

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

数物系科学(とくに素粒子、宇宙物理、天文)分野に関する学術研究動向及び学術振興方策 - 大型実験・観測装置と研究組織に注目した分野の動向 -

神田 展行(大阪市立大学大学院理学研究科・教授)

素粒子、宇宙物理、天文分野は、実験・観測の大型計画を多く有する分野である。もちろん小中規模の実験や、数多くの理論研究も盛んであるが、この分野の大まかな動向を知る上で、大型計画の現状や将来展望は重要である。本年度の大きな動向として、コロナウイルス感染症流行が大型計画の予定に大きな影響を与えた点が看過できない。多くの大型計画で進行に遅れや国際共同観測への支障が生じた。

一方で、日本国内では文科省の科学技術・学術審議会が、2020年8月に「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画について」を報告している。各研究の向後の予定が注目された。

2020年度はコロナウイルス感染症の流行のために、インターネットを利用したオンライン会議へ変更した研究集会が多くあった。研究員の専門分野を中心に、分野(科費費の中区分、小区分)、期間、参加人数、会議の形態、会議で使用したソフトウェア、公開の有無などについて調査した。オンライン会議に研究者が慣れてくるにつて、参加の形態(リモート、現地、ハイブリッドなど)や、会議にもちいるソフトウェアが収束してゆくのか、それとも慣れることでかえってヴァリエーションが増えるのかといった点は、研究者も注視するところであろう。調査の範囲では、会議のソフトウェアは特定のもの使用が70%であり、2020年度に限っていうならスタンダードが決まりつつあるようである。また、ポスターセッションや個別議論への分割のために、グループウェアを補助的に併用した会議が10%あった。興味深いのは参加者数の変化であり、前年度(または前回)の参加者数と比較できたものでは、2倍以上に増加したものが4割、それ以外も大半が参加者数増加であった。今後の学術研究集会の形態がどうあるべきかは、研究者にとって共通の問題であろう。

数物系科学(とくに地球惑星科学)の分野に関する学術研究動向及び学術振興方策 - 数物系科学における新たな潮流と展開 -

中村 美千彦(東北大学大学院理学研究科・教授)

天文学関連分野では、MAGIC望遠鏡によりギガ電子ボルト以上の高エネルギーガンマ線放射がガンマー線バーストの残光から検出された。重力波、高エネルギー宇宙ニュートリノなど、多種の観測手段を用いたマルチメッセンジャー天文学が急速に発展しつつある。またすばる望遠鏡を用いた大規模探査によって100個近くの巨大ブラックホール群が発見されるに至り、その誕生モデルが検証されるようになった。ブラックホールから放出されるエネルギーが銀河に影響を与えつつある現場も観測され、銀河との共生関係の糸口もつかめ始めている。

地球惑星科学関連分野においては、太陽系の探査が引き続き世界的に活発に行われている。特に生命起源、地球外生命に対する注目度は高く、惑星表面環境の探査データの解釈の重要性が増している。地球科学で蓄積された膨大な知見を活用し得る研究であり、探査データの取得と現象モデリングとの相乗効果が活発に展開されると予想される。固体地球科学領域では、岩石の破壊による地震波や通常地震計を用いない地震学が引き続き発展している。近年では、GNSSを広帯域の地震計として使い、断層モデルをリアルタイム解析することで、2011年東北地方太平洋沖地震のようなM9クラスの巨大地震の規模を即時推定する技術が開発された。津波ハザード予測にも社会実装されるに至っている。

コロナ禍でオンライン・ハイブリッドにより実施された大規模国際学会として、アメリカ地球物理学連合秋季大会に出席した。ハイブリッド開催であるメリットを活かしたPod reservation systemと呼ばれるオンライン会議室機能が強化されており、大学院生・若手研究者(ポスドク)のネットワーク形成支援が分野ごとに活発に行われている。これは、日常で対面での活動が限られた学生の支援になると同時に、規模の小さな大学に所属する学生・研究者にとっては特に有効と考えられ、ニューノーマルでも定着するかもしれない。

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)

研究期間延長(新型コロナ対応)分

応用数学および統計数学関連分野に関する学術研究動向 — 流体現象を始めとする非線形問題における数理解析および数値解析の現状と将来

木村 芳文(名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授)

担当者の専門分野は応用数学および統計数学関連分野(流体力学)であり、流体力学の数学的側面を主な研究対象としている。流体力学は工業問題、航空船舶、宇宙環境問題における様々な問題に関連し、幅広い応用を抱える学問であるが、その数学的な側面については大きく分けて次の2つの考え方が存在すると考えられる。

(1) 流体、特に粘性流体の運動を記述する非線形偏微分方程式である Navier-Stokes 方程式やそこから派生する方程式、およびそれらを基にしたモデル方程式を基礎方程式として、基礎方程式の解析およびその解の性質を知ることによって現実の問題の理解を行う立場

(2) 現象の様々なデータから統計操作によって問題とする物理量の特徴を抽出し、予測を行う立場

前者は元来の流体力学の問題意識であり、現在でも数値解析を含めた多くの研究がこの立場で行われているのに対し、後者は近年の AI およびデータ駆動型研究の発展の下、機械学習・深層学習の範疇として注目されている立場である。これらの2つの立場は相補的であり、例えば(1)で方程式の特異性を研究することは(2)の弱点とも言える突発的大偏差現象の予測に対する情報を提供することになると考えられるし、(2)の方法を用いることによって(1)の立場では計算できないような複雑な状況下の問題について予測が可能になる。

担当者はこれまで(1)の立場で研究を続けてきているが、新しいトレンドとしての(2)の立場に興味を持つとともに(1)と(2)のハイブリッド型の研究の可能性について研究動向を注目している。令和2年度はコロナ禍の影響でオンラインによる調査となったがアフリカにおける数学高等教育における統計、応用数学教育の現状とアメリカ物理学会・流体力学分科会(シカゴ)において渦運動をテーマとしたセッションにおける発表を通して調査を実施した。

素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理に関連する実験分野に関する学術研究動向—将来素粒子実験計画の国際的新展開—

川越 清以(九州大学大学院理学研究院・教授)

素粒子研究のための加速器は大規模化・長期化し、一つの国や地域では実現できない規模の将来計画は世界中の研究者コミュニティが協力・分担して実現しようとしている。そのための議論も国際的である。欧州や米国での議論には日本を含む地域外からの委員が招待され、世界中から寄せられたインプットをもとに議論を行う。

2020年6月に欧州の素粒子物理戦略が更新され、「電子・陽電子ヒッグスファクトリーを最優先の次期衝突型加速器とする」と合意された。いくつかのヒッグスファクトリーが提案されているが、「日本における電子陽電子国際リニアコライダー(ILC)のタイムリーな実現は、この戦略に適合するものであり、その場合、欧州の素粒子物理学コミュニティは協働することを望む。」とも記されている。ヒッグスファクトリーが次期加速器として欧州でも合意されたことで、日本での ILC の実現に向けた国際的な取り組みが強化されている。

米国では政府(エネルギー省など)のもとで数年に一度、高エネルギー物理学の将来計画についてコミュニティの意見を集約している。前回の報告(2014年)では、LHC とニュートリノ実験に加え、ILC への参加を強く希望した。米国での新たなプロセスは2020年4月から始まっており、2022年7月の会議で集中的な議論が行われる予定である。その議論をもとにして、政府の諮問委員会で答申がまとめられる。

素粒子物理学は、国際共同研究が最も進んでいる分野であろう。例えば、欧州原子核研究機構の LHC/ATLAS 実験には42カ国から181研究機関が参加し、論文の著者数は3000人を越える。第二次世界大戦後の1954年に「科学による欧州の結束」を目指した設立された CERN は、現在も「Science for Peace」というスローガンのもと、欧州のみならず世界の素粒子研究者が集まる国際研究拠点となっている。

2022年2月に始まったロシアによるウクライナ侵攻は、

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

素粒子物理コミュニティにも深刻な影響を与えている。ロシアの研究機関・研究者は多くの国際共同研究の中で無視できないポジションにある。3月8日に召集されたCERN理事会では、ロシアを強く非難し、理事会でのオブザーバー資格の停止などが決議された。一方、ドイツの研究機関はロシアの研究機関との共同研究を全て停止した。今後の成り行きを注視するとともに、私も一研究者として「Science for Peace」に貢献していきたい。

代数学分野に関する学術研究動向—整数論および代数学関連分野の最近の発展と展開—

栗原 将人(慶應義塾大学理工学部・教授)

2020年は新型コロナウイルス感染症により、研究集会・共同研究を始めとする多くの研究計画が中止・延期に追い込まれた。日本数学会2020年春の年会(日本大学で予定)は中止され、秋の総合分科会(熊本大学で予定)は大学の会場は使わずオンデマンド配信であった。2021年春の年会(慶應義塾大学で開催)でZoomによる配信が実現し、特に授賞式と総合講演は、会場に对面での参加者を集め、大多数はZoomで参加するというハイブリッド開催で行われた。

2020年度に代数学分野で最も大きな話題となったのは、望月新一氏によるabc予想を証明した論文が、2020年4月に掲載受理され、2021年3月に数理解析研究所発行の雑誌に出版されたことであろう。この論文は4部に分かれ、全部で700ページを超える大論文である。論文は出版されたものの、望月氏の証明は現況では世界に受け入れられた状態ではない。日本では新聞やテレビで取り上げられて、すごいことができた、というムードになっているが、これは日本だけの現象である。数学の論文のレビューを載せるzbMATH(zentralblatt math)誌にはP.ショルツによるレビューが書かれ、主定理が証明された状態ではない(Part II Iの系3.12に誤りがある)と述べられている。ショルツとJ.スティックスの文書に対して、望月氏は反論しているが、それが数学界で受け入れられているとは言い難く、望月氏が理論を理解可能な形で説明することが望まれている。

代数多様体のL関数の整数点での値をレギュレーター写

像で表す研究に進展があり、この方面(さらにはこのp進版)で成果をあげた朝倉政典氏が2020年度代数学賞を受賞し、また佐藤周友氏が代数学シンポジウムで招待講演を行った。

京都大学の山木孝彦氏は、幾何的ボゴモロフ予想(幾何的高さが小さい点を稠密に持つ既約閉部分多様体は特殊部分多様体に限る)の研究で大きな成果をあげ(曲線の場合には完全に証明)、やはり2020年度代数学賞を受賞した。

天文学関連分野に関する学術研究動向—次世代大型光学赤外線望遠鏡計画に関する動向調査 II

土居 守(東京大学大学院理学系研究科・教授)

天文学分野においては、現在次世代の光学赤外線大型望遠鏡の建設が進んでいる。ハワイ島マウナケア山あるいはカナリア諸島ラパルマに米国、日本、カナダ、中国、インド中心に建設中の口径30m Thirty Meter Telescope(TMT)計画、チリ北部アルマゾネス山にヨーロッパ南天天文台が建設中の口径39m Extremely Large Telescope(ELT)計画、米国、オーストラリア、韓国、ブラジル中心に建設中の口径22m Giant Magellan Telescope(GMT)計画である。いずれも2020年代終わりから2030年代の完成を目指して建設中である。日本は国立天文台を中心に北半球の建設されるTMT計画に主要メンバーとして参加しているが、南半球に設置されるELT、GMTには参加していない。日本の衛星望遠鏡や重力波望遠鏡KAGRAなどは南北両半球の観測が可能であるが、TMTは北半球に設置される予定で、南半球の望遠鏡へのアクセスは大変重要である。そこで現状分析を機能・性能の比較をおこなった。

望遠鏡の回折限界は、口径に反比例して小さくなるため、解像度の点ではELT、TMT、GMTの順に性能が高い。一方で、像の拡大率もELT、TMT、GMTの順に高くなり、ELTでは既存の高感度検出器のサイズ(15 μ m角程度)ではオーバーサンプリングとなり、また焦点面の物理サイズが巨大になる。このためELTでは補償光学を搭載しない形での広視野撮像カメラを搭載することは行わない予定となっており、その結果、Natural Seeing(補償光学を行わないそのまま

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

の大気ゆらぎ)で観測を行うモードがある TMT と GMT が天体の探査能力では勝っている。

この探査能力を活かすためには、冷却をあまり必要とせず、読み止し雑音が背景光や暗電流の雑音よりも十分小さい CMOS センサーあるいは次世代センサーを焦点面に敷き詰め、ピンニングを行いながら、高時間分解能撮像を行う装置を開発することが望ましいと考えられる。光赤外線波長域における短時間の発光現象等が最高感度で探査可能となり、時間軸天文学の推進において大変有効な可能性があり、さらに検討を続けている。

磁性、超伝導および強相関系関連分野に関する学術研究動向—磁性と他分野の境界領域における新たな潮流と展開—

村上 修一(東京工業大学理学院・教授)

スピントロニクス分野とは、電子のスピン自由度を利用したエレクトロニクス分野である。半導体を利用したエレクトロニクスでの技術革新と、電子スピンの物理の理解の深化に伴い、スピントロニクス分野は 1990 年代にかけて急速に発展してきた。当初は半導体の技術と幅広い制御性を利用した半導体スピントロニクスが主流であったが、2000 年代に入って金属スピントロニクス分野が発展してきた。一つには観測技術の発展がある。スピンホール効果などを利用したスピン流の観測技術が発展してきたためである。また、低温での実験が必要となることが多い半導体スピントロニクスと異なり、室温での実験が可能なことも、金属スピントロニクス分野研究の最近の発展の一つの理由である。

最近ではスピントロニクス分野が多種多様な方向へと発展してきている。一つには様々な粒子や準粒子との結合である。フォトンやフォノンといった粒子・準粒子との相互作用や混成は以前から議論されてきたが、微細加工技術の向上などでそれらの自由度の結合を強くする系のデザインが可能になった。もう一つにはスピントロニクス分野の舞台となる系が多様になっていることである。トポロジカル絶縁体、超伝導体、スキルミオン系、マルチフェロイ

クスなどのさまざまな電子状態と結合させることで、スピン輸送現象の増大や特異現象の発現が実験で報告されるようになり、また理論面での解明も進んでいる。一つ特筆すべき現象としては、CISS(chirality induced spin selectivity)があり、DNA のようなキラルな有機分子で盛んに研究されている。この CISS とは、こうしたキラル有機分子を透過してくる電子が数十パーセントなどの大きなスピン偏極率を示したり、またキラル分子が金属表面に吸着する際に、表面が磁化しているとその磁化の向きに依存して片方のキラリティの分子が優先的に吸着したりといった現象をさす。スピントロニクス分野での今までの常識では、スピンに絡む現象にはスピン軌道相互作用が必要であり、重い元素を持つ化合物が通常必要であったが、この CISS 等は主に有機分子という、軽い元素からなる化合物で見られ、今までの解釈では説明できず、今後の解明が待たれる。

電子スピンはそれ自身が量子力学的なものであり古典的対応物が存在しないため、さまざまな特異現象の宝庫となってきた。以上に述べるようにスピントロニクス分野は最近でも新しい発展があり、他分野とのかかわりを通じて今後のさらなる広がりが期待される。

半導体、光物性および原子物理関連分野に関する学術研究動向—時間・空間領域の光物性研究の潮流と展開—

木村 昭夫(広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授)

固体の示す多彩な物性現象はその電子のスピンと軌道との競合により決定される。物性物理学においては、さまざまな実験・理論手法によりそれらの発現機構を解明することが根本的な使命であるが、より新奇な物性を発現する物質開発にもつながる。様々な実験手法がある中で、最近では、実空間・時間分解した光学実験手法の発展が目覚ましく、磁性をはじめとする物性現象の解明に大きな進展をもたらしている。本動向調査では、特に磁気イメージング手法を用いて最先端の物性研究を進めている国内外の研究者の学会発表、研究論文をレビューすることにより、次世

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班) 研究期間延長(新型コロナ対応)分

代の更なる研究動向を調査した。その中で2つの最新動向を紹介する。

光磁気カー効果(MOKE)は、磁性体において入射光の偏光面に対し反射光の偏光面が回転する古くから知られ現象である。その偏光面の回転角は磁化に比例するため、磁気イメージング手法としても用いられてきた。一方、最近では反強磁性体 Mn_3Sn において、マクロな磁化を持たないにも関わらず、強磁性体に匹敵する大きなカー回転角が観測されたことから、原理に立ち戻った再解釈が求められるが、当該研究では、磁性八極子が原因となって大きなカー回転角が生じていると第一原理計算と合わせ解釈された。このことから、従来の単純な磁区のイメージングの殻を破り、磁性八極子などの多極子の空間イメージング手法につながる大いに期待される。

2022年3月15-19日に第76回日本物理学会年次大会がオンラインで開催された。その中の「放射光科学のフロンティア：最新動向と将来展望」と題したシンポジウムの企画に参加し、学術動向調査を目的に、海外からも講演者を招聘した。その中で、磁気的な表面敏感型X線光電子顕微鏡とバルク敏感軟X線透過顕微鏡を用いてIr/Co/Pt多層膜の磁気像を記録したところ、磁気Hopfionの観測に成功したという報告があった。このようなHopfionは3次元的なトポロジカルソリトン状態に相当するもので、次世代スピントロニクス分野にも波及しうるものとして注目される。

素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理理論分野に関する学術研究動向 —素粒子理論と他分野の境界領域における新たな潮流と展開—

初田 真知子(順天堂大学保健医療学部・教授)

素粒子物理と数学、物性、生物、天文学、工学など様々な分野との境界領域が発展しているなか、ここでは素粒子理論と量子コンピュータ、機械学習、量子情報の分野に焦点をあてて報告する。

量子コンピュータを高エネルギー加速器実験、ニュートリノ天体物理、宇宙論、初期宇宙、量子重力のシミュレーション

に適用するための検討が進んでいる(例えば、Baer et. al., "Quantum Simulation for High Energy Physics", arXiv:2204.03381 [quant-ph], the Proceedings of the US Community Study on the Future of Particle Physics, Snowmass 2021)。2019年に米googleが、2020年に中国が、量子コンピュータが古典コンピュータの計算速度を超える「量子超越」を達成したと発表したところである。素粒子理論における標準理論の完全な検証のためには、加速器衝突実験における多重シャワーによる終状態を完全に求めたシミュレーションとの比較が必要だが、古典的アルゴリズムでは計算量が爆発的に大きくなりその遂行は困難である。この問題の解決策として量子コンピュータの活用が期待されている。量子コンピュータによる計算の効率的なアルゴリズムを開発するため、空間の離散化、ゲージ理論の対称性の実現、カットオフ切断や繰り込みによる系統的な不確定性の問題などについて検討する必要がある。また逆にこれらの理論的アイデアが、素粒子論の新しい潮流を生み出す可能性がある。

機械学習の適用で高エネルギー加速器実験による未知粒子の探索に威力を発揮できることが示され、加速器衝突実験、QCDなどへの応用が展開されている。INSPIRE HEPにおいて、機械学習に関する論文は2020年に804件、2021年1172件と多くなり、機械学習、深層学習と素粒子物理に関する国際会議もいくつか開催されている(例えば、The 3rd KMI School, "Machine Learning in particle and astrophysics", 名古屋大学, 2020; "Machine Learning for Particle Imaging Detectors in Experimental Neutrino Physics", Deep learning and Physics 2020 Seminar Series)。加速器衝突実験のシミュレーションにおけるイベント生成、QCDジェット、ハドロン化、粒子輸送、ノイズを含めた検出器の信号に関する様々な部分に効率化が期待される。

量子情報と素粒子理論の融合が展開されている(例えば、Online Workshop on Qubits and Black Holes, IAS, 2020; It from Qubit: Simons Collaboration on Quantum Fields, Gravity and Information, 2020)。超弦理論におけるAdS/CFT対応(ゲージ・重力対応)はブラックホールの量子状態の説明を与えた。ワームホールとエンタングル

令和2年度学術研究動向等に関する調査研究 報告概要(数物系科学専門調査班)
研究期間延長(新型コロナ対応)分

メント、時空と量子ビットなど、ブラックホールや宇宙創
成の謎を解くべく量子重力と量子情報の融合が進んでい
る。