

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
Cosmic fireworks '花火' in colliding galaxies



42

No.

June 2018

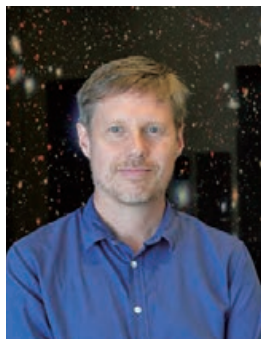
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Cosmic Fireworks' 花火 'in Colliding Galaxies
John Silverman
- 10 **Our Team**
Misao Sasaki
Hiraku Nakajima
Shin'ichiro Takeda
Yutaka Yoshida
Metin Ata
Hideaki Matsumura
Shi Pi
Yota Shamoto
Satoru Takakura
- 14 **Workshop Report**
Focus Week on Quantum Gravity and Holography
Masahito Yamazaki
- 15 **Workshop Report**
Joint Kavli IPMU - ICEPP Workshop on New Directions
for LHC: Run 2 and Beyond
Satoshi Shirai
- 16 **TEA BREAK**
What Is a WDVV-Algebra?
Alexander A. Voronov
- 17 **News**
- 22 λ -Adic Topology Alexander A. Voronov

Japanese

- 23 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 24 **Feature**
衝突する銀河に見られる宇宙の「花火」
ジョン・シルバーマン
- 30 **Our Team**
佐々木 節
中島 啓
武田 伸一郎
吉田 豊
メティン・アタ
松村 英晃
皮石
社本 陽太
高倉 理
- 34 **Workshop Report**
フォーカス・ウィーク「量子重力とホログラフィー」
山崎 雅人
- 35 **Workshop Report**
Joint Kavli IPMU - ICEPP Workshop on New Directions
for LHC: Run 2 and Beyond
白井 智
- 36 **TEA BREAK**
WDVV 代数とは?
アレクサンダー A. ボロノフ
- 37 **News**
- 40 先進トポロジー
アレクサンダー A. ボロノフ



John Silverman is an Associate Professor at the Kavli IPMU. His research is centered on understanding the evolution of star-forming galaxies and their relation to the growth of supermassive black holes, particularly in the distant Universe. His research program makes use of the largest optical/near-infrared telescopes on the ground (e.g., Subaru Telescope) and in space including the Hubble Space Telescope, Spitzer Space Telescope and the Chandra X-ray Observatory. He is one of the lead scientists planning the next generation of spectroscopic surveys with Subaru's Prime-Focus Spectrograph, a key Kavli IPMU initiative. Prior to his Assistant Professor position at IPMU in 2009, he held postdoctoral research positions in Germany (Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics) and Switzerland (ETH-Zurich) after receiving his doctoral degree from the University of Virginia in 2004.

ジョン・シルバーマン : Kavli IPMU准教授。特に遠方宇宙での星形成銀河の進化と超巨大ブラックホールの成長との関係を中心として研究。このため、地上の最大級の光学・赤外線望遠鏡（例えば、すばる望遠鏡）とハッブル宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡、チャンドラX線観測衛星などの宇宙望遠鏡を利用。Kavli IPMUが主導するPFS（すばる主焦点超広視野多天体分光器）を用いた次世代分光サーベイ計画を進める研究者の一員。2004年にバージニア大学から博士号を取得後、ドイツのマックス・プランク地球外物理学研究所、スイスのスイス連邦工科大学チューリッヒ校で博士研究員、2009年に助教としてIPMUに着任、2017年より現職。

Hitoshi Murayama at Work

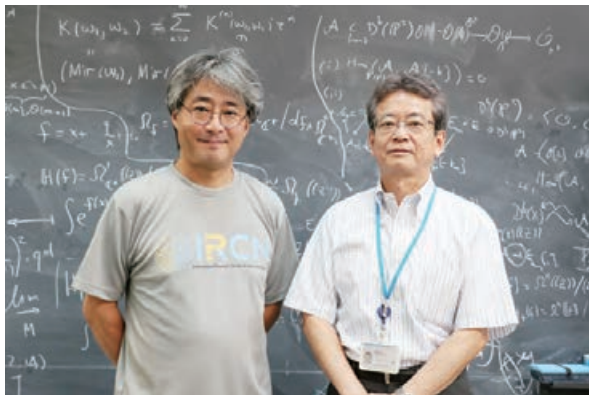
Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



May 28: Giving an address at the Opening Ceremony of the International Research Center for Neurointelligence (IRCN). (Courtesy of IRCN)



June 11: Round-table discussion with Professor Markus Gabriel, a philosopher at the University of Bonn (center) and Kavli IPMU PI Yasunori Nomura (right).



June 13: MEXT Deputy Minister Yoichi Ito (right) visited the Kavli IPMU (see p. 17). Note that Director Murayama wore an IRCN T shirt instead of a usual IPMU T shirt.



June 17: Research Institute of Science and Technology for Society (RISTEX)'s "Science of Science, Technology and Innovation Policy" Yokoyama Project held a symposium "Why the shortage of women in mathematical and physical sciences?" at the Kavli IPMU.



June 26: A congratulatory video message was presented at the SuperKEKB First Collisions Ceremony held at KEK. (Courtesy of Zoltan Ligeti)



June 28: Received Research Award from the Alexander von Humboldt Foundation (AvH) at its Annual Meeting in Berlin (see *Kavli IPMU News* No. 40, p. 34). (Left) President of AvH Hans-Christian Paper; (Right) Parliamentary State Secretary to the Federal Minister of Education and Research Michael Meister. (Photo: Humboldt Foundation / David Ausserhofer)

Cosmic Fireworks ‘ 花火 ’ in Colliding Galaxies

For much of their history, galaxies grow by forming new stars out of their gas reservoirs at a steady pace over billions of years. On occasion, an episode of intense star formation occurs, namely a ‘ starburst ,’ that is usually the result of a collision between two massive galaxies (Figure 1) with an eventual merger in many cases. These spectacular events are relatively short-lived (~100 million years), somewhat analogous to the fleeting 桜 ‘ Cherry blossom ’ season in Japan. In addition to generating new stars, galaxy mergers are effective at channeling gas to their centers to grow a supermassive black hole and a central concentration of stars (namely a bulge) that is a ubiquitous feature of massive galaxies in the nearby Universe.

Astrophysicists, both theorists and observers, view starbursts as an important laboratory to study the more extreme physical conditions (i.e., density, temperature and pressure) of the cool gas component of the interstellar medium. To understand why certain galaxies form stars at different rates, it is important to measure the properties of the molecular gas out of which stars form and over a range of scales from giant molecular clouds within galaxies to galaxy-wide quantities.

In the nearby Universe (out to a distance of ~ 50 Megaparsecs or 163 million light years), we have a clear understanding of the impact of galaxy interactions and mergers on the rate at which galaxies form their stars. In the more distant and younger Universe, the situation may not be the same since galaxies are richer in molecular gas and hence may be able to form stars rapidly without any help from a merger. Until recently, it has been challenging to study the molecular gas properties of galaxies at great distances.

A new window on distant starburst galaxies with ALMA

The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), a telescope located in Chile on the Chajnantor plateau, is now enabling investigations of the molecular gas (and dust) properties of galaxies out to the largest distances and on smaller physical scales than previously possible. This is due to the large collecting area of 66 antennas that work in unison, as an interferometer, and can be spread over wide separations that reach up to 16 kilometers (Figure 2) thus providing the highest resolution images possible over a wavelength (frequency) range of 9.6 to 0.3 millimeters (31 to



Figure 1: Hubble Space Telescope image of the interacting galaxy pair, Arp 87 (courtesy STSCI).

1000 GHz).

ALMA is an international observatory with Japan contributing as a major partner including Taiwan and South Korea that together constitute the East Asian participation group. In Japan, ALMA offers remarkable capabilities to fully explore interesting objects, such as distant quasars and galaxies that reside in the first emerging large-scale structures, currently being discovered by the wide and deep surveys with Subaru Telescope.

With respect to distant starburst galaxies, past interferometric investigations were restricted to the most luminous examples at the expense of having limited spatial information. With ALMA, we can now study the spatial and velocity distribution of gas within distant galaxies with ease.

Finding bona-fide distant starbursts

To know exactly where in the sky to point ALMA, we need to identify which galaxies are undergoing a starburst phase. Such an effort requires a multi-

wavelength observational approach to make key measurements that shed light on their current state and history of formation. With limited observational resources and manpower to compile such observational data sets, multi-national collaborations have been effectively pooling resources for such purpose. Here, we describe our own effort in the COSMOS field, a contiguous region of the sky, about nine times the size of the moon, that has been surveyed by numerous telescopes on the ground (e.g., VLT, Subaru, and Keck) and in space (e.g., *Hubble*, *Spitzer*, and *Herschel Space Telescopes*) that cover most of the electromagnetic spectrum. Japan is an important participant in the COSMOS survey and is now leading in the next generation of wide-field optical surveys with Subaru including the imager Hyper Suprime Cam and Prime-Focus Spectrograph to follow in a few years.

As a first step, we need to assess the rate at which new stars are being formed, usually in terms of the mass in stars per year. Since stars are born in regions of dense molecular gas, they are enshrouded by

dust thus making it difficult for optical or ultraviolet emission to escape without being absorbed and reradiated at longer wavelengths. To account for dust-obscured star formation, the brightness of a galaxy at infrared wavelengths is used as a measure of the rate that stars are being produced. Due to warm thermal 'infrared' emission from the Earth, space-based telescopes (i.e., *Spitzer*, *Akari*, and *Herschel*) are required for their detection at wavelengths greater than a few microns. Over the last decade or more, we have learned that the rates that galaxies form new stars can be off by an order-of-magnitude, if restricted to optical observations alone, especially in the case of starburst galaxies.

To measure the intrinsic star formation rate, we need to know the distance to the galaxy since the detector on *Herschel* or *Spitzer* only provides a brightness for distant galaxies, not its intrinsic luminosity. Furthermore, an accurate measure of the distance is needed to tune ALMA to the appropriate frequency. This requires observations with a spectrograph to disperse the optical or near-infrared light to detect spectral features that provide a measure of a galaxy's redshift, a consequence of the expansion of the Universe, that is directly related to its distance given our current cosmological model.

In our case, we spent 60 nights at Subaru Telescope observing over 3500 star-forming galaxies with the Fiber Multi-Object Spectrograph (FMOS). As a result, we identified close to 1500 galaxies with a detection of emission lines such as $H\alpha$ from ionized hydrogen gas that provided a measure of their redshift between 1.4 and 1.7. This project was a collaboration between researchers in Japan, Europe, and the United States. For some perspective on future technological advancement, the same effort could be accomplished with only a few nights using Subaru's Prime-Focus Spectrograph. Even so, we identified 150 galaxies (from the 1500 with redshift measurements) detected at far-infrared wavelengths with the *Herschel* Space Observatory. Therefore, we are able to estimate their star formation rate and single out the starburst galaxies that are forming stars at remarkable rates, well above the typical population.

Observing molecular gas as traced by carbon monoxide

Armed with a sample of bona-fide starburst galaxies at high redshift, we can now observe with ALMA at the appropriate frequency to detect an emission feature given off from regions of



Figure 2: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA; credit: ESO).

molecular gas where stars are forming. Traditionally, carbon monoxide (CO) has been used as a tracer of the total molecular gas content of galaxies that is primarily composed of molecular hydrogen (H_2). Emission from a CO molecule is emitted during transitions from a higher to a lower rotational state, initially excited due to collisions with H_2 molecules. The level of excitation is indicative of the presence of gas at different temperatures and densities. With the spatial resolution of a telescope dependent on the wavelength (or frequency) of light, higher order transitions can produce maps of the gas distribution at greater spatial resolution due to their higher observed frequencies. The aim here is to measure the total CO luminosity with ALMA of a given molecular transition (e.g., $J = 2$ to 1 ; rest frequency = 230.54 Gigahertz) and convert the luminosity to the mass in molecular gas. The relation between CO

luminosity and gas mass has been calibrated based on molecular clouds in our Milky Way and galaxies both at low and high redshift. The latter require a measure of the gas mass in galaxies, independent of CO luminosity. There is considerable ongoing debate about the accuracy of such relations including that for starbursts that may differ substantially from more typical star-forming galaxies.

A quintessential starburst event induced by a collision of two galaxies at high- z

At Kavli IPMU, we have been using ALMA to detect the total CO(2-1) emission from 12 starburst galaxies at redshifts $z \sim 1.6$ (an epoch when the Universe was 30% of its current age), selected as having star formation rates ≥ 4 times higher than more typical galaxies. Their star formation rates

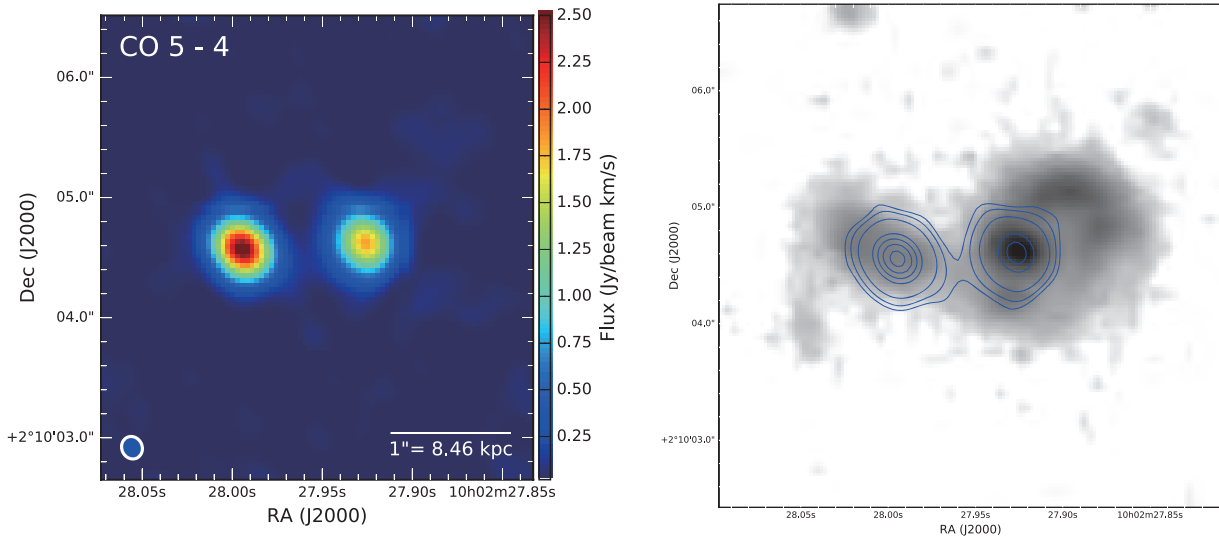


Figure 3: *Left* - ALMA map of CO(5-4) emission from two galaxies in PACS-787. *Right* - An infrared image taken with the Hubble Space Telescope using the Wide-Field Camera 3 with CO indicated by the blue contours.

range from ~100 to 700 solar masses per year. CO emission is clearly detected in all but one that indicates the presence of abundant gas reservoirs in these starburst galaxies.

Unsurprisingly, the brightest galaxy in CO is the galaxy (PACS-787) with the highest level of star formation at 720 solar masses per year. We were curious as to what factors could contribute to a galaxy having such a high star formation rate when simulations of gas-rich galaxies in mergers, similar to those in the high redshift Universe, typically produce only modest enhancements in star formation, not enough to reproduce the rates seen in PACS-787.

To answer this question, we re-observed PACS-787 at a higher resolution by detecting the CO(5-4) emission line at a rest frequency of 576.27 Gigahertz (Figure 3 left panel). To our astonishment, the CO emission was now resolved into two distinct galaxies with a separation between the galaxies being 8.6 kiloparsecs. With such a high star formation rate, we expected the galaxies to be close to final coalescence as seen in simulations, but

instead the two galaxies are still in the initial stages of an interaction. With a recent infrared image of PACS-787 taken with the *Hubble* Space Telescope (Figure 3 right panel), we now see clear evidence for an ongoing collision between the two galaxies since there are signs that some stars have been tidally stripped and form a bridge between the two galaxies that is also evident in CO emission.

Based on these observations, we conclude that the high star-formation rates in PACS-787 are based on a set of optimal factors including the interaction of two gas-rich galaxies and an orbital configuration conducive to drive gas to the nuclear regions thus powering a central starburst in each galaxy. We further find that the CO emission in each galaxy is rotating as a disk that provides further diagnostics on the amount of molecular gas present, independent of the CO luminosity.

A fuel-efficient engine in distant starbursts

There is much interest in determining if the star

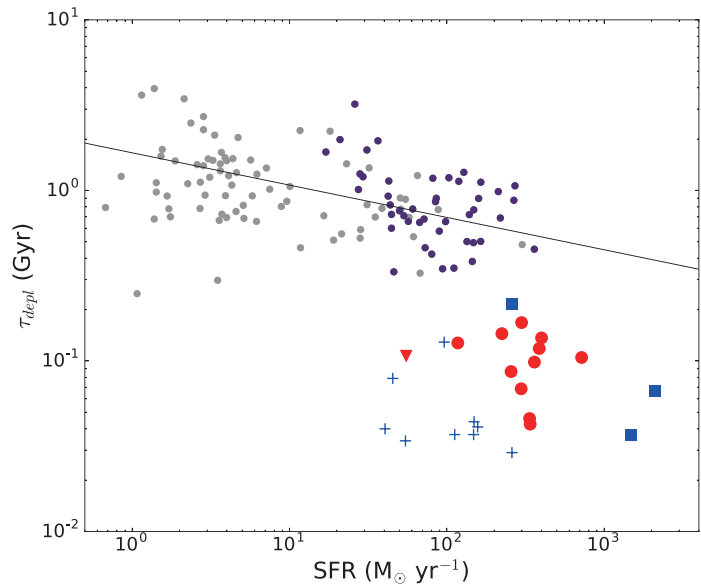


Figure 4: Time ($t_{\text{depl}} = M_{\text{gas}} / \text{SFR}$) to deplete the full gas reservoir of a galaxy at a given star formation rate (SFR). Starburst galaxies are shown as large colored symbols including our ALMA sample in red. More typical star-forming galaxies are indicated by smaller circles and a best-fit linear relation.

formation rates in distant starbursts are due to an elevated gas mass, a more efficient conversion of gas to stars, or a combination of the two. To distinguish between these scenarios, we convert the CO luminosity to molecular gas mass for all twelve starbursts in our sample using the appropriate relation. Regarding the efficiency, we measure a time scale for a galaxy to consume all of its gas by dividing the gas mass by the star formation rate. A galaxy that is efficiently forming stars will have a short gas depletion time.

As shown in Figure 4, the depletion times for our starbursts are between 50 – 150 million years, substantially shorter than more typical star-forming galaxies with depletion times around 1 billion years. This difference in times scales to form stars indicates that starbursts are likely triggered by a mechanism (e.g., galaxy merger) that induces conditions more favorable for star formation to proceed at such high rates. The debate is not completely settled since there is remaining uncertainty on the appropriate value of the factor to convert CO luminosity to

gas mass for high- z starbursts (and more typical galaxies).

Further progress with ALMA will be afforded by higher resolution observations to determine the physical characteristics of star-forming regions within galaxies down to ~ 100 parsec resolution. With new samples of high redshift galaxies to come from Subaru surveys, our understanding of star formation will vastly improve over the years to come.

Our Team

Misao Sasaki

Research Field: **Theoretical Physics**

Kavli IPMU Deputy Director

My main research interest is in general relativity and cosmology. I am particularly interested in the theory of the inflationary universe. Thanks to rapid progress in observational cosmology, we have begun to see linear vacuum fluctuations from inflation, and we will be able to detect nonlinear, non-Gaussian fluctuations from inflation soon. However, our understanding of inflation is still very limited, and far from a quantitative level. What I am interested in now is looking for new observational signatures that can distinguish differences between different models, to identify the physics behind inflation, and to possibly find traces from physics beyond inflation. In this respect, in addition to electromagnetic waves as an observational tool, gravitational waves will certainly play a central role in cosmology, particularly in exploring early universe physics in coming years. I am currently working on gravitational wave cosmology with this expectation.



Hiraku Nakajima

Research Field: **Mathematics**

Kavli IPMU Professor

My research topic is a mathematical study of gauge theories, which have their origin in mathematical physics. In particular, I study homology groups of various moduli spaces appearing in gauge theories, using a technique called geometric representation theory. Not only can this study be considered an analysis of gauge theories, it also sheds an interesting new light on representation theory, as I obtain familiar objects like Kac-Moody Lie algebras and their quantum analogue in a very different manner than usual. Recently I give a mathematically rigorous definition of Coulomb branches of 3d supersymmetric gauge theories



using this method, and study their properties and representation theory of their noncommutative deformations (quantization).

Shin'ichiro Takeda

Research Field: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor

It is very hard work to develop detectors, but it finally leads us to an exciting world. Together with a hand-picked group of colleagues, I have been working on the development of high-sensitivity hard X-ray and gamma-ray detectors for high-energy astrophysics. We also tried to apply our system to the visualization of radioactive substances and demonstrated its performance in Fukushima. For the last two years in Okinawa, I have been enjoying conducting research and development for small animal imaging with a capability of high-resolution tracking of radioactive probes. Here at Kavli IPMU, I will try to address the complexity of tumors in a living body with the power of hard X-ray and



gamma-ray imaging. The first prototype is now ready in the Kashiwa Research Complex 2 building. Welcome!

Yutaka Yoshida

Research Field: **Theoretical Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor

My research interests are developing exact results in quantum field theories in terms of supersymmetric localization methods and studying dualities, non-perturbative effects and mathematical aspects in supersymmetric theories. By using localization computations, I have mainly been studying non-perturbative effects in two dimensional topologically twisted sigma models such as world sheet instanton corrections and



dualities between three dimensional supersymmetric Chern-Simons-matter theories.

Metin Ata

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research is dedicated to the analysis and modeling of cosmological large-scale structures, including observational data and analytical descriptions.

All the epochs our Universe has gone through offer different insights into the dynamics that led to the world we know. I want to understand structures formed at high redshifts and test against model predictions. I also like machine learning



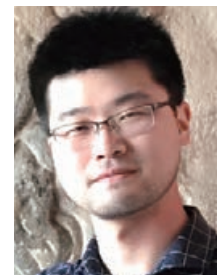
developments and try to utilize them as much as possible.

Hideaki Matsumura

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

I have been working on X-ray observation of supernova remnants and development of X-ray CMOS sensors. For the former, my interest is in thermal plasma of supernova remnants, especially in recombining plasma which is caused by interaction between hot plasma and cool molecular clouds. For the latter, I have developed event-driven pixel detectors for future X-ray astronomy satellites on the basis of silicon-on-insulator technology. I will



take on observational and experimental study with radio or gamma-ray without limiting used band to X-rays.

Shi Pi

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My main research interests focus on the early cosmology, especially the generation and evolution of cosmological perturbations. Originating from the quantum fluctuations on very small scales, cosmological perturbations can be stretched to all the scales and then seed the macroscopic phenomena like cosmic microwave background, large scale structure, primordial black holes, and



stochastic gravitational waves. I am trying to comprehend how the largest and the smallest scales of our universe are connected by the Nature.

Yota Shamoto

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My mathematical research focuses on Hodge theory and mirror symmetry. In particular, I am interested in problems in which differential equations with irregular singularity naturally appear. Recently, I gave a Hodge theoretic sufficient condition and examples for the modified versions of the conjectures proposed by Katzarkov-Kontsevich-Pantev from the viewpoint of mirror symmetry between Fano manifolds and Landau-Ginzburg



models. Currently, I am trying to apply this result to construct and study the Frobenius structure on the moduli space of Landau-Ginzburg models.

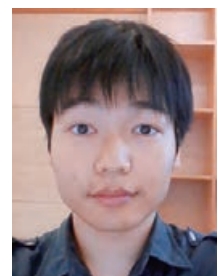
Satoru Takakura

Research Field: **Astronomy, Experimental Physics**

Postdoc

I have participated in the POLARBEAR experiment, which is a cosmic microwave background (CMB) polarization measurement at the Atacama Desert in Chile. My main work is mitigation of low-frequency noise, which is very important to observe inflationary B-modes. I have developed a polarization modulator using a continuously rotating half-wave plate and started large patch observations using it.

I will continue Simons Array, an upgrade of



POLARBEAR, and also collaborate with people developing a polarization modulator for LiteBIRD at the Kavli IPMU.

Our Team

Focus Week on Quantum Gravity and Holography

Masahito Yamazaki

Kavli IPMU Associate Professor

Our focus week “Focus Week on Quantum Gravity and Holography” was held at Kavli IPMU on April 2-6, 2018.

The search for the quantum theory of gravity has been one of the most important subjects in theoretical physics for decades. While superstring theory is widely believed to be a promising candidate, the focus of the community for quite some time has been the application of string theory and holography to other areas (such as quark-gluon plasma, condensed matter, and mathematics), and less so to quantum gravity per se. The situation has rapidly been changing over the past few years; many researchers are coming back to the field, armed with new ideas (e.g., relationship between quantum information and quantum gravity, Sachdev-Ye-Kitaev model, ER=EPR proposal, and supergravity on de Sitter space), or new techniques which can solve old and difficult problems (e.g., holographic entanglement entropy, new techniques based on integrability, conformal bootstrap, and lattice super Yang-Mills simulation).

In order to strengthen this trend, it was desirable and timely to bring together top researchers working in various different directions, encourage the deepening of mutual understanding, and discuss next directions. This was the motivation for

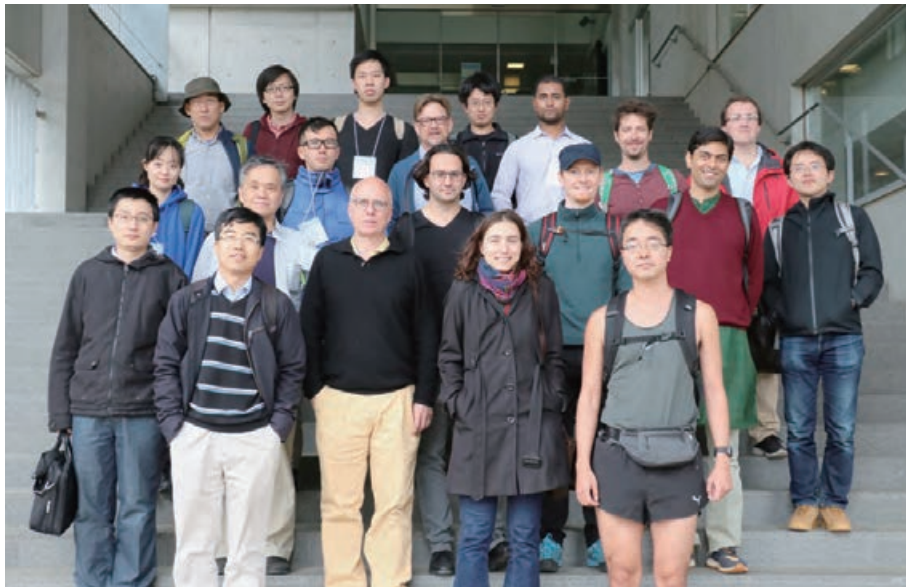
our focus week.

We had the fortune of having an international organizing committee, including Tatsuo Azeyanagi, Valentina Forini, Masanori Hanada, Bert Verhagen, Nico Wintergerst, and myself.

We had plenary talks by Monica Guica, Yuta Hamada, Song He, Simeon Hellerman, Petr Horava, Jared Kaplan, Ami Katz, Yasunori Nomura, Hiroshi Ooguri, Xiaoliang Qi, Suvrat Raju, Bo Sundborg, and Nico Wintergerst. We also had invited contributed talks, selected from among the applicants, by Yuhma Asano, Kanato Goto, Goro Ishiki, Anosh Joseph, Rene Meyer, Max Riegler, Takahiro Uetoko, Masataka Watanabe, and Yun-Long Zhang.

As an experiment, we organized this focus week as a hybrid: we had a relaxed schedule for the first three days with a lot of time for discussions, while we had a more intense conference-style format in the last two days.

I myself very much enjoyed attending this focus week, talking with experts and getting ideas for possible future projects. I also obtained positive feedback about the focus week from many participants. I do hope our focus week, while limited in scope, provided an inspiration for future fascinating activities in the field of quantum gravity and holography.



Joint Kavli IPMU - ICEPP Workshop on New Directions for LHC: Run 2 and Beyond

Satoshi Shirai

Kavli IPMU Assistant Professor

On June 18, 2018, we held the joint workshop of the Kavli IPMU and the International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP) “New Directions for LHC: Run 2 and Beyond” at Kavli IPMU. Kavli IPMU and ICEPP had never hosted such a workshop together and this is the first joint workshop.

The Large Hadron Collider (LHC) is now the most important experiment for elementary particle physics. So far, the LHC has discovered the Higgs particles and is now studying its mass and property in detail. On the other hand, signatures of new physics beyond the standard model are yet to be found. In this workshop, the latest results of the LHC were reported and we discussed the future direction of particle physics in light of the LHC results.

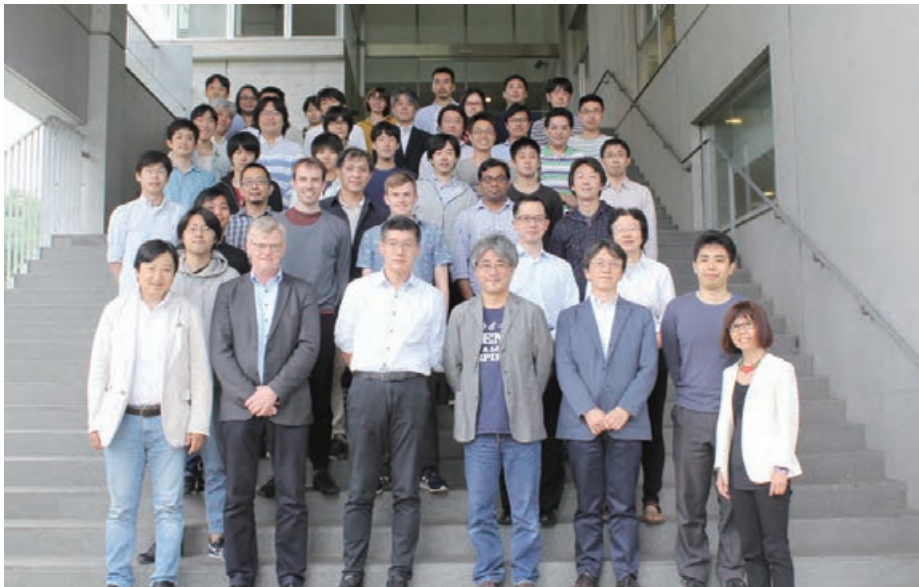
First, Karl Jakobs, a spokesperson of the ATLAS experiment, gave a review on the latest LHC results on the Higgs particle measurements and search for new physics. He also discussed the prospects of the future high luminosity LHC. Subsequent speakers and the contents of their talks were as follows. S. Shirai gave a talk on the status of the supersymmetric models after the discovery of the Higgs particle, and emphasized the importance of searching for long-lived particles at the LHC. Mihoko Nojiri reported her recent research on the

precise estimation of mono jet signals with colored particle productions, which play important roles for searching new physics. Takahiro Terada talked about a semi-analytic method to estimate the primordial gravitational wave spectrum in cosmology. Michihisa Takeuchi discussed the signatures of the Higgs pair production and dark matter in the supersymmetric models at the future LHC. Finally, Junping Tian gave a nice review on the prospect of precise measurement of the Higgs particle at the proposed International Linear Collider (ILC).

In the panel discussion, we discussed the future direction of the high luminosity LHC and synergy with other experiments such as ILC, SuperKEKB, and Hyper-Kamiokande. Especially, we intensively discussed precise measurements of the Higgs particle and top quark in the future experiments.

Unfortunately, a strong earthquake hit Osaka that morning and talks by Shinya Kanemura and Yuji Omura were canceled.

This workshop has brought together theoretical and experimental physicists. We enjoyed a stimulating discussion among participants. I hope the second Kavli IPMU-ICEPP joint workshop will be held in the near future.



What Is a WDVV-Algebra?

Alexander A. Voronov

Professor, School of Mathematics, University of Minnesota
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

People often ask me what a Witten-Dijkgraaf-Verlinde-Verlinde (WDVV) algebra is. And I never hesitate to tell them. After all, the definition is as beautiful, as it is useful. And I have embedded a mnemonic rule in it, so that if you see this definition once, you will never forget it! Here we go. A *WDVV-algebra* is a graded vector space V with graded symmetric multilinear operations (v_1, v_2, \dots, v_n) of degree $2(n-2)$, one for each $n \geq 2$, such that they satisfy the following associativity condition. Define a formal deformation of the commutative product (v_1, v_2) on V :

$$(w, d)_v := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} (w, d, v, v, \dots, v) \lambda^k, \quad v \text{ appearing } k \text{ times in the } k \text{ th term,}$$

for every “Witten” $w \in V$, “Dijkgraaf” $d \in V$, and all the “Verlinde brothers” $v \in V$, where λ is a formal parameter.¹ Then the condition is that the deformed bilinear product $(w, d)_v$ must be associative. Apparently, because of some controversy associated with the name, this structure is more often called a *hypercommutative algebra*.² It is also equivalent to the structure of a *linear Frobenius manifold* on V .

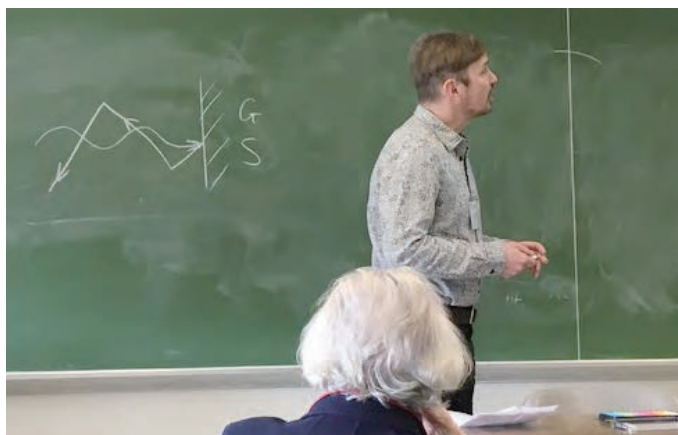


Photo credit: Takashi Kimura of Boston University.

¹ See, *λ -Adic Topology* on p. 22 in this issue.

² See Ezra Getzler, *Operads and moduli spaces of genus 0 Riemann surfaces*. *The moduli space of curves (Texel Island, 1994)*, 199–230, Progr. Math., 129, Birkhäuser Boston, Boston, MA, 1995.

News

Hiroshi Ooguri Awarded the 2018 Hamburg Prize for Theoretical Physics

On May 24, 2018, it was announced that Hiroshi Ooguri, Director of the California Institute of Technology's Walter Burke Institute for Theoretical Physics and Kavli IPMU Principal Investigator, has been awarded the 2018 Hamburg Prize for Theoretical Physics. This prize is awarded by the Joachim Herz Stiftung in partnership with the University of Hamburg and Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY). This is the first year the prize covers all areas of theoretical physics (previously it was given to theorists in quantum information, quantum optics, and quantum many-body systems). With a new endowment established for the prize, the prize money has been increased from 40,000 euros to 100,000 euros, making it one of the most valuable science prizes in Germany. The award ceremony will be held on November 7, 2018 at Planetarium Hamburg.



Hiroshi Ooguri

MEXT Deputy Minister Yoichi Ito Visits Kavli IPMU

On June 13, 2018, Deputy Minister of MEXT (Ministry of Education,

Culture, Sports, Science and Technology) Yoichi Ito visited the University of Tokyo's Kashiwa campus, accompanied by two MEXT officials. They arrived at the Kavli IPMU during its daily tea time break. There, they listened to Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama as he introduced the institute, and talked to a number of researchers (see photo on p. 3).

Construction of Fourth Layer Ladders of the Belle II Silicon Vertex Detector Completed

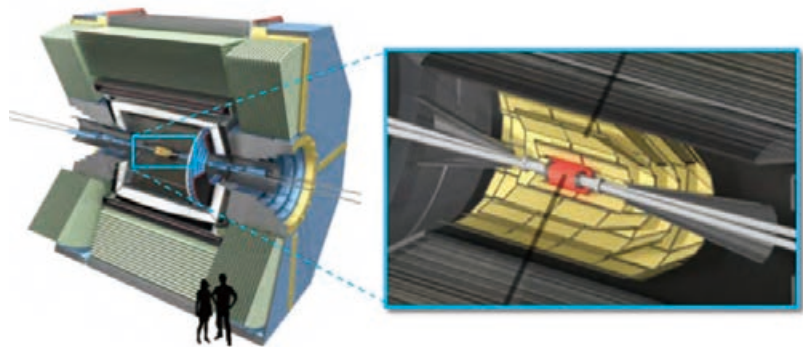
A group of researchers at the Kavli IPMU have been collaborating on the Belle II experiment to be conducted at the electron-positron collider SuperKEKB at KEK, and they have been constructing the fourth-layer "ladders" of the Silicon Vertex Detector (SVD). SVD is one of the seven different kinds of detectors that comprise the Belle II detector installed at the interaction point of SuperKEKB (see *Kavli IPMU News* No. 37, pp. 10 - 13).

SVD can measure the points where charged particles pass through its active silicon layers with high precision. In the Belle II detector located at the collision point of the SuperKEKB, SVD functions as a part of the Vertex Detector (VXD) which measures the decay vertices of short-lived particles such as B mesons, produced

in electron-positron interactions. If new physics beyond the Standard Model of elementary particles exists, SVD will play a very important role because decays of these short-lived particles may show different features from those of the predictions of the Standard Model.

Belle II collaborators at the Kavli IPMU started R&D for the construction of SVD fourth-layer ladders in 2011. They successfully constructed the memorable "final mockup ladder" in January 2016, and confirmed the completeness of all the ladder construction processes. In March 2016, they completed a prototype ladder with full electrical functions. In May 2016 they started construction of the ladders, and as of May 24, 2018, they successfully completed 16 ladders plus 3 spare ladders.

Starting in February 2016, the beam commissioning of SuperKEKB has been proceeding in three phases. The Belle II detector was "rolled-in" to the collision point of SuperKEKB in spring 2017, after Phase 1 commissioning without beam collisions. On March 19, 2018, Phase 2 commissioning started aiming at stable accumulation of the electron and positron beams, and the Belle II detector observed the first electron-positron collision event on April 26. The Phase 2 commissioning



The SVD will be placed at the center of the Belle II detector. At the very center, colored in red, is the pixelated silicon detector. The surrounding yellow components are the four layers making up the SVD. Kavli IPMU researchers built the fourth outermost layer. A part of the facilities at Kavli IPMU was also used by Indian researchers to build the second layer of the SVD. (Credit: Belle II Collaboration / Rey Hori.)

of SuperKEKB will be continued until July with Belle II detector taking data.

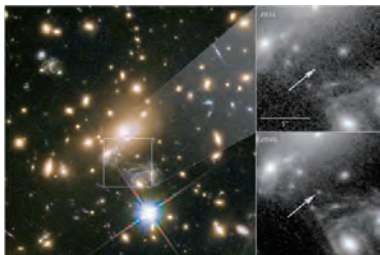
The fourth layer ladders of SVD which Kavli IPMU constructed are scheduled to be installed, together with ladders of the other layers, inside SuperKEKB in December this year after tuning and performance tests at KEK. The Phase 3 commissioning is expected to start in February 2019. In this phase, Belle II will take physics data with all kinds of detectors comprising the Belle II detector in operation, and real physics data analysis will begin.

Farthest Star Ever Seen in the Universe Detected

An international team of researchers, led by Patrick Kelly of the University of Minnesota, and including the University of Tokyo School of Science Assistant Professor and Kavli IPMU Associate Scientist Masamune Oguri, successfully observed the most distant individual star, 9 billion light years away from the Earth.

Except very near galaxies, it is usually impossible to spot individual stars in a galaxy because of the limitations in the sensitivities and resolutions of telescopes. However, since a gravitational lens can focus and magnify distant objects, in principle it would provide a means to overcome these limitations to observe a distant individual star.

While originally observing galaxy



Icarus capture by the Hubble Space Telescope. The left image shows galaxy cluster MACS J1149+2223 and the position of Icarus. The top right image shows how Icarus was not visible in 2011, and became visible in 2016. (Credit: NASA/ESA/P. Kelly)

cluster MACS J1149+2223, 5 billion light years away, using the Hubble Space Telescope, the researchers noticed a flickering light in a 9-billion-light-year distant galaxy in the background. Closer analysis revealed that the light was not from a star exploding at the end of its life, but a blue star with its brightness magnified by a gravitational lens. They have named it Icarus. These results were published in the April 3 issue of *Nature Astronomy*.

In addition to providing precious information regarding stars comprising distant galaxies, it also turned out that the discovery of Icarus is important for researchers studying dark matter, which constitutes most of the total mass in the Universe. Detailed theoretical analysis about it is reported by M. Oguri et al. in *Physical Review D* **97** (2018) 023518.

It is expected that many more magnified stars will be discovered when the upcoming James Webb Telescope becomes operational, and when they do so, they will be able to provide more insight into the stars comprising distant galaxies and the properties of dark matter.

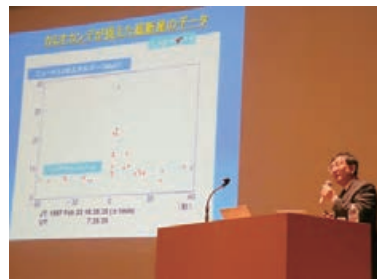
18th Kavli IPMU-ICRR Joint Public Lecture

On April 14, 2018, the Kavli IPMU and ICRR jointly held the 18th joint public lecture at Amuser Kashiwa in Kashiwa City, Chiba Prefecture with the catchphrase “ Exploring Particles, Describing the Universe with Particles. ” There was an audience of 333 people including junior high-school and high-school students.

After the opening address by ICRR Director and Kavli IPMU Principal Investigator Takaaki Kajita, the first lecture, entitled “ Super-Kamiokande: The Forefront of Supernova Neutrino

Observations, ” was given by ICRR s Kamioka Observatory Director and Kavli IPMU Principal Investigator Masayuki Nakahata. He talked about the world s first observation of supernova neutrinos by Kamiokande in 1987, when SN1987A appeared. He then explained that a countless number of supernova explosions have occurred throughout the history of the Universe, and spoke about experimental projects which attempt to observe diffuse supernova neutrinos originating from past supernova explosions.

The second lecture was given by Kavli IPMU Assistant Professor Satoshi Shirai. He talked about “ Naturalness: Unnatural Nature Explored by the LHC Experiments. ” First he explained what “ phenomenology ” is, and mentioned the Standard Model of elementary particles which is often referred to as a successful example. Then he talked about how the Standard Model failed to explain some phenomena such as neutrino mass. In particular, he stressed that the mass of the Higgs boson is quite unnatural and theoretical studies are ongoing,



Masayuki Nakahata, giving a talk.



Satoshi Shirai, giving a talk.

assuming new physics which would resolve this unnaturalness. He also mentioned that experimental results from the LHC at CERN are greatly anticipated as powerful tools for probing new physics.

After the lectures, a discussion was held between the lecturers. The audience was then invited to the foyer of the hall to chat with the lecturers, and many of them eagerly asked questions.

Kavli IPMU Public Lecture “ Universe × World ”

On June 10, 2018, the Kavli IPMU hosted a public lecture “ Universe × World ” at the Miraikan Hall of the National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan) in Odaiba, Tokyo, where 215 people attended the lectures delivered by Yasunori Nomura, Professor of Physics at the University of California, Berkeley and Principal Investigator at the Kavli IPMU, and Markus Gabriel, Professor of Philosophy at the University of Bonn.

First, Professor Nomura gave a lecture entitled “ Beyond the Universe. ” He pointed out the fact that our Universe is too good for our existence because there is a huge difference between the vacuum energy of our Universe and its theoretical expectation. Then, he talked about how string theory and the inflationary theory of cosmology suggest that the “ multiverse ” cosmology, which predicts the existence of many universes other than our Universe, is a promising hypothesis. He went on to talk about a quantum many-worlds interpretation of the multiverse: many worlds exist quantum mechanically in probability space. He concluded that our presence is insignificant, but we can understand Nature.

The next lecture, entitled “ Universe, World, and Reality ” was given by Professor Gabriel, who is known as the author of *Why the World Does Not Exist* (Polity Press, Cambridge, UK, 2015, translated by Gregory Moss). He began with the comment that it is no coincidence that Nomura’s depiction of the “ multiverse ” and his idea of the philosophical logical space have a similar form. Gabriel’s talk presented his negative proposal that the world does not exist by rejecting three conceptions of the world. He then went on to present his positive proposal that reality is a meshwork of locally overlapping fields of sense without a global context of all contexts.

Afterward, the lecturers exchanged opinions about reductionism and determinism from the viewpoints of physics and philosophy, respectively. The event ended with conversations between the lecturers and the audience, and the lecturers were surrounded with many inquiries.



Yasunori Nomura (left) and Markus Gabriel (right).

Public Lecture “ Gravitational Waves and Universe’s Dark Components: Forefront of Observational Cosmology ”

On June 17, 2018, the Kavli IPMU and Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas “ Why does the Universe accelerate? – Exhaustive study and challenge for the future– ” (Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama acting as Principal Investigator) cohosted a public lecture

“ Gravitational Waves and Universe’s Dark Components: Forefront of Observational Cosmology ” at Koshiba Hall on the University of Tokyo’s Hongo campus. The venue was filled to capacity with 196 audience members including junior high-school and high-school students.

The first lecture was given by Kavli IPMU Deputy Director Misao Sasaki. He spoke on “ The dawn of gravitational wave astronomy. ” He started from the results of the gravitational wave signal detections from a binary black hole merger and colliding neutron stars, both observed by the group of scientists at the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in the United States. He then talked about the impacts which these results have had on astronomy and cosmology. He also mentioned the LiteBIRD project, which, led by Kavli IPMU, aims at detecting primordial gravitational waves imprinted in a primordial B-mode component of the cosmic microwave background through multiple frequency measurements. He concluded his talk by presenting the future of gravitational wave observations.

Kavli IPMU Principal Investigator Masahiro Takada then spoke on “ Dark Components of the Universe Probed by Subaru. ” He started his talk by talking about how our Universe is filled with dark matter and dark energy which together are called “ dark components, ” and introduced Hyper Suprime-Cam (HSC) to be mounted on the Subaru Telescope in Hawaii. He told that it is expected to be a powerful tool to investigate these mysterious dark components.

He further talked about how gravitational lensing is a particularly effective means to investigate dark

matter, and, as a recent achievement obtained by using gravitational lens effects and HSC, that the observed results greatly constrained a theory which proposes the possibility of dark matter being composed of primordial black holes.

Finally, there was a discussion between the lecturers and the audience, and the event ended as a great success.



Misao Sasaki (left) and Masahiro Takada (right) .

Kavli IPMU Seminars

1. " What is strong lensing good for? two aspects of this question "

Speaker: Xuheng Ding (Beijing National U)
Date: Jan 30, 2018
2. " Majorana neutrino in seesaw mechanism and Bogoliubov quasiparticle "

Speaker: Kazuo Fujikawa (Riken)
Date: Jan 31, 2018
3. " The Astrophysics of BH-BH/NS-NS Mergers with LIGO/Virgo "

Speaker: Chris Belczynski (Warsaw U)
Date: Feb 06, 2018
4. " 6d SCFTs and AdS₃×S³×B holography "

Speaker: Hee Cheol Kim (POSTECH)
Date: Feb 06, 2018
5. " The Three Pillars of Supersymmetry "

Speaker: Jason Evans (KIAS)
Date: Feb 07, 2018
6. " Simulating structure formation in different environments and the application "

Speaker: Chi-Ting Chiang (Stony Brook U)
Date: Feb 07, 2018
7. " The Square Kilometre Array: understanding the history of the Universe "

Speaker: Phil Diamond (SKA Director-General)
Date: Feb 08, 2018
8. " Resummed Photon Spectra for WIMP Annihilation "

Speaker: Ian Mould (UC Berkeley)
Date: Feb 09, 2018
9. " HKR theorems in analytic geometry "

Speaker: Mauro Porta (U Strasbourg)
Date: Feb 13, 2018
10. " Implications of the mixed B - L anomaly "

Speaker: Archil Kobakhidze (U Sydney)
Date: Feb 21, 2018
11. " Using sheaf techniques to construct structures on categories "

Speaker: Alex Takeda (UC Berkeley)
Date: Feb 22, 2018
12. " The Vertex Algebra Vertex "

Speaker: Miroslav Rapcak (Perimeter)
Date: Feb 27, 2018
13. " The Frobenius structure conjecture in dimension two "

Speaker: Tony Yue-Yu (Laboratoire de Mathematiques d'Orsay, Universite Paris-Sud)
Date: Feb 27, 2018
14. " The CALorimetric Electron Telescope (CALET) on the International Space Station: Results from the First Two Years of Operation "

Speaker: Shoji Torii (Waseda U)
Date: Feb 28, 2018
15. " Measuring BAOs with cosmic voids "

Speaker: Francisco-Shu Kitaura (U La Laguna)
Date: Mar 01, 2018
16. " Little Conformal Symmetry and Neutral Naturalness "

Speaker: Rachel Houtz
Date: Mar 05, 2018
17. " On double covers and their degenerations "

Speaker: Patricio Gallardo (U Washington)
Date: Mar 06, 2018
18. " G-Hilb and crepant resolutions of certain abelian orbifolds in dimension 4 "

Speaker: Sara Muhvic (Wariwick U)
Date: Mar 06, 2018
19. " Brane bricks and mirror symmetry for hypersurfaces "

Speaker: Benjamin Gammage (UC Berkeley)
Date: Mar 07, 2018
20. " Interpretation of electromagnetic counterpart to a neutron star merger GW170817 "

Speaker: Kenta Hotokezaka (Princeton U)
Date: Mar 07, 2018
21. " Crepant resolution and the McKay correspondence "

Speaker: Yukari Ito (Kavli IPMU / Nagoya U)
Date: Mar 08, 2018
22. " The muon $g_{\mu}-2$ in the Earth's gravity "

Speaker: Takahiro Morishima (Nagoya U)
Date: Mar 09, 2018
23. " Neutron-Antineutron Oscillations and Discrete Symmetries "

Speaker: Arkady Vainshtein (U Minnesota)
Date: Mar 14, 2018
24. " Observational properties of stripped-envelope supernovae and constraints on their progenitors "

Speaker: Danfeng Xiang (Tsinghua U)
Date: Mar 15, 2018
25. " Insensitivity of bulk properties to the twisted boundary condition "

Speaker: Haruki Watanabe (U Tokyo)
Date: Mar 16, 2018

- 26: Search for Axion Like Particles using Laue-case Conversion in a Single Crystal ”
Speaker: Tomohiro Yamaji (U Tokyo)
Date: Mar 16, 2018
- 27: Introduction to derived algebraic geometry ”
Speaker: Gabriele Vezzosi (U Firenze)
Date: Mar 20, 2018
- 28: Magnetar Models for Superluminous Supernovae ”
Speaker: Andrey Zhiglo (Kharkov Inst of Physics and Technology, Ukraine)
Date: Mar 20, 2018
- 29: Symplectic and Poisson structures in derived algebraic geometry ”
Speaker: Bertrand Toen (U Toulouse)
Date: Mar 20, 2018
- 30: Co-evolution of galaxies and the multi-scale cosmic web: from predictions to observations ”
Speaker: Clotilde Laigle (U Oxford)
Date: Mar 22, 2018
- 31: The geometry of the cyclotomic trace ”
Speaker: Aaron Mazel-Gee (U Southern California)
Date: Mar 22, 2018
- 32: Clustering Distortions from Lyman-alpha Radiative Transfer ”
Speaker: Chris Byrohl (MPA)
Date: Mar 23, 2018
- 33: Quantum groups and monodromy ”
Speaker: Andrea Appel (U Edinburgh)
Date: Mar 27, 2018
- 34: Asymptotic geometry of monopole moduli space and the Sen Conjecture ”
Speaker: Michael Singer (U College London)
Date: Mar 27, 2018
- 35: Neutrino Mixing and CP Violation from Discrete Flavour Symmetries ”
Speaker: Arsenii Titov (Durham U)
Date: Mar 28, 2018
- 36: A geometric realization of the quantum enveloping algebra associated with the circle ”
Speaker: Francesco Sala (Kavli IPMU)
Date: Mar 29, 2018
- 37: Predicting neutrino CP violation in the minimal seesaw ”
Speaker: Morimitsu Tanimoto (Niigata U)
Date: Mar 30, 2018
- 38: Search for Dark Neutrino via Vacuum Magnetic Birefringence Experiment ”
Speaker: Kimiko Yamashita (National Tsing Hua U)
Date: Apr 04, 2018
- 39: What is Nature Astronomy and how do I get published in it? ”
Speaker: Marios Karouzos (Nature Astronomy)
Date: Apr 04, 2018
- 40: Planet Nine from Outer Space ”
Speaker: Konstantin Batygin (Caltech)
Date: Apr 10, 2018
- 41: Witten, Cardy, and the Holonomy Saddle ”
Speaker: Piljin Yi (KIAS)
Date: Apr 10, 2018
- 42: The quest for the origin of neutrino masses ”
Speaker: Josu Hernandez (SISSA)
Date: Apr 11, 2018
- 43: The Search for Planet Nine ”
Speaker: Mike Brown (Caltech)
Date: Apr 11, 2018
- 44: Letting the Data Speak for Themselves: What Observations Tell Us About Galaxy Formation ”
Speaker: Neal Katz (U Massachusetts)
Date: Apr 12, 2018
- 45: Energy-momentum tensor from the Yang-Mills gradient flow ”
Speaker: Hiroshi Suzuki (Kyusyu U)
Date: Apr 12, 2018
- 46: Topologically twisted index on Riemann surface and Bethe ansatz of q-boson ”
Speaker: Yutaka Yoshida (Kavli IPMU)
Date: Apr 12, 2018

- 47: Galaxy clustering: an effective field theory approach ”
Speaker: Fabian Schmidt (MPA)
Date: Apr 13, 2018
- 48: Making Galaxy Formation Great Again ”
Speaker: Neal Katz (U Massachusetts)
Date: Apr 17, 2018
- 49: Quantum Spectral Curve (QSC) for bi-scalar fishnet theory ”
Speaker: David Grabner (King s College London)
Date: Apr 17, 2018

Personnel Changes

Changes of Deputy Directors

Misao Sasaki was appointed to Kavli IPMU Deputy Director on April 1, 2018.

Kavli IPMU Professor Yoichiro Suzuki stepped down as Kavli IPMU Deputy Director on March 31, 2018.

Appointment of a New PI

Kavli IPMU Professor Tadayuki Takahashi was appointed to a Kavli IPMU Principal Investigator on April 1, 2018.

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 William Donovan [November 1, 2014 - May 31, 2018] moved to Yau Mathematical Sciences Center, Tsinghua University in China as a tenure-track Assistant Professor.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Anupreeta More [September 1, 2012 - June 30, 2018] moved to Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics in India as a Data Scientist.

λ -Adic Topology

Alexander A. Voronov

Professor, School of Mathematics, University of Minnesota
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

Would not it be great to live in a world in which every series $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converges, as long as $a_n \rightarrow 0$? No failing those Calculus I tests, to start with! Well, this world is out there, and mathematicians and physicists alike have been using it at their convenience. This world is the world of λ -adic topology. In a simple case, this is a topology on the space $\mathbf{C}[\lambda]$ of polynomials in λ with complex coefficients. The λ -adic topology is defined by the following basis of neighborhoods of 0: $\mathbf{C}[\lambda] \supset \lambda\mathbf{C}[\lambda] \supset \lambda^2\mathbf{C}[\lambda] \supset \dots$. If you complete this topological space, i.e., add the limits of all Cauchy sequences to it, you will get the space $\mathbf{C}[[\lambda]]$ of formal power series in λ . Every series $\sum_{n=0}^{\infty} a_n\lambda^n$ for any complex a_n will then converge in this space, actually because $a_n\lambda^n \rightarrow 0$ as $n \rightarrow \infty$ in the λ -adic topology. Given a prime number p , the ring of p -adic numbers \mathbf{Q}_p may be obtained via a similar construction. A p -adic number is a formal power series $\sum_{n=k}^{\infty} a_n p^n$ with $a_n = 0, 1, \dots, p-1$ and k is some integer, which could well be negative. There is also an inverse-limit construction of the ring of power series and p -adic integers \mathbf{Z}_p , which is illustrated below.

Formal power series: $\mathbf{C}[[\lambda]] = \varprojlim \mathbf{C}[\lambda] / \lambda^n \mathbf{C}[\lambda]$
 Formal Laurent series: $\mathbf{C}((\lambda)) = \varinjlim^N \lambda^{-N} \mathbf{C}[[\lambda]]$, $N > 0$
 For $f_0 = f_0(\lambda), f_1 = f_1(\lambda), \dots$ in $\mathbf{C}[[\lambda]]$, $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$
 converges in $\mathbf{C}[[\lambda]]$ as long as $f_n(\lambda) \rightarrow 0$ in $\mathbf{C}((\lambda))$
 For example, $\sum_{n=0}^{\infty} a_n \lambda^n$ converges for any a_0, a_1, \dots in \mathbf{C}
 For a prime p : $\mathbf{Z}_p = \varprojlim^N \mathbf{Z} / p^n \mathbf{Z}$ p -adic integers
 $\mathbf{Q}_p = \{ \frac{x}{p^N} \mid x \in \mathbf{Z}_p, N > 0 \}$ p -adic numbers

近況

Kavli IPMU 機構長

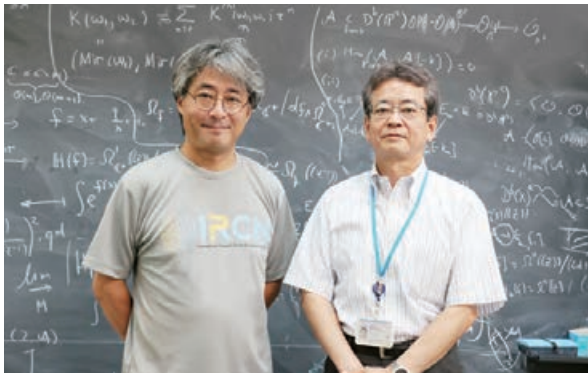
村山 齊 むらやま・ひとし



5月28日：東京大学国際高等研究所ニューロインテリジェンス国際研究機構 (IRCN) のオープニングセレモニーで挨拶。写真提供：IRCN。



6月11日：ボン大学の哲学者マルクス・カプリエル教授(中央)、Kavli IPMUの野村泰紀主任研究員(右)とKavli IPMU News 向けの座談会(次号掲載予定)。



6月13日：柏キャンパスを視察した伊藤洋一 文部科学審議官と共に (p. 37 参照)。この日、村山機構長は定番の IPMU Tシャツでなく IRCN Tシャツを着用。



6月17日：Kavli IPMUで行われたJST-RISTEX「科学技術イノベーション政策のための科学」横山プロジェクトシンポジウム「数物系女子はなぜ少ないのか」出席。



6月26日：高エネルギー加速器研究機構(KEK)の SuperKEKB 初衝突記念式で祝辞(ビデオメッセージ)。写真提供：Zoltan Ligeti。



6月28日：ベルリンで行われたフンボルト財団年次大会で研究賞を受賞 (Kavli IPMU News No. 40, p. 70参照)。左は Hans-Christian Pape フンボルト財団理事長。右は Michael Meister ドイツ連邦文部科学省政務次官。Photo: Humboldt Foundation / David Ausserhofer。

衝突する銀河に見られる宇宙の「花火」

銀河は、数10億年にわたる宇宙史のなかで、定期的に自ら蓄えていたガスから星を形成し、成長してきました。時には、「スターバースト」と呼ばれる激しい星形成現象が起きますが、通常これは巨大銀河の衝突（図1参照）によるものです。（多くの場合、衝突した銀河は最終的に合体します。）こういった華々しい現象は比較的短寿命（～1億年）で、あっという間に終わってしまう日本の満開の桜シーズンのようにです。新しい星の生成に加えて、銀河の衝突合体は効率的に銀河中心部へガスを供給することを可能にし、銀河中心に超巨大ブラックホールを成長させ、また近傍宇宙の巨大銀河の普遍的な特徴である銀河中心部の星集中（バルジ）を形成します。

天体物理学者は専門が理論か観測かによらず、スターバースト現象を、星間物質の冷たいガス成分のより極端な物理条件（密度、温度、圧力）を研究するための重要な実験室と考えています。なぜ各々の銀河が異なる生成率で星を形成してきたかを理解するために、銀河内部から銀河全体にわたり存在する、星生成の元となる分子ガスの性質を測定することが重要です。

地球からの距離が50メガパーセク（1億6千3百万光年）までの近傍宇宙においては、私たちは銀河間の相互作用と合体が銀河の星形成率に与えるインパクトを明確に理解しています。もっと遠方の若い宇宙では、各々の銀河は分子ガスをより多く蓄えており、銀河の衝突合体の助けなしに、容易に星を形成できる可能性

があり、近傍宇宙とは状況は異なるかもしれません。ごく最近まで、さらに遠い銀河の分子ガスの性質を研究するのは非常に困難なものでした。

ALMAが開いた遠方のスターバースト銀河観測の新しいウィンドウ

チリのチャナントール高原に設置された望遠鏡、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）により、今や、最遠方まで、また従来よりも小さな物理的スケールでの銀河の分子ガス（およびダスト）の研究が可能となっています。これは干渉計として連動する66基のアンテナを、最大で直径16 kmの範囲内に展開することで、実質的に大きな集光面積と、9.6 mmから0.3 mmまでの広い波長域（あるいは31 GHzから1000 GHzの周波数帯域）に渡り、最高の空間解像度のイメージングが達成されたためです（図2参照）。

ALMAは国際的に運営される観測所で、日本が主要な貢献をし、台湾、韓国と共に東アジア参加国グループを構成しています。すばる望遠鏡による広天域かつ深い（暗い）サーベイにより発見されている宇宙初期の大規模構造に存在する遠方のクェーサーあるいは銀河など、興味ある天体を詳しく調べることをALMAは可能にします。

遠方のスターバースト銀河に関しては、干渉計による過去の研究対象は最も明るいものに限られており、また十分な空間分解能が得られませんでした。しかし、



図1 ハッブル宇宙望遠鏡により観測された、相互作用している銀河ペアArp 87の画像（宇宙望遠鏡科学研究所（STSCI）提供）。

ALMA の登場により、私たちは遠方の銀河内のガスの空間分布と速度分布を容易に調べることができます。

遠方にある本物のスターバーストを探す

ALMAを最大限活用するには、まず天域のなかでどの銀河がスターバーストの段階にあるか同定する必要があります。これには、同じ天域を多波長で観測し、各々の銀河の現在（銀河の赤方偏移）また過去における形成史を明らかにする測定をすることが最善の策です。限られた観測施設へのアクセス、また限られたマンパワーでこのような多波長観測データを集めるためには、（各国の望遠鏡にアクセスがある）多国籍の国際共同研究が効果的です。本稿では、私たちのグループが関わる COSMOS 天域での成果について述べてみたいと思います。COSMOS 天域とは天球上で満月の約9倍の連続的な領域で、電磁波のスペクトルの大部分をカバーする地上（例えば VLT、すばる、Keck）と

宇宙空間（例えば、*Hubble*、*Spitzer*、*Herschel*）の多数の望遠鏡によってサーベイされてきました。日本は COSMOS サーベイの重要な参加国であり、超広視野イメージングカメラ（Hyper Suprime Cam）および数年後に続く主焦点超広視野多天体分光器（Prime-Focus Spectrograph）を搭載するすばる望遠鏡は、次世代の COSMOS 天域の可視光サーベイをリードすることが確実です。

最初のステップとして、各々の銀河の星の形成率を（通常は1年あたりに形成する星の総質量として）評価することが必要になります。星は通常は密度の高い分子ガスの領域で生成されるため、その領域はダストで覆われており、可視光または紫外線の放射は吸収され、波長の長い赤外線として再放射されます。ダストで隠された星形成を調べるため、代わりに赤外線波長での銀河の明るさを星形成率の尺度として用います。この目的には、地上での明るい赤外線放射のため、数ミクロンより長い波長での赤外線宇宙望遠鏡（すなわ

ち *Spitzer*, *Akari*, *Herschel*) の観測が必要となります。過去10年あるいはそれ以上の研究により、可視光のデータのみでスターバースト段階にある銀河の星の形成率を評価した場合、赤外線で評価した値よりも一桁もずれてしまうことがあると分かりました。

固有の星形成率を測定するためには、銀河までの距離を知る必要があります。*Herschel* あるいは *Spitzer* の装置は遠方銀河の「見かけ」の明るさだけを測定し、固有の明るさを測ることができないためです。さらに、後に述べるように、各々の銀河までの距離は適切な波長帯で ALMA の測定を実行するためにも必要です。銀河の距離を測ることは、銀河からの光を可視光あるいは近赤外線の波長帯で分散させてスペクトル上の特徴を捉え、その銀河の赤方偏移を測ることで可能になります（膨張宇宙のモデルを仮定すれば、銀河の赤方偏移からその銀河までの距離を推定することができます）。

私たちは、すばる望遠鏡で60夜を費やし、ファイバー多天体分光器 (FMOS) で3500個以上の星形成をしている銀河を分光観測しました。その結果、電離水素由来の H α 輝線などを検出し、赤方偏移が1.4 ~ 1.7の範囲にある1500個近くの銀河について、その

赤方偏移を測定することができました。このプロジェクトは日本、ヨーロッパ、アメリカの研究者による共同研究で可能となりました。将来の技術的進展のために、すばるの主焦点超広視野多天体分光器 PFS を用いれば、たった数夜で同じ成果が得られるでしょう。それでも、私たちは（赤方偏移を測定した1500個の銀河から）*Herschel* 宇宙望遠鏡により遠赤外線波長帯で検出され明るさが測定された約150個の銀河のサンプルを作ることができました。このユニークな銀河サンプルにより、それらの銀河の固有の星形成率を正確に推定することができ、私たちは典型的な銀河より十分に高い星形成率を示すスターバースト銀河を選び出すことができました。

一酸化炭素をトレーサーとした分子ガスの観測

本物の高赤方偏移のスターバースト銀河のサンプルが手に入ったので、星形成をしている領域の分子ガスの放射を検出するために適した波長帯に調整した ALMA を使い、スターバースト銀河を調べることができます。水素分子 (H $_2$) が主成分である銀河の分子ガスの全成分を推定するためには、これまでは一酸



図2 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA; credit: ESO)

化炭素 (CO) の観測が用いられてきました。これは、水素分子との衝突で励起された高い回転準位の一酸化炭素分子が低い回転準位に遷移する際に電磁波を放射するためです。異なる準位への励起は、温度と密度の違うガスの存在を示します。周波数 (波長) の関数として異なる空間分解能を有する望遠鏡 (ALMA) を用いることから、高次の励起の輝線は、対応する周波数が高いため、より高い空間分解能でそのガス分布を明らかにすることができます。私たちの目的は、与えられた回転準位間の遷移 (例えば回転準位 $J = 2$ から 1 への遷移; 静止周波数 = 230.54 GHz) の CO 輝線の光度を ALMA で測定し、その明るさを分子ガスの総質量に換算するという方法を用いることです。一酸化炭素の光度とガスの質量の関係については、私たちの天の川銀河、低赤方偏移および高赤方偏移の銀河に存在する分子雲の観測に基づき、知見が得られていま

す。系外銀河については、銀河内のガスの質量を一酸化炭素の光度とは独立に測定する必要があります。この CO 光度とガス質量の関係は、高赤方偏移のスターバースト銀河とは大きく異なっている可能性があり、またその関係のそもそもの精度・信頼性も含めて、現在かなりの論争が進行中です。

高赤方偏移での銀河衝突により引き起こされる典型的スターバースト

Kavli IPMUで、私たちは赤方偏移 $z \sim 1.6$ (宇宙年齢が現在の 30 % だった時代) の 123 個のスターバースト銀河からの CO ($J = 2-1$) 遷移の全輝線放射を検出するため、ALMA の観測を実行しました。これらの銀河サンプルは、星形成率がもっと典型的な銀河の 4 倍以上という条件で選ばれたもので、1 年当たり形成される星の質量が太陽質量のほぼ 100 倍から 700 倍の

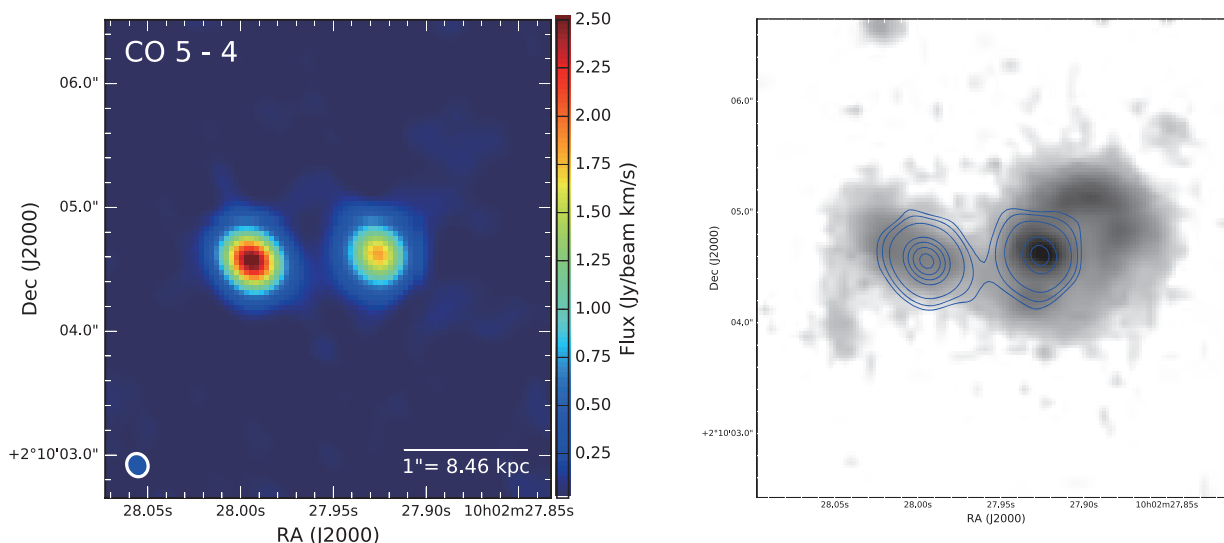


図3 (左) ALMAで観測した PACS-787 の2つの銀河からの CO(5-4)遷移の輝線放射の分布。(右) ハッブル宇宙望遠鏡の広視野カメラ3を用いて撮像した赤外線イメージ。青い等高線はCOの分布を示す。

範囲にも及ぶ、非常に活発なスターバースト銀河です。一酸化炭素の輝線は1個の銀河を除き有意に検出され、これらのスターバースト銀河に大量のガス貯蔵(燃料)が存在することを明らかにしました。

一酸化炭素からの輝線が最も明るい銀河は、星形成率が最も高く1年当たり太陽質量の720倍という銀河、PACS-787であったことは、驚くべきことではないかもしれません。しかし、高赤方偏移宇宙で期待される、ガスを豊富に含む銀河同士の衝突合体の数値シミュレーションは、PACS-787で見られるような爆発的な星形成を再現することはできず、どのような物理現象が爆発的な星形成を誘発しているのか謎が深まり、ますます私たちの興味をかき立てました。

この疑問に迫るために、私たちは静止周波数が576.27 GHzのCO(5-4)遷移の輝線放射を検出することにより、より高い空間分解能でPACS-787を再観測しました(図3左参照)。驚いたことに、その一酸化炭素の輝線は8.6キロパーセク離れた2つの異なる銀河から放射されていることが判明しました。PACS-787

の非常に高い星形成率から、シミュレーションに見られるように、2つの銀河が合体する最終段階に近いと予想していたのですが、そうではなく、2つの銀河はまだ相互作用の開始段階にあることが分かったのです。最近ハッブル宇宙望遠鏡で撮像した赤外線イメージ(図3右参照)によると、潮汐力により星がはぎとられ2つの銀河の間にブリッジを形成している形跡があり、またそれは一酸化炭素の輝線放射でも明らかであることから、私たちは進行中の2つの銀河の衝突のはっきりした証拠を得たのです。

これらの観測に基づき、PACS-787の高い星形成率は、ガスを豊富に含む2つの銀河の相互作用とそれぞれの銀河の運動の軌道がうまく組み合わせさり、それぞれの銀河の中心領域へのガスの流入が誘発され、それぞれの銀河で爆発的なスターバーストが起こったのではないかと考えています。私たちはさらに、各々の銀河からのCO輝線が回転運動することを発見しました。(回転速度は重力によって起こるので)これはCO輝線の光度とは独立にガス総質量を知る手がかりになります。

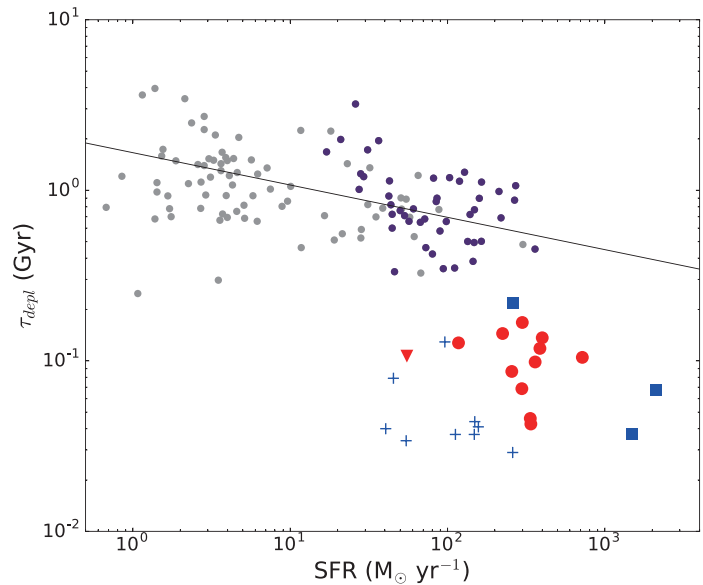


図4 星形成率 (SFR) と銀河のガスを完全に消費するまでの時間 ($t_{\text{depl}} = M_{\text{gas}} / \text{SFR}$) の関係。色つきの大きな記号はスターバースト銀河を示す (赤い点は本稿で述べたALMAのサンプル)。黒い小さな点はもっと典型的な星形成銀河のサンプルを示す (直線はそれらのベストフィット)。

遠方のスターバーストのエンジンは高効率

遠方のスターバースト銀河の星形成率が、(典型的な星形成銀河よりも) 大きなガス質量によるものか、ガスから星への転換効率が (典型的な星形成銀河よりも) 高いことによるのか、あるいはその2つの組み合わせによるものなのかを決めることは非常に面白い問題です。これらのシナリオを区別するため、私たちは適当な関係を使い、12個のスターバースト銀河のサンプル全部について一酸化炭素の光度を分子ガスの質量に換算してみることにしました。効率に関しては、ガスの質量を星形成率で割ったものを銀河がガスを全て消費するのに必要な時間スケールとして用います。結果として、効率的に星を形成している銀河では短時間でガスが枯渇することを示唆することが分かりました。

図4から、スターバースト銀河のガスが枯渇するまでの時間は5千万年から1億5千万年で、もっと典型的な星形成銀河の10億年程度に比べて著しく短いこと

が分かります。星を形成する時間スケールがこのように違うことは、星形成が非常に速く進行するのに適した条件を誘発する銀河の衝突合体のような機構が、スターバーストを引き起こすきっかけになっているのではないかということを示すと考えられます。しかし、まだ高赤方偏移のスターバースト銀河 (およびもっと典型的な銀河) について、一酸化炭素の光度をガスの質量に換算するために必要な正確な比例係数の値に不定性が残っているため、論争は完全には終わっていません。

ALMAを用いてもっと高い分解能で観測を行い、銀河内の星形成領域の物理的特徴を100パーセク程度までの精度で決定することにより、さらなる進展が得られることでしょう。さらに、すばる望遠鏡のサーベイから得られる高赤方偏移の銀河の新しいサンプルを用いることにより、私たちの宇宙の星形成史の理解が大きく進展することも間違いありません。

Our Team

佐々木 節

ささき・みさお 専門分野:理論物理学

Kavli IPMU 副機構長

私の主な研究分野は一般相対性理論と宇宙論で、特に力を入れて研究しているのはインフレーション宇宙の理論です。観測宇宙論の急速な進歩のおかげで、インフレーション宇宙における真空の線形揺らぎだけでなく、非線形、非ガウスの揺らぎの効果も検出可能な時代が近づいています。しかしながら、インフレーション宇宙に関する我々の理解は依然としてかなり低く、到底定量的理解からは程遠いレベルにあります。そこで、私が現在関心を持っているのは、異なるモデル間の違いを区別し、インフレーションの背後にある物理を特定し、可能であればインフレーション宇宙の先にある物理の痕跡を見つけることができる新しい観測を探ることです。特に、観測ツールとしての電磁波に加えて、最近直接検出された重力波が、今後の宇宙論、中でも初期宇宙物理の探査に中心的な役割を果たすであろうことを踏まえて、現在私は「重力波宇宙論」に取り組んでいます。



中島 啓

なかしま・ひらく 専門分野: 数学

Kavli IPMU 教授

私は、理論物理学に起源を持つゲージ理論を数学的に研究することを中心テーマとしています。特に、ゲージ理論に現れるさまざまなモジュライ空間のホモロジー群を幾何学的表現論とよばれる手法を用いて研究しています。ゲージ理論の解析と考えられるだけでなく、カツ・ムーディー・リー環や、その変形である量子群など、表現論でよく研究されているものが通常とは異なる実現のされ方をしますので、表現論としても興味深い視点を提供します。最近、この手法を用いて3次元の超対称性ゲージ理論に現れるクーロン枝と呼ばれる空間の数学的な定義を与え、その性質やその非可換変形（量子化）の表現論を調べています。



武田 伸一郎

たけだ・しんいちろう 専門分野: 実験物理学

Kavli IPMU 助教

自分達の手で装置を作り上げることは、大変な苦勞を伴いますが、新しいデータを初めて手にするとき、いつも新鮮な驚きに出会うことができます。硬X線・ガンマ線のイメージング技術を発展させ、未知の現象に測定のエラーを入れることが、私の研究のモットーです。これまで、多くの仲間と共に、宇宙高エネルギー天体用の高感度ガンマ線観測装置の開発、原発事故で飛散した放射性セシウムの可視化実証実験などに取り組んできました。そして、ここ2年間は、沖縄の地にて、生体を対象とした放射性プローブの高精度3Dイメージング装置の開発と、マウスを用いた実証実験を率いてきました。私は、ここ Kavli IPMU で、生体内の



がん組織の複雑性に、硬X線・ガンマ線のイメージングの力によって挑みたいと思っています。第一号のプロトタイプ機が、今、柏第二総合研究棟内のIPMU実験室にて稼働中です。ぜひ、お立ち寄りください!

Our Team

吉田 豊 よしだ・ゆたか 専門分野:理論物理学

Kavli IPMU助教

私の研究の興味は、超対称局所化の方法に基づく場の量子論の厳密な結果を発展させること及び超対称場の量子論における双対性、非摂動効果、数学的側面を研究することです。局所化の計算を用いることにより、私は2次元における位相的ツイストされたシグマ模型における世界面インスタントン補正などの非摂動効果、及び、3次元の超対称チャーン・サイモンズ・マター理論間における双対性を主に研究しています。



メティン・アタ Metin Ata 専門分野:天文学

博士研究員

私の研究は、観測データと解析的な手法などを用いる宇宙論的な大規模構造の解析とモデル構築を専門としています。

宇宙がこれまでに経験してきた全ての時代から、我々の知る現在の宇宙に導いた力学への洞察を得ることができます。私は、高赤方偏移の時代に形成された宇宙構造を理解し、モデルの予言をテストしたいと思います。また、私は機械学習の開発にも興味があり、



できるだけ活用してみたいと考えています。

松村 英晃 まつむら・ひであき 専門分野:実験物理学

博士研究員

私のこれまでの研究は、X線を用いた超新星残骸の観測的研究、およびX線CMOSセンサーの開発研究です。観測的研究については、超新星残骸の熱的プラズマに興味があり、冷たい分子雲と熱いプラズマが相互作用した場合に生じる過電離プラズマを専門としています。開発研究についてはSilicon on Insulator技術を用いたイベント駆動型ピクセル検出器を開発し、次世代のX線天文衛星搭載に向けて準備しています。今後



はX線帯域に限定せず、電波やガンマ線を用いた観測・検出器開発も積極的に取り組むつもりです。

皮石

ピー・シー 専門分野: 天文学

博士研究員

初期宇宙論、特に宇宙論的摂動の生成と進化を主として研究しています。微小なスケールの量子ゆらぎに由来する宇宙論的摂動は、あらゆるスケールに引き伸ばされ、宇宙マイクロ波背景放射、宇宙の大規模構造、原始ブラックホール、また原始重力波のような巨視的な現象の起源となっています。私は、自然がどのようにして宇宙の最大と最小のスケールを結びつけるかを理解しようと試みています。



社本 陽太

しゃもと・ようた 専門分野: 数学

博士研究員

私は、ホッジ理論とミラー対称性に興味をもって研究を行なっています。その中でも特に、不確定特異型の微分方程式が自然に現れる問題に関心があります。最近の研究では、ファノ多様体とランダウ・ギンツブルグ模型のミラー対称性に関連して、ランダウ・ギンツブルグ模型に対するカジャルコフ・コンツェビッチ・パンテフが提唱した二つの予想についてホッジ理論的な十分条件と例を与えました。現在は、この結果を用



いて、ランダウ・ギンツブルグ模型のモジュライ空間上にフロベニウス多様体の構造を与え、それを研究することに挑戦しています。

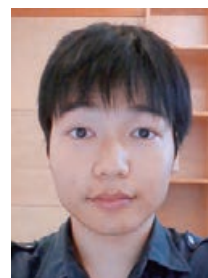
高倉 理

たかくら・さとる 専門分野: 天文学、実験物理学

博士研究員

私はこれまで、チリのアタカマ砂漠で宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測を行っている POLARBEAR 実験に参加してきました。特に、検出器の低周波数ノイズの低減という、インフレーション起源 Bモード観測にとって非常に重要な仕事を担当しました。連続回転半波長板を用いた偏光変調装置を開発し、それにより POLARBEAR の大角度観測を可能にしました。

これからは POLARBEAR の次世代実験である Simons



Array 実験に携わっていくとともに、Kavli IPMU で行っている LiteBIRD 衛星用の偏光変調装置の開発にも協力していきたいと考えています。

Our Team

フォーカス・ウィーク 「量子重力とホログラフィー」

山崎 雅人 やまざき・まさひと

Kavli IPMU 准教授

我々のフォーカス・ウィーク「量子重力とホログラフィー」はカブリIPMUにて2018年4月2日から6日まで開催されました。

量子重力の理論を見つけることは、理論物理学の分野においてここ数十年最も重要なトピックの一つであり続けています。超弦理論はその有望な候補であると広く信じられていますが、超弦理論のコミュニティの主たる焦点となってきたのは、超弦理論やホログラフィーを他の分野（例えばクォーク・グルーオンプラズマ、物性、数学）に応用することであり、必ずしも量子重力そのものではありませんでした。この状況は近年急速に変わってきています。多くの研究者が量子重力の分野に戻ってきており、新しい考えを持ち込んできた他（例えば量子情報や量子重力との関係、SYK模型、ER=EPR対応やドジッター空間上の超重力理論など）、昔ながらの難問を解くことができる新しいツール（例えばホログラフィックなエンタングルメントエントロピー、可積分系を用いたツール、コンフォーマルブーツストラップや格子状のスーパー・ヤンミルズ理論のシミュレーション）を持ち込んでいます。

このような状況をさらに確かなものにするために、量子情報の様々な分野で研究を行うトップ研究者を集め、相互理解を深め、次なる方向を探ることが望ましいとともに、また時宜を得たものでもありました。これが今回のフォーカス・ウィークの動機でした。

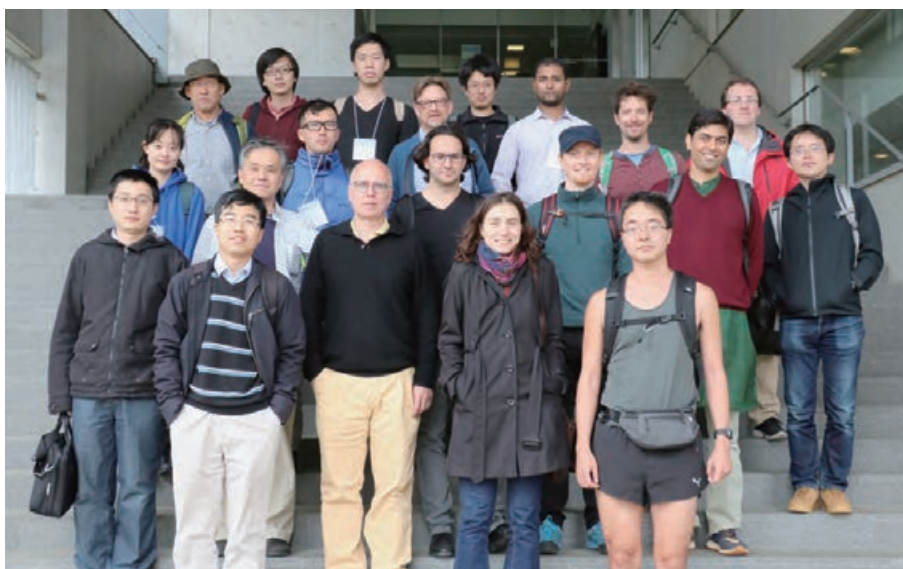
組織委員は国際的な顔ぶれで、Tatsuo Azeyanagi、

Valentina Forini、Masanori Hanada、Bert Verhagen、Nico Wintergerstと筆者から構成しました。

招待講演者はMonica Guica、Yuta Hamada、Song He、Simeon Hellerman、Petr Horava、Jared Kaplan、Ami Katz、Yasunori Nomura、Hirosi Ooguri、Xiaoliang Qi、Suvarat Raju、Bo Sundborg、Nico Wintergerstの各氏でした。また、公募により講演者を募りYuhma Asano、Kanato Goto、Goro Ishiki、Anosh Joseph、Rene Meyer、Max Riegler、Takahiro Uetoko、Masataka Watanabe、Yun-Long Zhangの各氏による講演がありました。

今回のフォーカス・ウィークは実験的に次の二つを組み合わせる方式をとり、最初の三日はゆったりしたスケジュールで、議論のためにたくさんの時間を設けた一方、最後の二日間はより集中的に会議形式で行いました。

筆者はこのフォーカス・ウィークで色々な専門家と議論した他、今後のプロジェクトのアイデアを得るなどし、楽しい時を過ごしました。また、多くの参加者からは今回のフォーカス・ウィークについて好意的なフィードバックを得ました。我々のフォーカス・ウィークの規模は限られたものではありませんが、これをインスピレーションにして量子重力とホログラフィーの分野にさらなるワクワクさせるような活動が生まれることを期待しています。



Joint Kavli IPMU - ICEPP Workshop on New Directions for LHC: Run 2 and Beyond

白井 智 しらいさとし

Kavli IPMU助教

2018年6月18日にKavli IPMUと東京大学素粒子物理国際研究センター（ICEPP）との合同ワークショップ“New Directions for LHC: Run 2 and Beyond”が開催されました。Kavli IPMUとICEPPの合同ワークショップは今回が初めてです。

大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は素粒子物理学にとって最も重要な実験です。これまでに標準模型のヒッグス粒子は発見され、その質量や性質などが詳しく調べられています。その一方、標準模型を超えた新物理に関しては未発見です。このワークショップでは、これまでのLHCの実験結果の報告、及びそれらを踏まえた将来的な発展についての議論が行われました。

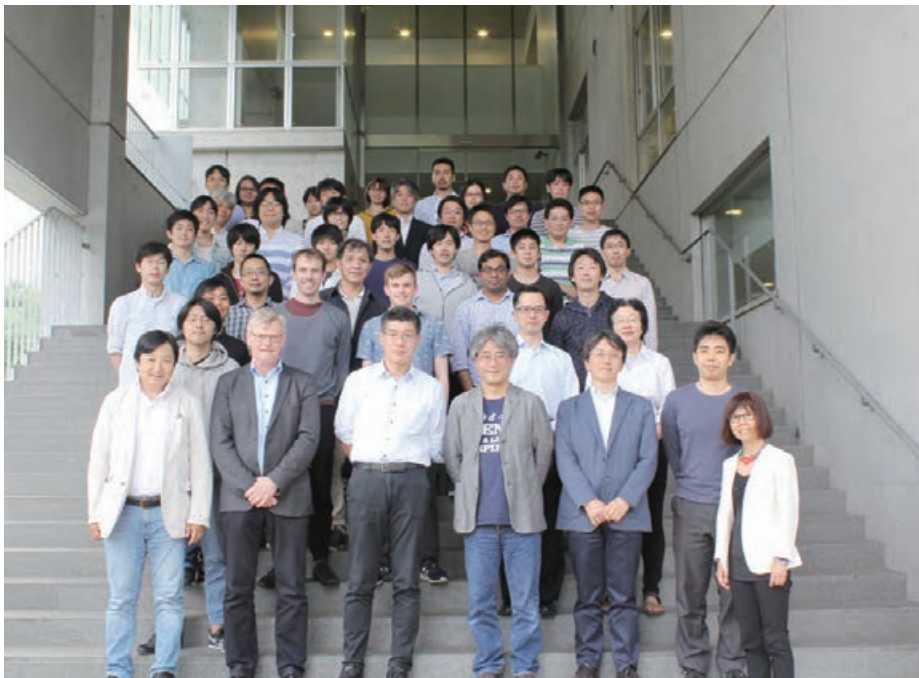
まず始めに、ATLAS実験のスポークスパーソンであるKarl JakobsがLHC実験におけるヒッグス粒子の測定と新物理探索に関する最新の結果を報告し、将来の高輝度LHCにおける展望を議論しました。続いて行われた講演の講師と内容は次の通りです。白井：ヒッグス粒子発見を踏まえた超対称模型について述べ、暗黒物質探査における長寿命粒子の重要性を強調。野尻美保子：新物理の発見において重要な役割を果たす単ジェットシグナルのための精密計算についての報告。寺

田隆広：宇宙論における原始重力波スペクトルを準解析的に計算するための手法を報告。竹内道久：将来のLHCにおけるヒッグス粒子対生成と超対称性模型の暗黒物質探査に関する議論。Junping Tian：現在計画中の国際リニアコライダー（ILC）がヒッグス粒子の精密測定について果たす役割についてのレビュー。

パネルディスカッションでは、将来の高輝度LHCがどのように物理を探るべきか、ILCやSuperKEKBやハイパーカミオカンデなどがどのような意義を持つかが議論されました。特にヒッグス粒子やトップ・クォークの精密測定について、LHCとILCがどのような手法を取るのかと、これらの精密測定の物理的意義などが熱心に議論されました。

残念なことに、当日の朝に起きた大阪を震源とした大地震のため、予定されていた兼村晋哉と大村雄司の講演はキャンセルとなりました。

理論屋、実験屋を含む幅広い分野の研究者が参加し、様々な視点から議論が行われたこのワークショップは、非常に実りの深いものでした。このような合同ワークショップが再び開催されることを望みます。



WDVV代数とは?

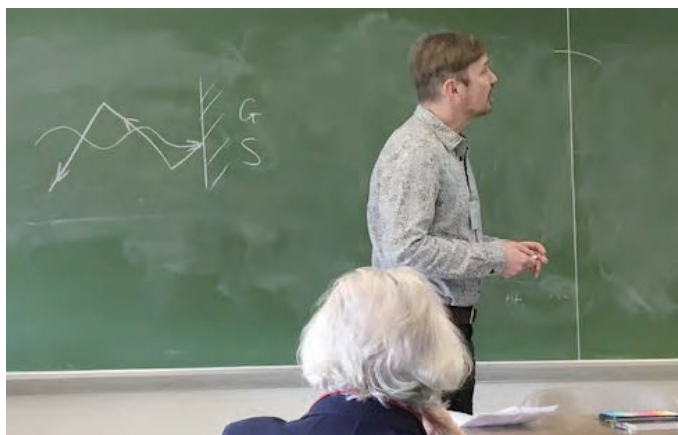
アレクサンダー A. ボロノフ

ミネソタ大学数学科教授、Kavli IPMU 客員上級科学的研究員

「ウィッテン-ダイクグラフ-フェアリンデ-フェアリンデ (WDVV) 代数とは何ですか?」とよく聞かれます。私はいつも喜んで説明します。何と言ってもその定義は WDVV 代数が役に立つのと同じくらい美しいものです。そして私は一度見たら決して忘れないような覚えやすい規則をこの定義に組み込んだのです! では、始めましょう。「WDVV 代数」とは、 $n \geq 2$ であるような整数 n に対して一つ定まる次に述べるような結合則を満たす次数 $2(n-2)$ の次数付対称多重線型演算 (v_1, v_2, \dots, v_n) をもつ次数付きベクトル空間 V です。 V 上の可換積 (v_1, v_2) の形式的変形を “ウィッテン” $w \in V$, “ダイクグラフ” $d \in V$, “フェアリンデ” 兄弟全員 $v \in V$ に対して次のように定義します。

$$(w, d)_v := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} (w, d, v, v, \dots, v) \lambda^k, \quad v \text{ は } k \text{ 番目の項で } k \text{ 回現れる。}$$

ここで λ は形式的変数です。¹ すると、条件は変形双一次積 $(w, d)_v$ が結合則を満たすこととなります。どうやら名前に関連してちょっとした議論があり、この構造は「超交換代数」² と呼ばれることが多いようです。また V 上の「線形フロベニウス多様体」の構造と同値です。



写真提供: Takashi Kimura ポストン大学教授。

¹ 裏表紙の「λ進トポロジー」参照。

² Ezra Getzler, *Operads and moduli spaces of genus 0 Riemann surfaces. The moduli space of curves (Texel Island, 1994)*, 199–230, Progr. Math., 129, Birkhäuser Boston, Boston, MA, 1995.

News

大栗博司主任研究員、ハンブルク賞を受賞

2018年5月24日、カリフォルニア工科大学ウォルター・パーク研究所長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる大栗博司さんが、ハンブルク賞を受賞することが発表されました。ハンブルク賞は、ドイツのヨアヒム・ヘルツ財団 (Joachim Herz Stiftung) が、ハンブルク大学およびドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) と共同で授与する賞です。前年までは、量子情報、量子光学、量子多体系などへの理論的貢献をもたらした研究者を顕彰するものでしたが、今年から対象分野が理論物理学全体に広げられると共に、賞金額が4万ユーロから10万ユーロに増額され、ドイツで賞金額の最も高い科学賞のひとつになりました。授賞式は2018年11月7日にハンブルクプラネタリウムで行われる予定です。



大栗 博司さん

伊藤洋一 文部科学審議官、Kavli IPMU を視察

2018年6月13日、文部科学省の伊藤洋一文部科学審議官と随行の細野亮平研究振興局学術機関課大学研究所・研究予算総括係長、西田洋輔同局振興企画課学術振興係専門職が柏キャンパスを視察しました。Kavli IPMU はティータムにに合わせて視察し、その場で村山機構長から機構の概要説明を受け、また研究者と歓談されました。(p. 23の

写真参照。)

Belle II 実験のためのシリコンバーテックス検出器第4層ラダーの製作完了

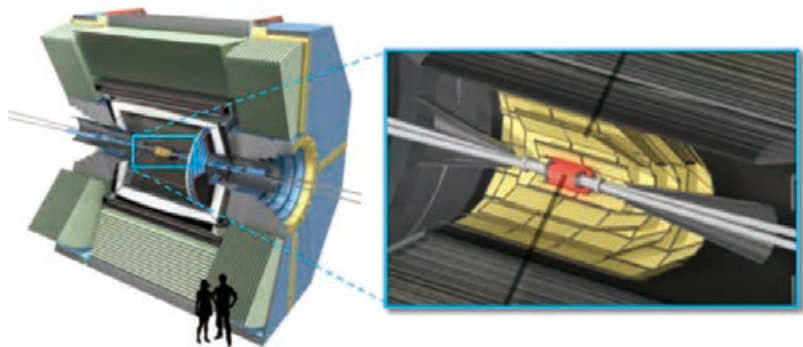
Kavli IPMUは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子-陽電子衝突型加速器 SuperKEKB で行われる Belle II 実験に参加し、衝突点に位置する Belle II 測定器を構成する7種類の検出器のうちの一つであるシリコンバーテックス検出器 (SVD) の第4層ラダーの製作を担当してきました (Kavli IPMU News No. 37, p. 32-35参照)。

SVDは衝突点で引き起こされる素粒子反応で発生する荷電粒子の通過位置を高精度で決定することができ、特にB中間子などの短寿命の素粒子の崩壊点位置検出器 (VXD) の一部として機能します。もし素粒子の標準理論では説明できない新しい物理が存在すると、これらの短寿命粒子の崩壊の様子が標準理論の予想とは異なることがあると考えられているため、SVDは

Belle II 実験において大変重要な役割を果たします。

Kavli IPMU では2011年から SVD 第4層ラダーの開発と製作に着手しましたが、2016年1月に記念すべき「最終モックアップラダー」の製作に成功し、ラダー製作のすべての工程が完成していることを確認しました。2016年3月には電氣的に完全に動作する初めてのラダーとなる「プロトタイプラダー」を完成させ、2016年5月からラダーの量産に移行し、この度2018年5月24日付でラダー 16本 (および予備3本) の製作が完了しました。

SuperKEKBでは、2016年2月からの衝突なしでビームを調整するフェーズ1運転、2017年春の Belle II 測定器の衝突点へのロールイン、今年3月19日から電子リングと陽電子リングに安定にビームを蓄積するフェーズ2運転での調整を経て、4月26日に Belle II 測定器による初の電子・陽電子の衝突が観測されました。今後7月までフェーズ



SVDは、Belle II 測定器の中心部に設置される。赤色部分は、最内層のピクセル型検出器。黄色部分が SVD 検出器で、4層からなる。Kavli IPMU は4層目の製作を担当。なお、2層目のラダーを担当したインドグループも、Kavli IPMU 棟内に設置されたクリーンルームの一部で製作を行った。(Credit: Belle II Collaboration / Rey.Hori)

Tea Break

News

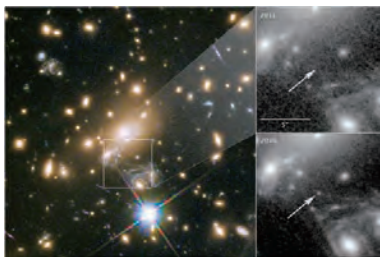
2運転を継続して SuperKEKB の調整と Belle II 測定器でのデータ収集が続く予定です。

Kavli IPMU が担当した SVD 第4層のラダーは、他の層のラダーと併せて KEK での調整や性能試験を経て、今年12月には Belle II 測定器の中心部に設置される予定です。2019年2月からは、SVD を含む全種類の検出器が稼働した状態で Belle II 実験の物理データ取得を行う SuperKEKB のフェーズ3運転が開始され、いよいよ本格的な物理データの解析が始まる予定です。

最遠方の単独の星を観測

東京大学理学系研究科助教で Kavli IPMU 准科学研究員を兼ねる大栗真宗さんが参加している国際共同研究チーム（リーダーはミネソタ大学の Patrick Kelly 氏）は、重力レンズの増光現象を利用することにより、90億光年離れた単独の星を観測することに成功、これまでの同種最遠方記録を大幅に更新しました。

ごく近傍の銀河を除き、銀河を構成する個々の星を分解して観測することは、通常、望遠鏡の感度や分解能の限界により不可能です。しかし、重力レンズの集光現象を利用すればこの限界を克服でき、原理的には遠方の銀河内にある単独の星を観測することも可能となります。そのような現象はこれまで発見されていみせんでしたが、今回、国際共同研究チームは、まさにこのような現象を初めて発見したのです。



ハッブル宇宙望遠鏡により撮影されたイカロスの画像。左は銀河団 MACS J1149+2223におけるイカロスの出現位置を示す。右はイカロス付近のハッブル宇宙望遠鏡画像の拡大図。2011年（右上）には観測されていなかったイカロスが2016年（右下）の観測で出現していることがわかる。（Credit: NASA/ESA/P. Kelly）

研究チームは地球から50億光年離れた MACS J1149+2223と呼ばれる銀河団をハッブル宇宙望遠鏡で観測した際に、銀河団の背後にある90億光年離れた渦巻銀河の中で増光する天体を発見しました。この天体をハッブル宇宙望遠鏡で継続観測し、その光度曲線や天体の色を詳細に解析した結果、これは超新星爆発などの星の死に伴う爆発現象ではなく、普通の青い星が重力レンズによって増光されたものであると結論し、「イカロス」と名付けました。今回の研究成果は、英国の科学雑誌 *Nature Astronomy* に2018年4月3日付で掲載されました。

また、この観測は遠方の銀河を構成する星に関する貴重な情報をもたらすだけでなく、宇宙の質量の大半を担うダークマターの研究に対しても非常に有用であることがわかりました。これについては、大栗さんを中心に執筆された別の理論論文（M. Oguri et al., *Phys. Rev. D* 97 (2018) 023518）で詳しく解析されています。

近い将来、ハッブル宇宙望遠鏡より感度の高いジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡が始動すれば、単独の星の増光現象がさらに多数観測されると考えられます。それにより、遠方の銀河を構成する星の研究やダークマターの研究がより一層進展するものと期待されます。

Kavli IPMU-ICRR合同一般講演会「粒をさぐる・粒でえがく宇宙」開催

2018年4月14日に千葉県柏市のアミュゼ柏で「粒をさぐる・粒でえがく宇宙」を主題に、今回で18回目となる Kavli IPMU と東京大学宇宙線研究所共催の一般講演会が開催され、中高生を含む333名が参加しました。

講演会は、宇宙線研究所所長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる梶田隆章さんの挨拶で始まり、初めに神岡宇宙素粒子研究施設長兼 Kavli IPMU 主任研究員の中畑雅行さんが「Super-Kamiokande: 超新星ニュートリノ観測の最前線」と題して講演しました。

中畑さんは1987年に超新星1987Aが発生し、超新星爆発からのニュートリノを初めてカミオカンデで観測した当時の様子、更には古来より沢山の超新星爆発が起こってきたことを紹介するとともに、過去の超新星爆発によって放出された超新星背景ニュートリノの観測を試みる実験計画について話しました。

続いて、Kavli IPMU助教の白井智さんが「Naturalness: LHC実験で探る不自然な自然」と題して講演しました。最初に自身が携わる「現象論」の分野が何であるかについて紹介、そして成功例としてあげられる素粒子の標準模型について言及した後、ニュートリノ質量をはじめとしてこの標準理論では説明できていないことがあることを述べました。特に、ヒッグス粒子の質量が非常に不自然であることについて、理論からはこの不自然さを解消する新物理があるとして研究が進められていること、実験からは新物理を探るための強力なツールとして CERN の LHC での観測結果が期待されていることについて紹介しました。その後2人の講師の対談が行われ、終了後はホールのホワイエで参加者が講師を囲み、熱心に質問をしていました。



講演する中畑雅行さん。



講演する白井智さん。

講演会「宇宙×世界」開催

2018年6月10日、東京都お台場の日本科学未来館未来館ホールにおいて、Kavli IPMU一般講演会「宇宙×世界」が開催され、215名が参加しました。

はじめに、カリフォルニア大学パークレー校教授で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる野村泰紀さんが「我々の宇宙を超えて」と題し講演し、真空のエネルギーが理論値とは大きく異なり、宇宙は我々が存在するには非常によくできすぎているという事実、更には超弦理論やインフレーション理論の示唆から、我々の宇宙以外にも多数の宇宙が存在するというマルチバース宇宙論が有力な仮説であることを紹介しました。更に、多数の宇宙が量子力学的に確率的に存在しているというマルチバースは、量子的多世界であるという考えについて述べ、我々は取るに足らない存在であるが自然を理解できるとして講演を締めくくりました。

続いて、ボン大学教授の哲学者で、日本でも翻訳された世界的ベストセラー『なぜ世界は存在しないのか』(講談社選書メチエ、翻訳：清水一浩)の著者、マルクス・ガブリエルさんが「宇宙・世界・実在」と題して講演しました。ガブリエルさんは、自身が描写する哲学的な論理的空間が、野村さんが紹介するマルチバースの描像と非常に似ていることは単なる偶然ではないとした上で、3つの世界概念の検討を通して「世界は存在しない」という消極的な提題について述べました。そして積極的な提題として、「世界ないし実在とは意味の場が局所的に重なっている網



対談する野村泰紀さん(左)とマルクス・ガブリエルさん(右)

目構造であって、それ以外に全ての文脈の文脈という包括的な全体というものがあるのではない」という考えを提示しました。

その後、「宇宙×世界」と題して2人の講師が物理学と哲学の視点から還元主義や決定論について意見を交わした対談、最後に講師を囲んでの懇談会があり、来場者が積極的に講師に質問を投げかける姿が見られました。

講演会「重力波と宇宙のダーク成分 観測的宇宙論の最前線から」開催

2018年6月17日に東京大学本郷キャンパスの小柴ホールで、Kavli IPMU の村山斉機構長が領域代表者を務める新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか? 徹底的究明と将来への挑戦」との共催により、「重力波と宇宙のダーク成分 観測的宇宙論の最前線から」を主題として Kavli IPMU 一般講演会を開催しました。中高生を含む196名が参加し、会場は満席となりました。

はじめに Kavli IPMU の佐々木 節副機構長が「重力波天文学の夜明け」と題して講演しました。まずアメリカの重力波観測グループ LIGO (ライゴ) が観測したブラックホールの合体及び中性子星の合体で生じた重力波の観測結果について紹介し、その後これらの結果が天文学・宇宙論に与えた影響や、Kavli IPMU が主導し、多周波数観測により宇宙背景放射に刻まれた宇宙初期の原始重力波の痕跡を捉えようとする LiteBIRD 計画についても言及、重力波観測が拓く未来に参加者に提示しました。

続いて、Kavli IPMU 主任研究員の高田昌広さんが「すばるで探る宇宙のダーク成分」と題して講演しました。高田さんは初めにこの宇宙は「ダーク成分」と呼ばれるダークマターとダークエネルギーで満ちていることを話し、この謎のダーク成分に迫っていく強力なツールであるハワイすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を紹介しました。

その後、特にダークマターを調べる手法として重力レンズ効果が有効であること、重力レンズ効果と HSC を用いて得られた最近の成果として、ダークマターの正体が宇宙初期にできた原始ブラックホールであるとする理論に観測結果が大きな制限を加えたことについて話しました。最後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。



佐々木 節さん(左)と高田昌広さん(右)の講演風景。

人事異動

副機構長の異動

2018年4月1日付けで佐々木 節氏が Kavli IPMU 副機構長として着任しました。

また、2018年3月31日付けで鈴木洋一郎 Kavli IPMU 教授が副機構長を退任しました。

PI (主任研究員) の異動

2018年4月1日付けで高橋忠幸 Kavli IPMU 教授が PI に就任しました。

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。]

William Donovan さん [2014年11月1日 - 2018年5月31日] Kavli IPMU 博士研究員から清華大学 Yau Mathematical Sciences Center テニュアトラック助教授へ。

Anupreeta More さん [2012年9月1日 - 2018年6月30日 (2012年11月16日から2014年11月15日は JSPS 外国人特別研究員)] Kavli IPMU 博士研究員からインドの Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics の Data Scientist へ。



λ進トポロジー

アレクサンダー A. ボロノフ

ミネソタ大学数学科教授、Kavli IPMU 客員上級科学的研究員

$a_n \neq 0$ である限り、あらゆる級数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ が収束する世界は素晴らしいと思いませんか？
まず第一に微分積分学の試験で落第点を取ることがなくなります！ こういう世界もあって、その世界を数学者と物理学者はどちらも同じように都合に応じて使ってきました。その世界とは、λ進トポロジーの世界です。簡単な場合、これは複素数を係数に持つλの多項式の全体、 $\mathbb{C}[\lambda]$ が作る空間上のトポロジーです。λ進トポロジーは次のような0の基本近傍系 $\mathbb{C}[\lambda] \supset \lambda\mathbb{C}[\lambda] \supset \lambda^2\mathbb{C}[\lambda] \supset \dots$ によって定義されます。もしこのトポロジカル空間に全てのコーシー列の極限を加えて完備化すれば、λの形式的べき級数の空間 $\mathbb{C}[[\lambda]]$ が得られます。すると、任意の複素数 a_n に対して級数 $\sum_{n=0}^{\infty} a_n \lambda^n$ は全てこの空間で収束します。実は、これはλ進トポロジーでは $n \rightarrow \infty$ で $a_n \lambda^n \rightarrow 0$ だからです。与えられた素数 p に対し、同様に p 進数 \mathbb{Q}_p の環を構成することも可能です。 p 進数は $a_n = 0, 1, \dots, p-1, k$ をある整数(負であることもあり得る)として形式的べき級数 $\sum_{n=k}^{\infty} a_n p^n$ で与えられます。また、下に示すように逆極限によりべき級数環と p 進整数 \mathbb{Z}_p を構成する方法もあります。

$$\begin{aligned} \text{Formal power series: } \mathbb{C}[[\lambda]] &= \varprojlim \mathbb{C}[\lambda] / \lambda^n \mathbb{C}[\lambda] \\ \text{Formal Laurent series: } \mathbb{C}((\lambda)) &= \varinjlim^N \lambda^{-N} \mathbb{C}[[\lambda]], N > 0 \\ \text{For } f_0 = f_0(\lambda), f_1 = f_1(\lambda), \dots &\text{ in } \mathbb{C}[[\lambda]], \sum_{n=0}^{\infty} f_n \\ &\text{converges in } \mathbb{C}[[\lambda]] \text{ as long as } f_n(\lambda) \rightarrow 0 \text{ in } \mathbb{C}((\lambda)) \\ \text{For example, } \sum_{n=0}^{\infty} a_n \lambda^n &\text{ converges for any } a_0, a_1, \dots \text{ in } \mathbb{C} \\ \text{For a prime } p: \mathbb{Z}_p &= \varprojlim^n \mathbb{Z} / p^n \mathbb{Z} \quad p\text{-adic integers} \\ \mathbb{Q}_p &= \left\{ \frac{x}{p^N} \mid x \text{ in } \mathbb{Z}_p, N > 0 \right\} \quad p\text{-adic numbers} \end{aligned}$$