

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 Field Theory and Mathematics



37

No.

March 2017

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Quantum Field Theory and Mathematics
Yuji Tachikawa
- 10 **Research Report**
Belle II Experiment
Takeo Higuchi
- 14 **Our Team** Andrew Macpherson
- 14 **Tea Break**
Hey, tell me what you do in research!
Alexander Voronov
- 15 **Workshop Report**
Conference "D-modules and Hodge Theory"
Tomoyuki Abe
- 16 **Workshop Report**
Conference: MEXT Scientific Research on Innovative
Area "Why Does the Universe Accelerate? – Exhaustive
Study and Challenges for the Future –"
Masahiro Takada
- 17 **Workshop Report**
Workshop "Mathematics and Superstring Theory"
Yukinobu Toda
- 18 **News**
- 24 **Search for New Physics in B-Meson Decays**
Tomoko Morii

Japanese

- 25 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 26 **Feature**
場の量子論と数学
立川 裕二
- 32 **Research Report**
Belle II 実験
樋口 岳雄
- 36 **Our Team** アンドリュー・マクファーソン
- 36 **Tea Break**
何を研究してるのかね!
アレクサンダー・ポロノフ
- 37 **Workshop Report**
D-Modules and Hodge Theory
阿部 知行
- 38 **Workshop Report**
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」シンポジウム
高田 昌広
- 39 **Workshop Report**
ワークショップ「数学と超弦理論」
戸田 幸伸
- 40 **News**
- 44 **B中間子の崩壊による新物理の探索**
森井 友子



Yuji Tachikawa is a Professor at the Kavli IPMU. He obtained his PhD in 2006 from the University of Tokyo, and became a postdoctoral member in the Institute for Advanced Study until 2010, when he joined the then-not-yet-Kavli IPMU as an Assistant Professor. He became an Associate Professor at the Department of Physics of the University of Tokyo in 2012, and came back to the Kavli IPMU as a Professor in 2016. He received the Nishinomiya-Yukawa Prize and the Hermann Weyl Prize in 2014 and the New Horizons in Physics Prize in 2015. His research interests revolve around physics and mathematics of quantum field theories, in particular those with supersymmetry, conformal invariance and/or topological invariance.

立川裕二：Kavli IPMU教授。2006年に東京大学大学院理学系研究科物理学専攻より博士号を取得、その後プリンストンにある高等研究所でポストドク研究員を勤めたあと、2010年にまだKavliを冠さなかったIPMUに助教として着任。2012年には東京大学理学部物理学科の准教授として本郷に異動、そして2016年にKavli IPMUに教授として帰任。2014年に西宮湯川賞と Hermann Weyl賞を、2015年に物理ニューホライズンズ賞を受賞。主な研究の興味は場の量子論の物理と数学にある。特に超対称場の理論、共形場の理論、トポジカル場の理論について研究を行っている。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



January 13: In the Cosmo Planetarium Shibuya at the Shibuya Cultural Center OWADA, after a preview of a new program for Cosmic Front, Planetarium Version, "Look for Dark Matter," Director Hitoshi Murayama (left) and the University of Tokyo School of Science/Kavli IPMU professor Naoki Yoshida (right) discussed about dark matter with Tamarokuto Science Center Director Yuichi Takayanagi (center) as a moderator.



January 16: A photo shoot in the Director's office for making Hitoshi Murayama's life-size photograph panel.



March 8: Giving an opening talk at the Symposium: MEXT Scientific Research on Innovative Area "Why Does the Universe Accelerate? – Exhaustive Study and Challenges for the Future –" held at KEK (see p. 16). Photo: Courtesy of KEK IPNS.



March 9: Hitoshi Murayama (right) with KEK/Kavli IPMU Professor Masashi Hazumi (center) and Kavli IPMU Associate Director Nobuhiko Katayama (left) at the symposium banquet. Photo: Courtesy of KEK IPNS.



March 30: At the Kavli IPMU's Administration Office farewell lunch, (photo on the left) Hitoshi Murayama giving an opening address; (photo on the right) with those who are leaving the Kavli IPMU, General Manager Junichi Mizukami (rightmost), International Relations and Researchers Support Section Head Akiko Fujita (2nd from right), and Assistant Professor Hideki Tanaka (leftmost).

Quantum Field Theory and Mathematics

What are we made of? This is a long-standing question for human beings. Our body is made of cells, which are made of molecules. Molecules are made of atoms, which, in turn, are made of electrons and nuclei. The latter are made of neutrons and protons, which are finally made of quarks. Electrons and quarks are known as elementary particles, and cannot be further subdivided as far as we know at present. The forces between these particles include the electromagnetic force, about which you are probably familiar, and the *strong force*^{*1} which binds quarks into protons and neutrons. Elementary particles and the forces among them are described by a framework called *quantum field theory* in theoretical physics.

As I will explain soon below, the computations based on quantum field theory reproduce many experimental results extremely well. At the same time, our understanding of quantum field theory is quite incomplete. Still, quantum field theory has been stimulating the development of various areas of mathematics. I would like to say something about this mysterious gap in our understanding of quantum field theories.

Quantum field theory is incomplete

What do I mean when I say quantum field theory is incomplete? Let us compare the situation of quantum field theory with that of general relativity and quantum mechanics, both of which appeared in the early twentieth century. You might know them

as difficult subjects, but in fact they are rather well understood as theoretical frameworks, by physicists and mathematicians. First, there are many textbooks aimed at physics students, which can be read alone in principle. Second, it is possible to express these frameworks to mathematicians in single sentences: we can just say: “general relativity is about studying the Einstein equation on Riemannian manifolds” and “quantum mechanics is the study of self-adjoint operators on Hilbert spaces.” The point here is not about whether or not you can understand these two sentences, but the fact that there is a way to tell mathematicians what they are in a concise way.

Now, what is the situation with quantum field theory? There are many textbooks for physics students, but they are rather difficult to study alone. Furthermore, there is no way to tell mathematicians in a few sentences what quantum field theory is. There might be no need for every physics theory to be understood by mathematicians, but the fact that physicists cannot communicate it in a straightforward way to mathematicians should suggest that physicists themselves do not understand it well enough.

But then, what do I think quantum field theory is?^{*2} For me, the framework called quantum field theory is merely a random collection of calculational techniques and results which I learned through textbooks and various original papers. I do not have a logical, uniform and straightforward understanding of it. And it seems it is not just a problem unique to me. For example, when you

open a textbook on quantum field theory and start studying it, you often encounter strange statements such as: “the explanation given in the last chapter to the concept X was not quite right. In fact the correct statement is the following.” You continue reading and then find: “in the last chapter we said that the correct interpretation of the concept X was such and such. But that is not perfectly true either. In reality it is...” These things rarely happen in the textbooks on general relativity and quantum mechanics.

Quantum field theory works very well

Still, computations done using quantum field theory reproduce experimental results quite well. For example, the anomalous magnetic moment of an electron, which is the strength of an electron as a magnet, can be computed in terms of the expansion in the fine structure constant, which is the basic strength of the electromagnetic force. Its theoretically computed value and the experimentally observed value are in extremely good agreement.*³

Let us next discuss the case of the *strong force*. For theoretical physicists, this is defined in terms of the so-called path integral, which is an infinite-dimensional integral. Various physical quantities can be computed by performing this process. However, it is impossible to perform the integration an infinite number of times in practice. Instead, the result is computed by first making an approximation by a finite sum and then taking the limit numerically.

This procedure is now carried out using the world’s fastest supercomputers. In the last ten years, the output of the computation started to show good agreement with experimental results.*⁴

One of the Clay Millennium Problems*⁵ is essentially equivalent to proving that this limiting procedure converges. We now know that the numerical value, before actually taking the limit, already agrees quite well with reality.

There are many other cases where the computations done using quantum field theory agree well with experimental results, although there is no satisfactory formulations of quantum field theory. It is expected, therefore, that some well-defined mathematics would be extracted from quantum field theory, just as Euclidean geometry was abstracted from various technical progresses in ancient Egypt and Babylonia.

Various exiting formulations of quantum field theory

Of course, there have been many researchers who thought exactly in the same way. After all, quantum field theory itself has been studied for about one hundred years already. A very early effort in the 1950s is now known as *axiomatic quantum field theory*, which successfully axiomatized the aspects of quantum field theory then known. Unfortunately, not much of the later developments on the physics side have been incorporated.*⁶ Then in the 1980s, a couple of formulations were given to subclasses of quantum field theory which are

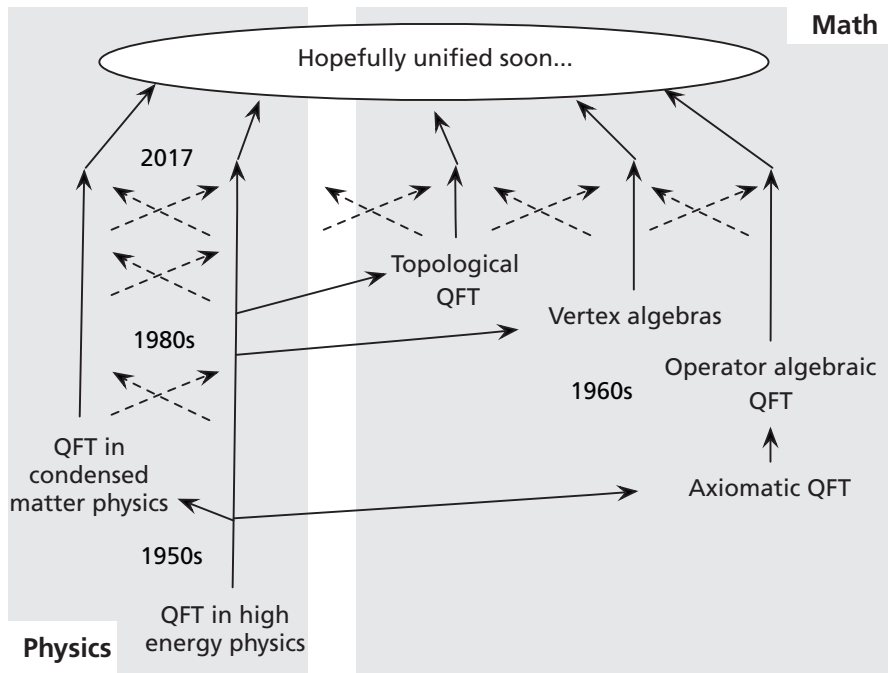


Figure 1: Existing formulations of quantum field theory

amenable to rigorous mathematical treatment, such as *topological quantum field theory* and *vertex algebras*. These cannot, however, deal with the quantum field theory which describes our microscopic world. Also, these formulations, once mathematical definitions are given, became separate subdisciplines of mathematics and had their own developments, with not much communications between them. Happily, we are starting to see fruitful interactions among them in the last ten years. I summarized the interrelationship of these formulations in Figure 1.

In addition, the quantum field theory which actually describes the real-world elementary particles is usually described in physics textbooks in terms of the path integral, which is infinite-dimensional. Therefore, a long-standing idea on the proper mathematical formulation of quantum field

theory is that we need to justify and make rigorous this integral. This approach is known as *constructive quantum field theory*. However, in the last ten years, it is recognized on the physics side that there are many examples of quantum field theories^{*7} which do not seem to be described by the path integral. This means that the completion of the program of the constructive quantum field theory does not mean a successful mathematical formulation of quantum field theory.

Mathematical applications of quantum field theory

So far I emphasized that we do not know how to formulate quantum field theory mathematically. Still, there have already been many rigorous mathematical results inspired by the research in quantum field theory. For example, from the study

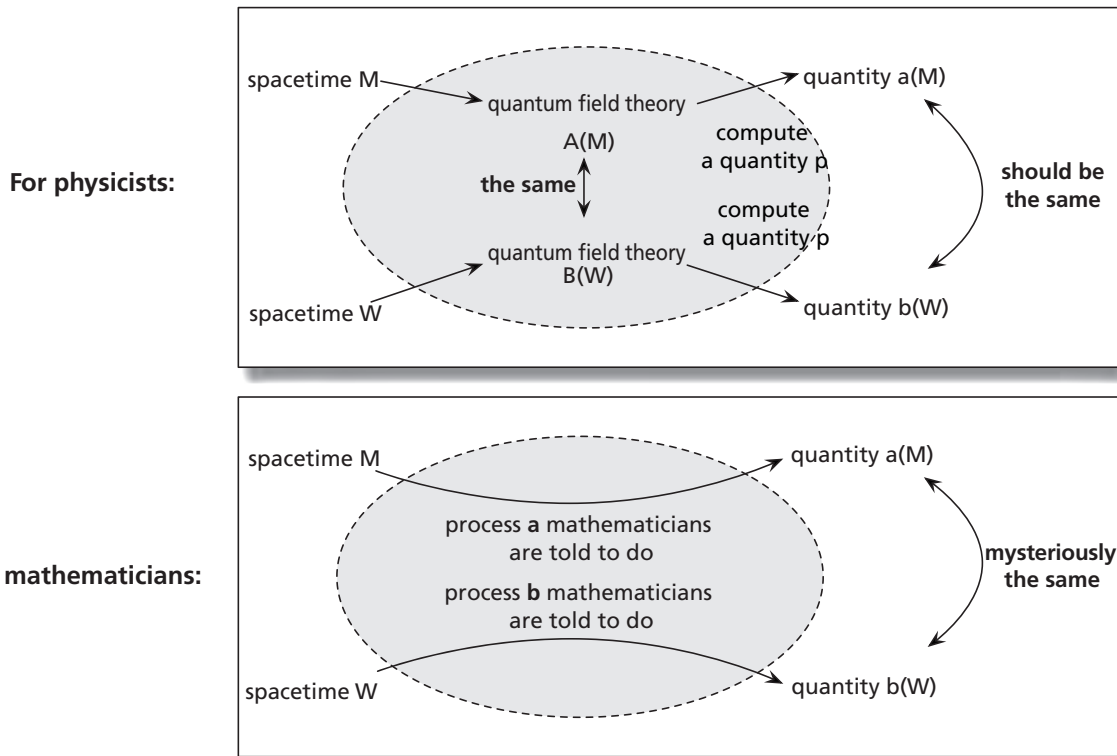


Figure 2: Mathematicians do not understand the area within the dotted line.

of two-dimensional quantum field theory in the early 1990s, there arose a subarea of mathematics known as *mirror symmetry*. Also, stimulated by the physics results of Seiberg and Witten concerning four-dimensional quantum field theory, our understanding of the topology of four-dimensional manifold was greatly improved around 1995. This is called the *Seiberg-Witten theory* in the mathematical literature.^{*8} In my own collaboration in theoretical physics with Luis F. Alday and Davide Gaiotto around 2010, we find that there should be a relation between the geometry of the instanton moduli space and the representation theory of infinite dimensional algebras. This conjecture was soon mathematically formulated, which got other mathematicians interested and inspired them to rigorously prove it.

In a sense, these can all be considered as an

application to mathematics of quantum field theory. However, these mathematical works are usually done quite independently from the mathematical sub-disciplines which deal with formulations of quantum field theory. Why is there such a mismatch? The reason can be understood by looking more closely at how these applications arose. Let us take mirror symmetry as an example.

How mathematical applications are extracted

In superstring theory, there are two types of strings, called type IIA and type IIB. The motion of these strings within a spacetime M is described by a quantum field theory depending on the type, $A(M)$ and $B(M)$. Slightly later, it was realized that there is a duality where a type IIA string moving in a spacetime M is equivalent to a type IIB string

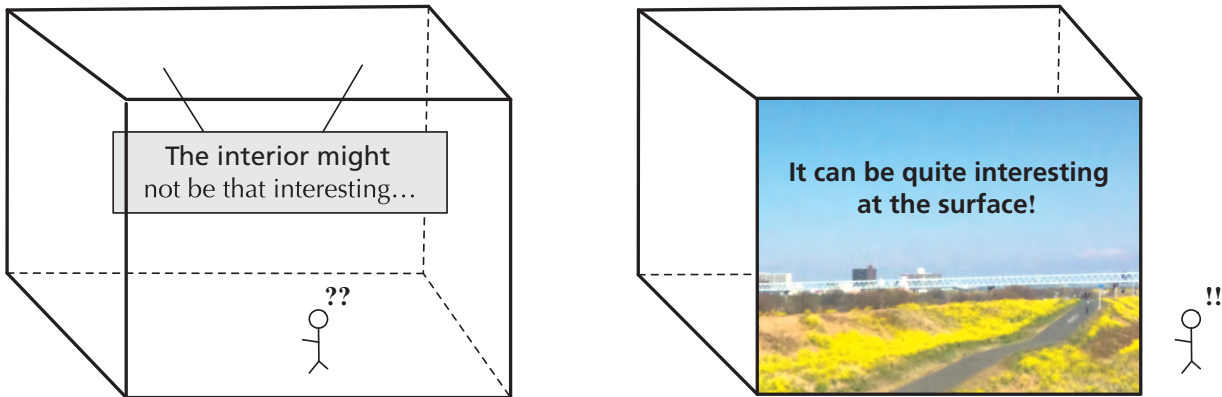


Figure 3: Interesting things can happen at the surface even when the interior is not that interesting.

moving in a different spacetime W . Then there should also be an equality $A(M) = B(W)$ between the quantum field theories describing them. Now, various quantities can be computed from a quantum field theory. Let us take the probability p of an event. Then of course we have $p(A(M)) = p(B(W))$.

Here, $A(M)$ and $B(W)$ are (un)fortunately not the kind of quantum field theories already formulated in mathematics. Therefore mathematicians do not understand them. However, it is still possible for them to understand the computational process of obtaining $a(M) = p(A(M))$ from M without understanding quantum field theory. Similarly, they can understand the process of computing $b(W) = p(B(W))$. Still, the processes a and b look totally unrelated if the intermediate steps, which used quantum field theory, are hidden from view. This makes these correspondences very mysterious from the mathematician's point of view. Please see Figure 2 for an illustration.

The important step is to translate what existing mathematics can deal with into quantum field theory which are still ill-defined, and then to translate it back to objects which can be analyzed again using existing mathematics. Many other mathematical applications of quantum field theory arose basically in the same manner, not just mirror symmetry. Mathematicians feel that a

mysterious new result is obtained, because what is equivalent from the standpoint of quantum field theory looks totally different from the viewpoint of the mathematics currently available. The existing mathematical formulations of quantum field theory I explained above are not powerful enough to be used to study these cases.

What should we do about formulations of quantum field theory?

How can this situation be improved? Can there be a way to convey the content within the dotted line in Figure 2 to mathematicians? For this, we need to clarify what quantum field theory is and what properties they satisfy. If this can be done, this will be good not only for mathematicians but also for physicists. This is because these general properties of quantum field theory are not yet written down in textbooks in any concise manner, even within theoretical physics.

It is true that these properties can be found scattered in various academic papers. The most crucial parts, however, can only be found in the minds of the physicists who are actually carrying out the research, and they are shared only vaguely among them. This is clearly an unsatisfactory situation. What should we do if a big earthquake or a terrorist attack hits a major international

conference? How do we reconstruct such knowledge if it is not even written down? This thought alarmed me, and so I started to write these things down a few years ago. But soon, after I wrote about a hundred pages, I found that it was not yet ripe for me to start this task.

I realized this problem while I was learning recent developments in condensed matter physics, where it was shown that there are quantum field theories which show extremely rich properties even though they look almost completely empty to the untrained eyes of high energy physicists, including mine. In condensed matter physics, we need to consider experimental samples, which necessarily have surfaces and boundaries. There might be nothing particularly interesting within the sample, but there can be rich phenomena at its boundaries and surfaces. Correspondingly, there can be quantum field theories which are almost empty in the bulk, and still have rich physics at the boundaries and surfaces. Please see Figure 3.

This is a natural idea in condensed matter physics, but it might have been a blindspot for high energy physicists. At least that was the case with me. This might be due to the historical background: the original aim in high energy physics was to identify the quantum field theory which describes the real world at the microscopic level. Then, that quantum field theory exists everywhere in this world, or more simply, that specific quantum field theory is the world, so there are no boundaries to it.

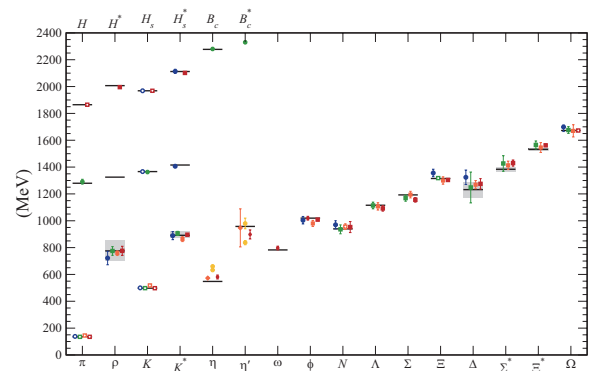
I learned of these new points of view only in the last few years, and this was a big surprise to me: something I thought would be almost trivial turned out to be not trivial at all. I am planning to spend the next few years at least to digesting and internalizing these developments. Once this is done, I should be able to restart writing down in one place my own understanding of quantum field theory. But when will that happen? Only time will tell.

*1 The phrase *strong force* should be thought of as a proper noun that names a specific type of a force, and not just a generic phrase meaning a force which happens to be strong.

*2 I would be usually counted as a physicist, so I guess I have to express my opinion as a physicist, rather than as a mathematician. But I should mention here that real physicists do not consider me as a physicist because what I study has no direct relationship with the real world, and that real mathematicians do not consider me as a mathematician because I do not rigorously formulate questions and prove theorems.

*3 See, e.g., Tatsumi Aoyama, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita, Makiko Nio, Tenth-Order QED Contribution to the Electron $g-2$ and an Improved Value of the Fine Structure Constant, arXiv:1205.5368 [hep-ph]. Both experiments and computations give the value $\alpha_e \approx 0:001159652180$.

*4 See, e.g., Andreas S. Kronfeld, Twenty-First Century Lattice Gauge Theory: Results from the QCD Lagrangian, arXiv:1203.1204 [hep-lat], from which the following figure is taken. The horizontal bars are the measured values of the mass of the mesons, and dots in various colors are the computational results of various research groups.



*5 Posed in 2000 by the Clay Mathematical Institute. Each comes with a \$1,000,000 prize. See <http://www.claymath.org/millennium-problems>

*6 One small example is the following. In quantum field theory, there are concepts called *gauge symmetry* and *flavor symmetry* now on the physics side. Around the 1950s, the same concepts were known as *local gauge symmetry* and *global gauge symmetry*, and this terminology is still used in the community of axiomatic quantum field theory. It is a trivial issue, but with many trivial differences, it becomes hard to communicate across sub-disciplines.

*7 The phrase 'quantum field theory' can either mean the entire framework or individual examples within that framework. Here it is used in the latter sense.

*8 The phrase 'the Seiberg-Witten theory' means the physics results for physicists and the mathematics results for mathematicians, and they are quite distinct. If you want to learn about one side but borrow a book about the other side, you will be totally at a loss. This happened to me more than once.

Belle II Experiment

Takeo Higuchi

Kavli IPMU Associate Professor

It is known that there are four fundamental interactions between particles: electromagnetic, weak, strong, and gravitational interactions. All particle interactions but gravity can be precisely formulated by the Standard Model of particle physics (SM). The SM is a powerful theory that can explain most known particle behaviors. Only a few exceptional behaviors are seen experimentally.

However, it is also known that the SM is not the ultimate theory of Nature. For example, while the existence of dark matter is widely accepted, its properties do not match any SM particles. For these reasons, new physics Beyond the SM (BSM) is believed to exist as an extension of the SM.

Belle II Experiment

Kavli IPMU has been a member of the Belle II experiment, a high-energy physics experiment searching for BSM physics. In the experiment, we produce B-meson pairs and tau-lepton pairs from collisions of electrons and positrons accelerated by the SuperKEKB accelerator. Since B mesons and tau leptons are unstable particles, they decay into other particles immediately after production. If there is BSM physics and it contributes to a certain decay process, there should be a discrepancy between the experimental observation of that process and the corresponding theoretical prediction by the SM. We will investigate BSM physics in the Belle II experiment by precisely measuring B-meson and tau-lepton decay processes to search for such discrepancies.*

*See page 24.

Furthermore, if we are successful in finding evidence for BSM physics, we will try to build a theoretical model for it.

Because the discrepancies we are looking for are very small, we need to produce an enormous number of B mesons and tau leptons to unambiguously find evidence for BSM physics. The event production rate by the predecessor of the SuperKEKB accelerator (the KEKB accelerator, which provided data for the Belle experiment and contributed to proving the Kobayashi-Maskawa theory) was the highest in the world at that time. The SuperKEKB accelerator is designed to be capable of 40 times the event production rate of the KEKB accelerator.

The Belle II detector, the particle detector of the Belle II experiment, is located at the interaction point of electrons and positrons, and has a cylindrical structure with respect to the beam axis. There are four parameters that characterize particle decay: decay position (vertex) of the particle, energy and momentum of daughter particles from the decay, and the species of the daughter particles. The Belle II detector is designed to be capable of measuring these parameters. While the detector design of Belle II is based on the Belle detector, it has many upgrades. For example, due to the increase of the accelerator luminosity, signals in the detector from adjacent events can overlap. In order to solve this problem, we have increased the speed of detector response to particles by employing new sensors and that of signal collection by employing

new readout electronics. We also renewed the entire data acquisition system from signal digitization to data storage in order to cope with the higher event rate and larger data size. Furthermore, we introduced a virtual organization of multiple computer resources across the Belle II collaborating universities and institutes in order to mitigate resource shortages that can potentially happen in data analysis. With these upgrades in the Belle II detector and peripheral systems, we aim to obtain 50 times more data than the Belle experiment had accumulated.

Belle II SVD

Information of decay vertices of the B meson and other particles is an essential input to quantitatively discuss the existence of BSM physics. The Belle II vertex detector (VXD) is located at the innermost position of the Belle II detector structure, and has a six-layer cylindrical shape (Fig. 1). The two innermost layers are pixel detectors (PXD), and the other four layers are silicon vertex detectors (SVD). Kavli IPMU is

contributing to the R&D of the SVD and production of the SVD fourth layer.

The dimensions of an SVD sensor (Fig. 2, left) are about 125 mm×60 mm. Each sensor has electrodes (strips) with a pitch of 50μm at the minimum (Fig. 2, right). Each strip is connected to a readout application specific integrated circuit (ASIC). When a charged particle passes through a sensor, an electrical signal is induced on the strips around the passing position. We detect a particle position by measuring signals on the strips. Because the topside strips and backside strips are running orthogonally to each other, a two-dimensional measurement of the particle position can be obtained.

Each SVD layer consists of ladders. A ladder is an array of sensors in a ladder shape. It is comprised of the following components: sensors, sensor supports, readout ASICs of strip signals (APV25), flex circuits connecting strips and ASICs, etc. These components are fabricated using glue (Fig. 3). A fourth-layer ladder, for which Kavli IPMU is responsible for the

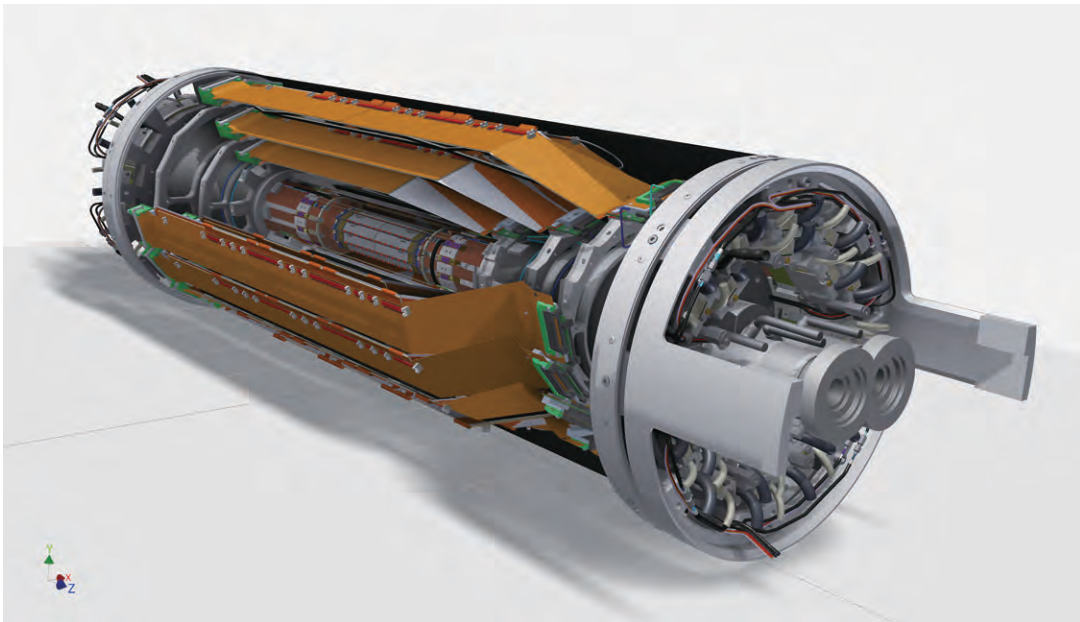


Figure 1. The Belle II vertex detector (VXD). The VXD has a six-layer cylindrical shape surrounding the electron-positron collision point. Its full length is 935 mm and diameter is 310 mm.

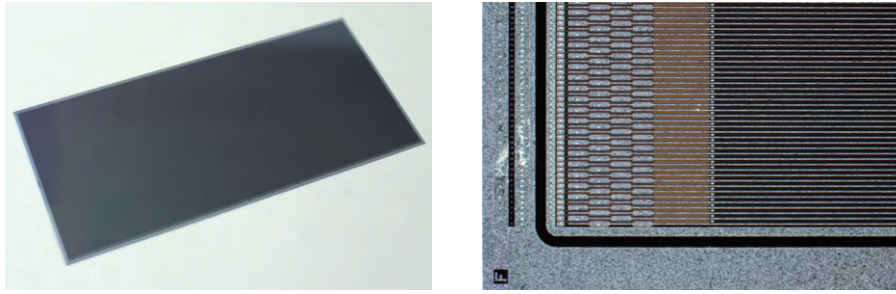


Figure 2. Picture of an SVD sensor is shown on the left. Strips are seen in the magnified picture on the right.

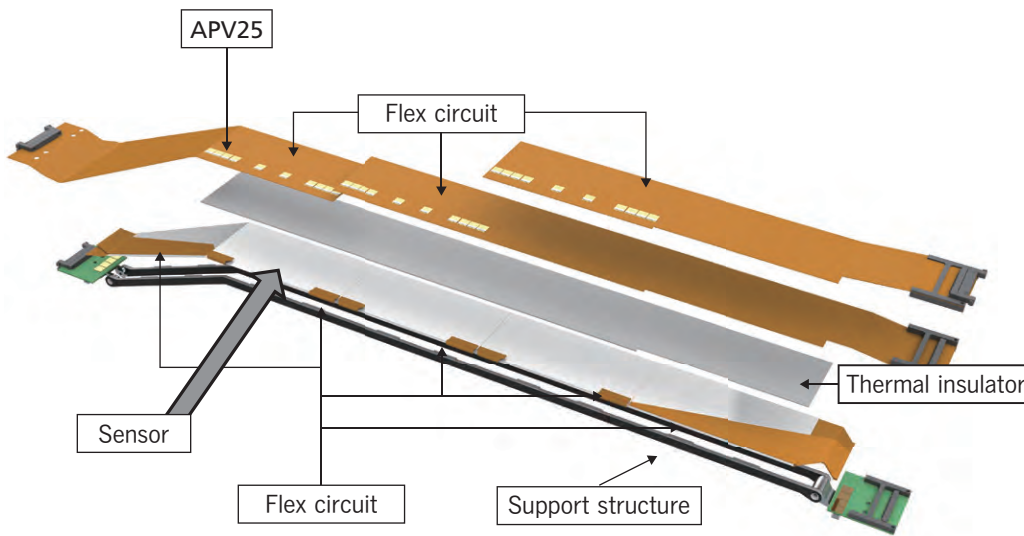


Figure 3. Exploded view of an SVD ladder of the fourth layer. The black parts at the bottom are ladder supports. Five sensors are arrayed on the supports. The brown parts on the sensors are readout flex circuits.

production, has five sensors, and it is 749 mm in full length. Each sensor in a ladder must be aligned at a precision of less than $200\mu\text{m}$ to avoid conflicts of sensors within a ladder and across ladders. A strip and flex circuit, and a flex circuit and APV25, are connected by aluminum wires with a $25\mu\text{m}$ diameter, and the total number of wires in a fourth-layer ladder is more than 12,000. The price of a ladder is comparable to that of a small bus.

Two of the most characteristic designs in a ladder are the chip-on-sensor concept and the Origami concept (Fig. 4). In order to minimize the length from a strip to the APV25, and to prevent capacitive noise coupling, we designed the APV25 chips to be placed immediately above the sensor. With this

configuration, however, there is no straightforward way to read the backside strips of the sensor. Therefore, we led the backside signals to the topside APV25 by putting a flex circuit on the backside of the sensor, folding and gluing it to the topside, and connecting the flex circuit and APV25 by wires.

We are currently assembling fourth-layer ladders of the SVD in a clean room at the Kavli IPMU. Twenty ladders including four spare ladders are being produced. We started this activity in 2012 with the establishment of the assembly procedure of ladders from a very complicated combination of very expensive parts. Since it was impossible to manually assemble the ladder with such precision, we designed dedicated assembly jigs. We currently employ more

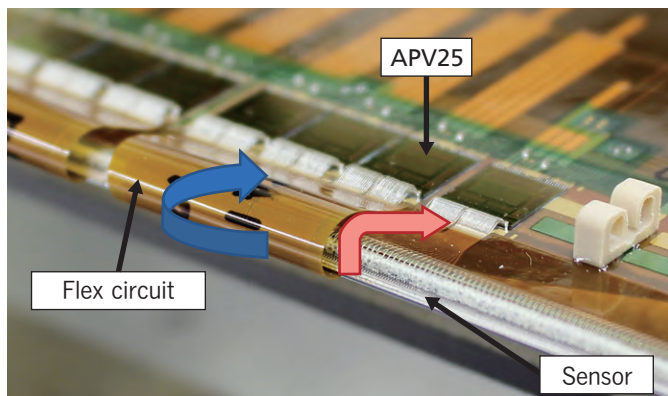


Figure 4. Photo showing the chip-on-sensor concept and Origami concept. Signals from the backside of the sensor are read out by putting a flex circuit on the sensor backside, folding it to the sensor topside, and leading the signals to the APV25.

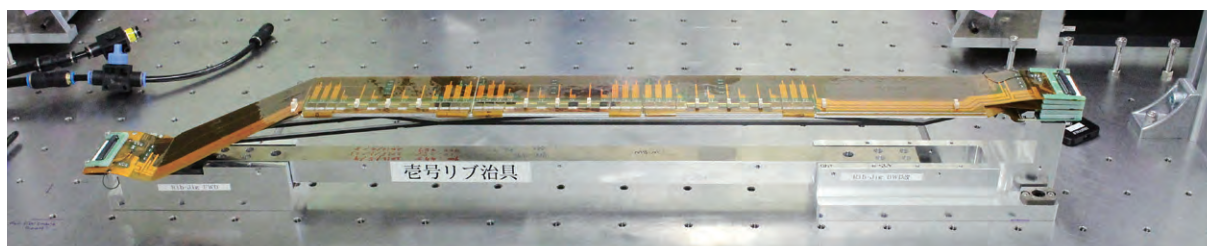


Figure 5. Photo of a completed ladder.

than 20 different jigs to assemble the ladder. In addition to the development and debugging of the assembly procedure, we also developed a gluing procedure of the ladder components and a wire bonding procedure for the electrical connection of parts. Through assemblies of more than ten mockup ladders, we established the assembly procedure of the ladder in 2015. In parallel with these activities, we also developed a test stand to evaluate the electrical quality of the assembled ladder. The test stand is equipped with a PC, and it analyzes readout signals from strips of the ladder that are irradiated by beta rays. We finally succeeded in assembling the first ladder with full electrical functionality in 2016. We tested this ladder together with ladders for other layers in an experiment using electron beams, and confirmed that our ladder had good particle-detection performance as expected.

Our next challenge was to stabilize the ladder quality for all the ladders we were going to fabricate. We employed an idea of stringent quality control into our ladder assembly line. We note the special

implementation of the following items to the assembly line: mechanization and manualization of assembly operations to minimize operator-dependent instabilities, securing traceability of all ladder parts through incoming inspections, installments of multiple checkpoints to the assembly line to detect an error as early as possible in the assembly process, and quality assurance of the completed ladder through a visual check, mechanical precision check, and electrical test.

We are currently assembling ladders in our clean room, and have produced five working ladders to date (Fig. 5). We estimate we will finish the full ladder assembly by early 2018.

The assembled ladders will begin to be mounted onto the VXD structure from the summer of 2017. The PXD and SVD will be combined to form the VXD by the summer of 2018, and a combined performance test of the VXD will be carried out using cosmic rays. The VXD will be installed into the Belle II detector structure in the autumn, and the real data-taking of particle interactions will start around the end of 2018.

Our Team

Andrew Macpherson

Research Field: **Mathematics**

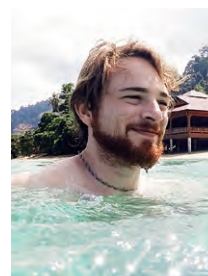
Postdoc

My research applies categorical and algebro-geometric thinking to other areas of geometry, especially those that pertain to mirror symmetry. For example:

- Derived geometry as an extension of smooth geometry in various contexts; with application to enumerative questions and Floer theory,
- Non-Archimedean geometry as formal geometry “up to birational modifications,” after M. Raynaud,

and

- Polyhedral and tropical geometry as the algebraic geometry dual to max-plus semirings, and its connections to the preceding.



Tea Break:

Hey, tell me what you do in research!

How often are you asked by your friends who are not physicists or mathematicians to describe what you do in your research? If you were looking for a short answer, here are a couple of options. A colleague of mine at the University of Minnesota, the Algebraic Topologist Hillel Gershenson, passed away last August. He was a remarkable fellow with a wonderful sense of humor. He always described what he was doing to curious non-mathematical friends as “most inapplicable mathematics.” Once someone asked him at a party what his field of study was, and he said “Algebraic Topology.” His friend misheard him as saying “Algebraic Apology” and responded: “Oh, I have been waiting for such a long time for someone to apologize for Algebra!”

(Contributed by Alexander A. Voronov)

Conference “D-modules and Hodge Theory”

Tomoyuki Abe

Kavli IPMU Associate Professor

From 23rd to 27th of January 2017, a conference entitled “D-modules and Hodge Theory” was held at the Kavli IPMU. There were 15 invited speakers, including three who gave two lectures.

Hodge theory, a main theme of the conference, sits at the intersection of various fields: algebraic, analytic, and arithmetic geometry. The story starts when W.B.D. Hodge discovered a marvelous decomposition of singular cohomologies of Kähler varieties by means of harmonic forms. Even though the proof is completely analytic, this decomposition can be interpreted in terms of algebraic geometry, and the existence of such decomposition is regarded as a unique feature of algebraic (or Kähler) geometry. Some decades after Hodge’s discovery, A. Weil conjectured a surprising conjecture for varieties over finite fields. J.P. Serre pointed out that complex analogue of his conjecture could be solved by using Hodge theory. Since then, Hodge

theory has been a source of inspiration for those studying cohomology theory over finite fields. On the other hand, inspired by works on the Weil conjecture, P. Deligne found a new way to understand Hodge decomposition from a more philosophical point of view: invention of Hodge structure. Following this philosophy as well as Grothendieck’s “yoga of 6 functors,” M. Saito established the theory of Hodge modules by using ideas from D-module theory. The next step was seeking for analogous structure for “irregular connection” generalizing Saito’s theory. The program was initiated C. Sabbah after C. Simpson’s work on twister Hodge structure, and recently completed by T. Mochizuki. One of the main aims of the conference was to understand this theory and relevant topics.

Mochizuki gave two lectures on his works. In the first lecture, he explained some basic facts on this theory, and in the second lecture, he gave some

applications. His theory enabled him to explain some facts appearing in mirror symmetry in a more natural way, which is expected to lead to more applications. K.S. Kedlaya gave two lectures on the resolution of turning points, which was shown independently by Mochizuki. Kedlaya’s method uses ideas from p-adic analysis. The most interesting aspect of his proof is that, by combining differential equation theory for Berkovich spaces and valuation theoretic point of view, he can explain the blow-up locus in a coherent manner. A. D’Agnolo gave lectures on irregular Riemann-Hilbert correspondence that he established in the work with M. Kashiwara. This result enables us to understand Stokes phenomenon in a higher dimensional situation. In the heart of the proof, they used resolution of turning points.

The conference was very successful with a lot of attendance from many universities and with various backgrounds.



Conference: MEXT Scientific Research on Innovative Area “Why Does the Universe Accelerate? – Exhaustive Study and Challenges for the Future –”

Masahiro Takada

Kavli IPMU Professor

There are observational evidences for two periods of accelerated cosmic expansion: at the very beginning, known as inflation, and the present. Since gravity, according to Newton as well as Einstein, is known as an attractive force, gravity can only “pull” the expansion to slow it down. Hence cosmic acceleration is the biggest mystery in cosmology. What is “pushing” the Universe to speed it up? We often invoke “inflation” and “Einstein’s cosmological constant” as its theory, but they have many unnatural features and are far from satisfying explanations. The purpose of this research area is to understand the origin of the accelerated cosmic expansion, as well as its interplay with dark matter which competes with the acceleration to build galaxies and clusters of galaxies. To address this problem, we launched the research program “Why Does the Universe Accelerate? – Exhaustive Study and Challenges for the Future –” (PI: Hitoshi Murayama), based on the MEXT Scientific Research on Innovative Area (FY2015 – 2019). We propose to conduct the research program based on a comprehensive approach; Theory units ranging from cosmic acceleration due to inflation (A01: Misao Sasaki, Kyoto Univ.), to decelerated expansion phase due to

dark matter (A02: Fuminobu Takahashi, Tohoku Univ.), and late-time cosmic acceleration due to dark energy (A03: Naoshi Sugiyama, Nagoya Univ./Kavli IPMU): Observational units based on the CMB experiments (B01: Masashi Hazumi, KEK/Kavli IPMU), galaxy imaging survey (B02: Satoshi Miyazaki, NAOJ), galaxy redshift survey (B03: Masahiro Takada, Kavli IPMU), and the Thirty-Meter Telescope (B04: Tomonori Usuda, NAOJ); and then Ultimate units developing tools of combining different cosmological datasets to fully extract cosmological information (D01: Eiichiro Komatsu, MPA/Kavli IPMU) and seeking ultimate theory of cosmic acceleration from super-string theory with top-down perspective (C01: Hirosi Ooguri, Caltech/Kavli IPMU). This is a 5-year research program (FY2015-FY2019).

We held the conference at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) at around the end of the second year from the launch of this program, March 8 – 10 in 2017,

where almost all members from each research group gathered together. At the conference we had updates from each research group/program and there were a lot of productive, stimulating discussions. We also had contributed talks mainly by young researchers. In addition, we had a special session “Primordial Black Hole” (PBH) on the third day, where we discussed the current observational constraint, a scenario to generate PBHs from an inflationary universe, a scenario to explain dark matter with PBHs, and a connection of PBHs to the gravitational events in the Advanced LIGO experiment that detected gravitational waves from a binary black hole system. We had more than 120 participants, and the conference was greatly successful.

Finally we would like to thank the organizers, Masaya Hasegawa, Haruiki Nishino, Shuichiro Yokoyama, and Teruaki Suyama. We also thank the secretaries of KEK for their dedicated support.

Photo: Courtesy of KEK IPNS.



Workshop “Mathematics and Superstring Theory”

Yukinobu Toda

Kavli IPMU Associate Professor

From March 21 to 23, 2017, the workshop entitled “Mathematics and Superstring theory” was held at the Kavli IPMU. This workshop was organized as a summary of the JSPS program “Advancing Strategic International Networks to Accelerate the Circulation of Talented Researchers” adopted as “Unlocking the Mysteries of the Accelerating Universe through Superstring Theory and Astrophysical Observations.” The aim of this program is to support young researchers in Japan to go abroad and do joint works with foreign researchers. Several researchers in Japan, including workshop organizers Masahito Yamazaki and Yukinobu Toda, went abroad and had discussions in foreign countries.

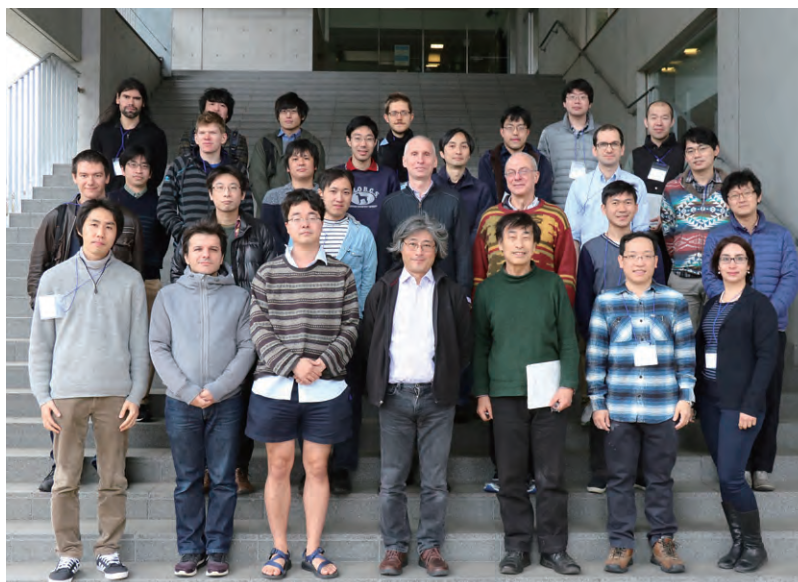
In the workshop, both mathematicians and string theorists came together and had significant discussions. From the mathematics side, there were 7 speakers: Ivan Ip, Zheng Hua, Akishi Ikeda, Atsushi Kanazawa, Georg Oberdieck, Yinbang Lin, and Kyoung-Seog Lee. The contents included various topics: derived algebraic geometry, mirror symmetry, stable pair invariants, derived categories of coherent sheaves, etc. Atsushi Kanazawa talked about Doran-Harder-Thompson conjecture on the construction of mirror Calabi-Yau manifolds by their

degenerations, and showed that their conjecture is true for elliptic curves and some abelian surfaces. Georg Oberdieck talked about his very strong result on the proof of Katz-Klemm-Vafa conjecture on Pandharipande-Thomas stable pair invariants, which count algebraic curves on Calabi-Yau 3-folds, for the products of K3 surfaces and elliptic curves.

From the superstring theory side, there were also 7 speakers: Mauricio Romo, Nezhla Aghaee, Shamil Shakirov, Pietro Longhi, Bruno Le Floch, Dongming Gang, and Taizan Watari. Mauricio Romo talked about sphere correlators for a hybrid model given by some non-affine algebraic

variety equipped with a superpotential. Shamil Shakirov talked about deformations of Chern-Simons topological field theory. It was known that such a deformation exists in the case that boundaries are Riemann surfaces with genus less than or equal to one, but Shakirov explained that it extends to the case that boundaries have genus two. There were also talks on quantization of super Teichmueller spaces, wall-crossing of BPS states, etc., which were also interesting for mathematicians.

During the workshop, both mathematicians and physicists enjoyed many discussions.



Workshop

News

Naoki Yoshida Awarded 13th JSPS Prize and Japan Academy Medal

Naoki Yoshida, Professor of the University of Tokyo School of Science and Kavli IPMU, was awarded the 13th JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Award and the 13th Japan Academy Medal in recognition of his “Large-Scale Numerical Simulations of Structure Formation in the Early Universe.” The award ceremony was held at The Japan Academy on February 8, 2017.



Naoki Yoshida with his Japan Academy Medal.
Photo: Courtesy of the Joint Institute for Computational Fundamental Science.

The JSPS Prize and Japan Academy Medal were both established in 2004. The JSPS Prize is meant to recognize young researchers with fresh ideas who have the potential to become world leaders in their fields. The purpose of the Japan Academy Medal is to honor outstanding young researchers, and up to six awardees (6 researchers this time) are selected every year from among the

annual winners of the JSPS Prize (25 researchers this time).

Professor Yoshida has developed a computer simulation code called GADGET (GALaxies with Dark matter and Gas intErACT) with collaborators. Using this code he has been studying structure formation and the evolution of the early universe, the formation of the first stars, and the origin of massive black holes.

Now, GADGET is a standard code in the field of large-scale computer simulation studies of the Universe. It also has a great influence on astronomical observations. Thus, Professor Yoshida’s contribution to astronomy and future prospects of his research have been recognized.

Tomoyuki Abe Wins the 2017 MSJ Spring Prize

Kavli IPMU Associate Professor Tomoyuki Abe won the Mathematical Society of Japan (MSJ) Spring Prize for his contributions to the “Study of Arithmetic D-module Theory and Langlands Correspondence.” An award ceremony was held on March 25 during the MSJ’s Annual Meeting at Tokyo Metropolitan University.



Tomoyuki Abe

The MSJ Spring Prize was inaugurated in 1988 as the successor to the Iyanaga Prize which had been established in 1973. It is awarded to MSJ members under the age of 40 to recognize outstanding mathematical achievement.

There are mainly two cohomology theories for varieties over fields of positive characteristic: one with a topological nature and the other with a more analytic nature. Deligne conjectured that these two cohomology theories have similar

information. Professor Abe used a variant of “analytic cohomology theory,” called theory of arithmetic D-modules, to establish Langlands type correspondence, and verified a part of Deligne’s hope. His research is difficult to understand, but you may get some idea from his article in the Kavli IPMU News, No. 35, pp. 4-9.

Meeting of WPI Center Administrative Directors Held at Kavli IPMU

On March 8, 2017, a meeting of the WPI (World Premier International Research Center Initiative) center Administrative Directors was held at the Kavli IPMU. In addition to the Administrative Director and some administrative staff from each WPI center, WPI Program Director (PD) Toshio Kuroki, Deputy PD Akira Ukawa, Director Takuya Saito of the Office for the Promotion of Basic Research, the Basic Research Promotion Division, Research Promotion Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), and some officers from MEXT and JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) WPI Secretariat also attended the meeting.

To begin, meeting host and Kavli IPMU Administrative Director Haruyama reported on the necessity for the WPI program, 10 years after its launch, to deepen cooperation among the centers. Then, PD Kuroki, MEXT Director Saito, and others explained the present status toward establishing the “WPI Academy.” According to these explanations, the WPI centers, which started in 2007 as first-generation centers, can maintain and develop their status of “World Premier International Research Center,” attained through

their ten years of activities, in the new framework of the WPI Academy. As the Kavli IPMU is a WPI center with a five-year extension, it is expected to play its role in the WPI Academy as well as in the current WPI program. Further, there was a presentation of information by a fundraising specialist. He pointed out the necessity of an approach toward various kinds of fundraising, sufficient appeal power the WPI activities have, etc.

The participants toured the Kavli IPMU building which is known for its unique design, and attended daily tea time which is aimed at cross-disciplinary communication of researchers.

Finally, there was a discussion regarding problems that are common to each center. The participants recognized the importance of the Administrative Directors meeting like the one held this time, and agreed upon a policy of gathering periodically as often as possible for the purpose of building up WPI's bank of information that can be shared among the centers.



A scene from the WPI Administrative Directors meeting.

VLA and ALMA Team up to Give First Look at Birthplaces of Most Current Stars

An international team of astronomers, including Kavli IPMU postdoctoral fellow Wiphu Rujopakarn (who is also affiliated with Chulalongkorn University in Bangkok) as the first author of the

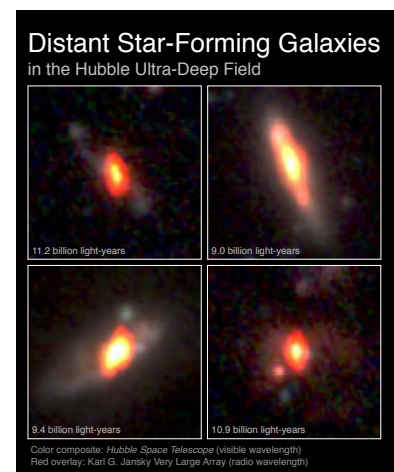
paper reporting this research, got their first look at the exact place where stars were born at a peak rate of star formation. To do so, they used the National Radio Astronomy Observatory's Karl G. Jansky Very Large Array (VLA) in New Mexico and the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) in Chile to look at eleven distant galaxies selected from the Hubble Ultra-Deep Field. They are seen as they were 8.9 – 11.5 billion years ago.

Most stars in the present Universe are thought to have been born then. However, galaxies forming stars prolifically are shrouded in a great deal of dust due to star formation activity. This makes it difficult to look at the birthplace of stars because intervening dust hides it from visible-light observations. However, radio waves, having longer wave lengths than visible light, can get through the dust. Therefore, the astronomers made the most sensitive image of such distant galaxies where star formation was occurring with the VLA, and observed the distribution of cold gas (which is the fuel for star formation) with the ALMA using radio waves in the millimeter wavelength region (called millimeter waves), as seen in the two figures shown on the right.

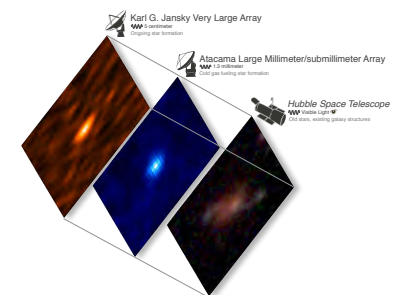
The new observations, using the VLA and ALMA, have shown that intense star formation in the galaxies they studied most frequently occurred throughout the galaxies, as opposed to much smaller regions in present-day galaxies with similar high star-formation rates. The star formation rate (the total mass of stars formed per year) in the galaxies they studied turned out to be 20 times as large as that in the present-day average galaxies.

By precisely observing and analyzing the images of more distant galaxies where star formation was occurring using both radio waves and millimeter waves in future research like the present one, it is expected that we can investigate what mechanisms were responsible for the bulk of star formation in those galaxies at that time, and how they are different from the star-formation mechanisms in present-day galaxies, and eventually, we can shed light on the history of galaxy evolution.

These results were published in the December 1 issue of the *Astrophysical Journal*.



Radio/Optical combination images of distant galaxies as seen with VLA and Hubble Space Telescope. Their distances from Earth are indicated in the images. Credit: K. Trisupatsilp, NRAO/AUI/NSF, NASA.



The combination of VLA, ALMA, and Hubble Space Telescope provides simultaneous insights into star formation, cold dust, and the existing stellar populations in distant galaxies in the Hubble Ultra Deep Field. Credit: Wiphu Rujopakarn/Kavli IPMU.

First Public Data Released by Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program

The first public data set from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) was released on February 27, 2017 (local time in Hawaii). The HSC-SSP is a large survey being done using HSC, an optical imaging camera mounted at the prime focus of the Subaru Telescope. Since it is difficult to analyze such a huge dataset with standard tools, a dedicated database and interface for ease of access and use of the data has been developed.

The HSC-SSP is a “cosmic census” project expected to spend 300 nights over 5 to 6 years to conduct an imaging survey of various galaxies over a wide solid angle of the sky, corresponding to 6,000 times the area of the full moon, in sufficient depth to probe the distant Universe. The HSC-SSP is an international collaboration of astronomers from NAOJ, Kavli IPMU, and other institutes in Japan, the Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA) in Taiwan, and Princeton University in the United States. Kavli IPMU Professor Masahiro Takada serves as a leader of the HSC-SSP Science Working Group using the HSC-SSP data.

This release includes data from the first 1.7 years (61.5 nights of observations beginning in 2014) and the total amount of data comprises of 80 terabytes. Though this first public dataset represents only a sixth of that expected from the entire HSC-SSP survey, it already contains almost 100 million galaxies. In contrast, the US-based Sloan Digital Sky Survey (SDSS)—which is known for its wide area observation—took over 10 years to create equivalent data sets.

Why was it possible for the HSC-SSP survey to collect such a large amount of data within this short period? It is because the HSC-SSP is a large survey project which fully takes advantage of the performance of the Subaru telescope and the HSC. First, the Subaru telescope has a large 8.2 m diameter primary mirror, and, therefore, a high light-collecting power. Further, the HSC, a wide-field camera mounted at the prime focus of the Subaru telescope, has 104 CCDs (870 million pixels in total) for science exposures and a 1.77 square-degree field of view—about 1000 times as large as that of the Hubble Space Telescope.

In contrast to other surveys, the HSC-SSP can collect high-quality data including information on dim galaxies and distant galaxies. In future, it is expected to shed light on such topics as the origin of galaxies, and the nature of dark matter and dark energy, using these data.

Kavli IPMU / ELSI Joint Public Lecture “A Question of Origins”

On January 22, 2017, the 2nd public lecture—“A Question of Origins”—co-sponsored by Kavli IPMU and Tokyo Institute of Technology’s Earth-Life Science Institute (ELSI) was held at the University of Tokyo’s Ito Hall at Hongo campus.

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.” These two WPI institutes planned this public lecture as an event to convey the latest findings of their research in an easy-to-understand way as well as to offer a diversity of perspectives, including the philosophical perspective to the audience, under the common theme

of “A Question of Origins,” which is fundamental to mankind. The venue was filled to capacity with 350 people.

After an opening address by WPI Program Director Toshio Kuroki, Kavli IPMU Principal Investigator Hiroshi Ooguri talked about “The Origin of the Universe from the Physics Point of View,” ELSI Director Kei Hirose talked about “Learning the Past from the Present—Travelling through Time over 4.5 Billion Years—,” and the University of Tokyo’s Graduate School of the Humanities and Sociology Professor Noburu Notomi spoke about “Question of the Origin (arkhē) Posed by Ancient Greek Philosophy.” After the lectures, the three speakers took part in a round table 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.



Round-table discussion. From right to left: Hiroshi Ooguri, Kei Hirose, and Noburu Notomi.

AAAS 2017 Annual Meeting in Boston

The American Association for the Advancement of Science (AAAS) annual meeting was held in Boston from February 16 through 20, 2017. 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 nine WPI centers including the Kavli IPMU hosted the WPI booth for three days from February 17. Open

to all attendees, the booth showcased some of the latest research from WPI centers, as well as highlighted their efforts to create an open research environment that attracts scientists from around the world, with WPI Program Director Toshio Kuroki in attendance. During the three days, the WPI booth was visited by more than 300 people, including researchers, journalists, students, and families.

At this AAAS annual meeting, Nobel laureate Takaaki Kajita (Director of the University of Tokyo's Institute for Cosmic Ray Research and Kavli IPMU Principal Investigator) participated as a panelist at the panel discussion entitled, "Opening a New Era to the Universe with Gravitational Waves."



WPI booth at the AAAS annual meeting in Boston. Photo: Courtesy of the International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I²CNER), Kyushu University.

Workshop –Searching for the Lost Study–Art×Science×Philosophy

On March 25, 2017, a workshop called "Searching for the Lost Study–Art×Science×Philosophy" was held at Tamarokuto Science Center in Nishi-Tokyo City.

This workshop was aimed at considering similarities and differences between science, art, and philosophy. The following specialists were invited to present their view on this theme: Masahito Yamazaki (Kavli IPMU Assistant Professor; Physics), Yoshihiro Maruyama (Kyoto University's Hakubi Project/Graduate School of Letters

Assistant Professor; Mathematical Philosophy), Masafumi Oizumi (ARAYA's Manager; Cognitive Science), Syunsuke Kuwahara (The University of Tokyo's Department of Aesthetics Assistant Professor; Aesthetics), and Nozomu Ogawa (Art Center Ongoing Director; Contemporary Art). There were about 40 participants. More than half of them were women.

The workshop lasted the whole day, with a Science session, Art session, and General session, and it was organized in such a way that there were frequent discussion times among the participants. In each group sitting around a table, a very active discussion was made to deepen the understanding of the presentation given by lecturers.



Presentation of Kavli IPMU's physicist Masahito Yamazaki.

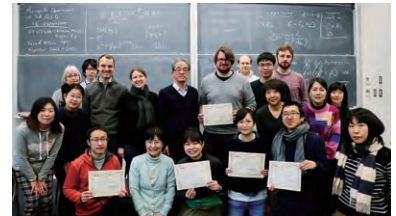


A scene of the workshop.

Japanese Class Completion Ceremony

At the Kavli IPMU, its own Japanese classes are open to researchers and their families. To date, many people have completed their 40 hours of Introductory Japanese Course taught by Kavli IPMU's Japanese Language teacher Masami Nishikawa.

On March 13, 2017, six students celebrated finishing their Japanese classes. They presented speeches in Japanese and received their certificates. They are Kavli IPMU Postdoctoral Fellows Jiaxin Han, Ting-Wen Lan, Juliana Kwan, Fabian Koehlinger, Po-yen Tseng, and his wife Chia-I Chen.



It looks that there are only five people holding their certificates, but there is another one who is not showing his certificate clearly.

Kavli IPMU Seminars

1. "Towards understanding the Large-Scale Structure in the Universe using perturbation theory"
Speaker: Zvonimir Vlah (KIPAC)
Date: Nov 09, 2016
2. "Supernovae and their progenitor systems"
Speaker: Samuel Jones (HITS, Heidelberg)
Date: Nov 10, 2016
3. "Gauge Theory and Calibrated Geometry for Calabi-Yau 4-folds: Part III"
Speaker: Yalong Cao (Kavli IPMU)
Date: Nov 11, 2016
4. "Primitive forms for Gepner singularities"
Speaker: Andrei Ionov (HSE)
Date: Nov 14, 2016
5. "Decoding the perfect Universe"
Speaker: Charles Kirkham Rhodes (U of Illinois, Chicago)
Date: Nov 15, 2016
6. "4d N=1 from 6d (1,0)"
Speaker: Gabi Zafrir (Kavli IPMU)
Date: Nov 15, 2016
7. "The search for the oldest stars in our Galaxy"

- Speaker: Patrick Francois
(Observatoire de Paris-Meudon)
Date: Nov 16, 2016
8. "Hydrodynamics of Rotating Stars"
Speaker: Philipp Edelmann (HITS, Heidelberg)
Date: Nov 17, 2016
9. "Homological mirror symmetry via constructible sheaves"
Speaker: Tatsuki Kuwagaki (U Tokyo)
Date: Nov 18, 2016
10. "Geometric Satake correspondence"
Speaker: Mikhail Kapranov (Kavli IPMU)
Date: Nov 21, 2016
11. "The ϵ -expansion of the codimension two twist defect from conformal field theory"
Speaker: Satoshi Yamaguchi (Osaka U)
Date: Nov 22, 2016
12. "Tyurin conjecture and SYZ mirror symmetry"
Speaker: Atsushi Kanazawa (Kyoto U)
Date: Nov 28, 2016
13. "Planar zeros in gauge theories and gravity"
Speaker: Miguel A. Vazquez-Mozo (Universidad de Salamanca)
Date: Nov 29, 2016
14. "Combining Cosmological Probes in the Dark Energy Survey, and Beyond"
Speaker: Elisabeth Krause (U Stanford)
Date: Dec 06, 2016
15. "Cheshire Cat Resurgence and Quasi-Exact Solvability"
Speaker: Yuya Tanizaki (RIKEN BNL Research Center)
Date: Dec 06, 2016
16. "The Assembly of Today's Most Massive Galaxies Over the Last 12.8 Gyr"
Speaker: Danilo Marchesini (Tufts U)
Date: Dec 07, 2016
17. "HETDEX: the Hobby-Eberly Telescope, VIRUS, and the evolution of dark energy"
Speaker: Gary Hill (U Texas)
Date: Dec 08, 2016
18. "Canonical relative tilting generator"
Speaker: Alexey Bondal (Kavli IPMU)
Date: Dec 08, 2016
19. "Bulk reconstruction in the Hartle-Hawking formalism"
Speaker: Daniel Jafferis (Harvard U)
Date: Dec 09, 2016
20. "Constructing expansion parameters for QCD-type theories"
Speaker: Aleksey Cherman (U Washington)
Date: Dec 13, 2016
21. "Pre-supernova Convection in Massive Stars"
Speaker: Manos Chatzopoulos (Louisiana State U)
Date: Dec 13, 2016
22. "On Perturbative/Non-perturbative Relations"
Speaker: Gerald Dunne (U Connecticut)
Date: Dec 14, 2016
23. "The Connection between Galaxy Growth and Dark Matter Halo Assembly from $z=0-10$ "
Speaker: Peter Behroozi (UC Berkeley)
Date: Dec 15, 2016
24. "3D Observations of Molecular Gas in Galaxies: From Global Dynamics to Supermassive Black Holes"
Speaker: Martin Bureau (U Oxford)
Date: Dec 22, 2016
25. "Random Tensor Models and Melonic Large N Limits"
Speaker: Igor Klebanov (Princeton U)
Date: Jan 05, 2017
26. "Searching for ultralight dark matter with atomic spectroscopy and magnetic resonance"
Speaker: Dmitry Budker (Johannes Gutenberg University)
Date: Jan 06, 2017
27. "The Lightcone Bootstrap and the Spectrum of the 3d Ising CFT"
Speaker: David Simmons-Duffin (IAS)
Date: Jan 10, 2017
28. "Entanglement Entropy in Smooth Quenches"
Speaker: Masahiro Nozaki (U Chicago)
Date: Jan 10, 2017
29. "Modeling baryonic physics in galaxy clusters"
Speaker: Erwin Lau (Yale U)
Date: Jan 11, 2017
30. "Observable properties of accretion disks in Kerr spacetimes"
Speaker: Frederico Garcia (Institute of Radioastronomy, Argentina)
Date: Jan 12, 2017
31. "K-HA/CoHA of the stack of Higgs sheaves on a curve"
Speaker: Francesco Sala (Kavli IPMU)
Date: Jan 12, 2017
32. "Peculiar Type Ia Supernovae - An Observational Perspective"
Speaker: Devendra Sahu (IAP)
Date: Jan 13, 2017
33. "Collapsar Model of Gamma Ray Bursts with MHD"
Speaker: Gary Lowe (Montana State U)
Date: Jan 16, 2017
34. "Global properties of gauge theories via M-Theory"
Speaker: Susanne Reffert (U Bern)
Date: Jan 17, 2017
35. "Compensating strong coupling with large charge"
Speaker: Domenico Orlando (U Bern)
Date: Jan 17, 2017
36. "Spherical symmetry of the bounce solution"
Speaker: Ryosuke Sato (Weizmann Institute)
Date: Jan 18, 2017

37. "Life and Death of the First Stars"
Speaker: Alexander Heger (Monash U)
Date: Jan 18, 2017
38. "A Tale of Three Lenses: From Galaxy Structure to Cosmology"
Speaker: Kenneth Wong (NAOJ)
Date: Jan 19, 2017
39. "Double Bruhat cells, clusters and maximal green sequences"
Speaker: Milen Yakimov (Louisiana State U)
Date: Jan 25, 2017
40. "Painlevé equations and AGT correspondence"
Speaker: Antonio Sciarappa (KIAS)
Date: Jan 27, 2017
41. "1. Production of high stellar-mass primordial black holes in trapped inflation / 2. Axion Dark Matter Induced Cosmic Microwave Background B-modes"
Speaker: Kin-Wang Ng (Academia Sinica)
Date: Jan 27, 2017
42. "(0,2) hybrid models"
Speaker: Marco Bertolini (Kavli IPMU)
Date: Jan 31, 2017

Changes to Principal Investigators

The Kavli IPMU was launched as a WPI center, the Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU), on October 1, 2007, and renamed as the Kavli IPMU following an endowment from the Kavli Foundation in 2012. At the end of March, 2017 (end of fiscal 2016 in Japan), the initial 10 years (effectively, 9.5 years) of funding under the WPI Program expires, and a 5-year extension of funding for the Kavli IPMU will start from the beginning of FY 2017. On this occasion, some of the Kavli IPMU's Principal Investigators (PIs) step down, and the number of PIs, including many younger

researchers, will increase from 19 to 26.

PIs who step down at the end of March, 2017

(Their position at the Kavli IPMU after April 1 is shown in parentheses.)

Ken'ichi Nomoto (Senior Scientist)
Kyoji Saito (Senior Scientist)
Henry Sobel
Yoichiro Suzuki (Deputy Director, Project Professor)
Tsutomu Yanagida (Project Professor)

New PIs from the beginning of April, 2017

(Their position is shown in parentheses.)

Kentaro Hori (Professor)
Mikhail Kapranov (Professor)
Young-Kee Kim (Chicago University Professor)
Eiichiro Komatsu (Max Planck Institute for Astrophysics Director)
Kai Martens (Associate Professor)
Shigeki Matsumoto (Associate Professor)
Shigetaka Moriyama (University of Tokyo's Institute for Cosmic Ray Research Associate Professor)
Yasunori Nomura (University of California, Berkeley Professor)
Masahiro Takada (Professor)
Yukinobu Toda (Associate Professor)
Mark Vagins (Professor)
Naoki Yoshida (University of Tokyo's School of Science/Kavli IPMU Professor)

List of PIs who continue to serve

Hiroaki Aihara, Alexey Bondal, Kunio Inoue, Takaaki Kajita, Stavros Katsanevas, Masahiro Kawasaki, Toshiyuki Kobayashi, Toshitake Kohno, Hitoshi Murayama, Masayuki Nakahata, Mihoko Nojiri, Hiroshi Ooguri, David Spergel, and Naoshi Sugiyama.

Personnel Changes

Moving Out

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

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yalong Cao [August 1, 2016 – March 31, 2017] moved to the University of Oxford as a Newton International Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Dongmin Gang [October 1, 2014 – March 31, 2017] moved to Seoul National University as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Song Huang [August 1, 2014 – February 14, 2017] moved to the University of California, Santa Cruz as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ilya Karzhanov [November 1, 2013 – January 31, 2017] moved to Moscow Institute of Physics and Technology as an Associate Professor.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yoshiki Oshima [April 1, 2013 – August 31, 2013 and September 1, 2014 – March 31, 2017] moved to the Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University as an Associate Professor.

JSPS Postdoctoral Fellow Koji Ichikawa [April 1, 2016 – March 31, 2017] moved to NEC Corporation as a Researcher.

JSPS Postdoctoral Fellow Maresuke Shiraishi [April 1, 2015 – March 31, 2017] moved to National Institute of Technology, Kagawa College (Kagawa KOSEN) as an Assistant Professor.

Also, Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Tirasan Khandhawit resigned the Kavli IPMU at the expiration of his term, from September 1, 2013 to August 31, 2016, and September 16, 2016 to January 15, 2017.

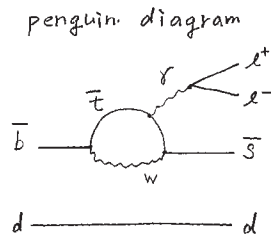
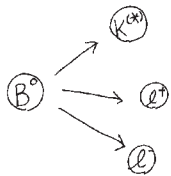
Search for New Physics in B-Meson Decays

Tomoko Morii

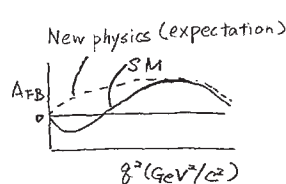
Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

There are some theoretical arguments that new physics will emerge at the TeV energy scale. Two approaches are important for the new physics search in this region. One is an energy frontier experiment that directly generates new particles, and the other is a high luminosity experiment to explore rare decays. The Belle II experiment is representative of the latter experiment, and what is important here is the decay process caused by the penguin diagram. In the penguin diagram, when the bottom quark of the B meson changes to another quark, it passes through an intermediate state. For this intermediate state, an ultrahigh energy state that may have existed in the early universe is allowed to appear due to the uncertainty principle in quantum mechanics. Therefore, we can investigate the influence of the new physics. An example is shown below. The decay process caused by the penguin diagram is a rare process that occurs once in tens of thousands of B-meson decays. In the Belle II experiment, we will investigate new physics by taking 50 times the data of the Belle experiment.

$$B^0 \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell^-$$



The lepton forward-backward asymmetry (AFB) changes when there is new physics



$$A_{FB} = \frac{N(\cos\theta_\ell > 0) - N(\cos\theta_\ell < 0)}{N(\cos\theta_\ell > 0) + N(\cos\theta_\ell < 0)}$$

θ_ℓ : The angle of ℓ^+ with respect to the opposite direction to the B direction.

近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



1月13日：東京の渋谷区文化総合センター大和田で行われた「コズミックフロント」プラネタリウム版『ダークマターを探せ!』の試写会&座談会で。左から村山機構長、司会の高柳雄一多摩六都科学館長、東京大学理学系研究科およびKavli IPMUを兼務する吉田直紀教授。



1月16日：等身大パネルを作るため、機構長室で写真撮影。



3月8日：KEKで開催された新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦」シンポジウム (p. 38参照) の冒頭で講演。写真提供：KEK 素核研。



3月9日：同シンポジウムの懇親会で。右から村山機構長、羽澄昌史KEK/Kavli IPMU教授、片山伸彦Kavli IPMU副機構長。写真提供：KEK 素核研。



3月30日：Kavli IPMU事務部門の送別会で。(左) 挨拶する村山機構長。(右) 送られる水上順一事務長(右端)、藤田明子国際交流係長(右から2人目)、田中秀樹助教(左端)と共に。



場の量子論と数学

我々は何で出来ているのか、それはどのように記述されるのか。これは人類の長年の疑問です。体は細胞から出来ており、細胞は分子から出来ており、分子は原子から、原子は原子核と電子から、原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はクォークから出来ています。電子とクォークは素粒子と呼ばれ、現時点ではこれ以上は分解できません。これらの粒子の間に働く力には皆さんも良くご存知の電磁力や、クォークをくっつけて陽子と中性子にしている「強い力」*1があります。素粒子とその間の力は、場の量子論という理論物理の枠組みで記述されます。

すぐ下で説明しますように、場の量子論に基づく計算は非常に良く実験結果を再現します。しかし、場の量子論の我々の理解は非常に不完全です。それでいて、場の量子論は数学のいろいろな研究を刺激してきました。この記事では、この不思議なギャップについて少し解説してみたいと思います。

場の量子論は不完全である

まず、場の量子論の理解が不完全だということはどういうことでしょうか？ 比較の為、二十世紀初頭にあらわれた、一般相対性理論と量子力学を考えましょう。これらは世間的には難しいという評判ですが、理論の枠組みとしては充分良く理解されています。例え

ば、沢山物理の学生向けの教科書が出版されています。難しいですが、自習することができます。また、数学者に対しては、一般相対論や量子力学が何であるか、一言で伝えることができます。そのためには、「一般相対論とはリーマン多様体上のアインシュタイン方程式の研究である」「量子力学とはヒルベルト空間上のエルミート作用素の研究である」と言えば良いのです。このカギ括弧内の文二つを読者が判るか判らないかはここでは関係ありません。数学者に一言で伝えられるということが、ここでは重要です。

さて、場の量子論ではどうでしょうか。物理の学生向けの教科書は沢山ありますが、自習は困難です。しかし、数学者に対して、一体場の量子論とは何なのか、一言で伝える方法は現時点ではありません。必ずしも数学者に判ってもらう必要は無いかも知れませんが、しかし、伝えられないというのは物理の理解が足りない一端でしょう。

そこでひるがえって、自分が場の量子論を何だと思っているかを反省してみます。*2 そうすると、私にとって、場の量子論というのは、教科書や種々の論文を通じて学んだ計算手法や結果の茫漠とした集まりにすぎず、筋道の通った一貫した理解に欠けていることに気が付きます。これはおそらく私だけの問題ではありません。例えば、場の量子論の教科書を開いて、読んでみますと、しばしば「前の章で説明したこれこれ

は実は嘘であった。本当のところはこうだ」「先の章で本当はこうだと書いたがそれも実は正しくなく実際はこうだ」と書いてあることが良くあります。こういうことは、一般相対論や量子力学の教科書では滅多にありません。

場の量子論は有効である

しかし、それでいて、場の量子論で行われる計算は実験結果と非常に良く合います。例えば、電子ひとつの磁石としての性質を意味する異常磁気能率という量は、電磁力の強さを示す微細構造定数の展開による近似計算をすることで理論的にもとめられますが、実験による測定と見事に一致しています。^{*3}

また、「強い力」は理論物理屋にとっては経路積分という無限次元の積分で定められています。これを計算すれば、さまざまな量を求めることが出来ます。無限次元の積分は現実には実行不可能ですから、頑張って有限和で近似して極限操作をして計算します。これは、世界最速のスーパーコンピューター等をつかって計算がなされており、ここ数年で実験結果を再現するようになりました。^{*4}

クレイ数学研究所が2000年に出した、それぞれ一億円の賞金のかかっているミレニアム問題^{*5}の一つは、実質この極限操作が収束することを数学的に証明

せよという問題ですが、極限を取る前の途中の数字が十分現実にあうことは確認されているわけです。

その他にも、場の量子論は数学的には満足に出来ないにも関わらず、場の量子論を用いてなされた計算結果が、実験結果を見事に再現するという事実は山のようにあります。ですから、古代エジプトやバビロニアでの建築技術が発展したところからユークリッド幾何学が抽出されたように、理論物理における場の量子論から、何か全うなきちんと定義された数学が抽出されるであろう、というのは当然期待されることです。

場の量子論の数学的定式化達

勿論、このように思った人は以前から沢山いました。何とんでも、場の量子論自体、もう百年弱研究されています。時期の早いものは1950年代になされた「公理的場の量子論」と呼ばれる分野で、その当時物理学者に知られていた場の量子論の側面を公理化したのですが、その後の理論物理内での理解の進展は生憎取り入れられていません。^{*6} その後1980年代になって数学的に扱いやすいクラスの場の量子論に対していくつかの定式化がなされました。「トポロジカル場の量子論」および「頂点作用素代数」がそれです。しかし、これらは実際の素粒子を記述する場の量子論は扱

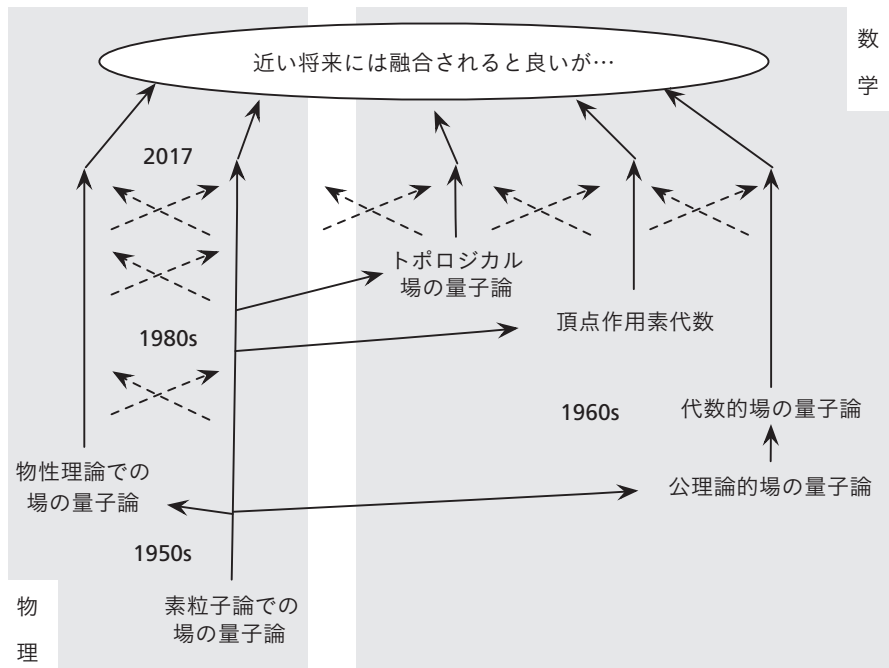


図1 場の量子論のいろいろな定式化達

えません。また、これらの定式化は、一旦なされたあとは、数学内の個別の分野として研究が進展し、定式化間の関連はそれほど多くありませんでした。ようやく、この十年ほど、交流が急に深まってきたようです。このあたりの定式化の関連を図1に載せました。

さらに、実際の素粒子を記述する場の量子論は、物理の学生向けの教科書では既にも書きましたように、通常経路積分とよばれる無限次元の積分を用いて説明を行います。ですので、数学的に定式化する上での問題は、この無限次元積分をどう正当化するかということである、という捉え方が長らくあります。これを直接数学的に調べようとする「構成的場の量子論」という分野もあります。しかし、ここ十年ほど、理論物理の枠内でも、経路積分ですら記述出来ない場の量子論^{*7}があるであろうということが認識されてきました。です

ので、もし構成的場の量子論が完成したとしても、それは場の量子論の数学の完成ではありません。

場の量子論の数学的応用

と、ここまで、場の量子論が数学的に何なのか良く判っていないことを強調してきましたが、それでいて、場の量子論の研究から刺激されて既に沢山のあたらしい数学が生じています。例えば、二次元の場の量子論を調べているところから、1990年代はじめ頃ミラー対称性という数学が生まれました。また、四次元の場の量子論におけるザイバーク=ウィッテンの結果に刺激されて、四次元の多様体の数学的性質がよりよくわかるということがありました。これは数学におけるザイバーク=ウィッテン理論と呼ばれています。^{*8} ち

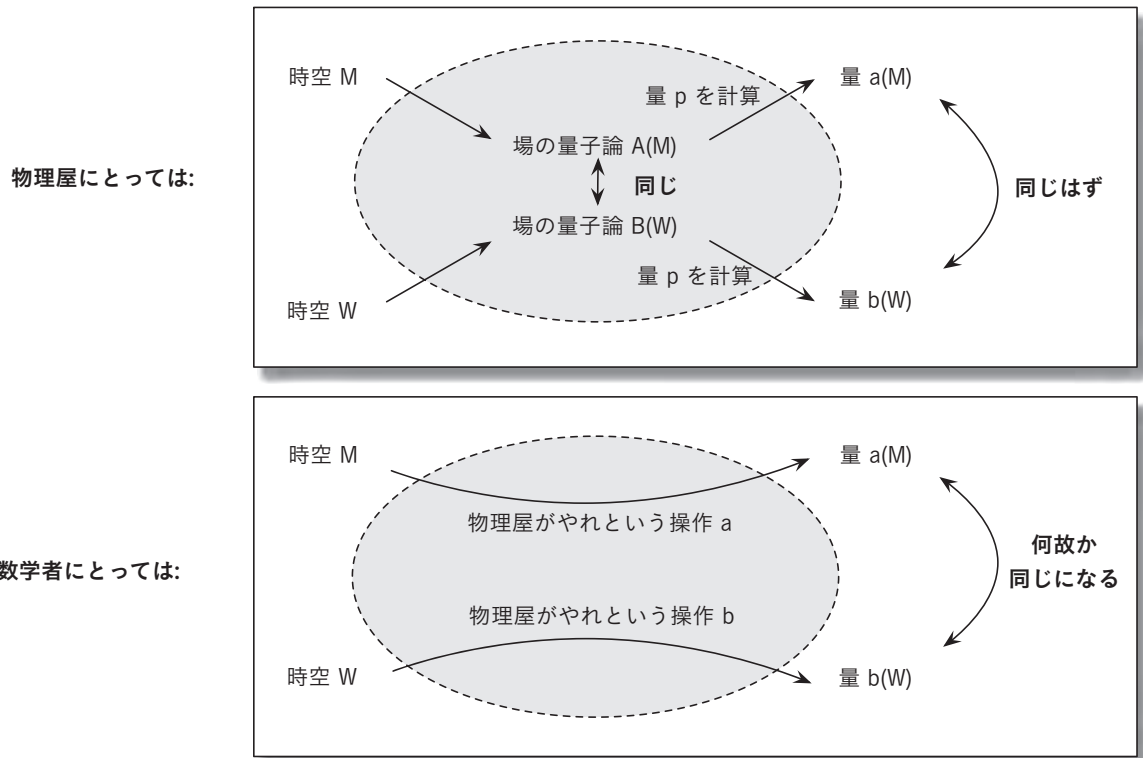


図2 点線の中は数学者にはわからない。

らは1995年頃の話です。また、私自身の寄与を書くのはおこがましいですが、アルダイとガイオットとの理論物理内の共同研究から、インスタントンモジュライ空間の幾何と無限次元代数の表現の間に関係があるべしという数学的予想が得られ、その後有り難いことにいろいろな数学者の研究対象となっています。これは2010年頃の話です。

これらは有る意味数学への場の量子論の応用なのですが、不思議なことに、上で述べたような数学的定式化を研究している分野とはほとんど独立して、また別の数学の分野になっています。これはなぜでしょうか。その理由は、どのようにこれらの数学的応用が現れたかをみると明らかです。例として、ミラー対称性についてみてみましょう。

数学的応用が得られる過程

弦理論の研究の過程で、IIA型弦とIIB型弦とよばれる二種類の弦理論がみつかりました。これら二種の弦が時空 M を動いている様子は、二種類の場の量子論 $A(M)$ と $B(M)$ で記述されます。さて、そのうちに、IIA型弦がある時空 M を動いているのはIIB型弦が別の時空 W を動いているのと等価であるという双対性が知られました。するとそれらを記述する場の量子論の間に等式 $A(M) = B(W)$ が成り立ちます。さて、場の量子論からはいろいろな物理量を計算できます。例えば何かの事象が起こる確率 p を考えますと、当然 $p(A(M)) = p(B(W))$ となります。

ここで、 $A(M)$ や $B(W)$ は生憎数学的にはまだ定式化されていないたぐいの場の量子論なので、数学者に

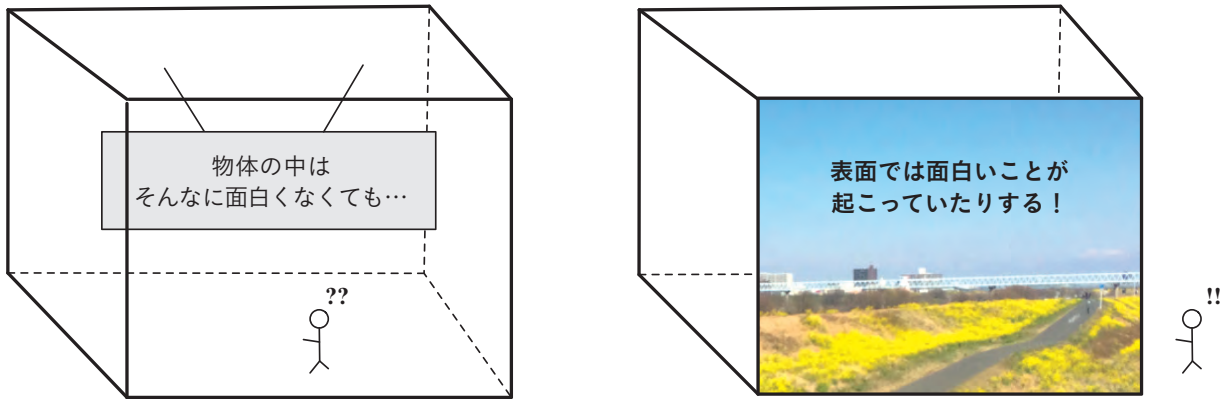


図3 内部がそれほど面白くなくても、表面は面白いことがある。

はなかなかわかりません。しかし、時空 M から $a(M) = p(A(M))$ を記述する手続き a は物理屋が根気よく説明すれば理解出来ます。同様に、時空 W から $b(W) = p(B(W))$ をもとめる手続き b も理解出来ます。すると、数学者にも、「時空 M で a という量を計算すると時空 W で b という量を計算するのと同じになる」という対応は理解出来ることになります。しかし、 a をもとめる手続きと b をもとめる手続きは途中に現れた場の量子論を忘れてしまうと全く異なるものに見えます。そのため、この対応は数学的にはとても不思議な対応にみえるわけです。図2を参照ください。

既存の数学で捉えられるものを、一度場の量子論に変換し、それをまた既存の数学で捉えられるものに戻すというのが肝心です。ミラー対称性に限らず、その他の場の量子論の数学的応用もほぼ同じような経緯であられました。場の量子論の立場では同じものが、その時点での厳密な数学ではまだ別のものとは見えないので、不思議な結果が得られたように思えるのです。上で述べた、既存の諸々の場の量子論の数学的定式化は、以上のような話に役立てるには力がまだまだ足りません。

場の量子論の定式化とこれからの僕

この状態はどうすれば改善できるでしょうか？ 図2の点線内を何とか数学者に伝える方法は無いでしょうか？ そのためには、場の量子論はどういうものであるか、どういう性質を満たすものなのか、を、はっきりさせる必要があります。それが出来れば、数学者のためになるだけでなく、物理屋のためにもなるでしょう。というのは、これら、場の量子論の満たすべき性質は、理論物理の枠内でも、教科書にまとまって書き下されたものでは未だ無いからです。

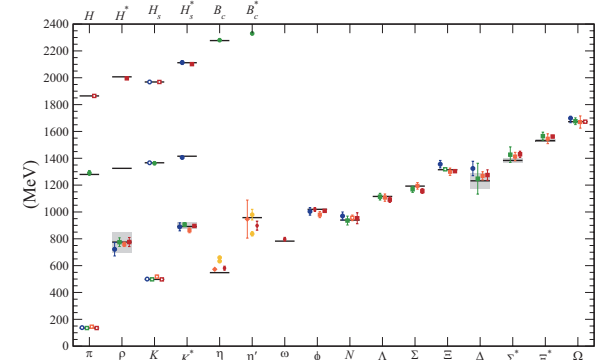
いろいろ論文のそこそこには断片的に書いてはありますが、もっとも重要な所は、実際に研究をやっている物理屋の心の中であって、それが物理屋間でおおまかに共有されているだけです。大きな国際会議中に地震やテロがあって、参加者がみな死んでしまったらどうしましょう。まとまって書き下されていない所から再構成するのは、どれだけ時間がかかるでしょう。そう思って、数年前、僕は実際にそれを自分で書き下してみようとノートを書きはじめました。しかし、百ページほど書いた辺りで、時期が尚早であったことに気が付きました。

というのは、ここ十年来、物性理論でのトポロジカル物質の研究の進展から、これまで僕のような素粒子理論屋の観点からするとほとんど空っぽであると思うような場の量子論でさえも、とても豊かな性質を持ちうる事が知られて来ているからです。物性物理においては、実験対象の試料には必ず表面や境界があります。試料の中ではあまり面白いことが起こっていませんが、試料の表面や境界で豊かな物性があります。対応して、場の量子論を考える際に、その中ではほとんど何も面白いことが起こっていませんが、表面や境界で面白いことが起こりえるのです。図3を参照ください。

これは物性物理においては自然な考え方ですが、素粒子論においては盲点だったのではないかと思います。少なくとも僕にとってはそうでした。というのは、この文章のはじめに書いたように、素粒子理論では、この現実世界の微小構成要素を記述している場の量子論を考えることが長らくの主目的です。その場合、この場の量子論は全世界に遍在しています、もしくは世界そのものですから、表面や境界はないわけです。

これらの発展を僕は数年前ようやく知ったのですが、これまでほぼ自明だと思っていた理論が実はまったく自明ではなかったのですから、僕にとっては一大事です。今後数年は、これらの発展をまず自分でも理解してなんとか消化することを目標にしています。これが一段落すれば、また、僕は場の量子論ノートを書き進められるようになるかもしれません。しかし、それはいつのことでしょうか？

- *1 力に何種類かあって、「強い力」というのはその一種類をさす固有名称です。強ければどんな力でも指すわけではありません。
- *2 著者は世間的には理論物理屋の一人ですから、数学者としてではなく物理屋として意見を述べる必要があります。現実と関係ない理論をやっているという意味で物理学者ではなく、厳密でないという意味で数学者でも無いのですが。
- *3 例えばTatsumi Aoyama, Masashi Hayakawa, Toichiro Kinoshita, Makiko Nio, Tenth-Order QED Contribution to the Electron g-2 and an Improved Value of the Fine Structure Constant, arXiv:1205.5368 [hep-ph] を参照のこと。実験でも計算でも $a_e \approx 0.001159652180$ という値が得られている。
- *4 例えば日本語では青木慎也著「格子QCDによるハドロン物理」(物理学最前線13) 共立出版、英文ではAndreas S. Kronfeld, Twenty-First Century Lattice Gauge Theory: Results from the QCD Lagrangian, arXiv:1203.1204 [hep-lat] を参照のこと。そこから図を一つ引用する。横線が中間子の質量の実測値、色々な色の点は各種研究グループの計算結果。



- *5 <http://www.claymath.org/millennium-problems> を参照。
- *6 どうしても良いことですが、現在は「ゲージ対称性」「フレーバー対称性」として理論物理では知られている概念は、当時は「局所ゲージ対称性」「大域ゲージ対称性」として知られていました。公理論的場の量子論の業界では未だこの古い用語が使われています。大した事では無いのですが、塵も積み重ねれば、業界間のコミュニケーションに齟齬をきたします。
- *7 「場の量子論」という用語は、分野全体を意味することもありますし、個別の対象をあらわすこともあります。ここでは後者の用法です。
- *8 物理屋が単にザイバーク=ウィッテン理論という物理側の結果をさしますが、片側しか知らない人がもう片側の論文をみても殆ど関係はわからないと思います。僕自身若い頃、物理側の話勉強しようとして反対側の文献を借りてきたため、ちんぷんかんぷんであった記憶があります。

Belle II 実験

樋口 岳雄 ひぐち・たけお

Kavli IPMU 准教授

素粒子の間に働く基本的な相互作用には、電磁気力、弱い力、強い力、そして重力があることが知られている。素粒子間の作用のうち重力を除く部分は精密に定式化されていて、その定式を我々は「素粒子標準理論」と呼んでいる。素粒子標準理論はきわめて強力な理論であり、素粒子標準理論と矛盾する素粒子反応は実験的にほとんど見つかっていない。

その一方で、素粒子標準理論が万能の理論ではないこともわかっている。たとえば、この宇宙にはダークマターとよばれる物体が存在することがほぼ確実であるが、ダークマターの性質と合致する粒子は素粒子標準理論には存在しない。このような理由から、素粒子標準理論を拡張する「新しい理論（新物理・新粒子）」が存在するであろうことが強く信じられている。

Belle II 実験

Kavli IPMU は、高エネルギー加速器実験「Belle II」に参加して、新物理の探索を最終目的に研究を進めている。Belle II 実験は日本を代表する高エネルギー加速器実験のひとつである。Belle II 実験では、粒子加速器 SuperKEKB を使って電子と陽電子を加速衝突させ、そこから B 中間子のペアやタウ粒子のペアを作り出す。これらは不安定な粒子であるためすぐに別の種類の複数の粒子に変化（崩壊）する。ここで、もし新物理が存在するならば、実際の粒子崩壊のようすと素

粒子標準理論が予想する粒子崩壊のようすとの間には不一致が生じるはずである。Belle II 実験では、この粒子崩壊の不一致の度合いを精密に調べることで新物理を追究する。^{*} さらに、もし新物理が見つかったときにはその理論モデルの構築も行う。

Belle II 実験で見ようとしている素粒子標準理論と新物理との不一致は非常にかすかであるため、新物理の発見を確実にするにはたくさんの B 中間子やタウ粒子を生成する必要がある。SuperKEKB 加速器の前身である KEKB 加速器（Belle II 実験の前身であり、小林-益川理論の検証に貢献した Belle 実験のための加速器）の事象生成の頻度もすでに世界最高であったが、SuperKEKB 加速器はさらにその 40 倍を実現する能力を備えている。

Belle II 実験のための粒子検出器が「Belle II 測定器」である。Belle II 測定器は電子・陽電子の衝突点に設置されており、ビームパイプを取り囲むような円筒形をしている。粒子の崩壊を特徴付けるパラメータには、粒子崩壊が発生した位置、崩壊によって生じた粒子の運動量とエネルギー、および生じた粒子の種類が 4 つあり、Belle II 測定器はこれらを測定できるようになっている。Belle II 測定器は Belle 実験のための Belle 測定器の設計を取り入れつつも、大幅な改良がほどこされている。たとえば、加速器の増強によって素粒子反応の頻度が増えたと検出器内で前後の素粒子反応の

^{*} 本号の裏表紙を参照。

信号が重なってしまうため、突入粒子に対して高速に反応するセンサーを採用したり、検出器の信号読み出し回路を高速化したりして、問題に対応している。また、検出器信号のデジタル化からコンピュータへの記録までの全システムを一新して、検出器信号の高速化・大容量化に対応したほか、Belle II 実験に参加する大学・研究機関のコンピュータ群を仮想的に統合するシステムを導入して、データ解析で発生しうる計算機資源の不足にも対応できるようにした。これらの工夫により、Belle II 実験では、最終的には Belle 実験の50倍の素粒子反応を蓄積しようとしている。

Belle II SVD

B中間子などの粒子の崩壊位置は新物理の存在を定量的に判定するのに欠かせない情報である。Belle II 実験の崩壊点位置検出器 (VerteX Detector, VXD) は Belle II 測定器全体のもっとも内側に配置されていて、電子・陽電子の衝突点を囲むような円筒6層の構造になっている (図1)。そしてVXDは内側2層がピクセル

検出器 (PiXel Detector, PXD)、外側4層がシリコン崩壊点位置検出器 (Silicon Vertex Detector, SVD) となっている。Kavli IPMUは、このうちSVDの開発とSVD第4層の製作を担当している。

SVDのセンサー (図2) は縦60 mm×横125 mm程度の大きさである。センサーの表面と裏面には最小50 μm 間隔で線状の電極 (ストリップ) が並べられており、各ストリップは読み出し集積回路に接続してある。粒子がセンサーを通過するとその近くのストリップに電気信号が発生するので、この信号をとらえることで粒子の通過位置を検出する。ストリップは表面と裏面とで直交して並べられているため、粒子の通過位置は2次元で検出できる。

SVDの各層は、センサーを棒状に並べた「ラダー」と呼ばれるモジュールから構成される。ラダーはセンサー、センサーの支持体、ストリップからの電気信号を読み出す集積回路 (APV25)、APV25とストリップを接続するフレックス基板などから構成され、これらは接着剤で接着される (図3)。Kavli IPMUが担当するSVD第4層ラダーには5枚のセンサーが使用され、

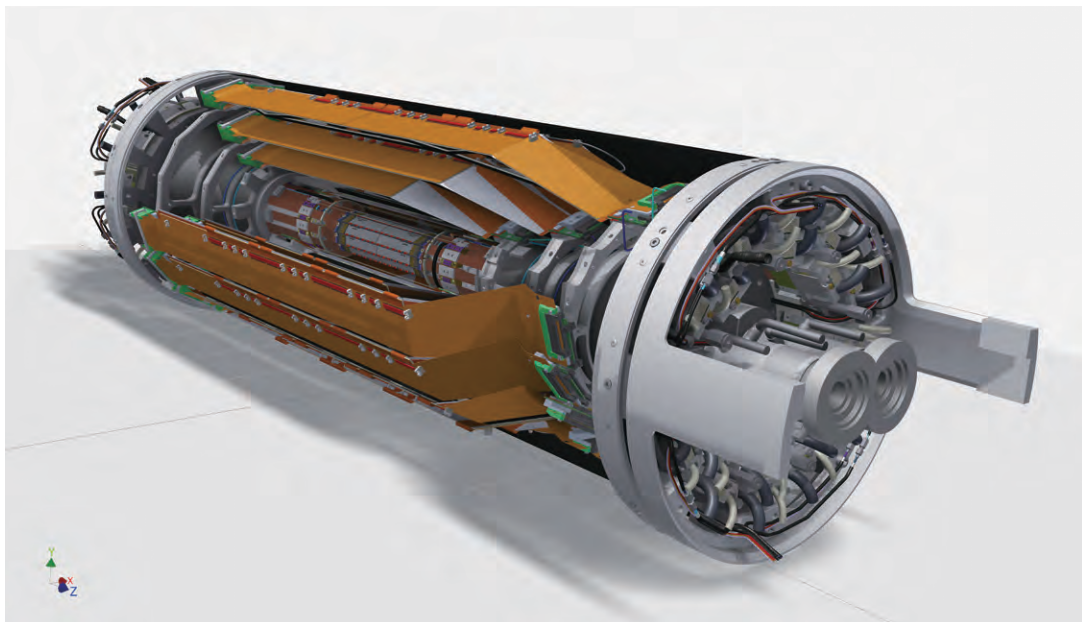


図1 Belle II崩壊点位置検出器。電子・陽電子衝突点を取り囲むような円筒6層構造をもつ。全長は935 mmで、円筒の直径は310 mmである。

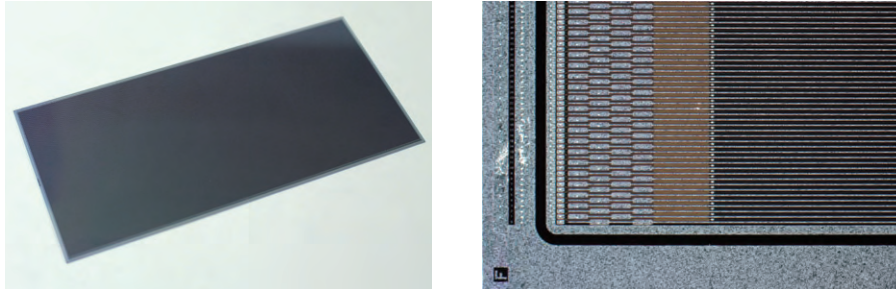


図2 センサーの全体写真(左)と拡大写真(右)。拡大写真ではストリップが見える。

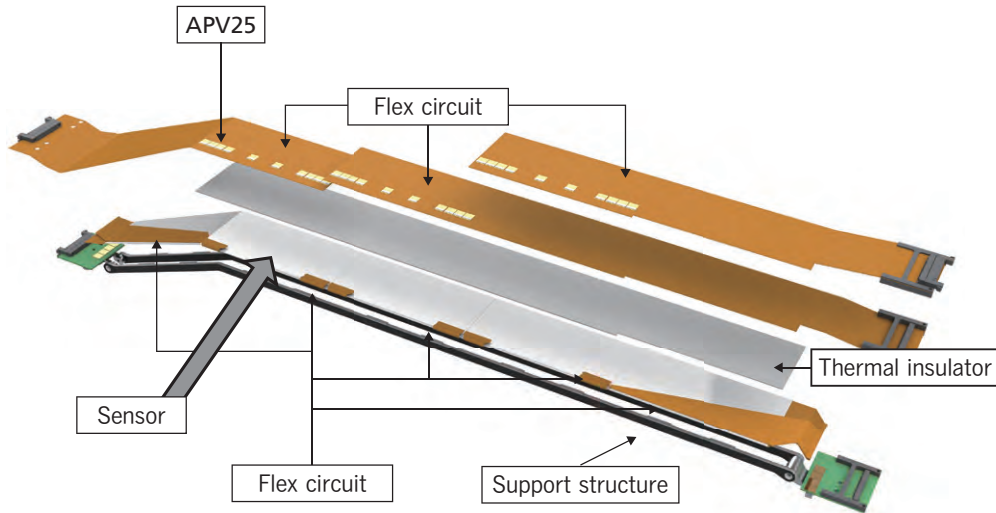


図3 SVD第4層ラダーの分解図。最下部の黒い部品がラダーの支持体で、その上に5枚のセンサーが並んでいる。茶色い部品は読み出しフレックス基板である。

ラダーの全長は749 mmである。ラダー内やラダー間でセンサーが衝突することを防ぐため、センサーは設計位置から200 μmの精度で配列されることが求められる。ストリップとフレックス基板の間、およびフレックス基板とAPV25の間は太さ25 μmのアルミニウムワイヤーで結線されており、SVD第4層ラダーでは結線ワイヤーの総数は1万2千を超える。なおラダー1本の価格は小型のバスと同程度である。

ラダーの中でもっとも特徴的な設計が chip on sensor conceptとOrigami concept (図4) である。信号読み出しのノイズを少なくするにはストリップからAPV25までの配線をできるだけ短くする必要がある。そこでAPV25をセンサーの直上に配置することにした。し

かしこのままではセンサー裏面の信号を読み出せない。そこで、センサー裏側からフレックス基板を伸ばし、これを表面に折り返して接着した上でワイヤー結線をして信号を読み出すのである。

Kavli IPMUではSVD第4層を構成するラダー16本と予備4本を実験室に建てられたクリーンルームの中で製作している。最初の課題は、高価な部品の複雑な組み合わせからなるラダーを、高精度で製作できる工程を確立することであった。ラダー製作の開発は2012年頃から開始した。そもそも、人の手では要求精度でセンサーを並べることはできない。そこで我々は、専用の治具を開発し、これを使ってラダーを製作することとした。使用する治具の総数は最終的に20

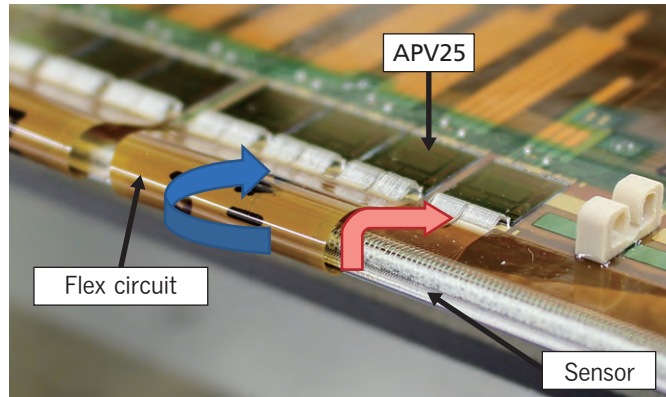


図4 Origami conceptの写真。センサー裏側に貼り付けられたフレックス基板をセンサー表面に折り返してAPV25に導入することで、センサー裏面の信号を読み出す。

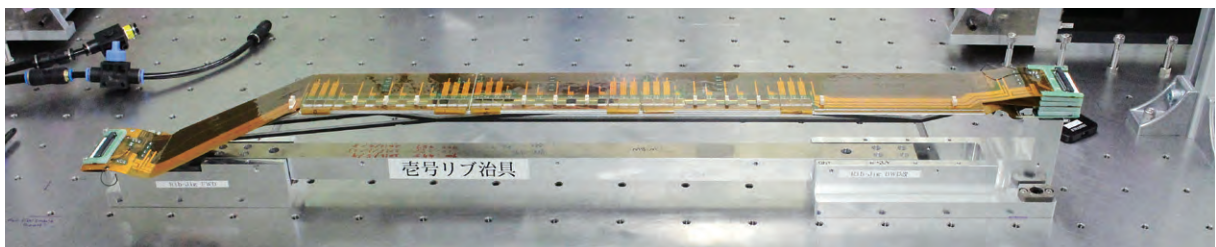


図5 完成したラダー実物の写真。

以上となった。治具によるラダー製作工程の検証とデバッグに加え、部品接着やワイヤー結線の工程も独自に開発した。10本以上のモックアップラダーの製作を経て、我々はラダー製作工程の開発を2015年頃に終えた。これと並行して、ベータ線の照射を受けたラダーからの電気信号をPCで解析することで、ラダーの電気的性能を評価するシステムも開発した。2016年春には、我々は電氣的に完動する初めてのラダーを完成させた。そして、このラダーを他の層のラダーとともに電子線照射実験に投入し、我々のラダーが期待通りに粒子検出能力を持っていることを実証した。

次の課題は、均一なラダー品質の確保であった。我々はラダー製作工程に厳重な品質管理の発想を組み込むこととした。とくに、作業による不定性排除のための作業の機械化とマニュアル化、受入部品の全数試験によるトレーサビリティの確保、ラダー製作中に

発生したエラーを速やかに検知するための複数のチェックポイントの設定、完成したラダーの品質を保証するための外観検査・組み立て精度検査・電気性能試験などには注意を払って実装した。

現在、我々はクリーンルームでラダーを量産している真っ最中である。これまでに5本のラダーを製作した(図5)。このまま順調にラダー製作が進めば2018年初頭にはラダー製作がすべて完了する予定である。他方、2017年夏頃から製作したラダーをVXD構造体へ取り付ける作業が始まる。2018年夏頃までにはPXDとSVDとを合体し、その夏を通して宇宙線粒子を用いたVXDの性能試験を行う。そしてその秋にはVXDをBelle II測定器全体の構造体に納め、2018年終わりからはいよいよ本格的に素粒子反応をとらえる実験を開始する予定である。

Our Team

アンドリュー・マクファーソン Andrew Macpherson 専門分野: 数学

博士研究員

私は圏論的および代数幾何学的思考を幾何学の他の分野、特にミラー対称性に関係する分野に適用する研究を行っています。例えば、次のようなものです。

- ・ 様々な文脈での滑らかな幾何学の延長としての導来幾何学：数え上げ問題およびフレアー理論への応用、
- ・ M. Raynaud流の、双有理変換で移行可能な違いを同一視した形式的幾何学としての非アルキメデス幾何学、および



- ・ max-plus半環に双対な代数幾何学としての多面体幾何学およびトロピカル幾何学、および、それと上に述べた分野との関係。

Tea Break:

何を研究してるのかね!

物理学者や数学者ではない友人から、「何を研究しているのか教えて」と度々聞かれることがありますか? もし短い答えをお探しなら、2つほど紹介しましょう。昨年8月に亡くなったミネソタ大学での私の同僚で、代数的トポロジーが専門の Hillel Gershenson は、並外れて素晴らしいユーモアのセンスの持ち主でした。彼は、数学者ではない友人の知りたがり屋たちに、いつも自分のしていることは「一番役に立たない数学さ。」とっていました。ある時、パーティーで誰かが彼に専門は何かと尋ねました。彼は「代数的トポロジー」と言ったのですが、その友人は「代数的アポロジー」と聞き違えてこう応えました。「何と! 私は今まで本当に長い間待ち続けていたんですよ、代数でご迷惑をおかけしましたと謝ってくれる人を!」

(アレクサンダー A. ポロノフ)

D-Modules and Hodge Theory

阿部 知行 あべ・ともゆき

Kavli IPMU 准教授

2017年1月23日から27日まで Kavli IPMUで研究集会“D-modules and Hodge theory”が開催されました。15氏の講演者を招聘し、3氏に2コマの講演をしていただきました。

集会のテーマであるホッジ理論は代数・解析・数論幾何の交差に位置する理論です。ホッジ理論の歴史はW.B.D. Hodge氏が調和形式を用いてケーラー多様体の特異コホモロジーの驚くべき分解を発見したことから始まります。証明は完全に解析的であるものの、分解自体は代数幾何学的解釈を持っており、代数幾何学（またはケーラー幾何学）の特徴的な性質と捉えられています。Hodgeの発見から数十年後、A. Weil氏が有限体上の多様体に関する衝撃的な予想を提唱し、J.P. Serre氏がその予想の複素幾何類似はホッジ理論から導かれることを発見しました。これ以降ホッジ理論は有限体上のコホモロジー論において発想の源

泉となってきました。一方で Weil 予想に触発され、P. Deligne氏はホッジ分解の新しいより哲学的な解釈の方法を見いだしました。ホッジ構造の発見です。この哲学とGrothendieckの“6つの関手の哲学”に沿い、またD加群の理論を用いながら、齋藤盛彦氏はホッジ加群の理論を打ち立てました。次に目標となるのは齋藤氏の理論を一般化し不確定特異点に対しても類似の構造を入れることとなります。このプログラムはC. Simpson氏のツイスターホッジ構造の仕事に影響を受けC. Sabbah氏によって始められ、近年望月拓郎氏によって完成を見ました。本研究集会の目標はこの理論とその進展について理解を深めることにありました。

望月氏には件の結果に関する2コマの講演をお願いしました。始めの講演では氏の理論の基礎的な事項を、二つ目の講演ではその応用について講義されました。彼の理論を用いることでミ

ラー対称性に表れるいくつかの事実をより自然な形で説明できることが分かり、更なる応用が期待されます。K.S. Kedlaya氏はターニングポイントの解消に関して講義されました。これは望月氏と同時期に独立に得られた結果です。Kedlaya氏の方法はp進解析を用いるものです。氏の証明の最も面白い側面は、ベルコピッチ空間上の微分方程式の理論と付置環の理論の視点を合わせることで、どこでブローアップを施すべきか、簡明な説明が出来る場所です。A. D'Angnolo氏は不確定リーマン・ヒルベルト対応に関する柏原正樹氏との共同研究について話されました。この結果から高次元多様体上のストークス現象を説明する術を得ます。証明の中核ではターニングポイントの解消を用います。

本研究集会ではたくさんの異なる分野の研究者が参加していただき、大盛況でした。



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」シンポジウム

高田 昌広 たかだ・まさひろ

Kavli IPMU 教授

現在の宇宙が加速膨張していること、そして宇宙初期にもインフレーションという加速膨張の時期があったことが、観測的に確からしいことが分かっています。これは「引力である重力は宇宙の膨張を減速させるはずである」という直感と反し、現代宇宙論の大問題となっております。いったい何が宇宙膨張を「後押し」し加速させるのか？ インフレーション、アインシュタインの宇宙定数という「理論」が「説明」に使われているものの、様々な不自然さを抱えており、到底満足できる説明とは言えません。本新学術領域研究は、宇宙膨張の加速の原因を究明、また加速に逆らって銀河・銀河団などの宇宙の構造形成を引き起こすダークマターの引力とのせめぎ合いを理解することを目的とします。この加速宇宙の物理を徹底的に究明するため、インフレーションによる加速 (A01: 京大 佐々木節)、ダークマターによる減速 (A02: 東北大 高橋史宜)、ダークエネルギーによる加速 (A03: 名大/Kavli IPMU 杉山直) という三つの宇宙膨張の時期を、宇宙背景放射 (B01: KEK/Kavli IPMU 羽澄昌史)、銀河イメージング (B02: 国立天文台 宮崎聡)、銀河分光 (B03: Kavli IPMU 高田昌広)、宇宙膨張の直接測定 (B04: 国立天文台 白田知史) の四つの手法でアプローチし、そのデータを究極物理解析 (D01: MPA/Kavli IPMU 小松英一郎)

で統一的に読み解き、究極理論 (C01: Caltech/Kavli IPMU 大栗博司) に結びつける計画研究を遂行します。平成27年度から31年度までの5年間の研究プログラムです。

この研究プロジェクトの発足から2年間の研究期間を経て、2017年3月8日から10日の3日間にわたり、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で研究会シンポジウムを開催しました。研究グループのメンバーが一堂に会し、各計画研究班、公募研究の研究者が進捗状況を報告し、また若手研究者にも発表の機会が与えられ、それらの研究内容について活発な議論が交わされました。さらに、原始ブラックホールに関するサイエンスの特別セッションの場を設け、観測的な制限の現状、イン

フレーションによる原始ブラックホールの生成機構のモデル、原始ブラックホールがダークマターである可能性、また重力波実験 Advanced LIGO でブラックホール連星による重力波が検出されましたが、原始ブラックホールがその連星の起源である可能性、などについて議論されました。3日間の研究会には120名を超える参加者があり、「加速宇宙」に関する幅広い分野の研究について活発な議論が交わされ、研究会は大盛況に終わりました。

最後に研究会の運営にあたり、長谷川雅也さん、西野玄紀さん、横山修一郎さん、須山輝明さん、大学院生の尽力が必要不可欠でした。またKEKの事務スタッフの皆様にもこの場を借りて御礼申し上げます。

写真提供: KEK 素核研



ワークショップ「数学と超弦理論」

戸田 幸伸 ただ・ゆきのぶ

Kavli IPMU 准教授

2017年3月21日から23日にかけて、「数学と超弦理論」という題目のワークショップがKavli IPMUにおいて開催されました。このワークショップは、「加速膨張宇宙を紐解く超弦理論の数学的構築と観測による検証」という課題名によって採択された日本学術振興会の事業「頭脳循環を加速する戦略的研究ネットワークプログラム」の締め括りとして開催されたものです。このプログラムの目的は国内の若手研究者を海外に派遣して共同研究を促すというもので、ワークショップ主催者である山崎雅人、戸田幸伸を含めた様々な国内の研究者が海外に派遣され、現地で議論を深めました。

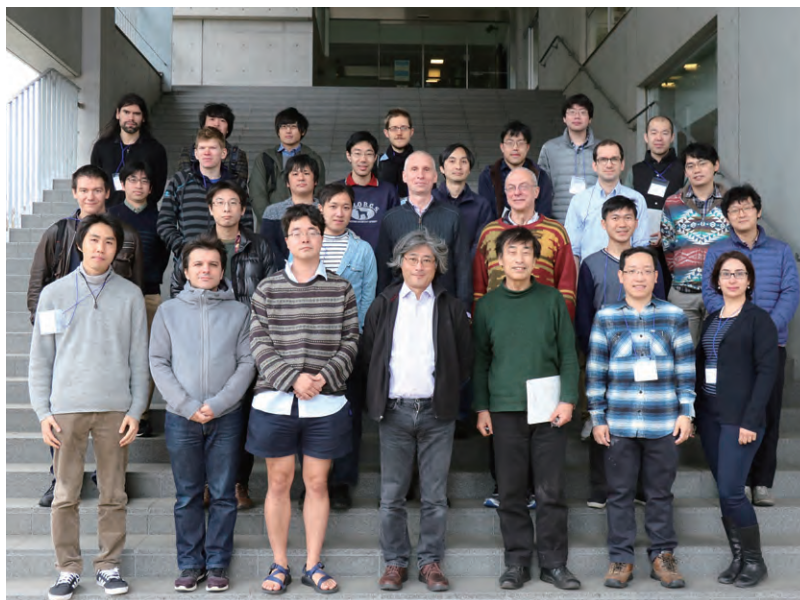
ワークショップでは数学と超弦理論双方の研究者が集まり、有意義な議論が展開されました。数学の側からは Ivan Ip, Zheng Hua, 池田暁志、金沢篤志、Georg Oberdieck、Yinbang Lin、Kyoung-Seog Lee の7名が講演を行いました。内容は導来代数幾何学、ミラー対称性、安定対不変量、連接層の導来圏等と多岐に渡っていました。金沢篤志はカラビヤウ多様体のミラー多様体の構成をその退化を用いて構成するというDoran-Harder-Thompsonの予想について解説し、彼らの予想が楕円曲線と特殊なアーベル曲面の場合に成立することを発表しました。Georg OberdieckはK3曲面と楕円曲線の直積である3次元カラビヤウ多様体上の曲線を数え上げる

Pandharipande-Thomas 安定対不変量についてのKatz-Klemm-Vafa予想を完全に解決するという、非常に強力な結果を発表しました。

超弦理論の側からはMauricio Romo, Nezhla Aghaee, Shamil Shakirov, Pietro Longhi, Bruno Le Floch, Dongming Gang, 渡利泰山の7名が講演を行いました。Mauricio Romoはアフィンではない代数多様体上で超ポテンシャルを考えたハイブリッド模型における球面相関関数について発表しました。Shamil ShakirovはChern-Simons理論による位相的量子場の理論の変形について解説しました。その

様な変形は種数が1以下のリーマン面を境界とする場合には知られていましたが、Shakirovはそれを種数が2のリーマン面を境界に持つ場合に拡張できると発表しました。他にも超タイフイミラー空間の量子化の話や、BPS状態の壁越えに関する話などがあり、数学者にとっても興味深い内容でした。

ワークショップの最中は数学者と物理学者が活発に意見を交し合い、双方の発展を促す良い機会となりました。頭脳循環プログラムの締め括りにふさわしい、実りあるワークショップとなりました。



Workshop

吉田直紀教授、第13回日本学術振興会賞及び日本学士院学術奨励賞を受賞

東京大学大学院理学系研究科教授とKavli IPMU教授を兼ねる吉田直紀さんが、「大規模数値シミュレーションに基づく初期宇宙での構造形成の研究」により第13回（平成28年度）日本学術振興会賞及び日本学士院学術奨励賞を受賞し、2017年2月8日に日本学士院で行われた授賞式に臨みました。



日本学士院学術奨励賞の賞状と賞牌を示す吉田さん。
写真提供：計算基礎科学連携拠点。

これらの賞は平成16年度に創設されました。日本学術振興会賞は創造性に富み優れた研究能力を有する若手研究者を顕彰するものであり、同賞の受賞者（今回は25名）の中から特に優れた業績を挙げたとされる研究者6名以内（今回は6名）が日本学士院学術奨励賞の受賞者に選ばれます。

吉田さんは、共同研究者とGADGETというシミュレーションコードを開発し、そのコードを用いて初期宇宙の構造形成や進化、初代星形成、超巨大ブラックホールの起源を探るシミュレーション研究を行ってきました。今では、GADGETは大規模コンピュータ

シミュレーションによる宇宙研究の分野で世界標準となっていて、天文観測研究の分野にも大きな影響を与えており、吉田さんの研究の天文学への貢献と将来性が評価されました。

阿部知行准教授、2017年度日本数学会春季賞を受賞

Kavli IPMU准教授の阿部知行さんが「数論的D加群の理論とラングランズ対応の研究」により日本数学会の2017年度春季賞を受賞しました。授賞式は、首都大学東京で開催された日本数学会2017年度年会中の3月25日に同大学講堂大ホールで行われました。



阿部知行さん

この賞は1973年に創設された彌永賞を前身として1988年に創設され、毎年日本数学会会員で40歳未満の優れた業績を上げた数学者に贈られます。

正標数の代数多様体のコホモロジー論には、大きく分けて位相的なものと解析的なものの2つのコホモロジー論が知られています。この2つのコホモロジー論は、ある意味で似た情報を持っていることがドリーニュによって予想されています。阿部さんは「解析的なコホモロジー」の一種である数論的D加群の理論を用いてラングランズ型の対応を構成することで、ドリーニュの予想の一部を体現しました。阿部さんの研究は難解ですが、Kavli IPMU News No. 35の解説（36 - 41ページ）からその一端をうかがうことができます。

Kavli IPMUでWPI 事務部門長会議開催される

2017年3月8日Kavli IPMUでWPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)の事務部門長会議が開催されました。各拠点の事務部門長らが参加したほか、WPIの黒木登志夫PD(プログラムディレクター)、宇川彰PD代理、斉藤卓也文部科学省研究振興局基礎研

究振興課基礎研究推進室長はじめ、文部科学省及び日本学術振興会WPI事務局からの参加がありました。

冒頭、主催者側として会議の開催を企画したKavli IPMUの春山事務部門長が10年を経過したWPIプログラムにとって、今後各拠点間の連携をより深める必要があることから今回の会議が企画されたという経緯を報告、続いて黒木PD、文科省斉藤室長らから、WPIアカデミー設立に向けた現状について、WPI 9拠点のうち2007年に開始した先行拠点は、10年間の活動で達成した世界トップレベル研究拠点を「WPIアカデミー」という新規に設立される枠組みの中で維持、発展させることができること、またKavli IPMUは5年の延長が認められた拠点として、現行のWPIプログラムと共に、WPIアカデミーにおいても、その役割を果たすことが期待される旨、説明がありました。さらに、ファンドレイジングの専門家による各種寄付金獲得に向けたプレゼンテーションがあり、WPI拠点活動は魅力的で十分にアピール力があることなどのコメントがありました。

その後、Kavli IPMUのユニークな建物、および毎日行われている分野を超えた研究者の交流のためのティータイムを見学しました。

最後に、各拠点で抱えている共通の問題点などについての意見交換が行われましたが、今回のような事務部門長会議の重要性が認識され、共有化できる情報をWPIの財産として構築していくため、今後できるだけ定期的に集まっていこうという方向で一致しました。



WPI事務部門長会議の様子。

VLAとALMAの組み合わせで初めて見た星誕生の地

Kavli IPMUの博士研究員Wiphu Rujopakarn (ウィプー・ルジョーパカーン)らを中心とする、アメリカ国立電波天文台(NRAO)、エディンバラ大学、ヨーロッパ南天天文台(ESO)の研究者を含む国際研究チームは、2つの電波望遠鏡、米国ニューメキシコ州にあるカール・ジャンスキー超大型干渉電波望遠鏡(VLA)と南米チリのアタカマ高原にあるアルマ望遠鏡(ALMA)を用い、89億光年から115億光年遠方の銀河を観測し、星形成が盛んだった頃の星形成の現場を初めて精細に捉えました。今回の観測対象は、ハッブル宇宙望遠鏡が遠方の銀河を捉えた Hubble Ultra Deep Field (ハッブル・ウルトラ・ディープフィールド, HUDF) から選ばれた11個の銀河です。

現在の宇宙におけるほとんどの星はこの頃に生まれたと考えられています。しかし、星形成が盛んな銀河には星形成の活発さゆえに塵が多く存在しています。このため、塵に遮られてしまう可視光では星形成の現場を詳しく観測することは困難です。しかし、可視光より波長の長い電波は塵に遮られずに通り抜けることができます。このため、VLAでは星形成が引き起こされている場所を精密な画像として観測することができ、また正式には「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」と呼ばれるALMAでは、電波の中でも波長の短いミリ波を観測に用いて、星形成に必要な冷たいガスの分布を捉えることができました(図参照)。

その結果、現在の宇宙では銀河の合体が起きているなどの限られた領域で星形成が盛んであるのに対し、今回観測した銀河では全ての銀河で星形成が広い領域で活発に行われており、この星形成の活発さ一銀河内での星形成率(1年間に新しく作られる星の総質量)一は、現在の普通の銀河に比べ20倍にもなることがわかりました。

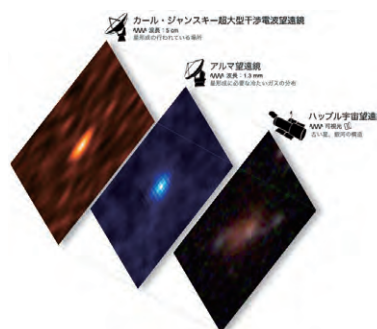
今後、電波とミリ波を組み合わせた

本研究のような観測により多くの銀河の星形成の現場を精細に捉え解析することで、当時の銀河でどのようなメカニズムで星形成が行われていたのか、また現在の星形成とのメカニズムの違いに迫ることができると考えられ、ひいては銀河進化の歴史の解明に繋がることが期待されます。

この研究成果は、アメリカ天文学会の天体物理学誌アストロフィジカル・ジャーナル(Astrophysical Journal)に2016年12月1日付で掲載されました。



ハッブル宇宙望遠鏡とVLAでみた遠方銀河の画像を重ね合わせたもの。赤の領域がVLAで捉えた電波の画像にあたる。各画像枠線内の左下は各銀河の地球からの距離を示す。(© K. Trisupatsilp, NRAO/AUI/NSF, NASA. 日本語訳についてはKavli IPMU)



VLAでは星形成が起こっている場所を、ALMAでは星形成に必要な冷たいガスの分布を捉えることができた。ハッブル宇宙望遠鏡は可視光で見た銀河の構造を示す。(© Wiphu Rujopakarn / Kavli IPMU)

HSCによる大規模観測データを全世界に公開開始

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)で進められている大規模な戦略的観測プログラム、HSC-SSPの第1期データが、2017年2月28日(ハワイ現地時間2017年2月27日)に全世界に公開されました。データ量が膨大なため通常的手法では解析が困難ですが、専用のデータベースやユーザーインターフェースを開発することで、誰でもこのビッグデータを用いた研究ができるような工夫が施されています。

HSC-SSPは、2014年から5、6年をかけて300夜もの観測時間を使い、満月の視野角に換算すると約6000個分にもなる広い天域にわたり、深宇宙に広がる様々な銀河を撮像する、言わば宇宙の国勢調査を行うプロジェクトです。国立天文台、Kavli IPMU、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が共同で観測を進めており、Kavli IPMUの高田昌広教授がHSC-SSPのデータを使ったサイエンスワーキンググループのリーダーを務めています。

今回公開されたデータは、2014年からの61.5夜分で、総データ量は80テラバイトという膨大なものです。まだ計画全体の6分の1のデータ量であるにも関わらず、既に約1億個の銀河のカタログを作成することに成功しました。これを他の観測と比較すると、例えば、広域観測で有名な米国のスローン・デジタル・スカイサーベイ(SDSS)では、同等のカタログを作成するのに10年以上の歳月を要しています。

この短期間にこれだけのデータ量を取得できた理由は、HSC-SSPがすばる望遠鏡とHSCの性能を最大限に活かした大規模観測サーベイだからです。まず、すばる望遠鏡は主鏡が8.2mと大きく、高い集光能力を有しています。また、すばる望遠鏡の主焦点に搭載されているHSCは104個の科学データ取得用CCD(計8億7000万画素)で

約1.77平方度の天域を一度に撮影できる超広視野カメラで、ハッブル宇宙望遠鏡に比べ約1000倍ほどの大きさの視野をもっています。

さらに、他の観測に比べ、HSC-SSPは暗い銀河や遠方の銀河といった情報を含む非常に質の高いデータが取得できます。これらのデータを用い、銀河の起源、ダークマター、ダークエネルギーの解明など、今後の成果が期待されます。

Kavli IPMU / ELSI 合同一般講演会「起源への問い」開催

2017年1月22日に東京大学本郷キャンパスの伊藤謝恩ホールでKavli IPMUと東京工業大学地球生命研究所(ELSI)との合同一般講演会「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、哲学も交えた多様な視点を提供するイベントとして企画されたものです。2回目となる今回は約350名が参加し、会場は満席となりました。

講演会はWPIの黒木登志夫 PD (プログラムディレクター) の挨拶で始まり、Kavli IPMU 主任研究員の栗原博司さんが「物理学からみた宇宙の起源」、ELSI 所長の廣瀬敬さんが「現在から過去を知る—45億年の時間旅行—」、東京大学大学院人文社会系研究科教授の納富信留さんが「古代ギリシア哲学から問う起源 (アルケー)」と題してそ



講演後の鼎談。右から栗原さん、廣瀬さん、納富さん。

れぞれ講演を行いました。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。

アメリカ科学振興協会 (AAAS) 年次大会に参加

2017年2月16日から20日まで、ボストン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17日から19日の3日間、WPIの国際的認知度の向上を目指して合同でブース展示を行い、WPIの黒木登志夫PD (プログラムディレクター) も参加して各拠点の研究成果や研究環境を紹介しました。WPI ブースには3日間で研究者、ジャーナリスト、学生、家族連れ等を含む約300名以上が訪れました。

なお、今回のAAAS年次大会では、2015年ノーベル物理学賞受賞者で東京大学宇宙線研究所長とKavli IPMU 主任研究員を兼ねる梶田隆章さんが「Opening a New Era to the Universe with Gravitational Waves」と題したパネルディスカッションに登壇しました。



AAASでのWPIブースの様子。写真提供：九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(PCNER)。

「Workshop -失われた領域を求めて- Art×Science×Philosophy」開催

2017年3月25日、多摩六都科学館で同館とKavli IPMUの共催で「Workshop -失われた領域を求めて- Art × Science × Philosophy」が開催されました。科学、芸術、哲学の各分野で重なる部分、重ならない部分を考察することを目的として行われた

このワークショップには、登壇して話題を提供する専門家としてKavli IPMU 助教の山崎雅人さん (物理学)、京都大学白眉センター文学研究科助教の丸山善宏さん (数理哲学)、ARAYA (株式会社アラヤ) の大泉匡史さん (脳科学)、東京大学美学芸術学研究室助教の桑原俊介さん (美学)、Art Center Ongoing の小川 希さん (現代美術) が招待され、約40名の参加者は半数以上が女性でした。

全体を、科学セッション、芸術セッション、全体討議に分け、朝から夕方までの長時間行いましたが、ワークショップということで参加者同士の議論の時間が頻りに設けられていたこともあり、講師の講演内容を更に深める形での各テーブルでの議論は大変な盛り上がりを見せました。



話題を提供するKavli IPMUの山崎さん。



ワークショップの様子。

日本語クラス修了式

Kavli IPMU では外国人研究者やその家族等に向けて独自に日本語の講座を開設しています。これまで多くの受講者がKavli IPMU 事務部門の日本語教師西川正美さんが開講する計約40時間の日本語入門集中コースを終えて修了証書を手にしてきました。

2017年3月13日に行われた日本語クラス修了式では、Kavli IPMU 特任研究員のハン・ジャーシン（韓 家信）さん、ラン・ティンウェン（藍 鼎文）さん、ジュリアナ・クワンさん、ファビアン・ケーリングさん、ツェン・ポーイェン（曾 柏彦）さん、ツェン・ポーイェンさんの奥さんのチェン・チャーイさんの6名が日本語のスピーチを行い、修了証書を授与されました。



一見、修了者は5人に見えますが、一人が修了証書を掲げていないため、ちゃんと6人写っています。

PI（主任研究員）の異動

平成19年10月1日にWPI拠点として発足したIPMUは、平成24年4月1日にKavliの名前を冠してKavli IPMUとなりましたが、平成28年度末でWPIの当初10年（実質9年半）の支援期間が終了し、平成29年度より5年間の支援延長期間に移行します。この機会にPI（主任研究員）の一部が新鋭研究者と交代するとともに、総数が19人から26人の体制に拡充されます。

3月31日付で退任するPI

（括弧内は退任後のKavli IPMUでの役職、身分）

野本憲一（上級科学研究員）

斎藤恭司（上級科学研究員）

Henry Sobel

鈴木洋一郎（副機構長、特任教授）

柳田勉（特任教授）

4月1日付で就任するPI

（括弧内は本務先またはKavli IPMUでの役職、身分）

堀 健太郎（教授）

Mikhail Kapranov（教授）

Young-Kee Kim（シカゴ大学教授）

小松英一郎（マックス・プランク宇宙物理学研究所Director）

Kai Martens（准教授）

松本重貴（准教授）

森山茂栄（東京大学宇宙線研究所准教授）

野村泰紀（カリフォルニア大学パークレー校教授）

高田昌広（教授）

戸田幸伸（准教授）

Mark Vagins（教授）

吉田直紀（東京大学理学系研究科教授 / Kavli IPMU特任教授）

留任するPI

相原博昭、Alexey Bondal、井上邦雄、

梶田隆章、Stavros Katsanevas、

川崎雅裕、小林俊行、河野俊丈、

村山 斉、中畑雅行、野尻美保子、

大栗博司、David Spergel、杉山 直

人事異動

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU 在任期間です。]

Yalong Cao（曹亚龙）さん [2016年8月1日 - 2017年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員からオックスフォード大学 Newton International Fellowへ。

Dongmin Gang（姜東泯）さん [2014年10月1日 - 2017年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員からソウル国立大学校博士研究員へ。

Song Huang（黄崧）さん [2014年8月1日 - 2017年2月14日]、Kavli IPMU博士研究員からカリフォルニア大学サンタ・クルーズ校博士研究員へ。

Ilya Karzhemanovさん [2013年11月1日 - 2017年1月31日]、Kavli IPMU博士研究員からモスクワ物理工科大学准教授へ。

大島芳樹さん [2013年4月1日 - 2013年8月31日、および2014年9月1日 - 2017年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員から大阪大学大学院情報科学研究科准教授へ。

市川幸史さん [2016年4月1日 - 2017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）から日本電気株式会社研究員へ。

白石希典さん [2015年4月1日 - 2017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）から香川高等専門学校助教へ。

また、Kavli IPMU 博士研究員のTirasan Khandhawit さん [2013年9月1日 - 2016年8月31日、および2016年9月16日 - 2017年1月15日]、が任期満了で退職しました。



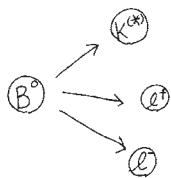
B中間子の崩壊による新物理の探索

森井 友子

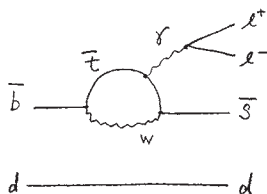
Kavli IPMU 博士研究員

これからの新しい物理法則はTeVのエネルギー領域にあると考えられており、この領域での物理探索には、エネルギーフロンティア実験により新しい粒子を直接生成する方法、高輝度フロンティア実験により稀崩壊過程を探索する方法の2つの方向からのアプローチが重要になってきます。Belle II 実験は後者の実験の代表格であり、ここで重要となるのがペンギンダイアグラムによって起きる崩壊過程です。ペンギンダイアグラムではB中間子のボトムクォークが他のクォークに変化するときに中間状態を経由します。この中間状態には量子力学の不確定性関係により初期宇宙のような超高エネルギー状態が現れることが許されるため、新しい物理の影響を調べることができます。その一例を下に示します。ペンギンダイアグラムによっておこる崩壊過程は数万個のB中間子の中で一回起こるような稀崩壊過程ですが、Belle II 実験ではBelle実験の50倍に及ぶデータをためることで新しい物理を調べます。

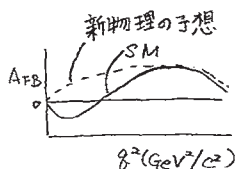
$$B^0 \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$$



ペンギンダイアグラム



新物理があると $l^+ l^-$ の前後非対称度 (A_{FB}) が大きく変化する



$$A_{FB} = \frac{N(\cos\theta_l > 0) - N(\cos\theta_l < 0)}{N(\cos\theta_l > 0) + N(\cos\theta_l < 0)}$$

θ_l : Bの進行方向と逆方向に対する l^+ の角度