーベル物理学賞に輝いた。ニュートリノ振動の歴史的発見は我々が取り組んでいる「宇宙にどうして我々がいるのか?」という大きな疑問に答えるヒントを与えるものである。Kavli IPMUの福来正孝、柳田勉が提唱した有名な理論によれば、ほんの僅かなニュートリノ質量の存在が物質と反物質のバランスを崩し、完全な対消滅を妨げたのである。この発見は我々が進めているT2Kを含むニュートリノ実験を活気つけるものである。

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。ダークマターの直接検出実験「XMASS」は建設を終え、いくつかのダークマター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。最初の数夜のデータを解析が行われ、論文発表されている。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。多くの科学論文がすでに出版されている。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10以上与えられており、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、2015年4月にUTIASと改名）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成果を取り入れている。

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、すでに物理学専攻と数理科学研究科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、大学院生の間で大変評判がよかった。

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に貢献していると信じる。

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。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、8名の教員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、UTIAS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9つのテニユア職が与えられた。それに伴いカブリ財団の寄付額もさらに増した。当機構の将来を持続可能で安定したものにしていいため、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、2007～2016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2-1]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、当機構の数学者である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LiteBIRD衛星計画を提案する結果に至り、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。Kavli IPMUの研究者である羽澄昌史(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)、片山伸彦、小松英一郎、菅井肇らは、LiteBIRD衛星の2022年の打ち上げに向けて積極的に活動している。2014年に、LiteBIRD衛星は、日本学術会議が選ぶ主要な科学研究プロジェクト「Master Plan 2014」の一つに選ばれるとともに、文部科学省による2014年の大規模研究のロードマップにおいて10個の新たなプロジェクトの一つに選定された。Kavli IPMUは、LiteBIRDに特化した最初の国際会議“B-mode from Space”を主催した。LiteBIRDは宇宙科学研究所(ISAS)による2つの戦略的な大型ミッションの一つに選定されている。

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一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一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一つである。PGM模型は標準模型(SM)に超対称(SUSY)を導入した模型の一つであり、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)]、及びダークマター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预言する: 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预言し[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陽子崩壊問題や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ダークマター粒子であると预言する[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。中性ウィーノは、その弱いパートナーである荷電ウィーノと同様に、LHC実験において消失飛跡法を用いた探索が進められている。そのシグナルの大きさを正しく見積もるためには、荷電ウィーノと中性ウィーノの質量差を極めて精密に計算する必要があるが、その計算を当機構のメンバーが行った(伊部、松本、佐藤 2012)。その結果は、ATLAS、CMSの両グループで受け入れられている。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%以上はダークマター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。ダークマター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

- ダークマターの分布とその時間的发展を理解すること
- 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ることで、ダークマター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：ダークマターの空間分布

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、ダークマター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ダークマター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atalog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量に依らない、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（ダークエネルギー）および冷たいダークマターが、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。

研究成果 5：ダークマターの検出

鈴木洋一郎は共同研究者と共にダークマター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）。

2013年11月から2015年3月までのデータを用いて、季節変動の探索をおこなった。DAMA実験のエネルギー閾値は、2keV_{ee}であるが、XMASSは1.1keV_{ee}を達成している。低いエネルギー閾値は、それだけ感度が高いことをしめしている。全データ量もDAMAの1.33ton・年に対して、XMASSは、ほぼ同様の0.8ton・年である。ダークマターのモデルに依存しない季節変動の結果 [5]を図2に示す。XMASSの結果は若干負の変動（位相が逆）を示しているが、2つの独立な解析によるp-値はそれぞれ、0.068と0.014であり有意ではない。しかし、この結果は、DAMAの示す季節変動のデータとは矛盾するものである。さらに、もし、ダークマターがWIMPであるとすると、WIMPを仮定したDAMAの許容領域のほぼ全域を排除することになる。これらの結果をより強いものにするには、将来のより多くのデータが必要となる。

XMASSは電子及び光子、並びに原子核反跳も検出できる。ダークマター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 3×10^{-4}

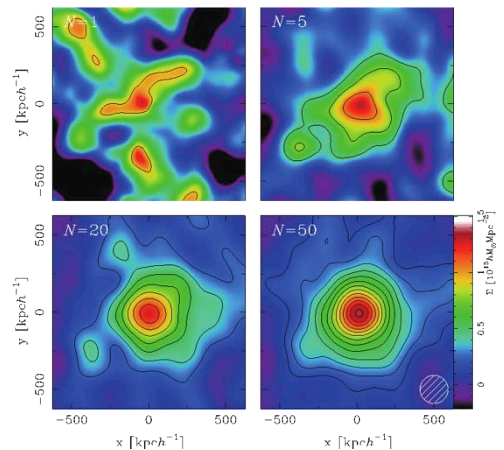


図1 X線光度で明るい、最大質量級の銀河団領域分布の弱い重力レンズ測定から復元した、平均的な質量分布(大部分がダークマター)の測定結果。左上から右下図の順に、図中に示されるように1個から50個の銀河団の測定結果を組み合わせた結果を示す (N. Okabe et al. 2013)。

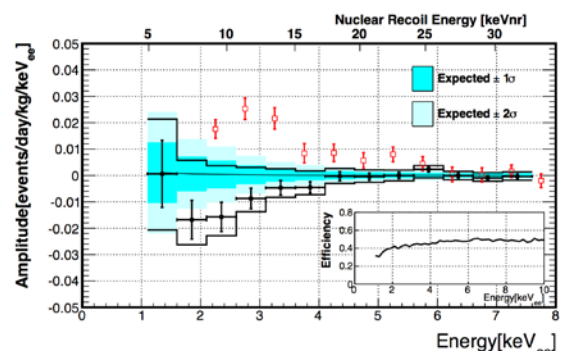


図2 XMASS 実験で得られた季節変動の振幅を示す。エネルギー閾値は1.1keV_{ee}である。KeV_{ee}に対応する原子核の反跳エネルギーを上部の軸に示す。誤差付きの黒点が XMASS のデータである。若干負の振幅（位相が逆）が見られる。黒線は 90% C.L. の範囲を示す。赤点は DAMA 実験の結果であり XMASS により排除されている。

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。これは暖かいダークマターであり、冷たいダークマター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3 ([6])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。

現在、鈴木と共同研究者は、1トンの有効質量とWIMP-核子のスピンに依存しない断面積 σ_{SI} に対する感度 $\sigma_{SI} \sim 10^{-26} \text{ cm}^2$ 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) がダークマターの場合、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、ウィーノダークマター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モデルはウィーノダークマターを予言する。一方、このモデルをしっかりと検証するためには、我々の銀河系におけるダークマター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(林、伊部、市川、石垣、松本、菅井 2016)。宇宙線の観測において、ウィーノダークマターも強いシグナルを与えることが期待される。最近、AMS-02コラボレーションが宇宙線の中の反陽子が過剰に存在することを報告した。伊部、松本、白井、柳田 (2015)の論文では、ウィーノダークマターがごく自然にこの現象を説明できることを示し、現象論コミュニティに大きなインパクトを与えた。

村山斎を含む国際的なグループが、パイ中間子のように振る舞い、自身と反応を起こす新しい種類のダークマター粒子を提案した [7]。この理論は、銀河や、銀河団内の物質分布の修正を予言し、観測された物質分布と冷たいダークマターを仮定したN体のシミュレーションとの食い違いを説明する。LHCやSuperKEKBなどの粒子加速器を使ってこの理論を検証することができる。

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。その原因はダーク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。宇宙の運命はダーク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: 宇宙の加速膨張

宇宙の加速膨張の発見は、物理学と宇宙論にまたがる最も根源的な問題のひとつとなっている。ダーク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。ダーク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

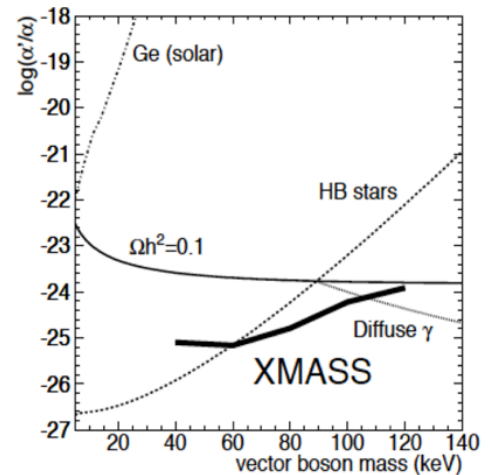


図3 ベクトルボゾンと電子の結合定数の下限を示す。細い実線は、現在のダークマターの量をすべてこのモデルで説明する結合定数の値である。点線と破線は、宇宙物理的な議論からの制限である。実験的制限(一点鎖線)は、太陽の中での生成量の議論から決まる。

論における安定なドジッター解、A. D. Feliceと向山によるmassive重力のミニマル理論、等を得た。

銀河赤方偏移サーベイは、宇宙大規模構造の成長速度を測定する上で優れた観測量の一つであり、重力の性質を探る上で重要な指標となる。FastSoundは、すばる望遠鏡に搭載したファイバー多天体分光器FMOSを用いた銀河赤方偏移サーベイであり(田村はビルダーの1人である)、赤方偏移が1.2から1.5の遠方宇宙の3次元地図の作成を目的としたものである。当機構の奥村哲平、日影千秋、および、東京大学の戸谷友則が中心となって、FastSound銀河の分布や運動を調べ、宇宙論スケールで重力理論の検証を行った[8]。このような遠方の宇宙においては初めての試みである。得られた結果は、一般相対論に基づく重力理論が遠方宇宙でも成り立つことを示すものであった。本結果は、SuMIReプロジェクトにおける重力理論の精密検証に向けての予備研究でもある。

研究成果 7 : 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Hyper Suprime-Cam (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完成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。

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ダーク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、ダークマター分布を解明することである。図5は、HSCの初期データによる弱重力レンズ測定によって得られたダークマターマップである。現在までに150平方度にわたるHSCデータを収集しており、2017年初期に出版予定の初年度科学的論文シリーズの制作に向けて、チーム一丸となって研究を進めている[9]。

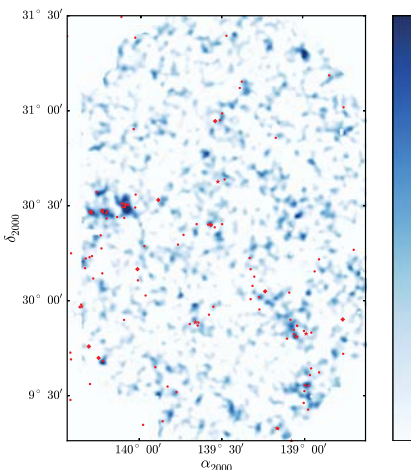


図 5 HSC の試験期間に観測された 2.3 平方度のデータの弱重力レンズ効果によって再構築したダークマターの射影マップ。カラースケールは、ダークマター密度の S/N 比を表す。赤点は、銀河団の位置を示す [9]。

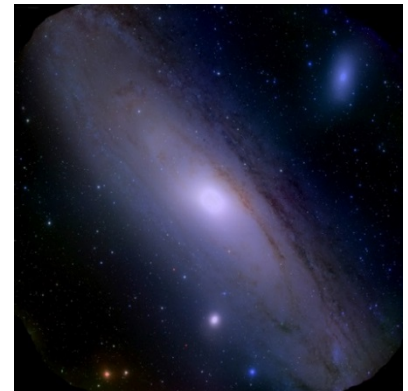


図 4 HSC の初期試験観測による M31 の画像。Kavli IPMU の研究者らで開発されたデータ解析ソフトウェアによって得られた。

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: 村山斉、プロジェクトマネージャー兼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、2015年後半に加わった11名の上級研究員からなる中国グループとの国際共同研究が進められている。

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、ダークマターとダーク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。分光カメラは、テスト中であり、10 μ の精度をもつ自動ファイバー位置制御装置の製作が始まっている。我々は、2019年半ばからすばるで最初の技術的観測を計画している。

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年以後のフィールズ賞の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 8： 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II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有理予想、その他を証明した[戸田 2010]。また、彼の安定性条件の研究は、ある種の 2 項複体のチャーン標数に対する Bogomolov-Gieseker 型不等式予想へと導いた[11, 12]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 9 : 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[13]。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[13, 14]。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 10 : 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(斎藤恭司 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-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。

堀と斎藤は 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、2012年 Kavli IPMUにおいてこれら2つの問題を解決した。

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むアイデアについて話した。これは齋藤とS. LiおよびG. 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む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[15]。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。

T. MilanovとB. Bakalovは、高次の種数の場合の再構成によって定義される不変量のある具体的な(モノドロミー)離散的データで記述するためにW代数を提案した。その構成は、T. Milanovが[16]で乗り越えた技術的困難を除いて一般的である。問題は、一般に我々のW代数の状態を具体的に発見することがとても難しいということである。それらが微分方程式系の解として定義されているためである。ここ2年で、T. Milanovは、物理学者B. EynardとN. Orantiniの仕事に影響されW代数の状態を構成する新しい方法を発展させた[17]。これは今のところ部分的な成功しか収めてないが、EynardとOrantiの位相的漸化式を使うアイデアは新しいものである。この分野は、研究すべき興味深い問題をたくさん含み、とても豊かである。

研究成果 11: 第二次多胞体と赤外代数

M. Kapranovは場の量子論に動機づけられ、圏論的、層理論的構造を研究してきた。物理学者Gaiotto、Moore、Wittenによる最近の仕事は、赤外領域における2次元物理理論の振る舞いを統制する代数構造を提示した。M. KontsevichとY. Soibelmanとの共同研究で、M. Kapranovはこれらの構造とより古典的な第二次多胞体の理論と関連させた。第二次多胞体は、M. KapranovとI. Gelfand、A. Zelevinskyとの共同研究によって1990年代に導入された。これらの多胞体は、もともとの第一次多胞体の異なる三角形分割をパラメトライズしている。第二次多胞体を導入するもともとの理由は、多変数の判別式多項式を研究することであった。新しい物理からの動機は全く異なっており、それはLandau-Ginzburgモデルの解析である。これは、第二次多胞体の分解に関する最先端の驚くべき性質をもたらした: そのような多面体のそれぞれの面は、他の第二次多胞体たちの積である。そのような分解構造は、Costelloらによる場の量子論への圏論的アプローチに現れるが、M. Kapranovはより古典的な数学の概念(凸性、三角形分割、判別式)[18]に関連した興味深い具体的な例を得た。

彼らのアプローチに関連する他の数学理論は、線形微分方程式のホロノミー系の位相的対応物である偏屈層の理論である。Landau-Ginzburgモデル(真空の集合、真空を結ぶインスタントンの集合)によって与えられるデータは、M. KapranovとV. Schechtmanによって偏屈Schoberと呼ばれている偏屈層の圏論的類似を定義するものである。それらは、超平面配置上の偏屈層の分類を、この圏論的類似を発展させる動機であるベクトル空間たちのある種の図式によって与えた[19]。

研究成果 12: 幾何学、有限群、情報理論の新しいつながりに関する発見

我々の幾何学の概念は、弦理論や量子重力理論における劇的な変化の影響を受けている。弦理論では、物質の基本要素は点粒子でなく1次元的な対象であると考えられている。量子重力理論では、幾何学は自由度の量子次数と量子力学的な不確かさを記述する言葉の一つとなっている。Kavli IPMUの研究者たちは、これらの幾何学における新しい考え方を研究するための数学的道具を発展させている。それらは、我々の物理理論への理解をより強いものにし、数学への強い影響も与える。大栗博司による重要な発見の一つは、マシュー・ムーンシャインである。楕円種数は、K3曲面と呼ばれる実4次元のカラビ-ヤウ空間でコンパクト化した超弦理論における粒子スペクトルを記述する。2010年に、大栗博司は、江口徹、立川裕二と共同で、楕円種数によって数え上げられる粒子たちは、最大のマシュー群であるM24の表現となっていること[20]を発見し、M24はK3曲面上の弦理論における隠れた対称性であることを予想した。弱いバージョンのマシュー・ムーンシャイン予想は、Terry Gannonによって2013年に証明された。大栗の発見は、世界中の数学者、物理学者によって精力的に研究されており、マシュー・ムーンシャインに関するたくさんの研究集会在US、ヨーロッパ、アジアで開催されている。この仕事は、物理学、数学の新しい研究領域を切り拓いた。

[21]では、大栗博司と山崎雅人は結晶融解の統計力学的モデルの熱力学極限からカラビ-ヤウ多様体がどのように生じるのかについて示すことにより、幾何学の新しい観点を導入した。より最近では、大栗博司は量子重力のホログラフィーと情報理論の新しい関係性を探っている。情報理論では、エントロピー不等式は情報処理の効率の良さを測る上へ重要な役割を担っている。[20]では、大栗博司と共同研究者は、これらの不等式のいくつかは、重力系におけるエネルギー稠密性の正值性として解釈できる

ことを示した。エネルギーの正值条件は一般相対性理論における様々な定理を示す際にしばしば仮定される。大栗博司らは、これらの条件のいくつかは量子重力理論の無矛盾性の帰結であることを示した。この仕事もまた、局所的な幾何学がホログラフィーにどのように現れるのかを明らかにする。

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の群に対して考察されたが、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9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し、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。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、半球[23]、およびトーラス[9]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を用いてテストされている。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、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り、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。

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[24]、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[24]。

その後の更なる研究の中で分かってきたのは、(我々の宇宙においてそうであるような) ランクが4のゲージ群をもつ真空は、 F 理論においては $e^{-0(1000)}$ 程度の小さな割合しか占めないのかもしれないということである[25]。この理解は、「なぜ我々が存在するのか」という問いに定量的な形を与えるものである。

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2011年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。これは物性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、物性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[26]。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、強結合のラーゼン(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・エントロピーの物性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物性物理学理論研究者Subir Sachdev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。

強く相互作用する量子多体系において、様々な励起状態のダイナミクスを解析したい場合にAdS/CFT対応はとても有効な手法となる。このようなダイナミクスを特徴付ける有用な量の一つにエンタングルメント・エントロピーがある。Bhattacharya、野崎、宇賀神、高柳は、エンタングルメント・エントロピーに熱力学の第一法則に類似する法則があることを発見した[Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 091602]。野崎、沼澤、高柳は、共形場理論における局所的な励起状態に対してレプリカ法によるエンタングルメント・エントロピーの計算方法を見出し、自由スカラー場理論に対して具体的な計算結果を初めて与えた[Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 111602]。宮地、沼澤、芝、高柳、渡邊は、AdS/CFTにおいてバルク(AdS空間)の局所的な励起を、量子エンタングルメントを用いて、共形場理論の状態として記述する方法を見出した[Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 171602]。宮地、沼澤、芝、高柳、渡邊は、情報計量と呼ばれる量をAdS/CFT対応で計算する方法を考察し、近似的にAdS空間の時間一定面の体積で与えられることを見出した[Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 261602]。

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。LHCで発見された有名なヒッグスボ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、物性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[27]。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・ボソンと呼ばれるギャップレス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 Synopsiに選ばれた。

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。

- 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いない。
- 星と銀河の誕生とその後の進化
- より小さいものからの銀河の形成
- 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(図6)、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の上限値が得られる

[28]。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 $0\nu\beta\beta$ 半減期の下限値と、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。目標達成後は、 ^{110m}Ag に由来する主要な背景雑音を除去するため、蒸留キセノンを充填した新しい液体シンチレータに交換した。これにより、 ^{110m}Ag の背景雑音をおよそ20倍削減することができ、キセノンの充填量は全部で380kgに達した。新たなフェーズでの成果は、国際会議Neutrino 2014において発表した。ミニバルーンに入っていた液を抜き出す2015年10月末までの534.5日にわたる結果について、論文出版の準備中である。期待されている感度は、すでに世界最高であった過去の結果を約5倍上回るものである。

斎藤俊・高田昌広・樽家篤史は、冷たいダークマターと質量のあるニュートリノとを含む混合ダークマターのモデルに対して、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. Lett.* **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、銀河のクラスタリングの特徴に、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[29]。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ズパラメータ(迷惑変数)をマージナライズ(積分して消去)した。混合ダークマターモデルの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。斎藤は現在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.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **444** (2014), 3501-3516)。

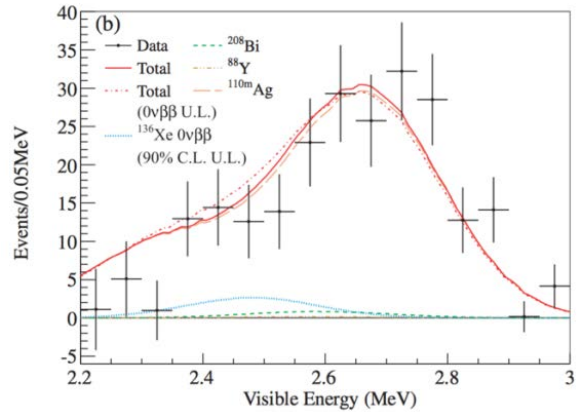


図6 選定されたイベント候補のエネルギースペクトルを、ベストフィットの残存バックグラウンド、90% C. L. の $0\nu\beta\beta$ 崩壊上限値とともに示す。

研究成果 18: 銀河の進化

Kevin BundyはMaNGA(アパッチ天文台近傍銀河地図作成)プロジェクトのPIである。MaNGA観測は、SDSSの第4フェーズの一つとして2014年7月に始まり、10000個におよぶかつてない規模の近傍銀河サンプルについて詳細な分光観測を行う予定である。今シーズンの観測が2016年の夏に終了したが、その時点でおよそ3000の銀河が観測されており、一般に公開された分解分光銀河サンプルの中では最大の規模になる予定である。MaNGAプロジェ

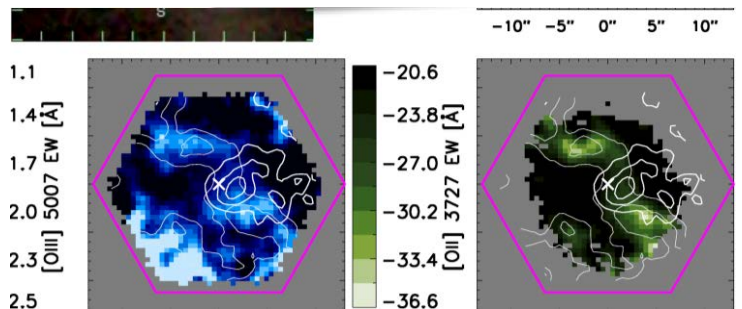


図7 K. Bundy と E. Cheun は、MaNGA データを用いて、楕円銀河中に予期せぬ風”red geysers (レッドガイザー)”を発見した。この発見は、楕円銀河で星形成が起きない謎を解く鍵となる。

クトを総括した論文は2015年に出版されている[30]。またK. BundyとE. Cheungは初期のMaNGAデータから超大質量ブラックホールから強いエネルギーをもった風を有する新しいクラスの楕円銀河について重要な発見をした。その風は、楕円銀河で星形成が抑制されると長年考えられてきたフィードバック機構を表すものである。彼らが発見したレッドガイザーに関する論文は、Nature誌に発表された[31]。図7は、red geysers (レッドガイザー)が示されている。

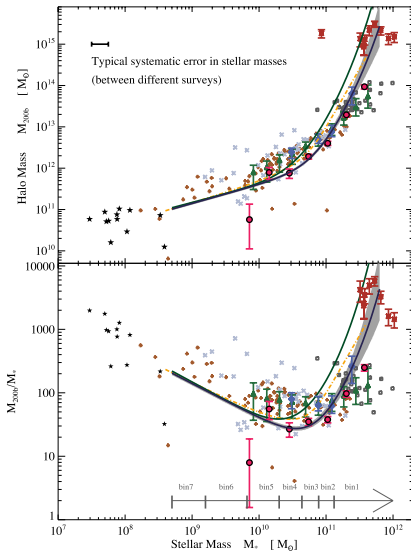


図8 $z=0.2$ から $z=1$ までの星質量とダークマターハロー質量の関係。実線とそのまわりの灰色の領域は、今回のCOSMOSの研究の結果を示す。

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、未だ解明されていない。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、銀河のクラスタリング統計量、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[32]。図8に示すように、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 $M_* = 4.5 \times 10^{10} M_{sun}$ あたりの銀河について、その質量比が $M_{DM}/M_* \sim 27$ 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。さらに研究員の齋藤俊とともに、BOSSデータを用いて本研究をより大質量の銀河に応用した。

J. D. Silvermanと共同研究者は、このダークマターとバリオンの関連を、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、Chandra衛星のデータを使用して同定した[33]。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。

S. Moreは(Kavli IPMUの学生であった)宮武広直や高田昌広とともに、銀河クラスタリングと重力レンズを用いた新たな手法によって、ハロー・アセンブリ・バイアスに関する初めての観測的証拠を得た。ハロー・アセンブリ・バイアスは、大スケールのハロークラスタリングが、ハロー質量以外の副次的なパラメータに依存する効果である。本結果は、将来の大規模構造サーベイにおいて考慮しなければならない効果である。この論文は、Physical Review Letter誌の編集者が推薦する論文に選ばれ、多くのメディアで発表された[34]。

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、 $\Omega_{dust} \sim 5 \times 10^{-6}$ であることを意味し、この存在量は典型的な明るい($-L^*$)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, *Astrophys. J.*, **754**, (2012) 116も参照のこと)。

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9参照)。

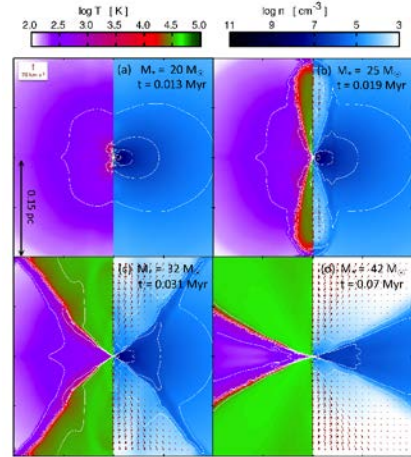


図 9 初代星からの紫外線放射のフィードバック。ガス温度の空間分布（左）、数密度（右）、速度（右、矢印）をそれぞれの図に示す。4 つの図はそれぞれ星質量が 20 太陽質量 (a), 25 (b), 35 (c), 42 (d) の時のもの。初代星誕生からの経過時間は、図中に示されている。(T. Hosokawa et al. 2011)

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て超新星爆発の物理を研究した(図10参照)[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ずれた場所で爆発的核反応が生じることが示唆された。

G. Folatelli, M. Bersten, 野本憲一らのグループは、明るい黄色い超新星2011dhの近くに、熱い連星のパートナーがある証拠を見つけた。彼らは、数値計算によって、連星のパートナーが存在することを予測していた。今回の発見は、彼らのグループが考えている超新星の描像を支持する観測結果の最後のピースにつながるものである。本結果はAstrophysics Journal letter誌に出版され、連星系と超新星機構に新たな知見を与えた[38]。

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]。

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探査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バール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可能になる。

SK容器中で水に溶けたガドリニウムの影響を調べるため、M. Vaginsをリーダーとして、2009年から神岡鉱山において、EGADS(検出器に対するガドリニウムの作用を評価)と呼ばれる研究開発プロジェクトが行われた[40]。ガドリニウムの影響に関する慎重な試験を通して、EGADS検出器は、ガドリニウム溶解技法と技術が実現出来ることを確証的に示した。0.2%の $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ が光電子増倍管を取り付けたEGADS容器

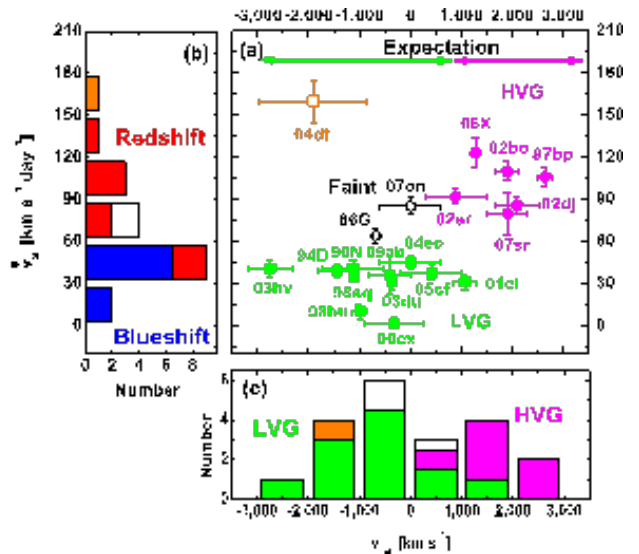


図10 Ia型超新星の初期と後期の特徴間の関係。初期の速度勾配(縦軸)と後期の輝線の色速度シフト(横軸)の比較。観測されたSN Iaの特徴には、低-高速度勾配(それぞれLVGとHVG)と赤-青赤方偏移との間の違いがある。(K. Maeda et al. 2010)

に入れられても、水の透明度は、SKで見られる超純水の範囲内に維持された。さらに、ガドリニウムの喪失は計測限界以下であった。EGADSのこのような素晴らしい結果から、SK共同実験グループは、2015年の6月に、正式にガドリニウムをSKに入れる提案を認めた。その後、2016年1月には、T2K共同実験グループもこの計画を認めた。SKグループの承認に続いて、神岡高山では準備が開始された。2015年9月までには、ガドリニウムを含んだ水のフィルター装置を設置するための新しい大きな実験室がSKの近くに掘削された。SKは、2019年末までに、ガドリニウムを入れてデータ収集を開始する予定である。

ガドリニウムを入れたEGADS実験装置では、実験が続けられている。頭文字の意味は、ガドリニウムを使って超新星爆発を自律的に検出する、に変更された。今や、電磁的な放射、ニュートリノ、重力波などの、高エネルギー突発天体事象からの様々な信号を結びつけるための天文コンソーシアムの一部になっている。この新しいフェーズにおける目標はEGADSへの超新星爆発ニュートリノを到着から1秒以内に全世界に発信することである。これは、超新星爆発ニュートリノによって検出器内で生成される誤検知のない「ガドリニウムの心拍」によって可能となった。

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階まで螺旋状に連なっていて、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2-2]に記載すること。

村山 資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。吉田直紀は科学技術振興機構(JST)の新しいCRESTプロジェクト「大量の宇宙イメージングデータを用いる宇宙統計数理研究」を獲得し、村山は新学術領域域科研費「なぜ宇宙は加速するのか?—研究の深化と未来への挑戦—」を獲得している。鈴木洋一郎は数回にわたって研究資金を獲得し、ダークマターを地下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28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）、田村直之（プロジェクトマネージャー）、高田昌広（プロジェクト研究者）の主導のもとで行われている。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および中国コンソーシアム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およびLiteBIRD（羽澄昌史が主導）は全て大きな国際共同研究グループによって運営され、LiteBIRDを除く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、カナダのペリメター理論物理学研究所、アメリカのストーン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、UNIFYはInvisiblesやそれに続くダークマターやニュートリノに関するElusivesネットワークにおいて重要な役割を果たしている。2016年1月にはKavli IPMUは統計数理研究所（ISM）と宇宙物理と統計に関する相互協力を強力に押し進める覚書に署名した。

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[添付様式2-3]に記述すること。

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、教員の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。野本憲二（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。キヤノン（株）は高精度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。キヤノン(株)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(株)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[添付様式2-4]に記述すること。

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。2016年3月、「宇宙観の東西」と題する一般講演会を行い、野村泰紀と中国哲学の専門家中島隆博の両氏に宇宙に関する東洋、西洋の視点で議論、物理学者と哲学者がそれぞれ宇宙をどう見ているのか語り合う機会を作った。また2015年12月には、初めてとなるKavli IPMUとELSIによる「起源への問い」と題した合同一般講演会を開催し、宇宙、地球、生命、科学の歴史、人間観について講演、意見交換を行った。我々のアウトリーチイベントはこれまで33,000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2,300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)をリードしている。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、と预言した。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ものと選別するには、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。そしてA. Moreが指導するグループは市民科学者に選別されたおよそ1,100万件CFHT Legacy Surveyから29個の新しい重力レンズの候補を発見した。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. 拠点が融合領域創出へ向け戦略的に行った取り組み

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り組み

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(MS)理論セミナー、天文-宇宙物理学-素粒子物理学(ACP)セミナー(後に実験物理を加えてAPECと改名)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もっており、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。堀健太郎と斎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ボ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日にヒッグスボ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ボ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。2015年5月、Kavli IPMUと物性研究所は物性物理と重力、弦理論の研究者を世界中から集めた物性物理とAdS/CFTに関する国際会議を開催した。「ホモロジー的射影双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-ギンツブルグ模型の幾何と物理」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模型を扱った。「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ダークマターを扱った。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。2014年11月にはKavli IPMUで理研iTHES（理論科学連携研究推進センター）、大阪大学TSRP（基礎理学プロジェクト研究センター）と共同の融合シンポジウム「理論科学の最先端-物質、生命、宇宙-」を開催した。研究協力は、Kavli IPMUとiTHESおよび大阪大学TSRPとiTHESの2つの2研究機関合意に基づくものである。斎藤恭司と河野俊文は「量子原始形式理論に向けて」と題するKavli IPMUと数物フロンティアプログラムによるジョイントワークショップを開催した。ワークショップでは原始形式の周期写像に関する最近の進展を網羅した。

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2014年10月に統計数理研究所、筑波大学およびNTTコミュニケーションと共同でJSTのCRESTプログラムを開始した。このプログラムで我々は、すばる望遠鏡HSCプロジェクトの25兆ものビッグデータとなるピクセルデータを解析することを通じ、統計学と宇宙物理学を結合した新しい先進的な研究領域となる「宇宙統計学」を切り拓いていく。

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。

この目的達成において、立川裕二、堀健太郎、大栗博司など数名の鍵となる「通訳」の存在が大きい。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。なお立川は2016年に東京大学理学部からKavli IPMUに教授として戻った。

「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。[4]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は引き続き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[23]。[9]で、R. Eager、堀と立川はBeniniと共に2次元トー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[5]。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[6]。山崎雅人（物理学）と大島芳樹（数学）は放物型Verma加群として知られる数学の対象の表現論を研究した。これは物理における高次元共形場理論（CFT）の表現論への適用とされるもので[12]、山崎の論文JHEP, 10 (2016) 035 [hep-th]で議論されている。

また、我々は現地視察ワーキンググループに励まされて物性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、大栗は物性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ダークマター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こし、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。大栗博司は数学者M. Marcolliおよび大学院生のJ. Lin、B. Stoicaと共同研究を行い、いかに境界上の情報理論データからホログラフィックな時空が現れるかというこの理解を大幅に進めた[20]。特に、境界理論における量子もつれデータを使って重力理論における局所的エネルギー密度を表現する式を発見した。村山は物性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（NGB）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[27]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/CFT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、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)ダークマター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、宇宙のボイド（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]。最近の広域銀河探索によれば、

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ボ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、観測された宇宙ボ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]やダークマター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。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[3]。この結果はサイエンス誌に掲載され、国際的に80以上のメディアに取り上げられた。

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4-1]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った。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。2015年度において機構には19名の主任研究者（内26%にあたる5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. Sobell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。

当機構の研究者のかなりの割合は外国人であり、多数のメンバーが世界レベルであると考えられる。教員、博士研究員、長期ビジター、大学院生を含む研究者259名の所属メンバーの内、91名（35%）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、57名の内、外国籍は27名（47%）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	2014	2015
全数	168	372	432	862	630	835	1017	928	801
外国機関	65	103	345	478	392	497	544	471	505

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)、Gerard 't Hooft (2015)らが、またフィールズ賞受賞者ではShin-Tung Yau (2009年)、Maxim Kontsevich (2010年)、Edward Witten (2014)、またプリンストン高等研究所の名誉教授で物理学者であり著書がよく知られているFreeman Dyson (2014)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り、現CERN所長の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を最初のテニュ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。彼のKavli IPMUにおける研究活動はこれからの延長期間中もしっかり続けられる。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ュ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ュ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、当機構は教員である戸田幸伸、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

ポスト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。

・ポストドクの国際公募の実施と応募・採用状況、外国人ポストドク比率、ポストドクの就職先の実績を[添付様式4-2~4]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、教員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。2015年度末までに採用した博士研究員総数139人のうち、102人(73%)が外国人である。常に40名程度の博士研究員がKavli IPMUでの研究生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。

教員を採用する場合は、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、教員と個別にそれぞれ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。契約条件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139名の博士研究員のうち107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、ルートビヒヒ-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107名の博士研究員のうち、44名は既に次のような研究機関の教員職に就いている。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、サンディエゴ州立大学、サウスダコタ大学、タタ研究所、チュラロンコーン大学、APCTP/POSTECH、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)、立教大学、KEK、広島大学、名古屋大学、大阪大学などである。52名は著名な研究機関、例えばCERN、プリンストン大学、高等研究所、ケンブリッジ大学、ロンドンインペリアルカレッジ、カリフォルニア工科大学、スタンフォード大学、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の若手教員に関しては、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なり、現在Kavli IPMUとのジョイントアポイントメントを行っている。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、向山信治も同じ基礎物理学研究所教授となっている。立川裕二が東京大学理学系研究科の准教授であったが、2016年にKavli IPMUの教授として戻ってきている。

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4-5]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名の教員、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16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)、清華大学 (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のテニュ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4-6]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、2013年15件、2014年13件そして2015年17件である。2015年に注目してみると計17回の会議の参加者総数1341名のうち38%にあたる506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)、“JGRG14: 第24回一般性相対性理論と重力に関するワークショップ” (2014年、20名の海外参加含む総数172名の参加)、“Kavli、IPMU-理研iTHES、大阪大学TSRPシンポジウム: 理論科学の最前線-物質、生命、宇宙” (2014年、31名の海外参加含む総数111名の参加)、そして“AdS/CFT物性物理に関する国際ワークショップ” (2015年、41名の海外参加含む総数121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。我々の教員は、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(2013年)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超対称性”(2014年)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、同特別賞を2008年、2013年および2015年の3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っている。

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

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な大学よりも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ぶ上で役に立っている。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の教員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、Scott Carnahan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ユ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ユ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、Mark Hartz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。
3. 元Kavli IPMUのポスドクで数学者のMarcus Wernerは京都大学白眉助教の職に就いた。日本の学界の国際化に貢献している。
4. 別の元Kavli IPMUポスドクのIvan Ipは京都大学数学教室の助教になった。

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、資金提供機関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。

我々はJSPSの「頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム」に採択された。このプログラムはKavli IPMUと世界トップレベル研究拠点大学や研究機関の有望な若手研究者の長期にわたる人的交流を推進するものである。

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回程度の頻度で定常的に開催され、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実行する。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。新しい教員の採用、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、教員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。TODIASは2015年4月にUTIASと改名された。

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。

2015年の時点で事務部門職員数は41名で、そのうち31名がKavli IPMUで直接採用された研究支援職員、10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3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10名（シンポジウム担当1名、日本語教室教師1名、特別プロジェクト担当1名を含む）、予算管理係3名、契約係3名、神岡分室事務室4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。

41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およびカブリ財団と連携を取って、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。現在、米国で AAAS による EurekAlert!、欧州では AlphaGalileo、さらにアジアの ResearchSEA に記事を投稿している。

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2名いる。またアーティストが1名おり、研究者が論文発表や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）

UTIAS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（後にUTIASと改名）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、UTIAS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。2015年度にはUTIASは卓越した研究、教育活動を確実にを行うための5つのテニユアポストを得た（2016年度には9つになる予定）。

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ユア教員職
- ・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
- ・カブリ寄付金とネーミング

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、吉田教授は理学部と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。また羽澄教授は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、テニユア・トラックのHartz助教が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の教員に対して、より動き易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になるかもしれない。

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5-1]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。濱田前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（後にUTIAS）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2015年には、この構造の下でUTIAS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、5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9つの総長裁量ポストをKavli IPMUに提供している。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5-2]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”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-Keek 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5-3]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員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、教員はあらゆる機会にKavli IPM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4名の女性博士研究員と1名の学術支援職員（A. More、石垣、森谷、服部、岩下）および1名の大学院生（新倉）が在籍している。

Kavli IPMUのポスドク、A. Moreのケースでは、夫のS. MoreもKavli IPMUの教員として雇用された。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、女性の教員を増やす努力は、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キャンパス内の保育施設を含む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。さらにより若い理系女子学生が科学の道に進んでくれるように、宇宙線研究所とKavli IPMUは共同で女子中高生とその親を招き、女性研究者の研究や進路、経験について聞ける機会を設けている。

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っ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。UTIASは、2015年度に幸い卓越した研究、教育を保証するための5つ（2016年度には9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。

2014年、Kavli IPMUは浜松ホトニクス(株)の寄付研究部門「宇宙のダークサイド」を立上げ、野本が着任、浜松プロフェッサーの称号を得ている。

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。村山は国連本部におけるCERNの60周年記念イベントの折、「平和と発展のための科学」と題する講演を行った。Kavli IPMU創設の精神が国連ウェブテレビを通じて放映された。

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ブ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2015年）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229（209）編（括弧内に示す数字はレビューを含めない場合）、論文あたりの被引用数は26.9（20.4）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）などの同じ機関の数字に比べて遜色ないかあるいは上回るものである。

NSF長官のCordova博士が来訪し、基礎科学支援に関する忌憚ない意見交換を行った。また数学のバックグラウンドを持たないジャーナリストが数日間滞在し、数学者の普段の研究ぶりに触れる機会も作っている。そしてそのジャーナリストの書いた数学支援の記事が、新聞に掲載されている。その後、米国からのジャーナリストも同様に受け入れている。

画家も1ヶ月ほど滞在して研究者グループと親交を図り、研究会にも参加し、その間得られた刺激を元に作品を制作した作品はビジターの目にも触れるようになっている。

7. 平成 27 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27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。

【平成 27 年度フォローアップ】

日本における研究の進め方の改革を考えたとき、Kavli IPMU のインパクトは更に大きくできるであろう。ホスト機関のコミットメントはもっと積極的であるべきである。Kavli IPMU の活動が、東大全体、特に多くの研究所を改革する模範として用いられれば、国際的な知名度がより上がるであろう。

Kavli IPMU が東大の組織改革のモデルになるべきであるという指摘はその通りである。前総長のイニシアティブによりメリットベースの給与、ジョイント・アポイントメント、年俸制度、ポスト運用の柔軟性、バイリンガルスタッフによる支援強化などのシステム改革が始められ、現実のものとなった。とりわけ、これまでは東大内での他部局間とのジョイント・アポイントメントは UTIAS のみに限られていたが、今は全部局ができるようになった。五神総長のビジョンにはすでにその多くが取り入れられている。五神総長のイニシアティブのもと、研究融合の発展を目指す部局間連携研究機構（仮名）が始められている。東大理学部では世界中の大学から卓越した大学院生を惹きつけることで国際レベルの科学プロフェッショナルを育成するグローバルサイエンス大学院コース（GSGC）を立ち上げている。2年目にはさらに進めていく所存である。

巨大な先端実験へ参画するという Kavli IPMU の大望は申し分のないものであるが、必要とされる技術的支援は注意深く決定され、資金限度内に収められるべきである。技術分野の人々は、他の研究所へ異動することでより容易に利益を得る理論家よりも長期に Kavli IPMU のスタッフとして残すべきである。

多くの実験系教員はテニユアであり長期のプロジェクトを進めることができる。民間会社や他の研究所などと契約し技術者の雇用を実現している。

外国人主任研究者の人数を増やすべきである。主任研究者は研究所でより多くの時間を過ごすべきである。日本人ポスドクの数が少なすぎる(たったの 4 分の 1); また大学院生の数を増やすことが望ましい。

2014 をとってみれば、19 人の主任研究員 (PI) のうち、5 人は外国人で 6 人はオンサイトである。オフサイト PI のうち一人は年に 6 ヶ月オンサイトであり、他の外国人 PI も研究活動を活発にするため年に 2-4 回来日している。日本人のオフサイト PI も年 2-3 回来所している。2017 年には PI を 26 人にし、そのうち 8 人を外国人とし 10 人をオンサイトにする予定である。オンサイト PI の全 PI に占める割合は 32% から 38% に増える。ポスドクの応募者はそのほとんどが外国からであり、持っている質で選考していく。現在 WPI での雇用ポスドクは 28 人が外国人、16 人が日本人 (他の財源で別に 7 人の日本人がいる) という構成である。

これまで物理では 4 人の教員のみが、また数学でも 4 人が大学院生の指導ができるだけであった。それ以外の教員は別のプログラムで学生を探すことをしている。オックスフォード大学の学生を獲得する新しいプログラムを立ち上げて、3 人の学生がこの夏から来所し、来年夏には少なくともさらに 3 人の学生が来所する。新しいグローバルサイエンス大学院プログラム (GSGC) により今年の秋に中国から 1 人、学生が来る

将来的には柏キャンパスという地の利を生かし、Kavli IPMU は筑波大学や千葉大学を始めとする他の近在の研究所との共同研究を強化することができるであろう。これは、東大はもとより、さらに他の研究機関での改革を前進させるだろう。

研究対象が合致すれば他機関との共同研究を行っている。筑波大学とは数件の協力研究を行っている。Scott Carnahan は数学者であり IPMU のポスドクであったが、今筑波大学の連携研究員となっている。CREST で行っている統計に関する研究で筑波大学と共同研究を行っている。

【現地視察】

2016 年 3 月の PD と PO の現地視察の折、保立研究担当理事・副学長が東京大学のコミットについて次のように述べている。

- ・ Kavli IPMU の現在のアクティビティを維持し高めることを支援する
- ・ 9 つの教員総長裁量ポスト
- ・ 文科省から UTIAS につけた 5 つのテニユアポストを保証する (2016 年度には 9 ポスト)
- ・ 9 人の東大事務承継職員をつける
- ・ 施設使用料を免除する

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料1-1. 平成27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。
- ・昨年度拠点構想進捗状況報告書に名前の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(添付様式1-1(別紙))を添付すること。

		【平成27年度実績】						主任研究者 計19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> (52) (*)	東京大学・カブリ数物連携 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 (66) (*)	東京大学・カブリ数物連携 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 (60) (*)	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・参与 東京大学・理学系研究科・ 副学長	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。		

Alexey Bondal (54) (*)	東京大学・カブリ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	拠点に年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 (50) (*)	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 (57) (*)	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 (62) (*)	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	拠点に年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
川崎雅裕 (55) (*)	東京大学・宇宙線研究所・所長・教授	博士 素粒子宇宙論	40%	0%	40%	20%	8/1/2015	拠点に週2回滞在し参画。	
小林俊行 (53) (*)	東京大学・数理科学研究科・教授	博士 数学	70%	0%	8%	22%	6/1/2011	拠点に月1回滞在し参画。 TV会議（月1回）により参画。	

河野俊丈 (60) (*)	東京大学・数理科学研究科・教授	博士 数学	70%	0%	8%	22%	10/1/2007	拠点に週1回滞在し参画。 TV会議（週1回）により参画。	
中畑雅行 (56) (*)	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 (53) (*)	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	拠点に週2回滞在し参画。	
野本憲一 (69) (*)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授	博士 天文学	70%	0%	12%	18%	10/1/2007	拠点に常駐し専任教員として参画。	
大栗博司 (54) (*)	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 (71) (*)	東京大学・カブリ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 (55) (*)	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 (72) (*)	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 (54) (*)	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 (67) (*)	東京大学・カブリ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27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

平成27年度新規主任研究者個人票

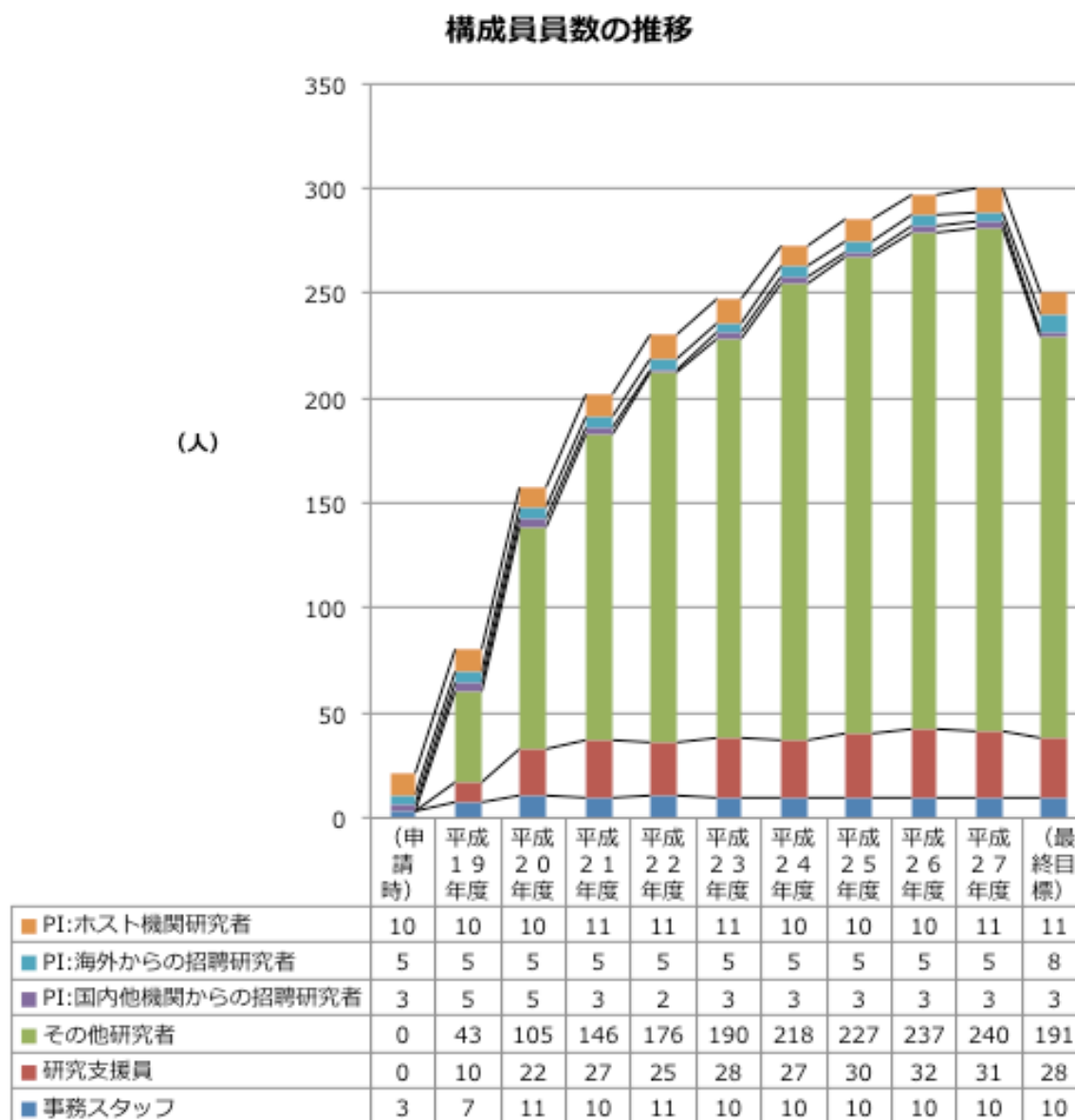
氏名 (年齢)	川崎雅裕 (55)
現在の所属機関・部局・職	東京大学・宇宙線研究所・教授
学位、現在の専門	博士(理学)、素粒子宇宙論
研究・教育歴 2004-現在: 教授、東京大学宇宙線研究所 1999-2004: 教授、東京大学初期宇宙研究所 (RESCEU) 1992-1999: 准教授、東京大学宇宙線研究所 1986-1992: 研究員、東北大学 1984-1988: 修士・博士課程学生、東京大学大学院理学系研究科物理学科 1979-1984: 大学生、東京大学物理学科	
これまでの研究の成果、アピールすべき点 (※ 世界トップレベルと考えられる研究者については、その理由を明記) 川崎雅裕教授は、初期宇宙の分野において世界をリードする研究者の一人である。彼は、宇宙論と素粒子物理学を結ぶ素粒子的宇宙論の研究を行っている。彼の研究分野は、素粒子物理モデルの宇宙論的制限、インフレーションモデル、バリオン生成、アクシオン宇宙モデル、宇宙論的な密度ゆらぎの生成に至る幅広い分野をカバーしている。	
研究活動実績 (1) 国際的影響力 a) 分野を代表する国際学会での招待講演・座長・理事・名誉会員、b) 有名レクチャーシップへの招待講演、c) 主要国アカデミー会員、d) 国際賞の受賞、e) 有力雑誌の編者の経験 等 賞: 湯川木村賞 (2014) 日本物理学会、特筆論文賞 (2015) 井上研究奨励賞 (1979) 会員: 日本物理学会	
(2) 大型の競争的資金の獲得 (過去5年の大型の競争的資金の獲得実績) 基盤研究C (2013年度-現在、PI): インフレーション宇宙における物質とその揺らぎの起源 基盤研究C (2010-2012年度、PI): 宇宙初期におけるスカラー場の進化の宇宙論的観測に基づく探求 新学術領域研究 (研究領域提案型) (2009-2014年度、co-PI): 宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査 基盤研究C (2010-2012年度、PI): 宇宙初期におけるスカラー場の進化の宇宙論的観測に基づく探求	
(3) 論文被引用 (主要な発表論文名、被引用の程度等) "Big-Bang nucleosynthesis and gravitino", Phys. Rev. D (2008), 被引用数317回 " Hadronic decay of late – decaying particles and Big-Bang Nucleosynthesis", Phys. Lett. (2005), 被引用数397回 "Big-Bang nucleosynthesis and hadronic decay of long-lived massive particles", Phys. Rev. D (2005), 被引用数607回 "Can modified gravity explain accelerated cosmic expansion?", Phys. Lett. B (2003), 被引用数466回 " Natural chaotic inflation in supergravity", Phys. Rev. Lett. (2000), 被引用数325回 " Gravitino production in the inflationary universe and the effects on big bang nucleosynthesis", Prog. Theor. Phys. (1995), 被引用数363回	

(4) その他 (当該研究者が世界トップレベルと判断するに足る実績 等)

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

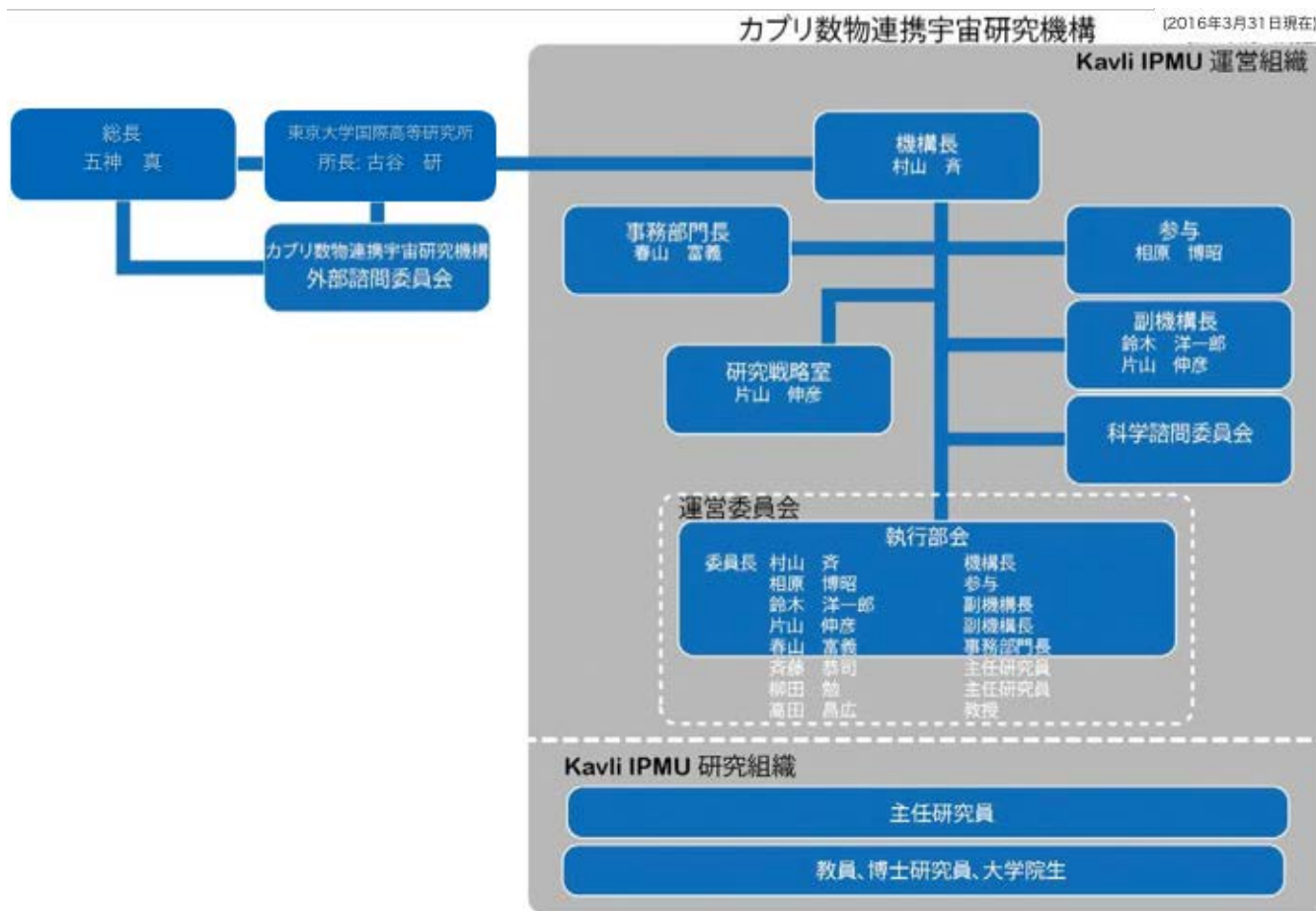
添付資料1-2. 構成員員数の推移

※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)

添付資料1-3. 運営組織図



世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

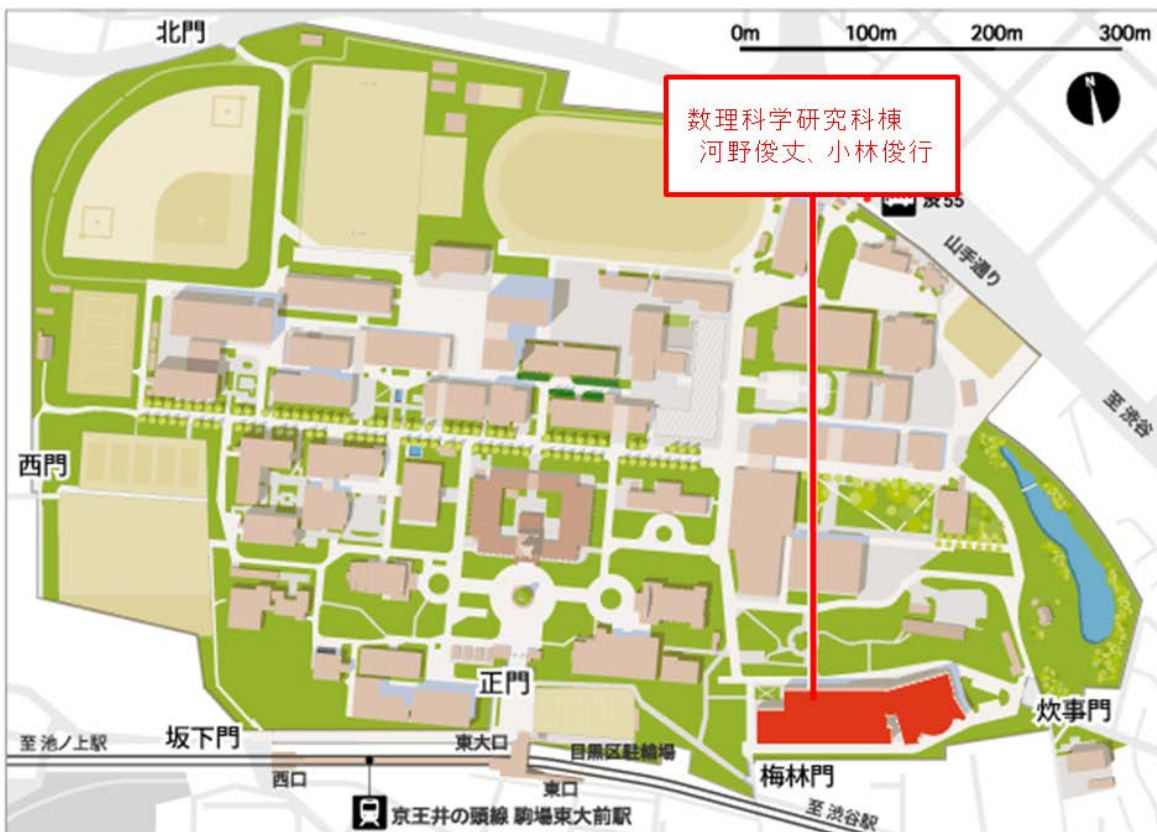
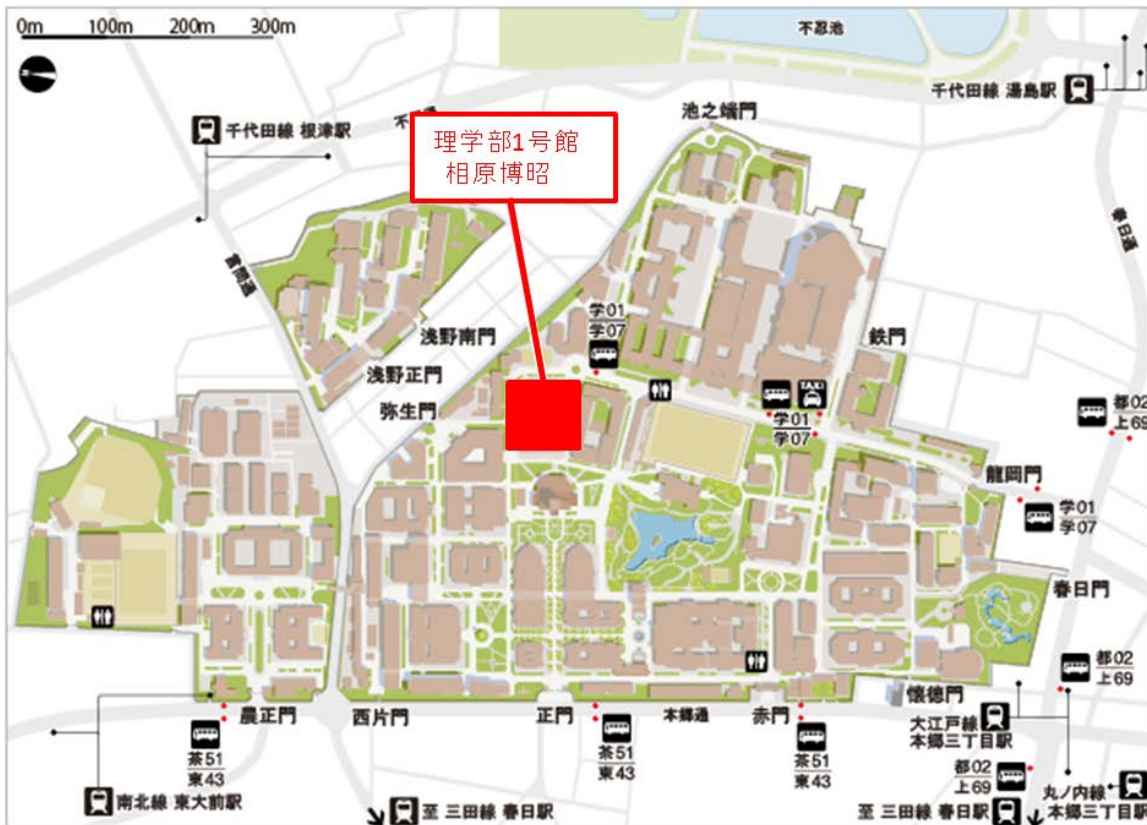
添付資料1-4. 拠点施設配置図

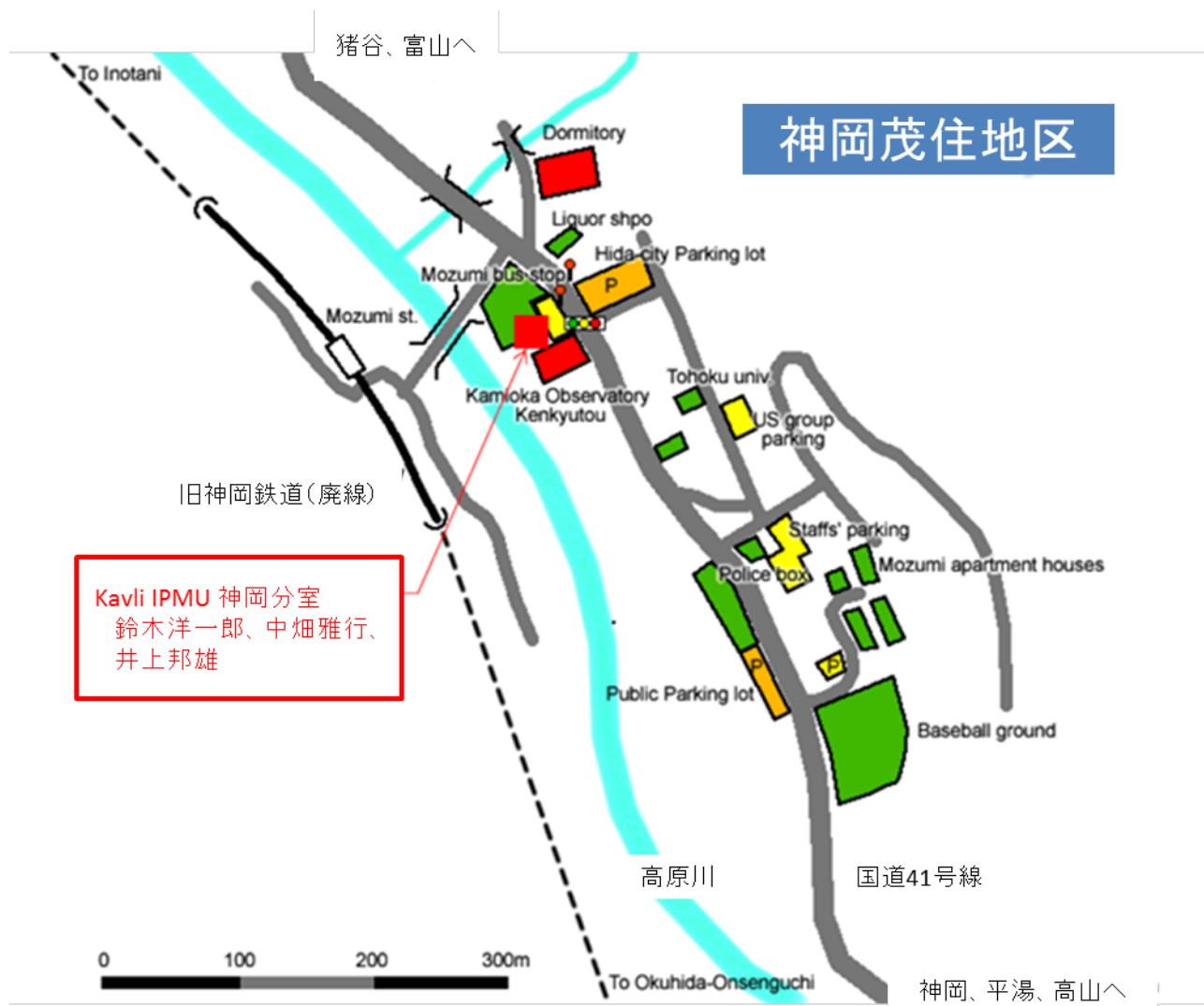


柏キャンパス



本郷キャンパス

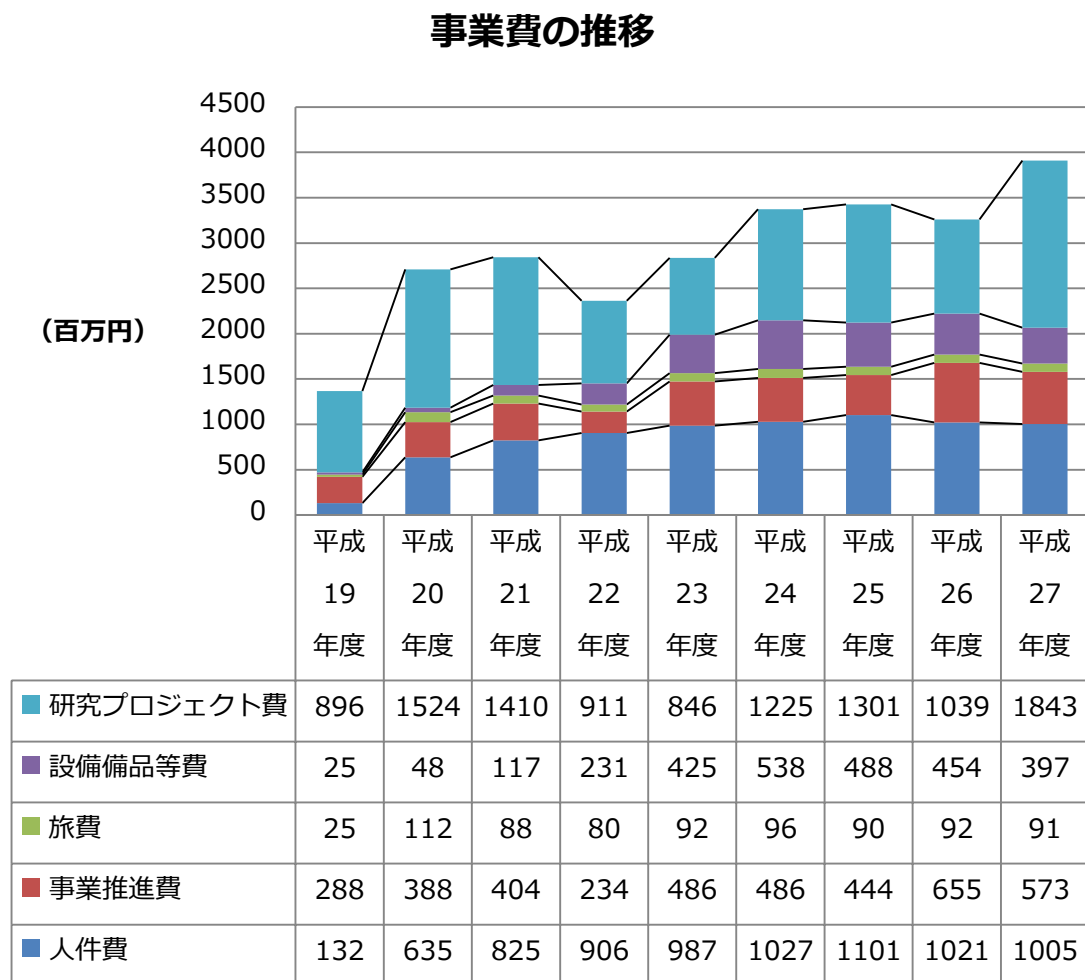




世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料1-5. 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。



世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料1-6. 平成27年度事業費

i) 拠点活動全体

(単位:円)

(単位:円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・拠点長、事務部門長	34,652,337
	・主任研究者 9人	85,324,169
	・その他研究者 124人	712,993,054
	・研究支援員 29人	93,456,558
	・事務職員 9人	79,081,696
	計	1,005,507,814
事業推進費	・招へい主任研究者等謝金 16人	24,392,459
	・人材派遣等経費 1人	588,667
	・スタートアップ経費 54人	25,822,889
	・サテライト運営経費 1ヶ所	24,200,000
	・国際シンポジウム経費 17回	1,712,835
	・施設等使用料	220,461,600
	・消耗品費	119,924,330
	・光熱水料	32,135,399
	・その他	123,949,952
	計	573,188,131
旅費	・国内旅費	8,659,131
	・外国旅費	46,922,311
	・招へい旅費 国内15人、外国176	30,434,629
	・赴任旅費 国内6人、外国11人	4,584,619
	計	90,600,690
設備備品等費	・建物等に係る減価償却費	339,513,326
	・設備備品に係る減価償却費	57,258,710
	計	396,772,036
研究プロジェクト費	・運営費交付金等による事業	1,243,009,671
	・受託研究等による事業	75,589,692
	・科学研究費補助金等による事業	524,953,987
	計	1,843,553,350
合 計		3,909,622,021

平成27年度WPI補助金額

#####

平成27年度施設整備額

0

平成27年度設備備品調達額

40,632,391

・ステンレス容器 1台	675,000
・ネットワークスイッチ 1台	2,073,600
・DELLサーバー 1台	510,300
・ターボポンプ 3台	4,105,080
・Heリークディテクタ 1台	2,216,160
・ワークステーション 1台	980,964
・デジタルオシロスコープ 3台	6,583,680
・パワーサプライモジュール 1台	753,840
・スマートファンユニット 1台	999,540
・電源クレーン 1台	1,058,400
・バイアス電源 1台	572,400
・VMEクレーン 1式	999,540
・ドライポンプ 1台	572,400
・ネットワークストレージ機器 1台	2,808,000
・デジタイザ 一式	1,620,000
・小型排気ユニット 1台	1,771,200
・ネットワークディスクレコーダー	1,620,000
・ラック型マウントサーバ 一式	992,946
・高速情報ネットワーク機器の増設	9,719,341

ii) サテライト等関連分

(単位: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 7人	
	・研究支援員 0人	
	・事務職員 0人	
	計	
事業推進費		129,750
旅費		170,501
設備備品等費		-
研究プロジェクト		-
合 計		24,200,000

東京大学

Kavli IPMU

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料1-7. 平成27年度WPI補助金支出

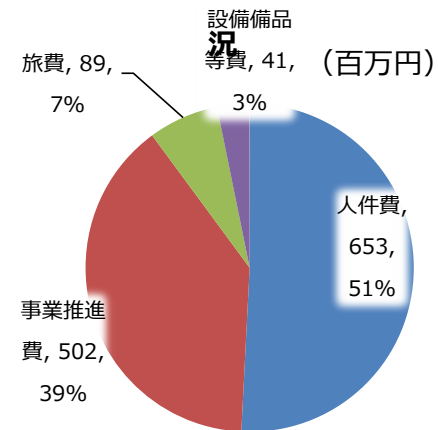
i) 総額

※Cost Itemsを色分けした円グラフを作成してください。

(単位：円)

経費区分	内訳	事業費額
人件費	・拠点長、事務部門長	34,652,337
	・主任研究者 (3人)	34,904,029
	・その他研究者 (71人)	412,037,965
	・研究支援員 (27人)	93,456,558
	・事務職員 (9人)	77,823,972
	計	652,874,861
事業推進費	・招へい主任研究者等謝金 (16人)	24,392,459
	・人材派遣等経費 (1人)	588,667
	・スタートアップ経費 (54人)	25,822,889
	・サテライト運営経費 (1ヶ所)	24,200,000
	・国際シンポジウム経費 (10回)	1,712,835
	・施設等使用料	220,461,600
	・消耗品費	65,266,256
	・光熱水料	25,609,872
	・その他	114,769,862
	計	502,824,440
旅費	・国内旅費	7,967,319
	・外国旅費	46,316,041
	・招へい旅費 (国内：15人) (外国：176人)	30,480,329
	・赴任旅費 (国内：6人) (外国：11人)	4,584,619
	計	89,348,308
設備備品等費	・設備備品調達額	40,632,391
	計	40,632,391
合計		#####

平成27年度WPI補助金の支出状況 (百万円)



ii) サテライト等関連分

(単位：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 (7人)	
	・研究支援員 (0人)	
	・事務職員 (0人)	
	計	23,899,749
事業推進費		129,750
旅費		170,501
設備備品等費		0
合計		24,200,000

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料2-1. 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 $z=3$ の非等方スケールリングにより、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、非等方スケール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、これまでになく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、「ラーゼ場」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とヒッグスボソンの理論

*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 $m_{3/2} = 10-100$ 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、本模型がダークマター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ダークマター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ダークマター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] : ダークマターの空間分布

*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、ダークエネルギー優勢宇宙での冷たいダークマターモデルに基づく 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。

*研究成果 [5] : ダークマターの検出

*5. K. Abe et al. (XMASS collaboration including K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Ogawa, H. Sekiya, Y. Suzuki, A. Takeda, M. Yamashita, B.S. Yang, X. Benda, J. Liu, K. Martens, Y. Takeuchi), "Direct dark matter search by annual modulation in XMASS-I", *to be published in Phys. Letts.*

地球の公転 (30km/s) がダークマターの観測量に 10% 程度の季節変動を引き起こす。DAMA/LIBRA グループは、長い間、季節変動を観測したと主張している。ただ、WIMPs ダークマター (原子核反跳) を仮定したときに許される parameter は、他の実験により否定されている。しかし、観測されている信号が電子/ガンマ線である可能性は残っている。したがって、この季節変動を原子核反跳と電子/ガンマ線の両方に感度のある実験で探索する事は重要である。解析に使ったデータは、2013年11月から2015年3月に収集されたものである。XMASS のエネルギー閾値は 1.1keVee で、DAMA の 2keVee より低い。図 1 は、ダークマターが何であるかを仮定していない結果である。若干の負の振幅 (位相が逆) がみられるが、2つの独立な解析による p-値はそれぞれ、0.068 と 0.014 であり有意ではない。しかし、XMASS の結果は DAMA の結果を否定している。WIMPs ダークマターを仮定すると、DAMA の許容領域ほぼすべてが排除される。

*6. K. Abe et al. (XMASS collaboration including K. Hiraide, Y. Kishimoto, K. Ichimura, K. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Ogawa, H. Sekiya, Y. Suzuki, A. Takeda, M. Yamashita, B.S. Yang, J. Liu, K. Martens, Y. Takeuchi), "Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Dark Matter Particles with the XMASS-I Detector", *Phys. Rev. Lett.* **113**, 121391 (2014).

冷たいダークマターの考えには、未だ問題が残っている。冷たいダークマターをいれて大規模構造を計算すると、銀河程度の大きさに不必要な塊ができてしまう。KeV から MeV 領域の軽いダークマターがこの問題を和らげることが認識されている。とくに、このエネルギー領域のベクトルスーパーWIMPs は、これまであまり探索されておらず良い候補として残っている。実験的には、このベクトルスーパーWIMPs は、質量に対応するエネルギーを測定器に落とすので、観測が容易である。信号を観測するには至らなかったが、40-120keV の質量範囲において、これまでの宇宙物理的考察による制限よりもより強い制限を与えた。これらの結果は、XMASS 実験が 3×10^{-4} kg/keV/kg という低バックグラウンドが実現できたことにより、初めて得られたものである。

*7. Y. Hochberg, E. Kuflik, H. Murayama, T. Volansky, J. G. Wacker, "Model for Thermal Relic Dark Matter of Strongly Interacting Massive Particles", *Physical Review Letters*, **115** (2015) 021301
DOI:10.1103/PhysRevLett.115.021301

ダークマターは強結合の隠れたセクターにおける3→2散乱の熱的残存粒子ではないか、という提案が最近なされている。著者らは、ダークマターのこのような振る舞いを許容する強結合のゲージ理論のクラスを本論文で具体的に示した。これらは、カイラル対称性をダイナミカルに破る量子色力学とよく似た理論であり、そのパイ中間子がダークマターの役割を果たす。ダークマターの残存量を決める3から2へ数に変化する過程は、ヴェス・ズミーノ・ウィッテン項から生じる。この理論は、3→2散乱の消滅率と2→2散乱の自己散乱率の間をはっきりと関係づけ、宇宙の構造形成の予測を変更する。これは、強く結合する重粒子(SIMP)機構の中で単純で計算可能な例になっている。

*研究成果 [6] : 宇宙の加速膨張

*8. T. Okumura, C. Hikage, T. Totani, et al. (including S. More, T. Nishimichi, N. Tamura, K. Yabe, N. Yoshida), "The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$ ", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press (2016)
DOI:10.1093/pasj/psw029

この論文では、FastSound サーベイによる赤方偏移空間での銀河クラスタリングの測定を行い、重力理論に新たな制限を与えている。FastSound は、すばる望遠鏡に搭載された多天体ファイバー分光器 FMOS を使った銀河分光サーベイであり、赤方偏移が 1.19 から 1.55 までの遠方宇宙では初めて宇宙論解析となる。著者らは、銀河の特異速度による赤方偏移空間でのクラスタリングの異方性「赤方偏移変形」を 4.2σ の有意性で検出した。赤方偏移変形は、宇宙論スケールで重力理論を検証する上で重要な観測量である。彼らの結果は、一般相対論に基づく重力理論の予想と 1σ の範囲内で矛盾が見られなかった。本研究は、赤方偏移が 1 を超える遠方宇宙でも一般相対論が成り立つことを初めて示すものである。

*研究成果 [7] : SuMIRe

*9. S. Miyazaki, M. Oguri et al. (including M. Tanaka, H. Aihara, H. Murayama, M. Takada) "Properties of weak lensing clusters detected on Hyper Suprime-Cam's 2.3 deg² field", *The Astrophysics Journal*, **807** (2015) 22 (14pp)
DOI:10.1088/0004-637X/807/1/22

この論文では、すばる望遠鏡に搭載された超広視野撮像カメラ「ハイパー・シュープリームカム」による重力レンズ観測によって検出した大質量銀河団の性質を調べている。ハイパー・シュープリームカムの初期の試運転期間中に観測した 2.3 平方度の重力レンズマップから、S/N が 4.5 を超えるピークを 8 つ検出した。また多色撮像データをもとに、多バンドの red sequence 法による銀河団検出法によって、可視光で銀河団を同定した。可視光で同定した銀河団の位置は、重力レンズマップのピークの位置と相関があることが分かった。

*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

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、ダーク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ダークマター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 [8] : 接続層の導来圏と数え上げ不変量

*11. Y. Toda, "Bogomolov-Gieseker type inequality and counting invariants", *Journal of Topology*, **6** (2013), no. 1, 217-250
DOI: 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年国際数学会議において招待講演を行った。

*12. 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次チェー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年以上追いつめていたものであった。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 [9] : Langlands対応と p 進コホモロジー論

*13. 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。

*14. 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 [10] : 原始形式とミラー対称性

*15. 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、摂動的にその原始型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^{\vee} 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。

*16. T. Milanov, "The phase factors in singularity theory", arXiv: 1502.07444, preprint

この論文では、著者は過去のB. Bakalovとの共同研究を一般化する際に必要だった技術的困難を乗り越えようとした。彼らは、単純特異点の周期を用いてある頂点代数の表現を提案した。それは、 W 代数の制約と可積分階層の両方の言葉で単純特異点に対するGivental's 再構成における分配関数を特徴付けることを可能にする。

*17. T. Milanov, "The Eynard-Orantin recursion for simple singularities", *Communications in Number Theory and Physics*, **9**, no. 4 (2015) 707-739

Eynard-Orantin漸化式はスペクトル曲線が互いに交わらない小さい円板の合併であるという意味で局所的な場合にのみ扱われていた。この論文では、著者は局所的なスペクトル曲線から実際のリーマン面の場合に一般化した。この結果は、Gromov-Witten理論をスペクトル曲線上の共形場理論とみなすことを可能にし、Gromov-Witten理論などを理解するのに物理学からのアイデアを使うことができるようになった。

*研究成果 [11] : 第二次多胞体と赤外代数

*18. M. Kapranov, M. Kontsevich, Y. Soibelman. "Algebra of the infrared and secondary polytopes", *Advances in Mathematics to appear* (2016), arXiv:1408.2673
DOI:10.1016/j.aim.2016.03.028

著者らはGaiotto, Moore, Wittenらが超対称二次元質量場に関する研究において導入した代数構造 (L_{∞} and A_{∞} -algebras) について研究した。著者らはそうした構造が第二次多胞体幾何 (特にその分解性質) を使うことによって何次元のものでも体系だって生成されることを示した。

*19. M. Kapranov, V. Schechtman. "Perverse sheaves on real hyperplane arrangements", *Annals of Mathematics*, **183** (2016), 619-679
DOI:10.4007/annals.2016.183.2.4

論文は実方程式により定まる複素超平面配置により与えられた滑らかなストラティフィケーションに対する偏屈層の分類を行っている。配置の実包体によりラベルされたベクトル空間等のダイアグラムによる記述が与えられている。

*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

*20. 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

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。

*21. H. Ooguri and M. Yamazaki, "Emergent Calabi-Yau Geometry", *Physical Review Letters*, **102** (2009) 161601
DOI: 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

*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 and M. Romo, "Exact Results In Two-Dimensional (2,2) Supersymmetric Gauge Theories With Boundary",
arXiv: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

*24. 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。

*25. A. Braun, T. Watari, "Distribution of Number of Generations in Flux Compactifications", *Physical Review D*, **90** (2014) 121901
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.121901>

IIB 型超弦理論でのフラックスのある真空解の分布の理論は、文献[X]においてF-理論用に再定式化された。その再定式化を用いることにより、クォークやレプトンの世代数は $O(1)$ の分散を持つガウス分布に従うことが分かった。対称性の破れていないゲージ群を持つ真空解の数は、指数関数的にスケールする。ランクが4のゲージ群をもつ真空解は、F-理論のフラックスのある真空解の集合の中で $e^{-0(1000)}$ 程度の小さな割合に過ぎないのかもしれない。

*研究成果 [16] : 物性物理学への応用

*26. 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)

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。

*27. 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ブ幾何学を使い、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。

*研究成果 [17] : ニュートリノの性質

*28. 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、EX0-200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 $0\nu\beta\beta$ の検出を97.5%の信頼度で否定する。

*29. 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、ダーク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

*30. K. Bundy et al., "Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory", *The Astrophysical Journal*, **798** (2015) 7
DOI:10.1088/0004-637X/798/1/7

本論文は、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)の第4期プロジェクトの一つである新しい分光サーベイ計画「MaNGA(アパッチ天文台近傍銀河地図作成)」を要約したものである。MaNGAは、2014年7月に始まり、10,000個の近傍銀河サンプルを使ってガスや星の内部運動学構造や組成を研究するものである。観測装置の詳細や主要な科学目標のためのサーベイデザインについてまとめられている。MaNGAのガスイオン化割合を探る性能を示すプロトタイプ観測についても紹介している。

*31. E. Cheung, K. Bundy et al. 2016, "Suppressing Star Formation in Quiescent Galaxies with Supermassive Black Hole Winds", *Nature*, in press (2016)

星形成がほとんどあるいは全く行われていない不活性銀河は、星質量 M_* が 2×10^{10} 太陽質量より重い銀河の大部分を占める。一度星形成が止まると、星の質量放出や合体によって降着してきたガスを排除あるいは加熱し、星形成が行われなくなるのだが、その原因ははっきりしていない。ブラックホールからのエネルギー放出が要因であると考えられているが、高温のガス殻が広がっている観測的証拠はこれまでほとんど見つかっていなかった。本論文の著者らは、イオン化されたガスの速度勾配とよくそろって左右対称に放出現象を発見した。これらは、低光度の活動銀河核をもつ典型的な不活性銀河における中心からの強い風が存在することを示すものである。これらの銀河は 2×10^{10} 太陽質量の星質量をもつ銀河の10%を占める、ごくありふれた銀河である。著者らは活動銀河核からのエネルギーによって、観測された放出現象が十分に説明でき、周囲の冷たいガスを温め、星形成を阻害するのに十分な運動学的エネルギーを持っていることを示した。

*32. 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

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(他の論文と同点で)引用数9番目にランクされた。

*33. 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

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。

*34. H. Miyatake, S. More, M. Takada et al., "Evidence of Halo Assembly Bias in Massive Clusters", *Physical Review Letters*, **116** (2015), 041301
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.041301

大スケールのハロークラスタリングが、ハロー質量以外にアセンブリヒストリー(ハローがこれまでどのような集積の歴史をたどったか)にまつわる副次的な物理量に依存することは理論的に予測されていたが、観測的な証拠を示すのは困難であった。本論文の著者らは、スローン・デジタル・スカイ・サーベイの銀河

団カタログを使い、銀河クラスタリングと弱重力レンズを組み合わせた新しい方法によって、初めてハローアセンブリーに起因するハローバイアスの観測的証拠を得た。本論文は、Physical Review Letter 誌の編集者が選ぶ、特筆すべき論文に選ばれ、多くのメディアによって報道された。

*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 $\Sigma_{\text{dust}} \sim 5 \times 10^{-6}$ 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. G. Folatelli, M. C. Bersten, O. G. Benvenuto, S. D. Van Dyk, H. Kuncarayakti, K. Maeda, T. Nozawa, K. Nomoto, M. Hamuy, R. M. Quimby, "A blue point source at the location of supernova 2011dh", *The Astrophysical Journal Letters*, **793** (2014), L22 (5pp)
DOI: [10.1088/2041-8205/793/2/L22](https://doi.org/10.1088/2041-8205/793/2/L22)

本論文では、M51にあるIIb型超新星2011dhの視野を、ハッブル宇宙望遠鏡の広視野カメラ3と近紫外フィルター（F225WとF336W）によって、爆発から1161日経った後に観測した結果を紹介している。星状の天体が両バンドで検出され、その明るさからF225W-F336Wが負、つまり青色をもつことが分かった。観測された天体は、現在はなくなった黄色い超巨星と対になる天体であるという相互作用する連星モデルの予想と合致する。著者らは、超新星が強い相互作用を受けている可能性は低いと考え、観測されたフラックスへの影響は小さいことを見積もった。分解できない光のエコーや全く関連のない天体を検出する可能性についても議論し、そうしたことが起こる可能性は低いと判断した。ダスト吸収の範囲を考慮して、著者らは連星系のパラメータを制限した。特に、新たに形成されたダストによる吸収が有意に大きくない場合には、連星の一方の星へ

の質量降着率が50%以下でなければならないことを示した。

*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

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、核破砕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、たとえば核破砕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砕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

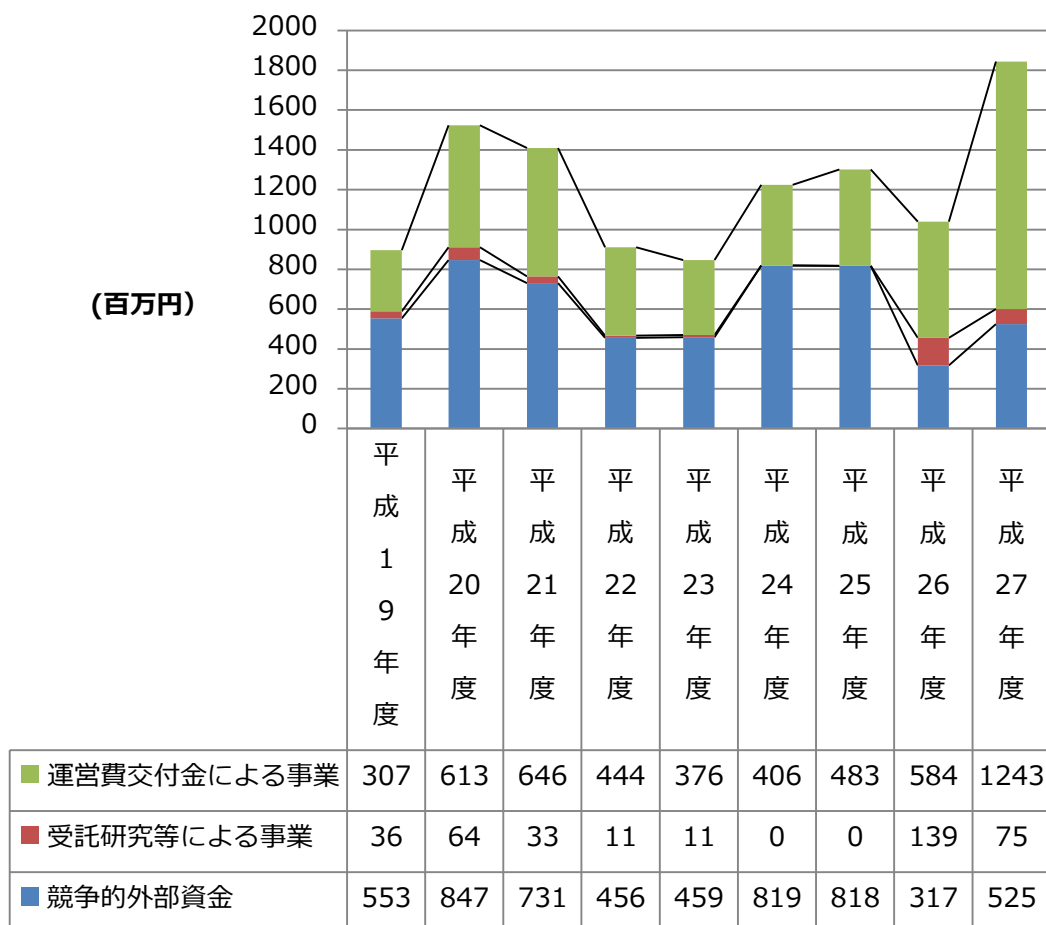
本論文は銀河系内の重力崩壊型超新星の距離と減光と等級の確率分布、衝撃波が表面に到達した時に発する放射、および爆発した大質量の親星のモデルを作った。銀河系内に次に出現する超新星は、非常に高い確率(~100%)で、近赤外で容易に見出されるであろうということと、2MASSサーベイによりその親星の近赤外測光のデータが既に得られている可能性が非常に高い(~92%)ことを見出した。ほとんど(~98%)の重力崩壊型超新星は、可視光でも容易に観測されるであろう。ニュートリノ検出実験は、早期に(超新星の) およその位置(~3 deg)を情報提供する。その利点について、銀河系内の重力崩壊型超新星からのニュートリノ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。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料2-2. 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。

研究プロジェクト費獲得実績の推移



[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)
- ・科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業「広域撮像探査観測のビッグデータ分析による統計計算宇宙物理学」(204百万円)
- ・科学研究費・新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか? -徹底的究明と将来への挑戦-」(1,106百万円)

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料2-3. 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) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2015年, 立川 裕二
- 2) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2015年, 梶田 隆章, 鈴木 洋一郎とSuper K コラボレーション (Chang Kee Jung, Christopher Walter, Edward Kearns, Henry Sobel, 小川 洋, James Stone, 亀田 純, Kai Martens, Kate Scholberg, 小林 兼好, 中村 健蔵, 奥村 公宏, 井上 邦雄, 三浦 真, Mark Vagins, 塩澤 真人, 古賀 真之, 中畑 雅行, Michael Smy, 森山 茂栄, 中山 祥英, 中家 剛, 竹内 康雄, 大林 由尚, 早戸 良成, 小汐 由介を含む)
- 3) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2015年, 西川公一郎とK2K/T2Kコラボレーション(竹田 敦, Bruce Berger, Chang Jung, Christophe Bronner, Christopher Walter, Edward Kearns, Henry Sobel, 田中 秀和, 相原 博昭, 関谷 洋之, James Stone, 亀田 純, Kai Martens, Kate Scholberg, 平出 克樹, 中村 健蔵, 奥村 公宏, 阿部 航, 三浦 真, Mark Hartz, Mark Vagins, 横山 将志, 塩澤 真人, 中畑 雅行, Michael Smy, 池田 一得, 木村 誠宏, Roger Wendell, 森山 茂栄, 中山 祥英, 春山 富義, 戸村 友宣, 中家 剛, 鈴木 洋一郎, 竹内 康雄, 大林 由尚, 早戸 良成, 小汐 由介を含む)
- 4) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2015年, 鈴木 厚人とKamLANDグループ (Alexandre Kozlov, Andreas Piepke, Bruce Berger, Brian Fujikawa, Glen Horton-Smith, 村山 斉, 小川 洋, Jason Detwiler, 井上 邦雄, 中村 健悟, Karsten Heeger, 古賀 真之, Patrick Decowski, 榎本 三四郎, Werner Tornow, Yuri Efremenko, 岸本 康宏を含む)
- 5) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2015年, Kam-Biu LukとDays Bayチーム (田中秀和, Karsten Heegerを含む)
- 6) 米国物理学会フェロー, 2015年, 小松 英一郎
- 7) 文化勲章, 2015年, 梶田隆章
- 8) ノーベル物理学賞, 2015年, 梶田隆章
- 9) マルセル・グロスマン賞, 2015年, 野本憲一
- 10) 戸塚洋二賞, 2015年, 小林 隆, 中家 剛, 塩澤 真人
- 11) 林忠四郎賞, 2015年, 小松 英一郎
- 12) 日本学術振興会賞, 2015年, 戸田 幸伸
- 13) 仁科記念賞, 2014年, 中家剛
- 14) 西宮湯川記念賞, 2014年, 立川 裕二
- 15) ニューホライズンズ物理学賞, 2015年, Horasio Casini, Marina Huerta, Shinsei Ryu, 高柳匡
- 16) 基礎物理学ブレークスルー賞, 2014年, Saul PerlmutterとSupernova Cosmology Project チーム31人 (Robert Quimby を含む)
- 17) 文化功労賞, 2014年, 佐藤 勝彦
- 18) ヘルマン・ワイル賞, 2014年, 立川 裕二
- 19) 紫綬褒章, 2014年, 小林 俊行
- 20) 数学会春季賞, 2014年, 戸田 幸伸
- 21) ユリウス・ヴェス賞, 2013年, 梶田 隆章
- 22) 日本数学会幾何学賞, 2013年, 河野 俊丈
- 23) ジュゼッペ・ヴァンナ・コッコニ賞, 2013年, 鈴木 洋一郎
- 24) アメリカ芸術科学アカデミー会員, 2013年, 村山 斉
- 25) ランスット M. バークレー賞, 2013年, 小松 英一郎
- 26) アメリカ数学会初代フェロー, 2013年, 大栗 博司
- 27) 仁科記念賞, 2012年, 井上 邦雄
- 28) 幾何学賞, 2012年, 戸田 幸伸
- 29) 米国グロバー賞, 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
- 30) サイモンズ研究賞, 2012年, 大栗 博司
- 31) 日本学士院賞, 2012年, 梶田 隆章
- 32) スローンリサーチフェロウシップ, 2012年, Brice Ménard
- 33) 日本数学会幾何学賞, 2011年, 齊藤 恭司
- 34) 日本数学会武部賞, 2011年, 阿部 知行
- 35) ブルーノ・コンテコルボ賞, 2011年, Serguey Petcov
- 36) ブルーノ・コンテコルボ賞, 2011年, 鈴木 洋一郎
- 37) 井上學術賞, 2011年, 小林 敏丈

- 38) パリ天体物理学研究所メダル、2010年、野本 憲一
- 39) ショウ賞、2010年、David Spergel、Charles L Bennett、Lyman A Page Jr
- 40) 日本学士院賞、2010年、佐藤 勝彦
- 41) ブルーノ・コンテコルボ賞、2010年、Henry Sobel
- 42) 井上 雅行、2009年、中畑 雅行
- 43) 仁科記念賞、2009年、大栗 博司
- 44) 湯川・朝永奨励賞、2009年、杉本 茂樹
- 45) フンボルト賞、2008年、大栗 博司
- 46) IUPAP 計算物理学若手科学者賞、2008年、小松 英一郎
- 47) IUPAP 計算物理学若手科学者賞、2008年、吉田 直紀
- 48) 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) 高田 昌広, "Halo bias", Cosmology and First Light, IAP, Paris, France, December 7-10, 2015
- 2) 大栗 博司, "Entanglement and Bootstrap", Eurostrings 2015, Dept of Applied Math and Theor. Phys. (DAMTP), Cambridge, UK, March 23-27, 2015
- 3) 村山 齊, "Power of Precision Higgs Measurements on Hierarchy Problem and Baryogenesis", HEFT2014 - Higgs Effective Field Theories, Instituto de Física Teórica (UAM-CSIC) in Madrid, September 28-30, 2014
- 4) 戸田 幸伸, "Derived category of coherent sheaves and counting invariants", Seoul ICM 2014 - International Congress of Mathematicians, August 13-21, 2014
- 5) 堀 健太郎, "1d Index and Wall Crossing", String-Math 2014, University of Alberta, Edmonton, Canada, June 9-13, 2014
- 6) 中畑 雅行, "Neutrino Physics", the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), July 2-9, 2013
- 7) 野尻 美保子, "Theoretical Results on Physics Beyond the Standard Model 30'", 2013 Lepton Photon Conference, June 24-29, 2013
- 8) 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
- 9) 杉本 茂樹, "Holographic QCD -Status and perspectives for the future-", Xth Quark Confinement and the Hadron Spectrum, October 8-12, 2012
- 10) 河野 敏丈, "Homological representations of braid groups and KZ connections", 6th European Congress of Mathematics, July 2-6, 2012
- 11) 向山 信治, "Modified Gravity", The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting, July 1-7 2012
- 12) 井上 邦雄, "Results from KamLAND-Zen", The 25th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2012), June 3-9, 2012
- 13) 齊藤 恭司, "On primitive forms and associated period maps", 2011 Geometry Prize, The Mathematical Society of Japan, March 28, 2012
- 14) 柳田 勉, "The Origin of Matter", HERTZ LECTURE (DESY Lecture on Physics 2011), September 2011
- 15) 高柳 匡, "Holographic Entanglement Entropy and its New Developments", Strings 2011, June 27-July 1, 2011
- 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

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料2-4. アウトリーチ活動一覧

※以下の表を用いて、平成19～27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	H19年度実績 (件数、回数)	H20年度実績 (件数、回数)	H21年度実績 (件数、回数)
広報誌・パンフレット	1	5	5
一般向け講演会・セミナー	0	4	10
小・中・高向けの授業・実験・実習	0	0	2
サイエンスカフェ	0	5	3
一般公開	0	1	2
イベント参加・出展	0	0	2
プレスリリース	4	9	17

種 別	H22年度実績 (件数、回数)	H23年度実績 (件数、回数)	H24年度実績 (件数、回数)
広報誌・パンフレット	6	6	7
一般向け講演会・セミナー	6	11	13
小・中・高向けの授業・実験・実習	1	8	7
サイエンスカフェ	0	4	3
一般公開	2	1	1
イベント参加・出展	1	2	3
プレスリリース	20	25	33

種 別	H25年度実績 (件数、回数)	H26年度実績 (件数、回数)	H27年度実績 (件数、回数)
広報誌・パンフレット	6	7	10
一般向け講演会・セミナー	12	8	10
小・中・高向けの授業・実験・実習	6	8	3
サイエンスカフェ	3	5	5
一般公開	1	1	1
イベント参加・出展	4	4	3
プレスリリース	33	31	16

平成19～平成27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19～27年度に報道された記事（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	2015.10.06	NEWS WEB (NHKウェブニュース)	「今までの標準理論越えた研究」*梶田主任研究員のノーベル物理学賞受賞について村山斉コメント
2	2015.8.25	日経サイエンス(雑誌):10月号	「WIMPではなくてSIMP」*村山斉 インタビュー 「暗黒物質を捉える」*鈴木洋一郎 インタビュー 「南部先生が成し遂げたこと」*大栗博司 寄稿
3	2015.7.02	NHK(テレビ)	コズミックフロント:「観測史上最古!超巨大ブラックホール 誕生の謎」 *吉田直紀とKavli IPMUが登場
4	2014.5.15	NHK(テレビ)	コズミックフロント:「超新星1987A」 *野本憲一とKavli IPMUが登場
5	2014.4.30	朝日新聞(電子版) 朝日新聞(新聞)	「『銀河にレンズ効果』超新星巡る日米論争、東大に軍配」(電子版) *ロバート・クインビー他の研究成果、4/25プレスリリース「明るすぎる超新星、手前に虫めがねがあった!～重力レンズを生み出す銀河をついに発見～」に関する記事
6	2014.3.27	毎日(新聞)	「原始重力波」って何? * POLARBEAR/LiteBIRDに言及
7	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
8	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
9	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
10	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
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	2012.5.10	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
13	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
14	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
15	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
16	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」
17	2010.4.20	毎日(新聞)	フロンティア 世界を変える研究者 村山斉さん 会話から画期的理論

18	2009.7	科学(雑紙: 岩波書店)	特集 宇宙はどんな「言葉」で書かれているか -IPMUの挑戦 *村山斉、杉山直、佐藤勝彦、井上邦雄、大栗博司、Alexey Bondal、Simeon Hellerman、高田昌広、Mark Vagins、野尻美保子、戸田幸伸
19	2009.1.26	ニュートン(雑紙): 3月号	ダークエネルギーは、銀河団の成長をさまたげる *協力: 高田昌広
20	2008.1.28	読売(新聞)	東大の宇宙研究機構長に就任した 村山斉さん 世界からトップの頭脳集める

2) 海外

番号	日時	媒体名 (新聞、雑誌、テレビ等)	内容概略
1	2015.5.27 -5.29	SPACE DAILY/Health Medicine Network/Press-News.org/Phys.org/e!Science, News/Nanotechnology Now/Before It's News/Science, Newsline/Scientific Computing (web)	※大栗博司とカリフォルニア工科大学マチルダ・マルコリ教授らの 5/27英語版プレスリリース「How Spacetime is built by Quantum Entanglement: New Insight into Unification of General Relativity and Quantum Mechanics」に関する記事
2	2014.4.25	BBCNews/PHYS.ORG/NATIONAL GEOGRAPHIC/New Scientist/新華網/Science Newsline (web)	※ロバート・クインビー特任研究者らの研究成果、4/25英語版プレスリリース「COSMIC ILLUSION REVEALED: GRAVITATIONAL LENS MAGNIFIES SUPERNOVA」に関する記事
3	2013.7.31 -8.3	CNET/BruDirect/Telegraph/SPACE.com/Gizmag/SEPA MAS/Pijama Surf (Mexico)/RIA (Russia)(web)	※HSCファーストライト画像公開についての 7/31の英語版リリース「A New View on the Origin of Dark Matter and Dark Energy - Image of M31 Heralds the Dawn of HSC -」に関する記事
4	2013.6.13-14	Pacific News/Newtalk/ Business Standard/ Economic Times/ Youth Daily News (台湾) (web)	岡部信広、高田昌広を含む 6/13英語版プレスリリース「Cosmic Giants Shed New Light on Dark Matter」に関する記事
5	2012.8.3	Hindustantimes(インド)/ red Orbit/mail Online/Phys.org (web)	田中雅臣を筆頭とする前田啓一と野本憲一らを含む 8/3の英語版プレスリリース「Clumpy Structure of Supernova Explosions -- A Subaru View of Supernova Explosion Mechanism --」
6	2012.2.9	Astrocast.tv/Nonotech-Now/New wise/spaceREF/Science Insider/ Nature News/ Phys.org/Physics World (web)	2/8の英語版プレスリリース「NEW KAVLI INSTITUTE ANNOUNCED AT THE UNIVERSITY OF TOKYO」に関する記事
7	2011.11.11	Space.com/Clarksville Online/ La Canada Flintridge Patch (web)	細川隆史(京大)、吉田直紀らの研究成果、11/11英語版プレスリリース「First Stars Heavy But Not Monstrous -Researchers recreate Universe's first star-」に関する記事
8	2010.5.20	ABC Science (web)	Spectrum reveals supernova surprise ※前田啓一と野本憲一らの5/20の英語版プレスリリース「An Unusual Supernova May Be a Missing Link in Stellar Evolution Research --Keiichi Maeda--」に関する記事
9	2009.11.09	Physics Today (web)	大栗博司の仁科記念賞受賞に関する記事
10	2008.6.28	KBS News (テレビ)	韓国で開かれたSUSY 09 会議において、村山機構長がCERNについて語る
11	2008.1.14	Fermilab Today (web)	特集: 村山斉がIPMUを創設

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料3. 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わ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. 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)

アメリカのPan-STARRSチームは赤方偏移1.39に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。毎日行われるティータイムでの議論で、R. M. Quimby (天文学者)、M. C. Werner (数学者)、大栗真宗 (物理学者)は、この超新星は超高輝度超新星ではなく、手前の銀河による重力レンズの増光で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に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見積もり、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、その解釈の正しいことを証明できると考えた。彼らはケック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外80件以上にわたる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

4. 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 \square' 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

5. Y. Toda, "Gepner type stability conditions on graded matrix factorizations", arXiv: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、堀健太郎に謝辞が述べられている。

6. 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ジ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 PF, G とし、その逆転級数の空間を $\Omega(PF, G)$ 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 $\pi: \Omega(\Gamma, G) \rightarrow \Omega(PF, G)$ 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

7. 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つた。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。

8. 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](https://doi.org/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、インスタントン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つて、彼らは論文の謝辞で感謝されている。

9. 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。

10. 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。

11. 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、つまり籐及びブレーン・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、各色は籐の頂点に対応する。また、原子間の結合は籐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。

12. Y. Oshima, M. Yamazaki, "Determinant Formula for Parabolic Verma Modules of Lie Superalgebras", preprint 1603.06705

山崎雅人が予想していたスーパーリー環の放物型 Verma 加群に対する行列式公式を証明する。我々の公式は、(スーパーでない)リー環の放物型 Verma 加群に対する Jantzen の結果、および、スーパーリー環の Verma 加群に対する Kac の結果両方の一般化になっている。得られた結果は高次元超対称共形場理論の研究へのさまざまな応用を持つことが期待される。また Verma 加群の既約性の判定条件についても述べる。

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

堀健太郎が発見した双対性(K. Hori, JHEP, 1310 (2013) 121)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、[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かったかが明らかでなく、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。

20. 情報理論の物理学への応用

20. [J. Lin](#), [M. Marcolli](#), [H. Ooguri](#), and [B. Stoica](#), "Locality of Gravitational Systems from Entanglement of Conformal Field Theories," *Physical Review Letters*, **114** (2015) 221601
DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.221601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.221601)

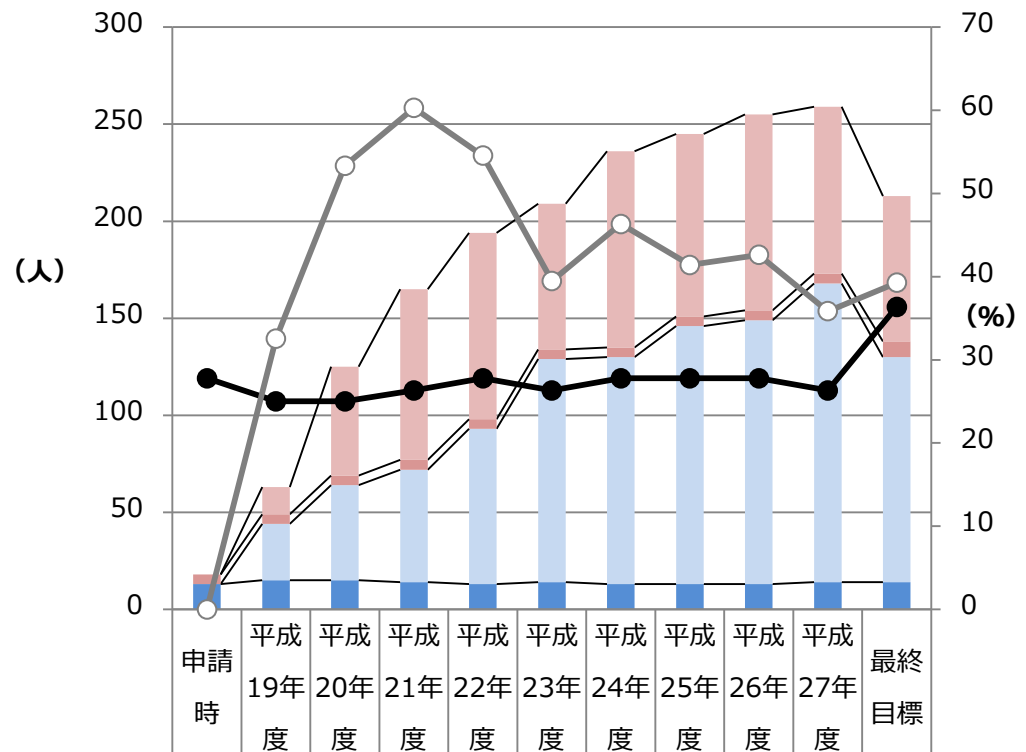
この論文では、大栗博司とその共同研究者は、エンタングルメント・エントロピーのホログラフィックな表現を与える笠-高柳公式から逆算して、それに対応する重力理論の時空間の境界近くでのストレス-エネルギー・テンソルを求めることができることを示した。また、相対エントロピーの正值性、単調性、凸性から、重力理論のエネルギー密度の正值条件が導かれることを示した。

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料4-1. 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。

外国人研究者比率とその年次推移



■ その他研究者：外国人	0	14	56	88	96	75	101	94	101	86	75
■ 外国人PI	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8
■ その他研究者：日本人	0	29	49	58	80	115	117	133	136	154	116
■ 日本人PI	13	15	15	14	13	14	13	13	13	14	14
● 外国人PI比率 (%)	27.8	25.0	25.0	26.3	27.8	26.3	27.8	27.8	27.8	26.3	36.4
○ その他外国人研究者比率 (%)	0.0	32.6	53.3	60.3	54.5	39.5	46.3	41.4	42.6	35.8	39.3

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料4-2. ポスドクの国際公募の実施と応募・採用状況

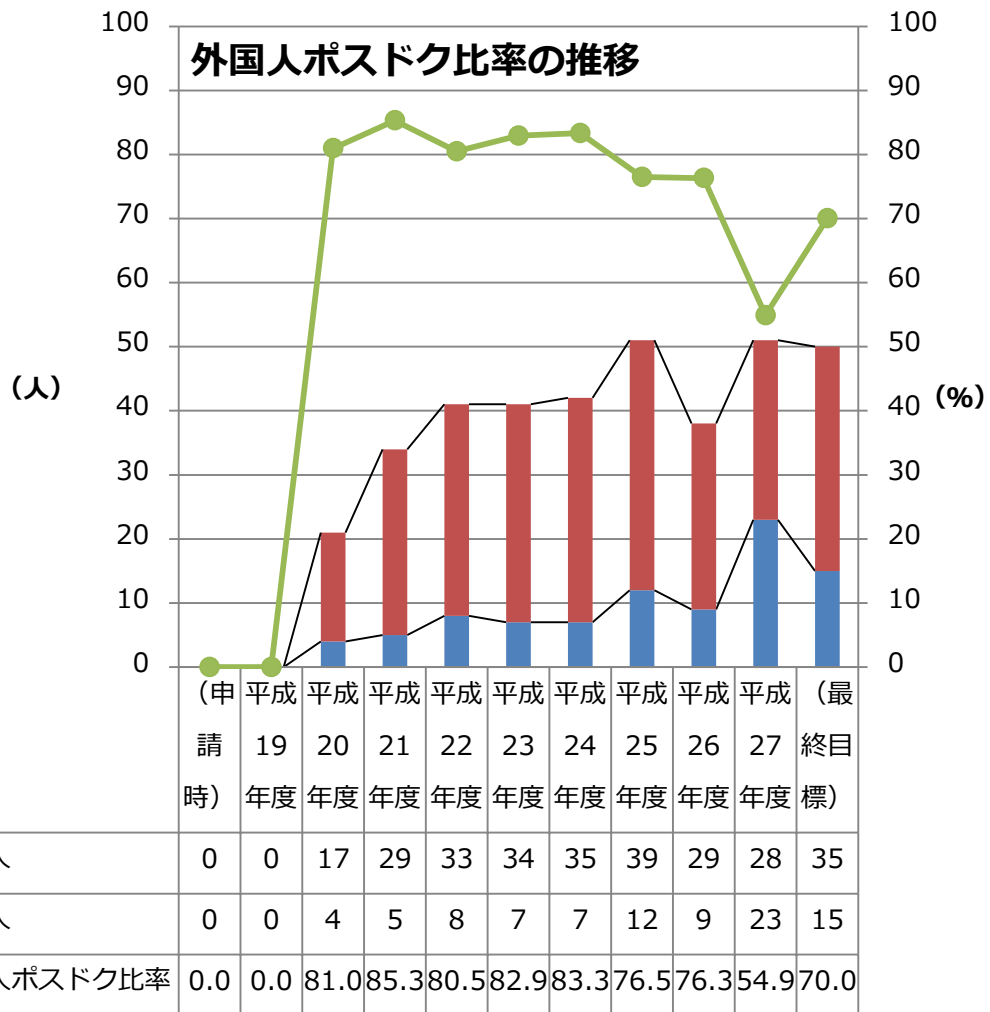
・応募人数、採用人数の欄の下段に<外国人研究者数,%>としてそれぞれ内数を記載すること。

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%>
平成26年度	747 <692, 93%>	11 <7, 64%>
平成27年度	610 <556, 91%>	21 <13, 62%>

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料4-3. 外国人ポスドク比率の推移

※申請時からの人数の推移を棒グラフで表すこと。



世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料4-4. ポスドクの国際的就職状況

・1名につき、1行で作成すること。記入欄が足りない場合は、適宜追加してもよい。

日本人ポスドク

拠点所属期間	前職機関・役職(所在国名)	就職先機関・役職(所在国名)
2015.7.1-2016.3.31	KEK, 博士研究員 (日本)	産業技術総合研究所, テニ ュアトラック研究員 (tenure track research scientist) (日本)
2014.4.1-2016.3.31	東北大学・博士課程 (日本)	大阪大学核物理研究センタ ー・助教 (日本)
2015.7.1-2016.3.31	東京大学 博士研究員 (日 本)	東京大学 数理科学研究科・ 博士研究員 (日本)
2015.9.1-2016.3.31	Caltech, Seiniior research fellow (USA)	立教大学, 准教授 (日本)
2013.4.1-2016.3.31	カリフォルニア大学 バークレ ー校・博士研究員 (アメリカ)	マックスプランク研究所(宇宙 物理)・博士研究員 (ドイツ)
2013.4.1-2015.4.30	カリフォルニア大学 バークレ ー校・博士研究員 (アメリカ)	KEK, 特任助教 (日本)
2013.9.1-2015.2.28	台湾中央研究院天文及天文 物理研究所, 博士研究院 (台湾)	広島大学・助教 (日本)
2013.4.1-2014.9.30	東京大学 理学系研究科・博 士課程 (日本)	イスラエル工科大学・博士研 究員 (日本)
2012.4.1-2014.10.31	東京大学 理学系研究科・博 士研究員 (日本)	東北大学・助教 (日本)
2010.9.1-2014.4.30	東北大学・博士研究員 (日 本)	名古屋大学・講師 (日本)
2010.5.1-2014.3.31	愛媛大学 宇宙進化研究セン ター・博士研究員(日本))	東京大学 宇宙線研究所・博 士研究員 (日本)
2008.9.1-2014.3.31	北海道大学, 博士研究員 (日本)	国立天文台, 助教 (日本)
2012.4.1-2014.2.28	東京大学 数理科学研究科・ 博士研究員(Project Researcher) (日本)	東京農工大学・講師 (Lecturer) (日本)
2013.4.1-2013.9.30	東京大学 理学系研究科・博 士課程 (日本)	株式会社ゴクロ・エンジニア (日本)
2013.4.1-2013.8.31	東京大学 数理科学研究科・ 博士課程 (日本)	プリンストン高等研究所・博 士研究員(postdoc) (アメリカ)
2011.9.1-2012.8.31	カリフォルニア工科大学・博 士研究員(Senior Research Fellow) (アメリカ)	カリフォルニア工科大学 Sherman Fairchild・博士研 究員(Senior Research Fellow) (アメリカ)
2010.8.16-2012.3.31	ペリメーター理論物理学研 究所・博士研究員(Postdoctoral Fellow) (カナダ)	京都大学 白眉センター・特定 准教授 (日本)

2010.5.1-2014.3.31	愛媛大学 宇宙進化研究センター・博士研究員 (Researcher) (日本)	東京大学 宇宙線研究所・協力研究員 (日本)
2010.4.1-2011.11.30	東京大学 Kavli IPMU, JSPS 特別研究員 (日本)	国立天文台・助教 (日本)
2010.1.1-2013.3.31	ヨーロッパ南天天文台・博士研究員(Fellow) (ドイツ)	国立天文台・特任助教 (日本)
2009.4.1-2012.3.31	東京大学 Kavli IPMU・博士研究員(Project Researcher) (日本)	大阪産業大学・博士研究員 (Fellow Researcher) (日本)
2009.4.1-2011.3.31	京都大学 理学研究科・博士課程 (日本)	京都大学 基礎物理学研究所・博士研究員(Postdoctoral Fellow) (日本)
2009.4.1-2010.3.31	東京大学 理学系研究科・博士課程 (日本)	マックスプランク物理学研究所・博士研究員(Project Researcher) (ドイツ)
2008.9.1-2014.3.31	北海道大学・学術研究員(日本)	国立天文台・助教 (日本)
2008.4.16-2009.3.6	東京大学 理学系研究科・学術研究支援員 (日本)	ミュンヘン工科大学・博士研究員(Visiting Scholar) (ドイツ)
2008.4.16-2008.10.31	京都大学 数理解析研究所・教務補佐員 (日本)	東京大学 Kavli IPMU・特任助教 (日本)
2008.4.1-2008.9.30	マギル大学・JSPS海外特別研究員 (カナダ)	ダラム大学・博士研究員 (Senior Research Associate) (イギリス)
2008.4.1-2009.9.30	東京大学 数理科学研究科・JSPS特別研究員 (日本)	神戸大学・助教 (日本)
2008.4.1-2008.6.30	高エネルギー加速器研究機構・博士研究員(Researcher) (日本)	東北大学・助教 (日本)
2008.2.1-2008.10.31	フランス高等科学研究所, JSPS海外特別研究員 (フランス)	九州大学, 特定有期教員(助教) (日本)

外国人ポスドク

拠点所属期間	前職機関・役職(所在国名)	就職先機関・役職(所在国名)	国籍
2014.4.16-2016.2.29	スタンフォード大学, 博士研究員 (アメリカ)	インスティテュート・オブ・フィジックス, ブバネーシュワル, リーダー (reader-faculty) (インド)	インド
2013.1.16-2016.1.15	デューク大学, 客員助教 (visiting assistant professor) (イギリス)	不明	アメリカ
2012.11.1-2015.11.30	イスラエル工科大学, 博士研究員 (イスラエル)	タタ基礎研究所, リーダー (reader) (インド)	インド
2012.11.1-2015.10.31	ドイツ電子シンクロトロン (DESY), 博士課程 (ドイツ)	マックスプランク研究所(原子核物理)・博士研究員(ドイツ)	ドイツ

2012.10.16-2015.10.15	カーネギーメロン大学・カタール, 博士研究員 (カタール)	メルボルン大学, DECRA フェロー (オーストラリア)	イタリア
2012.9.8-2015.9.30	クレタ大学, 博士課程 (ギリシャ)	ストーニーブルック大学, 博士研究員 (アメリカ)	ドイツ
2012.10.1-2015.9.30	ハリシュチャンドラ研究所・博士課程 (インド)	ピッツバーグ大学, 博士研究員 (アメリカ)	インド
2012.9.1-2015.9.20	カリフォルニア大学バークレー校, 博士課程 (アメリカ)	復旦大学, 博士研究員 (中国)	アメリカ
2013.9.16-2015.9.17	スタンフォード大学, 博士課程 (アメリカ)	カリフォルニア大学バークレー校, 博士研究員 (アメリカ)	アメリカ
2012.7.6-2015.9.15	カリフォルニア大学サンタバーバラ校, 博士課程 (アメリカ)	プリンストン高等研究所, 博士研究員 (アメリカ)	チリ
2012.9.1-2015.8.31	プリンストン大学, 博士研究員 (アメリカ)	Orbital Insight, データサイエンティスト (アメリカ)	アメリカ
2012.8.16-2015.8.15	ペンシルバニア大学, 博士課程 (アメリカ)	パシフィックノースウェスト研究所, 博士研究員 (アメリカ)	アメリカ
2014.3.16-2015.8.7	アリゾナ大学・博士研究員 (アメリカ)	チュラーロンコーン大学, 講師 (タイ)	タイ
2012.9.1-2015.5.31	プリンストン大学・博士課程 (アメリカ)	Element Analysis, データサイエンティスト (アメリカ)	アメリカ
2012.8.16-2015.5.15	イェール大学・博士課程 (アメリカ)	京都大学白眉センター特任助教 (日本)	カナダ
2011.10.1-2014.12.31	デューク大学, 客員助教 (visiting assistant professor) (イギリス)	京都大学基礎物理学研究所, 助教 (日本)	イギリス
2012.10.1-2014.9.30	カリフォルニア大学バークレー校, 博士課程 (アメリカ)	インペリアル・カレッジ・ロンドン, 博士研究員 (EPSRC postdoc research fellow) (イギリス)	アメリカ
2013.10.1-2014.9.30	欧州原子核研究機構(CERN), 博士研究員 (スイス)	浦項工科大学校 (POSTECH)・アジア太平洋理論物理センター(APCTP), 非常勤教授(Adjunct Professor) (韓国)	韓国
2010.10.1-2014.9.30	チリ大学, 博士研究員 (チリ)	科学技術研究委員会 (CONICET), 科学研究員 (scientific researcher) (アルゼンチン)	アルゼンチン
2010.10.1-2014.9.30	チリ大学, 博士課程 (チリ)	科学技術研究委員会 (CONICET), 科学研究員 (scientific researcher) (アルゼンチン)	アルゼンチン
2011.10.1-2014.9.30	カリフォルニア大学バークレー校, 博士課程 (アメリカ)	パリ数学財団, 博士研究員 (フランス)	ルーマニア

2011.9.16-2014.9.15	カリフォルニア大学サンタバーバラ校, 博士課程 (アメリカ)	マギル大学, 博士研究員 (アメリカ)	アメリカ
2011.9.16-2014.9.15	カリフォルニア大学サンタクルーズ校, 博士課程 (アメリカ)	ヴァンダービルト大学, 博士研究員 (アメリカ)	アメリカ
2011.9.1-2014.8.31	カリフォルニア工科大学, 博士研究員 (アメリカ)	サンディエゴ州立大学・助教/マウント・ラグナ天文台・所長 (アメリカ)	アメリカ
2011.9.1-2014.8.31	韓国高等科学院, リサーチフェロー(research fellow) (韓国)	韓国基礎科学研究院幾何・物理センター(POSTECH), IBS フェロー (韓国)	中国
2013.6.1-2014.8.31	ミシガン大学・博士課程 (アメリカ)	スタンフォード大学・博士研究員 (アメリカ)	中国
2011.9.1-2014.8.31	タタ基礎研究所, 博士研究員 (インド)	インド理工科大学院, 助教 (Assistant Professor) (インド)	インド
2011.9.1-2014.8.31	タタ基礎研究所, 博士研究員 (インド)	ダラム大学, 博士研究員 (イギリス)	インド
2009.10.1-2014.8.21	マックスプランク研究所(物理), 博士研究員 (ドイツ)	サウスダコタ大学, 助教 (Assistant Professor) (アメリカ)	中国
2011.8.1-2014.7.31	テキサスA&M大学, 博士課程 (アメリカ)	不明	中国
2009.11.2-2014.7.31	チューリッヒ工科大学, 博士課程(スイス)	ルートヴィヒ・マクシミリアン大学, 博士研究員 (ドイツ)	ドイツ
2011.5.1-2014.4.30 2014.5.16-2014.6.30	ポツダム大学, 博士課程 (ドイツ)	国立天文台, 研究サポートスタッフ (research support staff) (日本)	ドイツ
2012.9.1-2014.2.28	シカゴ大学・博士研究員 (Fellow) (アメリカ)	東京大学 Kavli IPMU・特任助教 (日本)	インド
2012.9.1-2013.10.31	マギル大学・博士研究員 (Postdoctoral Research Fellow) (カナダ)	ケンブリッジ大学 数理科学センター・博士研究員 (Fellow) (イギリス)	中国
2012.9.1-2012.11.15	シカゴ大学・博士研究員 (postdoctoral Scholar) (アメリカ)	東京大学 Kavli IPMU・JSPS 外国人特別研究員 (日本)	インド
2011.9.16-2013.1.31	ローレンスバークレー国立研究所・博士研究員 (Chamberlain Fellow) (アメリカ)	東京大学 Kavli IPMU・特任助教 (日本)	フランス & オーストラリア
2011.8.1-2012.7.31	香港中文大学・博士課程 (中国)	ハーバード大学・博士研究員 (BP fellow) (アメリカ)	中国
2011.7.1-2012.8.31	イリノイ大学・助教 (アメリカ)	ストーニーブルック大学・助教 (アメリカ)	ドイツ
2011.1.1-2011.7.15	フランス高等科学研究所・博士研究員 (Postdoctoral Fellow) (フランス)	香港中文大学・助教 (中国)	中国

2010.9.16-2013.9.30	ミネソタ大学・博士課程 (アメリカ)	ノッティンガム大学・博士研究員(Research Fellow) (イギリス)	トルコ
2010.9.1-2013.9.30	ボストン大学, 博士研究員 (Postdoctoral Fellow) (アメリカ)	オックスフォード大学, 博士研究員(postdoc) (イギリス)	カナダ
2010.9.1-2013.8.31	ハーバード大学・博士課程 (アメリカ)	カリフォルニア工科大学・博士研究員(post-doctoral Researcher) (アメリカ)	アメリカ
2010.9.1-2012.11.15	マサチューセッツ工科大学・博士研究員(C.L.E. Moore Instructor) (アメリカ)	筑波大学・助教 (日本)	アメリカ
2010.8.1-2012.12.31	南カリフォルニア大学・助教 (アメリカ)	ニューサウスウェールズ大学・講師(Lecturer) (オーストラリア)	ルーマニア
2010.7.1-2013.6.30	カリフォルニア大学 バークレー校・博士課程 (アメリカ)	防衛分析研究所・Research Staff Member (アメリカ)	アメリカ
2010.4.1-2012.8.31	マックスプランク物理学研究所・博士研究員(Postdoctoral Fellow) (ドイツ)	ウィーン工科大学・助教 (オーストリア)	オーストリア
2010.2.1-2011.8.14	ソウル国立大学・博士研究員 (Postdoctoral Fellow) (韓国)	フロリダ大学・博士研究員 (Postdoctoral Fellow) (アメリカ)	韓国
2009.10.1-2010.8.15	シカゴ大学・博士研究員 (Dickson Instructor) (アメリカ)	アイオワ州立大学 数学科・助教 (アメリカ)	インド
2009.9.16-2012.9.15	ミシガン大学・博士課程 (アメリカ)	ミネソタ大学・博士研究員 (Research Associate) (アメリカ)	アメリカ
2009.9.1-2012.8.31	カリフォルニア大学 サンディエゴ校・博士課程 (アメリカ)	コペンハーゲン大学 ニールス・ボーア研究所, (デンマーク) 職には就かず、アメリカに戻り、'VeriFyle社' 就職	アメリカ
2009.9.1-2012.8.31	欧州原子核研究機構・博士研究員(Fellow) (スイス)	中国科学技術大学 理論学際センター・教授 (中国)	中国
2009.9.1-2012.8.31	マックスプランク研究所数学研究所・博士研究員 (Scientist) (ドイツ)	フランス高等科学研究所・博士研究員(post-doctoral researcher) (フランス)	ロシア
2009.9.1-2010.8.31	南カリフォルニア大学・助教 (アメリカ)	不明	アメリカ
2009.9.1-2010.7.15	ハリシチャンドラ研究所・博士研究員(Visiting Fellow) (インド)	科学教育総合研究所・助教 (インド)	インド
2009.8.1-2010.9.30	ルートヴィヒ・マクシミリアン大学・博士課程 (ドイツ)	カリフォルニア大学 バークレー校・博士研究員(Simons postdoctoral fellow) (アメリカ)	ドイツ
2009.6.1-2012.8.31	ペンシルベニア大学・博士課程 (アメリカ)	マックスプランク天体物理学研究所・博士研究員 (Humboldt fellow) (ドイツ)	中国

2009.5.16-2010.1.18	カプタイン天文研究所, 博士課程 (オランダ)	トロント大学 カナダ理論天体物理学研究所, 博士研究員 (Postdoctoral-Fellow) (カナダ)	インド
2009.5.1-2012.4.30	ステクロフ数学研究所・博士課程 (ロシア)	モスクワ州立大学・博士研究員 (Researcher) (ロシア)	ロシア
2009.5.1-2010.3.31	トロント大学・博士課程 (アメリカ)	中国科学院 武漢数物研究所・博士研究員 (Associate Researcher) (中国)	中国
2009.4.16-2009.12.31	シカゴ大学・博士研究員 (postdoc) (アメリカ)	サンタフェ研究所・博士研究員 (Postdoctoral Researcher) (アメリカ)	アメリカ
2009.4.3-2010.9.30	エクス=マルセイユ大学マルセイユ素粒子物理学センター・博士研究員 (Researcher) (フランス)	バレンシア大学・博士研究員 (postdoc) (スペイン)	フランス
2008.11.1-2011.6.30	ロンドン大学・博士課程 (イギリス)	香港中文大学・博士研究員 (Postdoctoral Fellow) (中国)	中国
2008.11.1-2011.2.21	ソウル国立大学・博士研究員 (Research Fellow) (韓国)	全南国立大学・助教 (韓国)	韓国
2008.10.16-2011.10.15	東京工業大学・JSPS特別研究員 (日本)	民間企業 (日本)	イギリス
2008.10.16-2010.9.30	プリンストン大学・博士研究員 (Research Associate) (アメリカ)	台湾中央研究院 天文及天文物理研究所・博士研究員 (Assistant Research Fellow) (台湾)	台湾
2008.10.1-2011.9.30	アムステルダム大学・博士研究員 (postdoctoral researcher) (オランダ)	欧州原子核研究機構・博士研究員 (CERN Fellow) (スイス)	ドイツ
2008.10.1-2011.9.30	ヌーシャテル大学・博士研究員 (postdoc) (スイス)	欧州原子核研究機構・博士研究員 (CERN Fellow) (スイス)	イタリア
2008.10.1-2011.6.30	東京大学 数理科学研究科・JSPS特別研究員 (日本)	マギル大学・助教 (カナダ)	フランス
2008.9.19-2010.2.28	高エネルギー加速器研究機構・JSPS特別研究員 (日本)	マサチューセッツ総合病院・博士研究員 (staff) (アメリカ)	ドイツ
2008.9.1-2011.8.31	ウェイン州立大学・博士研究員 (postdoc Fellow) (アメリカ)	ルートヴィヒ・マクシミリアン大学・博士研究員 (Research Fellow) (ドイツ)	イタリア
2008.9.1-2011.8.31	シカゴ大学・博士課程 (アメリカ)	国際高等研究大学院大学 (SISSA)・博士研究員 (postdoc) (イタリア)	中国
2008.9.1-2011.5.31	ウィスコンシン大学・博士課程 (アメリカ)	浙江大学・教授 (中国)	中国
2008.9.1-2009.10.4	ニューヨーク州立大学, 博士課程 (アメリカ)	防衛分析研究所, 博士研究員 (Staff Research Member) (アメリカ)	アメリカ
2008.8.16-2011.8.15	ハーバード大学・博士課程 (アメリカ)	マックス・プランク重力物理学研究所・博士研究員	中国

		(postdoc) (ドイツ)	
2008.8.8-2010.12.15	ダラム大学・研究員 (Research Associate) (イギリス)	アリゾナ州立大学・助教 (アメリカ)	アメリカ
2008.5.1-2012.6.30	東北大学・COE研究員 (日本)	東京大学 Kavli IPMU・特任助教 (日本)	オーストラリア
2008.5.1-2011.8.14	ミシガン州立大学, 博士課程 (アメリカ)	アルゴンヌ国立研究所, 博士研究員(postdoc) (アメリカ)	台湾

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) 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ス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ろう。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。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料4-6. 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28年1月31-2月2日	2nd Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration Meeting, レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 68 国内: 42
平成27年12月10-16日	B mode from Space, レクチャーホール, Kavli IPMU	海外: 71 国内: 59
平成27年5月25-29日	International Workshop on Condensed Matter Physics & AdS/CFT, Kavli IPMU	海外: 41 国内: 80
平成26年11月17-21日	Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing, Kavli IPMU	海外: 48 国内: 18
平成26年11月10-14日	The 24 th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU	海外: 20 国内: 152
平成26年4月21-24日	Floer and Novikov homology, contract topology and related topics, Kavli IPMU	海外: 12 国内: 38
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）

添付資料5-1. ホスト機関による支援の実績

1. ホスト機関からのリソース供与

(1) 資金、人員

※ <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。

(平成19年～平成24年)						
<資金>						(百万円)
年 度	19	20	21	22	23	24
人件費	94	258	235	278	229	257
教員（研究職員）	68	150	160	201	229	257
うち専任	0	0	10	10	10	24
うち併任	68	150	150	191	219	233
ポスドク	0	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0	0
研究支援者	0	0	0	0	0	0
事務職員	26	108	75	77	0	0
事業推進費	3	18	113	7	23	8
旅費	1	1	2	6	1	1
設備備品等費	0	0	7	0	3	0
研究プロジェクト費	290	536	646	503	675	675
合計額	388	813	1,003	794	931	941
<人員>						(人)
年 度	19	20	21	22	23	24
人件費	16	38	42	52	44	48
教員（研究職員）	10	28	31	41	44	48
うち専任	0	0	1	1	1	3
うち併任	10	28	30	40	43	45
ポスドク	0	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0	0
研究支援者	0	0	0	0	0	0
事務職員	6(6)	10(10)	11(11)	11(11)	0	0

(平成25年～平成28年)					
<資金>					(百万円)
年 度	25	26	27	28	計
人件費	271	297	353	339	2,611
教員（研究職員）	271	296	352	339	2,323
うち専任	33	49	94	105	335
うち併任	238	247	258	234	1,988
ポストク	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0
研究支援者	0	1	1	0	2
事務職員	0	0	0	0	286
事業推進費	42	185	70	20	489
旅費	1	1	1	3	18
設備備品等費	0	0	9	0	19
研究プロジェクト費	560	584	1,084	799	6,352
合計額	874	1,067	1,517	1,161	9,489
<人員>					(人)
年 度	25	26	27	28	計
人件費	49	52	61	59	463
教員（研究職員）	49	52	59	59	421
うち専任	3	5	9	9	32
うち併任	46	47	50	50	389
ポストク	0	0	0	0	0
RA等	0	0	0	0	0
研究支援者	0	2	2	0	4
事務職員	0	0	0	0	38 (38)

(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。

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 (UTIAS) 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。

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に、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。

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、UTIAS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。

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。

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。

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料5-2. 「中期目標」・「中期計画」の抜粋

【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。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料5-3. 女性研究者数の推移

※平成22年度～平成27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	平成 26 年度	平成 27 年度	最終目標
研究者	10, 5%	4, 2%	12, 5%	12, 5%	15, 6%	11, 4%	5, 2%
	194	209	236	250	255	259	213
主任研究者	1, 6%	1, 5%	1, 6%	1, 6%	1, 6%	1, 5%	1, 5%
	18	19	18	18	18	19	22
その他の研 究者	9, 5%	3, 2%	11, 5%	11, 5%	14, 6%	10, 4%	4, 2%
	176	190	218	232	237	240	191

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) 延長期間進展計画

ホスト機関名	東京大学	ホスト機関長名	五神 真
拠点名	カブリ数物連携宇宙研究機構	拠点長名	村山 斉

※全体を6ページ以内で記載すること。

※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. これまでの成果に基づく中長期的な研究課題・戦略

延長期間中の研究課題・研究戦略におけるチャレンジについて記述すること。新たに設定する拠点の研究課題、あるいは拠点長の交代等の重要な変更事項があれば その戦略的背景についても記述すること。

当機構は5年延長期間に次あげる新しい目標への挑戦を提案する。

- (1) 統計学の新しい分野と手法を創出して、数学を観測および実験と融合させる。
- (2) 発足当時想像されなかったような分野間の新しい相乗効果を創り出す。
- (3) 導来幾何学および非可換幾何学を使って、例えば、様々な種類の双対性を統一するような、数学と物理学における幾何学的思考の新しい大きな枠組みを見出す。

初期の成功の上に立って次のようにこれらの目標を達成する。

- (4) プロジェクトを成功させて暗黒エネルギー、暗黒物質、インフレーションで世界と競争できる結果を出す。
- (5) 世界中から最も優秀で広い視野を持った科学者を惹きつけ、引き留める。

我々は最初の10年間で世界トップレベルの地位を確立したと確信しており、今後の展望も非常に明確である。数学、理論物理学、実験物理学、および天文学の学際的な相互触発に基づいて、常に新しい理論と新しいデータの創出に努めていきたい。暗黒エネルギーの特性、暗黒物質の分布と散乱断面積、インフレーションスケールに関して世界と競争できる成果を出していく。その結果を理解し、宇宙の新しい理論を構築する。我々はこれまでに、提案されたものおよび予想されなかったものの双方で、多くの学際的な相乗効果を創り出してきた(図1参照)。これまでに想像もしなかったような、例えば、新しいデータを介した天文学と超弦理論、統計学を介した実験と数学、物性物理学とのより一層の結びつき、など新しい相乗効果を創り出していく。当初の拠点構想で掲げた基本原則は固持してゆく。そこに掲げた5つの疑問は十分に広汎にわたるので、日々起こる研究目標の急激な変化もこれらの疑問を逸脱することはない。

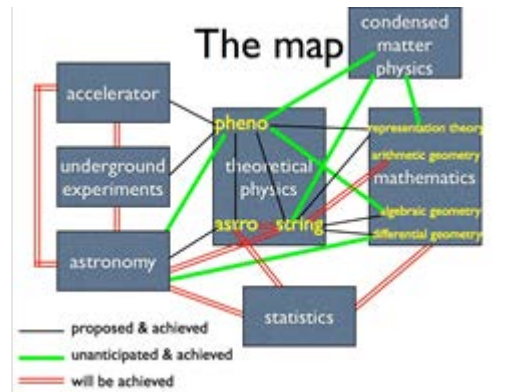


図1 Kavli IPMUにおける3種類の相乗効果：提案され達成済；予想しなかったが達成済；延長期間中に達成予定

わずか1世紀前、我々が宇宙をどのように考えていたか、今や想像することも難しい。我々の銀河の外に多くの銀河があることを知らなかった。アインシュタインですら宇宙は始まりのない静的なものだと信じていた。我々の太陽系の外に惑星は知られていなかった。原子は見えないと思われていた。我々を作っている原子以外の物質についてまともには考えることはばかげたことのように思えた。物理法則は確率的であるよりは決定論的であった。宇宙のエネルギー成分を表す有名な円グラフができたのはわずか10年前である。我々の宇宙に関する理解は爆発的な成長を遂げた。次の数10年にはより一層の驚きと感動があるだろう。我々はこの進展を主導していきたい。

長い間、数学と物理学は別々の道をたどってきた。1970年代に、有名な理論物理学者フリーマン・ダイソンは「過去数百年にわたって非常にうまくいっていた数学と物理学の結婚は最近になって離婚で終わってしまった」と嘆いた。しかし、すでにKavli IPMUではお互いの触発からそれぞれの研究が推進するように数学者と物理学者を1箇所に集めている。これは簡単ではなかったが、すでに非常に良い結果を生んでいる。

当機構発足からの10年間に、我々の分野にはいくつかの重要な突破口があった。ヒッグズボソンが発見されて「宇宙はどうやって始まったのか？」に答えるべく、ビッグバンから10億分の1秒後以前の宇宙を定量的に考察できるようになった。ニュートリノ間の新しい混合角が発見されて「宇宙はどうして我々がいるのか？」に答えるべく、ビッグバンの後にどのように反物質が消滅したかを実験で検証できるようになった。当機構の主任研究員である梶田隆章は2015年にノーベル物理学賞を受賞した。ゴーン・バオ・チャウによって証明されたラングランズ・プログラムの基本補題

は、物理学の可積分系に触発され、代数幾何を使って定式化されたヒッチンのファイバー構造を用いた。これは「宇宙の基本法則は何か？」に答えるために我々が選択した幾何学的手法と物理学との繋がりが正しいことを示している。これらの進捗があったことから、我々は次の突破口に備えて再調整を行っている。

学んだこともある。数学者、理論物理学者、実験物理学者、天文学者全員にすべての研究発表に出席するように強制するのは生産的ではない。時々レベルの高い講演を聴くことは大いに役に立つが、日常の研究活動を進めるためにはもっと専門化された研究手法に関する話を聞くべきである。理論研究は「考える時間」を必要とする。ティータイムの活発な議論や、集中した議論で新しいアイデアを思いつくワークショップと、論文を読んで問題をじっくり考えてまとめ上げていく静かな時間との健全なバランスを保つ必要がある。大型実験や天体観測などのプロジェクトにはマンパワーが必要で、装置を製作したり、得られたデータから意味のある結果を引き出したりする専門的技術のバランスのとれた分布が必要である。小さなサブフィールドにさえ異なる文化がある。それにもかかわらず、Kavli IPMUの初期段階ではそれらサブフィールド間の交流が新しい方向性と新しい分野を生み出せることが証明された。最初の提案では数学者は駒場に滞在するとしてもかかわらず、数学者と物理学者を同居させることができたことは決定的に重要であった。

これらの事を考慮して、以下に掲げる目標に挑んで世界トップレベル拠点から世界をリードする拠点へと成長していきたい。

(1) 統計学

我々のプロジェクトで予想されるデータの量と種類は我々の能力を超えるので、このままでは意味のある解析結果を出せない。数学の一分野である統計学が、Kavli IPMUの異なる分野を結ぶ新たな座標軸をもたらしてくれる。同時に、我々の大規模なデータセットを利用することは統計学者が実際のデータを使うことで自分たちのアイデアを検証し、理論を改良する助けとなるであろう。つまり両者にとって利益のある関係である。初期段階の調査からは、我々が世界レベルの統計学者を教員として呼ぶことはできそうに思えなかった。代わりに東京にある統計数理研究所 (ISM) の統計学者との共同研究が実現した。プリンストン大学とマルセイユ天文物理研究所のソフトウェアチームやISMその他の機関の統計学者と密接に協力して、我々の目標を達成するため新しい統計手法や統計学の新しい分野を開発する。

(2) 新しい相乗効果

我々は当初提案したとおりの相乗効果の創出に成功したが、加えて予想もしなかった学問分野間の相乗効果を見出したことは驚きであった。幾何学と天文学の間の直接的な繋がりは想像しなかった。また、物性物理学と超弦理論や現象論や表現論の間には密接な繋がりがあることを明らかにした。相互に結ばれたサブフィールド間の網の目をより一層拡充していく。今後さらにどのような相乗効果が生まれるか予言はできないが、次のような期待はできる。

加速器、地下実験、天文学、現象論: XMASSが暗黒物質の信号を発見して地下実験と加速器実験の間に新しい相乗効果を生むかもしれない。LHC実験の世界的リーダーの一人であるキムを主任研究員に加えて、当機構の現象論研究との繋がりを強化する。これにSuMIReも含めると天文学との間に3方向の繋がりができる。つまり、地下実験カムランド-禅と加速器実験T2Kがニュートリノの性質に制限を与え、それによってバリオン非対称の新理論に辿り着き、その予言がSuMIReの天文観測で検証されるかもしれない。ガドリニウムをスーパーカミオカンデに加えることにより、延長期間の終わるまでに数10億年昔の超新星から放出されたニュートリノを発見して、天文学と地下実験の新しい相乗効果を創出する。

天文学、超弦理論: SuMIReとLiteBIRDが量子重力理論を探り、天文学と超弦理論の間に新たな相乗効果をもたらす。

(3) 数学と物理学の新しい枠組み

我々の目標の一つは物理学者と数学者が用いる言語の融合に貢献する研究拠点を創ることである。Yale大学からKapranovを採用したが、彼は導来幾何学及び非可換幾何学を支える洞察力に富んだ指導者である。この採用が成功したことは、すでに、「 p 進Hodge理論」の非常に深淵な基本的結果に対する簡単な証明を得たことで証明された。さらに、彼は超対称場の量子論と数論における高次元局所体の研究との類似性を見出す上で先駆的役割を果たした。この分野は、Beilinson、Drinfeld、Kapustin、Wittenも幾何学的Langlandsプログラムの中で指摘しているように、今や世界中で競って研究される分野に成長しつつある。我々は彼の専門分野の圏論的側面が、代数幾何から数論幾何や他の数学分野への架け橋を構築することを期待している。主任研究員のBondal、Kapranov、戸田と教員の阿部、Milanov、斎藤がKavli IPMUの物理学者と協力して強力なグループを構成する。我々は、数論と超弦理論の幾何の間に存在すると期待される深淵な結びつきを解明するための根源的な圏論的背景を発見する、ユニークな立ち位置にいる。

以上の目標を達成するために、我々はこれまでの成功に改良を加えてゆくことが必要である。

(4) 計画の遂行

Kavli IPMUにより産み出され主導されるSuMIReとLiteBIRDの新計画からは、それぞれ、暗黒工

エネルギーと宇宙の運命、インフレーションと宇宙の始まりに関する世界と競争できるデータが生まれるに違いない。XMASS実験は装置の改造を終え、低バックグラウンドデータを取ろうとしており、またXMASS1.5への規模拡大を計画している。カムランド-禅も残留バックグラウンド問題を解決してニュートリノ質量の逆階層構造に感度のある有効質量領域に達しようとしている。スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶解することにより、過去の超新星爆発からの残存ニュートリノを発見するであろう。これらすべてが、5年延長期間の終わりまでに世界と競争できるデータを出すと期待される。従って5年延長期間の研究目標の1つであるが重要な側面は、これまでに計画されてきたプロジェクトを遂行して成功に導くことである。

機構の発足当初はできるだけ早くデータにアクセスする必要があったため、いくつかの進行中のプロジェクトに参加したが、同時にすばる望遠鏡のハイパー・シュプリーム・カム (HSC) を設計して製作した。この最初の計画を成功させた後、我々はSuMIRe計画 (HSCと主焦点超広視野多天体分光器PFS) に集中しつつある。天文学者と素粒子現象論研究者が共に働く当機構の学際的構成のおかげで、PFSをうまく始めることに成功した。SuMIReは撮像 (HSC) と分光 (PFS) の両方のサーベイを最大級の望遠鏡で実施する世界でもユニークなプロジェクトである。暗黒エネルギーのパラメータを1%以下の精度で測定する。その結果、加速膨張が収束に向かうのか、あるいは宇宙は限られた寿命を持つのかを知るようになるかもしれない。また、構造形成の研究のための暗黒物質の詳細な3次元マップを創り出す。

一方、宇宙はその全体が原子の大きさよりずっと小さかった時の宇宙のインフレーションで始まったと考えられており、その時の量子揺らぎから原始重力波が発生したはずである。我々はこの報告の前から既にLiteBIRD衛星に向けて作業を始めていた。この提案は日本学術会議の大型研究計画マスタープランに取り上げられ、また、文科省が取り纏めたりストで最上級に選ばれた。LiteBIRDは「(インフレーション中のインフラトン場の変化量が大きい) ラージ場模型」と呼ばれる広汎にわたるクラスの中の模型であれば、どれを使っても宇宙のインフレーションの直接的証拠を発見するであろう。SuMIReとLiteBIRDはそれぞれ異なる方法で量子重力理論の解明を目指し、天文学と超弦理論の架け橋になる。

(5) 卓越したメンバー

これまでに述べてきたことを考慮すると、我々が集めたサブフィールド、手法、専門性は次の10年間に向けての適切な分布であるように見える。したがって、最優先課題は我々が現在扱っている研究分野の分布を基にして、世界中から最も優れた人材を惹きつけ留め置くことである。歴史が示すように、我々の分野は驚くべき発見があるたびに新しい方向へと進化していく。例えば、超対称性、暗黒エネルギー状態方程式のrunning、暗黒物質の信号、宇宙のインフレーションの証拠、量子重力の新理論、あるいは数学における画期的進展のような大発見に出会うかもしれない。したがって、広い視野と柔軟性を持ち、かつ深い専門性を持った人材を必要とする。人材が鍵であり、卓越した人材なくして我々は活躍できない。

当機構の教員や博士研究員が頻繁に他機関から誘われるのは名誉なことであるが、これ自体大きな課題を我々に投げかけている。これまで8名の教員が昇格して他機関に移り、さらに2名も他機関に移った。一方で外部からのオファーに対抗して、戸田、高田、阿部、Bundy、Leauthaud、Moreの現職教員6名の引き留めに成功した。また、新しくできた東京大学内のスプリット・アポイントメント制度を利用して吉田を呼び戻し、また立川を当機構の教授として呼び戻した。現在、Yale大学からKapranovを採用したように、他機関の教員に誘いをかけている。全体でこれまでに47名の専任教員を雇用してきたが、ベストな人材を惹きつけて留めておくための戦いは今後も続く。今後、長期的展望が開けるにつれて、より多数の卓越した候補を惹きつけることができると確信する。新しくできたスプリット・アポイントメント制度により我々の機会は更に増大するが、一方、KEKやNAOJのような機関でこのような制度が可能となるように働きかけている。カップルを雇用する戦略も成功することが分かった。小さい研究機関では二人共に雇用することが難しいからであろう。加えて次のセクションで述べるような新たな独創的アイデアもある。

今後も一層努力して機構全体の研究を調和のとれたものとしていく。柏キャンパスのメンバー全員を神岡実験施設に集めて行う内部ワークショップ開催を計画している。全体会議を行なうことにより、機構のメンバーそれぞれが他のメンバーが興味を持つ研究課題について知るようになる。毎日のティータイムはすべての分野のメンバーが交流する垣根 (るつぼ) としての機能を果たし続けていく。Kavli IPMUにおけるこれまでの強力な頭脳循環を維持していく。

2. 研究組織運営

2-1. 上記で示した研究戦略・計画を実行するための研究組織運営について記述すること。

- ・ 進展・持続を確保するためのPI構成について[添付様式1]に記載すること。
- ・ 拠点の組織運営図を[添付様式2]に記載すること。

現在の運営体制は、採用や引き留め、あるいは研究活動を促進するための適時なワークショップ開催やビジター招へいに関して迅速な決定を可能とする。これは日本の大学で通常行なわれる全

体的な意思決定過程とは異なる。世界をリードする研究機関との競争力を維持するためにはこの迅速な決定ができる柔軟性を保持しなければならない。今ではテニユア職が増えつつあるので、教員が長期にわたる研究方針の議論に関わっていく機会が増えるであろう。それによって機構の次世代を担う若手メンバーの間に機構への「当事者意識」が広まるであろう。5年の延長期間は執行部単独による運営モードから主任研究員と教員が機構の将来形成に積極的に関わるモードへの移行期間と位置づけられる。ただし、この基本的な考え方の範囲内で主任研究員と教員の義務を最小限に留めて、執行部が最終決定を下す権限を維持する。これまでも博士研究員と新しい教員の採用決定には教員全員が関わってきたことに留意されたい。日常の運営判断はトップダウンで効果的に行なう一方、研究活動に関する案件ではボトムアップの計画を吸い上げる。当機構の組織は内部に「部門」を持たないフラットのままとし、執行部は常に教員一人一人からの新しい提案に門戸を開いている。

主任研究員の布陣を改造して若返らせ、専任メンバーの比率を増やす。新たに、堀、Martens、松本、森山、高田、戸田、Vagins、吉田、を加えて、再度、中核的研究プログラムを強調する。LHC実験のリーダーの一人であるKimを加えて実験と理論の緊密な協力関係を作り、小松を加えてLiteBIRDのような新計画を立ち上げる。野村はパークレーサテライトで活動して、東大とパークレーの研究上の結びつきを強める。Kapranovは既に述べたように数学研究に新しい局面を加える。

2-2. システム改革を先導する取組・計画

国立大学改革プラン・独立行政法人改革等に関する基本的な方針等への対応、ホスト機関全体を先導する取組の計画及び波及効果・貢献について記述すること(他機関を先導する取組の計画および波及効果・貢献等があれば記述すること)。さらに次世代研究者育成・確保の取組み(例えばテニユア・トラック制の導入等)、継続的な実行・検証(PDCA)システム等組織運営の進化を促すシステムへの取組みについても記述すること。

組織改革に関して次の課題に取り組む。

- (6) これまでに成功した組織改革を学内の他部局や外部の他研究機関に広めて、グローバルな尺度での日本の総合的競争力増強を支援する。
- (7) 活発な交換学生制度をもつ新しい国際的大学院プログラムの創設に真剣に取り組む。オックスフォード大学から学生を受け入れる新しいプログラムによって、3名の学生が今夏に当機構に派遣され、来夏にはさらに3名の学生が派遣される予定である。また東京大学大学院理学系研究科の新たな国際卓越大学院コース(GSGC)によって、今秋、中国から一人学生を受け入れる。
- (8) 研究者と高校教員のためのワークショップを企画して、若い生徒たちへのアウトリーチ活動を行う力を増強する。そして
- (9) 研究目標をWPI補助期間終了後も持続できるように、組織の十分な安定性を獲得する。

国立大学改革プランは「日本の大学は教育研究の厳しいグローバル競争にいかにして勝ち抜くか」と問いかけている。大学の教育研究のグローバル競争に於いて、各大学の強み・特色を最大限に生かすために、文科省は「第3期中期計画で目指す国立大学の在り方」および「今後の国立大学の機能強化に向けての考え方」の中で次のような方策が推奨されると明確に指摘した。

- (a) 人材・システムのグローバル化による世界トップレベルの拠点形成の推進
- (b) 人事・給与システムの改革
- (c) 優秀な若手研究者の育成と外国人研究者の活躍の場の拡大
- (d) イノベーション創出のための教育・研究環境整備

Kavli IPMUはここで推奨されているシステム改革に熱心に取り組んできた。いくつかの例を挙げる。

- ・ 研究に専念する環境の確立 (a, c, d)
- ・ 国外の研究機関とのスプリット・アポイントメント (b)
- ・ 能力と実績に基づく給与システム (b, c)
- ・ 雇用制度のグローバル基準 (a, b, c, d)

若手研究者の育成には特別の配慮をしている。年間最低でも1ヶ月(最大で3ヶ月まで)不在にして国外に行くことを義務付けているが、この方針は、若手研究者に国際舞台での十分な活躍の機会を与えることと、彼らが次の職を獲得する上で非常にうまく機能している。加えて、多くのワークショップ開催とビジターの来訪によって、世界中からやってくる一流研究者と我々のメンバーとの出会いや交流が確保される。典型的なアメリカの大学にいるよりも、ここKavli IPMUにいる方が簡単に自分の研究分野の重要人物たちに会える、と多くのアメリカ人博士研究員は言っている。このような努力が、研究者のほぼ半数が日本以外の国籍を持つという国際的分布を達成する上で鍵となっている。年間およそ800名のビジター研究者の約半数は海外から訪れる。年間約700名の応募者が18名程度の博士研究員職の公募で競っている。

次世代の研究者の育成と確保で重要な一つの側面として、助教職をテニユアトラックとすることを意図している。若手教員にはテニユア職に就くまでは義務を最小限にとどめて、評価の主要な判断基準である研究活動に専念してもらおう。助教は最初5年間雇用され、評価によって(1)5年で終わる、(2)さらに3年間延長する、(3)准教授に昇格してテニユアになる、のいずれかに決定される。ただし、この方針はテニユア職の数が足りないために十分に実現できていない。現在、大学と文科

省から幾つかのポストが与えられたので、これを実行に移していきたい。

新しい手法は成功している。TRIUMFとKavli IPMUの間の協定により、助教は最初の5年間テニュアトラックとして両方の機関で働くことができる。5年後に彼/彼女はテニュア職につく機関をいづれかに選ぶことができる。この魅力ある取り決めによって、我々は非常に優秀な応募者を惹きつけた。Hartzがこの新しいポストに選ばれ、我々は米国フェルミ国立研究所からのWilson Fellow職のオファーと競争して彼を獲得できた。彼は75%の時間をKavli IPMUで、残りをTRIUMFで研究活動を始めた。このモデルを拡充していく。

(6) 組織改革の波及

制度と組織の改革におけるKavli IPMUの成功は機構内だけに閉じ込めておくべきではない。能力と実績に基づく給与基準、スプリット・アポイントメント、複数の財源による混合給与での雇用、「年俸」制など、既に我々が達成したことは、東京大学はもとより、日本の国立大学改革のモデルとして文科省の「国立大学改革プラン」でも取り上げられている。我々はこれらの改革を、日本における研究の総合的競争力を高めるため、組織に浸透させる伝道者の役割を演じる。我々は、国立天文台 (NAOJ) やKEKなど日本の他機関との間で協力し、カリフォルニア大学バークレー校の村山やSteklov研究所のBondalのように、国外機関との間で成功したスプリット・アポイントメントを付与することに成功した。

(7) 新しい大学院プログラムの創設

我々は世界的な研究拠点では大学院生と共に研究することは必須であると信じている。我々の教員の一部が東京大学の既存の研究科に所属して正式に学生を指導できたことは極めて運の良きことであった。しかし、まだ全員そうだった訳ではなく、また現在の東京大学の制度では助教は学生を指導できない。我々は現在のプログラムに加えて、東京大学内外の研究科との学生の交換留学を通して大学院生のための新しいプログラムを構築したいと思っている。予備的な調査では独立研究科の創設も不可能とは見えない。延長期間中に当機構はさらに恒久的組織になっていくはずであることから、特に海外からの学生のために、新しい大学院プログラムの設立に向けて本格的取り組みを行うことを提案する。それによって国内外の共同研究機関との学生の交換留学を活発化する。2015年にはオックスフォード大学の大学院生と連携する新たなプログラムを推進した。また我々は、世界中の大学から優秀な学生を引き寄せるために、東京大学大学院理学系研究科の新たな国際卓越大学院コース (GSGC) にも加わっている。

(8) 若い学生・生徒

若い学生・生徒に対するアウトリーチは、国の将来のために優れた頭脳を科学、技術、工学、数学に惹きつけて次世代の研究者を確保する上で極めて重要である。これらの分野と距離を置こうとする最近の学生の傾向は弱まってきているとはいえ、これらの分野を専攻する割合はまだ警戒が必要なほど低い。これまでのところ我々のアウトリーチ活動は非常に人気があり成功しているが、若い学生に最大限のインパクトを与えるため、もっと系統的に企画する必要がある。Kavli IPMUにおける新規採用のおかげで、我々はこの分野の活動にこれまで以上に注意を向けることができる。明らかに、当機構の研究者にこれ以上の負担をかけないでインパクトを強める唯一の方法は実行部隊を広げることである。すでにStony Brook大学のAlan Aldaコミュニケーション科学センターと連絡をとり、研究者を訓練するための科学コミュニケーションワークショップ開催を検討している。教師を通して高校生にアウトリーチ活動を行うために、アメリカのQuarkNetと呼ばれる運動を手本にした高校教師のためのワークショップ開催を科学技術振興機構 (JST) に提案する予定である。

(9) 安定性と持続可能性

我々が関与する分野のほとんどのプロジェクトは、最低でも10年という長い準備期間を必要とすることは強調しておかなければならない。従って、延長期間中は現在立ち上げているプロジェクトを活発に遂行していく一方、延長期間後に起こる可能性に備えて計画および準備を始める必要がある。このような2段階構えの戦略を保持して、常に長期研究計画を検討していかなければならない。

目標を実現するためには機構の組織に安定性をもたす必要がある。WPIプログラムの時限付き補助金で始まったため、この組織は常に不安定のままできた。今では東京大学総長の強力な関与と東京大学国際高等研究所 (UTIAS, 前称TODIAS) の新しい組織構成、加えてカブリ財団による基金からの収益のおかげで、当機構は徐々に安定してきている。それでも2017年までに十分な安定性が得られると想像することは難しい。持続可能な運営形態を達成できるように時間を稼ぐため、5年間の延長は決定的に重要である。

WPIプログラム委員会の毎年の評価に加えて、東京大学は引き続き総長と研究担当副学長に報告する外部諮問委員会により毎年我々の評価を行う。我々は大学事務局と緊密な関係を保っていく。定期的に執行部会および運営委員会 (Steering Committee) を開催することにより、機構執行部は好機を逃さぬように、また問題を長引かせぬように迅速に対処することができる。

3. ホスト機関における位置付け及びリソース措置

以下の点についての今後の取り組みを記述すること。

3-1. ホスト機関の中長期的展望における拠点の位置付け

ホスト機関長のリーダーシップの下、当該拠点がホスト機関全体の今後の戦略においてどのような位置付けをされているか記述すること。

- ・ 今後の拠点のホスト機関における組織的位置付けが分かる図及び中長期的な計画等の抜粋、あるいはこれらの検討状況等について[添付様式3]に記載すること。

東京大学はKavli IPMUがすでに野心的なWPIプログラムのもとで「世界トップレベルの地位」を獲得したと認識している。大学はKavli IPMUを学内のフラッグシップとなる研究拠点と位置付けてきた。そしてその活動を恒久的に支援していく。2013年のWPIプログラム委員会の席上で濱田前総長は、「Kavli IPMUは我々にとって宝である」との所見を述べた。その内容は現五神総長に引き継がれている。Kavli IPMUは数理科学研究科と理学系研究科、宇宙線研究所、素粒子物理国際研究センターなど東京大学内の既存組織やNAOJ、KEK、JAXA、RIKENなどの研究機関の間の共同研究における中心拠点の役割を果たしていく。

2011年1月に東京大学はTODIAS（後のUTIAS）を設立し、Kavli IPMUをこの新しい恒久的組織の最初のメンバー機構として認定した。TODIASは全学的組織として設立され、世界を担う知の拠点たるにふさわしいことが証明された国際的研究機構から構成されて、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ものである。この改革は東京大学だけでなく、同様の計画を持っている全国の他研究機関にもインパクトを与えるものである。

五神総長は東京大学ビジョンの2020の中で、基本概念が卓越性と多様性であると述べている。

3-2. 世界トップレベル研究拠点たる活動の進展・持続についてのホスト機関の措置の実行計画（ポジション、財源等の措置）

- ・ ホスト機関によるポストの配分計画（研究部門及び支援部門）を含め、当該拠点に関する資金計画について[添付様式4]に記入すること。

Kavli IPMUにとって、中核をなす教員のために22のテニュア職を持ちクリティカルマスを保持することが決定的に重要であると東京大学は認めている。さらに、世界を「リードする」トップレベルの地位を持続するために必要な運営資金は、少なくとも現在WPIプログラムから得ている資金と同レベルであるということも理解している。これらの数値はいわゆる高等研究所を健全に運営していく上で極めて標準的である。大学は9つのテニュア職を総長裁量ポストとしてKavli IPMUに与えている。すでに教員の中核メンバーのために活用されている。加えて、UTIASは文科省へ活動を増強させるための予算要求を行ない、2015年に5つのテニュアポストを得た。東京大学はKavli IPMUをフラッグシップとして持続させていくために次年度もこの要求を最優先で行なう。東京大学は5年延長期間終了後も、一部の事務スタッフの給与、研究棟借料の半分の免除、追加運営資金などの支援をしていく。

最近、カブリ財団は当機構への基金を7億5000万円から12億5000万円（1ドル=100円換算）に増やす決定をした。これはKavli IPMUの注目度の高さと、当機構を持続させようとする東京大学の努力の結果である。東京大学はKavli IPMUの名声を高めてこの基金を一層増やすために延長期間中も各種の努力を続けていく。

世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)

添付資料1. 主任研究者リスト (進展計画用)

- ・主任研究者が10名を超える場合は、その数に応じて作成。
- ・「世界トップレベル」と考えられる研究者については、その氏名の右側に「*」印を付す。
- ・年齢は、2017年4月1日時点とする。
- ・進展計画開始時点で、当該構想に参加できないものについては、備考の欄に、参加予定時期を明記す。

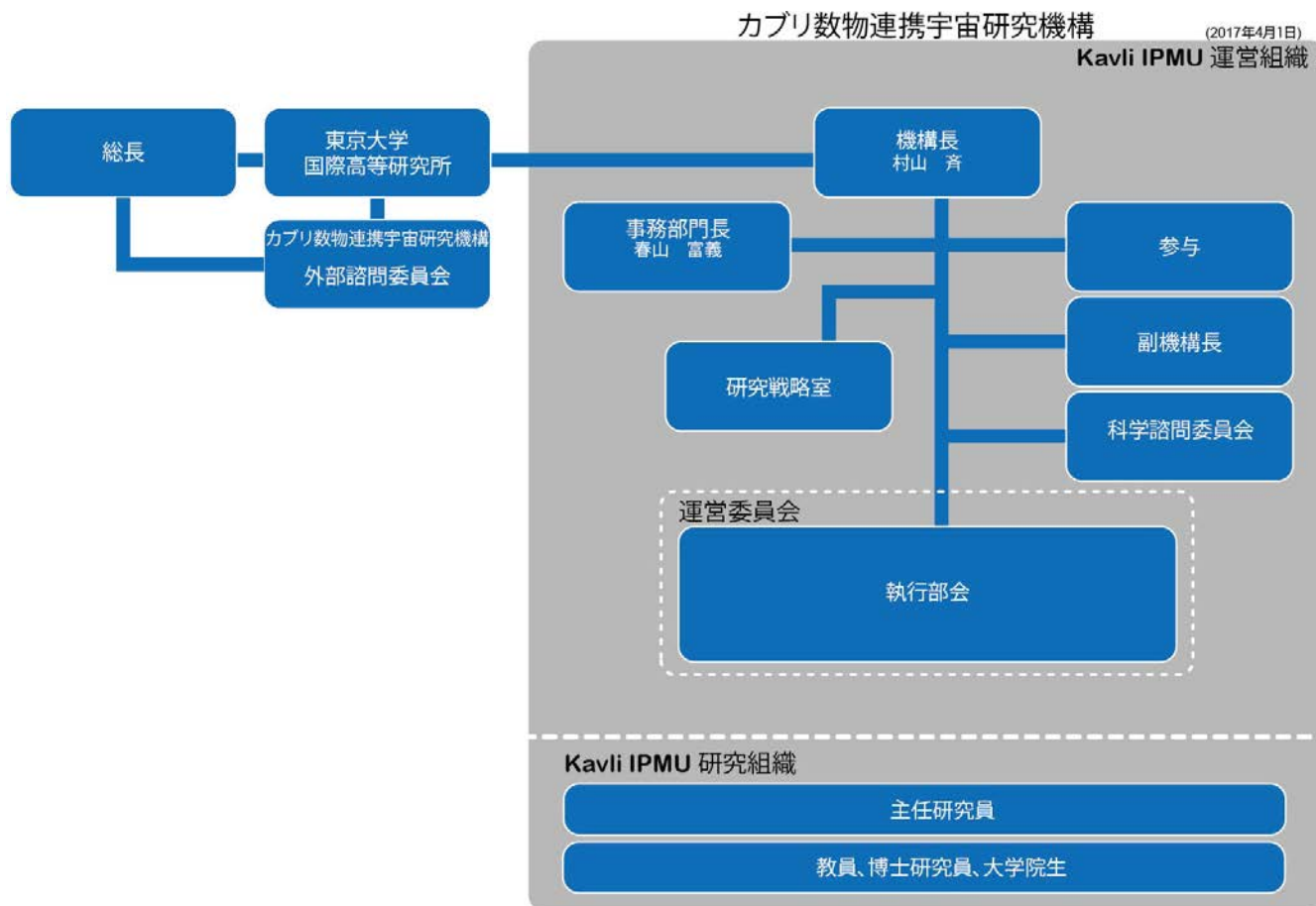
氏名	年齢	現在の所属 (機関、部局、専攻等)	現在の専門 学位	備考 (新規・継続等も記入)
1. 村山 斉 (*)	53	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・機構長・特 任教授 カリフォルニア大学パー クレー校・物理学科・教授	素粒子論、宇宙論 博士	継続
2. 相原 博昭 (*)	61	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・参与 東京大学・理学系研究科・ 副学長	高エネルギー物 理学 博士	継続
3. Alexey Bondal (*)	55	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・特任教授 ステクロフ数学研究所・教 授	数学 博士	継続
4. 井上 邦雄 (*)	51	東北大学・ニュートリノ科 学研究センター・センター 長・教授	ニュートリノ物 理学 博士	継続
5. 梶田 隆章 (*)	58	東京大学・宇宙線研究所・ 所長・教授	ニュートリノ物 理学 博士	継続
6. Stavros Katsanevas (*)	63	パリ第7大学・物理学部・ 教授	天体素粒子物理 学 博士	継続
7. 川崎 雅裕	56	東京大学・宇宙線研究所・ 所長・教授	素粒子宇宙論 博士	継続
8. 小林 俊行 (*)	54	東京大学・数理科学研究科 ・教授	数学 博士	継続
9. 河野 俊丈 (*)	61	東京大学・数理科学研究科 ・教授	数学 博士	継続
10. 中畑 雅行 (*)	57	東京大学・宇宙線研究所・ 教授	ニュートリノ天 体物理学 博士	継続
11. 野尻 美保子 (*)	54	高エネルギー加速器研究 機構・教授	素粒子論 博士	継続

12. 大栗 博司 (*)	55	カリフォルニア工科大学 ・ウォルター・バーク理論 物理学研究所 所長・教授	超弦理論 博士	継続
13. David Spergel (*)	56	プリンストン大学・天体科 学部・教授	観測宇宙論 博士	継続
14. 杉山 直 (*)	55	名古屋大学・理学研究科・ 教授	観測宇宙論 博士	継続
15. 堀 健太郎 (*)	51	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	超弦理論 博士	新規
16. Mikhail Kapranov (*)	54	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	数学 博士	新規
17. Young-Kee Kim (*)	54	シカゴ大学・教授	実験物理学 博士	新規
18. 小松 英一郎 (*)	42	マックスプランク宇宙物 理研究所・所長	理論物理学 (宇 宙論) 博士	新規
19. Kai Martens (*)	53	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・准教授	実験物理学 博士	新規
20. 松本 重貴 (*)	44	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・准教授	素粒子論、宇宙論 博士	新規
21. 森山 茂栄 (*)	47	東京大学・宇宙線研究所・ 准教授	実験物理学 博士	新規
22. 野村 泰紀 (*)	43	カリフォルニア大学バー クレー校・物理学科・教授	素粒子論 博士	新規
23. 高田 昌広 (*)	43	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	理論物理学 博士	新規
24. 戸田 幸伸 (*)	37	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・准教授	博士 数学	新規

25. Mark Vagins (*)	51	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	ニュートリノ物 理学 博士	新規
26. 吉田 直紀 (*)	43	東京大学・理学系研究科・ 教授 東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・教授	天文学 博士	新規

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料2. 拠点運営組織図



世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）

添付資料3. ホスト機関における拠点の組織的位置付け

※拠点のホスト機関における組織的位置付けが分かる図及び中長期的な計画等の抜粋、あるいはこれらの検討状況を記載すること。

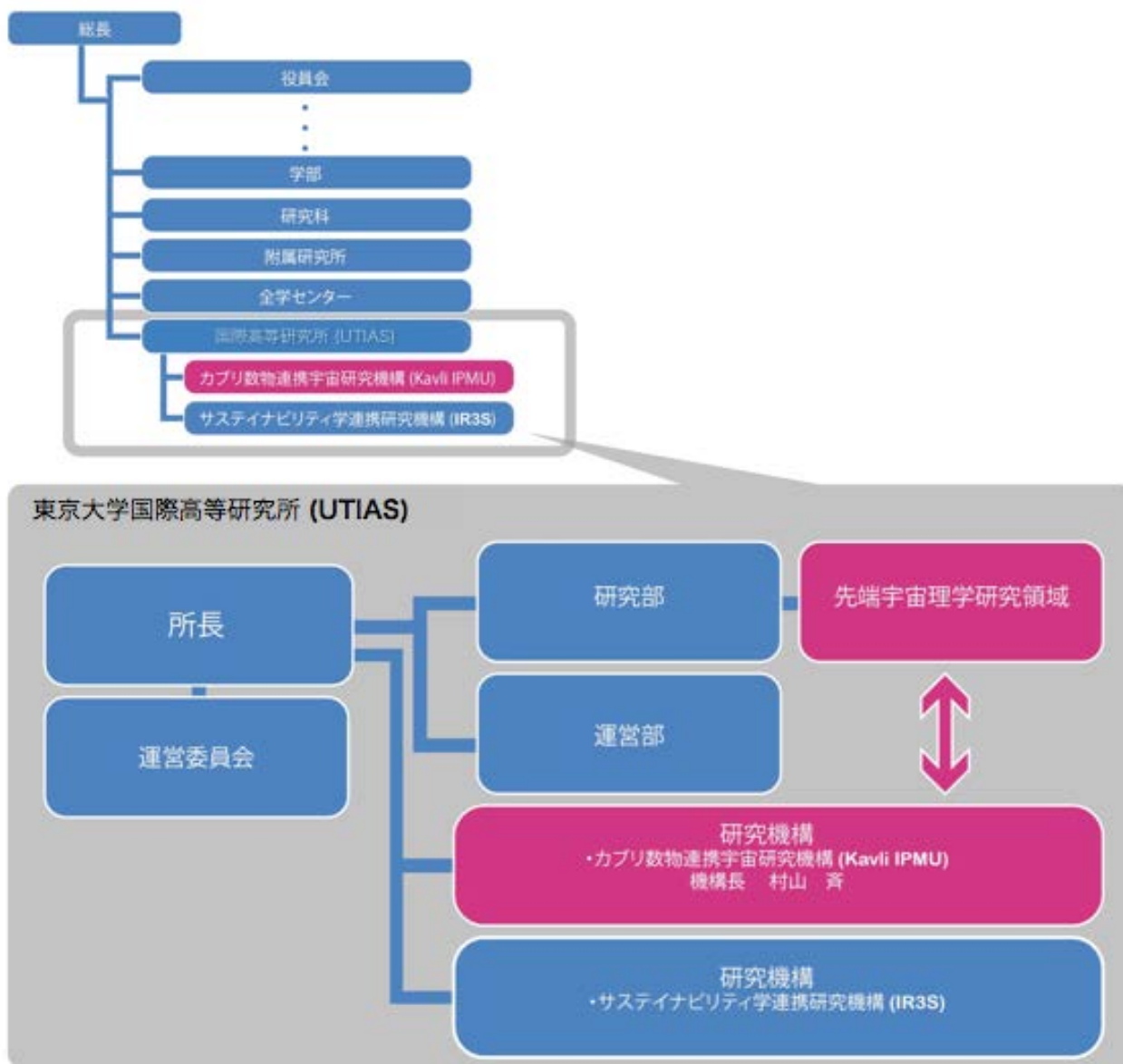
五神総長は「卓越性」と「多様性」を二つの基本理念として掲げた「東京大学ビジョン 2020」を示している。以下に詳しく示すが Kavli IPMU はまさに、このビジョンとアクションを担っていく中心的存在である。

ビジョン1：〔研究〕 新たな価値創造に挑む学術の戦略的展開

東京大学は、これまでも一貫して教育研究の卓越性と多様性を重視してきた。「東京大学ビジョン 2020」ではこの精神を受け継ぎながら、研究においては両者の相互連環をいっそう強く意識し、人間と世界のより透徹した理解を目指すとともに、それを通じて新たな価値創造に挑む学術を戦略的に展開します。

アクション1：〔研究〕 国際的に卓越した研究拠点の拡充・創設

東京大学が強みを持ち世界をリードしている分野や、着実に継承すべき独自の分野をさらに伸ばすとともに、東京大学の枠を超えた共同研究や国際的な連携を推進し、分野融合型の新たな学知を世界に先駆けて創出するなど、国際的に卓越した研究拠点を拡充・創設する。



世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)
添付資料4. 世界トップレベル研究拠点の進展・持続に係るリソース計画
(ホスト機関によるコミットメント)

日付 2016年5月27日

ホスト機関名 東京大学

ホスト機関の長の役職・氏名

総長・五神 真

「(拠点構想の名称)」を世界トップレベル研究拠点として維持していくため、責任をもって措置していくことを確認する。

年次計画 (平成29年～平成34年)						
＜資金＞						
(億円)						
年 度	29	30	31	32	33	34
・補助申請予定額	9.9	9.9	9.9	7.7	6.9	- (*)
・ホスト機関の措置予定額	6.3	6.3	6.3	8.4	9.2	13.1
・研究プロジェクト経費見込額	11.2	11.5	11.8	12.1	12.4	15.7
・合計額	27.4	27.7	28.0	28.2	28.5	28.8
＜人員＞						
(人)						
年 度	29	30	31	32	33	34
総人員	158(68)	158(68)	158(68)	158(68)	158(68)	158
教員 (研究職員)	81(59)	81(59)	81(59)	81(59)	81(59)	81
うち専任	31(9)	31(9)	31(9)	31(9)	31(9)	31
うち併任	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50(50)	50
ポストク	46(0)	46(0)	46(0)	46(0)	46(0)	46
RA等	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0
研究支援者	22(0)	22(0)	22(0)	22(0)	22(0)	22
事務職員	9(9)	9(9)	9(9)	9(9)	9(9)	9

(※) 補助金見込額は含めないこと。

- 金額については、小数点以下第一位まで記入。

- () に経費の支出元がホスト機関の資金によるものを記載。

幅がある場合上限と下限を示し、その変動条件についても注釈によって示すこと。

＜平成29年度以降において講ずる措置＞

・外部資金の獲得に関する戦略・取組についての行動計画等

東京大学は研究力強化のため様々な外部資金獲得を目指すKavli IPMU「研究戦略室」を引き続き支援する。研究戦略室は関連研究分野の政府、民間等の外部資金を得るため、URAが中心となり様々な情報収集を行っている。WPI拠点であるKavli IPMUにとって研究活動を大きく展開していく上で外部資金獲得は極めて重要である。戦略室と研究支援事務スタッフは、さらに提案書の書き方、審査の行われ方等に関する情報共有、科研費獲得セミナーなどを組織していく。

・適切な人員（ポスト）及びスペースの措置に関する戦略・取組についての行動計画等

東京大学はKavli IPMUにとって22の恒久ポストにコアとなって教員が確保されることが極めて重要であると認識している。このため、東京大学は既に総長裁量ポストを9つ付けている。ほとんどのポストには既にファカルティのコアメンバーが着任している。UTIASは大学がKavli IPMUを大学において恒久化するための優れたシステムである。こうした組織整備により、UTIASは文科省に機能強化のための概算要求を行っている。これまでに9つのポジションがUTIASに確保された（2016年度）。東京大学はさらに一部の事務職員の給料、建物借料の暫時減額化、運営費の支援等、Kavli IPMUが総長の2020ビジョンを実現に向けた世界をリードする研究拠点であり続けるための支援を行なっていく。

・その他、必要な措置に関する戦略・取組についての行動計画等

上述したように、支援終了後のKavli IPMUの拠点研究活動をさらに大胆に発展させるためには、外部資金の確保が生命線となる。東京大学はKavli IPMUの研究を達成させるために最大限の支援を惜しまない。それは研究を達成することによってさらにKavli IPMUを関連する科学分野コミュニティのみならず、一般の人々にも存在感をますます示すことができ、より広範な支持を受けることになるからである。例えば、外部資金の確保に加えて、大学渉外部はKavli IPMUと個人寄付をいかに得て、基金を確保するかいっしょに検討を行なっている。さらに大学は日本における基金のより効果的な運用についても検討を行っている。大学は引き続き、科学的成果を生み出す世界トップレベルの拠点としての研究環境を確保していく。これまでに確立したシステム改革、具体的にはジョイントアポイントメント、テニュアトラックポスト、世界規模の頭脳循環などをKavli IPMUのみならず関連する大学学部にも広めていく。

世界トップレベル研究拠点たる質の進展・持続に係る資金計画等詳細

<平成29年度>

年度の事業計画		
※ 実施する事業の具体的内容について記載。		
<p>東京大学はKavli IPMUの研究活動の発展を支えるため支援を強化する。WPI補助金は延長後5年でゼロに向け、段階的減額が行なわれる。東京大学は研究者、研究支援や事務職員の給料をさらに負担する。Kavli IPMUが引き続き世界トップレベルの研究拠点として人類にもたらす基礎科学の成果が出せるように関与していく。国際会議、研究集会、セミナーなどを開催して国内外の研究者を招聘、国際的な共同研究を更に推し進める。サテライト組織、連携機関との共同研究を強力に推し進める。いろいろな種類の外部資金や寄付を得る努力を続けていく。</p>		
経費の明細		
事 項	金額 (百万円)	備 考
<平成29年度>		
(WPI補助金)		
・ 拠点長給与	21.3	
・ 事務部門長給与	12.9	
・ 主任研究者給与 (3)	35.2	
・ その他研究者給与 (63)	402.8	
・ 研究支援員給与 (22)	85.2	
・ 招へい主任研究者等謝金	39.5	
・ スタートアップ経費	33.5	
・ サテライト運営経費	24.0	
スタッフ給与 (2.5): 22百万円		
旅費: 1百万円		
備品・消耗品等: 1百万円		
・ 国際シンポジウム等開催のための経費 (10回分)	16.3	
・ 施設等使用料	5.5	
・ 備品・消耗品費等	152.2	
・ 光熱費・水道費等	32.4	
・ 広報関係経費	11.5	
・ 交通通信費	4.2	
・ 国内旅費	11.0	
・ 外国旅費	46.2	
・ 招へい旅費	48.0	
・ 赴任旅費	6.0	
(ホスト機関の自主的なリソース措置)		
・ 主任研究者給与 (運営費交付金)	50.4	
・ その他研究者給与 (運営費交付金)	300.8	
・ 事務職員給与 (運営費交付金)	62.1	
・ 研究設備レンタル費 (運営費交付金)	215.0	
・ 研究プロジェクト費 (運営費交付金・補助金・寄附金)	1,120.3	
(平成29年度)		
合 計	2,736.3	

<平成30年度>

年度の事業計画		
※ 実施する事業の具体的内容について記載。		
<p>東京大学はKavli IPMUの研究活動の発展を支えるため支援を強化する。WPI補助金は今後4年でゼロに向け、段階的減額が行なわれる。東京大学は研究者、研究支援や事務職員の給料をさらに負担する。Kavli IPMUが引き続き世界トップレベルの研究拠点として人類にもたらす基礎科学の成果が出せるように関与していく。国際会議、研究集会、セミナーなどを開催して国内外の研究者を招聘、国際的な共同研究を更に推し進める。サテライト組織、連携機関との共同研究を強力に推し進める。いろいろな種類の外部資金や寄付を得る努力を続けていく。</p>		
経費の明細		
事 項	金額 (百万円)	備 考
<平成30年度>		
(WPI補助金)		
・拠点長給与	21.3	
・事務部門長給与	12.9	
・主任研究者給与 (3)	35.2	
・その他研究者給与 (63)	402.8	
・研究支援員給与 (22)	85.2	
・招へい主任研究者等謝金	39.5	
・スタートアップ経費	33.5	
・サテライト運営経費	24.0	
スタッフ給与 (2.5): 22百万円		
旅費: 1百万円		
備品・消耗品等: 1百万円		
・国際シンポジウム等開催のための経費 (10回分)	16.3	
・施設等使用料	5.5	
・備品・消耗品費等	152.2	
・光熱費・水道費等	32.4	
・広報関係経費	11.5	
・交通通信費	4.2	
・国内旅費	11.0	
・外国旅費	46.2	
・招へい旅費	48.0	
・赴任旅費	6.0	
(ホスト機関の自主的なリソース措置)		
・主任研究者給与 (運営費交付金)		
・その他研究者給与 (運営費交付金)	50.4	
・事務職員給与 (運営費交付金)	300.8	
・研究設備レンタル費 (運営費交付金)	62.1	
・研究プロジェクト費 (運営費交付金・補助金・寄附金)	215.0	
	1,149.3	
(平成30年度)		
合 計	2,765.3	

<平成31年度>

年度の事業計画		
※ 実施する事業の具体的内容について記載。		
<p>東京大学はKavli IPMUの研究活動の発展を支えるため支援を強化する。WPI補助金は延長期間終了に向けて、段階的減額が行なわれる。東京大学は研究者、研究支援や事務職員の給料をさらに負担する。Kavli IPMUが引き続き世界トップレベルの研究拠点として人類にもたらす基礎科学の成果が出せるように関与していく。国際会議、研究集会、セミナーなどを開催して国内外の研究者を招聘、国際的な共同研究を更に推し進める。サテライト組織、連携機関との共同研究を強力に推し進める。いろいろな種類の外部資金や寄付を得る努力を続けていく。</p>		
経費の明細		
事 項	金額 (百万円)	備 考
<平成31年度>		
(WPI補助金)		
・拠点長給与	21.3	
・事務部門長給与	12.9	
・主任研究者給与 (3)	35.2	
・その他研究者給与 (63)	402.8	
・研究支援員給与 (22)	85.2	
・招へい主任研究者等謝金	39.5	
・スタートアップ経費	33.5	
・サテライト運営経費	24.0	
スタッフ給与 (2.5): 22百万円		
旅費: 1百万円		
備品・消耗品等: 1百万円		
・国際シンポジウム等開催のための経費 (10回分)	16.3	
・施設等使用料	5.5	
・備品・消耗品費等	152.2	
・光熱費・水道費等	32.4	
・広報関係経費	11.5	
・交通通信費	4.2	
・国内旅費	11.0	
・外国旅費	46.2	
・招へい旅費	48.0	
・赴任旅費	6.0	
(ホスト機関の自主的なリソース措置)		
・主任研究者給与 (運営費交付金)	50.4	
・その他研究者給与 (運営費交付金)	300.8	
・事務職員給与 (運営費交付金)	62.1	
・研究設備レンタル費 (運営費交付金)	215.0	
・研究プロジェクト費 (運営費交付金・補助金・寄附金)	1,179.3	
(平成31年度)		
合 計	2,795.3	