

# 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**

Primordial Black Holes in the Inflationary Universe



38

No.

June 2017

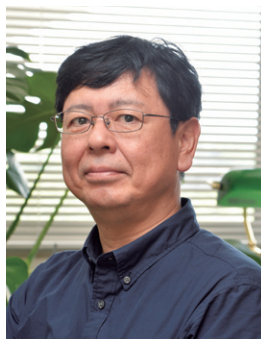
# Kavli IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**  
Primordial Black Holes in the Inflationary Universe  
Masahiro Kawasaki
- 10 **Our Team**  
Young-Kee Kim  
Eiichiro Komatsu  
Shigetaka Moriyama  
Hiromi Yokoyama  
Tomoko Morii  
Yusuke Nakajima  
Wenting Wang
- 14 **Special Contribution**  
The Art of Communication—Should science be  
communicated in the language of social media?  
John Amari
- 16 **Workshop Report**  
Developments of Mathematics at IPMU:  
in Honor of Kyoji Saito  
Toshitake Kohno
- 17 **Workshop Report**  
The 3rd Joint Symposium of Osaka CTSR,  
RIKEN iTHES/iTHEMS, and Kavli IPMU  
“Deep Learning and Physics”  
Shiro Ikeda
- 18 **News**
- 22 **Microlensing** Masamune Oguri

## Japanese

- 23 **Director's Corner** 村山 斉  
近況
- 24 **Feature**  
原始ブラックホールとインフレーション宇宙  
川崎 雅裕
- 30 **Our Team**  
金 鈴璣  
小松 英一郎  
森山 茂栄  
横山 広美  
森井 友子  
中嶋 祐介  
王 文婷
- 34 **Special Contribution**  
コミュニケーションの技術—サイエンスコミュニケーションに  
ソーシャルメディアを使うべきか?  
ジョン・アマリ
- 36 **Workshop Report**  
Developments of Mathematics at IPMU:  
in Honor of Kyoji Saito  
河野 俊丈
- 37 **Workshop Report**  
第3回 Osaka CTSR, RIKEN iTHES/iTHEMS,  
Kavli IPMU 合同シンポジウム  
“Deep Learning and Physics”  
池田 思朗
- 38 **News**
- 40 **重力マイクロレンズ** 大栗 真宗



Masahiro Kawasaki is a Professor at the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the University of Tokyo and a Principal Investigator at the Kavli IPMU. He graduated from the University of Tokyo and received his PhD in 1988. In the same year, he was appointed as an Assistant Professor at Tohoku University. He became a Postdoctoral Fellow at Ohio State University in 1990, an Associate Professor at ICRR in 1992, a Professor at Graduate School of Science of the University of Tokyo in 1999. Since 2004 he has been a Professor at ICRR. He received the Yukawa-Kimura Prize in 2013. His main research interests are axion cosmology, baryogenesis, inflation models, and formation of primordial black holes.

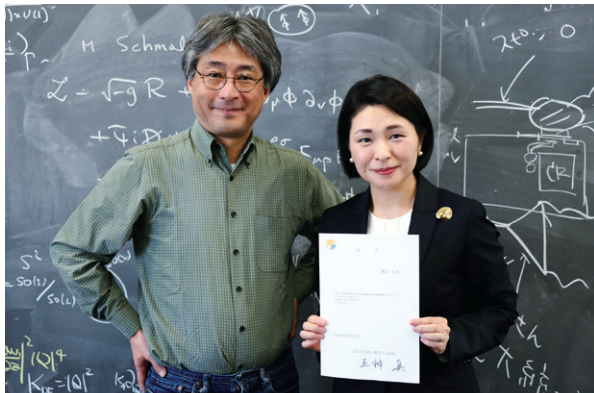
川崎雅裕：東京大学宇宙線研究所教授およびKavli IPMU主任研究員。1988年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程終了、博士（理学）の学位を取得。同年東北大学理学部助手に着任。1990年にオハイオ州立大学研究員、1992年に東京大学宇宙線研究所助教授、1999年に東京大学理学系研究科教授を経て、2004年より東京大学宇宙線研究所教授。2013年湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞受賞。最近は主にアクション宇宙論、バリオン数生成、インフレーション宇宙モデル、原始ブラックホール生成について研究を行っている。



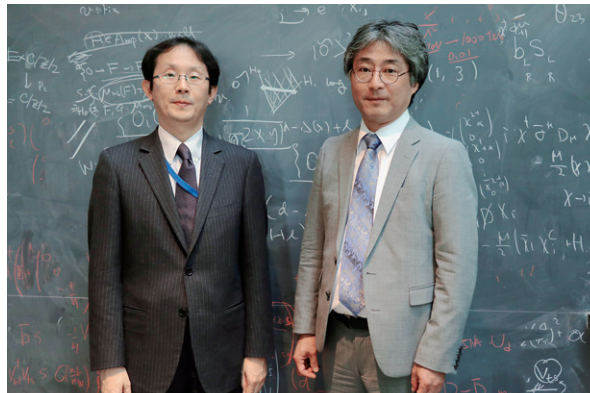
# Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU

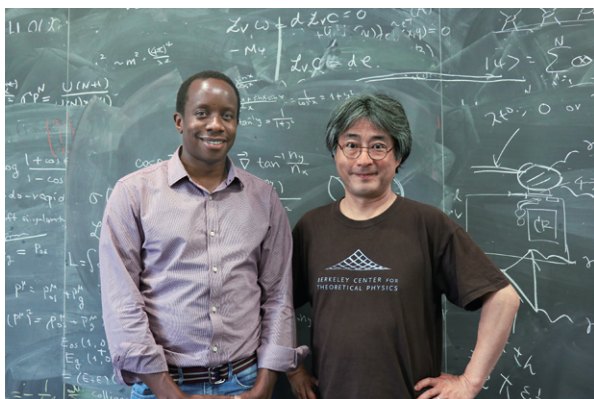
Hitoshi Murayama



April 4: Hiromi Yokoyama (right) shows her letter of appointment to Kavli IPMU Professor.



April 25: Mr. Tetsuya Kishimoto, left, Director of the Basic Research Promotion Division, Basic Research Promotion Bureau, MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) visited the Kavli IPMU.



May 11: John Amari (left) worked as a member of the Kavli IPMU Public Relations Group from July 1, 2016 to May 15, 2017. Please also enjoy John's contribution in this issue (pp. 14-15).



June 1: Delivering the letters of appointment to Kavli IPMU postdoctoral fellow Wenting Wang (center) and Kavli IPMU Academic Support Specialist Antonio Paladino (right).



June 16: Giving a talk at an Open House of the Institute of Statistical Mathematics. Photo: Courtesy of the Institute of Statistical Mathematics.



Director's  
Corner

# Primordial Black Holes in the Inflationary Universe

In September 2015, for the first time in history, gravitational waves from the coalescence of binary black holes were detected by the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in Livingston, Louisiana and Hanford, Washington. Afterward, more gravitational wave events were discovered and the third event was announced this year. These three events are caused by binaries of black holes whose masses are from about 10 to 30 solar mass. This historical discovery also means that humankind has obtained a new observational tool for exploring the universe.

Usually, black holes are formed when massive stars collapse due to their own gravity at the end of their lifetime. However, the masses of the black holes observed by LIGO are larger than those expected for the gravitational collapse of massive stars, and it is in dispute how such heavy black hole binaries are formed by stellar evolution. Therefore, we are interested in another idea on the formation of black holes; that is, primordial black holes produced in the early universe form black hole binaries and account for the gravitational events detected by LIGO.

## Primordial Black Holes

Primordial black holes are formed by gravitational collapse of high density fluctuations if they exist in

the very early universe at the cosmic time of less than 1 second. The possibility of the existence of black holes in the early universe was first considered by Zeldovich and Novikov in 1966, and Hawking in 1971, who presented the modern picture of primordial black holes forming from the collapse of high density regions. Since then, primordial black holes have been discussed from various points of view by physicists and astronomers.

The mass of a primordial black hole is determined by the formation epoch. Suppose that there are large density fluctuations in the early universe. At that time, the density fluctuations have various spatial sizes. Having an image that those fluctuations are something like waves which have crests and troughs in density, we call the spatial sizes of the fluctuations “wavelengths.” In this picture, large fluctuations correspond to waves with large amplitudes. Let us consider a wave with a certain wavelength. The evolution of the fluctuation depends on whether its wavelength is larger or smaller than the horizon length. Here the horizon length represents the maximum distance that can be reached by light. Roughly, the horizon length is given by  $(\text{horizon length}) = (\text{light speed}) \times (\text{cosmic time})$  and increases with time. Since no information travels faster than the speed of light, the causal relationship does not exist beyond the horizon. First, the wavelength of the fluctuation



is larger than the horizon. In this case, nothing happens to the fluctuation. The wavelength of the fluctuation increases by the cosmic expansion but the horizon length grows faster. Thus, it becomes equal to the horizon length after some time. When the fluctuation enters the horizon, a black hole is formed by gravitational collapse of the large density region if the amplitude of the fluctuation is large enough for its gravity to overcome the pressure by the radiation that dominates the universe. So the mass of the black hole formed is almost equal to the total energy of radiation inside the horizon. For example, a primordial black hole has a mass of about  $10^{-5}$  solar mass  $\sim 10^{28}$  grams if it is formed at the cosmic temperature of  $10^{15}$  degrees (cosmic time  $\sim 10^{-11}$  sec) and it has a mass of about 10 solar mass if it is formed at the cosmic temperature of  $10^{12}$  degrees (cosmic time  $\sim 10^{-4}$  sec). Thus, primordial black holes have various masses depending on the formation time.

The gravity of black holes is so strong that even light cannot escape from them. Thus, black holes had been considered stable once they were formed. However, in 1974 Hawking applied quantum theory to black holes and showed that they evaporate by emitting particles. This is called Hawking radiation. The effect of Hawking radiation is more significant for smaller black holes and black holes with mass less than about  $10^{15}$  grams have evaporated by now.

Therefore, primordial black holes existing now have masses larger than about  $10^{15}$  grams.

## Density Fluctuations in the Inflationary Universe

Let us consider how large density fluctuations required for primordial black hole formation are produced. It is known that large scale structures of the universe such as galaxies and clusters of galaxies are formed from tiny density fluctuations in the early universe which grow through gravitational instability. In fact, the existence of density fluctuations has been confirmed by the COBE satellite launched by NASA. The COBE observed the cosmic microwave background (CMB). CMB is relic light existing when the universe is hot and in thermal equilibrium and is presently observed as microwaves with a wavelength of several millimeters. CMB comes from all directions of the sky almost isotropically, but in 1992 the precise observation performed by the COBE revealed that there are small anisotropies. This implies that there existed small density fluctuations in the universe at a cosmic time of about 0.38 million years when the CMB light was emitted. Those anisotropies have been further studied in detail by the WMAP and Planck satellites, which have shown that our universe has density fluctuations with an initial amplitude of about  $10^{-5}$ .

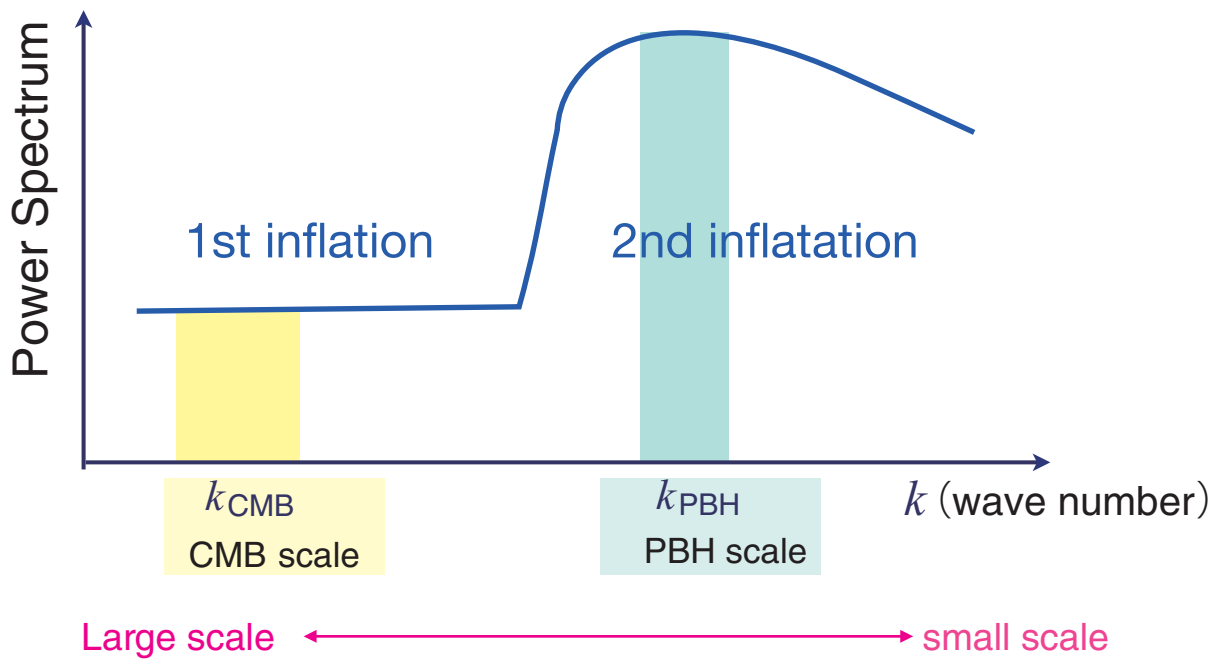


Figure 1: Schematic figure of the power spectrum produced by the double inflation model. The power spectrum represents the square of the amplitude of fluctuations with wavenumber  $k$ . The wavenumber is inversely proportional to wavelength, that is  $k \sim 1/(\text{wavelength})$ . The first inflation produces fluctuations on a large scale (small  $k$ ) while the second inflation produces fluctuations on a small scale (large  $k$ ). PBH means primordial black hole.

Now the problem is how the density fluctuations observed by the COBE are produced. Almost all researchers believe that those density fluctuations are produced by the accelerated cosmic expansion called inflation which is considered to have taken place at about  $10^{-36}$  sec after the birth of the universe. Inflation is driven by some scalar field called an inflaton whose potential energy dominates the energy density of the very early universe. During inflation, the inflaton field has quantum fluctuations which are stretched by inflation into fluctuations with cosmological scale. The fluctuations produced in the inflationary universe have the characteristic property of being almost scale-invariant. The scale invariant fluctuations mean that various waves composing the fluctuations have the same amplitude independently of their wavelengths. This property of the fluctuations produced by inflation

has been confirmed by CMB observations together with other predictions, which provides a reason for us to believe inflation.

### Primordial Black Hole Formation in Double Inflation

Almost scale-invariant fluctuations are produced in the inflationary universe and the CMB observation shows that the amplitude of the fluctuations is about  $10^{-5}$  for large scale wavelengths (longer than about 100 Mpc). On the other hand, in order to form primordial black holes, the density fluctuations should have amplitudes as large as  $10^{-1}$  when they enter the horizon. However, if the scale-invariance is satisfied, the fluctuations always have amplitudes of about  $10^{-5}$  when they enter the horizon so it is difficult to produce black holes without breaking the scale-invariance.



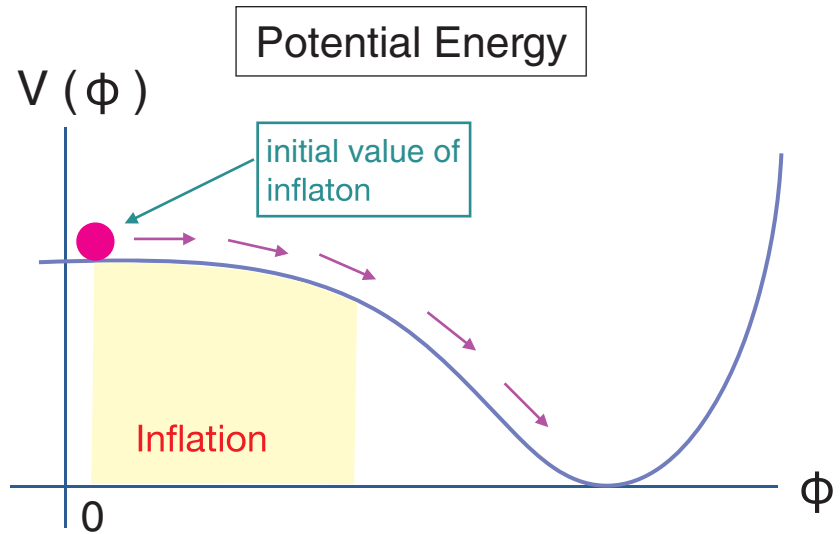


Figure 2: Potential of the scalar field (= inflaton) in the new inflation model. Inflation takes place when the inflaton has an initial value near zero and rolls down slowly toward the minimum of the potential.

Here I introduce a double inflation model as one of the interesting ideas for forming primordial black holes. The scale-invariance is hardly broken if a single scalar field causes inflation. However, this is not the case when inflation is derived by more than one field. Suppose that inflation takes place in two stages. Fluctuations with the smallest wavelengths are produced near the end of inflation, and the fluctuations produced earlier have larger wavelengths. This is because the fluctuations produced early are stretched by subsequent inflation. Therefore, in the scenario where inflation takes place in two stages, the first stage of inflation accounts for the fluctuations on a large scale observed by CMB, while the second stage of inflation produces large fluctuations on a small scale and hence primordial black holes. The model with two such stages of inflation is called the double inflation model. The schematic figure of the power spectrum (which is the square of the amplitude of fluctuations with wavenumber  $k$  or wavelength  $1/k$ ) is shown in Figure 1.

To build a double inflation model which produces primordial black holes, the model for the second inflation needs some special properties. It is required to take place at low energy and produce large fluctuations. Concretely, the new inflation model with potential shown in Figure 2 is the most favorable. The new inflation model, contrary to its name, is one of the oldest inflation models. It is a successful inflation model but has an initial value problem; the initial value of the inflaton field should be near the maximal point of the potential for sufficient inflation (Figure 2). However, in the double inflation model, this initial value problem can be solved through the effect of the first inflation.<sup>\*1</sup>

Figure 3 shows the mass distribution (mass function) of primordial black holes produced in the double inflation model. If appropriate sets of model parameters are chosen, double inflation can produce black holes with various masses. In an

<sup>\*1</sup> This was my personal reason for considering the double inflation model 20 years ago (K.-I. Izawa, M. Kawasaki and T. Yanagida, *Physics Letters B* **411**, 249 (1997)).

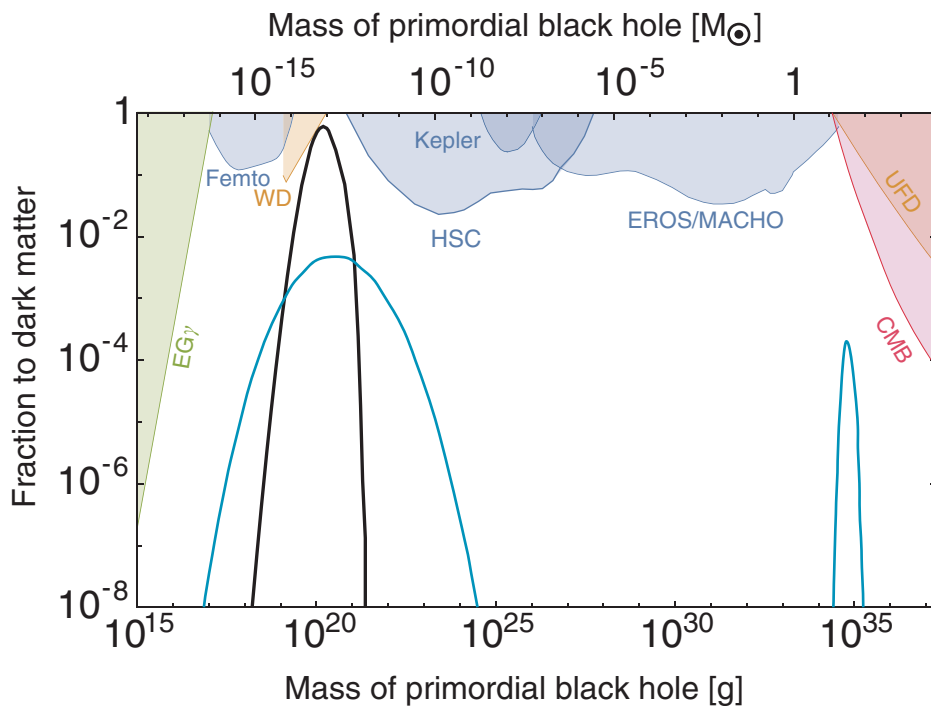


Figure 3: Mass distribution (mass function) of primordial black holes produced in the double inflation model. The solid black and blue lines represent the mass functions for different sets of the model parameters. Various observational constraints are shown by the shaded regions.  $M_{\odot}$  means the solar mass.

interesting case, the mass distribution of black holes has two peaks shown by the solid blue line in Figure 3.

## Searching for Primordial Black Holes

As mentioned above, primordial black holes could have a very wide range of masses. Many attempts have been made to observe primordial black holes in various ways. Unfortunately, no evidence for primordial black holes has been obtained, from which stringent constraints on their abundance have been imposed. For masses of between about  $10^{15}$  grams and  $10^{17}$  grams, the abundance is constrained by observations of gamma rays from evaporating black holes. Observations of the interference of gravitationally lensed light (femto lensing) from gamma ray bursters give a constraint on black holes with masses of  $10^{17}$  to  $10^{19}$  grams. On the other

hand, the abundance in the mass range from  $10^{20}$  to  $10^{35}$  grams is constrained by another gravitational lensing effect (microlensing<sup>\*2</sup>) by which the luminosity of stars is enhanced when black holes cross the line of sight to those stars. There are also constraints from the heating of gravitational systems like dwarf galaxies by black holes and from effects on CMB due to accreting gas around black holes. Figure 3 shows the constraints on abundance (fraction to the dark matter density) of primordial black holes. From this figure, it is seen that abundance is stringently constrained in the wide range of mass.

## Primordial Black Holes as Dark Matter

Can primordial black holes formed in the inflationary universe account for the dark matter?

<sup>\*2</sup> See page 22.



As shown in Figure 3, there are stringent constraints on black hole abundance. However, in the mass range of around  $10^{20}$  grams the constraint is relatively weak, so it is possible for primordial black holes to account for the dark matter of the universe if they have a mass distribution with sharp peak at  $10^{20}$  grams. In fact, such black holes can be formed in the double inflation model explained above. In Figure 3, the mass function denoted by the solid black line gives the observed dark matter density if it is integrated over mass, which means that the double inflation model can account for the all dark matter of the universe. However, the observational constraints are expected to be more stringent in future and the possibility of primordial black holes as dark matter might be excluded.

### LIGO Gravitational Wave Events and Primordial Black Holes

As I mentioned at the beginning, the gravitational wave events detected by LIGO can be caused by primordial black holes. When black holes are formed in the early universe, it is still uncertain how abundant they should be in order to account for the LIGO events, but one analysis indicates that it is possible if primordial black holes with a mass of about 30 solar mass have about  $10^{-3}$  of the dark matter density. The mass function of such black holes produced in the double inflation model is shown by the solid blue line in Figure 3.

In general scenarios where black holes are formed

by large fluctuations produced during inflation, gravitational waves are produced through the second order effect of the fluctuations (which is equal to the effect proportional to the fluctuation squared). These gravitational waves are different from those produced in binary systems of black holes, and have a frequency of nHz for the case of fluctuations which form primordial black holes and explain the LIGO events. The gravitational wave background with such frequencies is stringently constrained by observations of pulsar timings. Therefore, the density fluctuations should have a very sharp peak in order to avoid the pulsar timing constraint and account for the LIGO events. (The mass function in Figure 3 satisfies this condition.)

### Summary

Primordial black holes have been attracting interest since LIGO detected the first gravitational wave event from coalescence of binary black holes. In addition, primordial black holes could contribute significantly to the dark matter of the universe. In this article, I introduce the double inflation model which can produce density fluctuations large enough to form primordial black holes, and show that the primordial black holes produced can account for the LIGO events and the dark matter of the universe. I hope that future observations such as microlensing searches will discover primordial black holes.

# Our Team

## Young-Kee Kim

Research Field: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Principal Investigator



I am an experimental particle physicist. I have been devoting much of my research to understanding the origin of mass for fundamental particles. My group measured the mass of two of the most massive particles (the W boson and the top quark) at the Tevatron's CDF experiment, providing information about the mass of the Higgs boson, discovered at the LHC in 2012. In recent years, my focus has been to (i) find a deeper understanding of the nature of the Higgs, (ii) search for new physics using the Higgs as a new tool, and (iii) search for a new messenger particle that couples to dark matter, using the ATLAS detector at the LHC. Achieving these goals requires significant improvement of detectors and triggers. My group has been working on the new tracking trigger that has more capability and flexibility than the current trigger system. In addition, my group

is exploiting novel concepts in accelerator science and technology, studying limitations affecting the acceleration and intensity of particle beams at a fundamental level, and developing new approaches to overcome these limitations. I am a member of the particle and accelerator physics group at the University of Chicago and a member of the Kavli IPMU.



## Eiichiro Komatsu

Research Field: **Cosmology**

Kavli IPMU Principal Investigator

I study the beginning and an end (if any) of the Universe using the laws of physics and state-of-the-art measurements. I spend 2/3 of my time on theoretical research, and remaining 1/3 on providing theoretical underpinnings to experiments, and analysis and interpretation of the new data. My main weapons are the cosmic microwave background (CMB) and the large-scale structure of the Universe. I was a member of the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), with which we determined the age and composition of the Universe. We also found strong evidence for cosmic inflation by discovering adiabatic and Gaussian super-horizon fluctuations that are nearly, but not exactly, scale invariant. Over the next decade I would like to find definitive evidence for inflation by measuring B-mode polarisation of the CMB, rule



out the standard cosmological model ( $\Lambda$ CDM) by mapping cosmic structures up to a redshift of  $z=3.5$ , and determine the mass of neutrinos. To this end I am co-leading two galaxy surveys with the Prime Focus Spectrograph (PFS) on the Subaru telescope led by the Kavli IPMU, and with the Hobby-Eberly Telescope in the McDonald Observatory. For CMB, I am a member of the LiteBIRD team, and I am leading a team investigating impacts of the Galactic foreground emission on B-mode polarisation. I also enjoy thinking about what new physics we can learn about inflation in case of the discovery of primordial gravitational waves.

## Shigetaka Moriyama

Research Field: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Principal Investigator

My fields of interest include dark matter, axions, neutrino physics, and proton decay. My research comprises of two experimental approaches based on the energy scale of signals. The first approach involves the use of a liquid xenon scintillator that is sensitive to an energy scale ranging from sub-keV to MeV. The XMASS detector with 1 ton of liquid xenon is used to study dark matter particles, axions, and rare decay of xenon nuclei. To discover if dark matter is an elementary particle, we are searching for any deviations of observed events from background expectations, in addition to search for events caused by WIMPs or their relatives. The second approach involves the use of Super-Kamiokande, a large



water Cherenkov detector. The hierarchy of neutrino masses and CP violation in the lepton sector may be crucial for understanding the existence of matter in the Universe, and an observation of proton decay clearly indicates a large framework of particle physics. We are working to realize a much larger detector, the Hyper-Kamiokande, which will have a sensitivity far beyond that of Super-Kamiokande. I would like to work together with the members of Kavli IPMU to achieve big discoveries.

Our Team

## Hiromi Yokoyama

Research Field: **Science and Society**

Kavli IPMU Professor



I have been promoting science communication research based on science and technology sociology. In our post-truth era today, I am interested in how science maintains to be highly trusted by society, how it can develop in harmony, and how academia should fulfill their responsibility to society. In particular, I am interested in the following three studies:

1. Research on patronage of basic science (the difference between science born out of crowd funding and ordinary science, changes in scientific view as seen from society, etc.)

2. Big science and mega science policy and communication strategy (research on the relation between a big science facility such as TMT or SK and

a local community, comparison between SSC and ILC, etc.), and

3. Communication strategy for the basic science (research on scientists' information dissemination and trust from society using social psychology, etc.).

I will focus on discussing how to communicate with society in each research.

## Tomoko Morii

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc



I am producing the silicon vertex detector (SVD) for the Belle II detector. In the Belle II experiment, we will search for new physics from the deviation between the standard model and the result of experiment using a large amount of data. For this purpose, it is necessary to precisely measure the decay points of particles, and the SVD is a very important detector for it.

At Kavli IPMU, I have been involved in the production of the SVD. Development of the SVD took time due to its complicated structure, but in the spring of 2016 we started to mass-produce them. If

things go smoothly, it will be installed in the Belle II detector around the fall of 2018, and we will start taking data around the end of 2018. I would like to start research on new physics using the Belle II experiment data after mass production of the SVD.



## Yusuke Nakajima

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interests focus on commutative algebra and singularity theory. I am studying these subjects from the viewpoint of Cohen-Macaulay representations. For example, I am interested in non-commutative crepant resolutions, cluster tilting modules and their variants. Some interesting classes of these notions are given by dimer models, which are certain graphs on the real two-torus. In my recent research, I am trying to understand singularities and



non-commutative crepant resolutions arising from dimer models by paying attention to the operation called the mutation.

## Wenting Wang

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research interests lie in galaxy formation, dark matter haloes, and their connection to the underlying cosmology. My past research has been devoted to the properties of satellite galaxies, the connection between galaxies and dark matter, understanding the standard cosmology model with faint satellite galaxies, and constraining Milky Way halo mass through dynamical modelling of galactic haloes. These studies were carried out both theoretically



and observationally, with experiences in large galaxy surveys, cosmological numerical simulation, gravitational lensing and dynamical modelling.

# The Art of Communication

Should science be communicated in the language of social media?

John Amari

Writer

In the 21st century, stepping out of your comfort zone has become a mantra repeated almost ad nauseam across a number of fields. From the startup world to business, the media to politics, and even academia, the communications gurus recommend it as a kind of panacea for all modern-day outreach challenges.

I tend to agree with them. But when in July 2016 I joined the public relations group at the Kavli IPMU, I had to admit to myself that I may have bitten off more than I could chew. As a freelance journalist without any training in science, but with a general interest in all things scientific, I was not sure what—if anything—I could contribute to an institute of fundamental physics and mathematics.

Despite the daunting challenge of understanding the research that I was tasked with presenting to the public, I stepped up and—for the 10 months of my contract—did my best to represent the institute in Japan and abroad. In addition to publishing press releases of the latest research, I coordinated with colleagues at the Kavli IPMU and around the world to share with the public the latest results from the institute and its many global partners.

We also helped to create public events, including open days at the institute and at science conferences around the world. Of all the fascinating work that is done at the Kavli IPMU, one of the most eye-opening for me was to see throngs of people attend a public lecture by one of our researchers.

And it was really thrilling. As the legendary science communicator Carl Sagan once said, “When you’re in love, you want to tell the world.” He was talking, of course, about his life-long love affair with science, an affair he communicated in pioneering broadcasts like *Cosmos: A Personal Voyage*. A thirteen-part series, *Cosmos* broke new ground for television programming in the 1980s.

And yet, in the middle of the back-and-forth emails and preparatory work that is the mainstay of press officers, I had to face my greatest challenge: confronting the fundamental research that our scientists produced. Was I worried? Was I terrified? Absolutely. And yet I need not have been.

Researchers at the Kavli IPMU seem to have the patience of angels. Whether it was a question about the cosmic microwave background, the Standard Model of Particle Physics, or Lagrange on number theory, they listened carefully and answered fully—and without condescension. I was impressed with their communicative ability, especially as most are not native English speakers.

Kavli IPMU is endowed with a number of world-class science communicators. From the top, Director Hitoshi Murayama has led with infectious passion—he is a recognizable figure, and may be described as “the Carl Sagan of Japan.” He keeps the audience spell-bound long after a lecture, when he stays behind to answer the eager questions of individual attendees.

And the list of well-known scientists who go the extra mile in their communications with the public reads like a “who’s who” of the science world: 2015 Nobel Prize-winning physicist Takaaki Kajita and Principal Investigator and theoretical physicist Hiroshi Ooguri, to name two.

So it was not a surprise when I discovered that one of the criteria for selecting researchers at the institute is their ability as public communicators. And yet, it is my feeling that more can and should be done to reach the public. I firmly believe that to do this, researchers have to reach outside their comfort zone and embrace the latest platforms of mass communication: social media.

For many, social media is a menace to society and right-thinking-people are better off avoiding it. I think that view is mistaken. As a social media strategist, in addition to being a writer, I see the power of social media on a daily basis. Early in the 21st century, social media—be it Facebook, YouTube, Twitter, Instagram or whatever follows them—is the means of global communication. It is the television, or the radio, or the telegram, or the letter, or the messenger pigeon, or the smoke signal of modern times. But with a great difference: it is virtually free to produce and it has scale.

Facebook alone has, at the last count, around 2 billion users. Instagram has reached 700 million. There are some 300 hours of video uploaded to YouTube every minute, and around 5 billion videos are watched every day. People don’t just turn on social media in the same way that we turned on the television or radio in the past; they are on social media; that is where they spend a lot of the waking day.

Institutions, be they in the public, private, or academic sector, have to embrace social media. And so do individuals, in this case researchers. Whether you are a supporter or not, it is hard to argue that President Donald Trump of the United States has not found an effective tool for getting his message directly across to the public. Via his social media platforms, he can reach around 100 million people

directly.

But Trump is not a pioneer in this regard. So-called “influencers”—individuals who have a strong fan base on social media—have led the way in social media usage for as long as the medium has been around. Many scientists have followed suit. In the United States at least, public scientists like Neil DeGrasse Tyson and Brian Greene have cultivated a strong on-screen and social network persona. DeGrasse Tyson, for instance, has over 5 million followers on Twitter; Greene’s World Science Festival’s YouTube channel has over 230,000 subscribers.

Like Carl Sagan before them (in his case when he embraced the then-magic of television), they have on occasion received criticism for not being “real scientists” because they appeared—or appear—to be as concerned with their public reputation as they are with their academic one.

Despite the cynics, a new generation of researchers and science lovers are taking on the challenge of science communication for the masses. Physics Girl, a channel on YouTube, is run by Dianna Cowern and Sophia Chen. One of their videos—called “Crazy pool vortex”—explains vortices in straightforward yet non-condescending language. As of this writing, the video has been watched more than 6 million times.

Science students and enthusiasts like Cowern and Chen are not alone; there are more and more niche social media users out there, even in esoteric subject areas, and they are revolutionizing science communications—see the inspiring story behind IFLScience, for instance.

From my short time at the Kavli IPMU, I know that the institute’s greatest asset is its people. But I hope that, like Carl Sagan and others, more of them than has been the case thus far will step out of their comfort zone, and tell the world—in their own voice—about their love of science. To paraphrase Galileo: science may still be written in the language of mathematics, but in the 21st century, it is—perhaps—best communicated to the public in the language of social media.

# Developments of Mathematics at IPMU: in Honor of Kyoji Saito

Toshitake Kohno

Kavli IPMU Principal Investigator

Kyoji Saito finished his term as Kavli IPMU Principal Investigator at the end of March 2017. This conference was held on this occasion, from April 25 through 28, with the purpose of surveying the wide influence of Kyoji Saito's works on the development of mathematics at the Kavli IPMU. Based on a grand ambition to revive the theory of elliptic integrals and period integrals of Euler, Abel, and Jacobi from the 18th to 19th century into contemporary mathematics, Saito developed the theory of universal deformation of isolated singularities, primitive forms, flat structures and semi-infinite Hodge structures. These notions are closely related to the non-commutative Hodge theory developed later by Kontsevich, and the theory of Frobenius manifold which was used for the study of quantum cohomology. From the point of view of realizing period integrals of primitive forms along vanishing cycles, Saito also investigated infinite dimensional Lie algebras such as elliptic Lie algebras. Saito's theory plays an essential role in



mirror symmetry in mathematics and theoretical physics.

There were talks in various areas including integrable systems, algebraic analysis, representation theory, algebraic geometry and quantum field theory, that were all influenced by pioneering works by Saito, and we had stimulating discussions. The list of lecturers at the conference included Aleksander A. Belavin, Alexey Bondal, Claus Hertling, Kentaro Hori, Hiroshi Iritani, Michio Jimbo, Si Li, Takuro Mochizuki, Shigeru Mukai, Nikita Nekrasov, Kyoji Saito, Morihiko Saito, Yukinobu Toda and Alexander Varchenko. The talk by Kyoji Saito was entitled "Highest weight Integrable Representations of Elliptic Lie algebra" and described the representation theory of infinite dimensional Lie algebras beyond the classical correspondence between simple singularities and simple Lie algebras. At the end of the conference he mentioned that the subjects covered at the conference appeared different at first glance, but in fact each of them are deeply connected with one another. Through this event, we were able to appreciate the depth and wide-ranged aspects of mathematics initiated by Kyoji Saito.

Music performance by the Kavli IPMU Chamber Orchestra with the participation of Kyoji Saito at Tea Time on April 27.



# The 3rd Joint Symposium of Osaka CTSR, RIKEN iTHES/iTHEMS, and Kavli IPMU “Deep Learning and Physics”

Shiro Ikeda

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

On June 5, 2017, the 3rd Joint Symposium of Osaka CTSR, RIKEN iTHES/iTHEMS, and Kavli IPMU “Deep Learning and Physics” was held at the Nambu Hall of Osaka University. In contrast to the previous two symposia of this series, the theme of this symposium was the relationship between deep learning—a hot topic in the fields of artificial intelligence and machine learning—and fundamental physics. In deep learning, high performance of deep convolutional neural networks in image processing has been drawing attention. It was Kunihiro Fukushima who proposed this characteristic structure when he was a professor at the School of Engineering Science at Osaka University in the 1980s and 1990s. I enjoyed this coincidence, as I have been working around the field of machine learning.

The program consisted of seven talks. The first two talks were related to neural networks, where Masato Taki (iTHES) gave an overview of the mechanism and development of deep learning, and Shun-ichi Amari (RIKEN BSI) explained the relationship between the theory of neural fields, which he proposed about 40 years ago, and deep learning. The next two talks were related to the application of neural networks in physics. Methods of training neural networks to reproduce phase diagrams and their results were reported by Tomi Ohtsuki (Sophia Univ.) regarding quantum phase

transitions in random electron systems, and by Akinori Tanaka (iTHES) regarding an Ising spin model. The importance of machine learning in astronomy was the subject of the two subsequent talks. The present author (ISM/Kavli IPMU) explained the significance of sparse modeling in the Event Horizon Telescope, and the use of machine learning for the automatic detection of transients in the Subaru/Hyper Supreme-Cam (HSC) project. Nao Suzuki (Kavli IPMU) spoke about the relationship between Type Ia supernovae captured by the HSC and precision cosmology, and the role of machine learning. Finally, Yoshinobu Kawahara (Osaka Univ./RIKEN AIP) explained the way to extend the recently proposed Dynamic Mode Decomposition (DMD) by using a kernel method.

Having attended this symposium, it was surprising to learn that physicists have a keen interest in neural networks. But, because my background is close to machine learning, I understand the risks, and caution the use of those techniques. High performance in deep learning has not been fully understood theoretically, and in some aspects it is used as a black box. Sometimes it is dangerous to apply such a method to a problem which should be clarified through precise first-principles calculations. I hope that physicists will make great achievements through proper use of machine learning.





# News

## Hitoshi Murayama Named One of the 100 Influencers in the World

It has been 100 years since Albert Einstein established the General Theory of Relativity in 1915 and published it in 1916. To commemorate this historic milestone, the Albert Einstein Foundation is promoting the Einstein Legacy Projects. “Genius: 100 Visions of the Future” is one of these projects. It aims at collecting and publishing the visions of 100 significant influencers in the world including scientists, artists, thinkers, and innovators. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama has been named by the Foundation as one of the contributors for this project. Those already on the list include Kyoto University Professor and Nobel Laureate Shinya Yamanaka. The 100 visions will be compiled into the world’s first 3D-printed book featuring Einstein’s face, designed by the world-famous designer, Israel-born Ron Arad.



Hitoshi Murayama

## PI Young-Kee Kim Elected to the American Academy of Arts and Sciences

On April 12, 2017, it was announced that Chicago University Professor and Kavli IPMU Principal Investigator (PI) Young-Kee Kim was

named a new member of the American Academy of Arts and Sciences. Established in 1780, it is one of the oldest learned societies in the United States. Its members have made significant accomplishments in academia, arts, business, and politics, and selection by the Academy has been one of the highest honors in the United States. So far, three Kavli IPMU members have been selected by the Academy as its members: PI David Spergel in 2012, Director Hitoshi Murayama in 2013, and PI Hiroshi Ooguri in 2016.



Young-Kee Kim

Professor Young-Kee Kim has long been a leading physicist in the field of high-energy physics experiments using particle accelerators. Her research activities include participation in the CDF experiment at Fermilab in the US and the ATLAS experiment at the CERN LHC. She also served as Deputy Director of Fermilab from 2006 to 2013.

The 228 new members announced this year will be inducted at a ceremony at the Academy’s headquarters in Cambridge, Massachusetts on October 7.

## Kavli IPMU and ICRR Host 16th Joint Public Lecture

On April 15, 2017, the 16th Kavli IPMU and University of Tokyo’s Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) joint public lecture was held at Amuser Kashiwa in Kashiwa city, and about 330 audience including junior high-school and high-school students participated.

ICRR Professor Hiroyuki Sagawa delivered the first lecture, entitled “The Highest Energy Cosmic Rays —Probing Extremely High-Energy Astrophysical Phenomena from Utah,”

where he talked about the Telescope Array (TA) experiment carried out in a Utah desert. (For the highest-energy cosmic rays which are the objects of observation in the TA experiment, see *Kavli IPMU News* No. 27, p. 28.) Professor Sagawa explained that there are various hypotheses about the origin of the highest-energy cosmic rays, and the TA experiment uses two kinds of instruments, a ground array of scintillator surface detectors and fluorescence telescopes, to observe arrival directions and energies of cosmic rays, which are clues to distinguish these hypotheses. He also explained that the instruments of the TA experiment are deployed over a 700 km<sup>2</sup> area of the Utah desert, and in the TA’s future plan, a 3000 km<sup>2</sup> area is envisaged. The audience seemed to be astonished at such a large scale.

The next lecture was delivered by Kavli IPMU Associate Professor Yukinobu Toda. He spoke on “Calabi-Yau Manifolds—Mathematical ‘Conjectures’ Introduced by Physics.” Calabi-Yau manifolds are manifolds which attract a great deal of attention at the intersection between string theory in physics and pure mathematics. To explain what the Calabi-Yau Manifolds are, Professor Toda gave careful and stepwise illustrations of *dimensions*, *polynomial expressions*, *complex numbers*, *complex algebraic varieties*, and so on, while talking about the history of a field of mathematics developed in



Yukinobu Toda, giving a lecture.

Japan, “the classification of higher-dimensional complex algebraic varieties.”

He then talked about how the Calabi-Yau manifolds, known to mathematicians as interesting manifolds, came to be connected with physics when physicists discovered mirror symmetry, and how mathematician’s interests in superstring theory led to the mathematical discovery of the equivalence of two different mathematical theories thanks to mirror symmetry.

After the lectures, Professor Sagawa and Professor Toda answered each other’s questions. They also answered some of the written questions that the audience submitted during the break. There was then a further opportunity for attendees to ask the lecturers questions in the foyer of Amuser Kashiwa.



Yukinobu Toda (left) and Hiroyuki Sagawa (right)

#### First Lecture at Science Café Universe 2017

Since 2009, Kavli IPMU and Tamarokuto Science Center has been co-hosting “Science Café Universe” at Tamarokuto Science Center in Nishi-Tokyo City. Every year, a series of two or three Science Cafés, with the exception of 2009 when there were five, has been held on Saturdays over a month or two. This year, the first Science Café in the 2017 series was held on June 24. Here, for the first time a non-Japanese researcher, Kavli IPMU postdoctoral fellow William

Donovan delivered a lecture in English with no interpretation in Japanese. The second of the 2017 series will be held on July 8 in the same way.



Will Donovan, giving a lecture.

The title of Donovan’s lecture was “Soap Bubbles, Spacetime, and Structures.” There were about 30 attendees, about 30% of whom were junior high-school and high-school students. In the first half of the Science Café, each group of attendees made an experiment to generate soap bubbles using a hand-made soap bubble making kit and soap bubble liquid, for the purpose of understanding curvature. The lecturer explained that soap bubbles have surprising shapes and the shape of a soap bubble is set by simple equations. He then proceeded to Gaussian curvature, the bending of space and time, and Einstein’s equation for general relativity. The attendees seemed to be quite interested in the fact that there is a link between soap bubbles and the universe in terms of the mathematical concept of curvature.

Although only English was used throughout this Science Café, from the lecture to the Q&A session, one of the attendees remarked on the questionnaire, “As the lecture was given in English only, I was initially bracing myself for it. But because the lecturer spoke English in an easy-to-understand way, I was able to follow his lecture. And it was interesting.” There were other similar remarks.

Generally, the attendees seemed to be satisfied.



Will Donovan, answering questions of attendees after the lecture.

#### Kavli IPMU Seminars

1. “Theoretical Models for Hydrogen-poor Superluminous Supernovae”  
Speaker: Elena Sorokina (Moscow State U)  
Date: Feb 01, 2017
2. “Ultraluminous quasars with the most massive black holes at cosmic dawn”  
Speaker: Xue-Bing Wu (KIAA, Peking U)  
Date: Feb 02, 2017
3. “Curves and cycles on K3 surfaces”  
Speaker: Qizheng Yin (ETH Zurich)  
Date: Feb 07, 2017
4. “Dark Matter interpretation of the IceCube diffuse neutrino flux”  
Speaker: Marco Chianese (U Naples)  
Date: Feb 08, 2017
5. “Higher Dimensional Quantum Theories”  
Speaker: Kimyeong Lee (KIAS)  
Date: Feb 14, 2017
6. “Ultra-Light Axion Dark Matter and its impacts on dark halo structure in N-body simulation”  
Speaker: Yue-Lin Sming Tsai (NCTS, Taiwan)  
Date: Feb 15, 2017
7. “Simulating nonlinear cosmological structure formation with massive neutrinos”  
Speaker: Arka Banerjee (UIUC)  
Date: Feb 15, 2017

8. "Characteristic polynomials of Linial arrangements"  
Speaker: Masahiko Yoshinaga (Hokkaido U)  
Date: Feb 16, 2017
9. "Splashback and outskirts of Dark Matter halos"  
Speaker: Susmita Adhikari (UIUC)  
Date: Feb 16, 2017
10. "On geometric invariant theory for hypersurfaces and their hyperplane sections"  
Speaker: Patricio Gallardo (U Georgia)  
Date: Feb 21, 2017
11. "On quantized elliptic algebras"  
Speaker: Yoshihisa Saito (U Tokyo)  
Date: Feb 21, 2017
12. "A (The?) Higgs Vacuum Instability During Inflation"  
Speaker: Jack Kearney (FNAL)  
Date: Feb 22, 2017
13. "Nucleosynthesis of heavy elements in the r-process"  
Speaker: Igor Panov (ITEP)  
Date: Feb 22, 2017
14. "The Degeneracy of Cosmic Neutrinos"  
Speaker: Ming-Chung Chu (Chinese U of Hong Kong)  
Date: Feb 23, 2017
15. "The Thirty Meter Telescope - India Perspective"  
Speaker: Anupama Chakrapani (Indian Institute of Astrophysics)  
Date: Feb 23, 2017
16. "Algebraic Cycles and Modular Forms"  
Speaker: Marc-Hubert Nicole (Institut mathématique de Marseille)  
Date: Feb 24, 2017
17. "Top and Top+Charm Flavored Scalar Dark Matter with a Vector-like Fermion Partner"  
Speaker: Peiwen Wu (KIAS)  
Date: Feb 24, 2017
18. "Non-perturbative analysis of the spectrum of meson resonances in an ultraviolet-complete composite-Higgs model"  
Speaker: Michele Frigerio (CNRS)  
Date: Mar 01, 2017
19. "Superconformal index of Argyres-Douglas theories of class S"  
Speaker: Takahiro Nishinaka (Kyoto U)  
Date: Mar 07, 2017
20. "The interplay between the primordial magnetic fields and particle physics"  
Speaker: Kohei Kamada (Arizona State U)  
Date: Mar 08, 2017
21. "Langlands conjecture for function fields via shtukas"  
Speaker: Dennis Gaitsgory (Harvard U)  
Date: Mar 13, 2017
22. "Cosmology with Shadows in the Microwave Sky"  
Speaker: Nick Battaglia (Princeton U)  
Date: Mar 13, 2017
23. "The Influence of Galaxy Environment on the Stellar Initial Mass Function of Early-Type Galaxies"  
Speaker: Giulio Rosani (ARI Heidelberg)  
Date: Mar 14, 2017
24. "Factorization homology and the cobordism hypothesis"  
Speaker: John Francis (Northwestern U)  
Date: Mar 14, 2017
25. "Langlands conjecture for function fields via shtukas"  
Speaker: Dennis Gaitsgory (Harvard U)  
Date: Mar 15, 2017
26. "How environment chisels galaxy properties: the clusters galaxies' outlook"  
Speaker: Anna Pasquali (ARI Heidelberg)  
Date: Mar 16, 2017
27. "Mass growth of objects and categorical entropy"  
Speaker: Akishi Ikeda (Kavli IPMU)  
Date: Mar 16, 2017
28. "Langlands conjecture for function fields via shtukas"  
Speaker: Dennis Gaitsgory (Harvard U)  
Date: Mar 17, 2017
29. "The new relationship between inflation and gravitational waves"  
Speaker: Tomohiro Fujita (Stanford U)  
Date: Mar 21, 2017
30. "OzDES - Spectroscopic follow-up of transients and other objects in the DES supernova fields"  
Speaker: Chris Lidman (Australian Astronomical Observatory)  
Date: Mar 21, 2017
31. "Axion dark matter in the post-inflationary Peccei-Quinn symmetry breaking scenario"  
Speaker: Kenichi Saikawa (DESY)  
Date: Mar 22, 2017
32. "On magnetic field generation in stars"  
Speaker: Elena Popova (Moscow State U)  
Date: Mar 22, 2017
33. "New Ways to Study Magnetic Fields and Turbulence using Observations"  
Speaker: Alex Lazarian (U Wisconsin)  
Date: Mar 23, 2017
34. "Multiple Higgs production at very high energies (and meltdown of perturbation theory)"  
Speaker: Valya Khoze (IPPP, Durham U)  
Date: Mar 29, 2017
35. "The Boundary Dual of a Local Bulk Operator"  
Speaker: Sean Jason Weinberg (UCSB)  
Date: Mar 30, 2017

36. "Mapping the  $z > 2$  Cosmic Web with IGM Tomography: Latest Results and Future Perspectives"  
Speaker: Khee-Gan Lee (LBL)  
Date: Mar 30, 2017
37. "Equations and derived manifolds"  
Speaker: Andrew Macpherson (Kavli IPMU)  
Date: Mar 30, 2017
38. "Analysing the 21cm signal from epoch of reionization with artificial neural networks"  
Speaker: Hayato Shimabukuro (Observatoire de Paris)  
Date: Mar 31, 2017
39. "Effective Field Theory for the Standard Model"  
Speaker: Rodorigo Alonso De Pablo (CERN)  
Date: Apr 03, 2017
40. "Quantum Aspects of Black Holes"  
Speaker: Dieter Luest (MPI)  
Date: Apr 04, 2017
41. "Simplified models of dark matter with a long-lived co-annihilation partner"  
Speaker: Alexis Plascencia (IPPP, Durham)  
Date: Apr 05, 2017
42. "The Thin Flux-Tube Approximation and Some Applications in Solar/Stellar Magnetism"  
Speaker: Antonio Ferriz (IAA/CSIC Granada and Universidad de Vigo, Spain)  
Date: Apr 06, 2017
43. "Direct dark matter search with the XMASS detector"  
Speaker: Katsuki Hiraide (ICRR)  
Date: Apr 07, 2017
44. "Supercritical Entanglement: counter-examples to the area law for quantum matter"  
Speaker: Ramis Movassagh (IBM TJ Watson Reserach Center)  
Date: Apr 10, 2017
45. "Cohomological BPS invariants, vanishing cycles and Kac-Moody Lie algebras"  
Speaker: Ben Davison (U Glasgow)  
Date: Apr 10, 2017
46. "Superposition induced topology changes in quantum gravity"  
Speaker: David Berenstein (UCSB)  
Date: Apr 11, 2017
47. "Dark Matter and Collider Studies in the L-R Symmetric Standard Model with Vector like leptons"  
Speaker: Dilip Kumar Ghosh (Indian Association for the Cultivation of Science )  
Date: Apr 12, 2017
48. "Moving the CFT into the Bulk"  
Speaker: Herman Verlinde (Princeton U)  
Date: Apr 13, 2017
49. "From Precision to Accuracy: cosmology with large imaging surveys"  
Speaker: Boris Leistedt (NYU)  
Date: Apr 13, 2017
50. "Hunting for Dark Matter with SuperCDMS"  
Speaker: Tsuguo Aramaki (SLAC)  
Date: Apr 14, 2017
51. "How to resum perturbative series in supersymmetric gauge theories"  
Speaker: Masazumi Honda (Weizmann Institute of Science)  
Date: Apr 18, 2017
52. "Searching for dark matter with liquid xenon"  
Speaker: Masaki Yamashita (ICRR)  
Date: Apr 18, 2017
53. "Standard Model Parton Distributions at Very High Energies"  
Speaker: Bryan Webber (U Cambridge)  
Date: Apr 19, 2017
54. "Homotopy Lie algebroids and bialgebroids"  
Speaker: Alexander Voronov (U Minnesota)  
Date: Apr 20, 2017
55. "Dynamical Clockwork axions"  
Speaker: Rupert Coy (U. Montpellier)  
Date: Apr 21, 2017
56. "You can hide but you have to run: new theory tools to unveil the mystery of dark matter"  
Speaker: Francesco D'Eramo (UC Santa Cruz)  
Date: Apr 26, 2017
57. "Magnetic fields of primordial origin"  
Speaker: Ryo Namba (McGill U)  
Date: Apr 28, 2017

## Personnel Changes

### Reappointment

Former Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yin Li has been reappointed on April 1, 2017. Previously, he was at the Kavli IPMU from April 1 to September 30, 2016. He then stayed at Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) for half a year. For the time being, he will alternately work at the Kavli IPMU and LBNL for half a year each.

### 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 Christophe Bronner [May 1, 2014 – April 30, 2017] moved to the Kamioka Observatory of the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo as a Project Assistant Professor.

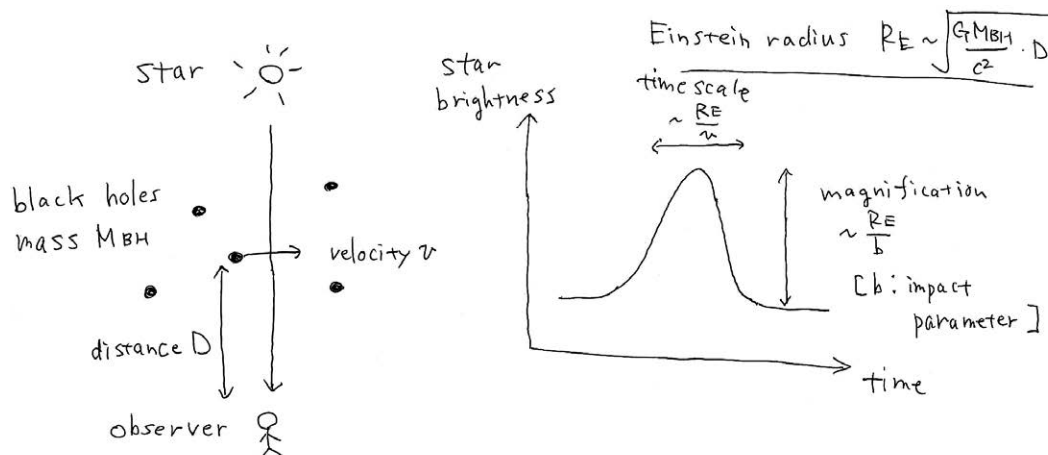
Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yohsuke Imagi [June 1, 2014 – June 15, 2017] moved to the Chinese University of Hong Kong as a Postdoctoral Fellow.

# Microlensing

Masamune Oguri

Assistant Professor, School of Science, The University of Tokyo,  
and Kavli IPMU Associate Scientist

One way to study the abundance of compact objects such as black holes is to make use of gravitational lensing magnifications of background stars by such compact objects, which is called microlensing. Although the probability of observing such magnifications for individual stars is tiny, this microlensing effect can be observed by monitoring the brightness of millions of stars. In particular, recent discoveries of gravitational waves from black hole mergers have stimulated theoretical studies to explain dark matter with black holes as well as observational studies to constrain the abundance and mass of black holes using microlensing observations.

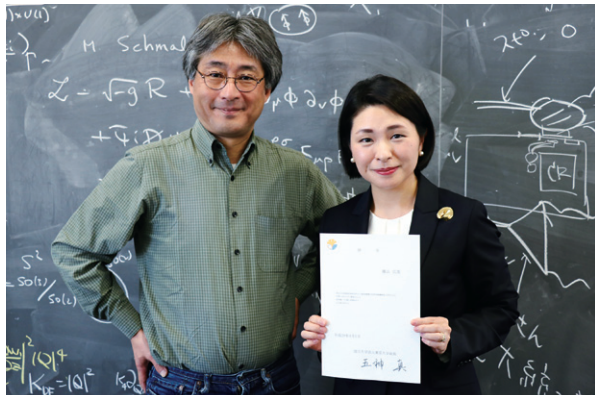




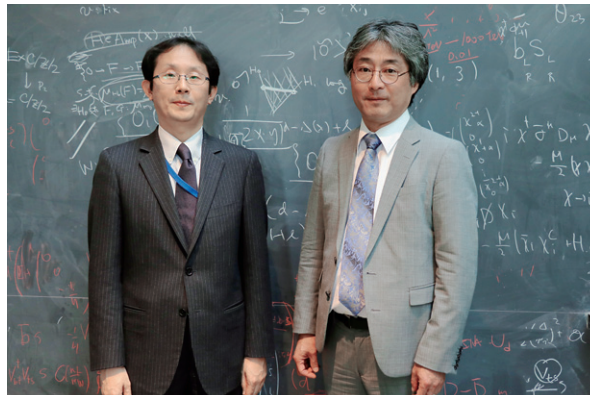
# 近況

Kavli IPMU 機構長

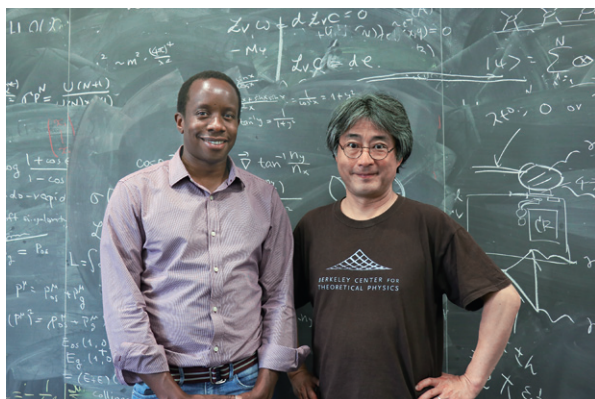
村山 斉 むらやま・ひとし



4月4日：辞令交付後、横山広美教授（右）と共に。



4月25日：Kavli IPMUを視察した岸本哲哉文部科学省研究振興局基礎研究振興課長（左）と共に。



5月11日：平成28年7月1日から29年5月15日まで在籍し、広報グループに所属したジョン・アマリさん（左）と共に。アマリさんが寄稿してくれた記事（本誌34-35ページ）もご覧下さい。



6月1日：学術支援専門職員のアントニオ・バラディノさん（右端）と博士研究員のウェンティン・ワンさんに辞令交付。



6月16日：統計数理研究所の一般公開で講演。写真提供：統計数理研究所。



Director's  
Corner

## 原始ブラックホールとインフレーション宇宙

2015年9月に、史上初めてブラックホール合体による重力波が米国ルイジアナ州リビングストーンとワシントン州ハンフォードにあるレーザー干渉計重力波検出器(LIGO)によって検出されました。その後もブラックホール合体による重力波イベントが見つかり、今年になって3例目のイベントが検出されたことが発表されました。これら3個のイベントは、質量が太陽の10倍から30倍程度のブラックホールの連星系が合体したことによると解釈されています。また、この歴史的な発見は、人類が重力波という新たな観測手段で宇宙を探ることができるようになったということを意味しています。

通常、ブラックホールは大きな質量を持った星がその一生の最後に自分自身の重力で崩壊して生まれると考えられています。しかし、LIGOによって観測されたブラックホールは星の重力崩壊で予想されるよりは質量が大きく、星の進化でこのようなブラックホール連星系がどのように形成されたかは議論になっています。そこで、重力波イベントを起こしたブラックホールの形成に関して、もう一つのアイデアが関心を持っています。それは、原始ブラックホールと呼ばれる宇宙初期に形成されたブラックホールが連星系を作り合体したのではないかとということです。

### 原始ブラックホール

原始ブラックホールは、宇宙が誕生して1秒にも

満たないごく初期に大きな密度揺らぎが存在した場合に、それが重力崩壊を起こして形成されるものです。宇宙の初期にブラックホールが存在した可能性は1966年にZeldovichとNovikovによって指摘され、1971年にHawkingが大きな密度揺らぎを持った領域が重力崩壊してブラックホールができるという、原始ブラックホールに対する現在の描像を提示しました。その後、約50年にわたって原始ブラックホールは様々な形で議論され、物理学、天文学の研究者に興味を持たれてきました。

原始ブラックホールの質量は生成された時期で決まります。いま、宇宙初期に大きな密度揺らぎが存在していたとします。この時、揺らぎには様々な空間的サイズのものが存在します。揺らぎを密度の高いところと低いところがある波だとイメージして、揺らぎのサイズを揺らぎの波長と呼ぶことにします。この描像では揺らぎの大きさは波の高さに相当します。そして、ある波長の揺らぎに着目しましょう。揺らぎの進化は揺らぎの波長が宇宙の地平線の大きさ（地平線長）と比べて大きい小さいかによって異なります。ここで地平線とは光速で到達できる限界を表し、大雑把に（地平線長）＝（光速）×（宇宙の時間）で与えられ、宇宙の時間とともに大きくなります。どんな情報も光速より速く伝わらないので地平線より大きなスケールでは因果関係が存在しません。最初、揺らぎは地平線より大きな波長を持っています。地平線長より揺らぎの波長が大きいと何も起きません。揺らぎの波長は宇

宇宙膨張によって引き延ばされますが、地平線長はそれより速く大きくなっていくので、十分時間が経つと揺らぎの波長は地平線長と等しくなり、揺らぎは地平線の中に入ります。この時、密度揺らぎの大きさが大きく、地平線内の重力がその時期宇宙を支配している輻射の圧力に打ち勝つとその領域は潰れ、ブラックホールが作られます。したがって、生成されるブラックホールの質量は地平線に囲まれた中にある輻射の全エネルギーにほぼ等しくなります。例えば、宇宙の温度が $10^{15}$ 度（時刻で約 $10^{-11}$ 秒）の時に作られる原始ブラックホールの質量は $10^5$ 太陽質量 $=10^{28}$ グラム程度で、温度が $10^{12}$ 度（時刻で約 $10^{-4}$ 秒）の時に作られる原始ブラックホールの質量は $10$ 太陽質量 $=10^{34}$ グラム程度となります。このように、原始ブラックホールは形成される時期によって様々な質量を持ちます。

ブラックホールはその強い重力のために光さえもその中から外に出ることはできません。そのためブラックホールは一旦形成されると安定に存在し続けると考えられていました。しかし、1974年にホーキングが、ブラックホール時空に量子論を適用することによって、ブラックホールが粒子を放出して蒸発することを示しました。これをホーキング輻射と呼びます。ホーキング輻射の効果は小さなブラックホールほど顕著で、質量が $10^{15}$ グラム程度以下のブラックホールはホーキング輻射によって現在までに蒸発してしまいます。したがって、現在の宇宙に存在している原始ブラックホールの質量は $10^{15}$ グラム以上のものになり

ます。

## 宇宙の密度揺らぎとインフレーション宇宙

さて、原始ブラックホールを生成するような大きな揺らぎはどうやって作られるのでしょうか。宇宙にある銀河や銀河団などの宇宙の大規模構造は宇宙初期に存在した小さな密度揺らぎが重力の不安定性によって成長し形成されたと考えられています。実際、宇宙の初期に密度揺らぎが存在することは、アメリカのNASAが打ち上げたCOBE衛星による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の観測から1992年に発見されました。CMBは宇宙が高温で熱平衡にあった時に大量に存在した光が宇宙膨張によってその波長が引き伸ばされ、現在数mmの波長をもつマイクロ波として観測されている放射で、宇宙のあらゆる方向から等方的に來ています。CMBを精密に観測するとわずかながら非等方性があることがCOBEによって発見されました。これは光が放出された時期、つまり、誕生して約38万年の宇宙にわずかに密度揺らぎがあることが原因であると解釈されます。CMBの非等方性はその後WMAP衛星とプランク衛星によってさらに詳細に調べられ、宇宙初期に $10^{-5}$ 程度の密度揺らぎが存在したことが明らかになりました。

そもそもCMBの観測で明らかになった密度揺らぎはどのように作られたかが問題ですが、ほとんどすべての宇宙論研究者は、インフレーションと呼ばれる

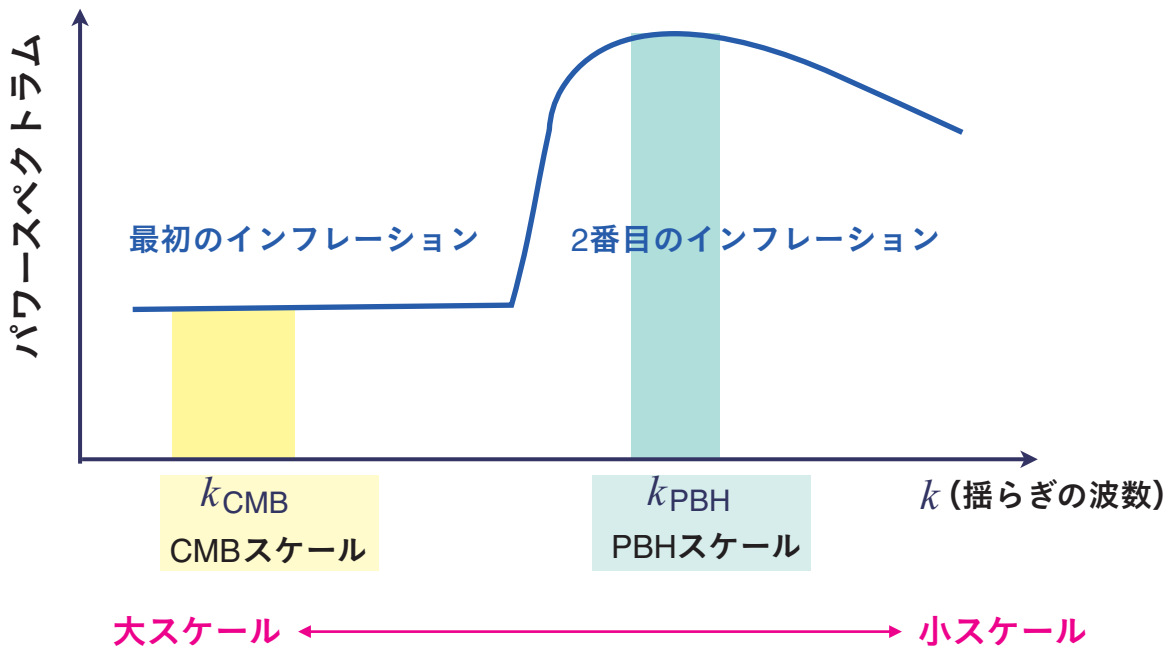


図1 ダブルインフレーション模型が作る揺らぎのパワースペクトルを模式的に示した図。パワースペクトルとは波数 $k$ の揺らぎの大きさの2乗を $k$ の関数として書いたもので、波数とは波長の逆数に比例する量、つまり $k \sim 1/(\text{波長})$ 。最初のインフレーションで大スケールの揺らぎ（波数の小さな揺らぎ）が作られ、2番目のインフレーションで小スケールの揺らぎ（波数の大きな揺らぎ）が作られる。図中のPBHは、原始ブラックホール（primordial black hole）を意味する。

宇宙誕生後約 $10^{-36}$ 秒に起こった宇宙の加速度膨張によって密度揺らぎが作られたと信じています。インフレーションはインフラトンと呼ばれるスカラー場のポテンシャルエネルギーが宇宙を支配することによって起き、その時インフラトン場は量子揺らぎを持っており、それが急激な膨張で引き伸ばされることによって宇宙論的スケールの長さを持った揺らぎになります。インフレーションが作る揺らぎにはほぼスケール不変であるという性質があります。スケール不変な揺らぎとは、揺らぎを構成する様々な波長の揺らぎの大きさが波長によらず一定であるような揺らぎのことです。このインフレーションの作る揺らぎの性質は、他のインフレーションの予言とともに宇宙マイクロ波背景放射の観測によって確かめられており、我々がインフレーション宇宙を信じる大きな根拠となっています。

### ダブルインフレーションによる 原始ブラックホールの生成

インフレーション宇宙ではほぼスケール不変な揺らぎが生成され、CMBで観測される大スケール（100 Mpc 程度以上）の波長の揺らぎは $10^{-5}$ 程度だと分かっています。一方、原始ブラックホールを作るには揺らぎが地平線内に入った時に $10^{-1}$ 程度の大きな揺らぎが必要です。しかし、スケール不変性が正しいと地平線内に入った時の揺らぎは常に $10^{-5}$ 程度で、原始ブラックホールを生成するような大きな揺らぎを作るのは困難です。したがってスケール不変性を破る必要があります。

ここではそのための1つのアイデアとしてダブルインフレーション模型を紹介します。スケール不変性はインフレーションが一つのスカラー場によって起こっている場合には簡単には破れません。しかし、インフ



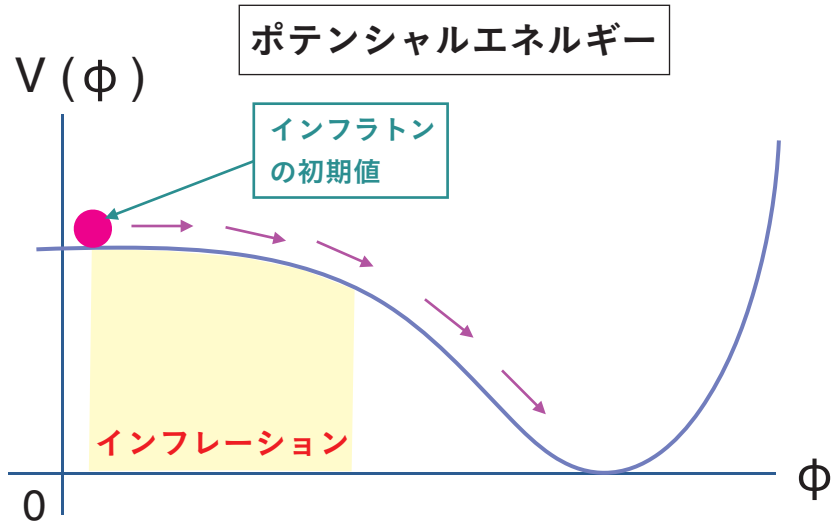


図2 ニューインフレーション模型におけるインフレーションを起こすスカラー場（＝インフラトン）のポテンシャル。インフラトン場が原点近くの値を初期値に持ち、ポテンシャルの最小値に向かってゆっくり転がる間にインフレーションが起きる。

レーションを起こすスカラー場が複数あると話は違ってきます。例えば、インフレーションが2段階で起こるとしましょう。インフレーションではインフレーションの終わりに近い時期に最も小さなスケールの揺らぎが生成され、それより早い時期に作られた揺らぎは大きなスケールの揺らぎになります。これは早い時期に作られた揺らぎの方がその後のインフレーションで引き伸ばされ、より大きな波長を持つ揺らぎになることを考えれば容易に理解できます。したがって、2段階にインフレーションが起こるシナリオでは、最初に起きるインフレーションがCMBで観測されるような大きなスケールの揺らぎを作り、あとで起こるインフレーションが小さなスケールで大きな揺らぎを生成し、それによって原始ブラックホールを作ることができます。このように2段階でインフレーションが起きる模型をダブルインフレーション模型と呼びます。ダブルインフレーションで生成される揺らぎのパワースペクトラム（波数 $k$ を持った揺らぎの2乗）を模式的に書くと図1のようになります。

実際に原始ブラックホールを生成するようなダブル

ルインフレーション模型を構築するためには、2番目に起こるインフレーションに工夫が必要になります。2番目のインフレーションとしては、エネルギースケールが小さくても大きな揺らぎを作ることのできる模型が好ましく、具体的には、図2のようなポテンシャルを持つニューインフレーション模型が適しています。ニューインフレーション模型はその名前に反して最も古いインフレーション模型の一つですが、難点としてインフラトン場の初期値をポテンシャルの極大近くの値にとる必要があるという初期値問題があります。しかし、ダブルインフレーション模型では、最初のインフレーションの効果によってこの初期値問題も解決することができます。<sup>\*1</sup>

図3にダブルインフレーション模型が生成する原始ブラックホールの質量分布（質量関数）を示しました。模型のパラメータを適切に選ぶことによって、様々な質量を持った原始ブラックホールが生成できます。また、図2の青い実線で示したように、パラメータに

<sup>\*1</sup> 個人的には初期値問題の解決が20年前にダブルインフレーションを考えた動機でした。(K.-I. Izawa, M. Kawasaki, and T. Yanagida, *Physics Letters B* **411**, 249 (1997))



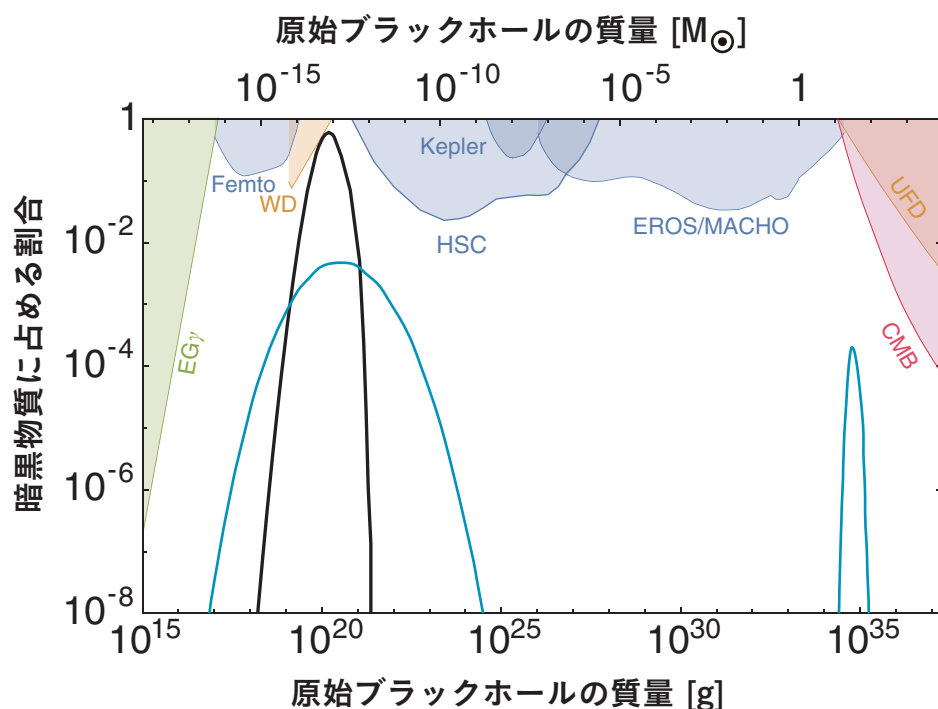


図3 黒の実線と青の実線は、それぞれ異なる模型パラメータに対するダブルインフレーション模型で生成される原始ブラックホールの質量分布（質量関数）を表す。影をつけた領域は原始ブラックホールの暗黒物質に占める割合に対する様々な観測的制限。 $M_{\odot}$  は太陽質量を表す。

よってはブラックホールの分布に2つピークが現れる場合もあります。

### 原始ブラックホールの観測的制限

前に述べたように、現在宇宙にある原始ブラックホールは極めて幅広い範囲の質量を持つ可能性があり、様々な方法でその存在を観測する試みが行われてきました。残念ながら、現在に至るまで原始ブラックホールの観測的証拠はなく、そのことから原始ブラックホールの存在量に制限がつけられています。まず、質量が $10^{15}$  グラムから $10^{17}$  グラム程度の比較的軽い原始ブラックホールは蒸発する際に放出されるガンマ線の観測から強い制限がつけられています。 $10^{17}$  グラムから $10^{19}$  グラムの質量のブラックホールはガンマ線バーストからの光の重力レンズ効果による干渉効果（femto lensing）の観測から制限され、 $10^{20}$  グラ

ムから $10^{35}$  グラムの質量のブラックホールは星と観測者の間の視線をブラックホールが通過すると重力レンズによって星の光が増光する効果（microlensing<sup>\*2</sup>）の観測から制限がつけられています。また、その他、ブラックホールが矮小銀河などの系を力学的に暖めることによる効果や、ブラックホールの周りのガスのアクリーション（降着）によるCMBへの影響からくる制限などがあります。図3に現在の原始ブラックホールの存在量（暗黒物質の密度に対する割合）に対する制限を示しました。この図から非常に広い質量範囲にわたって観測から制限がつけられていることが分かります。

### 暗黒物質としての原始ブラックホール

インフレーション宇宙で作られた原始ブラックホールは宇宙の暗黒物質を説明できるのでしょうか？ 図

<sup>\*2</sup> 本号の裏表紙を参照。

3で示したように、原始ブラックホールの存在量は観測から厳しく制限されていますが、質量が $10^{20}$  グラム付近のブラックホールの制限は比較的弱く、 $10^{20}$  グラムにシャープなピークを持つような質量分布の原始ブラックホールを作ることができれば暗黒物質を説明できる可能性があります。実際に、そのようなブラックホールを作るとは可能です。前述したダブルインフレーション模型で作られる原始ブラックホールの質量関数を図3の黒の実線で示しました。この質量関数を積分すると暗黒物質の全質量密度になり、宇宙の全暗黒物質を説明することができます。ただし、今後観測の制限はさらに厳しくなると予想され、近い将来暗黒物質としての原始ブラックホールは排除されるかもしれません。

## LIGO重力波イベントと原始ブラックホール

最初に述べたように、LIGOで発見された重力波イベントは原始ブラックホールの合体によって引き起こされた可能性があります。宇宙初期に原始ブラックホールが作られた場合、そのようなブラックホールがどのくらい存在すればLIGOの観測を説明できるかに関して、不定性が大きいのですが、約30太陽質量を持つ原始ブラックホールが暗黒物質に対して質量比で $10^{-3}$ 程度あればLIGOイベントを説明できるという解析があります。図3にはダブルインフレーション模型でそのような原始ブラックホールを説明できる質量関

数が青の実線で示されています。

ダブルインフレーション模型に限らず、一般的に、インフレーションで作られた大きな揺らぎで原始ブラックホールを作るシナリオでは、揺らぎの2次の効果として重力波が生成されます。これはブラックホールが連星系を作って放出する重力波とは異なるもので、LIGOイベントを説明するような原始ブラックホールの場合、生成される重力波はnHz（ナノヘルツ）程度の周波数を持ちます。この振動数帯の背景重力波に対してはパルサータイミングの観測から厳しい制限があり、その制限を逃れてLIGOイベントを説明するには密度揺らぎが極めてシャープなピークを持つことが要求されます。（図3の質量関数はこれを満たしています。）

## まとめ

最近のLIGOによるブラックホール連星合体からの重力波の観測によって、原始ブラックホールは注目を集めています。また、原始ブラックホールは宇宙の暗黒物質に重要な寄与をしている可能性もあります。ここでは原始ブラックホール生成に必要な大きな密度揺らぎを生成することができるダブルインフレーション模型を取り上げ、原始ブラックホールが宇宙の全暗黒物質やLIGOイベントを説明できることを示しました。近い将来、microlensingを用いた観測等で原始ブラックホールが発見されることを期待しています。

# Our Team

## 金 玲瑾

キム・ヤンキョー 専門分野: 実験物理学

Kavli IPMU 主任研究員

私は素粒子実験物理学者です。これまでに行ってきた研究の大部分は、素粒子の質量の起源を理解するためのものでした。私の研究グループは、フェルミラボの衝突加速器 Tevatron での CDF 実験で、最も重い2つの素粒子、Wボゾンとトップ・クォークの質量を測定し、CERNのLHCで2012年に発見されたヒッグス・ボゾンの質量についての情報を与えました。近年は、LHCにおけるATLAS実験の測定器を用いて、次の研究を行っています。(i) ヒッグス・ボゾンの性質のより深い理解。(ii) ヒッグス・ボゾンを新たな手段とした標準模型を超える物理(new physics)の探索。(iii) ダークマターと結合する新たなメッセンジャー粒子(素粒子間に働く力を媒介する素粒子)の探索。これらの目標を達成するには、測定器とトリガーの大幅な改良が必要です。私のグループは現在のトリガーシステム

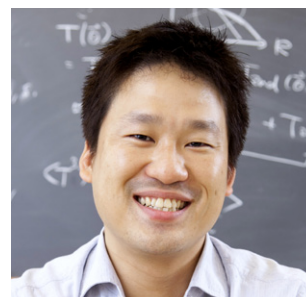


より能力と柔軟性に勝る新たな飛跡トリガーに取り組んでいますが、それに加えて加速器の科学と技術に新たな概念を取り入れようとしています。そのため、粒子ビームの加速と強度に根本的なレベルで影響を与える制限を調べ、こういった制限を克服する新たな方法を開発しています。私はシカゴ大学の素粒子・加速器物理グループのメンバーであり、また Kavli IPMU のメンバーでもあります。

## 小松 英一郎 こまつ・えいいちろう 専門分野: 宇宙論

Kavli IPMU 主任研究員

専門は宇宙論です。宇宙の始まりと終わりを、物理学の法則と最先端の天文学の測定を用いて研究します。研究時間の3分の2は理論研究に、残りは実験計画のサポートやデータ解析に費やします。道具は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)と宇宙の大規模構造です。これまではウィルキンソンマイクロ波異方性探査機(WMAP)のCMBの温度異方性と偏光のデータを用いて宇宙年齢や宇宙の組成を決め、地平線を超える断熱的でガウスのなゆらぎ、そして小さいがゼロではないスケール不変性からのズレを発見して、宇宙初期にあったと思われるインフレーションの強い証拠を得ました。今後の研究テーマは、CMBの偏光を用いて原始重力波を測定し、インフレーションの証拠をゆるぎないものにすることと、宇宙の大規模構造を現在から赤方偏移 $z=3.5$ まで詳細に測定し、暗黒エネルギー密度の時間



変動を見つけて宇宙の標準モデルである $\Lambda$ CDMを棄却すること、およびニュートリノの質量を決定することです。後者の目的には、Kavli IPMUが主導するすばる望遠鏡の主焦点分光器(PFS)を用いた銀河サーベイと、テキサス大学時代に立ち上げたマクドナルド天文台のホビー・エバリー望遠鏡を用いた銀河サーベイをリードします。CMBの研究では、Kavli IPMUが取り組む次世代探査機ライトバードが原始重力波の痕跡を測定できるように銀河系起源の前景放射の除去手法を開発し、発見できた場合、原始重力波の性質からインフレーションの物理をどう明らかにするかを理論的に研究します。

## 森山 茂栄 もりやま・しげたか 専門分野: 実験物理学

Kavli IPMU 主任研究員

私の興味は暗黒物質、アクシオン、ニュートリノ物理、そして陽子崩壊に及びます。これらを研究するために、信号のエネルギースケールによって二つの実験的手法を用いています。一つはkeV以下からMeV程度の現象に感度が高い液体シンチレーターを用いた手法です。XMASS検出器は1トンの液体キセノンを利用しており、それを用いて暗黒物質やaxion等、そして稀な原子核崩壊の探索をおこなってきました。暗黒物質を素粒子として発見するためには、WIMPsやその類似粒子によって期待される信号の探索のみならず、バックグラウンドの期待値から外れた現象を発見する努力も行っています。もう一つは水チェレンコフ型検出器であるスーパーカミオカンデを利用したニュートリノ



や陽子崩壊の研究です。ニュートリノの質量階層性やCP位相の決定は宇宙に存在する物質を理解するための鍵になるかもしれませんし、陽子崩壊の観測は素粒子のより大きなフレームワークを直接的に指し示すものです。現在スーパーカミオカンデをはるかに超える感度を持つより大型のハイパーカミオカンデの建設実現を推進しています。今後それぞれの物理テーマで大発見が行えるためにもKavli IPMUのメンバーたちと協力して研究を進めたいと考えています。

Our Team

## 横山 広美 よこやま・ひろみ 専門分野: 現代科学論

Kavli IPMU 教授

科学技術社会論に基づいた現代科学論・科学コミュニケーション分野を研究しています。Post truthの現代、科学がどのように社会からの信頼を高く保ち、調和して発展していくことができるか、あるいは学術が社会に対してどのように責任を果たしていくべきかに興味を持っています。

現在は、

- 1) 基礎科学のパトロネッジに関する研究（クラウドファンディングから生まれる科学と通常科学の違い、社会から見た科学観の変化など）、
- 2) ビッグサイエンス・メガサイエンスの政策とコミュニケーション研究（TMTやSKなどビッグサイエンス施設と地域社会の研究、SSCとILCの比較など）、



- 3) 基礎科学全般のコミュニケーション戦略についての研究（社会心理学を用いた科学者の情報発信と社会からの信頼についての研究など）を進めています。また、それぞれの研究において、どのように社会とのコミュニケーションを実践するかについての考察を重視しています。

## 森井 友子 もりい・ともこ 専門分野: 実験物理学

博士研究員

私はBelle II測定器のためのシリコン崩壊点位置検出器(SVD)を製作しています。Belle II実験では大量のデータを用いて、標準理論と実際のようすのズレを測定することで新物理の追及を行います。このためには粒子の崩壊点を精密に測定する必要がありSVDは粒子の崩壊点測定に大変重要な検出器です。

Kavli IPMUで私はSVDの製作に携わってきました。SVDの開発はその複雑な構造などのために時間がかかってきましたが、2016年春に大量生産のフェーズに入りました。そして順調にいけば2018年秋ごろにはBelle



II測定器にインストールされ、2018年終り頃にはデータを取り始める予定です。私はSVDの量産の次はBelle II実験のデータを用いた新物理の研究を行っていきたいと考えています。

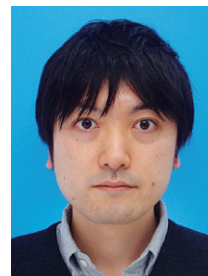


## 中嶋 祐介

なかじま・ゆうすけ 専門分野: 数学

博士研究員

私の研究対象は可換環論及び特異点論です。私はこれらの対象をCohen-Macaulay加群の表現論の視点から研究しており、例えば非可換クレパント特異点解消、団傾加群といった概念に興味があります。これらの概念の中のいくつかの興味深いクラスは、ダイマー模型と呼ばれる実2次元トーラス上に描かれたグラフから得られます。最近の研究ではダイマー模型の変異という操作に注目して、ダイマー模型から得られる特異点や



非可換クレパント特異点解消を理解しようと試みています。

## 王 文婷

ワン・ウェンティン 専門分野: 天文学

博士研究員

私は、銀河形成、ダークマターハロー、およびそれらと宇宙論との関わりを研究しています。これまでは、サテライト銀河の性質、銀河とダークマターの関係、暗いサテライト銀河による標準宇宙論モデルの理解、銀河ハローの動力学的モデルを用いた天の川銀河のハロー質量の制限などを、大規模な銀河サーベイ、宇宙論的な数値シミュレーション、重力レンズ、動力学モ



デルの手法を用い、理論、観測の両面から研究してきました。

## コミュニケーションの技術

### サイエンスコミュニケーションにソーシャルメディアを使うべきか？

ジョン・アマリ

ライター

21世紀においては、コンフォートゾーン（安全地帯、居心地の良い場所）から踏み出すことは、今や多くの分野でほとんどうんざりするほど繰り返し唱えられているマントラ（呪文）となっており、ベンチャー企業から成熟したビジネスまで、メディアから政治および学術の世界まで、現代のあらゆるアウトリーチ（一般市民への働きかけ）を成功させるための一種の万能薬としてコミュニケーション界のオピニオンリーダーたちが推奨しています。

私の考えは、大体のところ彼らに賛同するものです。しかし、2016年7月に私はKavli IPMU（以下IPMUと略す）の広報グループに加わったのですが、その時は、手に余るような仕事をしようとしているのかもしれないと認めざるを得ませんでした。サイエンスのトレーニングは何もしたことはないが、科学的なものに一般的な興味はもっているフリーランスのジャーナリストとして、基礎物理学と数学の研究所に対して何か貢献できることがあるのか、私にはわかりませんでした。

一般市民に伝えることを任された研究を理解するという大変な難題にも関わらず、私は徐々に進歩し、10ヵ月の任期中、日本及び外国でIPMUの紹介にベストを尽くしました。最新の研究成果のプレスリリースに加えて、私はIPMUおよび世界中の同僚達と連携し、IPMUと世界中の多数の協力機関からの最新の成果を一般市民と共有するよう努めました。

また、私たちはキャンパス一般公開や国外でのサイエンスコミュニケーションイベントなどの公開イベントへの参加を手伝いました。IPMUで行った興味深い仕事の中でも、私にとって最も驚いたことの一つは、一般講演会で研究者の話を聞きに来る人達の多いことでした。

それは実に刺激的な光景でした。伝説的なサイエンスコミュニケーターのカール・セーガンが述べたよう

に、「恋をしている時は、それを世界中に告げたいくなる」ものです。勿論、彼は先駆的なテレビ番組 *Cosmos: A Personal Voyage*（日本での表題は「コスモス（宇宙）」）で伝えたような、生涯にわたるサイエンスとのラブロマンスについて語っていたのです。全13話のシリーズ「コスモス（宇宙）」は1980年代のテレビ番組に新たな地平を切り開きました。

それでも、飛び交う電子メールのやりとりと広報担当者が中心となる準備作業の真ただ中で、私は自分にとっての最大の難問と向き合わなければなりませんでした。私は心配しているのだろうか？ 私は恐れているのだろうか？ まったくその通りでした。しかし、心配したり恐れたりする必要はなかったのです。

IPMUの研究者たちの辛抱強さは、まるで天使のようでした。問題が宇宙マイクロ波背景放射であれ、素粒子の標準模型であれ、ラグランジュの整数論であれ、彼らは注意深く話を聞き、完全な答えをくれました。彼らの態度に恩着せがましいところは微塵もありませんでした。特に、ほとんどの人達は英語が母国語ではないわけですから、彼らのコミュニケーション能力には感銘しました。

IPMUには多くの世界レベルのサイエンスコミュニケーターがいます。村山斉機構長は、情熱が伝わるという点で第一人者です。彼は有名人で、「日本のカール・セーガン」と言えるかもしれません。講演が終わった後も、長い時間をかけて参加者からの熱心な質問に一つ一つ答える間、聴衆は魔法にかかったようにうっとりしています。

職務を超えて一般市民とのコミュニケーションに努めるIPMUの著名な研究者のリストはサイエンスの世界の紳士録といった趣ですが、二人だけ、2015年のノー

ベル物理学賞受賞者、梶田隆章さんと主任研究員で理論物理学者の大栗博司さんの名前を挙げておきます。

従って、IPMUで研究者の審査基準の一つが一般向けのコミュニケーション能力であることに気がついた時も驚きはありませんでした。それでも、一般市民に働きかけるためにもっと多くのことができるし、もっと多くのことをなすべきであると私は感じています。私は固く信じているのですが、そうするために研究者は自分のコンフォートゾーンの外に踏み出し、ソーシャルメディアというマスコミュニケーションの最新のプラットフォーム（基盤となる環境）を取り入れるべきなのです。

多くの人達は、ソーシャルメディアはやっかいなものであり、まともな人は近寄らずに避けた方が良いものと考えています。私は、それは間違った見方であると思います。私はライターですが、それに加えてソーシャルメディアのストラテジスト（ソーシャルメディアを活用して新たな価値を実現するための基本戦略を策定・提案・推進する者）であり、日々ソーシャルメディアの威力を目の当たりにしています。21世紀の初期において、フェイスブックであれ、ユーチューブであれ、ツイッターであれ、インスタグラムであれ、あるいは何であれそれに続くものは、グローバル・コミュニケーションの手段なのです。それはテレビ、ラジオ、電報、手紙、伝書鳩、狼煙の現代版なのですが、実質的に金がかからない点とスケールの巨大な点は大きな違いです。

フェイスブックだけで、最新のカウントではおよそ20億人が利用しています。インスタグラムの利用者は7億人に達しました。ユーチューブには毎分およそ300時間分のビデオがアップロードされ、毎日約50億本のビデオが視聴されています。以前私たちがテレビやラジオのスイッチを入れたのとは違って、人々はソーシャルメディアに参加しており、起きている間かなりの時間を過ごす場所としています。

公立・私立を問わず公共施設、あるいは学術機関はソーシャルメディアを取り入れるべきです。研究者は各個人もそうすべきです。アメリカのドナルド・トランプ大統領を支持する、しないにかかわらず、彼が一般市民に直接メッセージを伝える効果的な手段を見出さなかったと主張することには無理があります。彼は自分のソーシャルメディアのプラットフォームを通じて、およそ1億人に直接働きかけることができるのです。

しかし、トランプ大統領はこの点においての先駆者ではありません。いわゆる「インフルエンサー」はソー

シャルメディアで強力なファン層をもつ人たちですが、ソーシャルメディアが出現して以来ずっとその利用の先頭に立ってきました。多くの科学者が後に続いてきました。少なくとも、アメリカにおいてはニール・ドグラス・タイソンやブライアン・グリーンのような、サイエンスを一般向けに分かりやすく紹介する科学者はテレビのスクリーンの上でもソーシャルネットワーク上でも強力なペルソナ（人格）を磨き上げてきました。例えばドグラス・タイソンにはツイッターで500万人以上のフォロワーがあり、グリーンの世界・サイエンス・フェスティバルでのユーチューブ・チャンネルには23万人以上の視聴者がいます。

以前のカール・セーガン（彼の場合には当時魅力的であったテレビを利用した時のことですが）同様、彼らは折に触れて「真の科学者」ではないと批判されました。学術的な評判にこだわるのに負けず劣らず一般市民からの評判にこだわるように見える（あるいは見えた）からです。

批判を受けても、新世代の研究者と科学愛好家は、一般大衆向けのサイエンスコミュニケーションという困難な課題に取り組んでいます。ユーチューブチャンネルのPhysics Girlはディアナ・カワーンとソフィア・チェンが配信しています。“Crazy pool vortex”と呼ばれる彼女たちのビデオの一つは、渦を直接的ではあるが丁寧な言葉で説明しています。この原稿を書いている時点で、このビデオは600万回以上視聴されています。

カワーンやチェンのようなサイエンスを学ぶ学生や愛好家は、孤立してはいません。難解なテーマの分野でさえもニッチなソーシャルメディア・ユーザーは増える一方で、彼らはサイエンスコミュニケーションに革命を起こしています。知人と共有する科学の面白情報ページから、2000万人以上がフォローする科学情報サイトに急成長したIFLScienceも成功例の一つです。

私がIPMUに居たのは短い間ですが、研究所の最大の財産は研究者であることを知っています。しかし、カール・セーガンやほかの人たちのように、これまで以上に多くの研究者がコンフォートゾーンから一歩踏み出し、世界に自分の声でサイエンスへの愛を伝えてほしいと希望しています。ガリレオの言葉を言い換えると、サイエンスはいまだに数学の言葉で書かれているかもしれませんが、21世紀においては、恐らく、一般市民に伝えるのに最善の言葉はソーシャルメディアなのです。

# Developments of Mathematics at IPMU: in Honor of Kyoji Saito

河野 俊文 こうの・としたけ

Kavli IPMU主任研究員

この研究会は斎藤恭司氏が2017年3月にKavli IPMUの主任研究員の任期を終えられた機会に、同氏が切り開かれた数学がKavli IPMUにおける研究の発展に及ぼした深甚な影響を俯瞰する目的で、4月25日から28日までの4日間にわたり開催された。斎藤恭司氏は18～19世紀の Euler, Abel, Jacobi らによる楕円積分・周期積分の理論を現代によみがえらせるという壮大な構想のもと、その実現のため孤立特異点の普遍変形、原始形式、平坦構造、半無限ホッジ構造などの理論を次々に構築された。これは後に Kontsevich などによる非可換ホッジ構造や、量子コホモロジーの研究に用いられているフロベニウス多様体などに関わっていく。また、斎藤恭司氏は、原始形式を消滅サイクルに沿って積分し周期写像を実現するという観点から、楕円リー環などの無限次元リー環の研究を進めた。斎藤恭司氏の理論は数学と理論物理におけるミラー対称性の理論などで本質的な役割を果たすものであり、こ



の研究会でも斎藤恭司氏の先駆的な研究に関わる、可積分系、代数解析、表現論、代数幾何学、量子場の理論など広範な分野にわたる研究が発表され、活発な議論がなされた。

研究会の講演者は、Aleksander A. Belavin, Alexey Bondal, Claus Hertling, Kentaro Hori, Hiroshi Iritani, Michio Jimbo, Si Li, Takuro Mochizuki, Shigeru Mukai, Nikita Nekrasov, Kyoji Saito, Morihiko Saito, Yukinobu Toda, Alexander Varchenkoの各氏であった。斎藤恭司氏の講演はHighest Weight Integrable Representations of Elliptic Lie Algebraと題し、古典的に良く知られている「単純特異点に対応する単純リー環」を超えた新たな無限次元リー環の表現論に関わる理論を述べられた。斎藤恭司氏は研究会の最後に「今回の研究会で扱われたテーマは、一見異なっているように見えるが、それらは非常に深いところで繋がっている。」と述べられた。この研究会を通して、斎藤恭司氏が築かれた数学の深さと広がりを実感することができた。



4月27日のお茶の時間には斎藤恭司氏も参加してKavli IPMU室内オーケストラによる演奏が披露された。



## 第3回 Osaka CTSR, RIKEN iTHES/iTHEMS, Kavli IPMU合同シンポジウム “Deep Learning and Physics”

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 客員上級科学研究員

2017年6月5日に大阪大学理論科学研究拠点(CTSR)、理研理論科学連携研究推進グループ/数理創造プログラム(iTHES/iTHEMS)、Kavli IPMUの第3回合同シンポジウム“Deep Learning and Physics”が阪大の南部陽一郎ホールで開催されました。今回のシンポジウムはこれまで2回とは異なり、人工知能、機械学習の分野で話題となっている深層学習と基礎物理の関わりを題材としたものでした。深層学習では、深い階層構造を持つ畳み込みニューラルネットワークの画像処理に関する性能の良さが注目されていますが、この特徴的な構造を提案したのは80～90年代に阪大の基礎工学部に所属していた福島邦彦氏でした。機械学習の周辺分野で研究をしてきた私にとっては感慨深い一致です。

講演者は7名でした。最初の2つの講演はニューラルネットワークに関するもので、瀧 雅人氏(iTHES)が深層学習の仕組みと進展について、甘利俊一氏(RIKEN 脳総研)が40年ほど前に同氏が提案した神経場の理論と深層学習の関係を説明しました。次の2つの講演は物理学へのニューラルネットワークの応用に関するもので、大槻東巳氏(上智大)がランダム電子系の量子相転移を、田中章詞氏(iTHES)がイジングスピનモデルを対象として、相図を学習する方法と結果

を報告しました。続く2つの講演は、天文学と機械学習の関わりについて、筆者(統数研/Kavli IPMU)がEvent Horizon Telescopeにおけるスパースモデリングの重要性とすばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラ(Hyper Supreme-Cam、HSC)を用いたプロジェクトにおける変動天体の自動抽出用法を、鈴木尚孝氏(Kavli IPMU)がHSCによるIa型超新星の発見から精密宇宙論へ結びつける方法と機械学習の役割を説明しました。最後の河原吉伸氏(阪大/RIKEN AIP)は、最近提案されているDynamic Mode Decomposition(DMD)と呼ばれる方法のカーネル法による拡張について説明しました。

今回のシンポジウムに出席して、物理学者がニューラルネットワークに強い興味を持っていることを知りました。このことは私にとって大きな驚きでした。一方で危惧もあります。深層学習の性能の良さは、理論的に十分理解されてはならず、ブラックボックスとして用いている面があります。本来、第一原理に基づく精密な計算で解明すべき問題に対してブラックボックス化した方法を用いるのは危険な面もあります。物理学者の皆さんには、機械学習と正しく付き合い、大きな成果を上げてほしいと感じています。



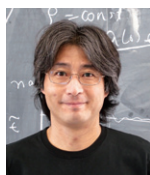
Workshop



# News

## 村山斉機構長、世界に影響を持つ100人の一人に選ばれる

アインシュタインが1915年から1916年にかけて一般相対性理論を発表してから100年になることを記念して、アルバート・アインシュタイン財団が世界で展開している「アインシュタイン・レガシー・プロジェクト」の一環として、世界に影響を与えている偉大な100人のビジョンと知恵をまとめて本にするという取り組み、Genius : 100 Visions of the Future (天才たち：未来を見据える100のビジョン)が進められています。その一人にKavli IPMUの村山斉機構長が選ばれたことが発表されました。



村山機構長

Genius : 100 Visions of the Futureには、科学・技術、芸術、思想、イノベーションなど様々な分野から現在世界で活躍している人たちが選ばれており、日本からは2012年ノーベル生理学・医学賞を受賞した京都大学の山中伸弥教授も名を連ねています。選ばれた100人のビジョンをまとめた本は、イスラエル生まれの芸術家・建築家であるロン・アラッド氏によってデザインされ、3Dプリンターを用いてアインシュタインの顔を模した本として制作される予定です。

## ヤンキー・キム主任研究員、アメリカ芸術科学アカデミー会員に選ばれる

2017年4月12日、Kavli IPMU主任研

究員を兼ねるシカゴ大学教授のヤンキー・キムさんがアメリカ芸術科学アカデミー (The American Academy of Arts and Sciences) 会



ヤンキー・キムさん

員に選出されたことが発表されました。アメリカ芸術科学アカデミーは1780年に創設された米国最古の学会のひとつで、歴代の会員には学術、芸術、ビジネス、政治など幅広い分野から選ばれた会員が名を連ねており、同アカデミーの会員となることは米国で非常に名誉なこととされています。Kavli IPMUのメンバーでは、これまで2012年にデービッド・スパーゲル主任研究員、2013年に村山斉機構長、2016年に大栗博司主任研究員が会員に選出されています。

ヤンキー・キムさんは、アメリカのフェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) のCDF実験や欧州原子核研究機構 (CERN) のATLAS実験などに参加し、加速器を用いた高エネルギー物理学実験で長年にわたって貢献してきました。また、2006年から2013年にFermilabの副所長を務めました。

2017年10月7日に、アメリカ芸術科学アカデミーの本部があるマサチューセッツ州のケンブリッジで、今回選出された新会員228名の就任式典が行われます。

## Kavli IPMU・ICRR合同一般講演会「宙に訊ね理を導く」開催

2017年4月15日に千葉県柏市のアミューズ柏で「宙に訊ね理を導く」を主題に、今回で16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330名が参加しました。

まず、宇宙線研究所教授の佐川宏行さんが「最高エネルギー宇宙線—ユタ州から極高宇宙現象を探る」と題し、米国ユタ州の砂漠で行なっているテレスコープアレイ (TA) 実験について講演しました。(TA実験の観測対象である最高エネルギー宇宙線については、

Kavli IPMU News No. 27の裏表紙をご覧ください。) 佐川さんは、最高エネルギー宇宙線の起源は諸説あり、それを探る手がかりとなる宇宙線の到来方向やエネルギーを調べるため、TA実験では地表検出器と蛍光望遠鏡の2種類の装置を使って実験を行なっていること、その検出器はユタ州の砂漠の700 km<sup>2</sup>という広範囲に置かれていること、更に将来計画ではそれが3000 km<sup>2</sup>になる予定であることも話し、その広さに客席からは驚きの反応が見られました。



講演する戸田さん。

続いて、Kavli IPMU准教授の戸田幸伸さんが「カラビ-ヤウ多様体—物理学がもたらす数学の『予想』」と題して、講演しました。カラビ-ヤウ多様体は、物理の超弦理論と純粋数学との接点で注目されている多様体です。戸田さんはこのカラビ-ヤウ多様体がある何かを説明するにあたり、日本で発達した数学研究の分野として「高次元複素代数多様体の分類問題」の歴史も交えつつ、「次元」「多項式」「複素数」「複素代数多様体」等について段階的に丁寧に解説していきました。

そして、数学者にとって興味深い多様体として知られていたカラビ-ヤウ多様体が、物理学者によって発見された超弦理論におけるミラー対称性をきっかけに物理学と結びつくようになったこと、数学者が超弦理論に関心を持つことにより、異なる数学理論が等価であるという数学的発見がミラー対称性によりもたらされたことについて述べました。

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、途中の休憩時間に参加者に付箋に書いてもらった質問をいくつか取り上げ、回答するなどしました。講演終了後には、ホールのホワイエにて参加者が講師を囲み、熱心に質問をしていました。



対談する戸田さん(左)と佐川さん(右)。

### 「サイエンスカフェ宇宙2017」の第1回開催

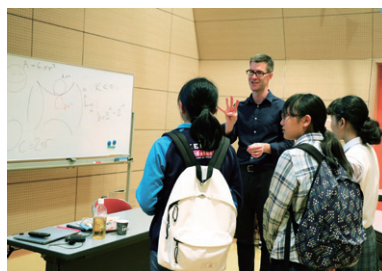
2009年以来、Kavli IPMUは西東京市にある多摩六都科学館との共催で「サイエンスカフェ宇宙」を実施してきましたが、毎年1ヶ月から2ヶ月の間の土曜日に2～3回(2009年は5回)を1シリーズとして行い、今年で9年目になります。今回の「サイエンスカフェ宇宙2017」シリーズでは、外国人研究者が講師を務め、英語で通訳なしの講演を行うという初めての試みによる第1回を6月24日に実施しました。第2回は7月8日開催予定です。



講演するドノバンさん。

第1回の講師はKavli IPMU博士研究員のウィル・ドノバンさんで、「シャボン玉・時空・構造体」と題して話し、約30名が参加しました。参加者の30%は中高生でした。曲率を説明するため、前半では、モールとプラスチック板で構成された手作りキットとシャボン液を用い、シャボン玉を作ってもらい実

験を各テーブルで行いました。ドノバンさんは、シャボン玉が作り出す構造には無駄がなく、シンプルな方程式で表せることを示し、続いてガウス曲率、そして時空の曲がり具合の話からアインシュタインの一般相対性理論の方程式へと説明を進めました。数学の曲率という概念が、シャボン玉から宇宙の話に広がっていながら繋がりにあることに参加者は大いに興味を惹かれているようでした。講演から質疑応答まで全て英語で行われましたが、参加者からは「通訳なしの英語ということで最初は身構えていたけれど、ドノバンさんの英語が分かりやすかったため理解でき、内容も面白かった」という声が聞こえるなど、満足度の高いサイエンスカフェでした。



講演終了後、参加者の質問に答えるドノバンさん。

### 人事異動

#### 再任

2016年4月1日から9月30日までKavli IPMUで博士研究員を務めたYin Liさんが、ローレンス・バークレー国立研究所に滞在後、2017年4月1日付でKavli IPMU博士研究員に再任されました。なお、Yin Liさんは今後も半年毎にKavli IPMUとローレンス・バークレー国立研究所を交互に勤務先とする勤務形態を続ける予定です。

#### 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。]

Christophe Bronnerさん[2014年5月1日—2017年4月30日]、Kavli IPMU特任研究員から東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設特任助教へ。

今城洋亮さん[2014年6月1日—2017年6月15日]、Kavli IPMU 特任研究員から香港中文大学博士研究員へ。



## 重力マイクロレンズ

大栗 真宗

東京大学理学系研究科助教、Kavli IPMU准科学研究員

ブラックホールなどのコンパクトな天体の存在量を調べる方法として、遠方の星の手前をそのようなコンパクト天体が通過することで起こる星の重力レンズ増光から推定する方法があります。この重力マイクロレンズと呼ばれる星の増光は、個々の星に対して起こる確率は非常に小さいですが、百万個以上の星の明るさを継続観測することで実際に観測することが可能です。最近のブラックホール合体からの重力波の発見に触発され、宇宙のダークマターをブラックホールで説明する理論研究や、ブラックホールの存在量や質量を重力マイクロレンズから観測的に制限する研究が再び活発になっています。

