

KAVLI IPMU NEWS



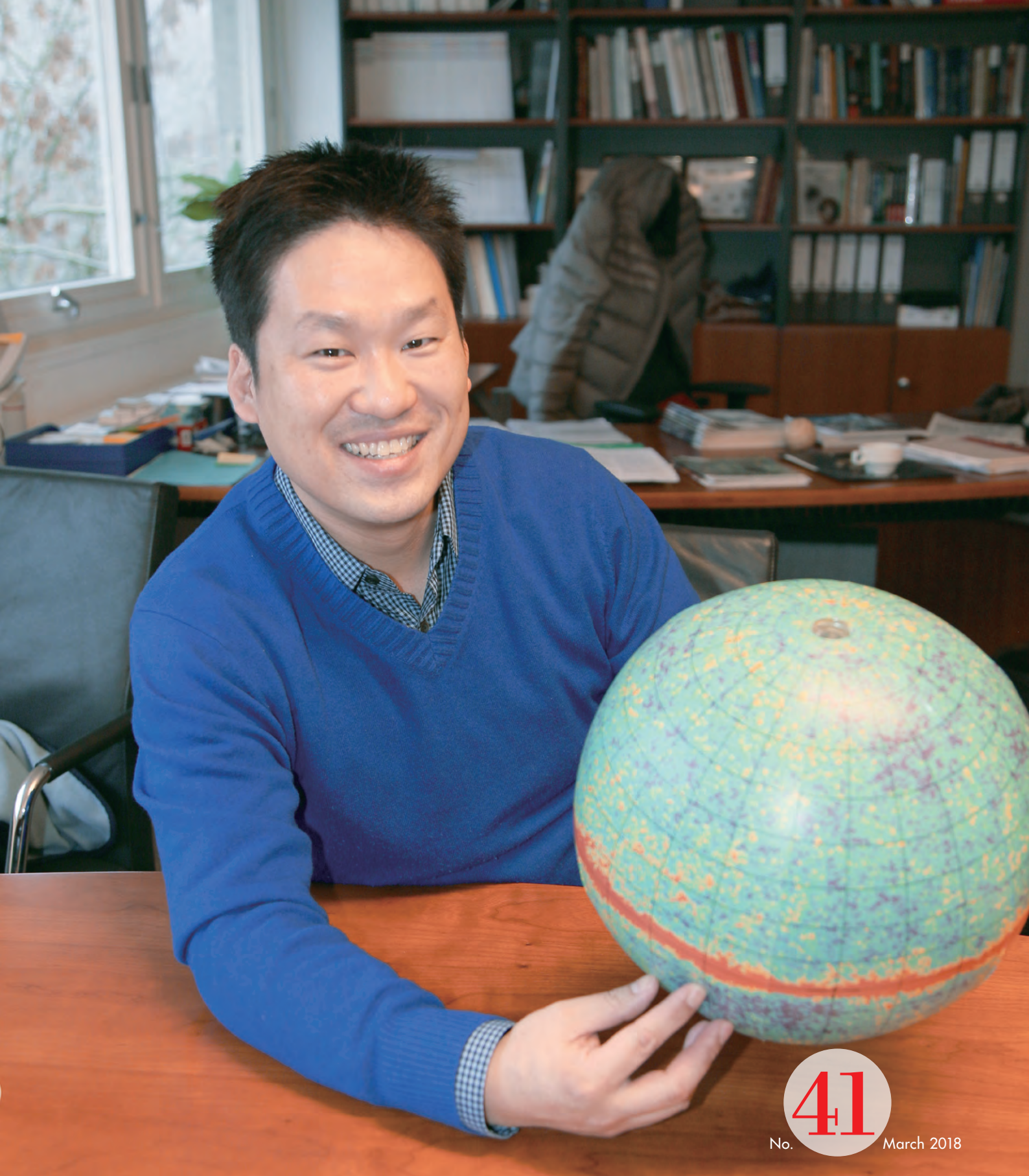
World Premier International Research Center Initiative
世界トップレベル研究拠点プログラム

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
Quantum Fluctuation



41

No.

March 2018

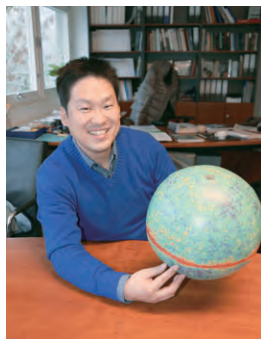
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Quantum Fluctuation Eiichiro Komatsu
- 10 **Research Report**
Subaru Prime Focus Spectrograph
Masahiro Takada
Naoyuki Tamura
Kiyoto Yabe
Yuki Moritani
- 18 **Research Report**
Forty new studies published from the first
data of world's biggest map of the Universe
Masahiro Takada
- 20 **Our Team** Tadayuki Takahashi
Khee-Gan Lee
Tadashi Orita
Atsushi Yagishita
Seyed Morteza Hosseini
Yuko Ikkatai
- 23 **Workshop Report**
Kavli IPMU-Berkeley Symposium
"Statistics, Physics and Astronomy"
Toshitake Kohno
- 24 **Workshop Report**
Lectures on Higher Structures and Quantisation
Andrew Macpherson
- 25 **News**
- 30 **Geometric Engineering**
Taizan Watari

Japanese

- 31 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 32 **Feature**
量子ゆらぎ 小松 英一郎
- 38 **Research Report**
Subaru Prime Focus Spectrograph
高田 昌広
田村 直之
矢部 清人
森谷 友由希
- 46 **Research Report**
宇宙の最大地図のデータを用いた
40編の査読論文の発表
高田 昌広
- 48 **Our Team** 高橋 忠幸
キーガン・リー
織田 忠
柳下 淳
セイェド モルテザ・ホッセイニー
一方井 祐子
- 51 **Workshop Report**
Kavli IPMU-Berkeley Symposium
"Statistics, Physics and Astronomy"
河野 俊丈
- 52 **Workshop Report**
研究会集「高次構造と量子化に関する講義」
アンドリュー・マクファーソン
- 53 **News**
- 56 **ジオメトリックエンジニアリング**
渡利 泰山



Eiichiro Komatsu is Director of the Max Planck Institute for Astrophysics. He also serves as a Principal Investigator of the Kavli IPMU. His research area is cosmology. He has been a member of the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Science Team. For his work on the analysis and interpretation of the WMAP data, in particular tests of the predictions of cosmic inflation, he received many prizes including the Nishinomiya Yukawa Memorial Award in 2010, Gruber Cosmology Prize in 2012, American Astronomical Society's Lancelot M. Berkeley - New York Community Trust Prize in 2013, Astronomical Society of Japan's Hayashi Chushiro Prize in 2015, Fellow of American Physical Society in 2015, and Breakthrough Prize in Fundamental Physics in 2017. After having received his Ph.D. from Tohoku University in 2001, he became WMAP Postdoctoral Research Fellow at Princeton University. In 2003, he moved to the University of Texas at Austin as an Assistant Professor. He became Associate Professor in 2008, Director of the Texas Cosmology Center in 2009, and Professor in 2010. He was appointed to the current position in 2012. On the cover: Photograph by Hiroto Kawabata. 小松英一郎：マックス・プランク宇宙物理学研究所ディレクター。Kavli IPMU主任研究員を兼ねる。専門は宇宙論。ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) サイエンスチームのメンバーとして活躍。WMAPのデータの解析と科学的解釈、とりわけインフレーション理論の検証に関する業績により、2010年に西宮湯川記念賞、2012年にグルーバー宇宙論賞、2013年に米国天文学会のランスロット M. パークレー賞、2015年に日本天文学会林忠四郎賞と米国物理学会フェロー、2017年に2018基礎物理学ブレークスルー賞など、国内外の賞を多数授賞。2001年に東北大学から理学博士の学位を取得。同年プリンストン大学博士研究員、WMAPチームに参加、2003年テキサス大学オースティン校助教授、2008年同准教授、2009年同テキサス宇宙論センター所長、2010年同教授、2012年より現職。表紙写真提供：川端裕人氏。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



January 6: The 2nd lecture delivered at 2017 Collaborative Knowledge Creation Practical Learning Course, cohosted by the Kavli IPMU and the University of Tokyo Center for Research and Development on Transition from Secondary to Higher Education. Division for Cross-Stage Education and Assessment, CoREF. (For the 1st lecture, see *Kavli IPMU News* No. 39, p. 22).



February 3: Giving a keynote lecture at the JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Researcher Reception, hosted by JSPS San Francisco Office. Photo: Courtesy of JSPS San Francisco Office.



February 27: At a press conference to inform the initial research achievements from HSC (see p. 18), Kavli IPMU Director Murayama talked about the importance of sustaining Subaru Telescope operation.



February 28: MEXT Research Promotion Bureau Director-General Keisuke Isogai (left) visited the Kavli IPMU (see p. 25).



March 12: Lecture delivered at the Second International Interdisciplinary Faculty Forum of the University of Chicago and the University of Tokyo: Perspectives on Big Data. Photo: Courtesy of the University of Tokyo Vice President Naoto Sekimura.



March 26: A press conference was held to announce the beginning on a new research project between fundamental science and medicine. From right: Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama, ISAS Director General Tsuneta Saku, Keio University Professor Hideyuki Saya, the University of Tokyo Executive Director and Vice President, and Kavli IPMU Principal Investigator Hiroaki Aihara (see p. 25).

Quantum Fluctuation

The 20th century has seen the remarkable development of the Standard Model of elementary particles and fields. The last piece, the Higgs particle, was discovered in 2012. In the 21st century, we are witnessing the similarly remarkable development of the Standard Model of cosmology. In his 2008 book on “*Cosmology*” Steven Weinberg, who led the development of particle physics, wrote: “This new excitement in cosmology came as if on cue for elementary particle physicists. By the 1980s the Standard Model of elementary particles and fields had become well established. Although significant theoretical and experimental work continued, there was now little contact between experiment and new theoretical ideas, and without this contact, particle physics lost much of its liveliness. Cosmology now offered the excitement that particle physicists had experienced in the 1960s and 1970s.”

The Standard Model of cosmology is known as the “ Λ CDM model”. This model contains some extraordinary ingredients, just like the Standard Model of elementary particles and fields once appeared to. The “ Λ ” denotes Einstein’s cosmological constant, the simplest (but most difficult to understand) candidate of Dark Energy that accelerates the expansion of the Universe today. The “CDM” stands for “Cold Dark Matter”, which accounts for 80% of the matter density in the Universe. The existence of Dark Matter and Dark Energy and their mysterious nature are well known to the public. They are among the most popular topics in cosmology.

However, the most extraordinary ingredient

is not well known to the public. This ingredient is not contained in the name of Λ CDM, but is an indispensable part of the Standard Model of cosmology. It is the idea that our ultimate origin is the quantum mechanical fluctuation generated in the early Universe. However remarkable it may sound, this idea is consistent with all the observational data that have been collected so far for the Universe. Furthermore, the evidence supporting this idea keeps accumulating and is strengthened as we collect more data! It is likely that all the structures we see today in the Universe, such as galaxies, stars, planets, and lives, ultimately originated from the quantum fluctuation in the early Universe.

Borrowing energy from the vacuum

In quantum mechanics, we can borrow energy from the vacuum if we promise to return it immediately. The duration that we can borrow energy is inversely proportional to the amount we borrow. If you visit a bank without an appointment and ask to lend one million dollars for one day, they would not do it. However, if you ask to lend one million dollars for one second, they might do it because you would have to receive and return the money immediately. (And they will probably call a police because they think you are crazy.) You could borrow a lot of energy from the vacuum in the early Universe because the time was still very short. The quantum fluctuation has emerged randomly everywhere in space.

Structure formation in the Universe proceeds

according to Einstein's gravitational field equations and the equations of motion for matter and energy components that constitute the Universe. Once initial conditions are given, the subsequent evolution is deterministic. And now modern cosmology, which is rooted firmly in a lot of observational data, tells us that the initial conditions were chosen randomly by quantum mechanics. Einstein said, "God does not play dice with the Universe" when he criticized the probabilistic aspect of quantum mechanics. Indeed, which galaxies form in what places in the Universe was determined by rolling dice!

"Missing link" between micro- and macroscopic worlds

But, the quantum fluctuation operates only in a microscopic world. How come it became a seed for an enormous structure like a galaxy? What is the missing link between microscopic and astronomical length scales? The most promising idea, which constitutes a pillar of the Standard Model of cosmology, is "cosmic inflation". The Universe underwent a period of rapid, exponential expansion right after its birth, and a short wavelength of the quantum fluctuation was stretched exponentially to become an astronomical length. In a typical model of inflation, the Universe expanded by at least 26 orders of magnitude within a trillionth of a trillionth of a trillionth (10^{-36}) of a second. That is to say, the size of an atomic nucleus became the size of Solar System within a tiny fraction of a second. Who would believe this? Despite tremendousness of the idea, the statistical properties of cosmic structures predicted by inflation are consistent with all the data we have collected so far. As I describe later, I have spent most of my career testing the predictions of inflation with the cosmic microwave background data. Every time I confirm the prediction with better precision I say to myself, "Geez, I am such an ordinary researcher! Those who came up with this crazy idea (Sato, Guth, Starobinsky...)—the idea that might actually be correct—are too extraordinary."

Didn't we have to return energy to the vacuum immediately? Something strange happens when the wavelength of the quantum fluctuation is stretched by inflation to a macroscopic scale: it starts to behave as if it were a classical fluctuation despite that it is still quantum. If we had to use the analogy with a bank again, it would be like "we do not have to return the money due to inflation (in economics)," which makes no sense. A better metaphor would be like this: Space between you and a person of the bank counter expands exponentially as soon as you borrow one million dollars, and the distance becomes so large that the communication between them is no longer possible.

Researchers have been wondering about a physical mechanism by which the quantum fluctuation became classical during inflation. Just because the wavelength was stretched does not mean that the fluctuation became classical. It just means that the fluctuation became nearly indistinguishable from a classical fluctuation. I always get a question about this "classicalization" of the quantum fluctuation during inflation whenever I give a talk on inflation in front of physicists. I reply by saying, "we do not yet understand the physical mechanism of classicalization, so perhaps it is a good topic for a Ph.D. thesis." However, at the conference on "*General Relativity and Gravitation: A Centennial Perspective*" held at Penn State University in June 2015, Abhay Ashtekar, a leading researcher on quantum gravity, said to me, "Eiichiro, the fluctuation never became classical. This world is still fully quantum!" I was like, "haha, that is funny." But he was serious. Indeed, as it is nearly indistinguishable from a classical fluctuation, perhaps we do not have to be adamant that the fluctuation had to become truly classical. The conversation with him made me realize again that I am an ordinary researcher with little imagination. I was glad that I could broaden my view on this profound issue of inflation.

We need a new energy component to accelerate the Universe, as the known components such as matter and radiation must always decelerate it. The Λ

of the “ Λ CDM” denotes Dark Energy that accelerates the Universe today, and we need something similar in the early Universe too. The technical term for this energy component in the early Universe is an “inflaton field”. Researchers working on inflation were encouraged very much when the Higgs particle was discovered, as the basic property of the Higgs field is similar to that of an inflaton field. However, the Higgs field in the Standard Model of elementary particles and fields cannot be an inflaton field for a technical reason that the Higgs potential is too steep. Therefore, we need a field that is similar to the Higgs but has a flat potential. Alternatively, we may introduce a new element to the Standard Model called a “non-minimal coupling of the Higgs field to gravity”.

To summarize: According to an inflationary scenario, the Universe underwent a period of accelerated expansion at the rate at which the size of an atomic nucleus could become the size of Solar System in a tiny fraction of a second. A microscopic wavelength of the quantum fluctuation was stretched enormously to a macroscopic wavelength, seeding all the structures we see today in the Universe. Astronomers often say, “we are stardust,” referring to the fact that the elements that make up our bodies originate from nucleosynthesis in stars. Cosmologists would say, on the other hand, “we originate from the quantum fluctuation.”

When I say something like this at public lectures, the audience would not believe it. Their reaction is completely normal. I worry more about astrophysics graduate students believing in this so easily. In my opinion, the public tends to take the cosmology research as a kind of a fairy tale. While they enjoy hearing about it, they seem to think, “This is a very interesting story, but most of it is a speculation of astronomers.” This could be because researchers giving a public lecture do not always make a clear distinction between the solid facts based on observational data and more speculative results. In any case, we must have convincing observational evidence to claim that we originate from the quantum fluctuation.

Observational evidence

The observational evidence came from measurements of the cosmic microwave background (CMB). Fluctuations in the photon energy density obey a certain probability distribution, which depends on physics of the creation of quantum fluctuations. One important question is as to which field's quantum fluctuation was mainly responsible for the seeds of cosmic structure formation. In the simplest picture, the quantum fluctuation of the inflaton field, the field that drove inflationary expansion, became the seeds. For technical reasons, the inflaton field has a flat potential, which implies that the interaction of the inflaton field must be weak. The probability distribution of quantum vacuum fluctuations of a free, non-interacting field is a Gaussian distribution; thus, the CMB temperature fluctuations are also expected to obey a Gaussian distribution.

I joined the science team of NASA's Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) mission shortly after the launch in 2001 and worked mainly on the analysis and cosmological interpretation of the WMAP data until the final data release in 2012. Testing inflation has been one of my main focus topics. We have found that the distribution of the temperature fluctuations (Figure 1) is consistent with a Gaussian distribution. In the final data release on December 21, 2012, we obtained a stringent 95% upper limit of 0.2% on a deviation from a Gaussian distribution. The science team of ESA's Planck mission used our method to improve the upper limit to 0.04%. This is the most precise Gaussian distribution I have ever seen for the data on the Universe (except instrumental noise). Not only are these results consistent with the quantum mechanical origin of CMB temperature fluctuations, but also with the prediction of “single-field inflation models” in which the quantum fluctuation originates from the inflaton field while contributions from other fields are unimportant.

The quantum fluctuation kept being generated, and its wavelength kept being stretched throughout

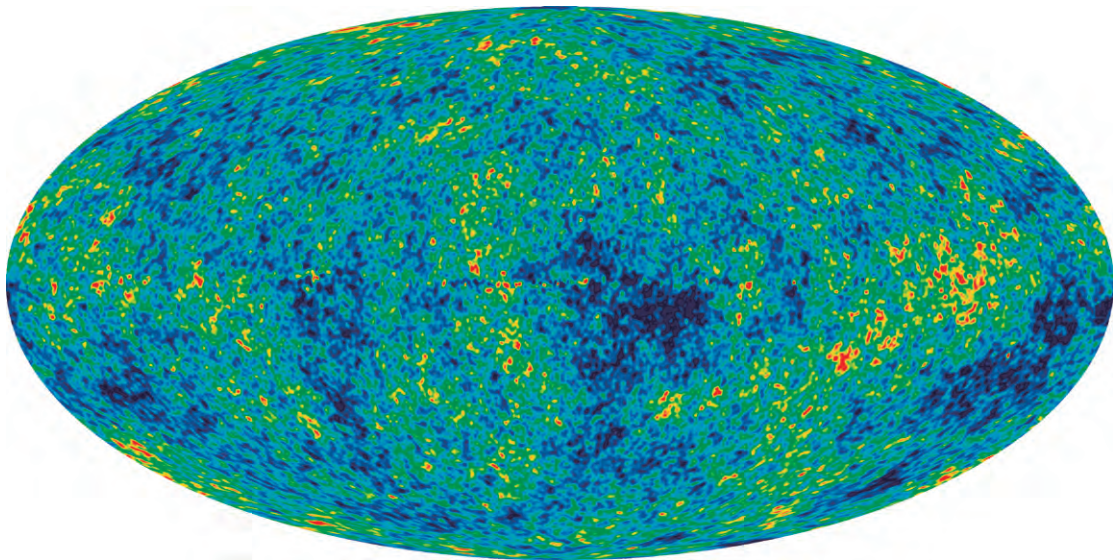


Figure 1: Full-sky map of the CMB temperature fluctuation in the Mollweide projection, obtained from 9-year observations of the WMAP. The distribution of the temperature fluctuation is consistent with a Gaussian distribution. (Credit: WMAP Science Team)

inflation. The earlier the fluctuation was generated during inflation, the longer its wavelength has become because it had more time to be stretched until the end of inflation. In the CMB data, the fluctuation generated earlier during inflation would appear on large angular scales. The amplitude of the quantum fluctuation we can borrow from the vacuum is inversely proportional to the time we borrow. The convenient quantity is the “Hubble expansion rate”, which is the number of e-folds of expansion per unit time. The expansion rate is thus in units of $[\text{time}]^{-1}$, and we can show that the amplitude of the quantum vacuum fluctuation in the inflaton field is proportional to the Hubble expansion rate.

As inflation has to end, the Hubble expansion rate decreases over time; thus, the earlier the fluctuation was generated during inflation, the stronger its amplitude would become. In the CMB data, the amplitude of the temperature fluctuation on large angular scales would be stronger than that on small angular scales. In practice, a perturbation to a photon fluid of the CMB creates sound waves, and the amplitude of the CMB temperature fluctuation oscillates as a function of angular scales. This oscillation must be modeled before extracting

information on the primordial fluctuations with “the amplitude on large angular scales being stronger than that on small angular scales”. This modeling is not difficult because the physics of sound waves is well understood.

Mukhanov and Chibisov predicted this effect in 1981. Finding it has been the dream of researchers working on inflation. If we write that the amplitude of the primordial fluctuation is proportional to the wavelength to the power of $1 - n_s$, the Mukhanov-Chibisov prediction is $n_s < 1$. We want to measure this. In December 2012, we used the WMAP 9-year data in combination with the other ground-based CMB data and the galaxy survey data from the Sloan Digital Sky Survey to measure $n_s = 0.958 \pm 0.008$ with the 68% confidence level. We were able to finally discover $n_s < 1$ with more than 5 standard deviations. Three months later, the Planck team combined the Planck and WMAP data to measure $n_s = 0.960 \pm 0.007$. This is an important confirmation of our result because it is based on the CMB data only. These results provide the strongest ever support for inflation and the quantum origin of the cosmic structures.

WMAP could have found primordial gravitational waves

Carl Sagan said, “Extraordinary claim requires extraordinary evidence.” In the pursuit of definitive evidence for inflation, CMB researchers are working hard to discover “primordial gravitational waves” generated during inflation. LIGO detects gravitational waves from collisions of binary black holes, whose wavelength is a few thousand kilometers. On the other hand, the wavelength of the primordial gravitational waves has been stretched by inflation to billions of light years! As astrophysical bodies cannot generate gravitational waves with such extreme wavelengths, their discovery would provide definitive evidence for inflation.

As gravitational waves stretch and contract space, they also stretch and contract the wavelength of the CMB light, generating temperature fluctuations. The WMAP could have measured this effect.

Back then, a monomial potential of the inflaton field ϕ was thought to be among the most plausible. A quartic potential (ϕ^4) was considered natural in particular. I certainly learned this view from my former thesis advisor at Tohoku University, Toshifumi Futamase, and the fact that the potential of the Higgs field is quartic for a large field value ϕ made this potential attractive. The quartic potential yields the amplitude of gravitational waves large enough for WMAP to detect. In the meantime, Keiichi Maeda at Waseda University and Toshifumi showed that the quartic potential model would become even more attractive when we include the so-called “non-minimal coupling of ϕ to gravity”, as it would allow the Higgs field to drive inflation. (This coupling does not exist in the Standard Model of elementary particles and fields.) Inspired by their idea, I calculated the expected amplitude of gravitational waves from this model. To my surprise, the model prediction for n_s hardly changed, but the amplitude of gravitational waves became 100 times smaller! I thus concluded in January 1999 that the non-minimal coupling to gravity would be required if no gravitational wave

was found despite $n_s < 1$.

In 2006, we ended up ruling out the minimal ϕ^4 model by the WMAP data. I trembled. I certainly did not expect this to happen, though this result was foreseen in my 1999 paper. At the time of writing (April 2018), no primordial gravitational wave has been found. The ϕ^4 model with non-minimal coupling to gravity is called “Higgs inflation” nowadays and remains one of the best-fitting models to the CMB data (Figure 2).

Next frontier: Polarization of the CMB

The amplitude of the gravitational waves from Higgs inflation is too small to be detected in the temperature data of WMAP and Planck. Therefore, the CMB researchers have turned their attention to the polarization of the CMB. CMB becomes polarized when electrons scatter the CMB temperature fluctuation generated by gravitational waves. The CMB researchers around the world are competing to find this polarization signal. I am a part of the international team led by Masashi Hazumi at KEK and Kavli IPMU, working with JAXA to develop the next-generation CMB satellite mission called “LiteBIRD” (*Kavli IPMU News* No. 36). While the LiteBIRD has not been selected for flight yet (we are in the middle of Phase A1), we are expecting to hear the result of JAXA’s selection by the end of this Japanese fiscal year. Fingers crossed. We really want to fly LiteBIRD to measure primordial gravitational waves.

In 2014, a group of researchers at American institutions reported a discovery of CMB polarization from primordial gravitational waves. This turned out to be a false alarm because they mistook polarization from thermal dust emission within our Galaxy for the CMB. While they are responsible for the false alarm, the news media also made two mistakes. First, they ignored cautionary remarks from CMB experts who were not involved in the discovery and sensationalized the news. (There were also researchers who actively contributed to the hype.) Second, they jumped to a conclusion that this

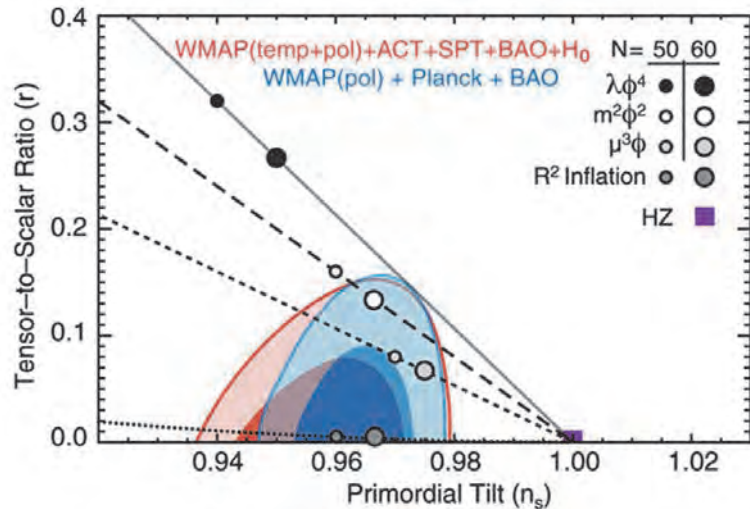


Figure 2: Constraints on inflation models. The vertical and horizontal axes show the amplitude of gravitational waves and n_s , respectively. The red contours show the 68% and 95% confidence levels of the WMAP final data release in December 2012, while the blue contours show those of the Planck data release in March 2013. The black circles in the top show the range of predictions from the minimal ϕ^4 model, whereas the dark grey circles in the bottom show those from the ϕ^4 model with non-minimal coupling to gravity. Adopted from Komatsu et al., *PTEP*, 06B102 (2014).

discovery is the evidence for quantum gravity. Let me comment on the latter.

The reason for this claim is the following. Gravitational waves are ripples of spacetime, and thus their quantum fluctuation would be a quantized deformation of spacetime; hence quantized gravity. While this claim is correct in principle, to make this profound claim we must *show* that the statistical property of the detected gravitational waves is consistent with that of the quantum fluctuation. That is to say, we must make sure that the distribution of CMB polarization is consistent with a Gaussian. This test has never been done, even today.

Do primordial gravitational waves originate from the quantum fluctuation in spacetime?

Frustrated by this situation, I started a campaign with my collaborators in our recent research articles and presentations at conferences. It is natural to expect that there were other matter fields as well as the inflaton field during inflation. The energy density

of the other fields must be much smaller than that of the inflaton field because the CMB temperature fluctuation is close to a Gaussian. Nonetheless, their energy density can be large enough to produce detectable amplitudes of gravitational waves in the CMB polarization. The probability distribution of gravitational waves from the matter fields can be strongly non-Gaussian. The CMB polarization data would then be a superposition of contributions from the quantum fluctuation in spacetime and the matter fields. We do not know which contribution dominates until we analyze the data.

It is essential to test Gaussianity of the probability distribution of primordial gravitational waves. If it is consistent with a Gaussian, and the wavelength dependence of the gravitational wave amplitude agrees with the expectation, we may declare discovery of evidence for the quantum fluctuation in spacetime. What if it is not a Gaussian? It would be the beginning of a new era in which particle physics of inflation makes a big leap!

Subaru Prime Focus Spectrograph

Masahiro Takada

Kavli IPMU Principal Investigator

Naoyuki Tamura

Kavli IPMU Associate Professor

Kiyoto Yabe

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

Yuki Moritani

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

1. Introduction

“How did the Universe start?” “Will the Universe end at some point?” “How did we come to exist?” These have been fundamental questions about the Universe since the dawn of humankind. Surprisingly, the Universe is found to be largely made of “dark matter,” which has never been detected directly, and “dark energy,” which is a much more mysterious negative pressure accelerating the expansion of the Universe. However, we do not understand either constituent physically. Likewise, the standard picture of galaxy evolution based on the hierarchical assembly of dark matter is insufficient to explain what we see from observation, such as the mass growth of galaxies, the diversity of present-day

morphologies, and the distribution of dwarf galaxies around our home, the Milky Way.

The Subaru Prime Focus Spectrograph (PFS, <http://pfs.ipmu.jp/>; <http://pfs.ipmu.jp/blog/>) project squarely aims at addressing these long-standing questions. This innovative instrument under development enables us to take spectroscopic observations of 2394 astronomical objects simultaneously on a large patch of sky several times larger than the size of the full moon. The lights from each star and/or galaxy observed are dispersed and recorded as spectra simultaneously covering a wide range of wavelengths from the near-ultraviolet, through the visible, and up to the near infrared regime (380 – 1260 nm). Table 1 compares the major parameters of the PFS instrument with those of the other competing instruments that

Table 1: Comparison of PFS specifications with other competing spectroscopy projects that are on a similar timeline to PFS

	PFS	DESI	WEAVE	MOONS
Telescope	Subaru (8.2m)	Kitt Peak Mayall (4m)	WHT (4.2m)	VLT (8.2m)
Field-of-View	1.2 sq. deg.	7 sq. deg.	~3 sq. deg.	0.14 sq. deg.
Multiplex	2394	5000	800	1024
Resolving power	~2000-4000	3000-5000	5000, 20000	~5000, 9000, 20000
Science operation	2021	2019	2019	2020



Figure 1: A group photo at the PFS collaboration meeting held at Kavli IPMU in November 2017.

are under development and will come online in a similar timeline to PFS. The table clearly shows that PFS is quite unique and powerful. This exciting PFS project is being promoted under the initiative of the Kavli IPMU, involving international partners across the world—the National Astronomical Observatory of Japan, the Academia Sinica, Institute of Astronomy and Astrophysics in Taiwan (ASIAA), California Institute of Technology (Caltech), NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), Johns Hopkins University, and Princeton University in the US, Laboratoire d’Astrophysique de Marseille (LAM) in France, the Brazilian Consortium, Max Planck Institut für Astrophysik (MPA) and Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) in Germany, and the Chinese Consortium. Figure 1 is a group photo taken at the PFS collaboration meeting held at Kavli IPMU in November 2017. We had more than 130 participants, and the photo clearly shows that the PFS collaboration is a truly international project.

The Principal Investigator (PI) is Kavli IPMU Director, Hitoshi Murayama, the Project Manager (PM) is Naoyuki Tamura, and the Project Scientist (PS) is Masahiro Takada. Kiyoto Yabe and Yuki Moritani are among the most active members on this project. These members at Kavli IPMU have been working to hold the collaboration of the different institutes together and drive the project to progress efficiently.

2. The Instrument

The PFS project takes the full advantage of the unique capabilities of the 8.2 m Subaru telescope, its light-collecting power, wide field of view at the prime focus, and superb image quality. The PFS instrument is composed of four subsystems, whose distribution on the telescope is illustrated in Figure 2. The lights from astronomical objects and the sky are fed to the fibers configured at the Subaru

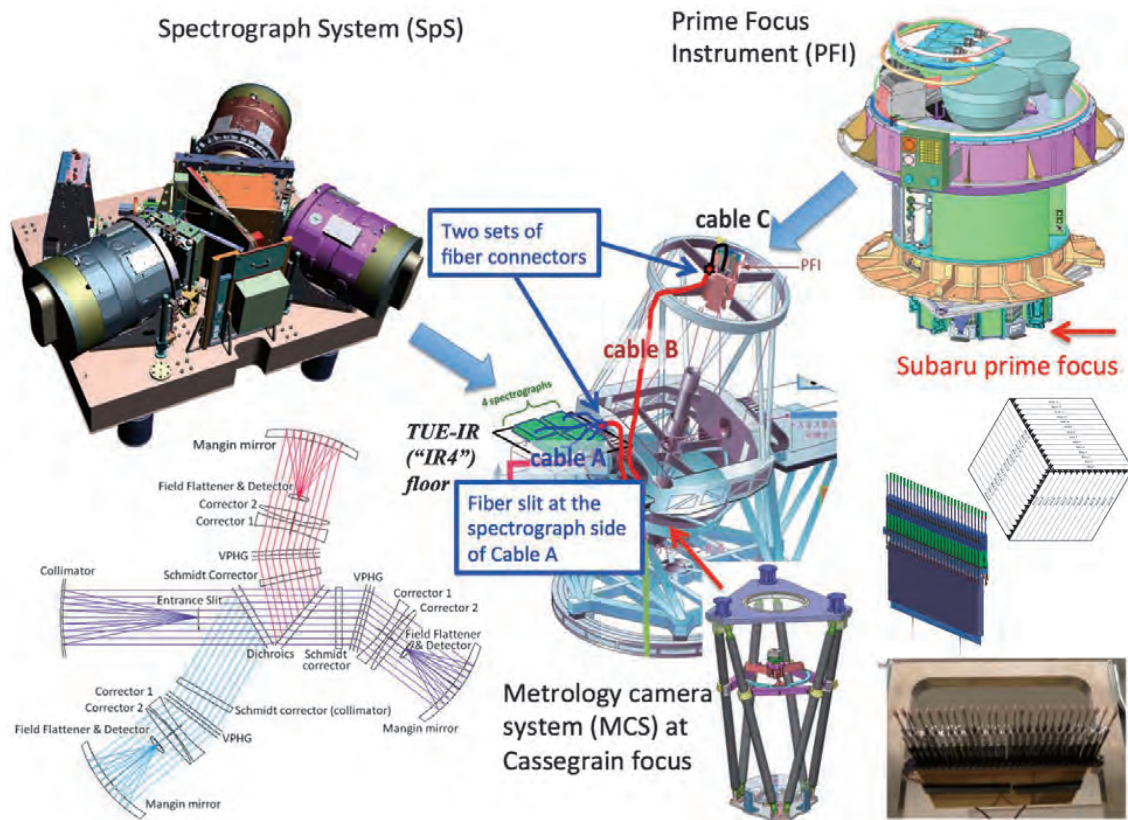


Figure 2: A schematic view of the configuration of PFS instruments. An overall sketch of the Subaru Telescope is presented in the middle with the PFS fiber cable routed from the prime focus to the spectrograph system. On the right, a solid model of PFI (top), a schematic view of the focal plane (middle), and a photo of the Cobra engineering model fiber positioners module are presented. On the left, a solid model of one spectrograph module (top) and a ray-trace view of it (bottom) are shown.

prime focus and transmitted via the fiber cables to the spectrograph system in the telescope enclosure building, and then the spectral images of them are delivered on the spectrograph detectors. PFS shares the Wide Field Corrector and the mechanical housing of a prime focus instrument called POpt2 equipped with an Instrument Rotator and Hexapod, all of which have already been constructed for the Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC), the prime-focus ultra wide-field imager for which Kavli IPMU also played a major role in the construction and project promotion/management. The focal plane will be equipped with 2394 reconfigurable fibers distributed in the 1.3-degree wide hexagonal field of view. “Cobra,” the actuator, is comprised of two motors and is used for moving each fiber to the

position of an astronomical object of interest on the focal plane. The “patrol area,” where each fiber attached to Cobra can move around, is a 9.5-mm diameter circle. Forty-two “Cobra modules,” each of which consists of 57 Cobras mounted at 8-mm intervals, will be used for the observation. The spectrograph has been designed to cover a wide range of wavelengths simultaneously from 380 nm to 1260 nm in one exposure. The Metrology Camera System takes images of backlit fibers on the primary focal plane and measures their current positions, so it will work as the encoder in the fiber positioning process. The HSC and PFS enable deep imaging and spectroscopic surveys of the same region of sky using the same 8.2 m telescope, allowing a good understanding of various systematics in the data.

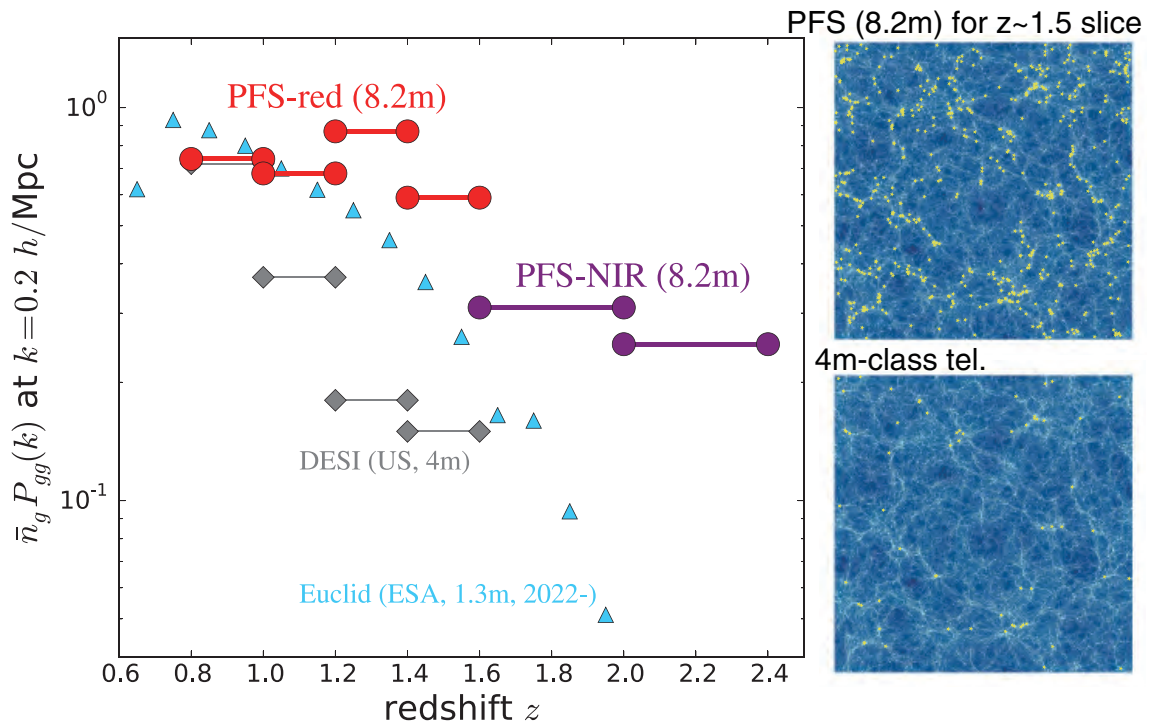


Figure 3: An illustration of the PFS cosmology survey. PFS maps out the three-dimensional (3D) distribution of galaxies by measuring distances to the galaxies from their spectroscopic observation. The upper-right panel shows a simulated distribution of galaxies in the Universe at redshift $z \sim 1.5$; the yellow dots are galaxies and the blue-color map shows the underlying dark matter distribution. Lower-right panel shows the similar simulation, but if a 4m-class telescope instead of the 8.2m Subaru telescope is used. The left panel shows the number density of PFS galaxies at each redshift slice. The higher value in the y-axis value means a higher number density of galaxies in the 3D map. These can be compared to other competing surveys: 4m US-led DESI project and the ESA satellite mission, Euclid.

3. Scientific Objectives

The combination of the large aperture, wide field-of-view, and massively-multiplexed spectroscopic capability of PFS/Subaru promises to enable a broad range of scientific topics in cosmology and astrophysics. The PFS team is planning to carry out a coherent, large-scale spectroscopic program with PFS, spending about 300 Subaru nights over 5 years. The scientific objectives consist of three pillars, namely, the Cosmology, Galaxy Evolution and Galactic Archaeology programs.

First, the PFS Cosmology program aims at mapping out the Universe over the wide range of redshifts, $0.6 < z < 2.4$, and over the wide

solid angle on the sky, 1,400 square degrees, by measuring redshifts of more than 4 million emission-line galaxies. This redshift range includes eras of the Universe changing from decelerating expansion to accelerating expansion. By measuring the scale of baryon acoustic oscillations imprinted onto the galaxy distribution in the PFS galaxy map, we can measure the cosmological distance and the expansion rate at each redshift, and then use the information to explore the nature of dark energy causing the accelerated expansion. Furthermore, by measuring the clustering statistics of galaxies, which quantifies the inhomogeneous distribution of galaxies on the galaxy map as a function of length scale and redshift, we can measure the time evolution of cosmic structure formation and then

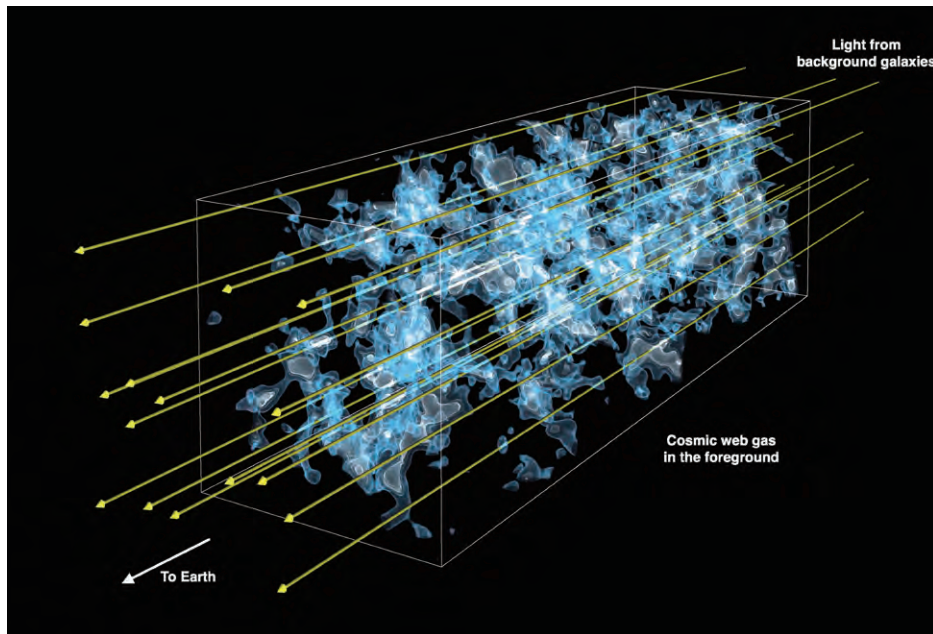
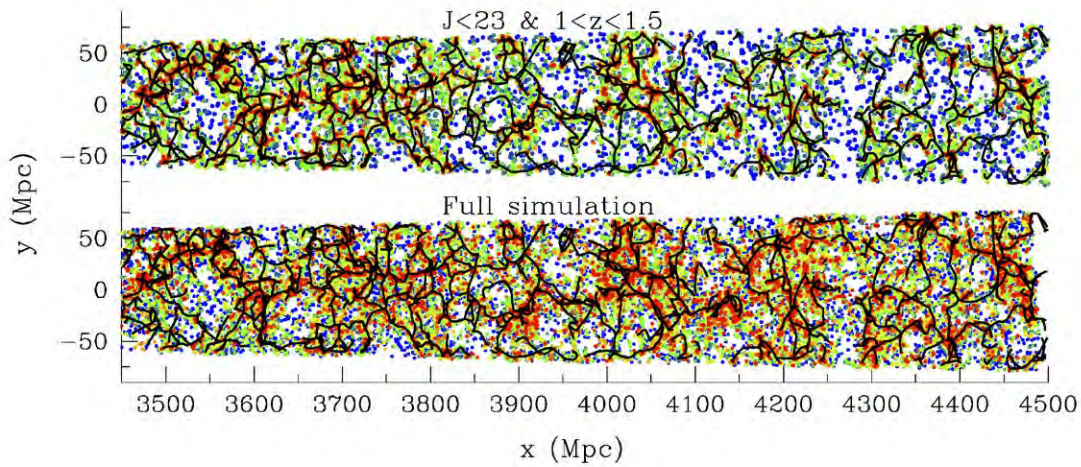


Figure 4: (Top panel): The three-dimensional map of galaxies at $1 < z < 1.5$ that are observed by the PFS Galaxy Evolution program. The blue, green, and red galaxies correspond to galaxies residing in low-, intermediate-, and high-density environments. The black lines denote filaments in the cosmic web structure. The lower figure represents all the galaxies in the same redshift slice, and the comparison shows that the PFS survey samples about 70% of all the galaxies in these structure. (Bottom panel): An illustration of “intergalactic medium (IGM) tomography” that the PFS survey will carry out. By using star-forming bright galaxies as a backlight, we can reconstruct the three-dimensional distribution of neutral hydrogen in the Universe by measuring absorption features in the PFS spectra of each galaxy.

use the information to explore the nature of dark matter, which plays a major role in the structure formation. Figure 3 shows how PFS can map out the three-dimensional distribution of galaxies as a function of redshift. The right panel shows that PFS provides us with a high-density map of galaxies,

thanks to the power of the large-aperture Subaru telescope, compared to a map done with a 4m-class telescope, and the galaxy map can be used to accurately infer the three-dimensional dark matter distribution in the Universe.

The second program is the PFS Galaxy Evolution

survey, which carries out detailed deep spectroscopic observations for hundreds of thousands of galaxies over several target fields of about 15 square degrees in total, which represents a cosmological volume. The program aims at charting the evolution of galaxies over cosmic epochs during which most of stellar masses in galaxies are assembled in the context of hierarchical structure formation scenario. Here the detailed spectroscopic data of individual galaxies for the sample enable us to investigate star formation activities, stellar and gas kinematics, and the role of feedback driven by star formation or central black hole accretion as a function of galaxy mass (size) and its surrounding environment. In addition, the new Kavli IPMU member, Khee-Gan Lee, has led the team to propose a new, exciting science case that can be done within the PFS Galaxy Evolution program. By taking spectra of star-forming, bright galaxies at high redshifts, $z \sim 3$ as a “backlight” and then measuring absorption systems due to neutral hydrogen in their spectra, we can also map out the three-dimensional distribution of neutral hydrogen that exists in intergalactic space. This is called “intergalactic medium (IGM) tomography.” With this method, we can unveil the distribution of IGM hydrogen, which cannot otherwise be observed as it does not emit light, and then study the interplay between IGM and galaxies. Figure 4 illustrates that the PFS Galaxy Evolution program will make a detailed map of galaxies and intergalactic medium in the same cosmic web of the Universe at high redshifts $z > 1$. These data will be complementary to the PFS Cosmology program, because the Galaxy Evolution survey will give a much more detailed understanding of the nature of emission-line galaxies that are targeted by the PFS Cosmology program.

The third program is the PFS Galactic Archaeology program. We plan to use PFS to measure the radial velocities and chemical abundances of numerous stars in the Milky Way, Andromeda Galaxy, and dwarf galaxies to infer the past assembly histories of these galaxies as well as their dark matter

distribution. In particular, dwarf galaxies are a dark matter-dominated system in their kinematic properties, but an accurate knowledge of the dark matter distribution is still lacking. By measuring the radial velocities of member stars over an entire region of some dwarf galaxies with PFS, we can unveil the distribution of dark matter. When combined with gamma-ray observations from the Fermi satellite, we can further explore a possible gamma-ray signal from the dwarf galaxies via annihilation or decay of dark matter particles in more detail. Even if we cannot find such a signal, we can improve the constraints on properties of dark matter such as the cross section or decaying time scale. This research goal lies in interdisciplinary fields between particle physics, astrophysics and cosmology. Figure 5 illustrates the power of the PFS Galactic Archaeology program. Thanks to the large-aperture Subaru telescope, PFS enables to measure the radial velocities and chemical abundances of stars out to a much larger distance up to ~ 30 kpc, which covers the entire region of the Milky Way Galaxy. This program would not be practical with a 4m-class telescope.

4. Current Status

The construction of PFS instrument is well underway. The subsystems are being developed at the international partner institutes of the PFS collaboration. For example, the PFS consists of 4 spectrograph modules. The first one is being assembled and is under various tests such as image quality and thermal performance in the integration hall at LAM. The team at Caltech-JPL are integrating Cobra modules. The first Cobra module has already been integrated and tested, and shipped to ASIAA in Taiwan. Also the integration of next modules has been ongoing. We aim at completing the integration and test of all the 44 Cobra modules (including 2 spare modules) this year. The Prime Focus Instrument is being integrated at ASIAA in Taiwan and will be ready soon to have the Cobra modules

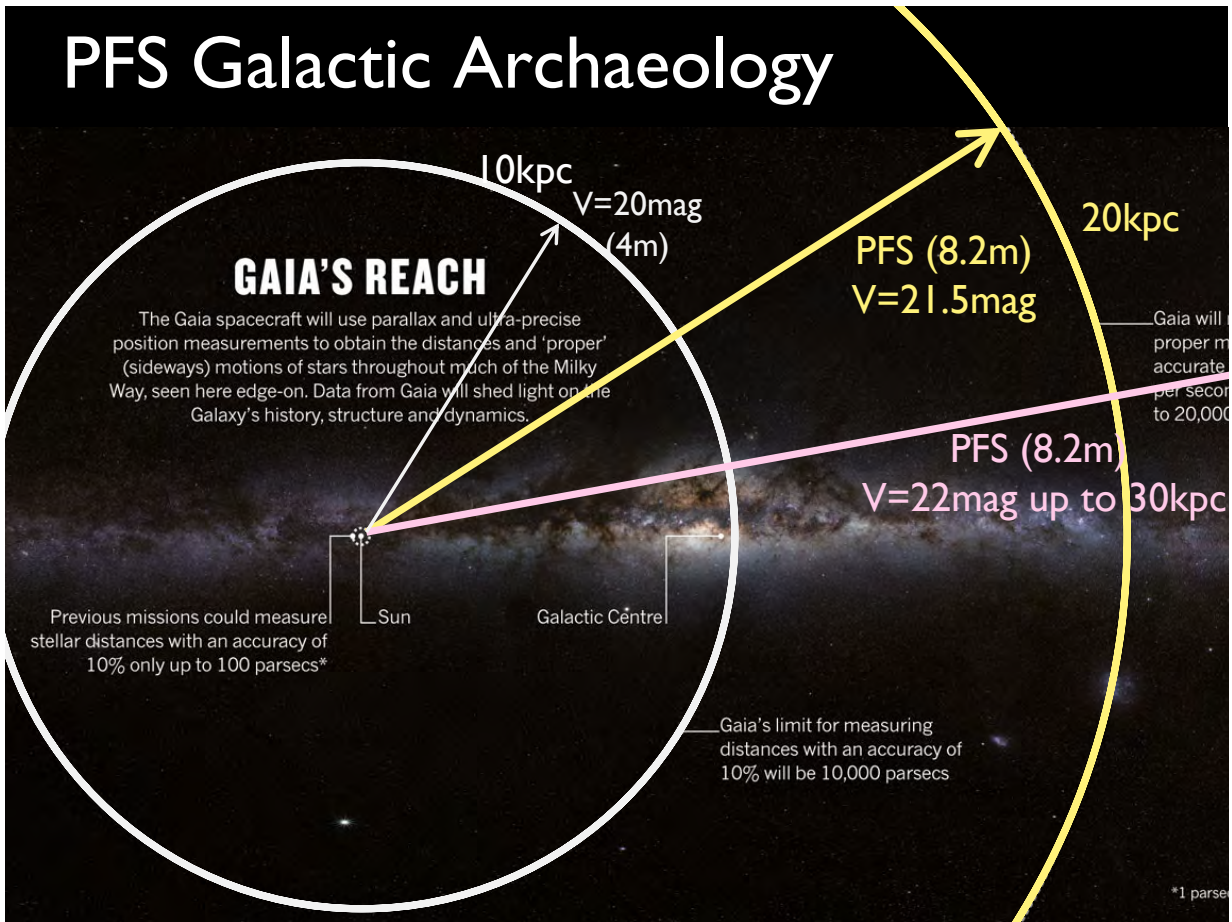


Figure 5: An illustration of the PFS Galactic Archaeology program, explaining how PFS is powerful for measuring the radial velocities and chemical abundances of numerous stars out to ~30 kpc from the Earth in the Milky Way Galaxy. The PFS survey is complementary to the ongoing survey by the ESA satellite GAIA that measures stars up to 10 kpc as well as to upcoming surveys that can be done with a 4m-class telescope that aims at carrying out more detailed (high spectral resolution) spectroscopic studies of stars up to ~10 kpc. (Background image credit: ESA.)

integrated and tested. The Metrology Camera System has been shipped in April from ASIAA to Hawaii. Then we plan to carry out various tests, first with the Metrology Camera System as stand-alone and then with it installed onto the Subaru telescope in the summer. All these integrations, developments, and scheduling of the subsystems are being led under the strong management of Project Manager Naoyuki Tamura and the PFS Project Office centered at Kavli IPMU.

Obviously the PFS is a complicated instrument, and it is of critical importance to succeed in various on-site tests of the performance and on-

sky commissioning observations at the summit of Maunakea with PFS installed on the Subaru telescope. Yuki Moritani is leading the detailed planning of the commissioning observations, having discussions for optimization with other members in the PFS team and also the staff at the Subaru Observatory. The current plan is to start the commissioning observations in 2019, and to complete the major performance testing of the PFS instruments within about one year from the start. After this, in parallel with the efforts of stabilizing the instrument performance and operation, the PFS team envisions to start the large-scale observational

program of the aforementioned PFS science by the end of 2021.

The three main science programs of PFS, Cosmology, Galaxy Evolution and Galactic Archaeology will make spectroscopic observations of different astronomical objects (stars and galaxies) in different fields in the sky, and the requirements on the quality of their taken spectra (exposure time and physical quantities we want to measure) are different in between the three programs. Hence, in order to make full use of observational nights at the Subaru telescope, it is very important to explore an optimal survey design of the PFS survey project by combining different observations of the three PFS science projects. In parallel to the instrumentation, the team being led by Kiyoto Yabe is developing an “Exposure Time Calculator (ETC)” that allows the simulation of an expected spectrum of an astronomical object for an assumed exposure time under the expected Maunakea observational conditions, where the expected performance of PFS instruments is taken into account. Using the ETC and the fiber assignment software, the team is exploring an optimal survey strategy by carrying out a simulation of the PFS survey program assuming target fields and target astronomical objects that the PFS Science teams are currently considering for 300 nights.

5. Future Prospects

As is obvious from what we have so far described, the Subaru PFS is a very powerful instrument. The 6.5m effective-aperture Large Synoptic Survey Telescope (LSST) is a US-led project starting around 2020 and is currently under construction, and will make possible the ultimate dedicated imaging survey of the Universe. However, a spectroscopic follow-up observation of LSST objects is not yet being planned. The extremely large-aperture telescope such as the Thirty-Meter Telescope in which astronomers in Japan are involved, is being planned to start its operation after 2025,

but has a small field-of-view, and is more suitable to make a detailed spectroscopic observation of interesting, rare astronomical objects. The TMT is complementary to PFS in light of their roles. Thus PFS will make the Subaru telescope a world-leading astronomical facility in the decade of the 2020s. In fact, astronomers in Japan and US are starting discussions toward a collaboration combining both data from the NASA-led satellite mission WFIRST (its launch will be around 2025 at the earliest) and the PFS-led Subaru telescope. The PFS project is an extremely exciting project, and astronomers and physicists in Japan should not miss this great opportunity to advance our understanding of the physics of the Universe.

Finally, we acknowledge the support from MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Area “Why does the Universe accelerate? — Exhaustive study and challenge for the future” (Nos. 15H05887, 15H05893, 15K21733, and 15H05892) for this HSC collaboration.

Forty new studies published from the first data of world's biggest map of the Universe

Masahiro Takada

Kavli IPMU Principal Investigator

The first two years of data from an international team mapping the Universe has moved research forward in several areas of astronomy and physics, including the search for new objects in the solar system, studies about both nearby and highest-redshift galaxies, galaxy clusters, dark matter, and the expansion of the Universe. The 40 papers based on the HSC data have been reported in the latest special issue of *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*.

An international team including National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU) at the University of Tokyo, other institutes in Japan, Academia Sinica Institute for Astronomy and Astrophysics (ASIAA, Taiwan), and Princeton University, has been conducting a large-scale astronomical survey using the Hyper Suprime-Cam (HSC), an ultra-wide-field camera installed at the prime focus of the Subaru telescope in Hawaii since 2014.

This large-scale survey, HSC-SSP (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program, <http://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/>), takes advantage of the HSC's ability to capture a large area of the sky, equivalent to nine times the area of a full moon, and will attempt to take high-resolution images of the Universe over more than 1,000 square degrees (the equivalent of more than 5,000 full moons). The international team will use the HSC image to address the mystery of the accelerating expansion of the Universe by

mapping the global distribution of dark matter with unprecedented resolution. The survey is expected to continue until 2019.

One of the major results so far is the creation of a two-dimensional and three-dimensional dark matter map over an unprecedented area with an unprecedented resolution, which was led by University of Tokyo School of Science Assistant

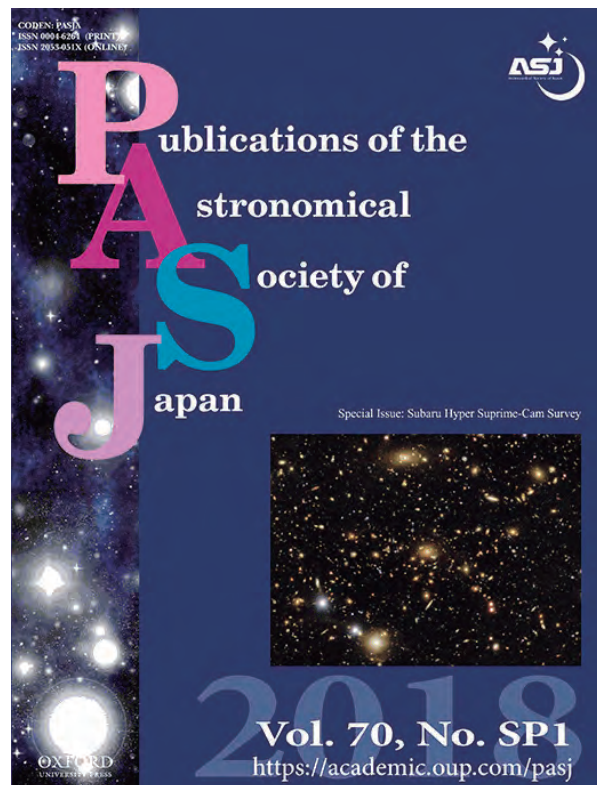


Figure 1: *Publications of the Astronomical Society of Japan* (Volume 70, Special Issue 1, 2018). (Credit: The Astronomical Society of Japan.)

Professor and Kavli IPMU Associate Scientist Masamune Oguri. It is based on the HSC data accumulated by April 2016 (16 per cent of the overall data size planned). The team first measured the weak gravitational lensing effects of galaxy images in the HSC data. Each galaxy in the HSC data has been taken with 5 color filters, each of which is transparent for a particular range of optical wavelengths. Combining these 5 colors for each galaxy, astronomers can infer a distance to each galaxy because a more distant galaxy color appears to be redder due to the “redshift” effect of wavelength caused by the expansion of the Universe. By performing gravitational lensing analysis of each galaxies as a function of distances to the galaxies, the team succeeded in reconstructing the three-dimensional map of dark matter distribution, like Computerized Tomography (CT) images in the medical field.

Figure 2 shows the dark matter distribution over an area of about one billion light years, times 250 million light years, and over a depth of eight billion light years. This is the first time a three-dimensional map over such a large volume has been built, which was made possible thanks to the high light-collecting power of the Subaru telescope.

The team expects to understand the fate of the Universe, evolution of the structure in the Universe over time, and time variation of the amount of dark energy, using the three-dimensional map of dark matter and analyzing more HSC-SSP data in the future.

Finally, we acknowledge the support from MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Area “Why does the Universe accelerate? — Exhaustive study and challenge for the future” (Nos. 15H05887, 15H05893, 15K21733, and 15H05892) for this HSC collaboration.

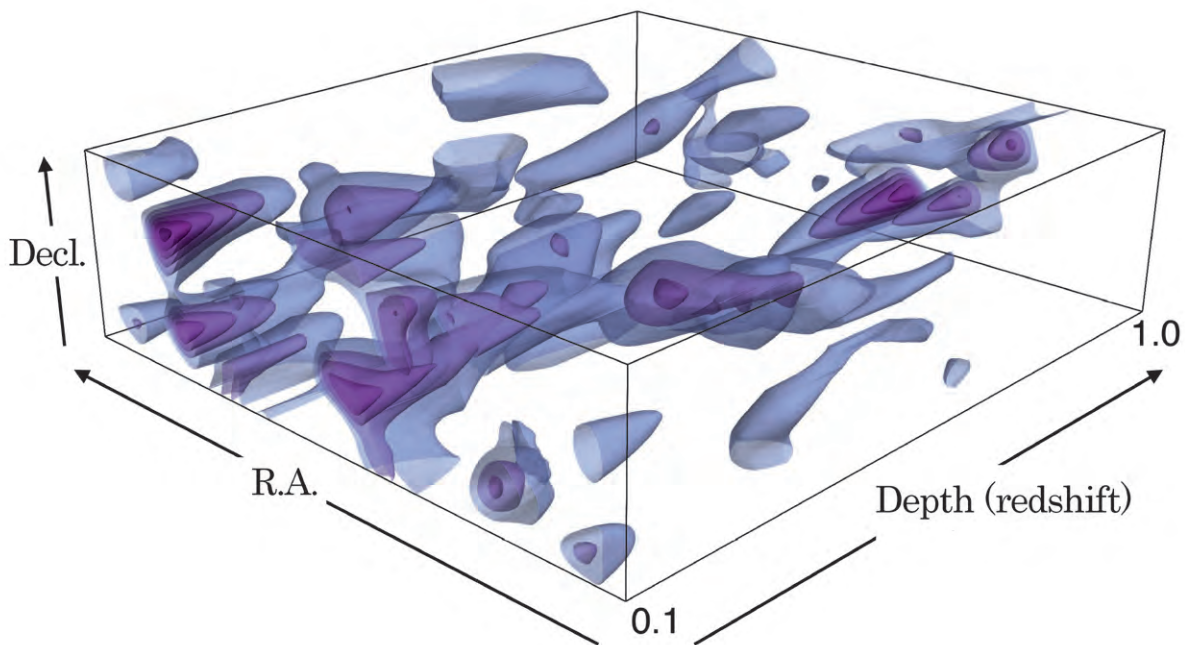


Figure 2: 3D dark matter distribution map reconstructed from measurements of gravitational weak lensing effects of galaxy images in the HSC data. Darker colors indicate higher density regions of the dark matter distribution. “R.A.” and “Decl.” are right ascension and declination of the celestial coordinates of the sky, and another third dimension denotes depth (redshift direction or line-of-sight direction).

Our Team

Tadayuki Takahashi

Research Field: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Professor*



I study various aspects of high-energy phenomena in the Universe, seen in X-rays and gamma rays. I have performed systematic studies of high-energy emission from black hole jets and supernova remnants, which are thought to be huge particle accelerators in the Universe, by using satellites and rockets. Observations in space require highly advanced detector technologies due to the severe conditions during the launch and in orbit, and also due to the very limited resources available. Through a series of satellite and rocket experiments, we have established cutting-edge technologies to make highly sensitive hard X-ray and gamma-ray detectors. Recently, it is becoming clear that these technologies also meet the long-standing demands from other fields such as (1) finding hot spots in gamma rays, (2) imaging of muon X-rays from muonic atoms, and (3) in-vivo 3D imaging of small animals to study cancer stem cells. New requirements from these applications are expected to further advance the performance of the detectors and enable us to design future hard

X-ray and gamma-ray missions with much higher sensitivities than the present ones. I would like to organize interdisciplinary activities at the Kavli IPMU to develop advanced detectors to address urgent research topics, particularly in nuclear medicine. In parallel with these experimental activities, I am continuing my research in high-energy astrophysics. One of the main topics will be the study of particle accelerators in the Universe. Understanding the connection between the process of magnetic reconnection and particle acceleration in a wide range of astronomical objects, from the Sun to black holes and clusters of galaxies will also be a subject.

*Kavli IPMU Principal Investigator from April 1, 2018.

Khee-Gan Lee

Research Field: **Astronomy**

Kavli IPMU Assistant Professor

Khee-Gan Lee, commonly known to his colleagues as “K.G.”, is an observational cosmologist originally from Malaysia. His primary research interest is on studying the large-scale distribution of gas and galaxies in the distant Universe. Since this “cosmic web” reflects initial inhomogeneities that were laid down immediately after the Big Bang, his research helps constrain the fundamental physical parameters of the Universe. In particular, his speciality is in tomographic 3D mapping of hydrogen absorption during the “Cosmic Noon” period 10 billion years ago. He is an experienced observer with the Keck telescopes, and is helping plan future spectroscopic



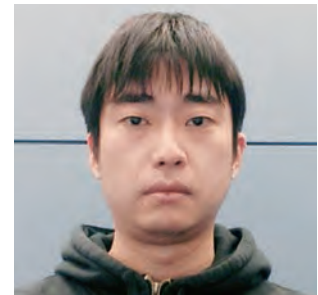
surveys using the Prime Focus Spectrograph on the Subaru Telescope. His shoe size is 26.5cm and his favorite color is blue.

Tadashi Orita

Research Field: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor

I have been engaged in the field of radiation measurement, including in applications for environmental radiation monitoring, especially for Cs-137, and medical applications such as positron emission tomography and single photon emission CT. In those applications, I have focused especially on developing three-dimensional image reconstruction algorithms and electronics such as integrated circuits for high-speed and low-noise readout. By developing advanced measurement technologies that have realized heavy demands for physics experiments, I aim to further develop not only physics experiments, but also a three-dimensional imaging system which



can achieve high sensitivity and high resolution for cancer stem cell research.

Atsushi Yagishita

Research Field: **Experimental Physics, Medical Science**

Kavli IPMU Assistant Professor



I have years of experience as a medical doctor and in clinical research. Inspired by this experience, I now work in chemical biology, where several fluorescent probes were synthesized. These fluorescent probes can detect stem cells (cells like “QUEEN BEE”) including cancer stem cells in vitro. In Kavli IPMU, the probes will be converted into radioactive probes aiming for in-vivo imaging. Thus far, the microstructure of the internal body of living animals and humans cannot be visualized. However, our team will make

it possible to visualize the microstructures of living animal tissues using the radioactive probes and a newly developed detecting device in which a hard X-ray/gamma-ray detector, which was developed for use in space observation, is incorporated.

Seyed Morteza Hosseini

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc



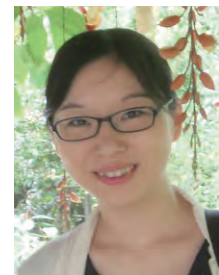
My research focuses on understanding the nonperturbative aspects of gauge and string theories. To this end, the most powerful tools are gauge/gravity duality and localization. The localization principle allows the path integral of a theory to be reduced into a matrix integral, and some exact results in strongly coupled field theories to be computed. It thus gives very precise predictions for the gauge/

gravity duality. I utilize the combination of these ideas in order to understand the microscopic origin of the black hole entropy.

Yuko Ikkatai

Research Field: **Science Communication, Psychology**

Postdoc



I study various topics in science communication. My current main research theme is why the proportion of female students pursuing physics is low in Japan. It is known that the proportion of females majoring in physics is less than that in biology. This might be related to the social background of Japan; however, it has not been fully explored. I would like to explore the topic using qualitative and

quantitative approaches. I am also interested in the new movements of “open science,” which includes crowdfunding.

Kavli IPMU-Berkeley Symposium “Statistics, Physics and Astronomy”

Toshitake Kohno

Kavli IPMU Principal Investigator

This symposium was held on January 11 and 12, 2018 Within the framework of the strategic partnership project UC Berkeley/UTokyo, and was a part of the program Berkeley Week at UTokyo. It was an interdisciplinary meeting focusing on various aspects of data science in mathematics, physics and astronomy. It is an important challenge at Kavli IPMU to interpret big data from astronomical observations using information statistics; therefore, the role of data science at Kavli IPMU will be increasingly important. The purpose of the symposium was to develop common interests in data science from the point of view of mathematics, physics, and astronomy.

The lecturers of the symposium were Wahid Bhimji (LBNL Berkeley), Shiro Ikeda (The Institute of Statistical Mathematics), Ippei Obayashi (AIMR, Tohoku University), Masanao Ozawa (Nagoya University), Alessandro Sonnenfeld (Kavli IPMU) and Philip B. Stark (Department of Statistics, University of California, Berkeley).

Shiro Ikeda explained recent developments in data science such as sparsity-based methods aiming for applications to EHT (Event Horizon Telescope). Masanao Ozawa described his quantum measurement theory and how it was related to showing the superiority of the interferometer type to

the resonator type as a gravitational wave detector. Philip B. Stark talked about quantifying uncertainty in inferences in physics and astronomy. Alessandro Sonnenfeld described applications of Bayesian hierarchical inference methods in a broad range of astronomical studies. Ippei Obayashi gave an introduction to topological data analysis, specifically, persistent homology. He also showed us data analysis software of persistent homology called Homcloud developed by his research group. Finally, Wahid Bhimji explained developments of deep learning for high-energy physics and cosmology. The lectures of the symposium were held in the afternoon.

On January 10 and in the morning on January 11 and 12, there was an event, Berkeley Week@IPMU, organized by Yasunori Nomura. This event was also a part of the program, Berkeley Week at UTokyo. For Berkeley Week@IPMU we invited five postdoctoral researchers and two graduate students from the University of California, Berkeley. There were also talks by five young researchers of Kavli IPMU. The participants of Berkeley Week@IPMU also attended the symposium “Statistics, Physics and Astronomy.” In this way we were able to share our common interests. The symposium and Berkeley Week@IPMU were extremely lively and there were many stimulating discussions.



Lectures on Higher Structures and Quantisation

Andrew Macpherson

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

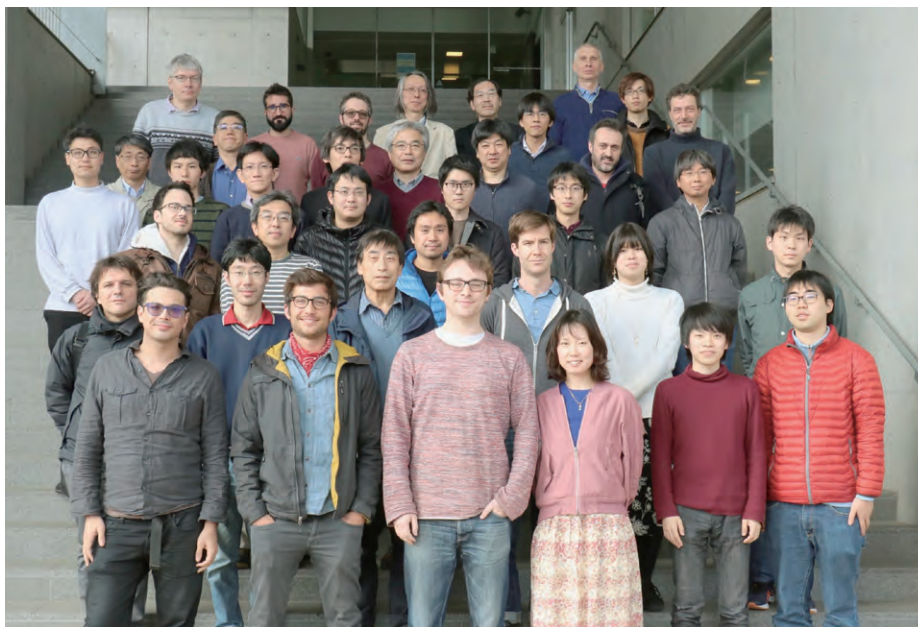
From the 20th until the 22nd March 2018, students and researchers with interests at the interface between homotopy theory and geometry gathered at the Kavli IPMU for a series of lectures “on higher structures and quantisation” delivered by derived algebraic geometry veterans B. Toën and G. Vezzosi from Europe and “homotopical terrorist” (this term is due to A. Bondal) A. Mazel-Gee from the USA. The format, in which each was allowed two talks of 90 minutes, gave the speakers a chance to get in-depth about their chosen topics. Our international visitors were supported by local contributions from I. Iwanari of Tohoku university and Kavli IPMU’s own M. Kapranov.

Rather than attempting to fix topics for the conference ahead of time, the interpretation of the deliberately broad title of the meeting was left to the speakers; that way, common themes could emerge naturally throughout the course of the week. Happily, this turned out to be the case—for instance, the theme of ‘formal glueing’ featured prominently in all of the lectures by our international guests.

When the participants arrived on the first day, we encountered a problem of the kind that every conference organiser hopes for: despite our initial worries about lack of publicity for this event, the

lectures turned out to be oversubscribed to the point that there was not enough space in the room we had booked. Fortunately, the Kavli IPMU staff—especially Rie Kohama, who at all times was instrumental in ensuring that the meeting ran smoothly—were able to locate us a larger room in the campus library to accommodate the enlarged audience. Remarkably, the number of attendees remained stable on the second and third days, despite the vernal equinox which would have normally earned our local participants a day off.

The success of this conference is attested by the interactivity of the audience with the lecturers in each talk and by the positive feedback I received at the end. I even heard the lectures mentioned a number of times at each of the major conferences taking place on Tokyo University’s Komaba campus in March, between which our conference was sandwiched. To the best of my knowledge, this meeting is the only one with this focus to have taken place recently in Japan. I hope that we will be able to repeat this experience and thereby create a new medium and international meeting spot for interaction between homotopy theory and geometry here at the Kavli IPMU.



MEXT Director General Keisuke Isogai Visits Kavli IPMU

On February 28, 2018, MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) Director General Dr. Keisuke Isogai of the Research Promotion Bureau visited the Kavli IPMU accompanied by four MEXT officers. They listened to Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama's presentation of an overview of the research activities at the Kavli IPMU. Subsequently, the guests joined a tea held in Piazza Fujiwara and enjoyed interacting with young researchers from many countries. In particular, Dr. Isogai enjoyed lively conversations with a number of young astronomers, physicists, and mathematicians.



MEXT Director General Isogai (right) enjoying conversation with a Kavli IPMU researcher. Also see photo on page 3.

"Kavli IPMU-JAXA Joint Research Program on Hard X-Ray and Gamma-Ray Imaging" Launched

In October of last year, the Kavli IPMU and the Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

(ISAS/JAXA) agreed to start a new collaboration to apply their work in artificial satellite projects, particularly in developing hard x-ray and gamma-ray detectors, with the base of collaborative research activities to be located at the Kavli IPMU. Researchers will work together with the Keio University School of Medicine and the University of Tokyo Graduate School of Pharmaceutical Sciences to transfer their technology to nuclear medicine. In particular, they will work toward seeing the location of cancer stem cells with very high resolution and precise quantification, and, it is hoped, advance research in cancer treatment.

The leading members of the collaboration have arrived or are about to arrive at their posts at the Kavli IPMU. Accordingly, on March 26, 2018, the Kavli IPMU and ISAS/JAXA held a joint press conference at the Ito International Research Center on the University of Tokyo's Hongo campus to announce the launch of the Kavli IPMU-JAXA Joint Research Program on Hard X-Ray and Gamma-Ray Imaging. After the addresses of Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama and ISAS Director General Saku Tsuneta, Keio University School of Medicine Professor and Keio University Hospital Vice Director Hideyuki Saya explained the main target of the collaborative research, cancer stem cells. University of Tokyo Executive Director and Vice President and Kavli IPMU Principal Investigator Hiroaki Aihara, who coordinates the collaborative research, presented an overview of the research. A Q&A session, photo session, and on-the-spot interview by reporters followed. There were many reporters eagerly posing questions to the four presenters. (See, photo on page 3).

The 3rd Kavli IPMU / ELSI Joint Public Lecture "A Question of Origins"

On January 21, 2018, the 3rd public lecture, "A Question of Origins" co-sponsored by the Kavli IPMU and Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science Institute (ELSI) was held at the Tokyo Institute of Technology's Kuramae Hall. The purpose of the Kavli IPMU is to pursue the origin of the Universe and the purpose of the ELSI is to pursue the origin of the Earth and life. For these two WPI institutes, this series of public lectures is an opportunity to convey the latest findings of their research in an easy-to-understand way as well as to offer, together with those in different fields from those studied at Kavli IPMU and ELSI, a diversity of perspectives to the audience under the common theme of "A Question of Origins," which is fundamental to humankind. For each of the last two times, a philosopher was invited, while this time, a researcher in the science of art was invited as one of three lecturers. There was an audience of about 300 people.

After an opening address by WPI Program Director Akira Ukawa, Nagoya University Graduate School of Science Dean and Kavli IPMU Principal Investigator Naoshi Sugiyama talked on "Towards Elucidating the Origin of the Universe," ELSI Vice Director Shigeru Ida gave a talk on "Extraterrestrial Life: Liberation from Earth-Centricity — Exoplanets, Icy Moons," and the Tokyo Institute of Technology's Institute for Liberal Arts Associate Professor Asa Ito spoke about "When Shape Is Formed: Rhythm and Body from the Viewpoint of the Science of Art." After the lectures, the three speakers took part in a roundtable discussion entitled "What Does It Mean to Question

Origins?” Finally, there was a discussion between the lecturers and the audience, and the event ended on a high note.



Naosugi Sugiyama giving a lecture.

6th Annual WPI Science Symposium “Unfolding Future”

On February 11, 2018, the 6th Annual WPI Science Symposium “Unfolding Future” was held at the Miraikan in Odaiba, Tokyo, and attracted about 800 people. Previously, it was called the WPI Joint Symposium, which had been held every year to convey leading-edge scientific research activities and their attractive features, in particular, to high-school students who will lead the next generation. As of Fiscal Year 2017, it has been renamed the WPI Science Symposium. This year, Tsukuba University’s International Institute for Integrative Sleep Medicine (IIIS) hosted the Symposium, and as its venue was the Miraikan, it was open not only to high-school students but also to a wider audience including families. Because of this, the program was enriched by the inclusion of, in addition to conversations and lectures by scientists, a panel discussion in which the future of science in Japan was discussed by panelists comprised of those from venture business and the science magazine Nature in addition to scientists, and a comedy live show presented by a science communicator certified by the National Museum of Nature and



Naoki Yoshida (second from the right) and Kei Hirose (rightmost).



WPI Booth jointly run by WPI centers.

Science, Tokyo.

From the Kavli IPMU, Principal Investigator Naoki Yoshida presented a special talk with Tokyo Institute of Technology’s Earth-Life Science Institute (ELSI) Director Kei Hirose to introduce attractive features of the Universe and the Earth. In addition, the Kavli IPMU jointly ran a booth with other 10 WPI centers, and participated a one-minute presentation to introduce each WPI center to the audience.

AAAS 2018 Annual Meeting in Austin, Texas

The American Association for the Advancement of Science (AAAS) 2018 annual meeting was held at the Austin Convention Center in Austin, Texas from February 15 through 19, 2018. At this AAAS annual meeting, the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), and the WPI centers including the Kavli IPMU jointly hosted the WPI

booth for three days starting February 16 for the purpose of increasing global visibility of the WPI program, and making the WPI centers better known by overseas researchers so that they recognize the WPI centers as their own place of research. During the three days, the WPI booth was visited by about 400 people, including researchers, journalists, students, and families. At this AAAS annual meeting, WPI Program Director Akira Ukawa and WPI Academy Director Toshio Kuroki participated along with the purpose of observing various events held at the meeting.



A group photo of staff joined from MEXT, JSPS, and WPI institutes, taken at the WPI booth. Photo: courtesy of JSPS.

1st Kavli IPMU Artist-In-Residence Program Artist Exhibition

The Kavli IPMU held an exhibition “Reⁿ-Encounter between Science and Art 2018” from March 9 through 25 at the warehouse space KAMATA_SOKO in Ota Ward, Tokyo. Since 2015, the Kavli IPMU has been hosting the Artist in Residence (AIR) program where artists stay in the institute for about a month, during which time they interact with scientists regularly inside a world-leading research institute and work on their new work. To date, the Kavli IPMU’s AIR program has welcomed three artists – painter Yasuo Nomura in 2015, media artist Norimichi Hirakawa in 2016, and sculptor Kentaro Haruyama in 2018. The aim of this exhibition

is to showcase the outcome of the Kavli IPMU's AIR to the general public including specialists in various fields, and at the same time to create a new culture through interactions between science and art as well as to generate publicity for the Kavli IPMU. The program included the exhibition of new pieces of art created by the three artists, Nomura, Hirakawa, and Haruyama, an exhibition to introduce the Kavli IPMU, and various related events including a symposium, workshop, and seminars, where specialists in various fields were invited and discussed the AIR program at the Kavli IPMU, as well as science café talks by Kavli IPMU mathematicians. Listed below is a part of the program for these related events, in which Kavli IPMU researchers participated.

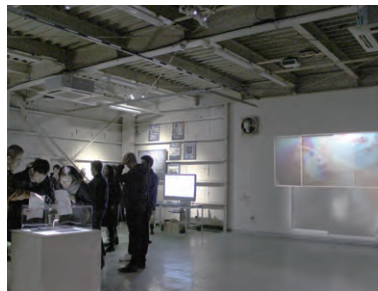
- Science café on March 17, "What do you do in mathematics? — Let's ask! A dialog with a mathematician" by Tomoyuki Abe (Kavli IPMU Associate Professor);
- Science café on March 18, "Amazing McKay correspondence" by Yukari Ito (Kavli IPMU Professor and Nagoya University Graduate School of Mathematics Associate Professor);
- Science café on March 21, "Soap bubbles and spacetime" by Will Donovan (Kavli IPMU Postdoctoral Fellow);
- Symposium on March 10, "From the viewpoint of science and society, and the theory of art practice" where Akishi Ikeda (Kavli IPMU Postdoctoral Fellow, mathematics), and Akemi Sunayama (Kavli IPMU Postdoctoral Fellow, astronomy) participated together with three artists who experienced AIR at the Kavli IPMU, as well as specialists in other areas.

In addition, on March 11, the workshop "Uncovering the basis of science and art through Truth, Good, and Beauty" was held at Tamarokuto

Science Center in Nishi-Tokyo City, where Kavli IPMU Associate Professor Masahito Yamazaki participated with three artists and specialists in mathematical philosophy and aesthetics. They discussed the AIR program at the Kavli IPMU, and shared opinions with the audience.



Left to right, media artist Norimichi Hirakawa, painter Yasuo Nomura, and sculptor Kentaro Haruyama.



Some of the work on display at Kavli IPMU Artist-In-Residence Program Artist Exhibition.

Kavli IPMU Komaba Seminar

1. "Various applications of supersymmetry in statistical physics"
Speaker: Edouard Brezin (LPTENS, Paris)
Date: Nov 9, 2017

Kavli IPMU Seminars

1. "How to break electroweak symmetry naturally?"
Speaker: Jing Shu (Inst Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences)
Date: Oct 20, 2017
2. "Algebraic properties of the monopole formula"

Speaker: Marcus Sperling (U Vienna)

Date: Oct 24, 2017

3. "A journey through loop braid groups"
Speaker: Celeste Damiani (Osaka City U)
Date: Oct 24, 2017
4. "Inflation from High-Scale SUSY Breaking"
Speaker: Kai Schmitz (MPIK)
Date: Oct 25, 2017
5. "Towards birational boundedness of elliptic Calabi-Yau varieties"
Speaker: Roberto Svaldi (U Cambridge)
Date: Oct 31, 2017
6. "Higgs Exempt No-Scale Supersymmetry"
Speaker: Jason Evans (Kavli IPMU)
Date: Nov 01, 2017
7. "The Leptonic Dirac CP Phase from Residual Symmetry and Muon Decay at Rest Experiment"
Speaker: Shao-Feng Ge (Kavli IPMU)
Date: Nov 01, 2017
8. "Homology of $gl(\infty)$ "
Speaker: Kenji Iohara (U Lyon)
Date: Nov 07, 2017
9. "Classical Conformal Blocks and Quasinormal Modes from Isomonodromic Deformations"
Speaker: Fabio Novaes (IIP-UFRN)
Date: Nov 07, 2017
10. "Gravitational interactions of a degenerate quantum scalar field"
Speaker: Pierre Sikivie (U Florida)
Date: Nov 08, 2017
11. "Constraints on the chemical enrichment history in clusters of galaxies from X-ray spectroscopy"
Speaker: Aurora Simionescu (ISAS)
Date: Nov 08, 2017
12. "Topics in Axion Cosmology"
Speaker: Andrew J Long (U Chicago)
Date: Nov 10, 2017
13. "Probabilistic Enumerative

- Geometry”
Speaker: Antonio Lerario (SISSA)
Date: Nov 14, 2017
14. “GW170817: Electromagnetic Wave Observations”
Speaker: Masaomi Tanaka (NAOJ)
Date: Nov 16, 2017
15. “Computing a categorical Gromov-Witten invariant”
Speaker: Andrei Caldararu (U Wisconsin)
Date: Nov 21, 2017
16. “Discriminants and Brane Monodromy”
Speaker: Edward Segal (U College London)
Date: Nov 21, 2017
17. “Ringel duality as an instance of Koszul duality”
Speaker: Agnieszka Bodzenta (U Edinburgh)
Date: Nov 22, 2017
18. “Categorifying Donaldson-Thomas invariants”
Speaker: Sven Meinhardt (U Sheffield)
Date: Nov 28, 2017
19. “Moonshine and Arithmetic”
Speaker: John Duncan (Emory U)
Date: Nov 28, 2017
20. “MApping the Most Massive Overdensity Through Hydrogen (MAMMOTH)”
Speaker: Zheng Cai (UCSC)
Date: Dec 05, 2017
21. “Kramers-Wannier and electromagnetic duality in lattice field theory”
Speaker: Constantin Teleman (U Oxford / UC Berkeley)
Date: Dec 05, 2017
22. “Deformations of Calabi-Yau categories”
Speaker: Christopher Brav (HSE, Moscow)
Date: Dec 05, 2017
23. “Deep Learning of Quasar Spectra”
Speaker: J. Xavier Prochaska (UC Santa Cruz)
Date: Dec 06, 2017
24. “Motivic realizations of dg-categories, matrix factorizations and vanishing cycles”
Speaker: Anthony Blanc (SISSA)
Date: Dec 07, 2017
25. “Yields and Routes of p-process Nuclei in Cosmic Rays and Supernovae”
Speaker: Motohiko Kusakabe (Beihang U)
Date: Dec 07, 2017
26. “Calabi-Yau moduli space metric for hypersurfaces in weighted projective spaces”
Speaker: Konstantin Aleshkin (SISSA / ITP)
Date: Dec 07, 2017
27. “On the classification of algebraic varieties”
Speaker: Shigefumi Mori (RIMS, Kyoto)
Date: Dec 11, 2017
28. “Which Galactic dust map should I use? Insights from extragalactic tomography”
Speaker: Yi-Kuan Chiang (JHU)
Date: Dec 12, 2017
29. “On ADE link homology”
Speaker: Dmitrii M Galakhov (UC Berkeley)
Date: Dec 12, 2017
30. “Symmetry enhancement and closing of knots in 3d/3d correspondence”
Speaker: Dongmin Gang (SNU)
Date: Dec 12, 2017
31. “Constraining Cosmology and Galaxy Formation with Lyman-alpha absorption”
Speaker: Daniele Sorini (MPIA)
Date: Dec 13, 2017
32. “Beyond the limits of visual insight”
Speaker: Brice Menard (JHU)
Date: Dec 15, 2017
33. “Holographic Screens in Flat Spacetime”
Speaker: Yun-Long Zhang (APCTP)
Date: Dec 18, 2017
34. “Teichmuller TQFT vs Chern-Simons Theory”
Speaker: Victor Mikhaylov (Simons Center for Geometry and Physics)
Date: Dec 19, 2017
35. “On compactifications of 6d $N=(1,0)$ to 4d $N=1$ ”
Speaker: Shlomo Razamat (Technion)
Date: Dec 19, 2017
36. “EFT for new physics in multi-Higgs final states in hadron colliders”
Speaker: Sichun Sun (National Taiwan U)
Date: Dec 20, 2017
37. “Exploring the Universe with the Cosmic Microwave Background”
Speaker: Aritoki Suzuki (LBNL)
Date: Dec 21, 2017
38. “New Frontiers of hard X-ray and gamma-ray imaging — Transferring advanced space technology to ground applications —”
Speaker: Tadayuki Takahashi (ISAS/JAXA)
Date: Dec 21, 2017
39. “Natural and Unnatural SUSY in light of Proton Decay and Gauge Unification”
Speaker: Kazuki Sakurai (Warsaw U)
Date: Dec 22, 2017
40. “Cosmological hints of axionic blue isocurvature”
Speaker: Amol Upadhye (U New South Wales)
Date: Dec 22, 2017
41. “Observation of supernova neutrinos”
Speaker: Masayuki Nakahata (ICRR)
Date: Dec 27, 2017
42. “Cacti groups, an operadic point of view”
Speaker: Anton Khoroshkin (HSE Moscow)

- Date: Jan 09, 2018
43. “Landau-Ginzburg / Calabi-Yau correspondence in one dimension”
Speaker: Yefeng Shen (U Oregon)
Date: Jan 09, 2018
44. “Higgs-Anomaly Mediation: a simple setup with interesting phenomena and flavor safety”
Speaker: Wen Yin (IHEP)
Date: Jan 10, 2018
45. “Thermal Evolution of Neutron Stars”
Speaker: Madeline Kelly (Montana State U)
Date: Jan 10, 2018
46. “On sheaf quantization of Lagrangian submanifolds”
Speaker: Tatsuki Kuwagaki (Kavli IPMU)
Date: Jan 11, 2018
47. “Some results toward the geometry of double-affine flag varieties”
Speaker: Dinakar Muthiah (U Mass)
Date: Jan 16, 2018
48. “Recent Results on GeV Neutrino Interactions”
Speaker: Kevin McFarland (U Rochester)
Date: Jan 16, 2018
49. “Revitalizing the Galaxy 3-Point Correlation Function to Probe Dark Energy”
Speaker: Zack Slepian (UC Berkeley)
Date: Jan 17, 2018
50. “Orbital degeneracy loci”
Speaker: Fabio Tantarri (Universite Lille 1)
Date: Jan 17, 2018
51. “Machine learning for SUSY exploration”
Speaker: JinMin Yang (ITP)
Date: Jan 19, 2018
52. “Probing the origins of astroparticles in the multi-messenger era”
Speaker: Ke Fang (U Maryland)
Date: Jan 19, 2018

53. “Introduction to exact WKB analysis and Borel summability of WKB solutions”
Speaker: Tatsuya Koike (Kobe U)
Date: Jan 23, 2018
54. “P-functors and cyclic covers”
Speaker: Timothy Logvinenko (Cardiff U)
Date: Jan 23, 2018
55. “Detecting Dark Blobs”
Speaker: Dorota M Grabowska (UC Berkeley)
Date: Jan 24, 2018
56. “Inflation, Primordial Black holes and Gravitational Waves – Dawn of Gravitational Wave Astronomy —”
Speaker: Misao Sasaki (Kyoto U)
Date: Jan 24, 2018
57. “Constructing a (conformally organised) basis of operators in QFT”
Speaker: Tom Melia (Kavli IPMU)
Date: Jan 25, 2018
58. “An Illiad and Odyssey of 5d SCFTs”
Speaker: Martin Fluder (Caltech)
Date: Jan 30, 2018

Personnel Changes

Promotion

Masahito Yamazaki, who was Kavli IPMU Assistant Professor, became Kavli IPMU Associate Professor on February 1, 2018



Masahito Yamazaki

Surhud More, who was Kavli IPMU Assistant Professor, became Kavli IPMU Associate Professor on March 1, 2018



Surhud More

Retirement

Kavli IPMU Professor Masataka Fukugita retired on March 31, 2018, and became Kavli IPMU Senior

Scientist on April 1, 2018. At the IPMU/Kavli IPMU, he served as Principal Investigator from the launch of IPMU on October 1, 2007 to March 31, 2012, and as Professor from April 1, 2012.

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 Feng Luo [November 1, 2015 – March 15, 2018] moved to Sun Yat-sen University in China as an Associate Professor.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Kazuya Yonekura [August 1, 2015 – March 31, 2018] moved to Faculty of Arts and Science, Kyushu University as an Assistant Professor.

JSPS Overseas Researcher Hirary Child [September 2, 2017 – February 27, 2018] returned to the Department of Astronomy and Astrophysics, the University of Chicago.

JSPS Postdoctoral Fellow Kyohei Mukaida [April 1, 2015 – March 31, 2018] moved to DESY as a Postdoctoral Fellow.

JSPS Postdoctoral Fellow Genki Oouchi [April 1, 2017 – March 31, 2018] moved to Riken as a Special Postdoctoral Researcher.

Also, Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Sho Saito resigned the Kavli IPMU at the expiration of his term, from April 1, 2015 to March 31, 2018.

Erratum to the Printed Version of the *Kavli IPMU News* No. 40

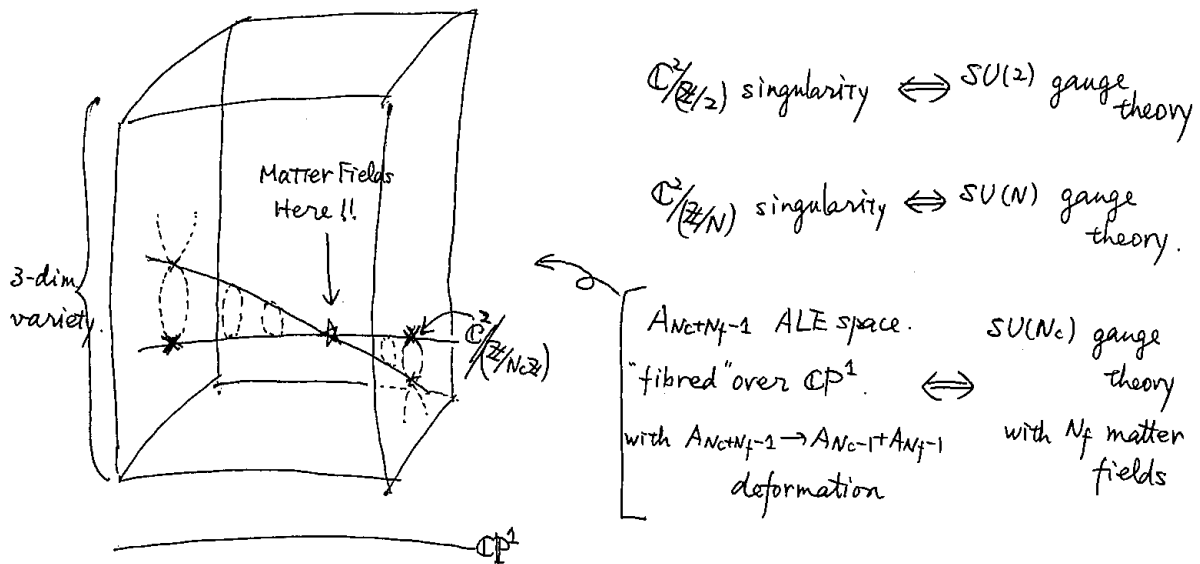
On page 20, left column, line 9, “2017” should be “2007”. (This erratum does not apply to the web version of the *Kavli IPMU News* No. 40).

Geometric Engineering

Taizan Watari

Kavli IPMU Associate Professor

When a Type IIA string propagates on a geometry with singularity, its quantized spectrum may contain a gauge field of a non-Abelian group. The more complicated the singularity a geometry contains, the more complicated the gauge theory that can be obtained from string theory. The idea that one can design geometry to realize the gauge theory one desires is called geometric engineering. This observation has also made it possible to deal with both gravity and gauge theory (as in the real world) by simply referring to geometry.



近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



1月6日：昨年8月19日に続き、東京大学CoREFとKavli IPMU共催の「平成29年度知の協創実践学講座『物理を学ぶ、物理を作る—高校物理から宇宙研究の最先端へ—2』」で講義（Kavli IPMU News No. 39、p. 43参照）。



2月3日：パークレーで行われた日本学術振興会サンフランシスコ研究連絡センター主催の「日本人研究者交流会 2017年度冬」で基調講演。写真提供：日本学術振興会サンフランシスコ研究連絡センター。



2月27日：HSCの初期成果がまとまったこと（p. 46参照）についての記者会見で、すばる望遠鏡が継続することの重要性についてコメント。



2月28日：磯谷桂介文部科学省研究振興局長の視察（p. 53参照）。



3月12日：シカゴ大学で行われた東京大学とシカゴ大学の合同フォーラム“Perspectives on Big Data”で講演。写真提供：関村直人東京大学副学長。



3月26日：「JAXA - Kavli IPMU/東京大学 硬X線・ガンマ線イメージング連携拠点」発足についての記者会見。右から村山機構長、宇宙科学研究所の常田佐久所長、慶應義塾大学医学部教授で慶應義塾大学病院の佐谷秀行副院長、相原博昭東京大学執行役・副学長兼 Kavli IPMU 主任研究員（p. 53参照）。

Director's Corner

量子ゆらぎ

20世紀後半に発展した素粒子物理学の標準モデルは、2012年のヒッグス粒子の発見をもって揺るぎないものとなった。21世紀には、宇宙論の標準モデルが大きく進展した。素粒子物理学の発展を主導したスティーブン・ワインバーグは、2008年の著書「宇宙論」の中でこう記している。「この宇宙論における新展開は、まるで素粒子物理学のそれを見るようである。素粒子と場の理論の標準モデルは80年代までには完成されていた。その後も重要な理論的、および実験的な仕事は続いたものの、現在では、実験と新しい理論的アイデアとのあいだにはほとんど関連性が見られない。このため、素粒子物理学はその生気のほとんどを失ってしまった。一方、宇宙論は、素粒子物理学の研究者が60年代や70年代に経験したような興奮を提供しているのだ。」

「 Λ CDMモデル」と呼ばれる宇宙論の標準モデルは、素粒子物理学のそれがかつてそう見えたように、一見突拍子もないものを内包している。 Λ は現在の宇宙膨張を加速させる正体不明の暗黒エネルギーの理論的な候補のうち、最も単純（かつ最も理解不能）なアインシュタインの宇宙定数を表わす記号で、CDMは宇宙の全物質密度の8割を占める、やはり正体不明の冷たい暗黒物質の略称である。暗黒エネルギーと暗黒物質の存在や、そのわけのわからなさ是一般の宇宙ファンにも広く知れ渡っており、人気のあるワードである。

一方、 Λ CDMの名前には含まれないが、宇宙論の標準モデルの柱として欠かすことのできないものこそが、最も突拍子もないことであることは、一般には知

られていない。それは、「我々の起源は、宇宙初期に生成された量子力学的なゆらぎ（以下、量子ゆらぎ）」であるという仮説である。驚くべきことに、この仮説は、これまでに得られたありとあらゆる宇宙の観測データと矛盾しない。それどころか、この仮説を支持する証拠は、新しい観測データが得られるたびに強固となってさえいるのだ。宇宙のあらゆる構造、すなわち銀河、星、惑星、ひいては生命に至るまで、その究極的な起源は宇宙初期の量子ゆらぎだった可能性が高いのである。

真空からエネルギーを借りる

専門家のお叱りを受けるのを覚悟の上でざっくりと言えば、量子力学では、すぐに返すことを約束するなら真空からエネルギーを借りることができる。量子ゆらぎを、真空から借りることのできたエネルギーであるとしよう。エネルギーを借りることのできる期間は、借りるエネルギーの大きさに反比例する。銀行を例にすると、突然1億円を現金で1日貸してくれ、と言っても貸してはくれないが、1億円を現金で1秒貸してくれ、と言うのなら、窓口で1億円をもらってそのまま返すしかないから、貸してくれるかもしれない。（それか、頭がおかしいと思われて警察を呼ばれるかである。）宇宙初期にはごく短い時間しかないので、借りることのできたエネルギーも大きく、空間のいたるところでランダムにエネルギー密度のゆらぎが発生していた。

宇宙の構造形成は、アインシュタインの重力場の方程式と、宇宙を構成するエネルギー成分それぞれの運動方程式に従って進む。宇宙初期のある時刻に初期条件を与えれば、あとは決定論的に進化する。そして、豊富な観測データに裏付けられた最先端の宇宙論によれば、その初期条件、すなわち初期時刻におけるエネルギー密度の分布は、量子力学によってランダムに与えられたのである！量子力学の確率論的な点を批判してアインシュタインが言ったとされる「神はサイコロを振らない」どころか、宇宙のどこにどんな銀河ができるかは、振られたサイコロの目に応じて決められたと言うのだ。

ミクロとマクロな世界を結ぶミッシング・リンク

しかし、量子ゆらぎは微小な世界でのみ顕著となるはずで、それが銀河のような巨大な構造の種となったとはどういうことだろう。微小な世界と天文学的な長さの世界とをつなぐミッシング・リンクは何であろうか？宇宙論の標準モデルの柱の一つを担う有力な仮説は「宇宙のインフレーション」である。宇宙空間は開闢直後に指数関数的に膨張し、そのため量子ゆらぎの微小な波長は指数関数的に引き伸ばされ、天文学的な長さになったとされる。典型的なインフレーション理論のモデルでは、 10^{-36} 秒間という刹那に、空間は少なくとも 10^{26} 倍に広がった。これは、原子核ほどの大きさが太陽系ほどの大きさになるというとてつもない広がり、すぐにはそんなことを信じる気にはなれない。しかし、インフレーション理論が予言する宇宙の構造の詳細は、これまでに得られた全ての観測データをうまく説明する。後に述べるように、筆者は宇宙マイクロ波背景放射の測定データを用いてインフレーション理論の検証をしてきたが、理論予言を高精度で確認するたび、自分の研究者としての凡人ぶりを再認識させられた。こんな突拍子もないことが本当かもしれないなんて！佐藤、グース、スタロピンスキーなど、インフレーション理論を考えついた人たちはすごすぎ

る。

しかし、真空から借りたエネルギーは、すぐに返さねばならないのではなかったか？ここで不思議なことが起こる。インフレーションによって量子ゆらぎの波長が引き伸ばされてマクロスコーピクなゆらぎとなると、見かけ上量子ゆらぎではなく、古典的なゆらぎとして振る舞うのである。無理に銀行の比喻を用いると、「インフレーションのため、銀行にお金を返さなくてもよくなった」という、わけのわからないことになる。少しマシな比喻は、窓口に行って1億円を現金で借りた瞬間、空間が指数関数的に膨張して、借りた人と窓口との距離が引き離され、その後交信不能になった、というところであろうか。

インフレーションの研究者は長い間、量子ゆらぎが古典的なゆらぎとなる仕組みに頭を悩ませてきた。波長が引き伸ばされるだけでは、ゆらぎは真の意味では古典化しない。見かけ上古典的なゆらぎと区別できなくなるだけである。物理学者の前でインフレーションの講演をするとこのあたりをいつも質問されるので、古典化するメカニズムはわかっていないから研究の余地があると言ってきたが、2015年6月にペンシルベニア州立大学で開催された一般相対性理論100周年の研究会で、量子重力理論のアベイ・アシュテカーが「いや、ゆらぎの古典化なんてなかったのだよ。この世はまだ、完全に量子力学的なのさ」と言ってきたので、またまたご冗談を、と返したら、本気だったので驚かされた。確かに、見かけ上は古典的なゆらぎと区別できないのだから、頭ごなしに古典化したものと決めつけなくても良いのかもしれない。また自分の凡人さを再認識し、視野が広がったことを喜んだ。

宇宙を加速膨張させるには、未知のエネルギー成分が必要である。物質や放射のような既知の成分は、宇宙を必ず減速膨張させるからである。ΛCDMのΛは現在の宇宙の加速膨張を担う未知の暗黒エネルギー成分であるが、そのようなものが宇宙初期にも必要だったことになる。このエネルギー成分は、専門的には「インフラトン場」と呼ばれる。ヒッグス場と似た性質を

持つため、ヒッグス粒子の発見は、インフレーションの研究者を勇気付けた。しかし、素粒子物理学の標準モデルのヒッグス場は、ポテンシャルの勾配がきつすぎるという技術的な問題からそのままではインフラトン場とはならず、ヒッグス場と性質は似ていても、より勾配の小さい平坦なポテンシャルを持つ別の場を仮定するか、標準モデルに「ヒッグス場と重力場の曲率との非最小結合」と言う新しい要素を導入せねばならない。

大事なことなので繰り返しておくと、インフレーション理論によれば、宇宙は開闢直後の刹那に原子核ほどの大きさが太陽系ほどの大きさになる急膨張を起こした。それに伴って、微小な空間に生じる量子ゆらぎの波長は大きく引き伸ばされ、現在宇宙に見られる全ての構造の種となったのである。私たちの体を構成する元素は星の内部の核融合で生成されたことを指して「私たちは星屑である」と言うが、宇宙論研究者に言わせれば、私たちの起源は量子ゆらぎである。

こういうことを一般講演で話すと、まず間違いなく信じてもらえない。当然の反応だと思う。むしろ、そんなことを言われてすぐに信じる宇宙物理の大学院生の方が異常かもしれない。宇宙の研究はおとぎ話のように思われがちである。一般の方は面白がって聞いてくれるが、頭のどこかでは「これは興味深い話ではあるが、大部分は天文学者の空想だ」と思っているようである。これは、研究者が一般講演をする際に、どこまでが観測データに基づいた確かな結果で、どこからが不定性の大きい推論であるかをはっきり言わないのにも原因があるかもしれない。いずれにせよ、「私たちの起源は量子ゆらぎ」なんて突拍子もないことを信じてもらうには、圧倒的な観測的証拠が必要である。

観測的証拠

観測的証拠は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の測定から得られた。量子ゆらぎのため真空中に生じるエネルギー密度のゆらぎの分布は、ある確率分布に従

う。この確率分布は、ゆらぎ発生の物理に応じて変わる。一つ重要な要素は、宇宙の構造の種となったのはどの場の量子ゆらぎか? という点である。最も単純な描像では、指数関数的な膨張の源であるインフラトン場の量子ゆらぎが宇宙の構造の種となる。ある技術的な理由からインフラトン場は平坦なポテンシャルを持つが、それはインフラトン場の相互作用は弱いという事を意味する。相互作用をしない場の真空の量子ゆらぎの分布はガウス分布 (正規分布) となるから、CMBの温度異方性の分布もガウス分布となることが予想される。

私は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) のウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) チームの一員として、2001年の打ち上げから2012年の最終データリリースまで、CMBのデータを用いたインフレーション理論の検証に没頭した。まず、温度異方性の分布 (図1) は、確かにガウス分布であった。年の瀬も迫った2012年12月21日に発表した最終結果では、ガウス分布からのズレの上限値は95%の信頼度でわずか0.2%までしか許されないことを示した。同じ手法を用いて、欧州宇宙機関 (ESA) のプランク探査機のチームは上限値を0.04%まで押し下げた。宇宙の観測データで、(検出器のノイズを除けば) これほど高精度なガウス分布を私はまだ見たことがない。これは、CMBの温度異方性の起源がインフレーション中に発生した量子ゆらぎであることと無矛盾であるだけでなく、量子ゆらぎはインフラトン場を起源とし、他の場の寄与は無視しうる「単一場のインフレーションモデル」を支持する成果である。

量子ゆらぎはインフレーション中常に生成され続け、波長は引き伸ばされ続ける。インフレーション初期に生成された量子ゆらぎの波長は、後期に生成されたゆらぎよりも引き伸ばされる期間が長く、長波長となる。これをCMBのデータで見ると、大きな見込み角度をもつ温度異方性はインフレーションの初期に生成されたことになる。量子ゆらぎの振幅は、真空からエネルギーを借りる時間に反比例する。単位時間に宇

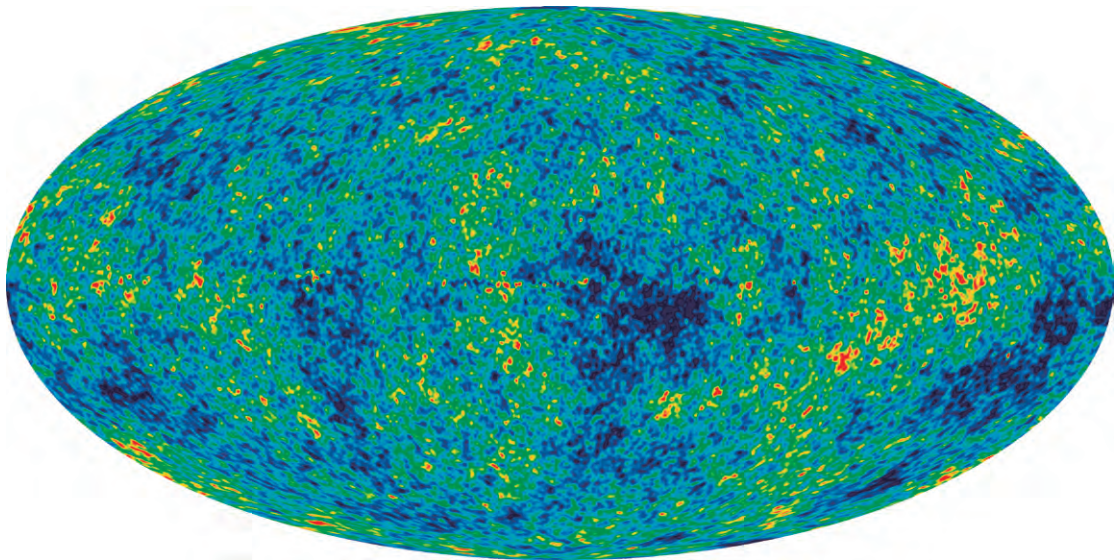


図1 WMAPの9年間の観測データから得られた宇宙マイクロ背景放射の温度異方性の全天分布を、モルワイデ図法で示す。温度異方性の分布は、ガウス分布と高精度で無矛盾であった。(クレジット：WMAPサイエンスチーム。)

宇宙空間が何倍になったかをあらわす便利な指標に「宇宙膨張率」があり、次元は $[(時間)^{-1}]$ である。これを用いると、量子ゆらぎの振幅は宇宙膨張率に比例することが導かれる。

さて、インフレーションはいずれ終わらねばならないので、宇宙膨張率は時間とともに減少する。すなわち、インフレーション初期に生成された量子ゆらぎの振幅は、後期に生成されたゆらぎよりも大きい。するとCMBの温度異方性の振幅は、大きな見込み角度のものほど大きく、小さな見込み角度のものほど小さくなるはずである。実際には、CMBにゆらぎを与えると音波が発生し、温度異方性の振幅は見込み角度とともに振動するので、「大きな見込み角度のものほど大きく、小さな見込み角度のものほど小さくなる」効果を取り出すには音波振動を取り除かねばならない。音波の物理はよく分かっているので、この作業は難しい。

1981年にムハノフとチビソフによって予言されたこの効果を発見することは、インフレーション研究者の悲願であった。ゆらぎの振幅は波長の $1-n_s$ 乗に比例すると書けば、ムハノフとチビソフの予言は「パ

ラメータ n_s は1より小さい」となり、これを測定すれば良い。私たちは2012年末、WMAPの9年間の観測データを、他のチームによる地上の望遠鏡で得られたCMBのデータ、およびスローン・デジタル・スカイ・サーベイで得られた銀河の分布のデータと組み合わせて、68%の信頼領域で $n_s = 0.958 \pm 0.008$ を得た。ついに、 $n_s < 1$ を統計的有意性5シグマで発見することに成功したのである。その3ヶ月後、プランク衛星のチームはWMAPとプランクのデータを組み合わせて、銀河の分布のデータなしに $n_s = 0.960 \pm 0.007$ を得た。これはCMBのデータのみから得た結果という点で、重要な確認である。これをもって、インフレーションと量子ゆらぎの仮説は強力な観測データの支持を得ることとなったのである。

WMAPで見えるはずだった原始重力波

それでも、カール・セーガンの言うように「途方もない主張には、途方もない証拠が必要」である。さらなる観測的証拠を求めて、CMBの研究者はインフレーション中に生成された「原始重力波」の発見を目指し

ている。LIGOによって直接測定される、ブラックホール連星の合体から放出される重力波の波長は数千キロメートルであるが、インフレーションによって波長が引き伸ばされた原始重力波の波長は、数十億光年にもなる。そのような極端に長波長の重力波は天体から作ることはできないので、インフレーションの決定的な証拠となるだろう。

重力波は空間を伸び縮みさせるのでCMBの波長も伸び縮みし、温度異方性が生じる。この効果は、WMAPで発見できるはずであった。

当時からもらしいと思われていたインフレーションのモデルは、ポテンシャルがインフラトン場のべき乗で与えられ、中でもインフラトン場 ϕ の4乗(ϕ^4)モデルは、自然なモデルだと考えられていた。東北大学での恩師二間瀬敏史教授からはそう教わったし、ヒッグス場のポテンシャルも、場の値が大きくなるほどは ϕ^4 の形となるので、もっともらしかった。このモデルによれば、原始重力波の振幅はWMAPで測定可能なほど大きい。一方、二間瀬教授は早稲田大学の前田恵一教授とともに、 ϕ と重力場の曲率との間に素粒子物理学の標準理論には含まれない非最小結合を許せば、 ϕ^4 モデルはヒッグス場のポテンシャルでもインフレーションを起こせて、さらにもっともらしくなることを理論的に発見していた。そこで、二間瀬研究室の修士の学生だった私は、非最小結合があると、原始重力波の振幅の予言がどう変わるかを計算して見た。驚くべきことに、モデルが予言する n_s の値はほとんど変わらないのに、原始重力波の振幅は100分の1になったのである！そこで、WMAPで $n_s < 1$ が発見されても原始重力波が発見されないならば、非最小結合が必要になるという論文を書いた。1999年1月のことである。

そして2006年。私たちはWMAPの3年目のデータを用いて、 ϕ^4 モデルを棄却してしまったのである。震えた。まさかこんなことになるとは。2018年4月現在、まだ原始重力波は発見されていない。非最小結合を含む ϕ^4 モデルは現在「ヒッグス・インフレーション」

として知られ、CMBのデータに最も良く合致するモデルの一つであり続けている(図2)。

宇宙マイクロ波背景放射の偏光

ヒッグス・インフレーションが予言する小さな原始重力波の振幅は、WMAPやプランクの温度異方性のデータでは発見できなかった。そこで、次はCMBの偏光を用いた方法が注目されている。重力波がCMBの波長を伸び縮みさせて生じた温度異方性を電子が散乱すると偏光する。それを用いるのである。現在、世界中で研究者がしのぎを削って観測中である。私は、KEKとカプリIPMUの羽澄昌史教授を中心とするチームの一員として、宇宙航空研究開発機構(JAXA)とともに、次世代CMB観測衛星ライトバード(LiteBIRD)計画を推し進めている(Kavli IPMU News No. 36)。まだ正式に採択はされていないが、今年度中には採択か否かの判断が下されるとのことで、ドキドキしている。ぜひ飛ばせたい。そして、原始重力波を見てみたい。

ところで、2014年にアメリカの研究グループが、原始重力波起源のCMBの偏光を発見したと報告した。これは、銀河系内の星間塵による偏光を誤解したものであった。研究者の責任もあるが、このニュースを扱ったメディアは2つの誤りを犯した。一つは、多くの専門家の懸念の声があったにもかかわらずそれらを見逃し、騒動を広げたこと(もちろん、それに進んで加担した一部の研究者の責任も大きい)。もう一つは、この発見が「重力場の量子化の証拠である」としたことである。前者は言うまでもないので、後者を取り上げたい。

この主張の根拠は、重力波は重力場そのものであり、その量子ゆらぎとはすなわち重力場(すなわち時空の歪み)が量子化されたことを示す、というものである。これは原理的には正しいが、この主張をするには、発見された原始重力波が時空の量子ゆらぎの性質と無矛盾であることを確認する作業が不可欠である。それは、発見された偏光の分布がガウス分布かどうか

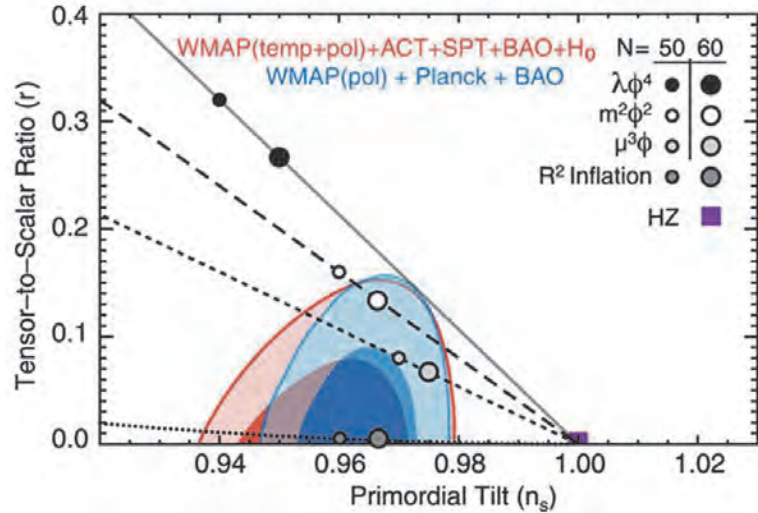


図2 縦軸は重力波の振幅を、横軸は n_s を表わし、赤い等高線は2012年12月発表のWMAPの結果から得られた68%と95%の信頼領域を、青い等高線は2013年3月発表のプランクの結果から得られた信頼領域を示す。上の方の2つの黒丸は ϕ^4 モデルの予言の範囲を示し、一番下の濃い灰色の丸は非最小結合を含んだ ϕ^4 モデルの予言の範囲を示す。Komatsu et al., *PTEP*, 06B102 (2014) より抜粋。

の確認である。そしてその作業がされることは、今に至るまで一度もなかった。

原始重力波は時空の量子ゆらぎか？

この状況に業を煮やし、最近私は共同研究者たちと、論文や研究会で一大キャンペーンを張っている。インフレーション中には、インフラトン場以外にも多くの物質場があったと考えるのは自然である。ただし、CMBの温度異方性が高精度でガウス分布であることから、これらの場のエネルギー密度はインフラトン場よりもずっと小さくしなければならず、近似的に単一場によるインフレーションとみなせる。しかし一方でこれらの物質場は、ライトバードの偏光データで発見可能な重力波を生成するには十分なエネルギー密度を持ち、その確率分布はガウス分布から著しくずれるのである。原始重力波によるCMBの偏光は、時空の量子ゆらぎ起源の重力波の寄与と、物質場起源の寄与の重ね合わせであり、どちらの寄与が大きいかは測定して見るまでわからないのだ。

原始重力波の発見の際には、ガウス分布の確認は必須である。ガウス分布と無矛盾だったなら、そして原始重力波の振幅の波長依存性が予想通りなら、重力場の量子化の証拠が得られたと報告すれば良い。ガウス分布でなかったなら？それは、インフレーションの素粒子物理学が大きく飛躍する新たな時代の始まりとなるろう！

Subaru Prime Focus Spectrograph

高田 昌広 たかだ・まさひろ

Kavli IPMU 主任研究員

田村 直之 たむら・なおゆき

Kavli IPMU 准教授

矢部 清人 やべ・きよと

Kavli IPMU 博士研究員

森谷 友由希 もりたに・ゆうき

Kavli IPMU 博士研究員

1. イントロダクション

「宇宙はどのようにして始まったか?」「宇宙に終わりはあるのか?」「どのようにして我々は存在するに至ったのか?」これらは人類誕生以来、我々が持ち続ける宇宙に関する最も基本的な問いである。驚くことに、宇宙の大部分は、未だ直接発見されていない「ダークマター」と、宇宙の膨張を加速させる謎のエネルギーである「ダークエネルギー」で占められることが分かっている。しかしながら、我々はどちらのダーク成分の物理的起源も理解していない。同様に、階層的ダーク

マターの集積過程に基づく銀河形成の理解も十分ではない。例えば、銀河の質量の集積過程、現在観測される銀河の形状の多様性、さらに我々の住む天の川銀河の矮小銀河の分布などの統一的描像が得られていない。

すばるの主焦点超広視野多天体分光器 (Prime Focus Spectrograph = PFS, <http://pfs.ipmu.jp/ja/index.html>; <http://pfs.ipmu.jp/blog/>) プロジェクトは、上述の人類の基本的な疑問を真っ向から調べることを目的としている。現在建設中のこの装置は、面積でいうと満月の5倍程度にも及ぶ広い空の領域にわたる2394個の天体を同時に分光観測することができる。これは、観測する星、銀河の各々についてその光を分散し、近紫外線

表1 PFS性能と同様のタイムラインの他の競合する分光装置の比較

	PFS	DESI	WEAVE	MOONS
望遠鏡	すばる (8.2m)	Kitt Peak Mayall (4m)	WHT (4.2m)	VLT (8.2m)
視野	1.2 sq. deg.	7 sq. deg.	~3 sq. deg.	0.14 sq. deg.
一度に分光できる天体の数	2394	5000	800	1024
波長分解能	~2000-4000	3000-5000	5000, 20000	~5000, 9000, 20000
サイエンス稼働年	2021	2019	2019	2020



図1 2017年11月にカブリIPMUで開催されたPFS共同研究会議の集合写真。

から、可視光、近赤外線に渡る幅広い波長帯（380 – 1260 nm）を一度にカバーするスペクトルを取得できることを意味する。表1は、他の競合する、同じようなタイムスケールの分光器プロジェクトとの比較を示しているが、PFSが極めてユニークな装置であることを示している。このエキサイティングなPFSプロジェクトは、カブリIPMU主導の下、国際共同研究で進められている。国際パートナーは、国立天文台、台湾の中央研究院天文及天体物理研究所（ASIAA）、米国のカリフォルニア工科大学（Caltech）、NASAジェット推進研究所（JPL）、ジョンズホプキンス大学、プリンストン大学、フランスのマルセイユ天体物理研究所（LAM）、ブラジルの大学連合研究者グループ、ドイツのマックスプランク天体物理研究所（MPA）および地球外物理学研究所（MPE）、また中国の研究者グループ、という世界各地の研究者を含む。図1は、2017年11月にカブ

リIPMUで開催されたPFS共同研究会議の集合写真である。130名を超える参加者があり、写真からPFSプロジェクトが真に国際共同研究であることが分かるだろう。研究責任者（PI）は村山斉、プロジェクトマネージャーは田村直之、またプロジェクト研究者リーダーは高田昌広である。また、カブリIPMUの研究者である矢部清人と森谷友由希もプロジェクトで活躍している。カブリIPMUの研究者が国際共同研究をまとめ、プロジェクトを効率的に推進させるために精力的に活動している。

2. PFS装置

PFSプロジェクトは口径8.2 mすばる望遠鏡のユニークな特性である、集光力、広視野、また高い結像性能（シャープな画像の取得）の威力を最大限活用している。

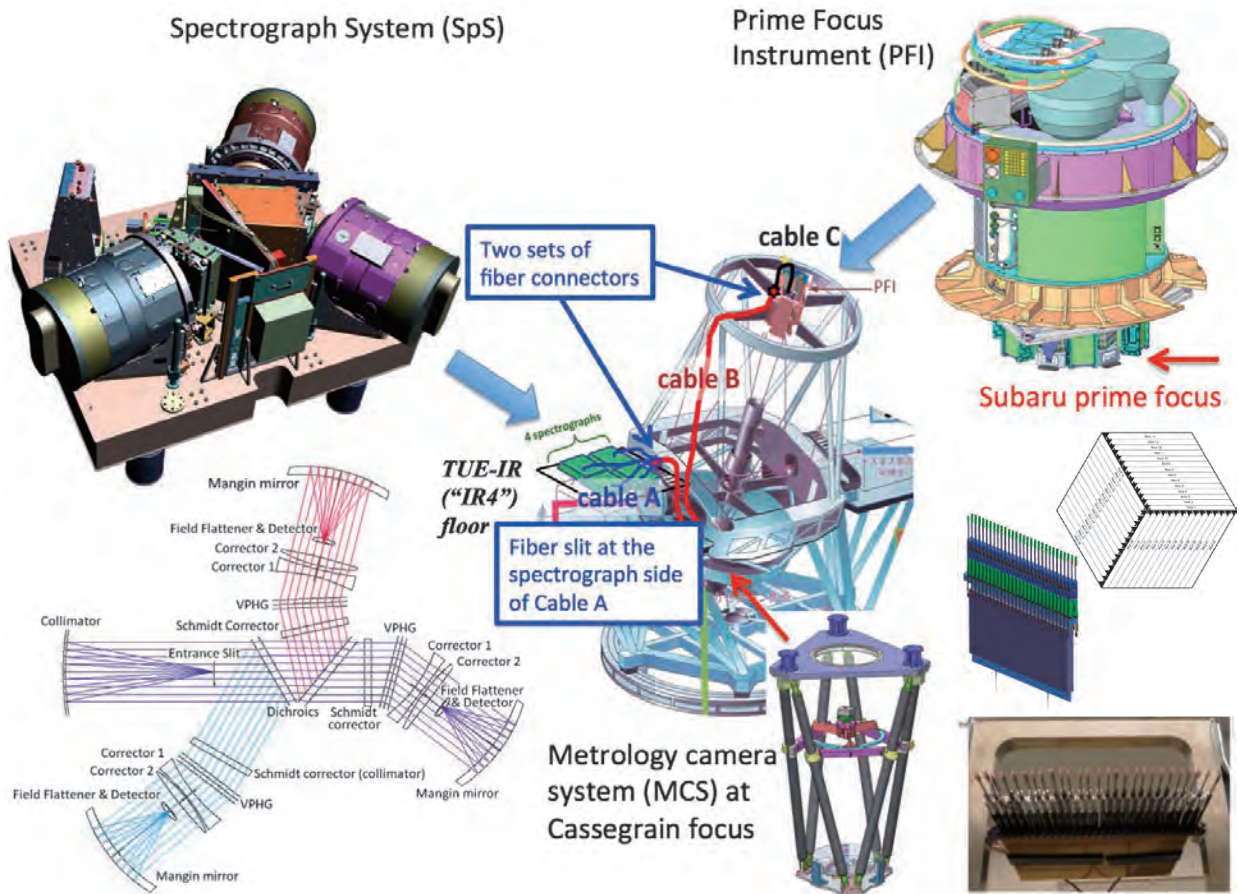


図2(a) PFS装置の概要図。中央にはすばる望遠鏡に示し、主焦点面からPFSファイバーで分光器装置へ天体からの光を転送する様子を示す。右上には主焦点装置 (PFI)、右中央には焦点面の概念図を、右下には天体からの光を捕らえる“Cobra” ポジショナーの写真を示す。左上は一つの分光器モジュールの概念図、左下は分光器の設計図を示す。

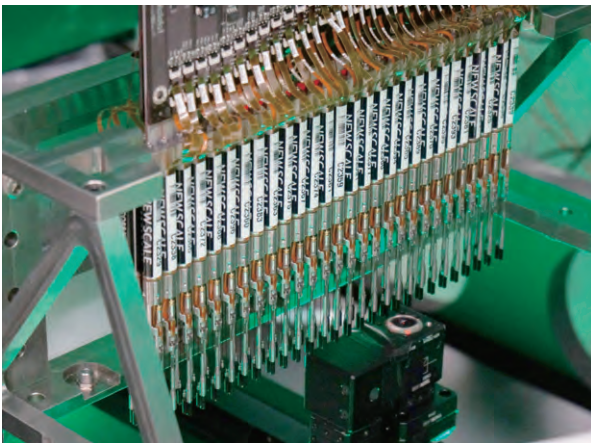


図2(b) Cobraモジュール。

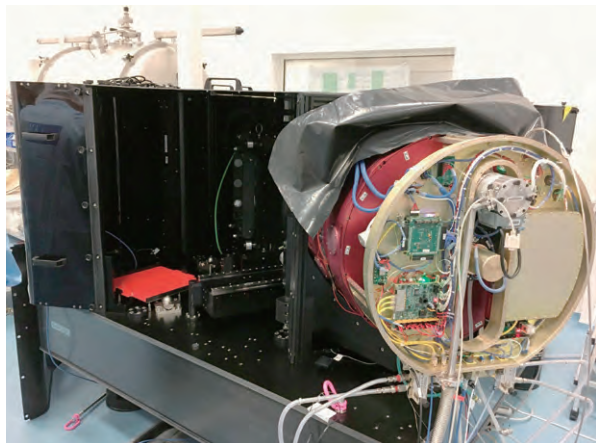


図2(c) 分光器の赤カメラ。

PFS装置は、図2(a)に示されるように、望遠鏡やドーム棟の各所に設置される、主に4つのサブシステムから構成される。天体あるいは夜空からの光を、まず主焦点面に配置されるファイバーで集光し、ファイバケーブルにより望遠鏡ドーム内に収納されている分光器まで送信し、そして分光器の検出器でその分光データを取得する。PFSは、すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) のために開発された広視野補正光学系と主焦点ユニットを用いる。カプリIPMUはHSCの開発およびマネジメントについても主要な役割を果たしてきている。主焦点面は対角長1.3度の六角形の視野内に2394個のファイバーが敷きつめられ、各ファイバーは焦点面にある各自のパトロール領域(直径9.5 mmの円)を自由に動き天体からの光を捕らえることができる。ターゲット天体にファイバーを向けるためのポジショナーは2個のモーターで駆動されるアクチュエーターで、“Cobra”と呼ばれる。8 mm 間隔で搭載されるCobraポジショナー57個を含むCobraモジュール42台で主焦点面をカバーする。分光器モジュールは4台あり、各モジュールに青、赤、近赤外の3つのカメラが搭載され、一度の露出で380 - 1260 nmの広い波長帯を分光するように設計されている。図2(b)にCobraモジュールの写真を、図2(c)に分光器の赤カメラの写真を示す。図2(a)下方のメトロロジカメラはファイバーの配置に用いられる装置であり、逆から照らしたファイバー像を取得し、その位置を測る(メトロロジ(metrology)とは「計量」を意味する)。HSCおよびPFSは同じすばる望遠鏡を用い、同じ空の領域のイメージング(デジタルカメラ撮像)と分光観測を行う。このため、これらの相補的なデータは様々な系統誤差の理解、コントロールを可能にする。

3. 科学目標

すばる望遠鏡の集光力、PFSの広視野そして多天体分光能力の組み合わせにより、宇宙論および宇宙物理の幅広い分野のサイエンスが可能になる。PFS チーム

は、5年をかけてすばる望遠鏡の約300夜を費やし、系統的、大規模なPFS分光サーベイプロジェクトを実行することを計画している。その科学目標は3つの柱からなる。宇宙論、銀河進化および銀河考古学である。

まず、PFS宇宙論プログラムは、1400平方度におよぶ広い天域に渡り、約400万個以上の銀河を分光することで、幅広い赤方偏移範囲 $0.6 < z < 2.4$ の3次元の宇宙地図を作成する。これは宇宙膨張が減速から加速に転じる時期をカバーする。この銀河地図の銀河分布に存在するバリオン振動のスケールを測ることで、これらの赤方偏移範囲で宇宙論距離と膨張則を測定し、加速膨張を支配するダークエネルギーの性質を探求することができる。さらに、銀河分布の非一様性を定量化するクラスタリング統計量をスケールと赤方偏移の関数として測定することで、宇宙の大規模構造形成の時間進化を測定し、宇宙構造形成におけるダークマターの性質を制限できる。図3は、4 m級の望遠鏡と比較して、高い銀河の個数密度で宇宙の大規模構造の地図を作成できることを示している。

2番目のプログラムは、合計で約15平方度の代表的な天域に渡り、数10万の銀河の詳細な分光スペクトルを測定し、宇宙史において如何に銀河が進化してきたか、また階層構造形成における星質量の集積過程を調べることを目的としたPFS銀河進化プログラムである。各銀河の深い分光スペクトルを取ることで、銀河の星形成、星とガスの力学的構造、星形成や銀河中心にあるブラックホールによるフィードバックの役割について、銀河の総星質量と環境の関数として調べ、銀河の形成・進化の物理を探ることができる。さらに、カプリIPMUの新しいメンバーであるKhee-Gan Lee氏は、新しい、エキサイティングな研究テーマを提案している。PFS銀河進化プログラム観測領域の高赤方偏移 $z \sim 3$ にある活発に星形成をしている明るい銀河を背景光源として使い、その分光スペクトルに吸収線系として現れる手前の中性水素を測定し、銀河間空間に存在する中性水素の3次元分布を復元するという方法である。これはIGMトモグラフィーと呼ばれる方法で、

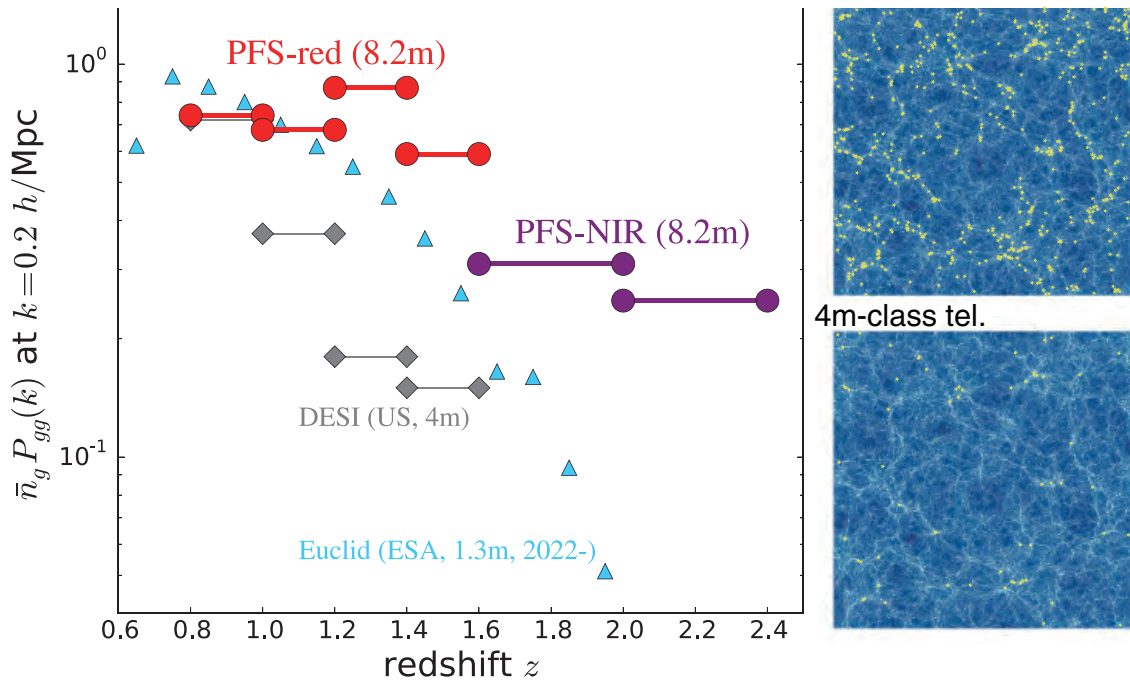


図3 PFS 宇宙論サーベイのイラスト図。PFS の分光観測から各銀河までの距離を測定することで、銀河の3次元地図を作ることができる。右上の図は、赤方偏移 $z \sim 1.5$ の宇宙の観測から予想される3次元地図のシミュレーション。黄色の点は銀河、青色のカラーマップはダークマターの分布。右下の図は、口径8.2 mのすばるではなく、4 m級の望遠鏡が使われた場合の銀河の地図。左の図は各赤方偏移におけるPFS 銀河の数密度の予想図。y 軸の値が大きいほど数密度が高い銀河地図に対応する。この結果は米国の4 m 望遠鏡のDESIあるいは欧州宇宙機関 (ESA) の衛星計画Euclid など、他の競合するプロジェクトと比較できる。

この手法以外では直接見るできない（光を発しない）銀河間ガスの大部分を占める中性水素の分布と銀河の関係性を調べる事ができる。図4は、PFS 銀河進化プログラムの威力を示す概念図である。 $z > 1$ の高赤方偏移の宇宙のフィラメント状、網目状構造などの複雑な大規模構造における、銀河、銀河間物質の3次元地図を作ることを目的としている。このデータはPFS 宇宙論サーベイと相補的である。なぜなら、銀河サーベイのデータから銀河進化の物理、特に宇宙論サーベイがターゲットとして観測する輝線銀河の性質についての詳細な情報を得ることができるからである。

3番目のプログラムはPFS 銀河考古学である。天の川銀河、アンドロメダ銀河、また矮小銀河の個々の星について分光サーベイデータから視線速度と化学組成

を調べる事により、これら銀河の形成史を復元し、またダークマターの分布を推定することができる。特に、矮小銀河はその力学的構造にダークマターが支配的な役割を果たしているが、ダークマターの分布は未だ正確には理解されていない現状に対し、すばるPFSで矮小銀河の全体にわたり星の速度構造を調べることで、ダークマターの空間分布を観測的に明らかにすることができる。このPFSの制限とフェルミガンマ線衛星のデータと組み合わせることで、より詳しくダークマターの対消滅信号が探査できる、あるいは、測定されなければ、対消滅断面積の制限を改善できると期待されている。この研究テーマは、素粒子物理学、天文学、宇宙物理学に跨る協奏的な研究である。図5は、PFS 銀河考古学プログラムの威力を示す概念

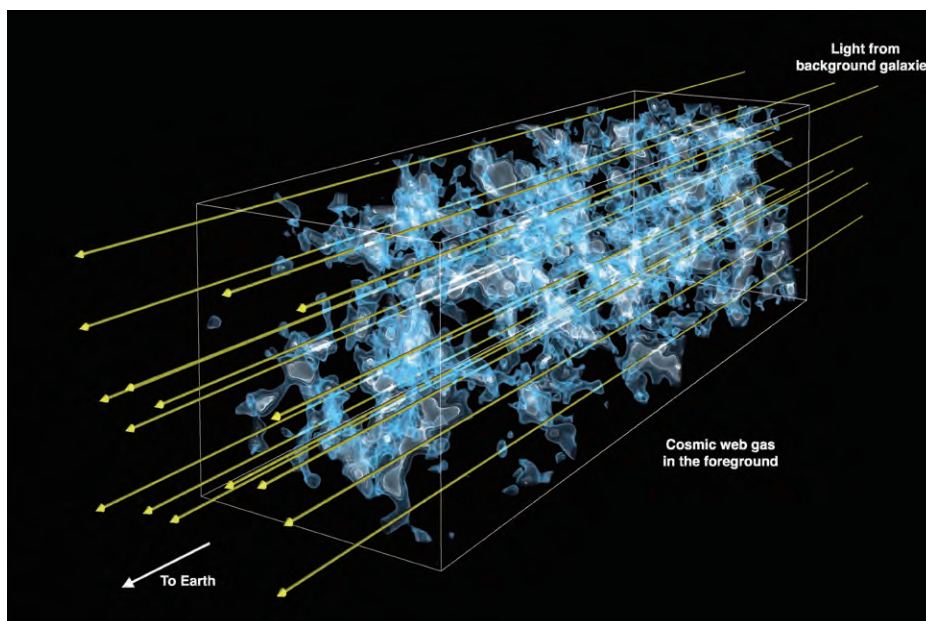
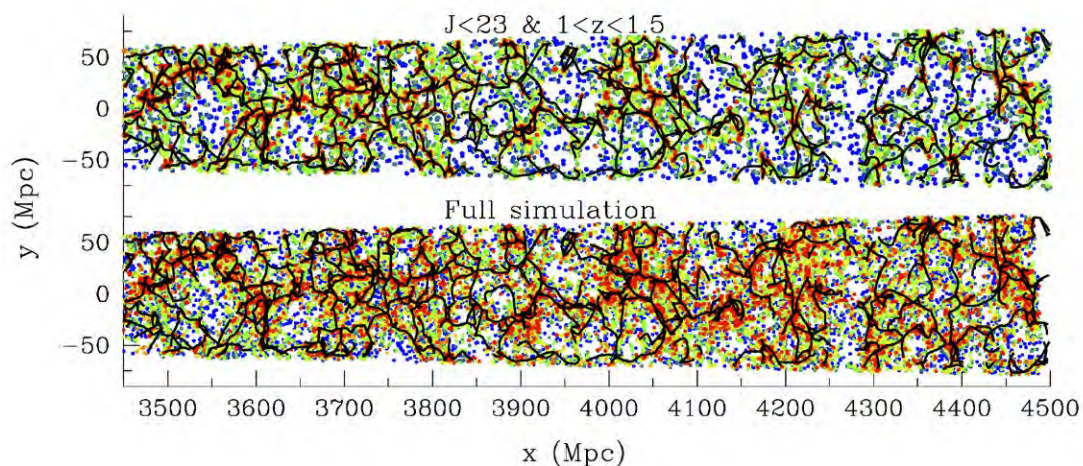


図4 (上図) 上のパネルはPFS 銀河進化プログラムで分光観測される、赤方偏移で $1 < z < 1.5$ の典型的な銀河の三次元地図のシミュレーション。青、緑、赤色の点は銀河を示し、それぞれ数密度が低い、中間、あるいは高い領域に存在する銀河を表す。黒い線は宇宙の大規模構造のフィラメント構造を示す。下のパネルは同じ領域の全ての銀河を表す。上下の比較からPFS 銀河サーベイは約70%の銀河をサーベイすることが分かる。(下図) PFS サーベイが行う銀河間ガストモグラフィー (IGM tomography) の概念図。星形成を行う明るい銀河を背景光源として使い、それぞれの分光スペクトルに現れる吸収線系を測定することで、宇宙の中性水素の三次元分布を復元することができる。

図である。すばるの集光力により、天の川銀河の星の分布を完全にカバーする距離で 30 kpc などの遠方の星についてもその視線方向速度、化学組成の測定を可能にする。この PFS サーベイは、現在進行中の欧州宇宙機関 (ESA) の GAIA 衛星のデータ (10 kpc までの星を測定) と相補的であり、また 4 m 級の望遠鏡では到

底不可能なプログラムである。

4. 現状

PFS の建設は順調に進んでいる。装置の各サブシステムは国際パートナー研究機関で開発されている。例

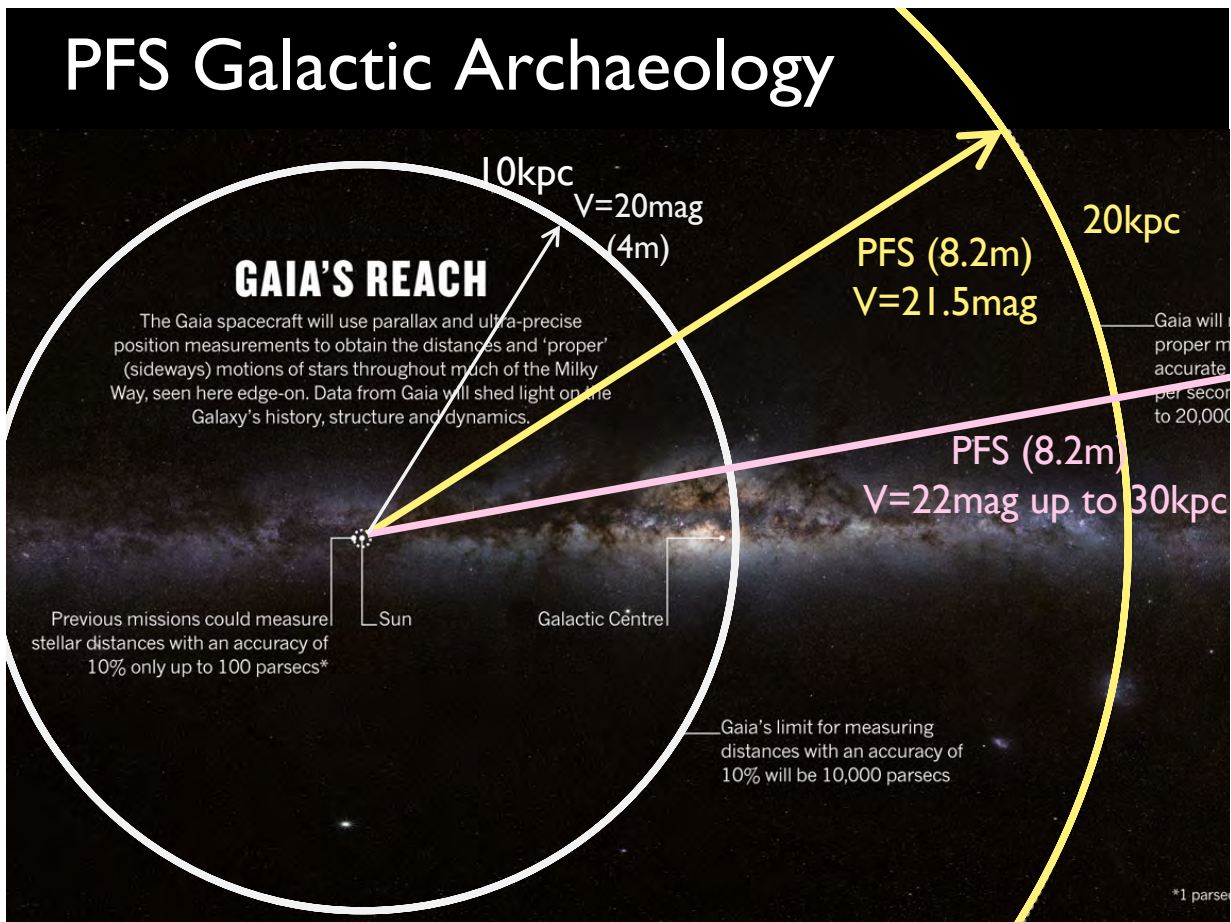


図5 PFS 銀河考古学プログラムの概念図。PFS が、我々の天の川銀河に存在する、距離で30 kpcにも及ぶ多数の星の視線方向速度および化学元素組成を測定できることを示している。この威力は、現在10 kpcまでの星をサーベイしている欧州宇宙機関 ESA の GAIA 衛星、あるいは10 kpc までの星を高波長分解能で分光観測する4 m 級の望遠鏡とは相補的である。(背景の図は ESA から参照。)

例えば、PFS は4つの分光器モジュールを作るが、マルセイユのLAM 機関で1台目のモジュールを組み上げ中で、実験室で結像性能や熱的性能などの試験が行われている。Caltech や JPL では、予備を含め44台の Cobra モジュールが組み上げられている。現在は1台目の Cobra モジュールの組み上げ・試験が完了し、台湾の ASIAA へ輸送された。今年中に必要な全てのモジュールの組み上げを目指している。台湾の ASIAA では主焦点装置を組み上げ中で、Cobra モジュールを受け入れる準備が間もなく整う。更に、ASIAA ではメトロロジカカメラの開発も行っている。このカメラは4月に ASIAA からハワイに輸送された。ハワイで最終調整や

試験を経て夏には望遠鏡を使った試験が行われる予定である。このような、サブシステムの統合、開発、スケジュール、といったマネジメント全ては、プロジェクトマネージャーの田村や Kavli IPMU のメンバーを中心とするプロジェクトオフィスが牽引している。

PFS は見るからに複雑な装置であり、実際にはハワイのマウナケア山頂のすばる望遠鏡に搭載し、その環境下での性能評価、実際の夜空の試験観測が必要不可欠である。森谷を中心に PFS のメンバーやハワイ観測所所員と相談しながら、試験観測の詳細な計画を企図している。現段階では2019年の試験観測開始を予定し、そこから約一年間をかけて、PFS 装置の実際の性能、

特性を評価する予定である。その後、性能や運用の安定化を図りつつ、2021年に上述の大型サーベイプロジェクトを開始することを目指している。

先に述べた3つの主要なサイエンス（宇宙論、銀河進化、銀河考古学）では、各々のターゲット天体（星、銀河）がそれぞれ異なる観測領域にあり、必要とする観測要求（露出時間、測定する物理量）も異なる。このため、すばる望遠鏡の観測時間を最大限活用するために、これらの3つのプログラムの観測をうまく組み合わせ、最大限の効率でPFSサーベイプロジェクトを行う必要がある。装置開発と平行し、Exposure Time Calculator (ETC)、すなわち期待される装置効率（一部には実際の測定値を利用）をもとに、マウナケア山頂の天候の下、仮定した露出時間で期待される天体の分光スペクトルをシミュレーションするソフトウェアの開発を矢部が中心となって行っている。このETCやファイバー配置ソフトなどを用い、現時点で想定している観測領域、分光ターゲット天体、および5年間で300晩の観測を行うことを仮定してPFSサーベイ観測をシミュレーションし、最適なサーベイ戦略を求めることが当面の課題である。

5. 展望

これまで述べてきたことから明らかなように、PFSは極めて強力な装置であり、広い空の領域にわたり、約2400個もの多数の天体の同時分光観測を可能にする。米国で建設中の実質口径6.5 mのThe Large Synoptic Survey Telescope (LSST)は、撮像サーベイを占有的に行う究極的な広視野望遠鏡であるが、分光観測を行うことはできない。日本も参画している30 m級望遠鏡 (TMT) などの究極的な巨大望遠鏡は視野が狭く、むしろ面白い希少な天体を詳細に分光観測することに適しており、PFSのサーベイ能力とは相補的である。PFSは2020年代にもすばるを世界第一線級の望遠鏡に留めておくことを可能にする。実際、2025年頃打ち上げ予定のNASAのWFIRST衛星とPFSを中心としたすばる

望遠鏡との国際共同研究も計画されている。このように、PFSは非常にエキサイティングなプロジェクトであり、宇宙の物理の理解を飛躍的に発展させることができるだろう。日本の天文学者、物理学者はこの絶好の機会を逃すべきではない！

最後にPFSプロジェクトは文部科学省科学研究費助成費事業の新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するか? — 徹底的究明と将来への挑戦」(No. 15H05887, 15H05893, and 15K21733)からの支援を受けていることを記します。

宇宙の最大地図のデータを用いた40編の査読論文の発表

高田 昌広 たかだ・まさひろ

Kavli IPMU主任研究員

この度、最初の2年間の観測にもとづくHSCの初期成果がまとめられ、40本の論文が日本天文学会欧米報告(PASJ)の特集号として発刊されました(図1)。HSCで観測取得されたデータは、多くの研究分野で有用なものであり、太陽系天体の探査から、近傍と最遠方の銀河、銀河団、宇宙論まで、宇宙の全ての階層にわたっています。

国立天文台、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)、他の日本の研究機関、台湾中央研究院天文及天文物理研究所(ASIAA)、米国プリンストン大学をはじめとする研究機関の研究者らは、2014年からハワイのすばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC; ハイパー・シュプリーム・カム、<http://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/>)を用いて、大規模観測を共同で進めています。

この大規模観測はHSC戦略枠観測プログラム(HSC-SSP)と呼ばれ、満月9個分の天域を一度に撮影できるHSCの性能を生かし、従来のカメラでは観測が不可能だった暗い天体を、1000平方度(満月5000個分)もの広い天域にわたって高解像度で撮影するものです。このHSCによる観測データから、ダークマターの大局的な分布をこれまでにない精度で描き出し、加速膨張宇宙の謎に迫ろうとしています。この大規模な探査観測は、2019年末まで続く予定です。

例えば、今回の成果の1つに、東京大学理学系研究科助教でKavli IPMU准科学研員の大栗真宗氏が中心研究者の一人として関わった、史上最高の広さと解像度を持つダークマターの「地図」を描き出した成果があります。まず、2016年4月までにHSCで観測され

たデータ(計画全体の約16%)を解析し、重力レンズ解析からダークマターの2次元分布を推定しました。観測された全天域は5色のフィルターで撮影されています。これらの多色画像を比較すると各銀河の色情報が得られ、銀河までの距離を推定することができます。これは、宇宙の膨張による赤方偏移の効果のため、我々から遠方にある銀河の色がより赤く見えるという効果を用いることで可能になります。研究チームは、各々

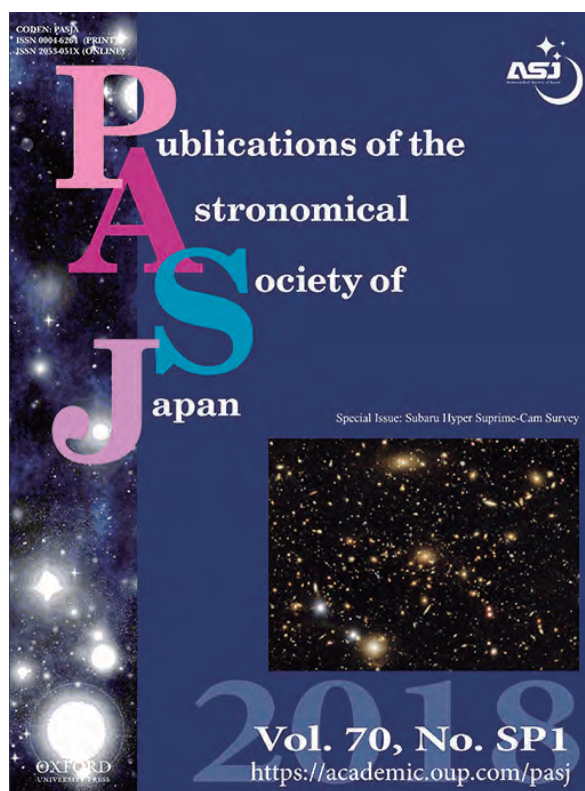


図1 天文学会欧米研究報告(PASJ, 70巻, 特集号1, 2018年)

の銀河への重力レンズ効果を銀河までの距離ごとに解析を行うことで、まるで断層写真を撮影するようにダークマターの3次元分布を得ることに成功しました。

図2は、約10億光年×2.5億光年の範囲、80億光年ほどの奥行きについてダークマターの分布を示した例です。これほど広い天域でダークマターの3次元分布が得られた例はありません。この3次元地図を作成するためには、背景にある遠方の銀河の観測が必要でしたが、すばる望遠鏡の大集光力がそれを可能にしました。

今後、HSC-SSPで得られる更に広い範囲のデータ

を解析し、3次元のダークマター分布を調べることで、宇宙の構造形成の時間的進化やダークエネルギーの量の関わりなど、宇宙の運命のカギを握る重要な情報が得られると期待できます。

最後にHSCプロジェクトは文部科学省科学研究費助成費事業の新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するか? - 徹底的究明と将来への挑戦」(No. 15H05887, 15H05893, 15K21733, 15H05892)からの支援を受けていることを記します。

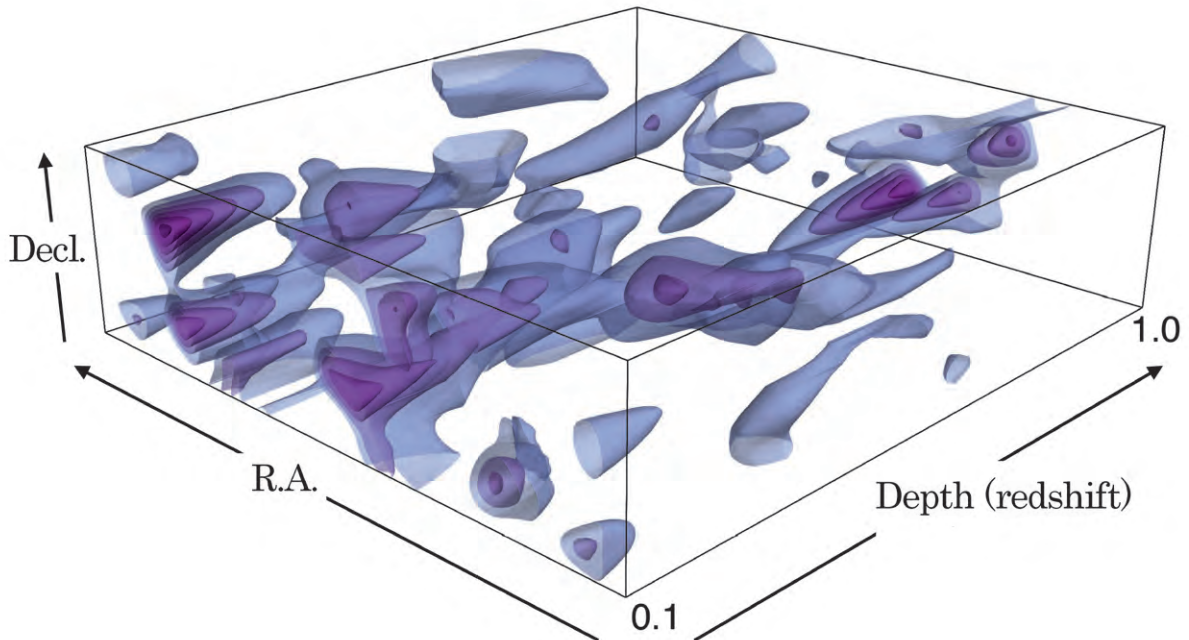


図2 HSCデータの銀河像の弱重力レンズ効果の測定から復元したダークマターの三次元地図。濃い色は、ダークマターが高い密度の領域を示す。“R.A.”と“Decl.”は天球座標の赤経と赤緯を示し、もう一つの軸は「深さ」(赤方偏移あるいは視線方向)を表す。

Our Team

高橋 忠幸

たかはし・ただゆき 専門分野: **実験物理学**

Kavli IPMU教授*

衛星やロケットを用いて、活動銀河核からのジェットや超新星残骸など、宇宙の巨大加速器と目される高エネルギー天体の研究を進めてきました。宇宙に出て観測する場合、打ち上げ時や宇宙空間での厳しい条件、極めて限られたリソースで動作させるための高度な検出器技術が要求されます。私の研究分野は衛星やロケット搭載用に先端的硬X線・ガンマ線検出器の開発を行い、それを用いた観測を行うことから始まります。最近、これらの検出器が、(1) ガンマ線を用いたホットスポットの可視化、(2) ミュオン原子からの蛍光X線による非破壊元素分析、(3) がん幹細胞研究のための小動物生体内3Dイメージングなど、他の分野が長く抱えていた課題を解く上で有効であることがわかってきました。私は、Kavli IPMUで、こうした喫緊の課題、特に核医学の課題への応用をめざしたイメージン



グ検出器の研究を行います。こうした研究を通じて、今度は、将来のX線やガンマ線衛星がさらに進化するのです。同時に、私はKavli IPMUの環境をいかして、これまで続けてきた「宇宙の加速器」の観測的、理論的研究をさらに進めたいと考えています。太陽から、ブラックホール、そして銀河団に付随する磁場が磁気リコネクションを通じて粒子加速にどのように結びつくかなども研究課題の一つです。

*2018年4月1日よりKavli IPMU主任研究員。

キーガン・リー Khee-Gan Lee 専門分野:天文学

Kavli IPMU講師

マレーシア出身の観測的宇宙論研究者で、同僚たちにはK.G.と呼ばれています。主たる研究対象は、遠方宇宙におけるガス及び銀河の大規模分布の研究です。クモの巣のようなネットワークを形成している「コズミック・ウェブ」と呼ばれる宇宙の大規模構造は、ビッグバン直後に生成された初期ゆらぎを反映していることから、この研究は宇宙の基礎物理のパラメータを制限する上で役立ちます。特に、私の専門は約100億年前の「宇宙史の正午^{*1}」と呼ばれる時代の中性水素による吸収線の3次元トモグラフィーマッピング^{*2}です。私はケック望遠鏡を用いた豊富な観測経験があり、将来のすばる主焦点広視野多天体分光器（PFS）を用



いる分光サーベイ計画の立案に加わっています。靴のサイズは26.5 cm、好きな色は青です。

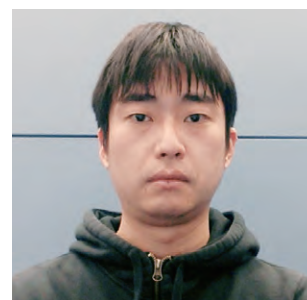
^{*1} 宇宙全体で個々の銀河の平均的な星形成量がピークに達した「銀河の激進時代」。

^{*2} X線を照射して臓器の形態を調べる医療のコンピュータ断層診断、CT (computed tomography) スキャン、のような手法。

織田 忠 おりた・ただし 専門分野:実験物理学

Kavli IPMU助教

私はこれまで、ガンマ線や硬X線をターゲットにした陽電子放射断層撮影装置や単一光子放射断層撮影装置などの医療応用や環境中のセシウムのモニタリング等の放射線計測の分野に従事してきました。その中でも主に検出器から出力される放射線信号を高速かつ低雑音で読み出すための集積回路などのエレクトロニクスや、画像再構成アルゴリズムの開発を行ってきました。物理学実験の高い要求を満たしてきた高度な計測技術をさらに発展させていくことで、物理学実験の高度化のみを目標とするのではなく、高感度・高分解能3Dイメージング装置開発という形で医療の分野に応



用することによって、がん根治にむけたがん幹細胞の研究への貢献を目指したいと考えています。

Our Team

柳下 淳

やぎした・あつし 専門分野: **実験物理学、医学**

Kavli IPMU助教

私は臨床医として実臨床に従事するとともに、臨床研究や臨床試験にも携わってきました。これらの経験に触発され、実験室での研究を始めることとなりましたが、現在は蛍光プローブを合成し、それをを用いて生物実験をしています。私の研究テーマは蛍光プローブによって幹細胞をイメージングし、その生物学的特性を研究することです。IPMUではこの蛍光プローブを放射線プローブにしてイメージングするプロジェクトに取り組めます。生体内の微細構造をその場で可視化



することは現在のところできません。そこで、今回新たに作成する放射線プローブと宇宙科学の分野で開発された高分解能硬X線/γ線検出器を組み込んだイメージング機器を組み合わせることによって生体内の微細構造をイメージングする予定です。

セイード モルテザ・ホッセイーニ

Seyed Morteza Hosseini 専門分野: **理論物理学**

博士研究員

主としてゲージ理論と超弦理論の非摂動的側面の理解について研究を行っています。この目標を達成するための最も強力な手段は、ゲージ/重力双対と局所化です。局所化原理によって理論の経路積分を行列の積分に帰着させることができ、強結合場の理論で厳密解が計算できます。その結果、ゲージ/重力双対に対する非常に正確な予言を与えます。私はこれらのアイデ



ィアを組み合わせ、ブラックホールのエントロピーの微視的な起源を理解するために用いています。

一方井 祐子

いっかたい・ゆうこ 専門分野: **科学コミュニケーション、心理学**

博士研究員

私は科学コミュニケーションと呼ばれる分野の研究を行っています。現在のテーマは「数物系に進学する日本の女子生徒はなぜ少ないのか」です。日本では数物系に進学する女子比率は生物系と比較して少ないことが知られていますが、どのような要因によるものかはあまりよく分かっていません。そこで、質的・量的な研究手法を使い、この問題に迫りたいと思っています



す。その他に、オープンサイエンスといった科学の新たな動きにも興味をもって研究を進めています。

Kavli IPMU-Berkeley Symposium “Statistics, Physics and Astronomy”

河野 俊文 こうの・としたけ

Kavli IPMU主任研究員

2018年1月11日と12日に行われたこのシンポジウムは、東京大学とカリフォルニア大学バークレー校の戦略的パートナーシップ大学プロジェクトによるものであり、Berkeley Week at UTokyo の一環として開催された。シンポジウムは数学、物理学、天文学におけるデータ科学のさまざまな側面に焦点をあてた分野横断的な研究会であった。カブリ数物連携宇宙研究機構において、天文学における観測のビッグデータから情報統計学を用いて解釈を与えることは重要な課題である。従って、カブリ数物連携宇宙研究機構でのデータ科学の役割は今後、ますます大きくなっていくと考えられる。このシンポジウムの目的は、数学、物理学、天文学の視点からデータ科学における共通の興味を進展させることであった。

シンポジウムの講演者はWahid Bhimji (LBNL Berkeley)、池田思朗(統計数理研究所)、大林一平 (AIMR, 東北大学)、小澤正直 (名古屋大学)、Alessandro Sonnenfeld (Kavli IPMU)、Philip B. Stark (カリフォルニア大学バークレー校統計学科) であった。

池田思朗はデータ科学におけるスパース推計に基づく手法による最近の進展と、EHT (「事象の地平線」望遠鏡) による観測への応用について説明した。小澤正直は同氏による量子測定理論とそれによって、いかにして重力波の検出装置として共振型よりも干渉型が優位であるかが示されたかを述べた。Philip B. Stark

は物理学と天文学における推計の不確定性を定量化する手法について説明した。Alessandro Sonnenfeldは階層ベイズモデルによる推計の天文学の研究の幅広い分野への応用を述べた。大林一平は位相的データ解析についての入門的な解説を行った。特に、パーシステント・ホモロジーの理論を説明して、これをコンピューターに実装したHomcloudとよばれる彼の研究グループが開発したソフトウェアを紹介した。最後にWahid Bhimjiが高エネルギー物理学と天文学における深層学習を用いた進展を解説した。シンポジウムの講演は午後の時間帯に行われた。

1月10日と、11日および12日の午前中は野村泰紀がオーガナイザーとなって、Berkeley Week@IPMUが開催された。このイベントもBerkeley Week at UTokyoの一環である。Berkeley Week@IPMUには、カリフォルニア大学バークレー校から5名のポストドク研究員と2名の大学院生を招聘した。また、カブリ数物連携宇宙研究機構の若手研究者5名による発表も行われた。Berkeley Week@IPMUの参加者はシンポジウム“Statistics, Physics and Astronomy”にも参加した。このようにして、私達は共通の興味を共有することができた。シンポジウムとBerkeley Week@IPMUはともに、とても活気に満ちた集会となり、多くの刺激的な議論が交わされた。



研究集会 「高次構造と量子化に関する講義」

アンドリュー・マクファーソン [Andrew Macpherson](#)

Kavli IPMU 博士研究員

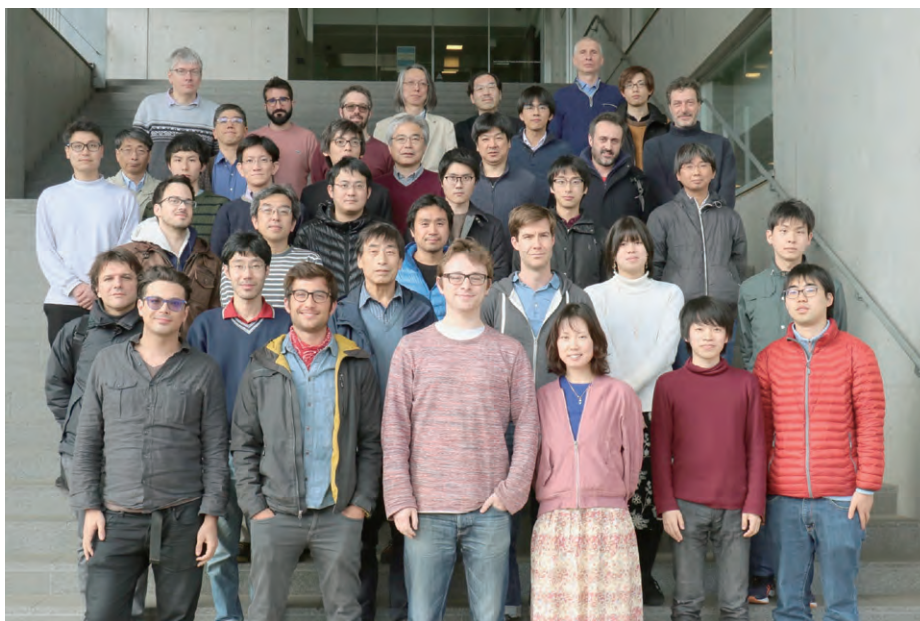
2018年3月20日から22日まで、ホモトピー理論と幾何学の接点に興味をもつ大学院生と研究者が、ヨーロッパから参加した導来代数幾何学のベテラン、B. ToënとG. Vezzosi、アメリカから参加した「ホモトピーのテロリスト」(この呼び名はA. Bondalによるものです) A. Mazel-Geeの「高次構造と量子化」に関する一連の講義を聞くために、Kavli IPMUに集まりました。それぞれ、1コマ90分の講義を2コマずつ行う形式のため、講師は選んだテーマを深く掘り下げて話すことができました。これらの講義に加えて、国内からも東北大学の岩成 勇とKavli IPMUのM. Kapranovがそれぞれ1コマずつ講義し、プログラムの充実を図りました。

この研究集会では、タイトルを意図的に幅広く設定してその解釈を講演者に任せ、取り上げるトピクスを前もって決めようとはしませんでした。こうすることで、研究集会の間に自然に共通のテーマが浮かび上がることもあり得るのではないかと考えたわけです。幸い、実際にそうになりました。例えば、「形式的貼り合わせ」というテーマが、国外から招待した講師全員の講義で際立っていました。

研究集会初日、参加者が会場に到着するにつれて、私たちは一つの問題に遭遇しました。それは、研究集会を組織する人たちならだれもが望むような類いの、

次のようなものでした。今回の研究集会は宣伝が行き届かず、最初のうちは心配していたのですが、ふたを開けてみると参加者が多すぎて予約した部屋では狭すぎる事態になったのです。幸いなことに、Kavli IPMUの事務スタッフ、特に、いつも研究集会が円滑に進むように助けてくれる小濱理恵さんが、柏キャンパスの図書館の中に想定したよりも増えた参加者を収容するもっと大きな部屋を見つけてくれました。驚いたことには、3月21日は春分の日で国内の参加者にとっては休みの日だったのですが、2日目も3日目も参加者数は安定していました。

この研究集会の成功を証明するものとして、各講義中に聴衆と講師の間に活発なやり取りがあったこと、それから最後に私が受け取った好意的な反応が挙げられます。さらに、3月にこの研究集会の前後に東京大学の駒場キャンパスで2つの大きな国際会議があり、私も参加しましたが、それらの国際会議で今回のKavli IPMUでの講義が何度も言及されていました。私の知る限り、最近日本でこれだけ注目された研究集会は他にありません。この経験を繰り返すことと、それによってKavli IPMUにホモトピー理論と幾何学の交流のための新たな媒体と国際的な出会いの場を創ることができるよう、望んでいます。



文科省の磯谷桂介研究振興局長、Kavli IPMUを視察

2018年2月28日、文部科学省研究振興局の磯谷桂介局長と随員の伊藤有佳子基礎研究振興課基礎研究推進室専門職、福永完治振興企画課係員、加藤久乃基礎研究振興課係員、中澤龍一参事官（情報担当）行政調査員が、Kavli IPMUを訪れ、村山機構長から概要と研究内容の説明を受けた後、研究棟内とティータイムを視察しました。磯谷局長は、ティータイムで天文、物理、数学の各分野の若手研究者多数と歓談され、大いに盛り上がりました。



研究者と歓談中の磯谷局長（右）。本誌31ページ、Director's Cornerの写真もご覧ください。

「JAXA-Kavli IPMU/東京大学硬X線・ガンマ線イメージング連携拠点」本格始動

昨年10月に Kavli IPMU は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（ISAS/JAXA）と新たな共同研究、特に宇宙衛星プロジェクトで培われた硬X線・ガンマ線イメージングの技術を発展させることで合意しました。具体的には、Kavli IPMUに連携拠点を置き、慶応義塾大学医学部や東京大学薬学部等の協力のもと、この技術の核医学、特にがん研究への加速度的応用を図るこ

とで、極めて高い分解能と正確な定量性をもって、これまで困難だった「がん幹細胞」の生体内での可視化が可能になる等、がん根治に向けた研究に発展をもたらすと期待されています。

このたび、連携拠点の主要メンバーが揃うことに伴い、2018年3月26日に Kavli IPMUは宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（ISAS/JAXA）と共同で、東京大学本郷キャンパスの伊藤国際学術研究センターにおいて、「基礎科学は役に立つ『JAXA-Kavli IPMU/東京大学 硬X線・ガンマ線イメージング連携拠点』本格始動」と題して、記者会見を実施しました。Kavli IPMUの村山 斉機構長とISASの常田佐久所長の挨拶の後、慶應義塾大学医学部教授で慶應義塾大学病院副院長でもある佐谷秀行さんが今回の研究のメインターゲットとなるがん幹細胞について「がん幹細胞とは?」と題して説明、続いて拠点の全体統括者である東京大学執行役員学長で Kavli IPMU 主任研究員の相原博昭さんが「JAXA-Kavli IPMU/東京大学硬X線・ガンマ線イメージング連携拠点」と題し、拠点の概要について説明しました。その後、質疑応答、登壇した4名のフォトセッション、記者によるぶら下がり取材が行われ、熱心に質問を投げかける記者の姿が見られました。（31ページの写真参照。）

第3回Kavli IPMU / ELSI合同一般講演会「起源への問い」開催

2018年1月21日に東京工業大学の蔵前ホールで Kavli IPMU と東京工業

大学地球生命研究所(ELSI)の第3回合同一般講演会「起源への問い」が開催されました。この講演会は、WPI 採択拠点のうち「宇宙の起源に迫る」ことを目的とする Kavli IPMU と「地球と生命の起源に迫る」ことを目的とする ELSI が、人類にとって根源的な「起源への問い」という共通テーマのもと、最新の研究内容を平易に紹介するとともに、他分野の専門家も交えた多様な視点を提供するイベントとして実施されてきました。過去2回は Kavli IPMU と ELSI の研究者に哲学者を交えての講演会でしたが、今回は芸術学を専門とする研究者を交えての講演会として開催し、約300名が来場しました。

講演会はWPIの宇川彰PD（プログラムディレクター）の挨拶で始まり、名古屋大学大学院理学研究科研究科長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる杉山直さんが「宇宙の始まりに迫る」、ELSI 副所長の井田茂さんが「地球外生命～地球中心主義からの解放～系外惑星、氷衛星～」、東京工業大学リベラルアーツ研究教育院准教授の伊藤亜紗さんが「かたちが生まれるとき～芸術学から考えるリズムと身体～」と題してそ



講演する杉山直さん。

れぞれ講演しました。その後、講師3名による鼎談「起源を問うとはどういうことか」、さらに講師を囲んでの懇談会があり、盛況のうちに閉会となりました。

第6回 WPI サイエンスシンポジウム『『未来』をはじめ』開催

2018年2月11日、日本科学未来館において第6回世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) サイエンスシンポジウム『『未来』をはじめ』一科学にはきっと、もっと、できることがある』が開催され、約800名が来場しました。「WPIサイエンスシンポジウム」とは、次世代を担う高校生を主な対象に最先端の科学とその魅力を伝えるために毎年行われてきたイベント、「WPI合同シンポジウム」が今年度より改称されたものです。今年は筑波大学国際統合睡眠医科学研究機構 (IIIS) が運営を担当しました。日本科学未来館を会場としたことから、高校生のみならず広く家族連れを含む一般に対象を広げたシンポジウムとなりました。このため、研究者による対談、講演に加え、科学雑誌 Nature やベンチャー企業の関係者も交えた日本の科学の未来をテーマにしたパネルディス



吉田直紀さん (右から2人目) と廣瀬 敬さん (右端)



ブース展示の様子

カッション、科学をネタとするお笑い芸人の黒ラブ教授によるお笑いライブ等、多様なプログラムが組まれました。

Kavli IPMUからは主任研究員の吉田直紀さんが、東京工業大学地球生命研究所 (ELSI) 所長の廣瀬 敬さんとの宇宙と地球の魅力を紹介するスペシャル対談を行いました。その他、Kavli IPMUはWPIの他の10拠点と合同でブース展示を行い、1分での機構紹介プレゼンテーションにも参加して来場者の方に機構を紹介しました。

アメリカ科学振興協会 (AAAS) 年次大会に参加

2018年2月15日から19日まで、テキサス州オースティンのオースティン・コンベンションセンターで開催されたアメリカ科学振興協会 (AAAS) 年次大会において、文部科学省と日本学術振興会およびKavli IPMUを含むWPI拠点が2月16日から18日の3日間、WPI事業の国際的認知度及び研究者にWPI拠点を自らの研究場所として認知してもらうための知名度向上を目指して、合同でブース展示を行いました。WPIブースには3日間で研究者、ジャ

ーナリスト、大学生等を含む約400名が訪れました。今回のAAASには、AAASで行われる各種イベントの視察も兼ねて、WPIの宇川彰PD (プログラムディレクター) とWPIの黒木登志夫AD (アカデミーディレクター) も参加しました。



WPIブースでJSPSとWPI拠点からの参加者の集合写真。(写真提供: 日本学術振興会)

第1回Kavli IPMUアーティスト・イン・レジデンスプログラム参加作家展を開催

2018年3月9日から25日まで、東京都大田区にある元倉庫のギャラリー、カマタ_ソーコで、Kavli IPMU主催の「再」邂逅する科学と美術の試み、2018東京一第1回Kavli IPMUアーティスト・イン・レジデンスプログラム参加作家展」を開催しました。この展覧会は、Kavli IPMUで2015年度より実施してきたアーティスト・イン・レジデンス (AIR) の取組みの成果を作品展示を通して紹介すると同時に、科学と美術の交流による新たな文化の創造とKavli IPMUの広報を目的として、広く専門家も含む一般の方を対象に開催したものです。AIRに参加した3名の作家、絵画の野村康生さん (2015年度参加)、メディアアートの平川紀道さ

ん（2016年度参加）、彫刻の春山憲太郎さん（2017年度参加）の新作展示、Kavli IPMU の紹介展示の他、科学文化論、美術批評、論理学、美学、神経科学、ギャラリーオーナーを含む多様な専門家を招いてAIRプログラムを検討するイベントや、Kavli IPMUの数学者によるサイエンスカフェ等、各種関連イベントを実施し、16日間で382名が参加しました。Kavli IPMUの関係者が参加した関連イベントのプログラムは次の通りです。

3月17日にKavli IPMU 准教授の阿部知行さんが「数学って何をするんですか？ 一聞いてみよう！ 数学者とのダイアログ」と題し、3月18日には名古屋大学大学院多元数理科学研究科准教授を兼ねるKavli IPMU 教授の伊藤由佳理さんが「不思議なマックイ対応」と題し、また3月21日にはKavli IPMU 博士研究員のWill Donovanさんが「シャボン玉と時空」と題し、それぞれ講演しました。3月10日のシンポジウム「科学論と美術論から考える基礎×科学×美術」では、Kavli IPMU 博士研究員の池田暁志さんと砂山朋美さんがAIRに参加した3名の作家、および各分野の専門家と共に登壇しました。また、3月11日には多摩六都科学館において本展示会の関連イベントであるワークショップ「真×善×美から考える科学の基底と美術の基底」が開催され、Kavli IPMU 准教授の山崎雅人さんが登壇し、3名の作家および論理学と美学の専門家とともにKavli IPMUのAIRについて検討し、さらに会場の参加者との意見交換を行うなどしました。



左から右へメディアアートの平川紀道さん（2016年度参加）、野村康生さん（2015年度参加）、彫刻の春山憲太郎さん（2017年度参加）。

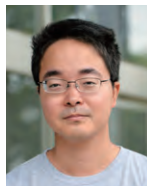


展示の様子。

人事異動

昇任

Kavli IPMU 助教の山崎雅人さんが2018年2月1日付けでKavli IPMU 准教授に昇任されました。



山崎雅人さん

Kavli IPMU 助教のSurhud Moreさんが2018年3月1日付けでKavli IPMU 准教授に昇任されました。



Surhud Moreさん

退任

福来正孝さんが、2018年3月31日付けでKavli IPMU 教授を退任し、4月1日からKavli IPMU 上級科学的研究員となります。福来さんはIPMUが発足した2007年10月1日から2012年3月31日まで主任研究員、2012年4月1日からはKavli IPMU 教授を勤められました。

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。]

Feng Luo (罗峰)さん [2015年11月1日 - 2018年3月15日]、Kavli IPMU 博士研究員から中国の中山大学准教授へ。

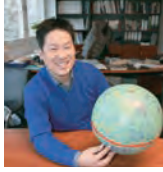
米倉和也さん [2015年8月1日 - 2018年3月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から九州大学基幹教育院助教へ。

Hirary Childさん [2017年9月2日 - 2018年2月27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）からシカゴ大学天文学・天体物理学部博士課程へ復帰。

向田享平さん [2015年4月1日 - 2018年3月31日]、東京大学特別研究員（日本学術振興会特別研究員）からDESY 博士研究員へ。

大内元気さん [2017年4月1日 - 2018年3月31日]、東京大学特別研究員（日本学術振興会特別研究員）から理化学研究所基礎科学特別研究員へ。

また、齋藤翔さん [2015年4月1日 - 2018年3月31日] が任期満了でKavli IPMU 博士研究員を退職しました。



ジオメトリックエンジニアリング

渡利 泰山

Kavli IPMU准教授

IIA型超弦が特異点を含む幾何の上を伝播するとき、その量子化されたスペクトルの中には、非可換ゲージ群のベクトル場が含まれることがあります。より複雑な特異点が含まれる幾何になれば、より複雑なゲージ理論が弦理論から得られます。幾何に工夫を凝らせば望みのゲージ理論を手に入れることができる、という考え方をジオメトリックエンジニアリングといいます。この考え方から発展して、(この現実世界にあるような)重力とゲージ理論の両方を幾何だけを使って扱うことができる、という理解に現在では至っています。

