

KAVLI IPMU NEWS



World Premier International Research Center Initiative
世界トップレベル研究拠点プログラム

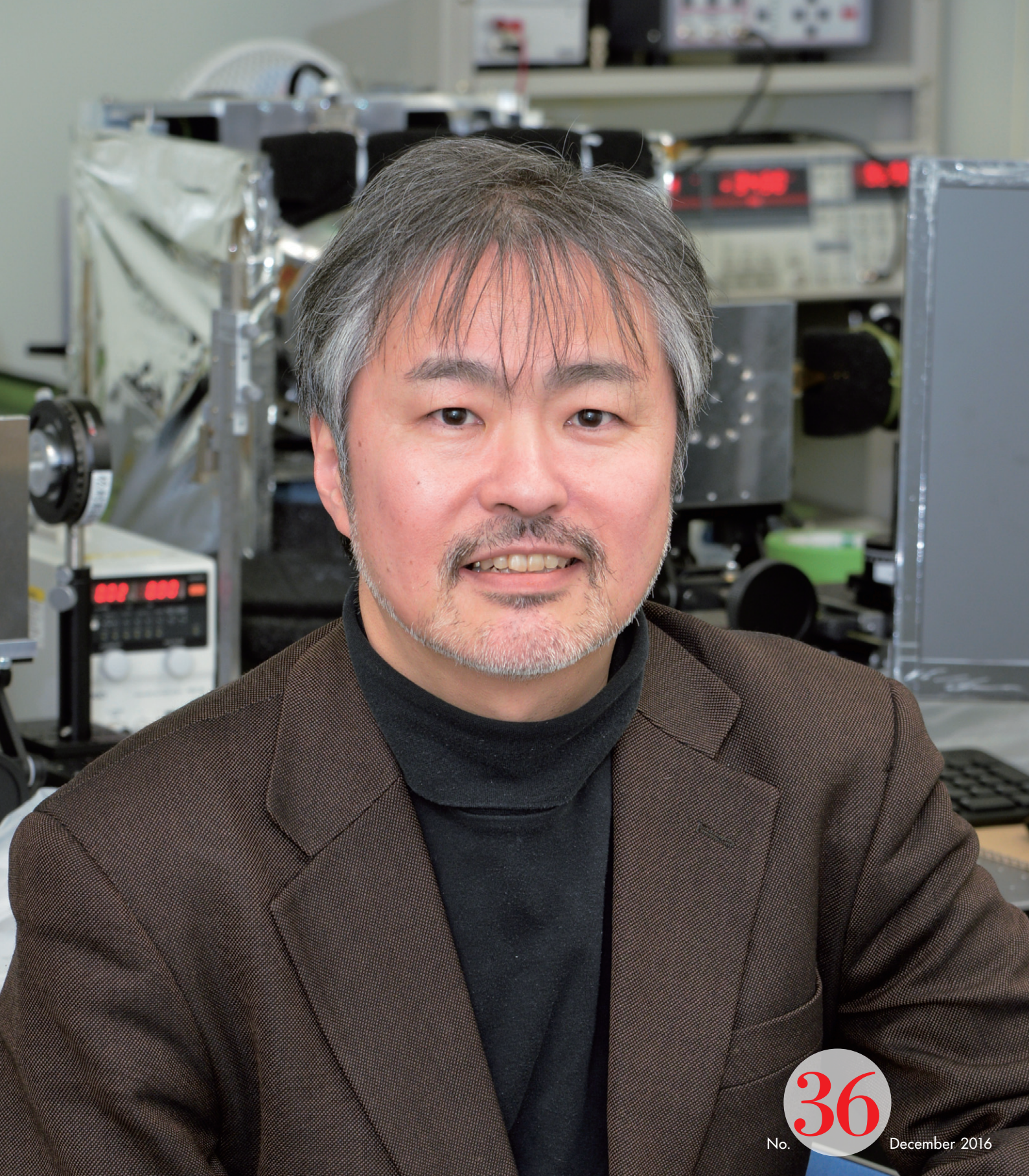
Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe
カブリ数物連携宇宙研究機構



The University of Tokyo Institutes for Advanced Study
東京大学国際高等研究所

Feature

Can We Observe the Universe before the Big Bang?



36

No.

December 2016

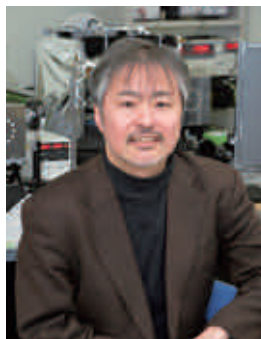
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Can We Observe the Universe before the Big Bang?
Masashi Hazumi
- 10 **Our Team**
Tomotake Matsumura
Satoshi Shirai
Anne Ducout
Fabian Köhlinger
Juliana Kwan
Matthew Murdoch
Francesco Sala
Tomomi Sunayama
Gabi Zafrir
- 14 **Research Report**
Data Science and Natural Science
Shiro Ikeda
- 16 **Workshop Report**
Statistics, Quantum Information, and Gravity
Hirosi Ooguri
- 17 **Workshop Report**
Workshop on Categorical and Analytic Invariants
in Algebraic Geometry IV
Alexey Bondal
- 18 **Workshop Report**
Resurgence at Kavli IPMU
Aleksey Cherman
- 19 **TEA BREAK**
Dream of the Monkey from diary, entry dated July 20, 2010
Kyoji Saito
- 20 **Special Contribution**
Science and Art Today
Norimichi Hirakawa
- 24 **News**
- 28 **Lagrangian Point 2 (L2)** Hajime Sugai

Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 30 **Feature**
ビッグバン以前の宇宙は見えるか?
羽澄 昌史
- 36 **Our Team**
松村 知岳
白井 智
アン・デューカー
ファビアン・ケーリング
ジュリアナ・クワン
マシュー・マードック
フランチェスコ・サラ
砂山 朋美
ガビ・ザフリル
- 40 **Research Report**
データ科学と自然科学
池田 思朗
- 42 **Workshop Report**
「統計、量子情報、量子重力」研究会
大栗 博司
- 43 **Workshop Report**
代数幾何学における圏論的及び解析的不変量IV
アレクセイ・ボンダル
- 44 **Workshop Report**
Resurgence at Kavli IPMU
アレクセイ・シャーマン
- 45 **TEA BREAK**
猿の夢日記 (2010年7月20日)
齋藤 恭司
- 46 **Special Contribution**
現代における科学と芸術
平川 紀道
- 50 **News**
- 52 **ラグランジュ点2 (L2)** 菅井 肇



Masashi Hazumi is a Professor at the Institute of Particle and Nuclear Studies (IPNS) of the High Energy Accelerator Research Organization (KEK). He is also a Kavli IPMU Professor. In 1993, he graduated from the University of Tokyo's Graduate School of Science and received his Ph.D. in Science. In the same year, he was awarded JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Research Fellowship for Young Scientists (PD). In 1994, he was appointed as an Assistant Professor at Osaka University. In 2001, he moved to KEK as an Associate Professor. Since 2007, he has been a Professor at KEK. Since May 2014, he has also been a Kavli IPMU Professor. He studied CP violation in the Belle experiment at the KEKB collider. Since 2007, he has been engaging in CMB observations to test inflationary universe theories. He received the 4th (FY 2007) JSPS Prize.

羽澄昌史：高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授およびKavli IPMU教授。1993年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了、博士（理学）の学位を取得。同年、日本学術振興会特別研究員。1994年より大阪大学助手、2001年より高エネルギー加速器研究機構助教授、2007年より同教授。2014年5月よりKavli IPMU教授を兼務。KEKBファクトリーでCP対称性の破れを研究。2007年より宇宙観測に乗り出し、現在はCMB観測によるインフレーション宇宙の検証を行っている。日本学術振興会賞（2007年）受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



October 22: (Left) Giving a public lecture titled, "Ripples of Space-Time: New Eyes to Space Opened by Gravitational Waves," at the Kavli IPMU lecture hall at Open Campus Kashiwa 2016. (Right) After the lecture, many people stood in a line to ask questions to Director Murayama (see p. 25).



November 11: Minister of State for Special Missions Yosuke Tsuruho (Minister of State for Science and Technology Policy / Minister of State for Space Policy) visited Kavli IPMU (see p. 24).



November 19: Talking with undergraduate and graduate women students at the event to support their thinking of physics careers, "I Actually Really Love Physics: Careers for Girls in Physics" (see p. 25).



December 17: Surrounded by young students, Director Murayama answers their questions, at the WPI 10th Anniversary Symposium "Towards the future of science in Japan" (see p. 26). Photo: Courtesy of IFRcC.

Can We Observe the Universe before the Big Bang?^{*1}

Introduction

What did the exact moment of the birth of our universe look like? What are the fundamental laws of physics that governed the very beginning? Answering these questions is one of the grand challenges of science. It is also a research topic that invokes the sense of wonder even beyond science. When you pursue it, you might even encounter a problem like “how to originate existence from nothing.”

How far can we go back in history and observe the primordial universe? It is often said that our universe at the beginning was in a hot dense state like a fireball, and the Big Bang, which is the expansion of the universe, occurred. Logically speaking, there is no state before the Big Bang if you define it as the true beginning of the universe. If, however, you define the Big Bang just as a state of the universe that is described by physical laws, you might admit that there should be a preparation period for the Big Bang.

Indeed, thanks to development of technology for observation, humankind is now about to start observing the universe before the hot fireball state, or before the Big Bang. Among several ways of observation that have been proposed, the most promising method is to observe the cosmic microwave background (CMB) polarization, about which there is a worldwide competition today.

^{*1} This article is revised from the following article written in Japanese: JAXA/ISAS News 2016 Sep. (No.426) The Frontier of Space Science “Exploring the universe before the Big Bang with LiteBIRD.”

The Cosmic Microwave Background (CMB) and the Big Bang Cosmology

The CMB is the oldest radiation in the universe, which is coming from the entire sky nearly isotropically with the central frequency of approximately 160 GHz (or equal to the wavelength of about 2 mm). The CMB was discovered in 1964 (publication was in 1965) by Arno A. Penzias and Robert W. Wilson, who received the Nobel Prize in Physics in 1978.

The universe continued its expansion after the Big Bang, and was cooled down as a result. About 380 thousand years after the Big Bang, the Universe went through a huge transition in which electrons and protons, which were apart from each other by that time, bound together quickly to form hydrogen atoms. Photons (or radiation), which were frequently interacting with free electrons, started traveling the space freely as they encountered no charged particles anymore. This transition is called recombination (“Hare-agari” in Japanese, which means “(the sky) clearing up”), and the CMB is indeed radiation from the recombination. The temperature of CMB at the time of recombination was 3000 K (hereafter we use the absolute temperature unit, K, for Kelvin). On the other hand, we know that the temperature of the CMB now is about 2.7 K. The reason why the temperature is lower now is that the wavelength of CMB becomes longer due to the expansion of space itself, and the radiation with the longer wavelength means lower temperature. Since there is no other plausible

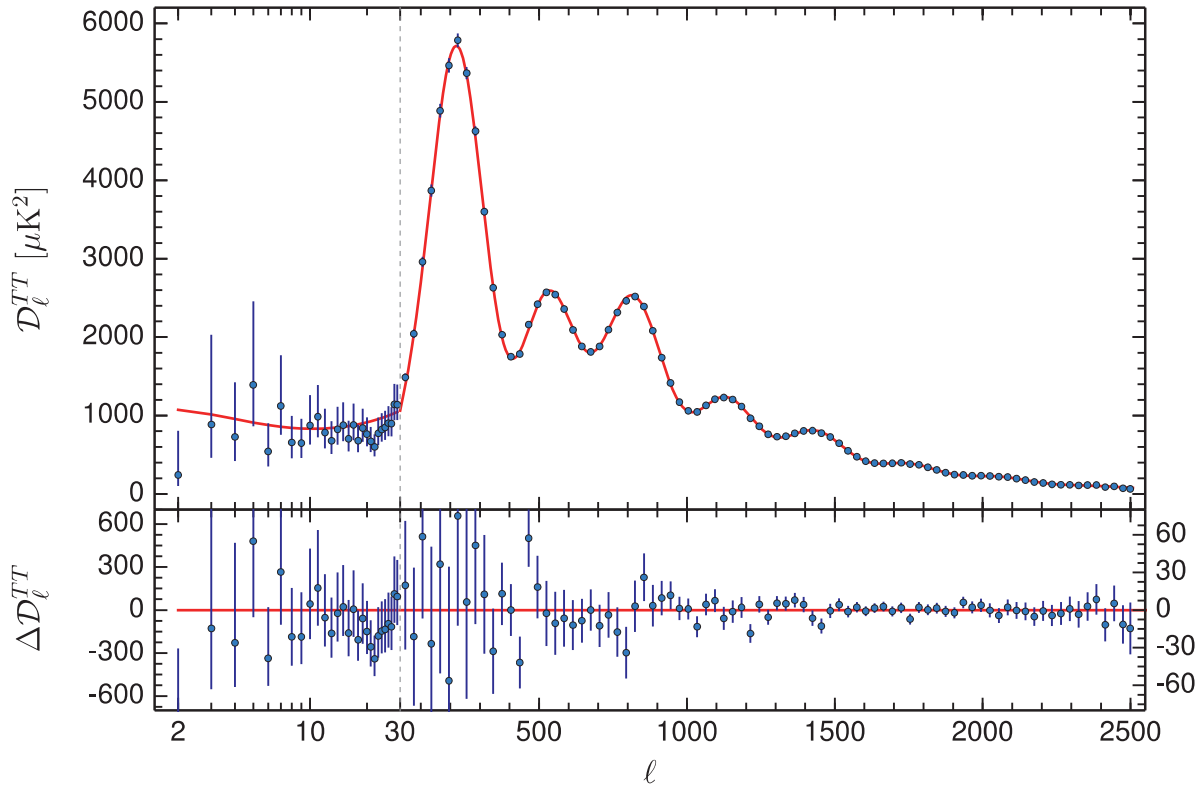


Fig. 1 Power spectrum of the CMB temperature fluctuation measured by the Planck satellite. The horizontal axis shows the wave number that corresponds to the fineness of the fluctuation pattern, while the vertical axis is the power of the fluctuation. The solid line is the result of the fit with the standard model of cosmology. The bottom panel shows the difference between the data and the fit result.

explanation for the existence of CMB, the discovery of CMB is regarded as key evidence of the Big Bang.

In 1989, NASA's COBE satellite started observation in orbit around the Earth. It was the beginning of the era of CMB precision measurements. The 2006 Nobel Prize in Physics was awarded to John C. Mather and George F. Smoot for their contributions to the measurements with COBE. In 2001, NASA's WMAP satellite, which was designed to measure the CMB with much better angular resolution, started observation at one of the Sun-Earth Lagrange points (L2).^{*2} In 2009, the Planck satellite, with even better angular resolution and sensitivity than WMAP, was launched by the European Space Agency (ESA).

^{*2} See page 28.

Observations by these satellites have revealed the surprising facts of the universe with great precision, such as that the age of the universe is about 13.8 billion years, and that our universe is mostly filled by dark energy, which is not understood well.

Figure 1 shows a result from the observation by the Planck satellite announced in 2015. The solid line is the theoretical prediction, and the points with error bars are data. The figure is an example of the so-called spectral analysis, which uses precision data by Planck on the CMB temperature over the whole sky as the input, and shows how much unevenness (expressed as "fluctuation") is seen in a quantitative manner. The horizontal axis corresponds to the fineness of the scale of the fluctuation, while the

vertical axis shows the magnitude of the fluctuation. One thing is surely seen from the figure even if you do not understand it, i.e., the theoretical prediction agrees quite well with data. This is a typical example of precision cosmology. The remarkable agreement is astonishing; humankind is able to uncover with precision what happened in more than 10 billion years ago!

The radiation consists of three entities, wavelength (color), intensity (brightness) and polarization (direction of oscillation). The frontier of CMB research after the observation by Planck is shifting to CMB polarization, which is not yet fully investigated. The primary motivation is that the CMB polarization, if observed with sufficient precision, will allow us to access the universe before the hot Big Bang. Humankind does not yet know what that looks like. We, however, know from all the cosmological observations done so far that the most promising idea is the cosmic inflation hypothesis.

Cosmic Inflation Hypothesis

The cosmic inflation hypothesis was proposed in the early 1980s. Its basic idea is very simple; it states that the universe went through an enormous accelerating expansion before it became a hot dense state, or a fireball. Since it resolves several problems of the naïve Big Bang cosmology^{*3} with one assumption only, it is regarded as the most promising hypothesis today. All the cosmological observations so far also indirectly support the hypothesis.

Given the explanation above, you might think that it is good enough to say that the cosmic inflation is the right answer. It is actually not that simple. The cosmic inflation contradicts the standard model of particle physics (the SM hereafter) we have today. The SM is a collection of most fundamental laws of physics. The universe follows the laws of physics with no exception. The problem is that the SM does

^{*3} See, for example, David Spergel "How Did the Universe Begin?" *Kavli IPMU News* Vol. 10 (Jun 2010), to see what problems can be solved by the cosmic inflation hypothesis.

not allow accelerating expansion of the universe; only deceleration is allowed. As long as we follow the SM, the universe should be like a car with brakes only; there is no accelerator you could press on.

Then you might ask if the cosmic inflation hypothesis should be ruled out because of the SM. The answer is NO! Here is an interesting point. The research of physics is like pinning down the rules of chess just by watching games; it should be very hard to accomplish it if you do not know any of the rules of chess. We do know that the SM today is incomplete. Many physicists including myself think that the ultimate laws of physics, which we do not yet know today, are written in "the rulebook of the universe," which should be able to create the inflationary universe and derive the SM at the same time. We already have a few attractive proposals for the ultimate laws of physics, which await experimental/observational tests. A representative example is superstring theory, which boldly predicts that the world consists of higher dimensions than the well-known 4 dimensions (3 for space and 1 for time), and the most elementary objects are not particles but strings.

Observation of Primordial Gravitational Waves (PGWs) through CMB Polarization

What observations will lead to a decisive test of the cosmic inflation hypothesis? Our answer is "primordial gravitational waves (PGWs)."^{*4}

Generation of PGWs is the most important prediction of the cosmic inflation hypothesis. The gravitational wave is a phenomenon that the space-time distortion propagates as wave. The accelerating expansion of the cosmic inflation generates gravitational waves. To distinguish from ordinary gravitational waves due to motion of astronomical objects, the inflationary gravitational waves are often called "primordial" gravitational waves. As we cannot decisively prove the cosmic inflation without

^{*4} See, for example, Katsuhiko Sato "Cosmic Inflation and Primordial Gravitational Waves," *Kavli IPMU News* Vol.26 (Jun 2014) p. 72.

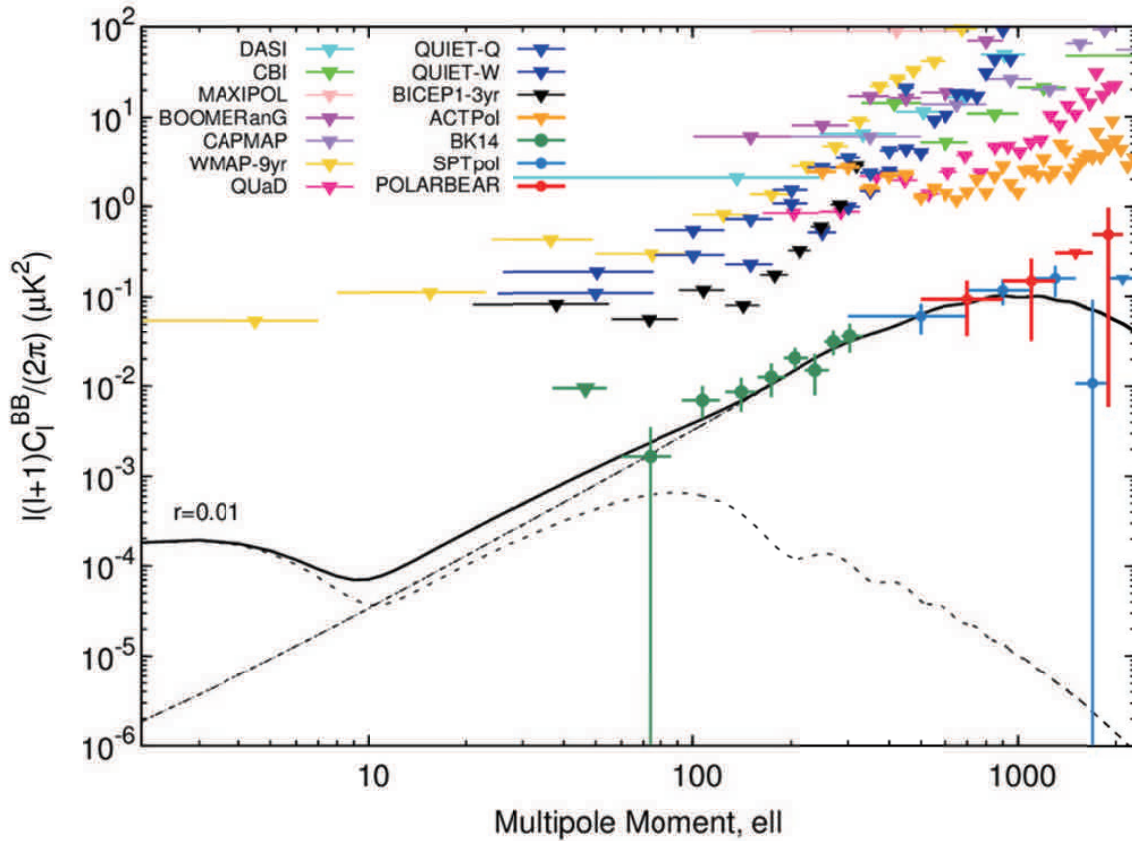


Fig. 2 The current status of CMB B mode measurements. The definitions of the horizontal and vertical axes are the same as those in Fig. 2. Circles (triangles) show the central values (upper limits). The dashed line is a theoretical prediction of the B mode signal due to the PGWs, which has not been confirmed by observation. An apparent B mode seen as the dot-dashed line is due to gravitational lensing of the CMB radiation, which has already been observed. The solid line shows the total from these two contributions. (Figure: courtesy of Dr. Yuji Chinone of Kavli IPMU and UC Berkeley)

detecting the PGWs, it is of crucial importance to observe them.

Let us explain the principle of the detection of PGWs with CMB polarization. It is predicted that PGWs, after generated during cosmic inflation, filled in the universe at the time of recombination and imprinted special curl pattern called “the B mode” in the distribution of CMB polarization on the sky (often called “the map”). Detection of the B mode in the polarization map is “smoking-gun” evidence for cosmic inflation. You might think that the method is analogous to detection of fingerprints.

Nowadays, there is a world competition on the CMB polarization measurements for discovery of

the PGWs. It looks like “the warlord era of CMB.”

There are several ground-based telescopes and balloon-borne instruments that are observing CMB polarization, or are in preparation. In Japan also, researchers at KEK and Kavli IPMU participate in an international collaboration and are observing CMB with a telescope in Atacama, Chile. If you want to know more about this ground-based project, named POLARBEAR, I suggest you read, for example, my book entitled “The Cosmic Microwave Background – in search for the signal from the universe before the Big Bang” (SHUEISHA paperback).

Figure 2 summarizes all the major results of the hunts for PGWs. As in Figure 1, which shows the

outcome of the spectral analysis of the temperature fluctuation, Figure 2 shows the results of the spectral analyses of the B-mode fluctuation. There are a lot of data (circles for central values and triangles for upper limits), but the point is that none of the results have indicated the signal of PGWs, which should appear as the dashed line from the prediction of the cosmic inflation hypothesis. To discover PGWs, one needs to carry out observations that are more sensitive than the results today at least by an order of magnitude. At the POLARBEAR project, for example, we plan to deploy three telescopes in total for higher sensitivities from the ground, which is called the Simons Array project.

To perform a decisive and ultimate measurement, one needs to cover the whole sky without contamination due to atmosphere. This means we need a dedicated satellite. In Japan, by reading the trends correctly, the CMB group at KEK started conceptual studies for a relatively small satellite already in 2008. This was the beginning of the LiteBIRD working group.

LiteBIRD Satellite

The LiteBIRD satellite was proposed to ISAS, JAXA in February 2015, and passed the initial down-selection. There have been more than 130 researchers who joined the working group for the conceptual design from KEK, Kavli IPMU, JAXA, Okayama Univ., National Astronomical Observatory of Japan, UC Berkeley, Max-Planck Institute for Astrophysics, etc. The group includes CMB experimenters, and X-ray and infrared astrophysicists.

Figure 3 shows an overview of LiteBIRD. It is the ultimate instrument for measurements of B-mode fluctuation as faint as a nano-Kelvin. Let me add more explanations for those who love instruments; from the sky side toward the detector system, the satellite consists of 1) a rotating half-wave plate system that modulates CMB polarization to reduce systematic bias due to imperfection of the instrument, 2) a reflective cryogenic telescope at

around 4 K, which consists of a primary mirror of about 80 cm in diameter and a secondary mirror, and a supplemental small refractive telescope dedicated to high-frequency measurements, 3) arrays of superconducting detectors with the base temperature of 100 mK, 4) readout system, 5) Joule-Thomson coolers and Stirling coolers, and 6) adiabatic demagnetization refrigerators. As WMAP and Planck did, we plan to send LiteBIRD to one of the Sun-Earth Lagrange points, L2, which is about a million miles away from the earth. With a scan strategy that looks like a spinning top with precession, we are able to survey the entire sky with great uniformity. Our superconducting detector arrays will observe the sky with 15 frequency bands between 40 GHz and 400 GHz. The general strategy of LiteBIRD is to have sufficient feasibility by using the detector technology that has been used in ground-based observations as proof-of-principle, and the cryogenic system as well as components for the satellite bus system that have high technology readiness levels based on past satellite missions.

Kavli IPMU plays a central role in moving ahead on the conceptual development of LiteBIRD. You might tend to think that Kavli IPMU is just for theoretical physics, mathematics, computer-based research and so on. We do have experimental facilities on the 1st floor of our IPMU building at Kashiwa campus, where we are doing R&D on instruments for LiteBIRD. Professor Matsumura, who is a world expert of the rotating half-wave plate system, is leading development and Dr. Sakurai is working on various measurements in the lab. Professor Sugai is investigating materials for reflective mirrors and plans for the test and verification of the optics. Professor Katayama is instrumental in introducing new instruments in our laboratory, and promoting collaborations with other research groups of the University of Tokyo. Of course studies with computer simulations are quite active. The current focus is on the method of separating foreground radiations from CMB. Dr. Eiichiro Komatsu, the director of Max-Planck Institute for Astrophysics and a new

Optics

- ◆ Modulation with half-wave plate
- ◆ 4K reflective telescope with a primary mirror and a secondary mirror (both about 80cm)

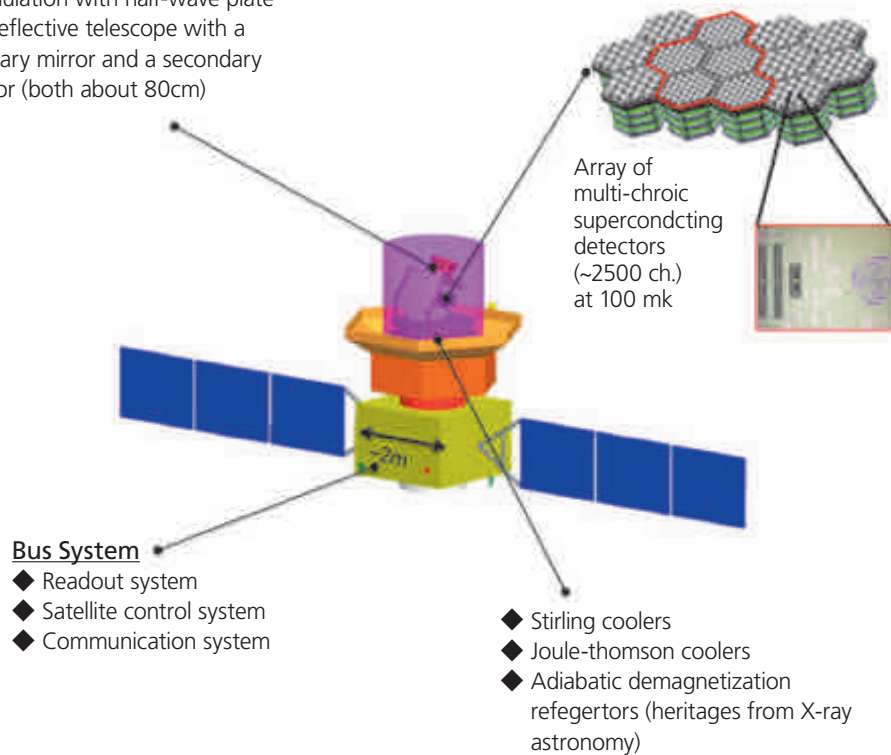


Fig. 3 Overview of the LiteBIRD satellite.

PI of Kavli IPMU, is conducting research on this important problem. At Kavli IPMU, there are several more researchers and visiting graduate students who are involved in R&D on LiteBIRD.

Conclusion

While two Nobel Prizes have already been awarded on the observations of cosmic microwave background, it is often said that beyond them the discovery of primordial gravitational waves will be a huge achievement. After all, it is the signal from the universe before the Big Bang! Observations from space by a satellite will play a key role in testing the

proposals for the ultimate laws of physics, such as superstring theory. It is true that it is a challenging experimental project. The members of LiteBIRD are working hard to improve the design as much as possible to pursue “the beginning of everything,” which invokes a great sense of wonder. Stay tuned!

Our Team

Tomotake Matsumura

Research Field: *Cosmology*

Kavli IPMU Associate Professor

I have been pursuing the research on the physics of early universe using the measurement of the cosmic microwave background (CMB) polarization. Currently, the measurement of the CMB polarization is known as a powerful tool to test inflationary models. While working on a CMB experiment is fascinating in terms of the scientific goal itself it is also exciting in terms of the nature of the experiment. A CMB experiment requires using broad areas of physics. It starts from relativistic cosmology to astronomy, thermal statistics, optics, superconductivity, mechanics, electromagnetism, and so on. Also the experimental techniques come with as simple as soldering wires (not actually simple!) to cryogenics, mechanical design and machining, parallel computing, and more. This makes me feel a tight connection between daily activities and an event at the early universe,



which may always look as if it is unreachable. The Kavli IPMU is a hub for scientists who are inspired by the fundamental questions and I look forward to working with you at the Kavli IPMU.

Satoshi Shirai

Research Field: **Theoretical Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor

The framework of the standard model and cosmology is demonstrating notable success in explaining nature. It is, however, clear that this is not the ultimate theory to explain everything. An obvious reason is this framework fails to explain the origin of the (dark) matter in the Universe.

My research aim is investigating the ultimate theory by studying closely the nature of the (dark) matter. In particular, I am now intensively studying the collider physics for efficient discovery/measurement of dark matter. I am also very interested in cosmic-ray signatures as a probe of dark matter. We will be getting deeper insights into dark matter for the next ten years, thanks to these observations.

I am excited that I will be working together with Kavli IPMUsers at this crucial time.



Anne Ducout

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

My research focuses on the Cosmic Microwave Background (CMB) analysis, mainly to constrain fundamental theories such as Inflation, and looking for primordial B-modes (primordial gravitational waves seen in polarization).

I previously worked on measuring the primordial non-Gaussianities, especially on Planck data.

More recently, I also worked on the instrumental analysis, for Planck but also for the POLARBEAR telescope, and here I will focus on LiteBIRD, a

Japanese-led satellite mission to detect primordial B-modes, particularly on methods to separate Galactic from primordial signals.



Our Team

Fabian Köhlinger

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

Shedding light on the physical nature of dark matter and dark energy, but also investigating the cosmological effects of massive neutrinos is the major motivation for my current research.

The weak gravitational lensing effect of the cosmic large-scale structure is very sensitive to the growth of structure in the Universe and hence to the evolution of these dark species.

Those kinds of weak lensing observations require



increasingly larger surveys and I have been working with data from two such surveys, i.e., CFHTLS and KiDS. Here at the Kavli IPMU I am especially looking forward to exploiting the statistical power of HSC.

Juliana Kwan

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I am a postdoctoral researcher interested in cosmology with large scale structure. I joined the Kavli IPMU in October 2016 from The University of Pennsylvania, where I worked on weak lensing within the Dark Energy Survey. I am particularly interested in using weak lensing as a probe for nature of cosmic acceleration, one of the most fundamental questions that plague modern physics. I am also interested in constraining the growth of large scale



structure, as measured by redshift space distortions. While at the Kavli IPMU, I will be working on a joint approach using both weak lensing and redshift space distortions as measured by the Hyper Suprime-Cam survey to address this problem.

Matthew Murdoch

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

The EGADS (Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems) detector was originally constructed as part of an R&D program for the gadolinium doping of the Super-Kamiokande detector. With its R&D mission largely completed, EGADS (re-branded Employing Gadolinium to Autonomously Detect Supernovas) will become a dedicated supernova detector capable of autonomously announcing a galactic supernova burst within one second of first



neutrino arrival and providing a valuable warning for the astronomy community. My research is focused on maximizing the sensitivity of EGADS through neutron tagging, simulation development, and analysis of cosmic-ray induced backgrounds.

Francesco Sala

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interests are algebraic geometry, geometric representation theory, and mathematical physics. At the moment I study different realizations of Hall algebras and their refined versions (K-theoretical/cohomological) by using (Higgs) sheaves on curves. One can construct geometric representations of these algebras by using the K-theory/cohomology of moduli spaces of torsion-free sheaves on resolutions of A-type toric singularities



and Nakajima cyclic quiver varieties. This yields to applications in physics, most notably in four-dimensional supersymmetric gauge theories on A-type ALE spaces and the AGT conjecture for these theories.

Tomomi Sunayama

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research interests lie between theory and observation related to cosmology. In particular, I am interested in how we can use galaxies to explore dark energy, dark matter, and early universe physics. During my Ph.D., I studied how to construct galaxy mock catalogs using large N-body simulations as well as some cosmological probes using galaxies such as the baryon acoustic oscillations (known as a “standard ruler”) and redshift-space distortions. These research projects provided me with appreciation for the



interplay between theory and observation. Increased survey volumes in upcoming galaxy surveys such as PFS (using the Subaru telescope) will enable us to measure cosmological parameters with much better precision and I think that this is a really interesting time for cosmologists.

Gabi Zafrir

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research focuses mostly on supersymmetric higher dimensional quantum field theories. These are interesting both from the study of quantum field theory in general and due to their connection with string theory on one hand and theories in lower dimensions on the other. The last connection is given by compactifying the higher dimensional theory to lower dimensions, and has proved insightful, for example, in the study of four dimensional theories



with 8 supercharges. I study all these aspects to better understand quantum field theories, in both lower and higher dimensions, and string theory.

Our Team

Data Science and Natural Science

Shiro Ikeda

Professor, The Institute of Statistical Mathematics, The Research Organization of Information and Systems, and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

The word “science” means “the deepening of and distribution of knowledge of a subject.” When the subject is a natural phenomenon, we call it natural science; if the subject is society, we call it social science. The subjects studied in the Kavli IPMU are physics and mathematics; therefore, they fall into the categories of formal science and natural science. In my institute, the main subject is the methodology of data analysis. Therefore, we call our science “data science.” To be precise, our subject is “to deepen and distribute the knowledge of data analysis.”

Recently, the fields of data science, including statistics, machine learning, and artificial intelligence, are attracting a great deal of interest from both academia and industry. The amount of data is increasing rapidly as measurement technology advances and the internet expands, while data science is becoming powerful as applied mathematical methods advance and computational power increases. It is expected that combining these two elements will bring new innovations.

Data science consists of theoretical and practical studies. As for the theoretical side, I have studied information geometry, which applies differential geometry to information theory and statistics. On the



The author reports his research activities in collaboration with Kavli IPMU researchers to the External Advisory Committee of the Kavli IPMU on August 22, 2016.

practical side, I have been working on astronomical data analysis for several years. Since last year, I have been a visiting scientist at the Kavli IPMU, and I am starting new collaborations. Each project of the Kavli IPMU is interesting from the data scientific viewpoint. Some of them are listed below.

For the last two years, I have been participating the Subaru/Hyper Suprime-Cam (HSC) survey project through the Japan Science and Technology Agency (JST) CREST Big-Data research program (PI: Naoki Yoshida). The HSC repeatedly takes images of target fields, and one of the tasks is to find new supernovae from image subtraction (see Fig. 1). Although the number of candidate transients detected from the

image subtraction is more than 50,000 per night, the expected number of supernovae is around 50. In order to discover good supernova candidates, an automatic detection system must be implemented. We have developed a type Ia supernova detector using machine learning technique in collaboration with NTT Communication Science Laboratories. The detector is used for real observations.

I have started discussions with researchers working on experiments conducted at Kamioka. In both T2K and XMASS, whose scientific goals are different, it is essential to find the target events from a vast amount of data. A natural strategy for event detection is to compute the probability of the target events based on physical models. We need to develop a method to compute the probability quickly. We will continue discussions for possible contribution.

LiteBIRD is a future satellite project to measure temperature fluctuations in the CMB. The fluctuations are much smaller than the foreground emissions, and the separation based on their statistics would be essential for the measurement. For the Planck data analysis, an Independent Component Analysis (ICA) method, which was developed in the 90s, was applied. I studied ICA methods when I was a post-doctoral fellow, and am expecting to apply them to new data.

When we collaborate with researchers in other fields, just receiving data via e-mails and sending the results back does not work properly. Sometimes their expectations of data science are too high, and

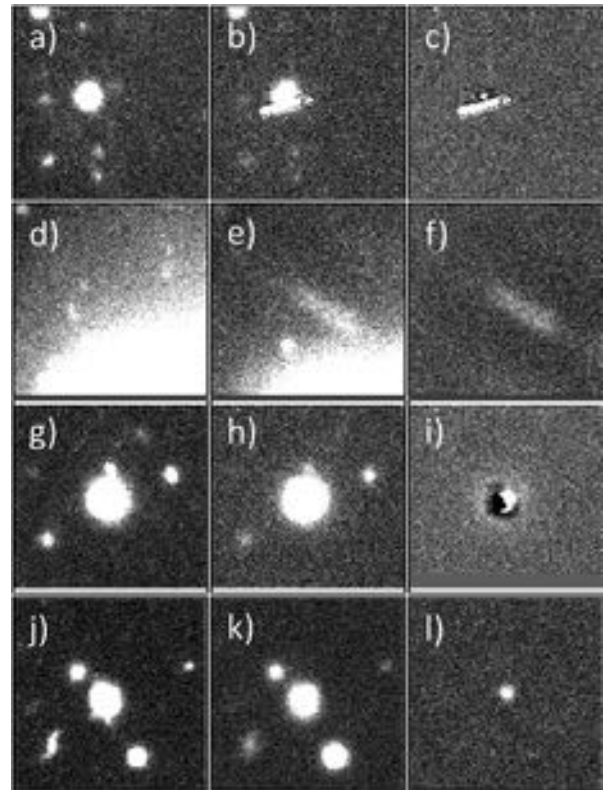


Fig. 1. Examples of real and bogus objects obtained with Subaru-HSC. The left, middle, and right columns show the reference, new, and difference images, respectively. Each row shows the cosmic ray (a–c), ghost near a bright star (d–f), inaccurate image convolution or astrometric alignment (g–i), and a real transient located in a galaxy (j–l).

sometimes our understanding of the data is not sufficient. In either case, one of the main reasons for misunderstanding is a lack of communication.

An important role of a data scientist in a project is the consultation of data analysis. It is important to have discussions to understand the data and what data science can do for it. I have just started collaborations with the Kavli IPMU. I am looking forward to participating in different projects.

Statistics, Quantum Information, and Gravity

Hirosi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

Unification of general relativity and quantum mechanics has been one of the holy grails of modern physics. After the discovery of the Ryu-Takayanagi formula for the entanglement entropy 10 years ago, it has become increasingly clear that information theory provides powerful tools to study quantum gravity and quantum field theory. In turn, the study of quantum gravity has provided a new set of problems that information theorists can study and stimulated its progress.

In the past, the Kavli IPMU has successfully hosted Focus Weeks at the interface of high energy physics and condensed matter physics, and they have led to new collaborations between theorists at the Kavli IPMU and condensed matter theorists at other institutes. The purpose of this one-day conference is to explore another interface area, between high energy physics and information theory.

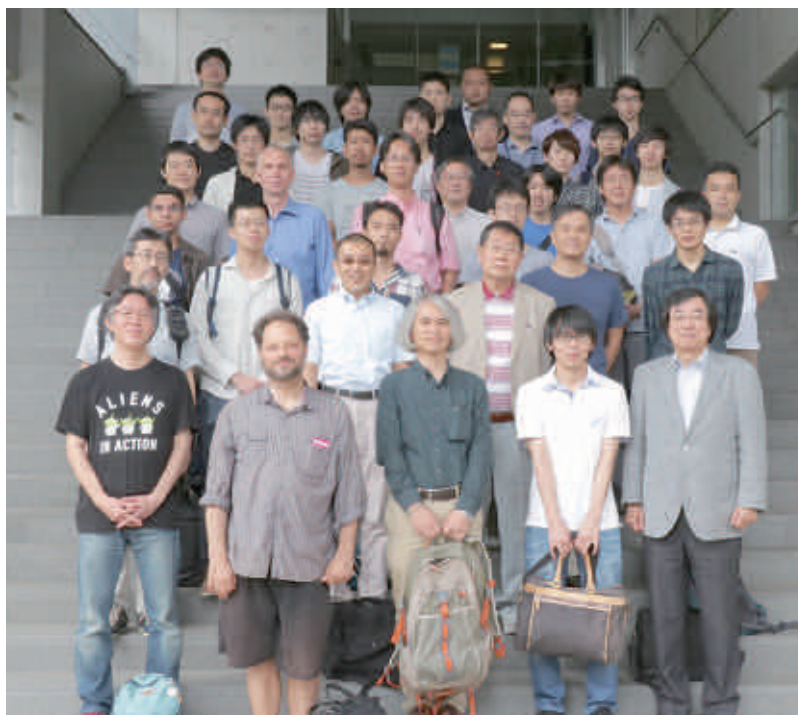
We invited a broad range of scientists as speakers: Masanao Ozawa (who studies quantum information theory and foundations of quantum mechanics), Hal Tasaki (who studies fundamental questions in statistical mechanics), Takahiro Sagawa (who studies non-equilibrium statistical mechanics, quantum measurement, control and information theory), Yasuyuki Kawahigashi (who studies operator algebras, which are

important for quantum field theory), and Simmeon Hellerman (who is at the Kavli IPMU and studies string theory, which is the leading candidate for the unification of general relativity and quantum mechanics).

Ozawa is well-known for his discovery of “Ozawa inequality” in quantum measurement theory. The conference opened with Ozawa’s talk, in which he discussed measurement theory in quantum field theory. He was followed by Kawahigashi, who discussed operator algebraic approach to conformal field theory, which is an important class of quantum field theories, relevant to many aspects of string theory and AdS/CFT correspondence. In the afternoon,

Tasaki discussed thermalization of statistical systems and Sagawa used information theoretic methods to discuss fundamental questions in statistical mechanics. The conference ended with a talk by Hellerman, who pointed out an issue with defining quantum entanglement in quantum field theories with non-vanishing gravitational anomalies.

The conference offered an excellent opportunity for scientists with such a broad range of backgrounds to interact with each other. We hope to foster such interactions further and encourage collaborations between high energy physics and information theory.



Workshop on Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry IV

Alexey Bondal

Kavli IPMU Principal Investigator

The year 2016 was final for the bilateral Japanese-Russian project “Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry.” It was financially supported jointly by JSPS and Russian Foundation for Basic Research (RFBR). The project is governed by Kyoji Saito and Alexey Bondal.

In 2016, the series of events started in 2015 was continued. A conference “Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry III” under the auspice of this project was organized by the Kavli IPMU, Steklov Institute, Higher School of Economics in Moscow (where this conference was held) and the Institute of Fundamental Science on September 12–16. Members of the Kavli IPMU participated, as well as mathematicians from the Graduate School of Mathematical Sciences of Tokyo University, Osaka University, Tokyo Metropolitan University, Steklov Institute in Moscow, Higher School of Economics in Moscow and from other institutions in Britain and Poland.

Another workshop “Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry IV” took place at the Kavli IPMU in the week of 14–18 November 2016. Further exchange of ideas and cooperation between Japanese and Russian participants of the project as well as with other Russian and Japanese scientists took place.

A particular attention was given to birational transformations and their mirror symmetric partners. Constructions of derived equivalences of algebraic varieties given by both birational and nonbirational varieties

were discussed. Noncommutative mirror partners of ordinary algebraic varieties were scrutinized. The foundational base of the theory via properties of DG-enhanced categories, introduced by A. Bondal and M. Kapranov almost 30 years ago, was carefully studied.

The work of analytical invariants constructed by means of mirror symmetry was presented in several talks from the Japanese side. As in the events of the previous year, many talks of the workshop were devoted to the study of one of the sides of the mirror and/or to comparison of the two.

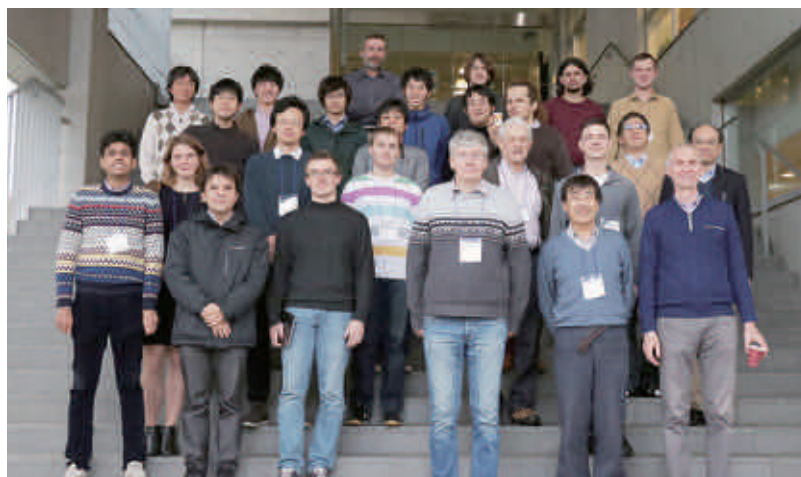
Mikhail Kapranov outlined a new perspective in his talk on higher Kac-Moody algebras and derived moduli spaces of G -bundles. He developed a generalization for higher dimensional varieties of one of the fundamental features of the Conformal Field Theory on Riemann surfaces, that is the action of the current (Kac-Moody) algebras on the moduli space of rigidified G -bundles.

A young Japanese mathematician T. Kuwagaki presented his powerful result on coherent-constructible correspondence. The first observation and results of A. Bondal on equivalence of derived categories of coherent sheaves on toric varieties with the derived categories of constructible sheaves on the real torus

subordinated to a suitable stratification was developed by a range of authors into a general conjecture of such equivalence for toric stacks. The conjecture can be interpreted in terms of mirror symmetry by identifying the constructible side with the relevant Fukaya category. T. Kuwagaki reported on his proof of the conjecture in full generality.

The cooperation with physicists was particularly fruitful. Kentaro Hori presented mathematical conjectures about derived equivalences of some Calabi-Yau varieties based on consideration of a two parameter gauged linear sigma model that has six phases. It can be regarded as a two parameter extension of Hosono-Takagi model. Sh. Hosono in his turn described a series of examples of mirror symmetric partners for Calabi-Yau varieties that have infinite birational automorphisms and identify these automorphisms with monodromy transformations in their mirror families.

A young Russian mathematician Andrei Yonov developed the physics proposal of A. Belavin that the Witten’s descent deformation of the chiral ring should correspond to the certain K. Saito’s primitive forms for the Gepner singularity. Yonov constructed by purely mathematical tools primitive forms for Gepner singularities.



Resurgence at Kavli IPMU

Aleksey Cherman

University of Washington Postdoctoral Research Associate

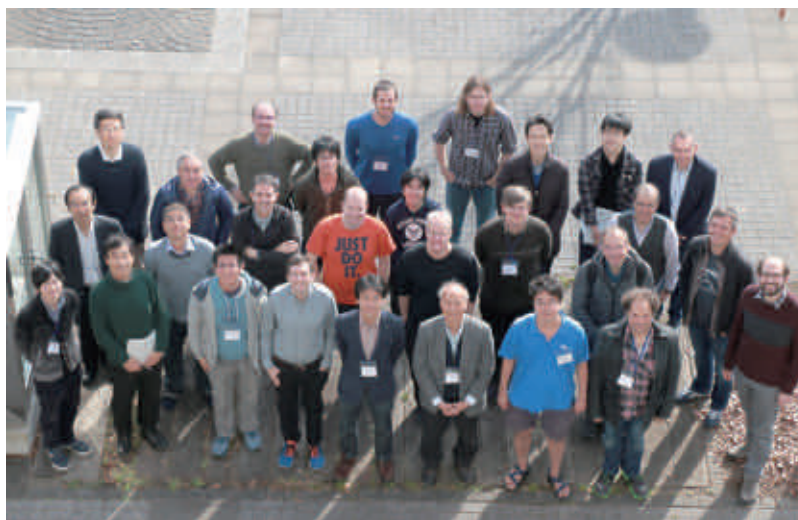
The “Resurgence at Kavli IPMU” was held from December 12 to 16, and focused on surveying recent developments in resurgence theory and related topics. Resurgence theory is a framework to systematically construct solutions to non-linear problems arising in physics and mathematics. For example, one may want to construct solutions to non-linear differential equations, or to write expressions for observables in a quantum field theory (QFT) as a function of its coupling constants. The starting point for the analysis of such problems is of course perturbation theory around a linearized limit. But perturbation theory alone is usually not enough, because it produces divergent asymptotic series, and the result is not valid non-perturbatively. Resurgence theory allows one to develop exact solutions by systematically putting together perturbative expansions around different linearized limits. For example, in QFT, this involves understanding how perturbative fluctuations around various instanton-like sectors fit together to produce an unambiguous result valid for any value of the coupling constants.

The workshop was highly international, with participants from Europe, North America, South America, and Asia. The talks highlighted exciting developments along several directions. Many talks, for example by Y. Tanizaki,

T. Schafer, E. Poppitz, P. Putrov, G. Basar, and T. Misumi, discussed the relation between resurgence theory, which gives an algebraic perspective on semiclassical expansions, and Lefschetz thimbles, which give a geometric perspective on the same topic. A. Cherman and T. Sulejmanpasic gave overviews of techniques necessary to produce smooth weakly-coupled limits for asymptotically-free QFTs, which is a necessary step to apply resurgence theory techniques. O. Costin and G. Dunne announced intriguing results on practical new methods for summation of semiclassical expansions and relations between perturbative and non-perturbative effects. R. Schiappa and M. Yamazaki explained recent developments in applications of resurgence theory to string theory and

supersymmetric gauge theory, while T. Aoki, Y. Takei, and A. Getmanenko presented advances in the study of the WKB expansion and related topics in resurgence and Stokes phenomena.

The format of the workshop was focused on leaving as much time for informal discussion as possible, with most days having two talks in the morning and two in the evening, and plenty of tea and cookies placed near blackboards to trigger interactions. Kavli IPMU’s wonderful staff and facilities provided an excellent and stimulating environment, and the workshop was very successful, with many participants remarking that they developed new research ideas from the talks and interactions with other researchers.



Dream of the Monkey*1

from diary, entry dated July 20, 2010

Kyoji Saito

Kavli IPMU Principal Investigator



A beer party was held for the first time on the roof of the IPMU building. I was talking with Takada-san*2 and Kato-san.*3 Takada-san said, "In the eyes of Kato-san, IPMU researchers are something like monkeys or aliens. Though," he continued while glancing at Murayama-san, "it may well be that some of them are human beings." "Whee! I'm a monkey! If I remember my past life correctly, I should have fallen into the realm of hungry ghosts this time — have I come up to the animal realm?*4 I don't really feel that I have risen to a higher realm, but I am glad I could become a monkey." While I was thinking things like that, I awoke from my dream.

In the innermost depth of mountains — this is where I was born and bred. Now I see that I have been a monkey from the beginning. But I fought against the boss monkey of my home mountain. Eventually I left that mountain and acquired a mountain of my own, my own territory. Now I have a large family and a lot of fellow monkeys. But I am somehow lost in thought these days. I am the boss of this mountain! I can do whatever I want here. But something is missing.

What are the stars twinkling in the sky, up where I cannot reach? Why am I here? I wonder what I

am. I don't understand at all! Nevertheless, I desperately try to understand.

I heard that human beings are trying to understand what is beyond the stars using something called Subaru. I heard that, using something called LHC, they are trying to understand what is happening in an extremely tiny world. Imagine this whole mountain squeezed into a grain of sand, and then further squeezed by the same amount... what could be going on in such a tiny place? I also heard that in the world of humans, they have something called mathematics, which enables them to see the truth across the entire history of the universe — from its beginning to its very end.

Aaah! I wanna be a human being! As a human being, I wanna understand what I am. I wanna understand the universe. I heard that a priest travelling in quest for the truth will pass through here in five million years from now. I've got it! I'm gonna follow him and see what the truth is...

This was why I called my family and fellow monkeys to the mountain. "You have always taken care of me. I'm grateful for it. But today I'll go down the mountain to start a journey. I'll follow a priest who shall

pass near here in five million years. You must not concern yourselves about me. I'm counting on you to take care of everything regarding our mountain from now on. You guys, get along with each other!" I was cool but irresponsible in saying these things. Then I came down the mountain.

After an unspeakable five million years of wandering — there were countless things that happened during the journey; it is impossible to give a short summary — I was thinking, "At last, tomorrow I'll be able to meet the priest whose name is Hitoshi Sanzang.*5" Then, I awoke from a dream, again!

What in the world is this? It may be that I'm also in a dream, from which I should awake. So, I've written down my dream before I forget it.

*1 Inspired by Zhuangzi's *Dream of the Butterfly* (see, for example, <https://en.wikiquote.org/wiki/Zhuangzi>).

*2 Masahiro Takada, who was an IPMU Associate Professor at that time. (Now he is a Kavli IPMU Professor.)

*3 Yasuhiro Kato, who was head of the Accounting and Finance Section of the IPMU Administration Office at that time.

*4 For more information regarding the Karmic wheel of life, see, for example, <http://www.onmarkproductions.com/html/six-states.shtml>.

*5 See, for example, [https://en.wikipedia.org/wiki/Xuanzang_\(Journey_to_the_West\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Xuanzang_(Journey_to_the_West)).



Science and Art Today

Norimichi Hirakawa

Limits of Imagination

Considering that one of the functions of modern art is rediscovering or extending the *world* based on the concept of *beauty* or *sublimity*, it is hard to imagine that the conventional method, in which artists have been creating something by themselves based on their own imaginations, is still effective. This is because the picture of the world presented by science is unusual and goes against common sense to the extent that it goes beyond the scope of artists' imagination.

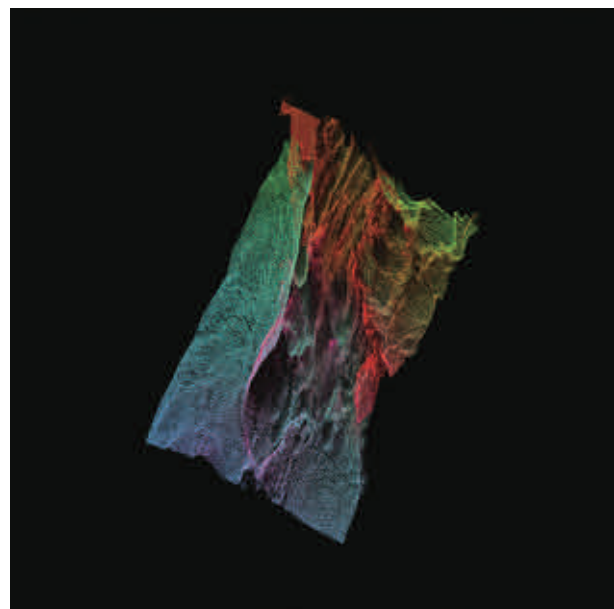
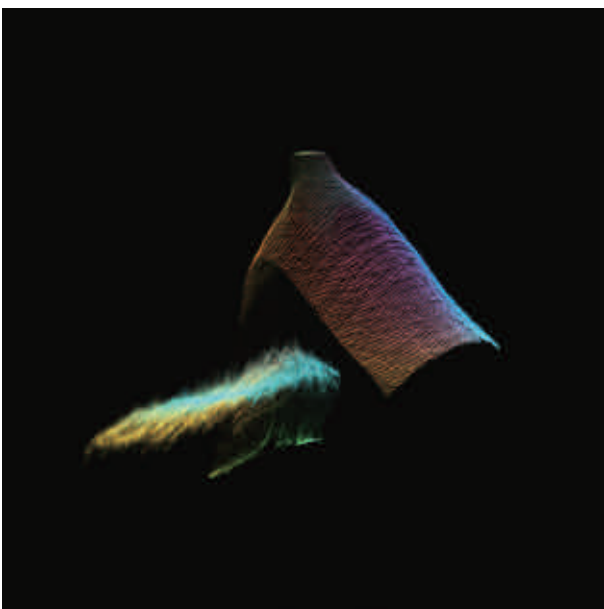
Programming as a Technique of Expression

Artists have always been working with technology. Needless to say, technology includes a pencil, a brush, and a sheet of white paper. Digital technology is a remarkable modern technology. There are a number of techniques of expression utilizing digital environments. However, drawing

a picture on the screen with a computer mouse—though it is an analogy of reality—cannot be considered a technique utilizing the essential nature of the computer as computing machinery, for instance. An effective method to extract the power of a computer as a piece of computing machinery is computer programming. As far as we rely on GUI (graphical user interface) we cannot create what exceed our physical abilities, but writing computer code makes it possible to exploit the computer's computing power with its amazing velocity and accuracy that far exceed our abilities for creating something.

“Computation” as a Technology

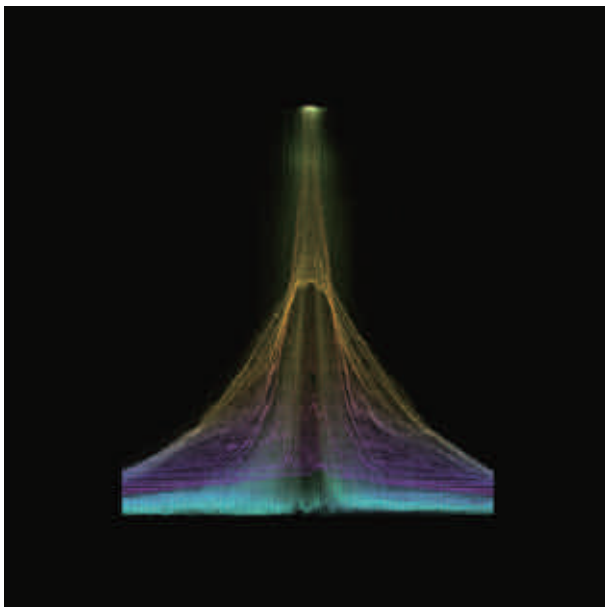
What is the most fundamental technology involved when we represent something by writing a program? Considering that a single algorithm can be expressed by multiple programming languages,



we understand that programming itself is not an essential technology. A truly essential technology must be “computation” itself. I think it is the most primitive technology created by human beings who can handle symbols.

Does “Computation” Create Artwork beyond Imagination?

What is the crucial difference between creating something by letting the computer compute and that by our own hands based on imagination? I think, ultimately, it is whether or not the created result is what we expected. As long as human beings create something with their hands, they have images of final drawings no matter how crude they may be, and these final drawings are drawn by imagination. On the other hand, when we create something through programming, we can think of a sequence of operations such as “*for all the pixels of a given digital image data, divide the green value by the red value, and substitute the result for the blue value.*” but it is difficult to predict the result. However, it is possible to write an entire program without knowing the result, based on the logical system of a programming language. If the entire program is logically consistent, it is executable. Upon looking at the result of the executed program, then, there emerges a feedback structure which becomes key to going beyond imagination in creating artwork. It is an infinite loop of modifying the initial values or the algorithm of the program



as a result of computation and then executing the modified program. I think this is one of the purposes of creating representations by computer technology—to discover *beauty* or *sublimity* that surpasses human imagination.

Artist-in-Residence at the Kavli IPMU

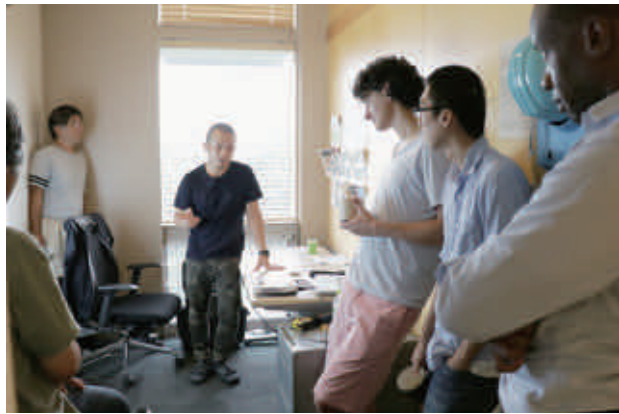
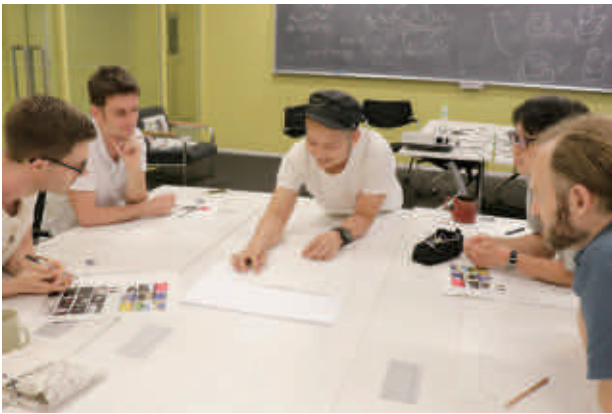
During my residency at the Kavli IPMU, I spent time thinking about what to create by how to compute what, with a hint of the concept of *dimension*. As a result, I managed to formulate one idea. It is the idea of considering a digital image as a set of points in 5-dimensional Euclidean space, by interpreting the five numbers that each pixel has—coordinates X and Y, representing the position on the image, and R, G, and B (red, green, and blue), representing pixel's color—as the coordinates of a point in 5-dimensional Euclidean space, and to observe a different aspect of the image by rotating it in this 5-dimensional Euclidean space. Mathematically, rotation conserves the distance between any two pixels, and of course inverse rotation restores the original image. In other words, it is something like watching a sculpture as you are walking around it. Mathematically, this is a feasible idea, but, again, it was not possible for me to imagine what kind of image was obtained by rotation. However, while I was addressing this program during my residency, it was possible for me to empirically learn which plane of rotation corresponds to what kind of change on the image.

Work created during the residency: “sunset” [(from left to right) gradation, complexity, spot] 2016, digital C type print series, 680 × 680 (mm).

These images are outputs from different input data (photographs of sunsets) with arbitrary parameter values of 5-dimensional rotation (see below). It is assumed that the “beauty of the sunset” unconsciously felt by us can be represented by the following three factors or their combinations:

1. Color gradation of the sky as compared to the ground,
2. Complexity of the shape and shadow of the cloud, and
3. The sun itself, felt as a white bright circle.

Considering digital pixels as 5-dimensional points (XY+RGB), the shape and the color gradation can be interchanged. Using this fact, I searched for the “beauty of the sunset,” which can be felt even if the “sunset” itself cannot be recognized as a result of the rotation.



(Upper left) A workshop was held for Kavli IPMU scientists. First, participants evaluated artworks of 14 media artists based on 10 items such as *simplicity*. This way, they understood the viewpoints for evaluating artworks. They then thought out ideas of installation artworks. Four scientists (astronomer, theoretical physicist, mathematician, etc.) participated the workshop and enjoyed the discussion.

(Upper right) An occasion of showing how the artist was working in the office to Kavli IPMU scientists. The artist explained his theme and progress of the work at this residency, using projected images.

(Left) A total of about 2800 people visited Open Campus Kashiwa 2016. On this occasion, the outcomes of residency were exhibited. Through two days of Open Campus, the artist explained his artworks to visitors. According to questionnaire from visitors, this exhibition gained a very good reputation with impressions such as "Fantastic!" and "Interesting though difficult."

Art & Science

Art & Science, or Art-Science collaboration, may be taken as something good, but I think it is actually very difficult, or rather almost impossible. First of all, science and art are different systems, each describing the *world* using a different language. This inevitably leads to the situation that the more they deepen, the more mutual understanding becomes difficult and the less they need each other. At the present time, science does not need art; it is a system that has

developed in this way. On the other hand, art does not need to understand cutting-edge science, and painting has developed by sharpening subjectivity rather than objective realism since appearance of the camera. The meaning of Art & Science is not self-evident. However, it is obvious that the motivating power of some scientists and artists comes from such common fundamental questions as "What is the world made of?" "What is time?" and "Where do we come from?" I wonder what it does mean.

Artist Interview

(by Kavli IPMU Public Relations staff)

What pieces of artwork are you creating?

Mostly I create installation artworks using images obtained using computer programming. While combining various materials such as algorithms and real photographed images, I am thinking, for example, about how I

can create what cannot be produced by human hands only, or whether it is possible to represent something by continuing the computing process itself.

How did you find creating artwork under the "condition" of residency at the Kavli IPMU?

As there were a variety of scientists, it was possible for me to ask some of

them questions as needed in trying an algorithm that I had not tried before. So, expecting that the algorithm itself would change while it was developed, I intentionally tried to think and create something without setting goals as much as possible. In the end, I was advised on how the same algorithm can be used rather than changing it, and to what motif I should apply it to expect interesting results.

Also, I think it was one of the conditions to, as much as possible, create something as an accumulation of processes that can be logically explained, without an artistic jump or a connection of thought. I think it was not intentionally imposed, but rather it occurred spontaneously owing to the environment of residency at the Kavli IPMU, a research institute in fundamental science. After the residency, now I think it was very constrained. However, we rarely experience this kind of thing in the world of art and artists only. When I returned to everyday life, suddenly memories of experiences at the residency came back, and the way of thinking I had learned there showed itself as pieces of work after a long time. I would say that these are the outcomes of the residence.

You are highly recognized for huge video installation pieces, which somehow conceptually or philosophically examine and present the laws that control nature, by using the computer's "computing function," and you are regarded as a young leader of media art in the contemporary art world. How do you evaluate your pieces "sunset" created from the viewpoint of a programmer who designs computing, and from the viewpoint of an artist who completes the computed results as pieces of work?

As a programmer who designs computing, I evaluate "sunset" as follows. It is a program dealing with a five-dimensional digital image data having spacial coordinates X and Y and color coordinates R, G, and B, but I have developed it as a program applicable to any dimensions depending on the computing resource.

In fact, I have already created and exhibited the piece "datum" by dealing with image data pixels as digital points in six-dimensional Euclidean space. I would say that it is a success in the sense that it was designed and developed as a general program which, in principle, can deal with Euclidean space of any dimension. Regarding your second question with respect to the level of completion of my work, I could see that a *curve* in the spatial coordinate system appears as *gradation* in the color coordinate system and vice versa, as a result of five-dimensional rotation which mixes spatial and color coordinates. However, I have to say that it is insufficient to refer to whether these two are also interchangeable to the human eye which recognizes beauty. Further, I think that while it would be possible to see if they are interchangeable by means of a method which is somehow similar to scientific one, a jump of subjective thinking would be needed to make pieces of work as art based on these observations. So, it is likely that this would become something that takes a very long time, like my life work.

You obtain the image data of three primary colors in the two-dimensional plane by taking certain four-dimensional space-time pictures in this *world* by means of an optical instrument (camera), and reconstruct them by regarding these data as a set of points in the five-dimensional Euclidean space. Was it possible for you to get some clues about the relation between things and truth (the laws of physics or beauty) while you were having the experience of transforming several hundred times the familiar outputs of three primary

colors in the two-dimensional plane into the outputs obtained through rotations in the five-dimensional space, of which humans cannot recognize all the directions at the same time?

While I have been repeating my work, at a certain point it came to me that I could expect – though not completely, but to some extent – the image that can be obtained by rotating the original one in the coordinate system which combined the color coordinates and spatial coordinates, both visible in my eyesight. Then I felt how the potential of human brains is constrained by the phenomena occurring in the world which we are looking at and appealing to our senses. If phenomena occurring before our eyes are sufficiently rich, human brains can sense something from them and learn their pattern. Conversely, I have come to feel as if the real phenomena we can observe at the respective places in this universe are very restrictive, and this constrains the potential of the human brain. I feel that there are visual experiences which never result from observation of natural phenomena before our eyes, but which bear logically explainable beauty; namely, there exists *beauty* or *sublimity* beyond the universe as a totality of the nature that is observable by the mankind.

What is your plan for the future?

As for a big plan, I will hold a personal exhibition in Breslau, Poland in March, 2017, so I am preparing for that. It will be a big opportunity to present the outcomes of my residency at the Kavli IPMU as a package of artworks.

Minister of State Yosuke Tsuruho Visits Kavli IPMU

On November 11, Minister of State for Science and Technology Policy Yosuke Tsuruho visited the Kavli IPMU, accompanied by Yoshio Yamawaki (Director General for Science, Technology and Innovation of Cabinet Office), Yasuyoshi Kakita (Director, Promotion Policy Division, Research Promotion Bureau of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), and other government officers.

Director Hitoshi Murayama began by presenting an overview of the Kavli IPMU and its research activities. He also explained the World Premier International Research Center Initiative (WPI) as well as the present status of the SuMIRE project conducted under the Cabinet Office's Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology (FIRST) and the applications and technologies derived from basic research. Then, after having looked over the Kavli IPMU building, the guests joined researchers and talked with them at tea time. (See a picture on page 3.)

Toshiyuki Kobayashi Selected as a Fellow of the American Mathematical Society

On November 1, 2016, the

American Mathematical Society (AMS) announced the list of the 2017 Class of Fellows; University of Tokyo Graduate School of Mathematical Sciences Professor and Kavli IPMU Principal Investigator Toshiyuki Kobayashi was among those selected. The AMS has recognized his contributions to the structure and representation theory of reductive Lie groups. Professor Kobayashi has paved the way for a new mathematics via his research on the theory of discontinuous groups, branching laws of infinite-dimensional representations, and global analysis of minimal representations, and pioneered revolutionary breakthroughs in mathematics.



Toshiyuki Kobayashi

The Fellows of the American Mathematical Society program was inaugurated in 2012. It recognizes members who have made outstanding contributions to the creation, exposition, advancement, communication, and utilization of mathematics. *The responsibilities of Fellows are to take part in the election of new Fellows, to present a "public face" of excellence in mathematics, and to advise the President and/or the Council on public matters when requested.**

Tadashi Takayanagi Awarded the 2016 Nishina Memorial Prize

On November 10, 2016, the Nishina Memorial Foundation announced that the 2016 Nishina Memorial Prize was to be given to Kyoto University Yukawa Institute for Theoretical Physics Professor and Kavli IPMU



Tadashi Takayanagi

Visiting Senior Scientist Tadashi Takayanagi for the discovery and development of the holographic entanglement entropy formula.

The holographic entanglement entropy formula, which Tadashi Takayanagi and his colleague Ryu Shinsei published in 2006, is now widely known as the Ryu-Takayanagi formula and regarded as an important formula in theoretical physics. Professor Takayanagi's leading contributions to the development of the Ryu-Takayanagi formula over the past 10 years and to elucidation and application of the mechanism of the holographic principle have been recognized.

Kyoji Saito Awarded the 2016 Kiyoshi Oka Prize

On December 3, 2016, Kavli IPMU Principal Investigator Kyoji Saito was awarded the inaugural



Kyoji Saito

Kiyoshi Oka Prize. The award ceremony was held at the beginning of the 15th Oka Symposium at Nara Women's University in Nara City.

The award bears the name of world-renowned mathematician Kiyoshi Oka, who was a professor emeritus at Nara Women's University. Established in 2016, the prize is given to *mathematicians who have found interesting problems and solutions, have broken new ground in mathematics, and have made promising discovery and innovation for future mathematics.***

Professor Saito is a world-class mathematician in the field of complex geometry. He has been working

* Cited from the AMS Fellows Program Document.

** Cited from http://www.nara-wu.ac.jp/omi/oka_prize_en.html

on various subjects in complex geometry and representation theory. In particular, his theory of primitive forms and their period maps, and theory of elliptic Lie algebras and their representation theory have had a wide influence not only in mathematics but also in physics, including superstring theory and topological field theory. These achievements, which have led to new developments, as well as his longtime contributions to the mathematics community, have been recognized.

Kavli IPMU Staff Received the University of Tokyo's Special Award for Operational Improvement in 2016

The Kavli IPMU Administrative Division team, represented by Rieko Tamura of the International Relations and Researchers Support Section, received the University of Tokyo's 2016 Special Award for Operational Improvement. The team consists of 20 members that took part in the "Win-Win Project towards University Globalization." The Awards for Operational Improvement is divided into three ranks: the President's Award, the Executive Vice President's Award, and the Special Award given by the University's Division for Operational Improvements. Every year, teams of university staff members are invited to implement ideas for operational improvement, and the awards are given to teams that have shown excellent achievements.

The Kavli IPMU team planned and implemented two programs: "Lunchtime English Training" and "Language Exchange with IPMU Researchers." These programs raised the English proficiency of administrative staff, and reduced inefficiencies around English

language-related tasks. In addition, "Language Exchange with IPMU Researchers" is a program carried out between Kavli IPMU staff and researchers from abroad. It is a win-win program as recognized by the award: the exchange is an opportunity for the researchers to improve their knowledge of Japanese language and culture.

Open Campus Kashiwa 2016

On October 21 and 22, 2016, the University of Tokyo's Kashiwa Campus held an open campus under the banner "Kashiwa Knowledge: Discover and Experience."

At the Kavli IPMU lecture hall, two public lectures were given. On the first day, Kavli IPMU Associate Professor Naoyuki Tamura spoke about "A Survey of the Universe with the PFS (Prime Focus Spectrograph), A New Spectrometer for the Subaru Telescope, Will Observe an Unprecedented Number of Galaxies and Stars at the Same Time." The next day, Kavli IPMU Director Hotoshi Murayama spoke about "Ripples in Spacetime—Gravitational Waves Open Up a New Way to Probe the Universe —." (See pictures on page 3.) In addition, Kavli IPMU Professor Naoki Yoshida and Kavli IPMU Artist-in-Residence Norimichi Hirakawa, a media artist who stayed at the Kavli IPMU twice in July and September 2016, had a conversation about "Common Features between Science and Art."



Naoyuki Tamura, giving a lecture.

The Kavli IPMU also presented a two-day program including an exhibition of artist Hirakawa's new media art pieces inspired by his residence at the Kavli IPMU, "Research at Kavli IPMU" poster presentations, mathematical puzzles, guided tours of the Kavli IPMU building, a display of books written or recommended by IPMU researchers, and a screening of Particle Fever. This is a documentary film that follows the lives of six researchers as they search for answers about how our universe was made, and witnesses moments of scientific breakthrough at the Large Hadron Collider. It has Japanese subtitles, in cooperation with UC Berkeley Professor and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist Yasunori Nomura, and by Kavli IPMU staff.

In two days, a total of 9,600 people visited the campus. The Kavli IPMU attracted more than 2,900 people

Note: Readers who are interested in Mr. Hirakawa's Artist-in-Residence story at the Kavli IPMU can find his report as well as an Artist Interview in this issue of the *Kavli IPMU News* (pp. 20–23).

Event: "Actually I Really Love Physics! —Career Paths of Female Physics Graduates"

On November 19, 2016, the University of Tokyo's Kavli IPMU, Institute for Solid State Physics, and Institute for Cosmic Ray Research jointly hosted an event called "Actually I Really Love Physics! — Career Paths of Female Physics Graduates" at the Kavli IPMU, and there were 33 participants. This event was held to support female students in physics to plan their careers. For that purpose, various speakers of physics graduates talked their career paths and the attractiveness of the

field of physics. It was also aimed to create a network of participants on this occasion.

In the morning, four speakers talked about topics including their career paths and research for 10 to 20 minutes each.

In the afternoon, there were two thirty-minute lectures. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama spoke on the topic “What I started to see as I majored in physics—the forefront of astrophysics research and achievements of female researchers.” The University of Electro-Communications Associate Professor Haruka Tanji then gave a lecture entitled “What I saw when I broke out of my shell—Study at a graduate school in the U.S. and afterwards.” In her lecture, she also spoke about reconciling research with raising a child.

After the lectures, the participants toured the three host institutes. The final program of the event was a meeting of the lecturers and participants. A friendly atmosphere, with tea and cookies being served, produced active interactions among the participants, and the event ended successfully. (See a picture on page 3.)

15th Kavli IPMU/ICRR Joint Public Lecture. “The Observable Universe and Beyond”

On November 27, 2016, the Kavli IPMU and the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) held the 15th joint public lecture at the Ito Hall of the University of Tokyo’s Hongo campus. “Observable Universe and Beyond” was the main topic and it attracted an audience of about 300 people including junior high school and high school students.

The first lecture entitled “Observing Formation and Evolution of Galaxies

with Large Telescopes” was given by ICRR Assistant Professor Yoshiaki Ono. He talked about studies of the evolution of the neutrality of the universe, which elucidate the reionization epoch when cosmological structure formation started. In particular, he focused on surveys of distant galaxies that are important in understanding the number density of galaxies in the early universe.

Then Kavli IPMU Associate Professor Taizan Watari spoke on “Beyond Our Universe, Far to Observe, People Say, Different Worlds Exist.” Having started with quoting Karl Busse’s poem *Über den Bergen*,*** he developed the topic by comparing “happiness imagined to dwell over the mountains” to the laws of physics in the worlds which we cannot yet observe. He said, “While our laws of physics seem to hold within the universe we can observe, it is possible that the laws of physics and constants beyond the observable universe are different from ours.” He then explained a possible world resulting from slight changes in physics laws and constants.

After the lectures, Professor Ono and Professor Watari answered questions from each other and the audience. There was then a further opportunity of communication between the lecturers and the attendees in the foyer of Ito Hall, and many of them eagerly asked questions at that time.



Taizan Watari (left) and Yoshiaki Ono (right).

*** English translation (copyrighted):
The LiederNet Archive: http://www.lieder.net/lieder/get_text.html?TextId=3453.

Director Murayama Talked at the WPI 10th Anniversary Symposium

On December 17, 2016, the WPI 10th Anniversary Symposium “Towards the Future of Science in Japan” was held at Assembly Hall, East Annex, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), under the sponsorship of MEXT and the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and with the cooperation of all the nine WPI centers. In this symposium, Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama spoke on “The Beginning and the End of the Universe.” His lecture and other lectures (all in Japanese) can be seen at https://www.jspso.go.jp/j-toplevel/13_lecture.html. Also, see a picture on page 3.

Kavli IPMU Seminars

1. “State-sum constructions of spin-TFTs and fermionic SPT phases”
Speaker: Lakshya Bhardwaj (Perimeter Inst for Theoretical Physics)
Date: Aug 23, 2016
2. “QCD jet substructure and its simulation”
Speaker: Yasuhito Sakaki (Kavli IPMU)
Date: Aug 24, 2016
3. “Quantum Nature of D-branes”
Speaker: Yoshifumi Hyakutake (Ibaraki U)
Date: Aug 25, 2016
4. “Spaces with holonomy G₂ and their use in M-theory”
Speaker: David Morrison (UC Santa Barbara)
Date: Aug 25, 2016
5. “Rise of the Proto-Galaxy System in the Universe”
Speaker: Jason Xavier Prochaska (UC Santa Cruz)
Date: Aug 31, 2016
6. “Natural Low-Scale Inflation and the Relaxion”

- Speaker: Jason Evans (KIAS)
Date: Sep 07, 2016
7. "Conformal bootstrap in Mellin space"
Speaker: Kallol Sen (Kavli IPMU)
Date: Sep 21, 2016
 8. "Z and Lepton-Flavor Violation"
Speaker: Po-Yen Tseng (Kavli IPMU)
Date: Sep 21, 2016
 9. "The result of the MEG experiment with the full dataset"
Speaker: Daisuke Kaneko (Kavli IPMU)
Date: Oct 05, 2016
 10. "Generalized Monstrous Moonshine"
Speaker: Scott Carnahan (Tsukuba U)
Date: Oct 11, 2016
 11. "Multidimensional Simulations of Magnetar Powered Supernovae"
Speaker: Ke-Jung Chen (NAOJ)
Date: Oct 13, 2016
 12. "Gauge Theory and Calibrated Geometry for Calabi-Yau 4-folds"
Speaker: Yalong Cao (Kavli IPMU)
Date: Oct 13, 2016
 13. "Exact results in N=2 gauge theories"
Speaker: Francisco Morales (INFN Sezione di Roma)
Date: Oct 18, 2016
 14. "B-Physics Puzzles and Lepton Flavor Violation"
Speaker: Olcyr Sumensari (LPT Orsay)
Date: Oct 19, 2016
 15. "The other 95%: Insights from Strong Gravitational Lensing"
Speaker: Tommaso Treu (UCLA)
Date: Oct 19, 2016
 16. "Cosmology beyond the B-mode spectrum from BICEP2/Keck Array"
Speaker: Toshiya Namikawa (Stanford U)
Date: Oct 20, 2016
 17. "The Coherent Satake Category and Line Operators in N=2 Gauge Theory"
Speaker: Harold Williams (UT Austin)
Date: Oct 20, 2016
 18. "Radiation-hydrodynamic modeling of supernova shock breakout in multi-dimension"
Speaker: Akihiro Suzuki (Kyoto U)
Date: Oct 20, 2016
 19. "Hints for New Physics from a Rare Decay of Beryllium-8?"
Speaker: Tim Tait (UCI)
Date: Oct 21, 2016
 20. "D-instantons and indefinite theta series"
Speaker: Boris Pioline (CERN)
Date: Oct 21, 2016
 21. "Lecture 1: Dark matter halos"
Speaker: Houjun Mo (U Massachusetts)
Date: Oct 25, 2016
 22. "Lecture 2: Gas processes and galaxy formation"
Speaker: Houjun Mo (U Massachusetts)
Date: Oct 25, 2016
 23. "Introduction to topological field theories"
Speaker: Takuo Matsuoka
Date: Oct 26, 2016
 24. "Reconstructing the initial conditions to simulate the formation of the local universe"
Speaker: Houjun Mo (U Massachusetts)
Date: Oct 26, 2016
 25. "A Massive Progenitor of Strongly Lensed Supernova Refsdal"
Speaker: Petr Baklanov (ITEP Moscow)
Date: Oct 27, 2016
 26. "Introduction to topological field theories"
Speaker: Takuo Matsuoka
Date: Oct 27, 2016
 27. "Gravitational-wave memory observables and charges of the extended BMS algebra"
Speaker: David A. Nichols (Radboud U Nijmegen)
Date: Oct 28, 2016
 28. "Gauge Theory and Calibrated Geometry for Calabi-Yau 4-folds: Part II"
Speaker: Yalong Cao (Kavli IPMU)
Date: Oct 28, 2016
 29. "Searching for Dark Matter with Gamma Rays"
Speaker: Simona Murgia (UCI)
Date: Oct 31, 2016
 30. "A 1d Theory for Higgs Branch Operators"
Speaker: Ran Yacoby (Princeton U)
Date: Nov 01, 2016
 31. "Double ramification hierarchies"
Speaker: Paolo Rossi (Inst Mathematics at Burgundy)
Date: Nov 01, 2016
 32. "Dark matter self-interactions - from observations to particle physics"
Speaker: Felix Kahlhoefer (DESY)
Date: Nov 02, 2016
 33. "Carbon-Enhanced Metal-Poor Stars and Asymptotic Giant Branch Nucleosynthesis"
Speaker: Richard Stancliffe (Argelander-Institut fur Astronomie, Bonn)
Date: Nov 08, 2016
 34. "Self-Dual Yang-Mills Theory and Twistors"
Speaker: Alexei Rosly (ITEP)
Date: Nov 08, 2016

Personnel Changes

Moving Out

The following people left the Kavli IPMU to work at other institutes. Their time at the Kavli IPMU is shown in square brackets.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Teppei Okumura [January 1, 2014 – December 31, 2016] moved to ASIAA in Taiwan as an Associate Research Fellow.

JSPS Postdoctoral Fellow Richard Calland [November 2, 2014 – November 1, 2016] moved to Preferred Networks Inc. as a Researcher.

Lagrangian Point 2 (L2)

Hajime Sugai

Kavli IPMU Associate Professor

Sky observations with a satellite telescope require careful design of the satellite structure and its orbit in terms of eliminating light and thermal effects from the sun and the earth. The Lagrangian point 2 (L2) is an excellent position for this purpose.

The two-body problem, such as between the sun and the earth, is analytically solved. Although there is not a general analytical solution on the three-body problem, when three bodies are located in certain special positions, the relative positions of these bodies are kept unchanged in the rotating system. Such positions are points where the sum of gravitational forces from the sun and the earth on the third body, such as a satellite, is balanced with the centrifugal force seen from the satellite. In particular, the circular restricted three-body problem is solved analytically. In this case we assume that the satellite mass is negligible with respect to the masses of the sun and the earth and that their motions can be described as circular. These special points are then called Lagrangian points. At one of five Lagrangian points, L2, a satellite telescope can observe the deep space side at all times against the sun and the earth because they are seen in the same direction from L2. LiteBIRD will use this Lagrangian point.

When 3 bodies located in certain special positions, relative positions kept unchanged. Particularly (circular restricted 3-body) solved analytically.

sum of gravitational forces balanced with centrifugal force

2-Body
Isaac Newton

3-Body
No general analytical solution

$$f_s + f_e = m\omega^2 (l_2 - l_e)$$

$$\therefore \frac{GmM_s}{l_2^2} + \frac{GmM_E}{(l_2 - L_0)^2} = \frac{m\omega^2 (l_2 - L_0)}{L_0^3} = \frac{m\omega^2 (M_s + M_E)}{L_0^3} \left(l_2 - \frac{M_E}{M_s + M_E} L_0 \right)$$

$$\frac{M_E}{M_s} = 3.0 \times 10^{-6}$$

$$\therefore l_2 = 1.010 L_0$$

$$\therefore l_2 - L_0 = 0.010 L_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ km}$$

Satellite telescope can observe deep space side all the time against sun and earth because they are seen in same direction from L2

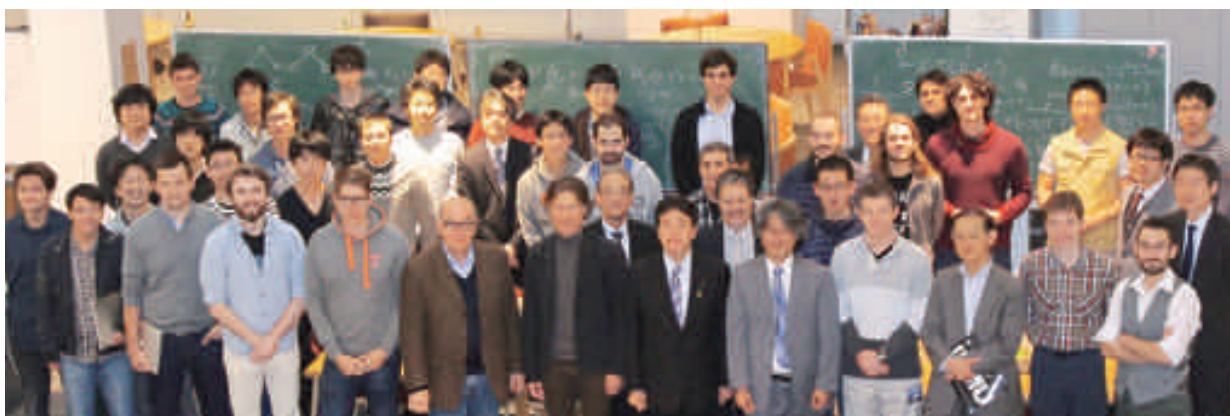
近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



10月22日：(写真左) 2016年柏キャンパス一般公開の2日目に、Kavli IPMUレクチャーホールで「時空のさざなみ～重力波が拓く宇宙への新しい眼～」を講演。(写真右) 講演後、村山機構長に質問するため列を作る参加者(本誌50～51ページ)。



11月11日：鶴保庸介内閣府特命担当大臣(科学技術政策、宇宙政策)がKavli IPMUを視察(本誌50ページ)。



11月19日：女子学部生及び女子大学院生向けキャリアサポートイベント「やっぱり物理が好き!～物理に進んだ女子学生・院生のキャリア～」で参加者と歓談(本誌51ページ)。



12月17日：世界トップレベル研究拠点プログラム10周年記念「日本の科学の未来に向けて」で、中高生に囲まれて質問に答える村山機構長(本誌51ページ)。写真提供：IFReC。

Director's
Corner

ビッグバン以前の宇宙は見えるか?^{*1}

はじめに

宇宙誕生の瞬間とは? 宇宙創生を支配する物理学の根本法則とは? これらの問いに答えることは科学の大いなる挑戦の一つです。と同時に、科学を超えたセンス・オブ・ワンダー（感動をともなう不思議な感覚）を呼び覚ます研究テーマです。究めようとする、「何もない状態から存在をつくりだす」などといった問題にすら直面してしまうのです。

宇宙はどこまでさかのぼって見ることができるでしょうか? 宇宙の始まりには、熱い火の玉状態でビッグバン（宇宙の膨張）が起きた、と言われます。ビッグバンを、とにかく宇宙の始まりの瞬間のこと、と定義してしまうと、論理的にその前はないことになりそうです。でも、ビッグバンも物理学で記述できる現象に過ぎないと思えば、その準備期間があっても良い気がしてきませんか?

実は、観測技術の進歩のおかげで、今や人類は熱い火の玉状態以前の宇宙（ビッグバン以前の宇宙）を観測できそうなのです。いくつかのやり方が提案されていますが、最も有望な方法が、宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background, 以下CMB）の偏光測定です。現在、世界的な競争状態にあります。

^{*1} JAXA宇宙科学研究所のISASニュース 2016年9月号 (No.426) 宇宙科学最前線「ライトバード (LiteBIRD) でビッグバン以前の宇宙を探る」をもとに加筆。

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とビッグバン宇宙論

CMBは全天から降り注ぐ宇宙最古の電磁波で、周波数は、およそ160 GHz（波長2ミリ程度）を中心としています。1964年（論文掲載は1965年）にアーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンにより発見されました。2人はその業績で1978年のノーベル物理学賞を受賞しています。

宇宙はビッグバンのあと膨張しながら冷えていきました。誕生から約38万年たった頃の宇宙では、電子と陽子がバラバラに存在していた状態から、お互いがくっついて水素原子になるという大きな変化が起きます。それまで電子としょっちゅう衝突していた電磁波は、以後自由に宇宙空間を伝わることになります。このできごとは「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれています。この自由に伝わり宇宙に満ちた電磁波がCMBです。晴れ上がりのCMBの温度は約3000 Kでした（以下、温度はすべて絶対温度(K)で表します）。一方、CMBの現在の温度は約2.7 Kだとわかっています。低くなったのは宇宙膨張とともにCMBの波長が伸びたからです（電磁波の波長が長くなれば、その温度は低くなります）。これ以外にはCMBの存在は説明できないので、CMBの存在そのものが、ビッグバンの重要な証拠とされています。

1989年には米国のCOBE衛星が地球周回軌道での

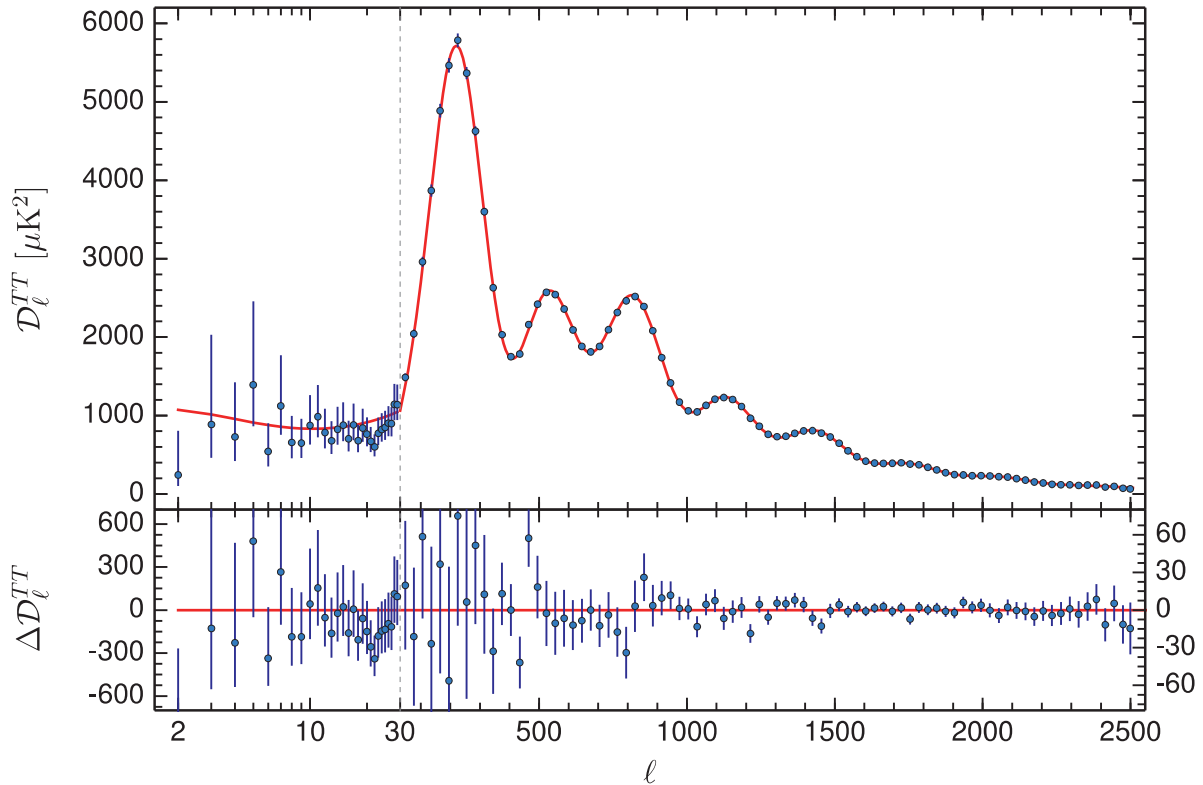


図1 プランク衛星によるCMB温度ゆらぎの観測結果。横軸はパワースペクトルの波数（ゆらぎの模様の「細かさ」に相当）、縦軸はゆらぎの強度をあらわす。実線は、標準宇宙理論によるフィット結果を示す。下図は観測結果とフィット結果の差を示している。

観測を開始しました。CMB精密観測時代の幕開けです。COBE観測の功績により、2006年のノーベル物理学賞はジョン・マザーとジョージ・スムートに与えられました。その後、2001年には角度分解能でCOBEをしのぐWMAP衛星が太陽と地球のラグランジュ点の1つ(L2)^{*2}で観測を開始し、さらに2009年にはヨーロッパが主導して、WMAP衛星の感度と角度分解能を上回るプランク衛星が打ち上げられました。これらの観測によって、宇宙の年齢が約138億年であることや、宇宙はまだ人類が理解できない謎のエネルギーに満ちていることなど、我々の宇宙の驚くべき姿が高い

^{*2} 本誌の裏表紙を参照。

精度でわかってきたのです。

2015年に発表されたプランク衛星の観測結果を図1に示します。実線が理論予想、点が観測結果（棒は誤差）を示します。CMBの温度を全天にわたり精密に観測し、どれほどのムラ（「ゆらぎ」と表現します）があるかを解析（スペクトル解析と言います）した結果で、横軸がゆらぎのサイズ、縦軸がゆらぎの大きさを表します。たとえ図の意味を知らなくとも、理論と観測がとてもよく合っていることがわかりますよね。まさに精密宇宙論と呼ぶにふさわしい結果です。これは驚くべきことだと思います。100億年以上も昔のことが正確にわかってしまうのですから。

電磁波には、波長（色）、強度（明るさ）、偏光（振動の方向）の3要素があります。プランク衛星後のCMB研究のフロンティアはまだ精密に観測されていない偏光の観測に移りつつあります。CMB偏光の観測により熱いビッグバン以前の宇宙を探れるからです。それがどんな宇宙だったか、人類はまだ正解を知りませんが、最も有力な仮説がインフレーション宇宙仮説です。

インフレーション宇宙仮説

インフレーション宇宙仮説は1980年代初頭に提案されました。基本的なアイデアは実に簡単で、宇宙は、熱い火の玉状態になる前に急激な加速膨張を起こした、というのです。このたった一つの仮定で、素朴なビッグバン宇宙論のいくつもの問題を一網打尽に解決してしまうので、*3 現在最有力の仮説なのです。これまでの観測結果も、すべてインフレーション宇宙仮説をサポートしています。

こう書くと、インフレーション宇宙仮説が正解でいいのでは、と思われるかもしれませんが、ことはそう単純ではありません。人類が現在手にしている物理学の標準理論（最も基本的な法則を集めたもの）と矛盾するのです。宇宙の森羅万象は、すべて物理法則どおりに動いています。問題は、標準理論では宇宙の加速膨張は起こせない（減速膨張しかしない）ということなのです。物理学の標準理論にしたがうかぎり、宇宙は、いわばブレーキだけあってアクセルのない車のようなものでしかないはずなのです。

じゃあインフレーション宇宙仮説はダメなの、とい

うと、そうでないのです。ここが面白いところです。物理学研究は、将棋のルールを知らない人が、対局を横で眺めるだけでルールを突きとめるようなものです（このやり方で完全なルールブックを突き止めるのは、骨が折れることでしょう）。現在の標準理論は、未完成なものなのです。私を含む多くの物理学者は、宇宙のルールブックには、私たちがまだ知らない物理学の根本法則が書いてあり、それはインフレーション宇宙も作れるし、現在の標準理論も導けるはずと思っています。すでに物理学根本法則の提案はいくつかあって、観測によるテストを待っています。代表的な例としては超弦理論があり、世界は4次元を超えた高次元でできており、万物の根源は素粒子ではなく、ひも状の何かであるというような、とても大胆な予想をしています。

CMB偏光による原始重力波観測

では、どんな観測をすれば、インフレーション宇宙仮説の決定的な検証ができるのでしょうか？ 答えは「原始重力波」です。*4

インフレーション宇宙仮説の最も重要な予言は、原始重力波の生成です。重力波とは、時空のゆがみが波として伝わる現象です。インフレーションの加速膨張は重力波を生みます。天体の運動で生まれる普通の重力波と区別して、これを原始重力波と呼びます。原始

*3 インフレーション仮説がどんな問題を解決するかについては、たとえば *Kavli IPMU News Vol. 10* (June 2010)、デビッド・スパーゲル「宇宙はどのように始まったか？」を参照。

*4 *Kavli IPMU News Vol. 26* (June 2014) p. 72、佐藤勝彦「宇宙のインフレーションと原始重力波」参照。

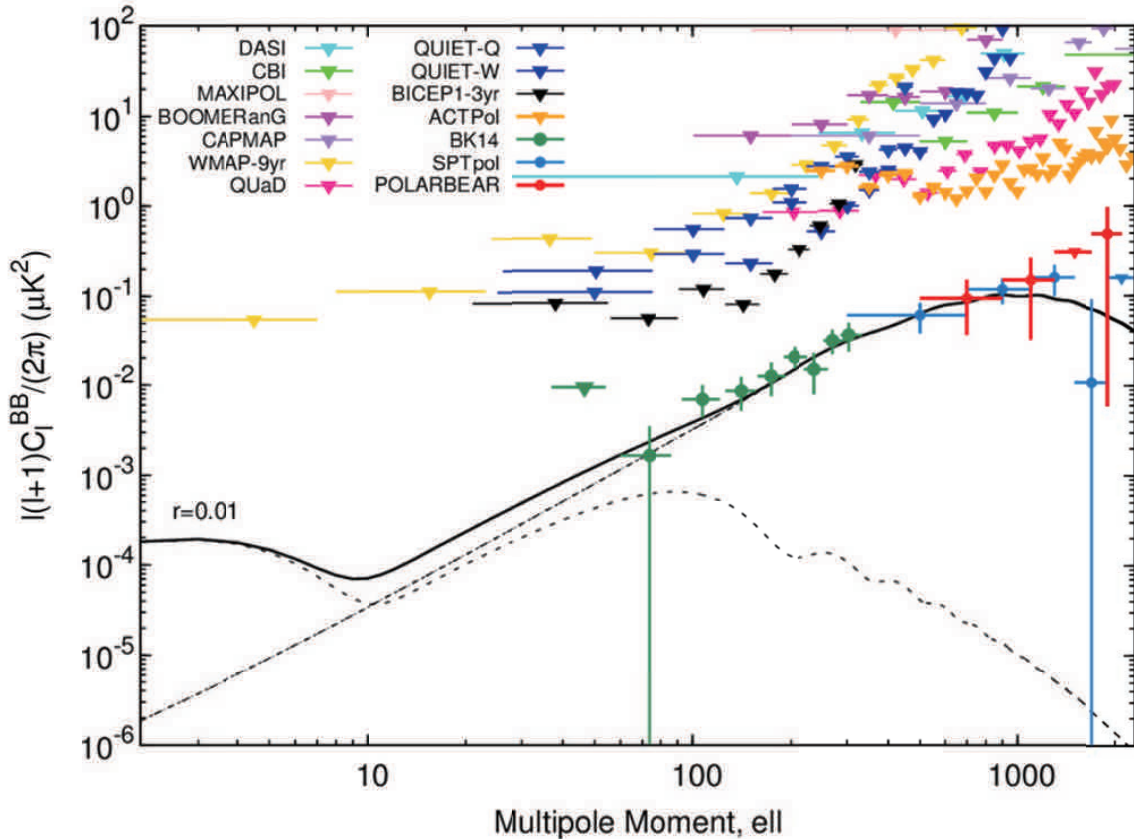


図2 CMB Bモード観測の現状。横軸・縦軸は図1に同じ。丸は中央値、三角は上限値をあらわす。鎖線がまだ観測されていない原始重力波によるBモードの理論予想を示す。一点鎖線はCMBが我々のもとに電磁波として届くまでに天体などにより進路を曲げられるため生まれる見かけのBモードで、すでに観測されている。実線は2つのBモードの合計をあらわす。(作図はKavli IPMU/カリフォルニア大学バークレー校の茅根裕司氏による。)

重力波の検出なくしてインフレーション仮説を証明することはできないので極めて重要です。

CMB偏光を使った原始重力波の検出方法を説明しましょう。原始重力波はインフレーション宇宙で生まれた後、晴れ上がりの時にも宇宙空間を満たしており、CMB偏光の分布に特殊な渦巻きパターン(「Bモード」という名前がついています)を刻印したと予想されています。これを検出すれば、インフレーションの動かぬ証拠です。人の指紋を検出するのと似たような感じです。

現在、原始重力波の発見を目指したCMB偏光観測の世界的競争が行われていて、群雄割拠の状態です。地上の望遠鏡や気球を使ったプロジェクトが進行中も

しくは準備中です。我が国でも高エネルギー加速器研究機構(KEK)やカブリ数物連携宇宙連携機構の研究者を中心に国際共同チームに参加し、チリ・アタカマ高地にCMB望遠鏡を設置して観測を行っています。ポーラーベアプロジェクトと名付けられたこの観測研究についてより詳しく知りたい方は、例えば拙著『宇宙背景放射「ビッグバン以前」の痕跡を探る』(集英社新書)をお読みください。

CMB偏光について、これまで世界中で行われた探索結果のまとめを図2に示します。図1は温度のゆらぎをスペクトル解析した結果でしたが、図2はBモードのゆらぎをスペクトル解析した結果です。たくさん

データがあります（丸は中央値、三角は上限値）が、要するに、横軸の値が小さいところで見えるはずの原始重力波の信号（図中の鎖線がインフレーション宇宙仮説の予想）はまだ見えていない、ということです。上限だけが得られています。原始重力波を発見するには、これまでより少なくとも10倍以上の感度で観測を実行しないとはいけません。地上でより感度の高い観測を行うために、ポーラーヘアプロジェクトでは最終的に望遠鏡を3台設置して同時観測を行うことにしており、準備が進んでいます（サイモンズアレイ計画と名付けられています）。

決定的な観測をするには大気の影響を受けず全天をカバーする究極の測定が必要になります。つまり衛星計画です。我が国では2008年ごろにすでにこうした流れを読んで、世界に先駆けて比較的小型の衛星を打ち上げる検討をKEKのCMBグループが中心となって開始しました。これがライトバード（LiteBIRD）計画です。

ライトバード (LiteBIRD) 衛星計画

LiteBIRD計画は、2015年2月にJAXA宇宙科学研究所へ正式提案を行い、初期の審査を通過しました。現在、KEK、東大Kavli IPMU、JAXA、岡山大、国立天文台、カリフォルニア大バークレー校、マックスプランク宇宙物理学研究所などから総勢130名以上の研究者がLiteBIRDワーキンググループに参加し、2020年代半ばの打ち上げを目指して概念設計に従事しています。CMB観測を手掛けている研究者以外にも、X線天文学や赤外線天文学の研究者などが参加しています。

図3にLiteBIRDの概念図を示します。ひとこと言え、[ナノケルビン程度しかないBモードのムラを見る究極の観測装置]です。以下、メカ好きな読者のためにミッション部観測装置を空側からCMBの進む方向に沿って説明すると、1) 観測の系統誤差を減らすためにCMBを変調する回転半波長板、2) およそ4 Kに冷却した直径約80 cm程度の主鏡と一枚の副鏡を持つ反射光学系、および高周波側の観測に特化した小さな屈折望遠鏡、3) 100 mKの熱浴温度で動作する超伝導検出器アレイ、4) 読み出し回路系、5) ジュール・トムソン冷凍機とスターリング冷凍機で構成される予冷系、および6) 断熱消磁冷凍機からなります。WMAPやプランク衛星と同様、地球から150万km離れた太陽・地球のラグランジュ点の一つ (L2) で3年間の観測を行うことを検討しています。歳差運動するコマのような運動をすることにより、まんべんなく全天をスキャンする方式を考えています。超伝導検出器アレイによって、40 GHzから400 GHzまでを15バンドに分けて観測する予定です。全般に、地上観測で使い込んでいる技術の延長としての検出器システムに、これまでのJAXAの科学ミッションで実績のある冷凍機や衛星バスのコンポーネントを使って、高い実現性をもたせる計画です。

Kavli IPMUは、LiteBIRD計画を進めるにあたり、中心的な役割を担っています。Kavli IPMUといえば、理論物理、数学、コンピュータを使った研究というイメージが強いかもしれませんが、柏の葉キャンパスの建物の1階にはちゃんと実験室もあり、LiteBIRDのための装置の開発研究を行っています。CMBを変調する回転半波長板については、昨年着任した松村准教授

光学系

- 回転半波長板による変調
- 反射型望遠鏡。主鏡と副鏡(ともに直径約80cm)を約4ケルビンに保持

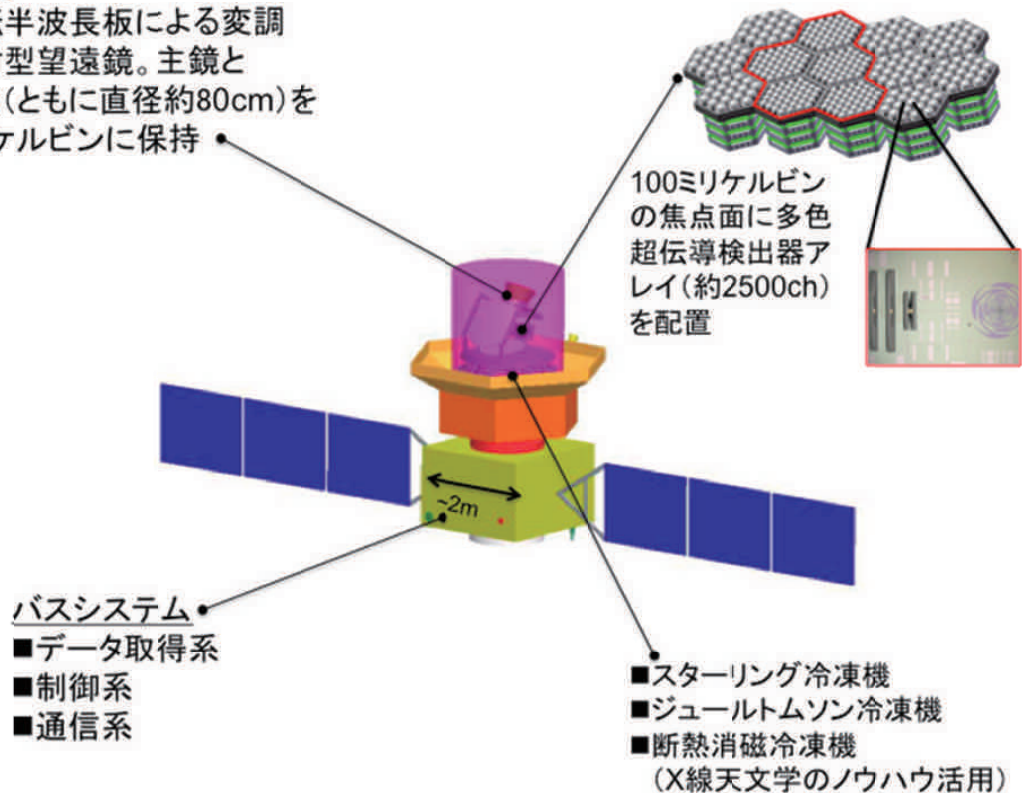


図3 LiteBIRD衛星の概要。

が世界的なエキスパートで開発をリードしており、桜井研究員が実験室で様々な測定をしています。反射光学系については素材や検証計画の検討を菅井准教授が中心になって行っています。さらに片山副機構長の活躍により、実験室の整備や東大の他の研究室との連携も進んでいます。もちろんコンピュータを使った研究も盛んで、特に前景放射をCMBからいかに分離するかが焦点となっています。Kavli IPMUの新しいPI(主任研究員)の一人でもある小松英一郎・マックスプランク宇宙物理学研究所長が国際チームを率いてこの重要課題に取り組んでいます。Kavli IPMUでは、ここまで述べた方々以外にも、数名の研究員と大学院生がLiteBIRD衛星の開発研究に携わっています。

おわりに

CMBの観測はこれまで二度のノーベル物理学賞に輝いていますが、原始重力波の発見は、それを超えた大成果になると言われています。なんといっても、ビッグバン以前の宇宙からの信号です! 衛星による精密観測は、発見だけでなく、超弦理論などの物理学根本法の候補をテストするという役割も担います。決して簡単ではない実験プロジェクトですが、少しでも感度を上げて、ぜひ「全ての始まり」という大いなるセンス・オブ・ワンダーを呼び覚ます問題に迫っていきたいと考えています。ご期待ください!

Our Team

松村 知岳 まつむら・ともたけ 専門分野: 宇宙論

Kavli IPMU 准教授

これまで宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background=CMB) の偏光観測を用いた初期宇宙論の研究を実験的な観点から進めてきました。現在、CMB偏光観測はインフレーション仮説を検証する有力な方法の一つとして世界的に注目されており、カブリIPMUでも掲げる「真の根源的な問い」に対して正眼の構えで挑む実験です。CMB実験は、その科学目的の面白さもさることながら、日常的に広範囲な物理がツールとして求められます。それは相対論的宇宙論から天文学、熱統計、光学、超伝導、力学、電磁気などなど。さらには実験技術として半田付から、Cryogenics、設計や機械工作、並列計算やら色々。ゆえに、日常の手元のことが初期宇宙まで繋がっていることを実感できる研究テーマです。カブリIPMUは学問の枠にとらわれず、根源的な問いに迫ることに共



感する研究者が集う研究所だと理解しており、ここでCMB実験を用いたインフレーション探索を進められることを楽しみにしております。

白井 智

しらいさとし 専門分野: 理論物理学

Kavli IPMU 助教

標準模型、宇宙論は（憎らしいほど）うまく観測、実験事実を説明できていますが、これが宇宙の究極理論でないことは明らかです。その理由の一つに、この枠組みでは宇宙に存在する（暗黒）物質の起源についての答えが与えられていません。

私の研究目標は（暗黒）物質の性質を詳しく調べることで究極理論への道を一步ずつ進んでいくことです。現在、特に力を入れて研究しているのは、LHCやILCなどの加速器実験での暗黒物質の発見や測定のための新しい手法の提案です。また、宇宙線観測による暗黒物質の探索にも注目して研究を行っています。今後の10年間で地上実験と宇宙の観測によって暗黒物質に関する研究は大きな転換期を迎えると期待されます。このような時期に、Kavli IPMUで多くの仲間たちと一緒に研究できることをとても楽しみにしています。



アン・デュークー

Anne Ducout 専門分野: 宇宙論

博士研究員

私の研究課題は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の解析、中でも主として宇宙のインフレーションのような基本的理論に制限を与えることと、原始重力波起源のCMBのBモード偏光を探索することです。以前は、特にプランク衛星のCMB観測データを用いて原始非ガウス性（原始密度揺らぎのガウス統計からのずれ）を測定する研究を行いました。また、最近ではプランク衛星、さらにPOLARBEARの望遠鏡についても、機器分析を手がけました。Kavli IPMUでは、日本が主導する原始Bモード偏光を検出するためのミッション、



Our Team

LiteBIRD 衛星計画に参加し、特に銀河からの前景成分を原始Bモードの信号から分離する方法について研究を行います。

ファビアン・ケーリング Fabian Köhlinger 専門分野: 天文学

博士研究員

現在私は、ダークマターとダークエネルギーの物理的性質の解明を主要な動機として、またそれにとどまらずニュートリノの質量による宇宙論的効果の研究も含め、研究を行っています。宇宙の大規模構造による弱い重力レンズ効果は、宇宙の構造の成長、従ってこれら各種の「見えない」成分の進化に非常に敏感です。こういった弱い重力レンズ効果の観測には、益々大規模なサーベイ観測が必要となりますが、私はこれまで



CFHTLSおよびKiDSという2つのこのようなサーベイからのデータを用いて研究してきました。Kavli IPMUでは、特にHSCの誇る大統計を利用することを楽しみにしています。

ジュリアナ・クワン Juliana Kwan 専門分野: 天文学

博士研究員

私は博士研究員として、大規模構造の宇宙論の研究に興味をもっています。2016年10月にペンシルバニア大学からKavli IPMUに着任しました。ペンシルバニア大学ではダークエネルギーサーベイDESで弱い重力レンズを研究していました。私は弱い重力レンズを、現代物理学を悩ませている最も基本的な問題の一つである宇宙の加速膨張の性質を調べる手段として用いることに特に興味をもっています。Kavli IPMUに滞在中、



私はこの問題に取り組むためにハイパー・シュプリーム・カムによるサーベイで観測される弱い重力レンズと赤方偏移空間歪みの両方を用いる統合的方法を研究する予定です。

マシュー・マードック Matthew Murdoch 専門分野: 実験物理学

博士研究員

EGADS (Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems) 検出器は、当初スーパーカミオカンデ検出器にガドリニウムを添加する開発研究プログラムの一部として建設されました。この開発研究がほとんど終了したことに伴い、その正式名称をEmploying Gadolinium to Autonomously Detect Supernovasと改め、銀河系内超新星爆発を、“自律的に”最初のニュートリノ到着後1秒以内に報告し天文学界への貴重な警



報発令を行うことが可能な超新星の専用検出器となります。私はEGADSの感度の最大化を目指して中性子の検出、シミュレーションの開発、宇宙線起源のバックグラウンドの解析を研究課題とします。

フランчесコ・サラ Francesco Sala 専門分野: 数学

博士研究員

私の研究対象は代数幾何学、幾何学的表現論、および数理物理学です。現在、私は曲線上の(Higgs)層を用いることによりHall代数とその(K理論的/コホモロジー的)改良版の異なる実現について研究しています。A型トーリック特異点の解消およびNakajima周期楕円多様体に関する捩れなし層のモジュライ空間のK理論/コホモロジーを用いてこれらの代数の幾何学的表現を構成することができます。これは物理学への応用、



中でも最も注目されるのはA型ALE (Asymptotically Locally Euclidean) 空間上の4次元超対称ゲージ理論およびこれらの理論についてのAGT (Alday-Gaiotto-Tachikawa) 予想への応用をもたらします。

砂山 朋美 すなやま・ともみ 専門分野: 天文学

博士研究員

私の研究は、主に大規模構造と呼ばれる銀河を使って宇宙の仕組みを解明することです。特に、超新星爆発を使って宇宙が加速膨張していることが分かって以来、暗黒エネルギーと呼ばれる加速膨張を引き起こしているであろうメカニズムを解明するために、世界各国で大規模な観測プロジェクトが行われています。日本でも、今後すばる望遠鏡を使ったプロジェクトがあります。大学院では、シミュレーションを使って、どのように銀河のカタログを作ることができるのか、またそれらのカタログからバリオン音響振動への影響な



どを研究していました。今後は、これからのプロジェクトにおいて、どのように観測の精度を上げることができるのか、シミュレーションや実際のデータを使って検証していくことが私の研究テーマです。

ガビ・ザフリル Gabi Zafrir 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は主として超対称性をもつ高次元場の量子論を研究しています。これらは量子場の理論一般の研究という観点から、また、一方では弦理論、他方では低次元における理論との関係により、興味深い研究対象です。後者の関係は、高次元の理論を低次元にコンパクト化することにより与えられ、例えば8個のスーパーチャージをもつ4次元理論の研究において多くの示唆を与え



ることが分かりました。私は低次元及び高次元の場の量子論、および弦理論の理解を深めるため、これらの側面全てについて研究しています。

Our Team

データ科学と自然科学

池田思朗 いけだ・しろう

情報・システム研究機構 統計数理研究所 教授、
Kavli IPMU 客員上級科学的研究員

「科学」という言葉は「対象に関する知識を深め、広めること」を意味しているとしていただろう。対象が自然現象であれば自然科学、社会現象であれば社会科学となる。Kavli IPMUの研究対象は物理、そして数学であるから、目指す科学は自然科学、そして形式科学だろう。一方、私の属する統計数理研究所の研究対象はデータの処理・解析の方法である。そのため、我々の科学をデータ科学と呼ぶことがある。研究の目的を丁寧に書けば「データの処理方法、解析方法に関する知識を深め、それを広めること」となる。

最近、様々な学問分野、そして産業界で、統計学、機械学習、人工知能といったデータ科学分野に対する期待が高まっている。一方では計測技術の発達やインターネットの拡大によって取得されるデータが爆発的に増え、他方では応用数学分野の発展と計算機の能力の向上によってデータ科学の方法が格段に進歩している。この二つを組み合わせることにより、新たな発見が期待されているのだろう。

データ科学には、応用数学の理論と実際にデータ解析を行う実践との両面がある。私は理論に関しては、微分幾何学を統計学や情報理論に応用する情報幾何学の研究を行ってきた。データ解析としては、この数年間、天文分野との共同研究を中心に研究している。昨年からはKavli IPMUの客員となり、いくつかのプロジェクトに関わろうとしている。どのプロジェクトのデータ



2016年8月22日に行われたKavli IPMUの外部評価委員会で報告する筆者。

も興味深いものばかりである。それぞれをデータ科学の観点から説明する。

私は二年前よりJST（科学技術振興機構）のプロジェクト（研究代表：吉田直紀）を通じて、すばる望遠鏡のHSCを用いたサーベイ観測に参加している。このサーベイ観測では、天球上の特定の領域を繰り返し観測しており、ある日突然現れる超新星を画像の差分から発見することが課題のひとつである(図1)。差分画像に現れる「引き残し」は一晩で数万にも及び、その中から超新星と思われる数十個の天体を素早く発見するには、機械学習の技術を用いた自動判別器の実装が不可欠である。これまでにNTTコミュニケーション科学基礎研究所と共同でIa型超新星の自動判別器を開発し、観測に用いている。

神岡で行われている実験についても、研究者と議論をし始めている。T2KとXMASSとでは目的は異なるが、どちらも観測されたデータの中から非常にまれなイベントを見逃さずにとらえることが課題である。物理学のモデルを用いてイベントの生成確率を記述し、素早く計算を行って判別につなげる方法を開発しなければならない。今後、貢献できるように努力したい。

将来計画にあがっているLiteBIRDでは、非常に微弱なCMB（宇宙マイクロ波背景放射）の揺らぎをとらえることが目的である。そのためには、はるかに大きい前景放射を分離して取り除かなければならない。前景放射とCMB、それぞれの統計的性質を基に、信号を分離する方法を考えることになるだろう。Planck衛星の信号処理では、90年代に提案された独立成分分析の方法が用いられている。私が研究者になりたての頃に研究した方法が、ここでまた使えるのかもしれないと考えている。

他の分野の研究者と共同研究を行う際、データだけを送ってもらい、我々が処理して送り返すという形ではうまくいかないことが多い。データ科学に対する過度の期待が原因の場合もあれば、我々の理解不足が原因の場合もある。いずれの場合もコミュニケーション不足なのだ。

データ科学者の役割は、データ処理に関するコンサルティングである。そのために、データの背景を知り、データ科学ができることを説明する。議論を重ねながらプロジェクトに参加するのが理想だ。Kavli IPMUとの共同研究はまだ始まったばかりである。今後、様々なプロジェクトと関わりを持っていきたい。

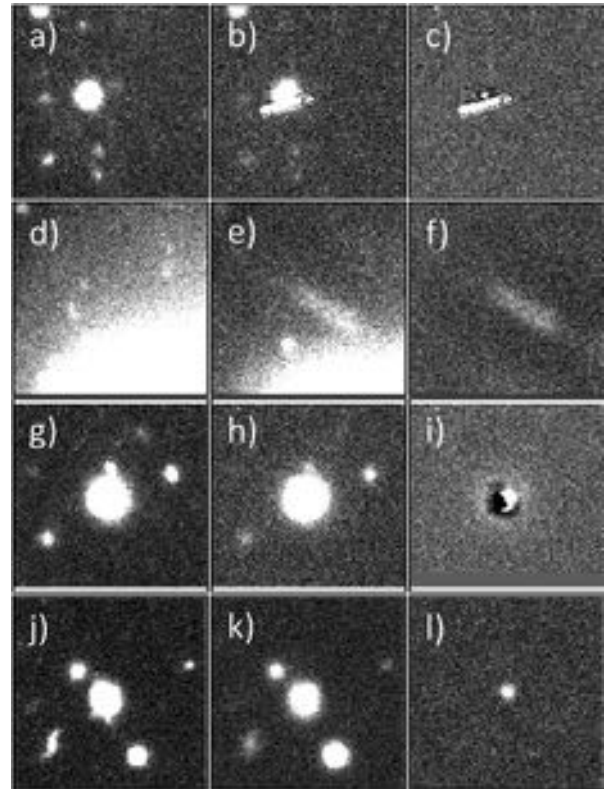


図1 すばる望遠鏡のHSCを用いた観測で得られる変動天体の画像と偽像。各行とも左から右へ、参照画像、新規画像、引き残し画像となる。(a-c) 宇宙線が写り込んだ例。(d-f) 明るい星の近くの偽像。(g-i) 位置ずれによる偽像。(j-l) 銀河の中にある変動天体と思われる天体。

「統計、量子情報、量子重力」研究会

大栗博司 おおぐり・ひろし

Kavli IPMU 主任研究員

一般相対性理論と量子力学の統合は、現代物理学の大きな課題のひとつである。笠真生と高柳匡によりエンタングルメント・エントロピーの公式が発見されて以来、この10年の間に、情報理論が量子重力や場の量子論の研究に強力な理論的手法を与えることが明らかになってきた。それと同時に、量子重力の研究は情報理論に新しい課題を提供し、この分野の研究を促進してきた。

カブリIPMUでは、これまで、素粒子物理学と物性物理学の境界領域においてフォーカス・ウィークを2回開催してきた。これにより双方の分野の研究者の交流が促進され、新しい共同研究にもつながった。今回の研究会の目的は、素粒子物理学と情報理論という新たな境界領域を開拓することにある。

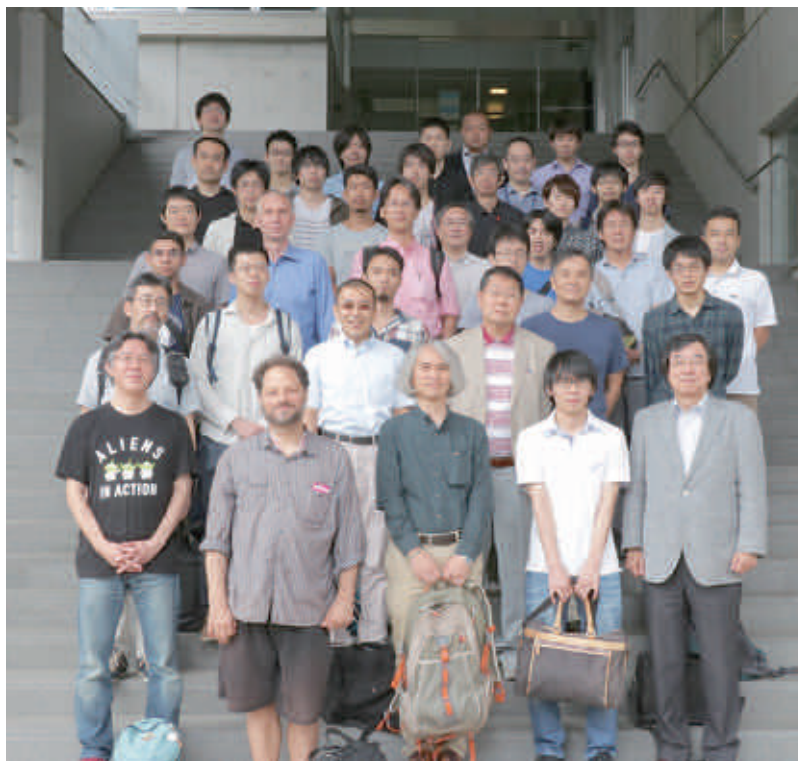
この研究会では、幅広い分野の講演者を招待した。小澤正直は量子情報と量子力学の基礎的研究者。田崎晴明は統計力学の基礎的問題を、沙川貴大は非平衡統計力学と測定・制御・情報理論を研究している。また、場の量子論の数学的基礎付けについて議論を深めるために、作用素環を専門とする数学

者、河東泰之を招待した。シメオン・ヘラーマンはカブリIPMUの研究者であり、一般相対性理論と量子力学を統合する最も有望な理論である超弦理論の専門家である。

小澤は、量子測定理論の「小澤の不等式」でよく知られているが、今回は場の量子論における測定の問題について講演した。これに続く河東は、作用素環の見地から共形場の理論の様々な側面を議論した。共形場の理論は超弦理論やAdS/CFT対応の研究においても

重要な場の量子論である。田崎は統計系の熱化の問題を議論し、沙川は統計力学の基礎的な問題を情報理論の手法で解明した。ヘラーマンは、重力アンマリーがある場の量子論における量子エンタングルメントの定義の問題について議論した。

この研究会は、幅広い分野の研究者が交流する貴重な機会であった。今後、素粒子物理学と情報理論の交流をさらに促進することで、有意義な共同研究につながることを期待する。



代数幾何学における圏論的及び解析的不変量IV

アレクセイ・ボンダル Alexey Bondal

Kavli IPMU 主任研究員

2016年は日露2国間交流事業共同研究「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量」の最終年度でした。日露2国間交流事業は日本学術振興会およびロシア基礎科学財団(RFBR)から資金援助を受け、本共同研究は齋藤恭司とアレクセイ・ボンダルが代表者を務めています。

2016年には、2015年に開始された研究集会シリーズが継続して行われました。研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量III」はこの事業の後援の下、Kavli IPMU、ステクロフ数学研究所(モスクワ)、ロシア国立研究大学高等経済学院(HSE、モスクワ)、Institute of Fundamental Science(モスクワ)によって組織され、9月12日から16日までHSE(モスクワ)で開催されました。Kavli IPMU、東京大学数理科学研究科、大阪大学、首都大学東京、ステクロフ数学研究所(モスクワ)、HSE(モスクワ)、およびイギリスとポーランドの研究機関からも数学者が参加しました。

ここで述べるもう一つの研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量IV」は、2016年11月14日から18日までKavli IPMUで開催され、2国間事業の日本側およびロシア側の参加者、それに加えて他のロシアと日本の科学者の間で、より一層のアイデアの交換と共同研究という成果が得られました。

特に注目されたのは双有理変換とそのミラー対称なパートナーでした。双有理多様体および非双有理多様体の

両方によって与えられる代数多様体の導来同値の構成が議論され、通常代数多様体の非可換ミラー対称パートナーが詳細に検討されました。また、A. BondalとM. Kapranovにより30年近く前に導入されたDG enhance 圏の性質を通じて、この理論の基礎が注意深く調べられました。

日本側からはいくつかの講演でミラー対称性を用いて構成された解析的不変量についての研究が発表されました。このシリーズの昨年の研究集会と同様に、多くの講演はミラー対称性の一方の研究か双方の比較検討、またはその両方についてのものでした。

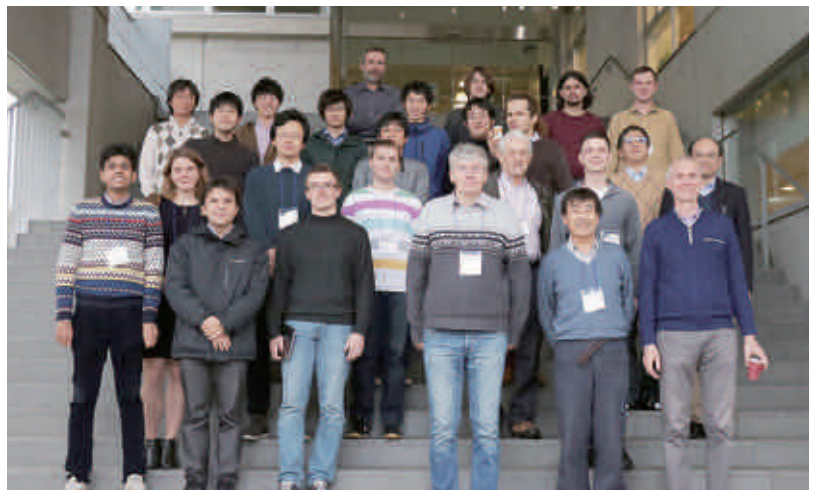
Mikhail Kapranovは高次のカット・ムーディ代数とG束の導来モジュライ空間について、新たな展望を概観しました。彼はリーマン面上の共形場の基本的特徴の一つである高次元多様体に対する一般化を行いました。それは“rigidified”G束のモジュライ空間上のカレント(カット・ムーディ)代数の作用です。

日本の若手数学者、桑垣 樹(くわがき・たつき)は、coherent 構成可能対応に関する彼自身の強力な結果を発表しました。トーリック多様体上の接続層の導来圏と、適当なストラティフィケーションに属する実トーラス上の構成可能層の導来圏の同値に関す

るA. Bondalの最初の検討とその結果は、一連の数学者の研究により、トーリック・スタックに対するこのような同値についての一般的な予想に発展しました。この予想はミラー対称性によって、構成可能な側面を関連する深谷圏と同一視することにより説明できます。桑垣はこの予想を完全に一般的に証明し、それについて報告しました。

物理学者との協力は、特に多いものでした。堀 健太郎は、6個の位相をもつ2パラメータ・ゲージ化線形 σ モデルの考察に基づき、あるカラビ・ヤウ多様体の導来同値についての数学的予想を発表しました。これは細野・高木モデルの2パラメータへの拡張とみなすことができます。細野 忍は自分の講演で、無限個の双有理自己同型をもつカラビ・ヤウ多様体に対するミラー対称パートナーの一連の例について話し、この自己同型をそのミラー対称ファミリーの中でのモノドロミー変換と同一視しました。

ロシアの若手数学者 Andrei Yonovは、Wittenのカイラルリングのdcent変形は、Gepner 特異点に対する齋藤恭司のある原始形式に対応するはずであるというA. Belavinの物理的な提案を進展させ、純粋に数学的方法によりGepner 特異点に対する原始形式を構成しました。



Resurgence at Kavli IPMU

アレクセイ・チャーマン Aleksey Cherman

ワシントン大学博士研究員

12月12日から16日までワークショップ“Resurgence at Kavli IPMU”が開催され、resurgence理論と関連する話題について最近の発展を概観しました。Resurgence理論とは、物理学と数学に現れる非線形問題に対し、系統的に解を構成する枠組みです。例えば、非線形微分方程式の解を構成したい、あるいは場の量子論（QFT）で観測可能量を結合定数の関数として表したいとしましょう。このような問題を解析する出発点は、もちろん線形化された極限の周りでの摂動論です。しかし、摂動論による漸近展開は発散級数となり、非摂動論的に正しい結果ではないため、それだけでは十分ではありません。Resurgence理論は、異なる線形化極限の周りの摂動展開を系統的に組み合わせることにより厳密な解を構成する道を開きます。例えば、QFTでは、様々なインスタント的セクターの周りの摂動揺らぎがどのように組み合わせられて任意の結合定数に対して成り立つ不定性のない結果を与えるのかを理解することができるようになります。

このワークショップは非常に国際的で、ヨーロッパ、北アメリカ、南アメリカ、アジアから参加者が集まりました。講演によって多方面での興味深い進展にハイライトが当たりました。Y. Tanizaki, T. Schafer, E. Poppitz, P. Putrov, G. Basar, T. Misumiなど、多くの講演が、半古典的展開に代数的な視点を与える resurgence 理論

と、幾何学的な視点を与える Lefschetz thimbles の間の関係を議論しました。A. ChermanとT. Sulejmanpasicは漸近的に自由なQFTに対し、resurgence理論の方法を応用するために必要なステップである滑らかな弱結合極限を得るために必要とされる技術を概観しました。O. CostinとG. Dunneは半古典的展開の実用的な新しい総和法について、および摂動的効果と非摂動的効果の間の関係について興味深い結果を発表しました。R. SchiappaとM. Yamazakiは、resurgence理論のひも理論および超対称ゲージ理論への応用の最近の展開について説明しました。一方、T. Aoki, Y. Takei, A. Getmanenkoは、WKB展開の研究にお

ける進展について、およびresurgenceとストークス現象についての関連した話題について発表しました。

本ワークショップは、インフォーマルな議論にできるだけ多くの時間を残すことを重要視して日程の大部分は午前中に二つの講演、夕方に二つの講演を配し、黒板のそばにお茶とクッキーを十分用意して交流を促すという方式で行われました。Kavli IPMUの有能なスタッフと素晴らしい設備のおかげで刺激に富んだ素晴らしい環境が用意され、多くの参加者が言っていたように講演と研究者同士の交流により新たな研究のアイデアが得られ、ワークショップは大成功を収めました。



猿の夢日記 (2010年7月20日)

齋藤 恭司

Kavli IPMU 主任研究員

IPMUの屋上で初めてビアパーティーがあった。高田さん、*1 加藤さん*2 と話していたら、高田さんから言われた。「加藤さんから見れば、IPMUの僕ら研究者は皆人間じゃない、猿なんですよ。宇宙人もいるし。まあ、中には人間も居るかもしれないけど」とちらっと村山さんの方を見た様な気がした。「ヒャッホー、俺は猿なんだ。確か俺は餓鬼道に落ちていたはずなのに、畜生道まで上がったのか？俺自身そんなに高まった気もしないが、それでも猿になれたのは嬉しい」等と思っているうちに目が覚めた。

山の奥の奥の、その又奥の深いこの山々こそが俺の生まれ育った場所なのだ。何だ、俺は最初から猿だったんだ。でも、自分の生まれ育った山のボスに反抗して、結局山を飛び出して、自分の山を築いてきた。今は、家族も仲間も大勢居る。でもなんか物思いに沈む此の頃だ。おれはこの山の大将だ。この山の事は何でも好きにできる。だけど、何か足りない。

俺にはとても届かないあの空に光る星たち。あれは何なんだ。俺はどうしてここに居るのだろうか。俺は何なんだ。分からない、分からない！胸をかきむしりながら、考える。

聞く所によると、人間とかはスバルとか言うもので星の彼方を知ろうとしているらしい。LHCとか言うもので、この山全部を砂粒位に縮め、更にまたその砂粒を同じ位に縮め、、、そんな小さい所で起きている事を



知ろうとしているらしい。人間の世界では数学とか言うものが有って、宇宙の始まりから終わり迄を更に超えた真実を見逃かす事が出来るらしい。

あああ、俺も人間になりたい。人間になって、俺が何なのか知りたい。宇宙を知りたい。聞くところによると、今から五百万年後に真実を求めて旅をする坊さんが此処を通るらしい。そうだ！俺はその人間について行って、真実が何なのかを見届けるのだ...

そういう訳で、家族や山の仲間たちを呼び集める。「お前等には世話になったな。感謝している。しかし今日を限りに俺は山をおりて旅にでる。五百万年後に此処を通る坊さんについて行くのだ。もう俺の事は考えてくれるな。これから後の山の事は任せる。お前等仲良くやってくれ」等と格好良くも無責任に言い放って山を下りる。

そして、言うに言われぬ五百万年放浪の旅（そこにはとても一口では言い切り得ない、いろんな事が有ったのだが）の末、ようやく明日こそはその三蔵ヒトシとか言う坊さんに巡り会えると思っている所でまた夢から覚めた。

これはどういう事なんだ。でも、この夢もまた覚めるかもしれない。忘れないうちに夢を書き留めておこう。

*1 高田 昌広 IPMU 准教授(当時)。現在、Kavli IPMU 教授。

*2 加藤 康洋 予算管理係長(当時)。



現代における科学と芸術

平川紀道

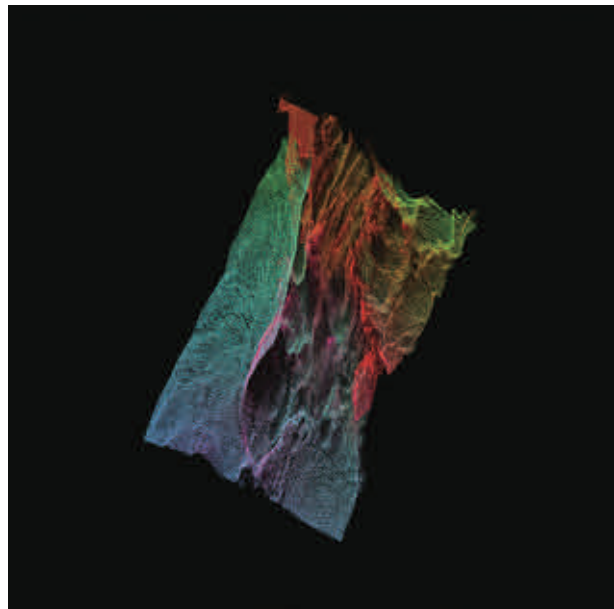
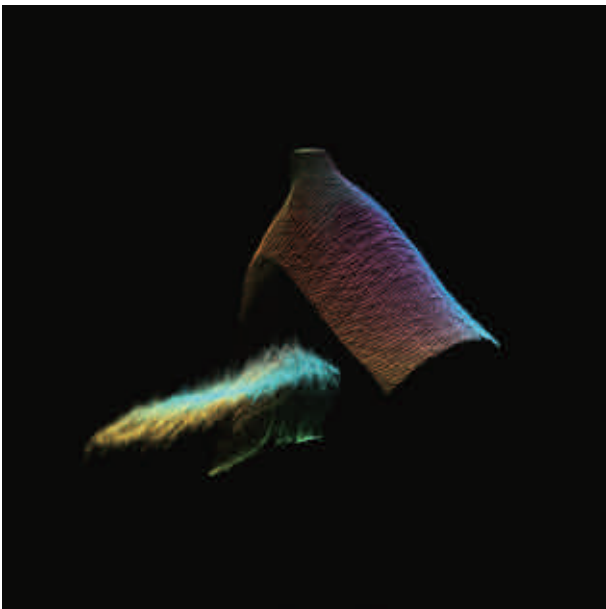
想像力の限界

現代の芸術のひとつの機能が、「美」や「崇高」といった概念に基づいて「世界」を再発見すること、もしくは拡張することであると考え、従来の芸術家にとってきた、作家自身の想像力に基づいて作家自身の手で何かを作り出すという手法が、今もなお有効であるとは考えにくい。というのは、現代においては、科学が描き出す世界観が、美術作家の想像力が描き出すことのできる範疇を超えるまでに非日常的／非常識的であるからだ。

表現手法としてのプログラミング

芸術家は常にテクノロジーとともに歩んできた。当

然ながら鉛筆や筆、白い紙もテクノロジーである。現代において注目すべきテクノロジーのひとつはデジタル・テクノロジーだ。デジタル環境で表現する手法は数多くあるが、例えばコンピュータ上でマウスを使って絵を描く、といったような手法は、現実のアナロジーではあっても、本来、計算機であるはずのコンピュータの本質を利用しているとは言えない。計算機であるコンピュータの能力を引き出すために有効な手段はコンピュータ・プログラミングだ。GUI（グラフィカル・ユーザ・インターフェイス）に依存している限り、人間の身体能力を超えたものを作ることはできないが、コードを書くことで、コンピュータの非人間的な速度と正確さの計算能力を、何かを作り出すために使うこ



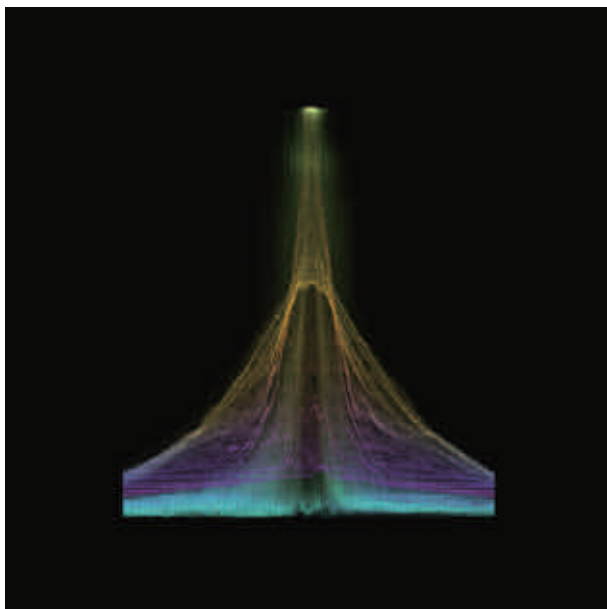
とができる。

テクノロジーとしての「計算」

プログラムを書いて何かを表現する場合、そこにあるもっとも本質的なテクノロジーは何であろうか。ひとつのアルゴリズムが、複数のプログラミング言語で記述可能であることを考えると、プログラミング自体が本質的なテクノロジーではないことがわかる。真に本質的なテクノロジーは「計算」そのものであるはずだ。それは、記号を扱うことのできる人間が生み出したもっとも原始的なテクノロジーであろう。

「計算」は想像力を超える作品を生むか？

プログラミングを通してコンピュータに計算させてものを作ることと、想像力に基づいて手でものを作ることの決定的な違いは何だろうか。それは、結果の予測がつくかどうか、という一点に集約される。人間が手でものを作る以上、完成図が大まかにでも頭の中にあるはずで、その完成図は想像力によって描かれたものである。一方で、プログラムを介す場合、例えば、ある画像データの全画素に対して、その画素の緑の値を赤の値で割って青の値に代入する、といったような計算を思いつくことはできるが、その結果を予測することは困難である。しかし、プログラミング言語自体



が持つ論理体系に基づいて、結果を知ることなく、プログラム全体を構築することは可能である。その論理として構築された全体が、論理的に破綻していなければ、そのプログラムを実行することができる。そして、そのプログラムの実行結果を目にするとき、作品制作において想像力を超えるための鍵となるなフィードバック構造が生まれる。実行結果をもとに、初期値やアルゴリズムを変更し、そのプログラムを実行するという無限のループである。そのループの中で、人間の想像力を超えた「美」や「崇高」を発見することが、コンピュータを用いて表現することの一つの目標であろう。

Kavli IPMUにおける滞在制作

Kavli IPMUでの滞在中は、「次元」という概念をヒントに、何をどう計算することで何を作るかを考えて過ごした。結果として、一つのアイデアを形にすることができた。それは、デジタル画像の画素が持つ情報、画像上の位置を表すX、Yに、本来その画素の色を表すR、G、B（赤、緑、青）の値を合わせた5つの数値を、5次元ユークリッド空間における点の座標として捉えることで、画像そのものを5次元ユークリッド空間における点の集合として扱い、5次元ユークリッド空間で回転してみることで、その画像が持っている別の側面を見てみようというアイデアだ。回転であ

滞在制作作品 sunset [(見開き左から) gradation, complexity, spot]
2016. digital C type print series, 680×680 (mm)

これらの画像は全て異なる入力データ（夕陽の写真）を5次元空間（次のパラグラフ参照）で任意のパラメータの値で回転させたものが出力されている。無意識に人間が感じる「夕陽の持つ美」を下記の3つの要素、もしくはその組み合わせで表現できると仮定した。

1. 大地と対比された、空の色調のグラデーション
2. 雲の形態と陰影の複雑さ
3. 白く眩い円として知覚される太陽自体

デジタル画素を5次元における点（XY+RGB）として扱うと、回転変換によって、形態と色調が変換可能であることから、変換によって「夕陽」自体が認識されない状態でも感じることもできる「夕陽の持つ美」を模索した。



(上左) 研究者を対象としたワークショップを行った。内容は、14名のメディアアーティストの作品について、「簡潔さ」等10項目から評価し、作品にはどのような評価の視点があるのかを把握した上で、自分が関心をもっている現象について、インスタレーション作品を構想してもらうというもの。天文、理論物理、数学等から4名の参加があり、議論に花が咲いた。

(上右) 研究者を居室に招待し、居室での制作風景を公開。今回の滞在で取り組んでいる課題とその進捗について映像を使いながら解説した。

(下) 約2800名が訪れたキャンパス一般公開で成果を発表した。会期中は終日来場者に解説をし、来場者アンケートでは「素晴らしい」、「難しいが面白い」と大変好評だった。

るから、数学的には全ての画素同士の距離は保存されており、当然、逆の回転をすることで元の点に戻すことができる。言い換えると、彫刻作品を周回しながら眺めているような状態だ。このアイデアについても、数学的に可能であることはわかっている、実際に回転してどのような画像が得られるのかを想像することはできなかった。しかし、滞在中にこのプログラムに接していく中で、どの平面での回転がどのような画面上の変化に相当するのかを、経験的に学んでいくことができた。

アート&サイエンス

アート&サイエンス、アートとサイエンスのコラボレーションと言うと、聞こえは良いが、実際には非常に難しい、というよりもほぼ不可能だというのが筆者

の考えだ。そもそも、科学と芸術は、我々が生きる、この一つの「世界」を異なる言語によって記述する別々の体系であり、互いが深化すればするほど相互理解は難しくなっていくし、互いを必要としなくなるものであるはずだ。現代において、科学は芸術を必要としないし、そうすることで発展してきた体系である。逆に芸術は先端科学を理解する必要がないし、カメラの登場以来、絵画は客観的な写実性よりも主観性を先鋭化させることで発展してきた。アート&サイエンスの意味は自明ではないのだ。しかしながら、一部の科学者と一部の芸術家が、「世界は何でできているのか」「時間とは何か」「我々はどこから来たのか」といった共通の根源的な問いを原動力にしているということは明らかである。それは一体何を意味しているのだろうか。

アーティストインタビュー

(聞き手：Kavli IPMU広報)

どんな作品を作っていますか？

コンピュータ・プログラミングを使った映像を用いたインスタレーションが多いです。

アルゴリズムであったり、実写の映像であったり、様々な素材を組み合わせながら、人間の手だけでは作り出せないものを如何に創り出すことができるか、また、続いていく計算プロセス自体によって何かを表現できないか、といったことを考えています。

今回、Kavli IPMUでのレジデンスという「条件」での制作はどのようなものでしたか？

今までに試したことのないアルゴリズムを試す、という点においては、様々な研究者がいて、必要があれば話を聞けるという状況だったので、開発途中でアルゴリズム自体が変わっていくようなことが起きるのではないかと予想し、できるだけゴールを限定しないままで、けれども何かを作り出される方向に思考や制作を進めていく、ということ意識して行いました。結果としてはアルゴリズム自体の変更ではなく、同じアルゴリズムをどう使うことができるか、どういったモチーフに対して適用すると面白い結果が期待できるか、といった示唆を受けました。また、アートの思考の飛躍や接続をできるだけしないような、論理的に説明可能なプロセスの集積として何かを作り出す、ということが1つの条件だったように思います。それは意図したものではなく、基礎科学の研究施設であるKavli IPMUでのレジデンスという環境が自然にそうさせたのだと思っています。レジデンスを終えた今考えると、非常に窮屈とも言えますが、美術だけの世界ではあまり体験しないことですし、レジデンスを終えて日常に戻ったあと、ふとその経験が蘇ってくることで、またその思考方法が、長い時間をかけて作品として表出してくるまでがレジ

デンスの成果と言えると思います。

平川さんは、コンピュータの「計算機能」を用いることで、自然現象を統治する法則を、ある種概念的/哲学的に検討/提示してみせる巨大なビデオインスタレーション作品で、現在の美術界におけるメディアアートの若き担い手として国内外で高い評価を受けておられます。今回の作品「sunset」は、「計算」を設計するプログラマーとして、そして、計算の結果を「作品」として完成させる作家として、ご自身はそれぞれどのように評価されていますか？

計算を設計するプログラマーとしては、次のように評価します。「sunset」は、デジタル画像データにおける、X、Yの空間座標、R、G、Bの色座標を合わせた5次元を扱うプログラムではありますが、プログラム自体は、リソースの許す限りにおいて、何次元にも対応できるプログラムとして開発しました。「sunset」の延長として、映像データのピクセルを6次元ユークリッド空間の点として扱う「datum」という作品を実際に制作し、公に発表しました。原理的には、あらゆる次元のユークリッド空間を扱うことができる汎用的設計で開発したという点で成功したと言えると思います。

2つ目の、作品として完成させるという点においては、空間と色空間を混合した5次元における回転では、空間座標における曲線が色座標におけるグラデーションとして現れること、またその逆も現れるということを確認することはできましたが、その2つが人間の「美」を感じる目にとっても変換可能であるかどうかという点に言及するには不十分であると言わざるを得ません。また、それが変換可能であるかどうかを確かめること自体は、どちらかというと科学に近い手法で達成することができる一方、その結果を踏まえてアートとして作品を成立させるためには、主観的な思考の飛躍が必要になると思います。非常に長い時間のかかる

ライフワークのようなものになりそうです。

平川さんは、この「世界」の中で、ある4次元時空を光学機器（カメラ）で撮影することで、2次元の平面における3原色のデータを得、その「データ」を「5次元のユークリッド空間」上の点群として捉えて再構成しているわけですが、日頃から親しんでいる2次元平面における3原色の出力を、人間には全体として感知し得ない5次元空間での回転を通じた出力へと何百回となく変換するという経験をする中で、事物と真理（物理法則や美）との関係について何か手がかりを得ることができたでしょうか？

作業を繰り返す中で、自分の視界における色座標、空間座標を統一した座標系で回転することで得られる画像が、完全でないにしろある程度予測できるようになる時期がありました。そのときに感じたのは、人間の脳の能力が、如何に目の前の世界で起きること、五感で感じられることに制約されているか、ということです。眼前で起こる現象が十分に豊かであれば、人間の脳はそこから何かを知覚することができるし、パターンを学習することができます。逆に言うと、この宇宙で、今ここで観察することのできる現実が、非常に限定的な現象であり、そのことが人間の脳の可能性を制限しているかのように感じるようになりました。目の前の自然現象を観察した結果として得ることのない、けれども論理的に説明可能な美を孕んだ視覚体験があるという、つまり人類が観測可能な自然の総体としての宇宙の先にも「美」や「崇高」が存在していると感じています。

今後のご予定は？

大きな予定としては、翌3月にポーランドのヴロツワフという街で個展があるので、その準備を進めています。Kavli IPMUでの滞在の成果を作品としてまとまった形で発表する1つの大きな機会になると思います。

鶴保庸介内閣府特命担当大臣、Kavli IPMUを視察

2016年11月11日に鶴保庸介内閣府特命担当大臣（科学技術政策、宇宙政策）がKavli IPMUを視察し、山脇良雄内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）、柿田恭良文部科学省研究振興局振興企画課長らが随行しました。

初めに村山斉機構長がKavli IPMUの概要や研究を紹介するとともに、世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の取り組みを説明し、内閣府の最先端研究開発支援プログラム（FIRST）で進められたSuMIReプロジェクトの現状や基礎研究から派生した応用技術についても触れました。続いて一行は研究棟内を視察し、ティータイムで研究者たちと歓談しました。（29ページの写真参照。）

小林俊行主任研究員、アメリカ数学会のフェローに選出される

2016年11月1日、アメリカ数学会（American Mathematical Society, AMS）の2017年フェローが発表され、東京大学大学院数理科学研究科教授でKavli IPMU主任研究員を兼ねる小林俊行さんが、簡約リー群の構造論と表現論に対する貢献が評価され、2017年フェローの一人に選ばれました。小林さんは、「不連続群の理論」「無限次元表現の分岐則の理論」「極小表現の大



小林俊行さん

域解析」などをテーマとして新たな数学の道を切り拓くなど、数学界において画期的進展をもたらしてきました。

アメリカ数学会のフェロープログラムは2012年に開始され、数学の新分野の創設、発展、振興、他分野との連携、活用などへの顕著な貢献のある研究者を選出し、選出された研究者は、数学発展のための牽引、数学会の会長および評議会への助言、新たなフェローの選出などの役割を担います。

高柳 匡客員上級科学研究员、仁科記念賞受賞

2016年11月10日、2016年度の仁科記念賞が発表され、京都大学基礎物理学研究所教授でKavli IPMUの客員上級科学研究员を兼ねる高柳 匡さんが「ホログラフィー原理を用いたエンタングルメント・エントロピー公式の発見と展開」により受賞しました。

高柳さんが共同研究者の笠真生さんと共に2006年に発表した「エンタングルメント・エントロピーのホログラフィック公式」は、現在「笠-高柳公式」という名で広く知られ、理論物理学における重要な公式としての地位を確立しています。高柳さんは過去10年にわたり笠-高柳公式を発展させ、ホログラフィー原理の仕組みの解明と応用に主導的な貢献をしてきたことが評価されました。



高柳 匡さん

斎藤恭司主任研究員、岡潔賞2016を受賞

Kavli IPMU 主任研究員の斎藤恭司さんが2016年に創設された第1回の岡潔賞を受賞され、奈良女子大学で開催された第15回岡シンポジウムにおいて2016年12月3日に授賞式が行われました。

岡潔賞は世界的数学者として名を

馳せた奈良女子大学の故岡潔教授の名前を冠した賞で、「数学の発展の源である、問題の発掘と新展開へと結びつく解決あるいは発展性のある発見や創意」を生み出した数学者に贈られます。

斎藤さんは複素解析幾何学の世界的権威で、複素解析幾何学や表現論をはじめとする研究を行ってきました。特に、斎藤さんが創始した原始形式と呼ばれる周期積分の一形式や楕円型等の無限次元リー環とその表現論は、数学分野に留まらず超弦理論や位相的場の理論などの物理学分野にも多くの影響を与えており、こうした新展開へと結びつく研究や長年にわたる数学界への貢献が評価されました。

Kavli IPMU事務部門の20名、2016年度東京大学業務改革特別賞受賞

Kavli IPMU事務部門国際交流係・研究者支援チームの田村利恵子さんを代表とする職員20名からなるチームは「大学グローバル化へのWin-Winプロジェクト!!」により、2016年度東京大学業務改革特別賞を受賞しました。業務改革特別賞は、東京大学が教職員から業務改革のアイデアや各部署での業務改革成果を募集し、その中で特に優れたものを表彰する業務改革総長の枠組みに属する賞の1つです。

受賞内容は「ランチタイム英語教室」と「Language Exchange with IPMU Researcher」の取組みで、事務職員の英語能力の底上げを図ることができ、英語対応業務が特定の職員に偏っていた非効率の改善に繋がりました。また、後者はKavli IPMUに所属する外国人研究者らと共にを行うプログラムで、研究者らには日本語能力の向上や日本文化を知る機会となることから、互いにとって有意義な取組みです。

2016年度柏キャンパス一般公開

2016年10月21日、22日の2日間、東京大学柏キャンパス一般公開「発見・体験! 柏の知」が開催されました。

Kavli IPMU では研究棟の大講義室

で、初日に田村直之准教授の講演「銀河や星を一網打尽～すばるに搭載！新分光装置 PFS で宇宙を測る～」、2日目に村山斉機構長の講演「時空のさざなみ～重力波が拓く宇宙への新しい眼～」(29ページの写真参照)に加えて吉田直紀教授とKavli IPMUで7月と9月の2回に分けて滞在制作(Artist in Residence)を行ったメディアアーティストの平川紀道さんの科学と芸術の共通性に関する対談が行われました。



講演する田村さん

その他、2日間の企画として、平川さんのArtist in Residence 成果展、パネル展示によるKavli IPMUの研究紹介、数学パズル、研究棟ツアー、Kavli IPMUの研究者の著作や研究者の推薦する著作を紹介した「わたしと図書館2016」、カリフォルニア大学パークレー校教授でKavli IPMU客員上級科学研究員を兼ねる野村泰紀さんとKavli IPMUが監修した日本語字幕付き映画「Particle Fever」の上映を実施しました。

2日間でキャンパス全体では9,600名が来場し、Kavli IPMUには2,900名以上が訪れました。

なお、滞在制作を行った平川さんがその成果などを寄稿してくれました。本誌46ページをご覧ください。

「やっぱり物理が好き! ～物理に進んだ女子学生・院生のキャリア～」開催

2016年11月19日、Kavli IPMUと物性研究所、宇宙線研究所の主催により、物理を学ぶ女子学部生及び女子大学院生のキャリア支援を目的とした「やっぱり物理が好き! ～物理に進んだ女子学生・院生のキャリア～」がKavli IPMUで開催され、33名が参加しました。このイベントは、物理学科出身の

様々な講師がキャリアパスを提示すると共に、物理学分野の魅力を伝え、参加者同士のネットワークを作る機会として行われたもので、午前中は4名の女性講師による10分から20分のミニ講演が行われました。

午後は各30分で、Kavli IPMUの村山斉機構長が「物理に進んで見えてきたこと—宇宙研究最前線と女性研究者の活躍」を話し、次に電気通信大学准教授の丹治はるかさんが「殻から出てみて見えたもの—米国大学院への留学とその後」と題して子育てと研究の両立の話題も交えた話をしました。

講演後には主催3機関を見学し、最後の交流会では打ち解けた雰囲気の中でお茶やお菓子を片手に参加者同士の積極的な交流も生まれ、盛会のうちに終了しました。(29ページの写真参照。)

Kavli IPMUとICRRの合同一般講演会「此岸と彼岸の宇宙」開催

2016年11月27日に東京大学本郷キャンパスの伊藤謝恩ホールで「此岸と彼岸の宇宙」を主題に、今回で15回目となるKavli IPMUと東京大学宇宙線研究所共催の一般講演会が開催され、中高生を含む約300名が参加しました。

はじめに宇宙線研究所助教の小野宜昭さんが「大望遠鏡で探る銀河の形成と進化」と題し、宇宙で天体が形成され始めた宇宙再電離の時代を明らかにする、宇宙の中性度の進化に関する研究について紹介しました。中でも、過去の宇宙における銀河の個数密度を知る上で重要となる遠方銀河の探査について重点的に触れました。

続いて、Kavli IPMU准教授の渡利泰山さんが「宇宙の彼方のなほ遠く異世界ありと人の云ふ」と題して、最初にカール・ブッセの詩「山のあなた」を取り上げ、山の向こうの幸せを、私たちがまだ観測できていない世界の物理法則に例える形で話を進めました。そして観測できる範囲内では今のところ私たちの用いている物理法則が成り立っているようであるが、その範囲外で

は物理法則や定数が異なっていることはあり得ると話し、定数や法則を少し変えただけで例えばどんな世界があり得るのかなどを紹介しました。

その後2人の講師の対談が行われ、互いに疑問に思った点を質問しあったり、客席からの質問を受けるなどしました。講演終了後には、講師を囲む懇談会が催され、熱心に講師に質問する参加者の姿が見られました。



渡利さん(左)と小野さん(右)

村山機構長、WPI 10周年記念講演会で講演

2016年12月17日に文部科学省東館3階講堂を会場として、文部科学省と日本学術振興会主催、WPIの全9拠点共催によるWPI 10周年記念講演会「日本の科学の未来に向けて」が開催され、村山 斉Kavli IPMU機構長も「宇宙の始まりと終わり」と題して講演を行いました。講演会の模様はhttps://www.jsps.go.jp/j-toplevel/13_lecture.htmlをご覧ください。(29ページの写真も参照。)

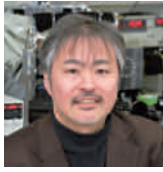
人事異動

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU在任期間です。]

奥村哲平さん [2014年1月1日—2016年12月31日]、Kavli IPMU博士研究員から台湾のASIAA(中央研究院天文及天文物理研究所) Associate Research Fellowへ。

Richard Callandさん [2014年11月2日—2016年11月1日]、東京大学特別研究員(日本学術振興会外国人特別研究員)から株式会社Preferred Networks研究員へ。



ラグランジュ点2 (L2)

菅井 肇

Kavli IPMU 准教授

衛星望遠鏡からの“夜空”の観測においては、太陽や地球からの光や熱を意識的に避けることが衛星構造・軌道設計上重要です。この目的によってつねに衛星位置がラグランジュ点2 (L2) です。

二体運動、例えば太陽と地球の間の運動は解けますが、三体となると一般的には解析的に解けません。しかし、三体が特殊な位置にあると回転系にのった相対位置が固定されます。太陽と地球それぞれからの、三体目（例えば人工衛星）への引力の足し合わせが人工衛星から見た遠心力とつり合う位置です。人工衛星の質量が太陽・地球に比べてずっと小さく、かつ円軌道を基本に考える場合は解析的に解け（円制限三体問題）、これらの平衡点をラグランジュ点と呼びます。ラグランジュ点は5つありますが、その中でも、L2においては太陽と地球が人工衛星から見て同じ方向・向きにあるので、太陽・地球に背を向けて常に深宇宙側を観測できます。LiteBIRD計画では、L2の使用を考えています。

でも、三体から特殊な位置にあると、
三体の相対位置は固定される！

とL1: 円制限三体問題の場合、
解析的に解ける。

引力の足し合わせが
遠心力とつり合うところ。

$$f_S + f_E = m\omega^2(l_2 - l_0)$$

$$\frac{GmM_S}{l_1^2} + \frac{GmM_E}{(l_2 - L_0)^2} = \frac{mG(M_S + M_E)}{L_0^3} (l_2 - \frac{M_E}{M_S + M_E} L_0)$$

$$\frac{M_E}{M_S} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ 程度}$$

$$l_2 = 1.010 L_0$$

$$\therefore l_2 - L_0 = 0.010 L_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ km}$$

L2から見ると、太陽と地球が同じ方向・向きにあるので、
太陽・地球に背を向けて常に深宇宙側を観測できる！