

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
Flavors of Geometry Motivated by Mathematics and Physics



39

No.

September 2017

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Flavors of Geometry Motivated by Mathematics and Physics
Mikhail Kapranov
- 11 **Our Team**
Yukari Ito
Tom Melia
Hillary Child
Chang-Tse Hsieh
Frederick Takayuki Matsuda
Benjamin Quilain
- 14 **Research Report**
Progress in Neutrino Oscillation
New Results of the T2K Experiment and Status of the Hyper-Kamiokande Project
Atsuko K. Ichikawa
Tsuyoshi Nakaya
- 18 **Workshop Report**
Stellar Evolution, Supernova and
Nucleosynthesis Across Cosmic Time
Keiichi Maeda
Chiaki Kobayashi
- 20 **News**
- 24 **Kilonova** Masaomi Tanaka

Japanese

- 25 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 26 **Feature**
数学と物理学により触発された幾何学の趣^{おもむき}
ミハイル・カプラーノフ
- 33 **Our Team**
伊藤 由佳理
トム・メリア
ヒラリー・チャイルド
謝 長澤
フレドリック タカユキ・マツダ
ベンジャミン・キーラン
- 36 **Research Report**
ニュートリノ振動研究の展開
T2K実験の最新結果、そしてハイパーカミオカンデ計画
市川 温子
中家 剛
- 40 **Workshop Report**
Stellar Evolution, Supernova and
Nucleosynthesis Across Cosmic Time
前田 啓一
小林 千晶
- 42 **News**
- 44 **キロノバ** 田中 雅臣

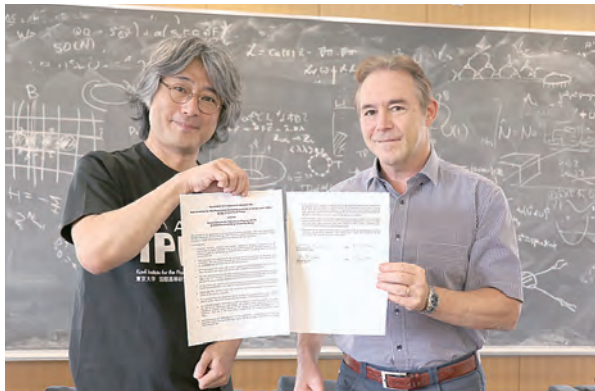


Mikhail Kapranov is a Professor and a Principal Investigator at the Kavli IPMU. He has contributed to several areas of mathematics including algebra (Koszul duality for operads), algebraic geometry (discriminants, secondary polytopes, hypergeometric functions), and category theory (semiorthogonal decompositions, Serre functors). After having received his Ph.D. from Steklov Institute in Moscow in 1988, he was a Scientific Associate there, and subsequently has been a Professor at Northwestern University, University of Toronto, and Yale University before joining the Kavli IPMU in 2014. He has been serving as a Kavli IPMU Principal Investigator since April, 2017.

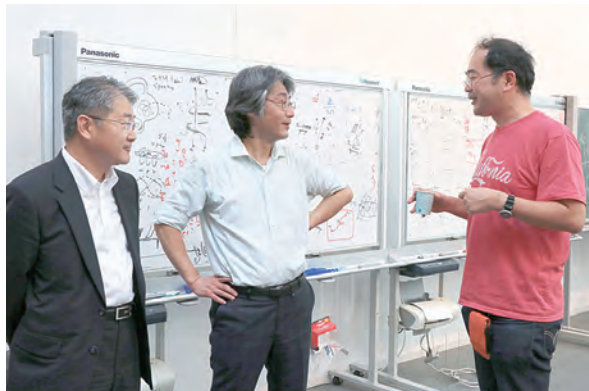
ミハイル・カプラーノフ：カブリIPMU教授、主任研究員。数学者。代数学（オペラドに対するKoszul双対性）、代数幾何学（判別式、第2ポリトープ、超幾何関数）、圏論（半直交分解、セール関手）などを研究。1988年にモスクワのステクロフ数学研究所よりPh.D.取得後、Scientific Associateとして同研究所に在籍。その後ノースウェスタン大学、トロント大学、イェール大学教授を経て2014年よりKavli IPMU教授。2017年4月よりKavli IPMU主任研究員を兼ねる。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



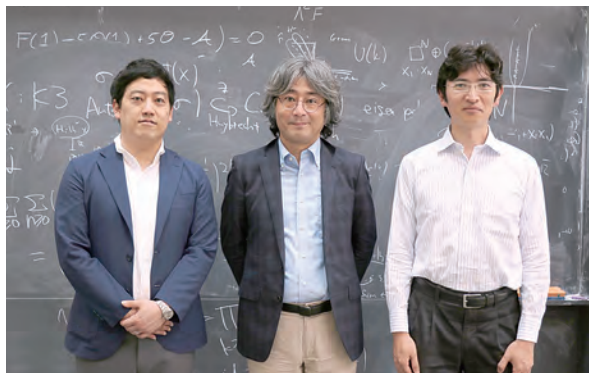
July 20: Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama (left) and Mainz Institute for Theoretical Physics (MITP) Director Matthias Neubert (right) signed Agreement for Cooperation between the Kavli IPMU and the MITP.



July 21: MEXT Research Promotion Bureau Director-General Yasunao Seki (left) visited the Kavli IPMU. (Right) Masaki Oshikawa, University of Tokyo's Institute for Solid State Physics Professor and Kavli IPMU Senior Scientist (see p. 20).



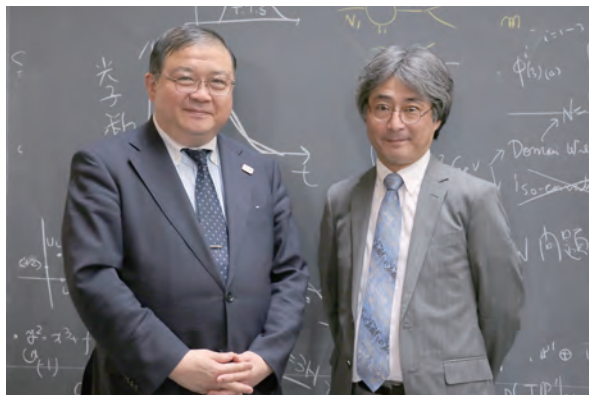
August 19: Lecture delivered at 2017 Collaborative Knowledge Creation Practical Learning Course, cohosted by the Kavli IPMU and the University of Tokyo Center for Research and Development on Transition from Secondary to Higher Education, Division for Cross-Stage Education and Assessment, CoREF (see p. 22).



August 21: Officers from MEXT's Research Promotion Bureau, the Basic Research Promotion Division visited the Kavli IPMU. (Right) Ryuuma Oohora, Director of the Office for the Promotion of Basic Research. (Left) Yuuki Shigeta, Unit Chief (see p. 20).



September 1: Appointment of Kavli IPMU Professor Yukari Ito (right).



September 15: MEXT Vice minister Kazuo Todani (left) visited the Kavli IPMU (see p. 20).

Director's
Corner

Flavors of Geometry Motivated by Mathematics and Physics

Geometry is one of the oldest branches of mathematics. Its goal is to describe the structure of space, so it is motivated by our physical understanding of the space around us. From the human perspective, geometry is dominated by the visual sense, the source of so-called geometric intuition, which allows us to see the connections between parts of an image before formally describing them. It is our everyday experience of seeing everyday things around us that forms the basis of our assumptions about what geometry should be about.

But modern physics tells us that the structure of our physical space (or space-time) at very short distances is not known. Why? Because our visual sense is based on the eye observing the light reflected by objects. But light is in fact a wave phenomenon. So “objects” smaller than the wave length of the light, are hard to observe precisely in this way. Trying to increase the resolution, so to say, involves bombarding the object with quanta of light (or with other particles) with higher and higher energies. Since our ability to produce higher energy particles is limited, so is our ability to “see” at very short distances.

So we cannot just assume that at extremely small ranges our space has the same general structure as we are used to from everyday life. For example, it is not a law of nature that it consists of points which are arranged continuously next to each other,

with well defined distances between them, etc. In other words, the premises on which we base our development of geometry must be re-examined.

There have traditionally been several branches of geometry: differential geometry, algebraic geometry, topology, combinatorial geometry and so on. But all these types agreed on certain assumptions (like the above) on what should we understand by a “space” in the first place, and differed only in the approaches they took in studying it: differential calculus, algebraic equations and so on.

However, in recent decades, there appeared several new directions of geometry which require a change in the very way we think about geometric shapes. I want to discuss some of these directions.

Grothendieck’s scheme theory

Most of new geometric approaches are based on the theory of schemes developed by A. Grothendieck in the early 1960’s as a new foundation of algebraic geometry. The basic idea is that all the information about a “space” X (whatever we mean by this) must be encoded by the datum R of functions on X . In the naive settings R consists of functions on X of certain kind, i.e., of rules f associating to any point x of X some numerical value $f(x)$. Such functions can be added, subtracted and multiplied pointwise. Mathematically, a system of functions (or other entities) closed under addition, subtraction and

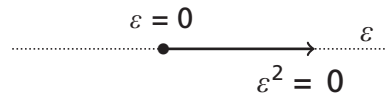


Figure 1: A non-classical space given by the equation $\varepsilon^2 = 0$.

multiplication is called a *ring*. The rings of functions have one obvious but important property: the multiplication is commutative:

$$f \cdot g = g \cdot f.$$

This property turns out to be crucial for the formalism of algebraic geometry to work.

For example, if X is the n -dimensional coordinate space, then the corresponding R consists of polynomials in n variables, expressions like

$$f(x, y) = 2x + 3y + 16x^5y^3 + x^4y^7$$

(here $n = 2$). If X is given by a polynomial equation, then the corresponding R is obtained from the polynomial ring by a natural identification: we “identify” (consider as one) any two polynomials f, g whose difference is a multiple of the equation, and similarly for the case of several equations. One refers to X as the *spectrum* of R and writes $X = \text{Spec}(R)$.

The word “spectrum” comes from spectral theory of linear operators (i.e., the theory of eigenvalues), an area that was heavily influenced by the needs of quantum physics. So this is an example of implicit influence of physics on mathematics.

The important (and initially controversial) step in Grothendieck’s theory is that one can associate the geometric image (scheme) $\text{Spec}(R)$ to any commutative ring R whatsoever. An important non-classical example is given by the *ring of dual numbers* D . An element of this ring is an expression $a + b\varepsilon$; such expressions are multiplied formally using the

rule $\varepsilon^2 = 0$. So $\varepsilon^2 = 0$ is the equation in this case. How is it different from $\varepsilon = 0$? Naively, D cannot be realized as the set of functions on anything, because there is no number other than 0 which squares to 0. Nevertheless, the scheme $\text{Spec}(D)$ has a meaningful geometric interpretation: it is viewed as having one point (where $\varepsilon = 0$) and also having the tangent direction at this point, but no further data, see Fig. 1. In a way, this is a revival of the old idea of “infinitesimally small quantities”: ε itself is not yet zero, but is “so small” that ε^2 is already negligible. One can also consider infinitesimals ε such that $\varepsilon^2 \neq 0$ but some higher power of ε vanishes. Rings containing such infinitesimals (called *nilpotents*) are visualized as corresponding to infinitesimally thin neighborhoods of more classical geometric images (curves et cetera).

Noncommutative geometry

The spectacular success of “visualization of commutative rings” given by scheme theory led to repeated attempts to extend it to *noncommutative rings*, algebraic structures in which the multiplication can lead to $f \cdot g \neq g \cdot f$.

A non-mathematician may wonder: what is the importance of such structures? do they really appear “in real life”? In fact, it was the advent of quantum mechanics which brought noncommutative rings into the forefront of physics. Usual physical quantities are promoted, in quantum mechanics, to non-commuting “operators”. A typical commutation relation is $p \cdot q - q \cdot p = i\hbar$ between the operators

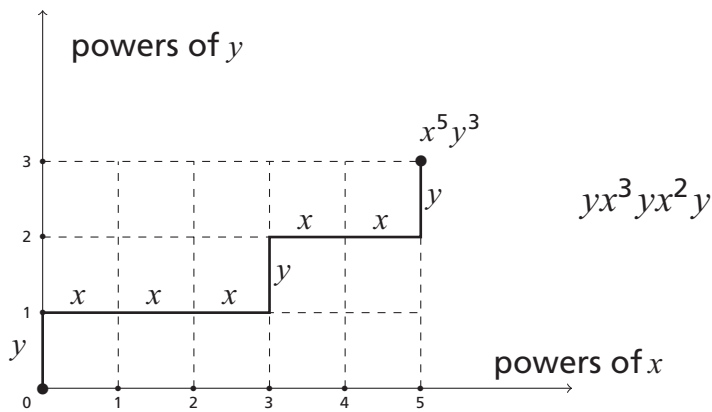


Figure 2: A noncommutative monomial represented by a path.

corresponding to the coordinate and momentum of a particle. There are many other examples in pure mathematics, such as multiplication of matrices, or composing transformations, i.e., operations of some kind. In fact, if we do any actions in a sequence, the result usually depends on the order. To put on a shirt and then a jacket is not the same as to first put on a jacket and then a shirt!

A good illustration of the challenges presented by noncommutativity is provided by the concept of “noncommutative polynomials”. For instance, consider two variables x, y which do not commute. Then we have 4 quadratic monomials: x^2, xy, yx, y^2 , all different. If we think of x, y as commuting, then xy and yx are the same but as noncommutative monomials they are different. In this way, a single commutative monomial can be represented by several noncommutative ones. For example $x^5 y^3$ can be lifted to $yx^3 yx^2 y$, or to $xyx^2 yxyx$, or to several others. It is convenient to make a picture (known as *Newton’s diagram*) depicting a usual monomial, say $x^5 y^3$ by a point on the plane with coordinates $(5, 3)$. Then a noncommutative lifting of this monomial corresponds to a “taxicab path” (like in a city with a grid of street blocks) starting from $(0, 0)$ and ending at $(5, 3)$. That is, one move to the east corresponds to x and one move to the north corresponds to y , see Fig. 2.

Thus a noncommutative polynomial is really a

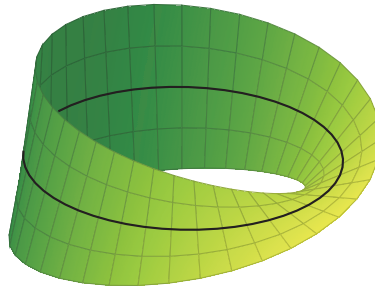
sum over such paths. Making x and y commute means that we perform *summation over paths* with fixed beginning and end. This means that “commutatization” (forcing noncommutative rings to be commutative) can be seen as an algebraic analog of path integration which is the fundamental conceptual tool of modern physics.

One way of attaching geometric intuition to noncommutative rings is to use the concept of a *vector bundle* in geometry, i.e., a continuous family of vector spaces parametrized by a space X . For example, the Moebius strip (Fig.3) is a vector bundle over its central (black) circle: a family of “vertical” lines parametrized by it. If X corresponds to a ring R , then a vector bundle on X gives rise to an algebraic object M called a *module* over R , where we can multiply elements r of R and m of M and get an element $m' = r \cdot m$ of M .

Attaching geometric intuition to noncommutative rings is not only a tool for studying such rings, it has many applications to more familiar geometric problems. In many cases, one can approximate a usual (“commutative”) but complicated or badly behaved space, by a much simpler non-commutative object.

Super-geometry

Still, noncommutative algebraic structures do not



$$r \cdot m = m'$$

Figure 3: The Moebius strip¹ and the multiplication in a module.

*1 Picture source: pgfplots.

seem to be capable of fully geometric interpretation. It is the commutativity property that makes many essential constructions work.

An alternative approach is to look for properties “similar to commutativity” which act as similar but different keys to the realm of geometry. One of such properties is graded, or super-commutativity, which leads to super-geometry.

In this setting we have a ring R having quantities of two types, even and odd. A general element of R is represented as a sum of an odd and an even one. The super-commutativity law (also known as the Koszul sign law) reads:

$$(1) \quad f \cdot g = (-1)^{\deg(f) \cdot \deg(g)} g \cdot f,$$

where f and g are either even or odd. The quantity $\deg(f)$ is equal to 0 for f even and 1 for f odd. In other words, we have $f \cdot g = g \cdot f$ when at least one of f, g is even and $f \cdot g = -g \cdot f$ when both are odd.

So a super-commutative ring is not commutative in the usual sense. Nevertheless, the experience of mathematicians has been that super-commutativity unlocks all the geometric features that can be associated to usual commutative rings. For example, one can speak about super-manifolds, objects which have usual (even, commuting) coordinates together with odd, anti-commuting coordinates.

The super-commutative law is just one of an

elaborate system of sign rules in this kind of algebra (sometimes called super-algebra). The remarkable fact is that these rules are non-contradictory: various transformations incur various sign changes but it never happens that doing something in two different ways results in different signs (that would destroy the whole theory). This almost mystical self-consistency of the rules adds a lot to the appeal of the theory. But perhaps the real reason the things do not collapse is the physical origins of super-algebra.

It is known in physics that elementary particles fall into two types: bosons and fermions. The difference is that more than one fermion cannot be in the same quantum state (this is known as the Pauli exclusion principle), while for bosons it is possible. For example, electron and proton are fermions, while photon (the quantum of light) is a boson. At a more mathematical level, the state vector of a system of several fermions changes sign under permuting any two of them, in a way remindful of (1). This fermionic nature of electrons is at the basis of the structure of atoms and chemical elements, and so is fundamental for the existence of the universe as we know it.

The idea of super-geometry was first suggested by F. Berezin in the late 1960s. He had a clear physical motivation: to create geometry that would account for the behavior of fermionic particles. This was included into a large program of so-called *supersymmetry*, i.e., symmetry between bosonic and

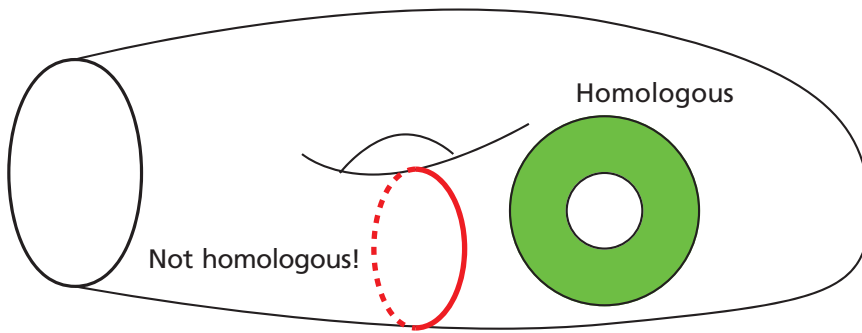


Figure 4: Homologous and non-homologous cycles.

fermionic particles. Most importantly, these ideas turned out to be extremely fruitful in string theory. The \pm signs that appear in super-algebra, far from being an annoyance, ended up serving a crucial purpose: they make answers provided by physical theories more manageable (free from obvious infinities). That is, individual terms in the calculations end up being very large but because of summation with \pm signs the end results appear finite, something that would not happen without super-algebra.

Modern super-geometry serves as a geometric language underlying superstring theory. Especially, super-analogs of algebraic curves and of their moduli spaces provide a mathematically solid background for many aspects of the theory.

Interlude: Homological algebra

Every mathematical object is, at least formally, a *set*, a collection of simpler entities of some kind called *elements*. Thus, a circle “is” the set (collection) of its points, a ring is the set of the functions that form it etc. This approach is still the mainstream of mathematical reasoning. A mathematician usually does not understand a construction unless it is formulated in such terms.

Now, there are two fundamentally different and dual ways of constructing new sets (mathematical objects) out of ones we have already.

One is by *conditions*, say describing a circle by the equation $x^2 + y^2 = 1$.

The other is by *parametrization*, i.e., by presenting an exhaustive list of all the data in the collection. For example, the same circle can be parametrized by $x = \cos(\alpha)$, $y = \sin(\alpha)$.

Homological algebra, in a wider sense, is the part of mathematics that studies the interplay between these two types of description. Often it is not possible to give two exactly matching descriptions of the same object, there is a “gap” between them: not every element satisfying the conditions is listed. This gap is formalized in the mathematical concept of *cohomology*.

The origins of homological algebra were in topology, the part of geometry that studies rough shapes of spaces invariant under deformations. To understand such structures, one considers *cycles*, geometric images with no boundary. Two cycles are called *homologous*, if their difference is a boundary. In such a way one can tell, for example, the difference between a sphere and a torus: in the torus we can have 1-dimensional cycles non-homologous to each other, unlike in the sphere. See Fig. 4. So here the conditions (vanishing of the boundary) and the lists (being a boundary) stem from the same geometric concept.

A mathematical structure allowing for systematic study of such phenomena (conditions vs. lists) is called

Tangent approximation



Figure 5: A smooth and a singular space.

a *cochain complex*, a vector space V together with a “differential” (analog of the boundary operator) d which, applied twice, gives 0. This formalizes the fundamental geometric property that “the boundary has no boundary.” In most cases there is also a grading: vectors are assigned integer degrees.

This type of approach has also slowly gained ground in physics where it is known as the BRST quantization (named after physicists C. Becchi, A. Rouet, R. Stora and I. Tyutin who first introduced it in the 1970s). In this approach, only the “states” (vectors) ψ annihilated by d , are considered physical. Further, two physical states ψ, ψ' are considered equivalent (physically the same!) if their difference is of the form $d(\phi)$. Thus the actual physical meaning is assigned to the cohomology, i.e., to the gap! The full implications of this bold idea are still not fully understood.

Derived geometry

One can say that geometry teaches us how to pass from flat (linear) spaces to curved spaces (called manifolds). A manifold has a flat approximation associated to each point: the tangent space. A different choice of the concept of a flat space may be often upgraded to a curved generalization. The idea of derived geometry is to match this approach with that of homological algebra. That is, we consider,

as flat models, not linear spaces but complexes as above.

The motivation for this was originally purely intrinsic to mathematics. It was known for a long time that moduli spaces (spaces of parameters of geometric structures) can be *singular*, i.e., possess points near which linear approximation breaks down, like the sharp point of a cone (see Fig. 5). It turns out that introduction of derived structures allows one to overcome these difficulties by producing new objects, which do possess nice linear approximations, but these approximations are complexes!

However, passing to the derived world drastically enlarges our supply of geometric objects. Along with “spaces” in the usual sense (even when understood as schemes in the sense of Grothendieck) one finds other types of geometric objects, some known, some new, which can be roughly classified by the range of the degrees of their tangent spaces (complexes) (see Fig. 6 where some of these types and the corresponding ranges are outlined). Thus, *stacks* (whose range comprises (-1) and 0) describe “spaces with internal symmetry” (similar to gauge symmetry in physics); most moduli spaces are known to be, in fact, stacks. Higher stacks describe even more sophisticated symmetries.

In some intuitive sense, the positive (right-hand) range corresponds to “geometry in the small”, where we focus on small details near a complicated

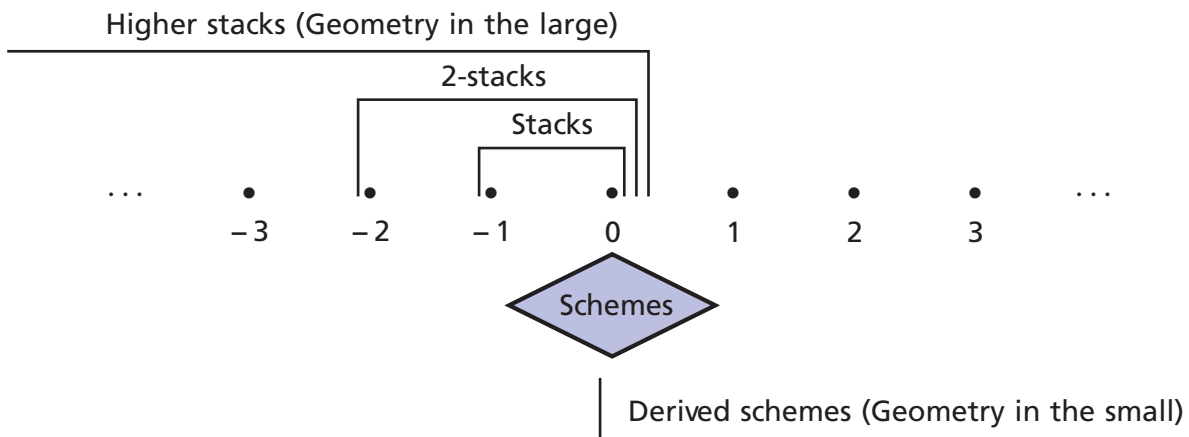


Figure 6: Panorama of derived geometry.

(singular) point of a geometric object. The negative (left hand) range corresponds similarly to “geometry in the large”, where we focus on large scale, topological properties of spaces. It is remarkable that these two complementary aspects of geometry find a natural common framework.

Although somewhat abstract in its origins, derived geometry has by now found many remarkable applications in physics. Thus, derived stacks (objects belonging mostly to the right hand direction) provide the source of integration cycles in topological quantum field theories. Derived analogs of symplectic manifolds (geometric objects at the basis of Hamiltonian formalism of classical mechanics) have, in the last few years, emerged as a structure carried by many moduli spaces.

There is also a strong connection to super-geometry as the concept of commutativity in the derived world also involves the super sign rule (1). In fact, the sign system underlying (1) (such structures are called *Picard groupoids*) can be given a purely topological interpretation, in terms of the classification of mappings between higher-dimensional spheres (so-called stable homotopy groups). The degrees $\deg(f)$ (assumed integer) correspond to the integer invariant of maps between spheres of the same dimension, also known as the degree. The two signs \pm corresponds to two types

of maps between spheres of dimension $n + 1$ and n , where $n = 3$ or more.

Conclusion

These are just a few examples of new geometric techniques that mathematicians use. Which type of geometry describes “the real world”? Which other types may be necessary for such description? So far, we do not know. The concept of space-time at extremely small distances may not even make sense as such, and some grainier, more chaotic quantum structure may replace it. But to be able to even talk about such things meaningfully, we need bridges connecting them to our geometric intuition and to our human patterns of thought. It is likely our lack of imagination of what kinds of geometry are possible that prevents us from asking the right questions.

To me, the fascinating power of super-geometry and the physical promise of supersymmetry suggest that commutativity in some even higher sense may open the doors to new geometric worlds relevant to physics. In particular, I think that structures related to stable homotopy groups of spheres, a classical subject of algebraic topology, may provide a guide to such new worlds.

Our Team

Yukari Ito

Research Field: **Mathematics**

Kavli IPMU Professor

My original research area is algebraic geometry and I have studied quotient singularities and the resolution. When I started to learn algebraic geometry, I came across an amazing problem on singularities from superstring theory. It implies a generalization of two-dimensional McKay correspondence. I studied several ways to construct crepant resolutions of quotient singularities for three-dimensional McKay correspondence. The McKay correspondence is now generalized to a higher dimensional case in terms of derived categories. However, there are two problems: most results hold only for abelian finite subgroups. Moreover, they need a crepant resolution. To show the existence of a crepant resolution is difficult in general, but I believe there is a way, and non-abelian cases may bring us new mathematics. I would like to expand my mathematical world at the Kavli IPMU with many other mathematicians and physicists.



Tom Melia

Research Field: **Theoretical Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor

I am currently interested in exploring particle phenomenology in two main areas. The first is in devising novel analyses at the LHC or future colliders to search for beyond the (or interesting ‘within the’) standard model physics. The second is the effort to directly detect dark matter, where in particular I have been thinking about designing new small-scale experiments with low energy thresholds.

I am also interested in uncovering – and putting to use – new mathematical structures in quantum field theory. Conformal representation theory, commutative algebra, and cohomology have proven important in organizing the way we think about real-world effective QFTs. Standard model scattering amplitudes harbour hidden symmetries. I am interested in developing these ideas further.



Hillary Child

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

Much of my research focuses on the shape and evolution of dark matter halos. I measure the concentrations of simulated halos to better determine the redshift dependence of the concentration-mass relation, which is sensitive to cosmological parameters, and to better understand how the shapes of halos change as they grow. During my six months at Kavli IPMU, I will also be working on using the bispectrum to improve measurements of the baryon acoustic oscillation length scale.



Chang-Tse Hsieh

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

I am broadly interested in theoretical physics. Specifically, my research interests lie on high energy and condensed matter theories, and in particular, the interplay between them. My past research has been devoted to the classification of topological phases of matter, wherein I applied some theoretical tools, such as K-theory in algebraic topology and anomalies in quantum field theory and string theory, to study the universal properties of these exotic states when



considering symmetry and interaction effects. Currently, I would like to have more understanding about topological phenomena and entanglement in quantum systems and also explore the fundamental physics behind them.

Frederick Takayuki Matsuda

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

My research interest is Cosmic Microwave Background (CMB) polarization observation experimentation. The CMB polarization B-mode signal contains rich information related to the mechanism of inflation and massive neutrinos in the early universe. I primarily work on instrumentation for CMB ground-based experiments such as the Simons Array and the Simons Observatory. I research telescope optical



design and optical simulation analysis. I optimize the optics of these telescopes in order to obtain high sensitivity and throughput across all observation frequencies of interest.

Benjamin Quilain

Research Field: **Experimental physics**

Postdoc

The matter and antimatter asymmetry observed so far in the baryon sector is too small to explain coherently the predominance of matter in our universe with a realistic inflation scenario. I have focused on searching this asymmetry in the lepton sector, through neutrino oscillation at the T2K and Super-Kamiokande experiments. After having observed the appearance of electron neutrinos in a muon neutrino beam, we have recently shown hints that antineutrino may



oscillate differently. Through the construction of a new detector to decrease systematic uncertainty and T2K-Super-Kamiokande combined analysis, I aim to provide evidence of this asymmetry.

Our Team

Progress in Neutrino Oscillation

New Results of the T2K Experiment and Status of the Hyper-Kamiokande Project

Atsuko K. Ichikawa

Associate Professor, Graduate School of Science, Kyoto University

Tsuyoshi Nakaya

Professor, Graduate School of Science, Kyoto University,
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

1. Introduction

There were two major achievements in the field of neutrino oscillation in the summer of 2017. The T2K experiment released a new result showing that the symmetry between matter and antimatter (CP symmetry) may be violated in neutrino oscillation with a 95% (2σ) confidence level. The Hyper-Kamiokande project, which is the successor to the Super-Kamiokande experiment, was chosen for inclusion in the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) Large Project Roadmap. This is a major milestone for the realization of the project. These achievements are reported in this article.

2. New results from the T2K experiment

2.1 Accelerator-based neutrino oscillation experiment and CP-violation

Neutrino oscillation was discovered through the observation of atmospheric neutrinos and solar neutrinos and is a phenomenon in which neutrinos change (oscillate) their types. There are three types of neutrino: electron neutrino, muon neutrino, and tau neutrino. Neutrino oscillation consists of beats of quantum waves. It occurs when each type of neutrino is made of three different waves (wave functions) corresponding to three different masses and those

waves interfere. Interestingly, the beats can be different for particle and antiparticle when the three quantum waves interfere and CP symmetry is broken. This kind of CP-symmetry breaking has not yet been observed in neutrino oscillation, and the parameter of the CP-phase, which represents the magnitude of CP-violation, has not yet been measured. To study the CP-violation effect, it is necessary to measure appearance, that is, to which type the neutrino has changed as a result of oscillation. In practice, this is possible only by conducting experiments using an accelerator-produced neutrino beam. The well-controlled neutrino type, energy, and flight length of the beam from accelerators enable the measurement of rare appearance events.

2.2 T2K (Tokai-to-Kamioka) experiment

The T2K experiment observes accelerator-produced neutrinos at a detector 295 km away. Either a muon-neutrino beam or a muon-antineutrino beam is produced with the J-PARC proton accelerator complex at Tokai village in Ibaraki prefecture. The neutrino detector, Super-Kamiokande, is located at Kamioka in Hida city, Gifu prefecture. By comparing the rate of change of muon neutrinos to electron neutrinos and that of muon antineutrinos to electron antineutrinos, the experiment probes CP-violation. If CP-symmetry is violated, these rates are different. The value of CP-phase can also be determined by comparing them with the predictions made by

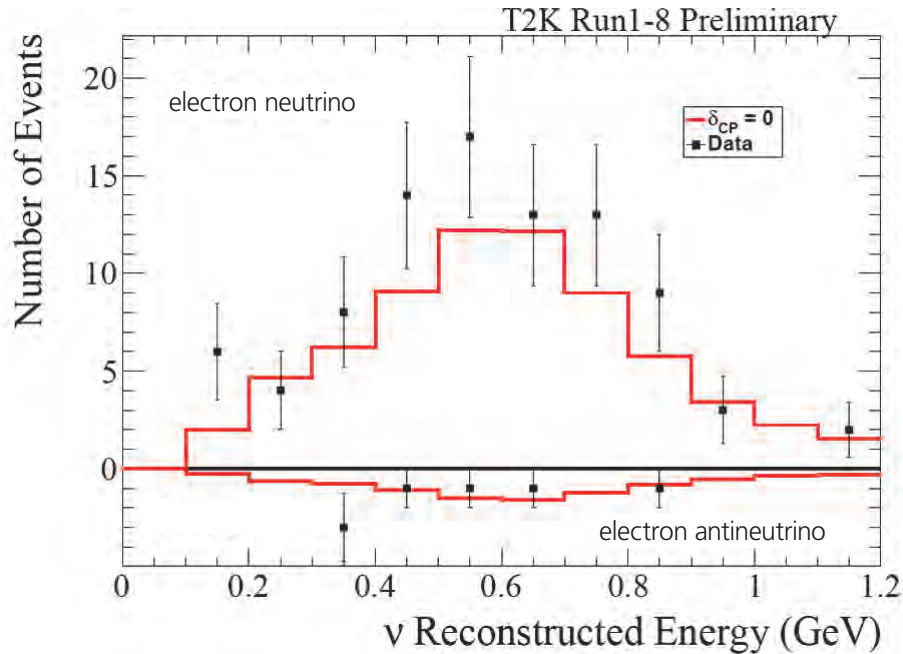


Figure 1: Observed energy spectra for electron neutrino (top) and electron antineutrino (bottom). The red line is the expectation in case CP-phase is equal to zero

assuming CP-phase is 0 (which corresponds to the case in which CP-symmetry is conserved). Since the interaction rate of antineutrinos with matter is about one third of that of neutrinos, observation of oscillation is quicker with the neutrino beam.

T2K started data taking with the neutrino beam in 2010 and observed electron neutrino appearance with a 7σ confidence level in 2013. After that, data taking with antineutrino beams continued until the middle of 2016. The result then showed weak indication of CP-violation. From October 2016 to April 2017, data was accumulated with the neutrino beam. Thanks to the accelerator intensity increase from 250 kW up to 480 kW, the data for the neutrino beam doubled in the past year.

2.3 Hint of CP violation?

T2K also succeeded in improving the method of analysis; electron neutrino events are selected 30% more efficiently compared to the previous analysis, mainly by increasing the volume usable for analysis inside the detector. By applying the new analysis to all the data collected to date, T2K observed 89

electron neutrino events. The expectation when CP symmetry is conserved is 67, so the observation is larger than this prediction. On the other hand, the expected number of electron antineutrinos in the case of CP-conservation is 9 while the observed number is 7, smaller than expected. Figure 1 shows the energy spectra for electron neutrinos and electron antineutrinos. An analysis was performed using this observation, together with the observations of muon neutrinos and antineutrinos in the T2K experiment, and results of the measurements of reactor neutrinos and solar neutrinos to obtain the value of CP-phase. The value which reproduces the observations best was found to be -105 degrees. The statistically allowed region with 95% probability is from -171 degrees to -70 degrees. This means that the CP conserving case is excluded at a 95% (2σ) confidence level. The T2K experiment will further increase the data, aiming to confirm CP-violation at a 3σ confidence level in the case that CP is significantly violated. From this autumn, the experiment will collect data with the antineutrino beam.

3. Status of Hyper-Kamiokande project

The Hyper-Kamiokande project is to build a large water Cherenkov detector of 260,000 tons of water (190,000 tons of fiducial volume) in Kamioka to advance neutrino research and to explore proton decay as evidence for the Grand Unification Theory (GUT) with the world's best sensitivity. The effective volume of Hyper-Kamiokande is roughly 10 times larger than that of Super-Kamiokande. The project was selected in the "Japanese Master Plan of Large Research Projects (Master Plan 2017)" by the Science Council of Japan (SCJ). Recently, it was also chosen for inclusion in the MEXT Large Project Roadmap 2017. This is a major and necessary milestone toward the approval of the project.

3.1 Goals of the Hyper-Kamiokande experiment

This summer, T2K showed a hint of CP violation in neutrinos with 2σ significance. In order to establish CP violation, measurement with more than 5σ significance is expected in the Hyper-Kamiokande experiment. In addition, observation of atmospheric neutrino oscillations inside the Earth could determine the mass ordering of neutrinos. Furthermore, precise measurements of neutrino oscillations in Hyper-Kamiokande will explore the possibility that neutrinos beyond the known three flavors may exist. Observation of solar neutrinos will provide important information of neutrino oscillation inside the sun. If we observe supernova neutrinos from an explosion occurring in our galaxy, we can expect to obtain important information on the explosion mechanism of supernovae. Due to the size of Hyper-Kamiokande, it is possible to search for a burst of supernova neutrinos coming from as far away as the Andromeda galaxy. If we can measure the diffuse flux of neutrinos existing in our universe from past supernova explosions, we can explore the evolutionary history of the universe.

In addition to these neutrino investigations, an

important goal of Hyper-Kamiokande is to search for proton decay, which is one of the most fundamental questions in particle physics and predicted by GUT. Although proton decay has not yet been found in Super-Kamiokande, most elementary particle physicists believe in GUT. Hyper-Kamiokande will search for proton decay with a sensitivity more than 10 times better than the current best thanks to the large volume.

With the Hyper-Kamiokande project, we can provide answers to unsolved problems in neutrinos; advance neutrino astronomy; and have a good chance to discover the evidence for GUT, which is a dream of particle physicists. It really is a unique and powerful project.

3.2 Hyper-Kamiokande detector

A sketch of the Hyper-Kamiokande detector is shown in Figure 2. Approximately 40,000 photosensors are mounted in a tank that contains 260,000 tons of ultrapure water. The detector can measure Cherenkov light to observe the signals of neutrinos and proton decay. The photosensors have a diameter of 50 cm, and the performance is twice as good as that of Super-Kamiokande for sensitivity to a photon, time response, and energy resolution. The photosensors cover 40% of the inner surface to detect faint signals of neutrino interactions and proton decays.

3.3 Status and prospect of the Hyper-Kamiokande project

The Hyper-Kamiokande experiment is regarded as a high-priority project in the communities of Cosmic Ray Research and High Energy Physics in Japan. The experimental collaboration consists of 300 scientists from 15 countries all over the world. The Letter of Intent was published in 2011, and the Design Report in 2015. At present, the University of Tokyo is requesting funding from the government. For funding to be approved, recognition of Hyper-Kamiokande as an important project by MEXT is required. It is good news and a major step forward

that Hyper-Kamiokande has been selected for the MEXT Roadmap 2017. If the requested budget is approved in FY 2018, the experiment will start operation in 2026 after 8 years of construction.

4. Summary

Neutrino research is a field in which Japan has led the world. In 2017, an important result on CP violation was announced to the world from the T2K experiment. Recently, the financial situation of Japan for basic science has been facing severe difficulties,

but basic science is an investment in the future. Great progress in basic science is desired for the future of Japan. Hyper Kamiokande is a long-term project with 8 years of construction and over 10 years of operation; it is truly an investment in the future. The project will give dreams to young researchers in the near future. In cooperation with the many people involved in the project, we expect that the Hyper-Kamiokande project will be realized, and basic science in Japan will be moving forward even 10 or 20 years from now.

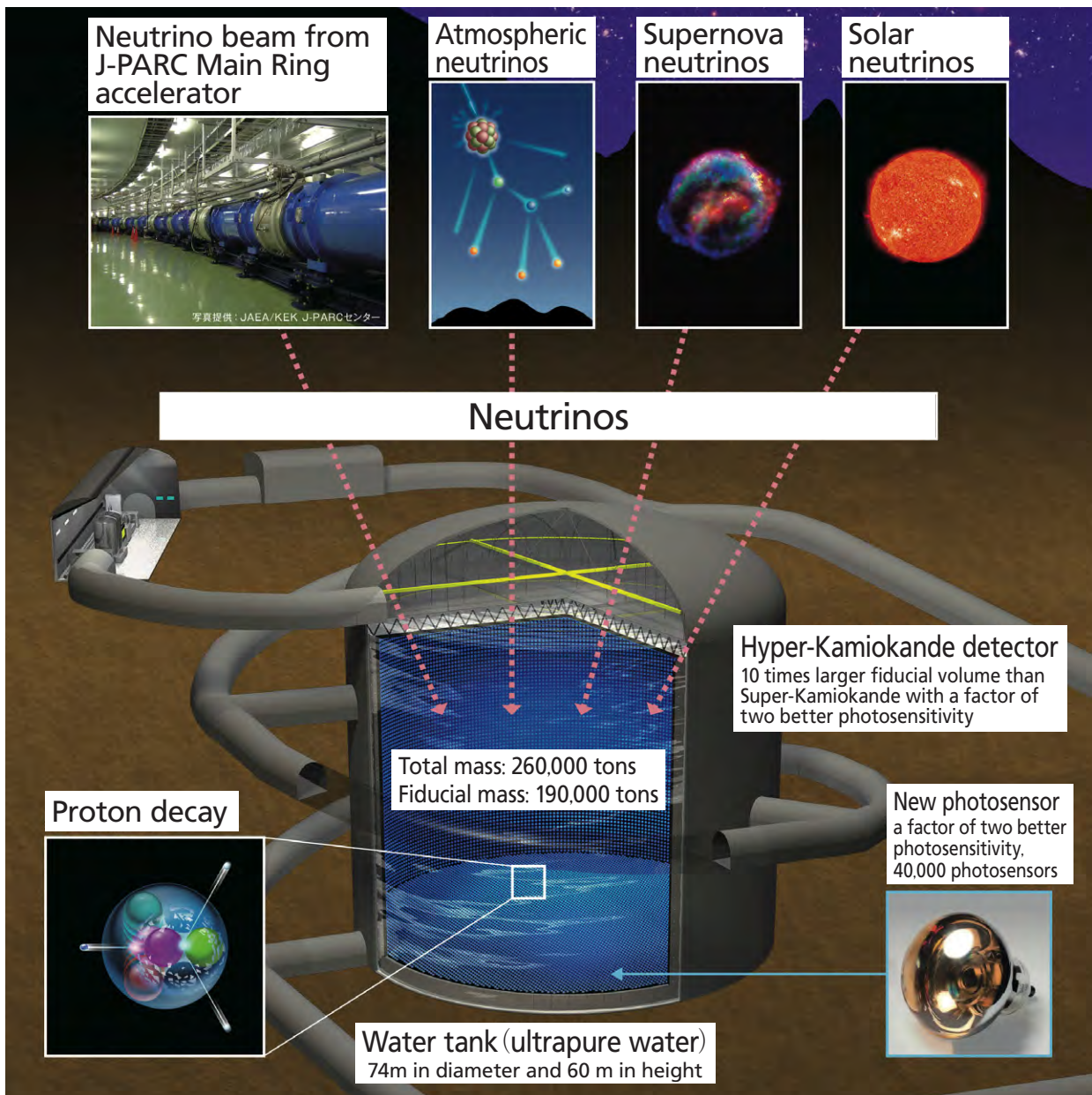


Figure 2: Sketch of the Hyper-Kamiokande detector. The objects of research are also shown.

Stellar Evolution, Supernova and Nucleosynthesis Across Cosmic Time

Keiichi Maeda

Associate Professor, Graduate School of Science, Kyoto University,
and Kavli IPMU Visiting Scientist

Chiaki Kobayashi

Senior Lecturer, University of Hertfordshire,
and Kavli IPMU Visiting Scientist

We hosted a Kavli IPMU workshop on “Stellar Evolution, Supernova and Nucleosynthesis Across Cosmic Time,” for two weeks from 18 September to 29 September 2017. The workshop was also to celebrate the career and achievements of Kavli IPMU Professor Ken’ichi Nomoto in the field of stellar evolution and supernova explosions on the occasion of his 70th birthday. We invited active researchers in related fields from all over the world. In total, we had 81 participants including 46 researchers from foreign institutes (24% of whom were female). This international spectrum of participants was engaged in active discussion on “massive star evolution and core-collapse supernovae,” “low and intermediate mass star evolution and type Ia supernovae,” “asymptotic giant stars and electron capture supernovae,” and “chemical evolution and Galactic Archeology.”

It was organized in a workshop style, namely we tried to limit the number of talks every day, and encouraged discussion and collaboration. The review talks were arranged for the morning, while the afternoon was for discussions. Ken’ichi Nomoto offered free beers in the cafeteria every evening, which stimulated discussion in an informal and friendly atmosphere. There were 39 talks in the morning sessions, and 25 informal talks in the afternoon sessions. This workshop style is an experiment at the Kavli IPMU. This required the invaluable help of the Kavli IPMU secretaries,

without whom it would have been impossible to have this successful meeting. The workshop style was well-received by many participants, and we believe this could be one possible direction for future Kavli IPMU activities.

The first week mainly dealt with topics related to massive stars and core-collapse supernovae. On Monday, Norbert Langer gave a broad review of the current status of the massive star evolution and open questions, which was then followed by several talks on the up-to-date observational status. On Tuesday, Adam Burrows summarized the latest issues related to the theory of core-collapse supernova explosions, and several talks followed to address relations between massive star evolution and the supernova explosion mechanism. Galactic Archeology was a topic on Wednesday, led by a review by Chris Sneden on observations of metal-poor stars. Ken’ichi Nomoto detailed how supernovae from the first stars would have polluted our galaxy with heavy elements. One of the topics on Thursday was supernova nucleosynthesis, exemplified by a review by Marco Limongi. On Friday, various new types of transients were discussed, led by Chris Fryer, covering highly topical issues on super-luminous supernovae, gamma-ray bursts, and electro-magnetic counterparts of binary neutron star mergers.

The second week mainly dealt with topics related to low-/intermediate-mass stars and type

la supernovae. On Monday, Ken'ichi Nomoto provided a review of one of his most influential fields of study, namely the evolution of intermediate mass stars and electron capture supernovae. Tuesday morning was on the long-debated issue of progenitor evolution toward type Ia supernovae, where the so-called single degenerate scenario (talk given by Izumi Hachisu) and double degenerate scenario (by Ashley Ruiter) were discussed, followed by observational constraints as reviewed by Mark Sullivan and Kate Maguire. The explosion mechanisms were discussed on Wednesday. Various models were discussed in the session, following an overview review by Friedrich Roepke. On Thursday, Peter Nugent presented exciting new discoveries by the iPTF survey, and discussion on supernova light curves and spectra followed. On Friday, Chiaki Kobayashi reviewed the galactic chemical evolution, emphasizing in particular the importance of feedback from low-/intermediate-mass stars and type Ia supernovae. This was then followed by Naoki Yasuda's talk on transient survey program(s) with Subaru/HSC. The two-week workshop was closed with talks by Wolfgang Hillebrandt and Philipp Podsiadlowski, who summarized the open questions of supernova study and possible future directions in the coming decade.

During the workshop period, two of the participants provided APEC seminars. Philipp

Podsiadlowski gave a review of the highly topical issue of gravitational wave sources, including mergers of binary black holes and binary neutron stars. Francesca Matteucci, a pioneer in the field, provided a review of the chemical evolution and Galactic Archeology, covering everything from the basics to the most recent update. The lecture room was nearly full for both of the seminars, and both were followed by active discussions among the workshop participants and Kavli IPMU researchers.

On Wednesday evening of both weeks, a buffet-style banquet, complete with sushi stand, was held at a nearby Japanese restaurant. About 50 participants and their families enjoyed meals and conversation at each banquet. Friedel Thielemann and Melina Bersten in the first banquet, and Francesca Matteucci and Wolfgang Hillebrandt in the second, gave enjoyable speeches and showed many slides to celebrate Ken'ichi Nomoto's 70th birthday.

It was very impressive to observe that the field of stellar evolution, supernovae and transients, as pioneered by Ken'ichi Nomoto, is now rapidly expanding. The Subaru/HSC transient survey, which involves many IPMU researchers, is still young, but has started reporting many interesting results. We are hoping that these exciting fields of astronomy keep expanding in the future, and after this successful workshop we have no doubt that they will.



The 1st week banquet on September 20



The 2nd week banquet on September 27

Hirosi Ooguri Elected to the Japan Writers' Association

Hirosi Ooguri, Kavli IPMU Principal Investigator and Fred Kavli Professor at Caltech, has been elected to the Japan Writers' Association on June 23, 2017. He has written several popular science books, including "Introduction to Superstring Theory," which received the 2014 Kodansha Prize for Science Books, the most prestigious prize for science books in Japan (see *Kavli IPMU News* No. 27, p. 23).



Hirosi Ooguri

The Japan Writers' Association was established in 1926. The Founding Chair was Kan Kikuchi, a well-known writer and founder of the major publishing company Bungeishunju Ltd. Though the association was disbanded during World War II, it was re-established in 1946 as a professional organization to promote literature, protect freedom of expression, and support writers. Its membership consists of writers, playwrights, critics, essayists, translators, and poets.

2017 WPI Site Visit to Kavli IPMU

For the FY 2017 WPI site visit to the Kavli IPMU, WPI Program Director (PD) Akira Ukawa, Program Officer (PO)

in charge of the Kavli IPMU, Ichiro Sanda, WPI Academy^{*1} Director (AD) Toshio Kuroki, and several JSPS officers visited the institute on July 19, 2017. PD Ukawa was newly appointed at the beginning of this Fiscal Year, taking over the position from the now former PD Toshio Kuroki, who was in turn appointed as WPI AD. The site-visit team examined the Kavli IPMU's progress plan for the five-year extension period based on its achievements in the past 10 years, and the host university's vision and support.

To begin with, the site-visit team heard Director Murayama's presentation on the progress of the nine challenges for the extension period. Subsequently, the University of Tokyo Managing Director and Executive Vice President Toshihiko Koseki explained the University's vision, University-wide ripple effects caused by the Kavli IPMU's systemic reform, and University's support to the Kavli IPMU in the future. Then, there were active question and answer exchanges between the site-visit team and the Kavli IPMU/University of Tokyo side. The two-hour site visit concluded with comments from the PD, PO, and AD.



^{*1} In FY 2017, MEXT established the new WPI Academy. The WPI centers that have achieved "world-premier status" are the initial members of the WPI Academy. See https://www.jspss.go.jp/english/e-toplevel/18_academy.html.

MEXT Vice Minister Todani, Director General Seki, and Director Ohora visit Kavli IPMU

In July, August, and September, 2017, several notable visitors from MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) visited the Kavli IPMU. (See photos in the Director's Corner on page 3.)

On July 21, Director General Yasunao Seki of the Research Promotion Bureau and two officers visited the Atmosphere and Ocean Research Institute, Institute for Cosmic Ray Research, Graduate School of Frontier Sciences, Institute for Solid State Physics, and Kavli IPMU on the University of Tokyo's Kashiwa campus. At the Kavli IPMU, after hearing an overview and research of the institute from Director Murayama, they toured the Kavli IPMU building and observed interaction of researchers at tea time.

On August 21, Director of the Office for the Promotion of Basic Research, the Basic Research Promotion Division, Ryuuma Oohora, and Unit Chief Yuuki Shigeta, both from the Research Promotion Bureau, visited the Kavli IPMU. After Director Murayama's overview presentation, they were guided through the Kavli IPMU building. When they entered the interaction area, Piazza Fujiwara, on the third floor, where researchers gather for daily tea time breaks, Mr. Ohora showed interest in a book which he found on a table. It was "*Quest for Truth—Interaction of Buddhism and Astrophysics*" (published by Gentosha Inc.), which Kavli IPMU Principal Investigator Hirosi Ooguri wrote with Buddhism scholar Shizuka Sasaki.

On September 15, MEXT Vice Minister Kazuo Todani visited the Kavli IPMU, accompanied by Director of the Office for the Promotion of

Basic Research Ryuuma Ohora, and Deputy Director of the Office of Vice Minister, General Affairs Division, Susumu Ideshio. Mr. Todani listened to Director Murayama as he introduced the institute, and the research being carried out here. He showed interest in the institute's goal to improve the university system in Japan, and asked Murayama questions about how the Kavli IPMU looks after its overseas researchers and processes their pension and insurance paperwork. Following a tour of the Kavli IPMU building, Mr. Todani joined in the institute's daily tea time break, and talked to a number of the researchers.

Second Lecture at "Science Café Universe 2017"

Every year, the Kavli IPMU and Tamarokuto Science Center co-hosts "Science Café Universe" at Tamarokuto Science Center in Nishi-Tokyo City. This year's Science Café 2017 was the ninth in this series, and non-Japanese Kavli IPMU researchers gave lectures in English without any translation into Japanese. This public lecture style was a first for the Kavli IPMU. This year's first lecture was already given on June 24 (see *Kavli IPMU News* No. 38, p. 19). On July 8, Kavli IPMU postdoctoral fellow David Stark gave the second lecture, entitled "The Birth, Growth, and Death of Galaxies." There were about 40 attendees; 40% of them were junior high-school and high-school students.

In the first part of the lecture, David showed a number of pictures and simulations to introduce how galaxies grow through attraction of gas into dark matter halos which consist of dark matter. The last part of the lecture was devoted to the death of galaxies, and David explained what mechanism causes grown-up

galaxies to stop forming stars and turn into inactive galaxies. Finally, David discussed that there are several theories about why galaxies cease forming new stars. No definite answer for this problem has been obtained yet, and he introduced his own research working on this problem.

Despite English being the only language used throughout the lecture and subsequent Q&A session, participants left comments in the questionnaire such as, "The English was difficult to understand, but I could tell how enthusiastic the lecturer was about his research," and, "I would like to hear a lecture given in English again." Also, a number of attendees remained after the lecture to ask questions to the lecturer in English. Overall, we think this trial of "Science Café in English" was a success, which will aid future planning of similar public events by the Kavli IPMU.



Kavli IPMU Science Café "What Can a Particle Accelerator Discover?"

On July 15, 2017, the Kavli IPMU hosted Science Café "What Can a Particle Accelerator Discover?" There were about 40 attendees including junior high-school and high-school students.

This event started at the lecture hall with a screening of the documentary film "Particle Fever" (Kavli IPMU version with Japanese subtitles; for more details, see *Kavli IPMU News* No. 30, p. 23). This film follows the lives of six physicists over the course of

five years as they search for the Higgs particle at CERN.

After the movie, people moved to the Kavli IPMU's interaction area, Piazza Fujiwara, on the third floor, and there was a science café lecture in English by Chicago University Professor and Kavli IPMU Principal Investigator Young-Kee Kim. Kim has a long career in high-energy physics experiments using high-energy accelerators, including the ATLAS experiment, which contributed to the discovery of the Higgs particle at CERN's Large Hadron Collider. She talked about the importance of this discovery as well as upcoming next-generation high-energy physics experiments after the Higgs discovery. Further, she mentioned ongoing and planned high-energy physics experiments in Japan, such as the SuperKEKB/Belle II experiment, Hyper-Kamiokande project, and ILC project. After the lecture, a discussion to facilitate dialog between Kim and the attendees was held. Some attendees were seen to talk with her in English.



Booth at the 2017 Super Science High School Student Fair

On August 9 and 10, the 2017 Super Science High School Student Fair was held at the Kobe International Exhibition Hall in Kobe, Hyogo Prefecture. The Kavli IPMU and other 8 WPI centers jointly ran a booth exhibiting their research activities.

Learning and Creating Physics— From High School to the Forefront Research of the Universe

On August 19, 2017, a Collaborative Knowledge Creation Practical Learning Course “Learning and Creating Physics—From High School to the Forefront Research of the Universe” for junior high-school and high-school science teachers was held at the Seihoku Gallery of the Yayoi Auditorium Annex on the University of Tokyo’s Hongo campus. It was co-hosted by the Kavli IPMU and the University of Tokyo Center for Research and Development on Transition from Secondary to Higher Education, Division for Cross-Stage Education and Assessment, CoREF.^{*2} About 30 teachers attended this event.

The program started with a hands-on exercise, where teachers were assigned a task to “give an easy-to-understand explanation of dark matter to high-school fresh-year students.” The participants were divided into groups to discuss and present how to accomplish the task, based on the given material. Subsequently, Kavli IPMU Director Murayama gave a lecture explaining why dark matter is believed to exist. He also gave some examples of familiar phenomena, which are likely not to exceed the Japanese government course guidelines for high-schools, including quadratic curves and planetary orbits, and the relation between the flame reactions and absorption lines (see photo on page 3).

Finally, there was time for attendees to have a discussion with CoREF Professor Hajime Shirouzu and Kavli IPMU Director Murayama. They discussed how to introduce cutting-edge science in normal classes, amongst many things.

^{*2} Consortium for Renovating Education of the Future

Kavli IPMU Seminars

1. “Coulomb branches of 4d $N=2$ SUSY gauge theories for $R^3 \times S^1$ ”
Speaker: Hiraku Nakajima (Kyoto U)
Date: May 01, 2017
2. “Existence of crepant resolutions and generalized McKay correspondence”
Speaker: Yukari Ito (Nagoya U)
Date: May 08, 2017
3. “Implications of locality and unitarity for massive S-matrix”
Speaker: Yu-tin Huang (National Taiwan U)
Date: May 09, 2017
4. “ADE String Chains and Mirror Symmetry”
Speaker: Babak Haghighat (Tsinghua U)
Date: May 16, 2017
5. “ R_D, R_K : Flavor Anomalies in B Decays.”
Speaker: Alakabha Datta (U Mississippi)
Date: May 17, 2017
6. “Extent and spatial distribution on a kpc scale of star formation in cluster galaxies from $z=0$ to $z \sim 0.5$ ”
Speaker: Benedetta Vulcani (INAF OaPD)
Date: May 18, 2017
7. “Phase space slicing method in NNLO QCD and its application in collider physics”
Speaker: Chong-Sheng Li (ITP, Peking U)
Date: May 19, 2017
8. “Status of the Dark Energy Survey”
Speaker: Gary Bernstein (U Penn)
Date: May 22, 2017
9. “Weak gravitational Lensing by Large-Scale Structure”
Speaker: Hendrik Hildebrandt (U Bonn)
Date: May 23, 2017
10. “Probing fundamental physics with galaxies”
Speaker: Neal Dalal (U Illinois)
Date: May 24, 2017
11. “Recent wide-angle photometric redshift catalogues”
Speaker: Maciej Bilicki (Leiden U)
Date: May 25, 2017
12. “Classical Field Theory”
Speaker: James Wallbridge (Kavli IPMU)
Date: May 25, 2017
13. “Aspects of the chiral algebra in 4d $N=2$ SCFT”
Speaker: Jaewon Song (KIAS)
Date: May 30, 2017
14. “‘Magnetic bubble chambers’ for sub-GeV dark matter direct detection”
Speaker: Tom Melia (UC Berkeley)
Date: May 31, 2017
15. “From Einstein to Gravitational Waves and Beyond”
Speaker: Barry Barish (Caltech/LIGO)
Date: May 31, 2017
16. “Higgs bundles, branes and applications”
Speaker: Laura Schaposnik (U Illinois at Chicago)
Date: Jun 06, 2017
17. “Peterson isomorphism in K-theory and Relativistic Toda lattice”
Speaker: Takeshi Ikeda (Okayama U of Science)
Date: Jun 06, 2017
18. “Gravitational Instabilities of the Cosmic Neutrino Background with Non-zero Lepton Number”
Speaker: Neil Barrie (U Sydney)
Date: Jun 07, 2017
19. “Cosmic rays from high-redshift starburst galaxies and their role in heating and ionizing the intergalactic and circum-galactic medium”
Speaker: Ellis Owen (U College

- London)
Date: Jun 08, 2017
20. “Cores in Dwarf Galaxies from Fermi Repulsion”
Speaker: James Unwin (U Illinois)
Date: Jun 09, 2017
21. “The Search for Inflationary B-modes: Latest Results from BICEP/Keck”
Speaker: Clem Pryke (U Minnesota)
Date: Jun 12, 2017
22. “The universal quantum invariant and colored ideal triangulations”
Speaker: Sakie Suzuki (Kyoto U)
Date: Jun 13, 2017
23. “From CREAM to ISS-CREAM Projects”
Speaker: Hwanbae Park (Kyngpook National U)
Date: Jun 14, 2017
24. “Universality in Biology?: Fluctuation-response relationship and Deep Linearity in Adaptation and Evolution”
Speaker: Kunihiko Kaneko (Universal Biology Inst, U Tokyo)
Date: Jun 14, 2017
25. “Perverse coherent sheaves on blow-ups at codimension two loci”
Speaker: Naoki Koseki (Kavli IPMU)
Date: Jun 15, 2017
26. “Secondary astrophysical production of anti-deuteron and anti-Helium3 cosmic ray”
Speaker: Ryosuke Sato (Weizmann Inst)
Date: Jun 16, 2017
27. “Derived categories and flips”
Speaker: Matt Ballard (IAS / U South Carolina)
Date: Jun 20, 2017
28. “New information from the small scale CMB”
Speaker: Simone Ferraro (UC Berkeley)
Date: Jun 21, 2017
29. “The Galaxy-Halo Connection with the Observation of Neutral Hydrogen”
Speaker: Hong Guo (SHAO)
Date: Jun 27, 2017
30. “Supernovae: Observational Wonders and Theoretical Nightmares”
Speaker: Tomasz Plewa (Florida State U)
Date: Jun 28, 2017
31. “The Curious Case of Lyman-alpha Emitting Galaxies”
Speaker: Zheng Zheng (Utah U)
Date: Jun 29, 2017
32. “Mutations of non-commutative crepant resolutions arising from dimer models”
Speaker: Yusuke Nakajima (Kavli IPMU)
Date: Jun 29, 2017
33. “R-matrices and cohomological Hall algebras”
Speaker: Eric Vasserot (Jussieu)
Date: Jul 04, 2017
34. “A New Population of (extragalactic) X-ray Transients”
Speaker: Franz Bauer (Instituto de Astrofisica, Facultad de Fisica Pontificia Universidad Catolica de Chile)
Date: Jul 05, 2017
35. “Planet Formation as an Astrophysical Problem”
Speaker: Roman Rafikov (DAMTP, U Cambridge)
Date: Jul 06, 2017
36. “From the FOURGE to the FIRE: Tracking Galaxy Evolution over 12 Billion Years”
Speaker: Kim-Vy Tran (University of New South Wales)
Date: Jul 06, 2017
37. “The Mass Within Galaxy Clusters: CMB Cluster Lensing and Splashback”
Speaker: Eric Baxter (U Penn)
Date: Jul 10, 2017

Personnel Changes

Changes of Deputy/Associate Directors

Kavli IPMU Administrative Director Tomiyoshi Haruyama was additionally appointed to Kavli IPMU Deputy Director on June 7, 2017.

Kavli IPMU Professor Nobuhiko Katayama stepped down as Kavli IPMU Associate Director on July 13, 2017. He will concentrate on his research.

Promotion

Yukinobu Toda, who was Kavli IPMU Associate Professor, became Kavli IPMU Professor on July 16, 2017.



Yukinobu Toda

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 Edmond Cheung [October 1, 2014 — September 30, 2017] moved to Raise.me as a Lead Data Scientist.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Dulip Piyaratne [October 16, 2014 — August 13, 2017] moved to the University of Arizona as a Postdoctoral Research Associate.

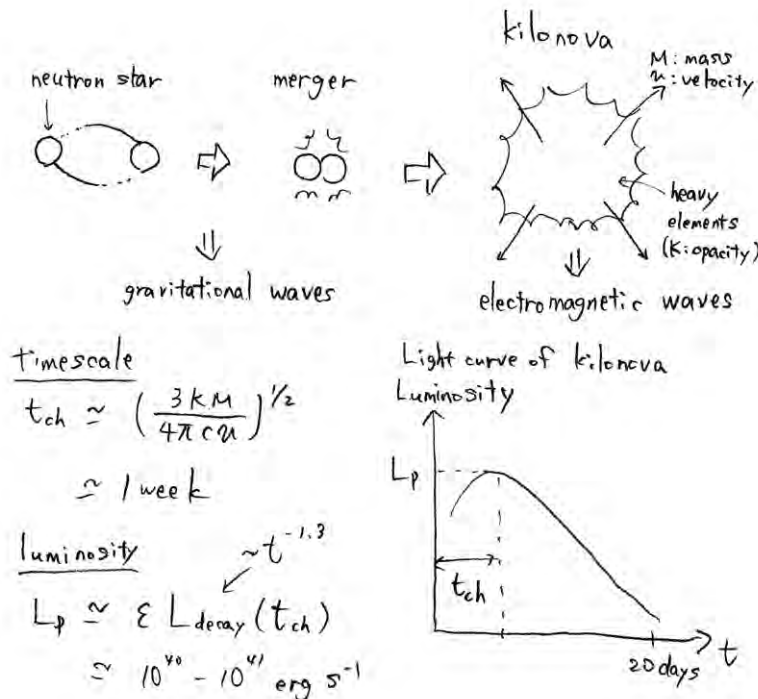
Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Wiphu Rujopakarn [March 16, 2014 — August 7, 2015 and March 1, 2016 — July 10, 2017] moved to Chulalongkorn University in Thailand as a Lecturer of Department of Physics, Faculty of Science.

Kilonova

Masaomi Tanaka

Assistant Professor, Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, and Kavli IPMU Visiting Associate Scientist

Kilonova is an optical and near-infrared emission from neutron star mergers. When two neutron stars merge, strong gravitational waves are emitted and a part of the neutron star material is ejected into interstellar space. In the ejected material, heavy elements such as gold and platinum are synthesized by a rapid neutron capture process. Kilonova is an electromagnetic emission powered by radioactive decays of newly synthesized heavy elements. In August 2017, it was announced that researchers had successfully made the first detection of gravitational waves from a neutron star merger (GW170817). Subsequently, electromagnetic emissions in the various wavelengths were also observed from GW170817. The observed properties of the optical and near-infrared counterparts are similar to theoretical expectations of kilonova. Astronomers may have witnessed the place where heavy elements are produced.

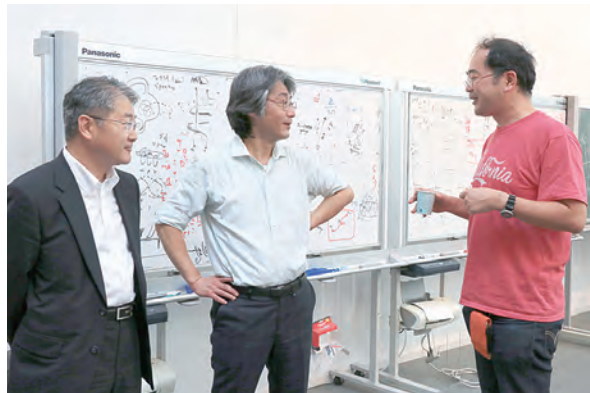


近況

Kavli IPMU 機構長
村山 斉 むらやま・ひとし



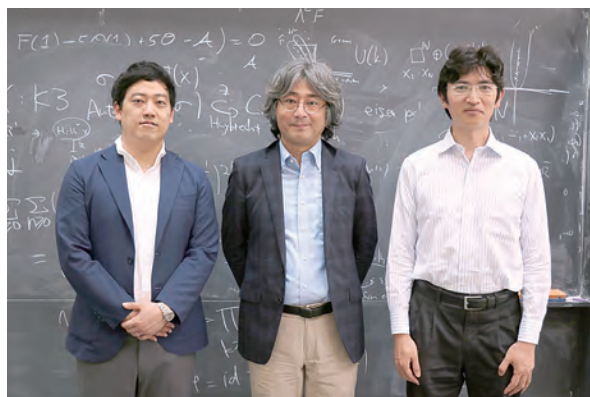
7月20日：マインツ理論物理学研究所(MITP)との研究協力協定締結。村山機構長(左)とMatthias Neubert MITP所長(右)。



7月21日：関 靖直文部科学省研究振興局長、Kavli IPMUを視察。左から関局長、村山機構長、Kavli IPMU 上級科学研究員を兼務している押川正毅東京大学物性研究所教授 (42ページ参照)。



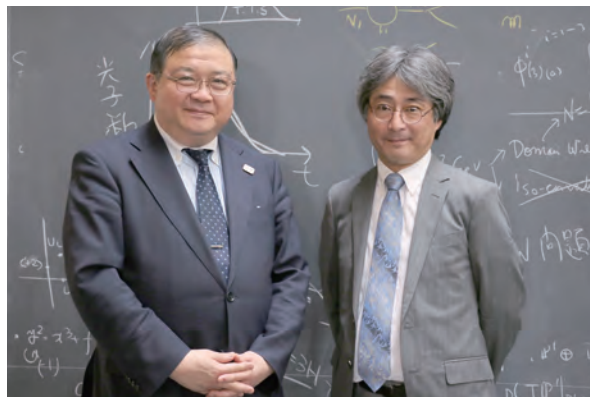
8月19日：東京大学高大接続研究開発センター-高大連携推進部門 CoREFユニットとKavli IPMU 共催の「平成29年度知の協創実践学講座」で講義 (43ページ参照)。



8月21日：大洞龍真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(右)と重田佑樹同課企画調整係長(兼)国際研究拠点形成支援係長(左)がKavli IPMUを視察 (42ページ参照)。



9月1日：伊藤由佳理教授(右)に辞令交付。



9月15日：戸谷一夫文部科学省事務次官(左)がKavli IPMUを視察 (42ページ参照)。

数学と物理学により触発された幾何学の趣^{おもむき}

幾何学は数学の中で最も古い分野の一つです。その目的は空間の構造を記述することで、私たちの周りの空間を物理的に理解するという動機に基づくものです。人間の考え方では、幾何学はいわゆる幾何学的直観（イメージの構成要素の間を関係を形式的に記述するまでもなく私たちが理解できてしまうこと）の源である視覚に支配されています。幾何学とはどういうものであるべきか、ということについての私たちの仮定の基礎を形作るものは、私たちの周囲にある日常的なものを見る日常的な経験なのです。

しかし、現代物理学によれば、きわめて短い距離での物理的空間（あるいは時空）の構造は未だ知られていないのです。何故でしょうか？ 視覚というものが物体によって反射された光を目で見ることに基づくということがその理由です。ところが、実際は光とは波動現象なのです。ですから、この方法では光の波長より小さな「物体」を正確に観察することは困難です。解像度を上げる試みは、見ようとする物体が小さければ小さいほど、言わばより高いエネルギーの光の粒（あるいは他の粒子）を衝突させることとなります。私たちが高いエネルギーの粒子を生成する能力には限りがありますから、私たちが極微のものを「見る」能力にも限りがあります。

従って、私たちは空間の極微の領域が日常的に見慣れたものと同じ一般的な構造をもつものと単純に仮定することはできないのです。例えば、その領域が、隣同士の距離がきちんと定まった連続的に並ぶ点から成り

立っている、といったようなことは自然の法則ではありません。言い換えると、私たちが幾何学の発展の基礎としてきた前提には再検討が必要なのです。

幾何学には微分幾何学、代数幾何学、トポロジー、組合せ幾何学など伝統的にいくつかの分野があります。しかし、そもそも「空間」によって私たちが何を理解するべきかという、ある（例えば上述したような）仮定については全ての分野の見解が一致しています。単にそれを研究するために用いる微分計算、代数方程式などの手段に違いがあるだけです。

しかし、この数十年の間に、私たちの幾何学的な形についての考え方そのものの変革を求める新しい幾何学の方向が幾つか現れました。以下、このような方向について話をしたいと思います。

グロタンディークのスキーム理論

新しい幾何学的な手法の大部分は、1960年代初めに A. グロタンディークが新しい代数幾何学の基礎として発展させたスキーム理論に基づいています。その基本的な考えは、「空間」 X （その意味は問わず）に関する全情報が X 上の関数のデータ R によりエンコードされるべきであるというものです。単純な設定では R は X 上のある種の関数の集合により与えられます。ここで関数とは、 X 上の任意の点 x に、ある数値 $f(x)$ を対応させる規則 f を意味します。このような関数は各点毎に足し算、引き算、掛け算が可能です。数学的

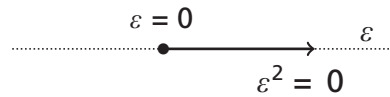


図1 方程式 $\epsilon^2 = 0$ によって与えられる非古典的空間。

には足し算、引き算、掛け算について閉じている関数（あるいは他の構成要素）の系を「環」と呼びます。関数の環には、掛け算について可換（順序を入れ替えても結果が変わらない）であるという自明であるが重要な性質

$$f \cdot g = g \cdot f$$

があります。

例えば、 X が n 次元座標空間の場合、対応する R は

$$f(x, y) = 2x + 3y + 16x^5y^3 + x^4y^7$$

のような n 変数の多項式（ここでは $n = 2$ とする）の集合で与えられます。 X が1つの多項式方程式で与えられる場合は、対応する R は任意の2つの多項式 f と g の差がその方程式の倍数である場合にこれらを同一視するという「自然な同一視」を施した多項式環で与えられます。複数の方程式で与えられる場合についても同様です。 X を R の「スペクトル」と呼び、 $X = \text{Spec}(R)$ と書きます。

「スペクトル」という言葉は量子物理学での必要性に強い影響を受けた線形演算子のスペクトル理論（つまり固有値理論）から来たものです。従って、これは数学に対する物理学の暗黙の影響の一例なのです。

グロタンディークの理論で重要な（そして当初は議論を巻き起こした）ことは、幾何学的イメージ（スキーム）である $\text{Spec}(R)$ を全く任意の可換環 R に対応させることができる点です。重要で非古典的な例として、「二重数の環 D 」があります。この環の元は $a + b\epsilon$ という式で、掛け算を行うには形式的に $\epsilon^2 = 0$ という

規則を用います。従って、 $\epsilon^2 = 0$ がこの場合の方程式です。 $\epsilon = 0$ とは何が違うのでしょうか？単純には0以外に2乗して0になる数は存在しないため、 D を何かの（空間）上の関数の集合として実現することはできません。それでもスキーム $\text{Spec}(D)$ は意味のある幾何学的解釈ができるのです。つまり、 $\text{Spec}(D)$ は1点（ここでは $\epsilon = 0$ ）とその点における接線方向を含むだけで、それ以上のデータはもたないものと考えられます。図1を参照してください。ある意味で、これは「無限小」という古い概念の復活と言えます。 ϵ 自身はまだゼロではありませんが、「非常に小さい」ため、 ϵ^2 は既に見捨てられる、というものです。また、 $\epsilon^2 \neq 0$ であるが ϵ のある高次のべき乗はゼロになるというような無限小（「ニルポテント」と呼ばれる）を含む環は、より古典的な幾何学的イメージ（曲線など）の無限に薄い近傍として思い描くことができます。

非可換幾何学

スキーム理論によりもたらされた「可換環の視覚化」の目覚ましい成功により、その理論を掛け算が $f \cdot g \neq g \cdot f$ となり得る代数的構造である「非可換環」に再度拡張する試みが行われました。

数学者でない人は、このような構造の何が重要なか不思議に思うかもしれません。実際に「現実の世界」に現れるものなのでしょうか？実は、非可換環を物理学の最先端にもたらしたものは、量子力学の発見でした。通常物理量が量子力学では非可換の「作用素」

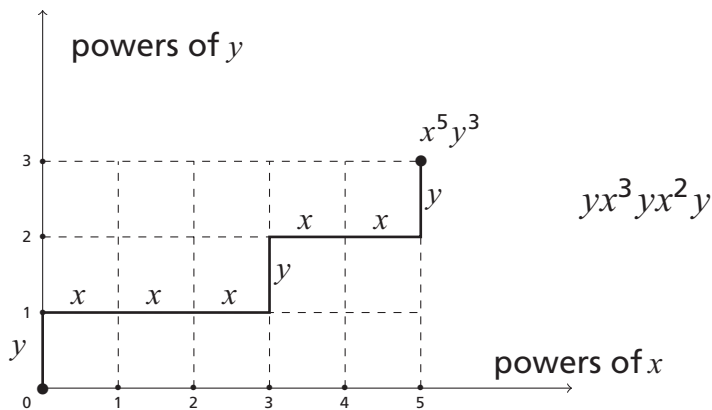


図2 非可換単項式の経路による表現。

に格上げされます。典型的な交換関係として粒子の座標と運動量に対応する作用素の間の $p \cdot q - q \cdot p = i\hbar$ が挙げられます。純粋数学では、行列の掛け算、あるいは、ある種の演算である合成変換など、他にも多くの例があります。実際、どんな動作でも続けて行くと、通常その結果は順序に依存します。シャツを着て次ぎにジャケットを着るのと、最初にジャケットを着て次ぎにシャツを着るのは同じではありません！

「非可換多項式」の概念により、非可換性の仕組みが理解できます。例として、非可換な2変数 x と y を考えましょう。すると4個の2次単項式 x^2, xy, yx, y^2 がありますが、これらは全て異なります。もし x と y が可換とすると xy と yx は等しいのですが、非可換単項式としては異なります。このように、1個の可換単項式が幾つかの非可換単項式で表されることになります。例えば、 $x^5 y^3$ は $yx^3 yx^2 y$ 、あるいは $xyx^2 yxyx$ やその他幾つかの非可換単項式に持ち上げられます。普通の単項式、例えば $x^5 y^3$ を平面上の座標 $(5, 3)$ の点として図示すると便利です（これはニュートン・ダイアグラムとして知られています）。こうするとこの単項式を非可換に持ち上げることは、街路が縦横のブロック状の都会で $(0, 0)$ から出発して $(5, 3)$ に至る「タクシーの走行経路」に対応します。つまり、東への走行は x に、北への走行は y に対応します（図2参照）。

従って、非可換多項式はこのような経路を足し合わせたものになります。これは、 x と y を可換にするこ

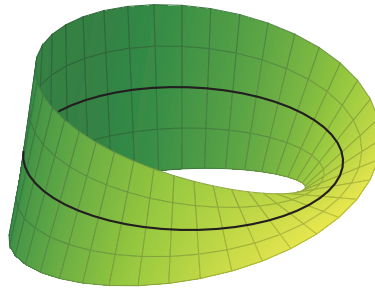
とは、始点と終点を固定して「経路について和を取る」ことを意味します。即ち、非可換環を強制的に可換にする「可換化」は現代物理学の概念的な手法である経路積分の代数的類似と見ることができます。

非可換環に幾何学的直感を付加する一つの方法は、空間 X によって連続的にパラメータ付けされたベクトル空間の族である「ベクトル束」という幾何学の概念を用いることです。例えば、メビウスの帯（図3参照）は黒で示す中心円上のベクトル束、すなわち中心円によってパラメータ付けされた「縦の」線の族です。 X が環 R に対応する場合は、 X 上のベクトル束は R 上の「加群」と呼ばれる代数的対象 M に対応します。加群 M においては、 R の元 r と M の元 m を掛け合わせることができ、 M の元 $m' = r \cdot m$ が得られます。

非可換環に幾何学的直感を付加することは、このような環を研究するための手段としてだけでなく、もっと良く知られた幾何学的問題へ数多く応用されます。多くの場合、普通の（つまり可換の）、しかし複雑な、あるいは振る舞いの悪い空間を、もっと簡単な非可換の対象で近似することができます。

超幾何

しかし、非可換代数構造は未だに完全な幾何学的解釈が可能なのには見えません。多くの本質的な構成を機能させるものは、可換性なのです。



$$r \cdot m = m'$$

図3 メビウスの帯¹と加群の乗法。

*1 Picture source: pgfplots.

幾何学の世界に対して、似ているが異なった鍵として働く「可換性に良く似た」性質を探するという別のアプローチがあります。そのような性質の一つが次数付（あるいは超）可換性で、これが超幾何学へと導きます。

この設定では、環 R には偶と奇の2種類の量があるとして、 R の一般的な元は偶と奇の元の和で表されます。超可換性 (Koszul の符号則としても知られる) は

$$(1) \quad f \cdot g = (-1)^{\deg(f) \cdot \deg(g)} g \cdot f$$

で表され、ここで f と g は偶か奇のいずれかで、 $\deg(f)$ は f が偶なら0、奇なら1とします。言い換えると、 f と g の少なくとも一つが偶の場合は $f \cdot g = g \cdot f$ 、両方が奇の場合は $f \cdot g = -g \cdot f$ となります。

従って、超可換環は通常の意味で可換ではありません。それにもかかわらず、数学者の経験によれば超可換性は通常可換環に付随する全ての幾何学的特徴を許します。例えば、通常可換である偶の座標と反可換である奇の座標を共に持つ超多様体を考えることができます。

超可換則は（超代数と呼ばれることもある）この種の代数の精巧な符号則システムの一つに過ぎません。これらの規則に矛盾が無いことは驚くべき事実です。種々の変換によっていろいろな符号の変化が生じますが、何かを2つの異なる方法で行った結果が異なる符号になるということは決して起きません。（もしそうなったら理論全体が成り立たなくなります。）この、ほとんど神秘的とも言える規則の自己無矛盾性は、い

やが上にもこの理論の魅力を高めるものです。しかし、この理論や規則が崩壊しない真の理由は、恐らく超代数の物理的起源にあると思われます。

物理学では素粒子にはボゾンとフェルミオンの2種類があることが知られています。その違いは、2個以上のフェルミオンが同じ量子状態に入ることはできない（これはパウリの排他律として知られています）のに対して、ボゾンはそれが可能な点にあります。たとえば、電子と陽子はフェルミオンですが、（光の量子である）光子はボゾンです。もっと数学的なレベルでは、何個かのフェルミオンの系の状態ベクトルは、任意の2個を交換すると式 (1) を思い出させるように符号を変えます。この電子のフェルミオンとしての性質が原子の構造や元素の基礎となっており、従って私たちの知っている宇宙が存在するために根本的に重要なものなのです。

超幾何学の着想は1960年代の末にF. Berezinによって初めて示唆されました。彼には、フェルミ粒子の振る舞いを説明する幾何学を創るという明確な物理的動機がありました。これはボゾンとフェルミオンの間の対称性である、いわゆる「超対称性」という大きなプログラムの一部となりました。最も重要なのは、こういった考え方が超弦理論で極めて有用であると分かったことです。超幾何学に現れる±符号が、やっかいものどころか、物理の理論により与えられる答えを（見かけの無限大を含まない）もっと扱い易いものにする

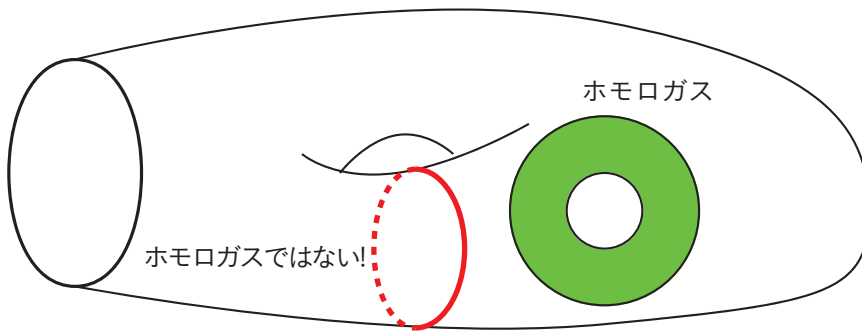


図4 ホモロガスなサイクルとホモロガスではないサイクル

という重要な目的に資するものであるということになったのです。すなわち、計算に現れる個々の項は非常に大きな値をもつが、和を取ると±符号のおかげで結果は有限に収まることになり、これは超幾何学無しには起こり得ないことです。

現代の超幾何は超弦理論の背後に潜む幾何学的言語としての役割を果たしています。特に、代数曲線とそのモジュライ空間の超類似は超弦理論の多くの側面で数学的に強固な背景を提供しています。

幕間：ホモロジー代数学

全ての数学的対象は、少なくとも形式的には、「元」と呼ばれるより簡単な何らかの要素の集まりである「集合」です。従って、円はその上の点の集合、環はそれを構成する関数の集合、等々です。数学的論法の主流は未だにこのアプローチなのです。数学者は、このような言葉で定式化されていない数学的な構成は理解しないのが普通です。

さて、既存の集合から新しい集合（数学的対象）を構成するには、2つの基本的に異なる双対的な方法があります。

一つは「条件」によるもので、例えば円を方程式 $x^2 + y^2 = 1$ で記述する方法です。

もう一つは「パラメータ付け」によるもの、すなわち全てのデータのリストを余すところなく示すことによるもので、例えば上と同じ円は $x = \cos(\alpha), y =$

$\sin(\alpha)$ によってパラメータ付けされます。

広い意味では「ホモロジー代数」は数学の中でこれら2種類の記述の間の関係を調べるものと言えます。しばしば同一の対象について2種類の記述を完全に同等にはできないことがあります。それらの間には「ギャップ」があって、条件を満たす元を全てリストすることができません。このギャップは「コホモロジー」という数学的概念によって定式化されます。

ホモロジー代数は、変形により不変であるような空間の大まかな形状を研究する幾何学の一部であるトポロジーに起源があります。このような構造を理解するため、境界を持たない幾何学的図形である「サイクル」を考えます。2つのサイクルはその違いが境界（図4の緑の領域が例）の場合、ホモロガスであると言えます。

このようにして、例えば球面とトーラスの違いを次のように言うことができます。トーラスには互いにホモロガスでない1次元のサイクルが存在しますが、球面ではそのようなことは起こりません（図4参照）。従って、球面上の1次元サイクルにおいては条件（境界を持たないこと）とリスト（境界であること）が同じ幾何的概念（境界を取るという操作）に由来します。

このような現象（条件対リスト）を系統的に調べることを可能にする「コチェイン複体」と呼ばれる数学的構造は、ベクトル空間 V が境界演算子の類似で2回作用すると0になる「微分 (differential)」 d と組になったもので、これは「境界には境界が存在しない」

接空間近似



図5 滑らかで特異性を持つ空間。

という基本的な幾何学的性質を定式化したものです。たいていの場合次数付けも行われ、ベクトルには整数が次数付けられます。

このタイプのアプローチも物理学で（1970年代に最初に導入した物理学者、C. Becchi, A. Rouet, R. Stora, I. Tyutinの名前から）BRST量子化として知られ、徐々に広がり始めています。このアプローチでは d によって消滅する「状態」ベクトル ψ だけが物理的と考えられます。さらに、2つの物理的状态 ψ と ψ' はその差が $d(\phi)$ の形の場合に限り同値（物理的に等しい!）と考えられます。このようにしてコホモロジー、すなわちギャップに対して実際の物理的意味が与えられました! この大胆なアイデアの意味する全体像は、まだ十分理解が進んでいるとは言えません。

導来幾何学

幾何学は平坦な（線形の）空間から（多様体と呼ばれる）曲がった空間に進む方法を教えてくれると言えます。多様体は各点において接空間と呼ばれる平坦な空間で近似することができます。平坦な空間の概念として別のものを選ぶ際、しばしば曲がった空間に格上げされることがあります。導来幾何学の着想はこのアプローチをホモロジー代数のアプローチと結びつけるものです。言い換えると、平坦模型として線形空間ではなく、先に述べた複体を考えることなのです。

こうすることの動機は、当初は純粋に数学固有のもの

のでした。モジュライ空間（幾何学的構造のパラメータの空間）が特異性を示す、つまり円錐の尖点のようにその近傍で線形近似が成り立たなくなる点をもつこと（図5参照）は、かなり前から知られていました。この困難は、導来構造を導入して性質の良い線形近似をもつ新たな対象を生成することにより克服できることが分かりましたが、これは複体による近似なのです!

しかし、導来化された世界に進むことは私たちの幾何学的対象の数を劇的に増大させます。通常の意味の「空間」に加えて（グロタンディークの意味でのスキームであると理解される場合でさえ）、別のタイプの幾何学的対象が見出されます。それらは既知のものもあれば新規のものもありますが、大まかには接空間（複体）の次数の範囲で分類できます。図6に幾つかの例と対応する接空間の次数の範囲を示します。この様に、スタック（その範囲は (-1) と 0 から成る）は「内在的対称性付きの空間」（物理におけるゲージ対称性のようなもの）を記述します。ほとんどのモジュライ空間は実際、スタックになります。高次スタックは更に洗練された対称性を記述します。

直感的には次のように言うこともできます。正の（右側の）範囲は複雑な（特異）点近傍の局所的な振る舞いを詳細に調べる「局所的幾何学」に対応し、負の（左側の）範囲は同様に空間の大域的でトポロジカルな性質を調べる「大域的幾何学」に対応します。この幾何学の2つの相補的な側面が自然に共通の枠組みに収まることは驚くべきことと言えます。

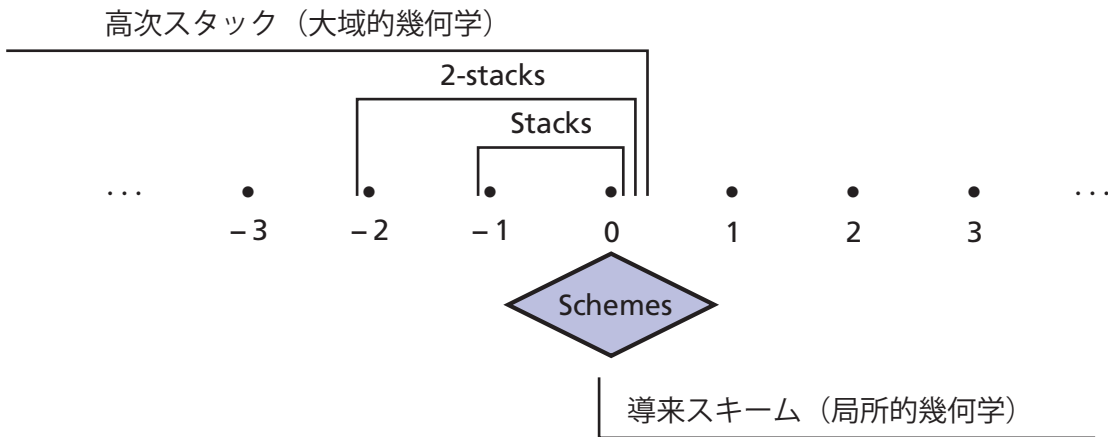


図6 導来幾何学の概観。

その起源はやや抽象的ですが、今までに導来幾何学の物理学に対する多くの注目すべき応用が見出されています。このようにして導来スタック（主として右側方向に属する対象）はトポロジカル場の量子論における積分サイクルの源を与えます。シンプレクティック多様体（古典力学のハミルトニアン形式の基礎をなす幾何学的対象）の導来類似は、この数年、多くのモジュライ空間の持つ構造として浮かび上がってきました。

導来化された世界の可換性は超符号則 (1) も含むため、超幾何学とも強い関係があります。実際、(1)の根底にある符号システム（このような構造はピカル亜群と呼ばれます）に、高次元の球面の間の写像の分類（いわゆる安定ホモトピー群）の観点から純粋にトポロジカルな解釈を与えることができます。次数 $\deg(f)$ （整数と仮定）は、次元の同じ球面の間の写像の次数として知られる整数不変量に対応します。2つの符号 \pm は $n+1$ 次元と n 次元（ここで n は3以上）の球面の間の2種類の写像に対応します。

結論

以上、数学者が使っている新しい幾何学的手法の例をほんの幾つか紹介しました。「現実の世界」を記述するのはどの幾何学でしょうか？このような記述の

ために必要かもしれない幾何学が他にもあるでしょうか？今までのところ、答えは知られていません。極めて短距離での時空の概念はそのようなものとしては意味がないということさえあるかもしれません。もっと（滑らかではない）粒々状の、もっと無秩序な量子的構造が取って代わることになるかもしれません。しかし、このような事柄について意味のある話をするのでさえ、それを可能とするには、それらと私たちの幾何学的直感および人間の思考パターンとを結ぶ橋が必要なのです。正しい答えを得るには適切な質問が必要ですが、それを妨げているものは、どのような幾何学が可能なのかということについての私たちの想像力の欠如かもしれません。

私には、魅力的な力を持つ超幾何学と物理的に有望な超対称性が示唆しているものは、何らかの一層高度な意味での可換性が物理学に必要な新しい幾何学の世界につながるドアを開くことになるかもしれない、ということのように思えます。特に、私は、代数的トポロジーの古典的な問題である球面の安定ホモトピー群に関係する構造が、そのような新しい世界への道案内となるのではないかと考えています。

Our Team

伊藤 由佳理 いとう・ゆかり 専門分野: **数学**

Kavli IPMU 教授

私の専門は代数幾何学です。これまで商特異点やその特異点解消について研究してきました。特異点に興味を持ち、代数幾何学を学んでいたときに、超弦理論から出てきた特異点の問題に出会いました。特異点の幾何学と代数学を結び付ける2次元のマックイ対応を3次元に拡張できることを示唆するもので、とても魅力的でした。その後、私は様々な方法でクレパントな特異点解消を構成し、3次元のマックイ対応について研究してきました。近年、導来圏を用いたマックイ対応の高次元化も盛んですが、2つ問題点があります：ひとつは多くの場合、群が可換な場合にのみ成り立つこと、もうひとつはクレパントな特異点解消の存在を仮定していることです。特異点解消の存在を示すのは難しいのですが、何か方法があると信じていますし、非可換な群の研究で新しい数学が生まれる可能性もあります。これからKavli IPMUで、いろいろな数学や物理との縁を身近に感じながら研究を楽しみたいです。



トム・メリア

Tom Melia 専門分野: 理論物理学

Kavli IPMU 助教

私は、現在主として二つの分野での素粒子の現象論の研究に興味を持っています。第一はLHCあるいは将来のコライダーで、素粒子の標準模型を超える（あるいは標準模型の「範囲内」での興味深い）物理を探索する新しい解析法を考え出すことです。第二は直接ダークマターを検出する試みで、中でも低いエネルギー閾値をもつ新しい小規模な実験のデザインを考えています。

また、私は場の量子論に秘められた新しい数学的構造を明らかにし、利用することにも興味があります。私たちが場の量子論において、現実の世界の有効場の理論についての考え方を整理するにあたり、共形場理論における表現論、可換代数、コホモロジーが重要であることが示されています。標準模型の散乱振幅は隠れた対称性を宿しています。私はこういったアイデアをさらに発展させたいと思っています。



ヒラリー・チャイルド

Hillary Child 専門分野: 天文学

博士研究員

私のこれまでの研究は主にダークマターハローの形状と進化に関するものです。ハローの質量と質量分布の中心集中度の関係、またその赤方偏移進化(時間進化)の理解を深めるために、N体計算で再現したハローの質量中心集中度を調べています。この質量と中心集中度の関係は宇宙論パラメータに依存し、またハローの進化と共に質量分布の形状がどのように変化するかの理解に役立ちます。カブリIPMUでの6ヶ月の滞在のあいだには、バースペクトル(3点相関関数)を用いることで、バリオン音響振動の長さスケールの測定を如何に改善できるかという問題を調べる予定です。



謝長澤

シェ・チャンゾウ 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は幅広い理論物理学に幅広く興味を持っています。具体的には、高エネルギー物理学と凝縮系物理学の理論、特にそれらの相互関係を研究しています。過去の研究では物質のトポロジカル相の分類に専念し、代数トポロジーのK理論、場の量子論と弦理論のアノマリ一等の理論的手法を応用して、これらの特異な状態の対称性と相互作用の効果を考える際の普遍的な性質を研究しました。現在、私はトポロジカルな現象と量子



系のエンタングルメント（量子もつれ）に関する理解を深めるとともに、それらの背後にある基本的な物理を探求したいと考えています。

フレドリック タカユキ・マツダ

Frederick Takayuki Matsuda 専門分野: 宇宙論

博士研究員

私は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光を観測する実験を行っています。Bモードと呼ばれるCMBの偏光の信号は、初期宇宙におけるインフレーションのメカニズムとニュートリノの質量についての豊かな情報を持っています。私は主に Simons Array と Simons Observatory のようなCMB地上観測のための望遠鏡と装置の開発研究に携わっています。望遠鏡の光学設計と光学的シミュレーションを研究しており、興味のある



観測波長全てにわたり高い感度とスループットを得るため、これらの望遠鏡の光学系の最適化を行います。

ベンジャミン・キーラン

Benjamin Quilain 専門分野: 実験物理学

博士研究員

これまでにバリオンセクターで物質と反物質の非対称性が測定されていますが、その値は小さすぎて私たちの宇宙が物質優勢であることを現実的な宇宙のインフレーション・シナリオと矛盾なく説明することができません。私は、レプトンセクターでこの非対称性をT2Kおよびスーパーカミオカンデ実験におけるニュートリノ振動を通じて探す研究を行います。ミュートリノビーム中で電子ニュートリノの出現を観測した後、私たちは最近反ニュートリノが異なった振動を



するかもしれないというヒントを示しました。私は、系統的誤差を減らすことと、T2Kとスーパーカミオカンデの同時解析により、この非対称性の証拠を示すことを目指します。

Our Team

ニュートリノ振動研究の展開

T2K実験の最新結果、そしてハイパーカミオカンデ計画

市川 温子 いちかわ・あつこ

京都大学大学院理学研究科 准教授

中家 剛 なかや・つよし

京都大学大学院理学研究科 教授、Kavli IPMU 客員上級科学研究員

1. はじめに

2017年夏、ニュートリノ振動研究に二つの大きな進展があった。一つはT2K実験の最新結果が発表され、ニュートリノで粒子と反粒子の間の対称性（CP対称性）が破れている兆候が 2σ の有意度として報告されたことである。二つ目は、スーパーカミオカンデの後継実験であるハイパーカミオカンデ計画が文部科学省の「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想・ロードマップの策定（ロードマップ2017）」に採択され、計画の実現に向けて大きく前進したことである。この暑い夏の進展について報告する。

2. T2K実験の最新結果

2.1 加速器ニュートリノ振動実験とCP対称性の破れ

ニュートリノ振動は大気ニュートリノや太陽ニュートリノの観測を通して発見され、ニュートリノに質量がある場合にニュートリノの種類が変化する（振動する）現象である。3種類のニュートリノ（電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ）が、3種類の質量の波（波動関数）の重ね合わせ状態であるために起こる波の干渉、うなり現象である。面白いことに、量子力学的に3種類の波が重なる際には、粒子と反粒子でそのうなりの様子が異なる、いわゆるCP対称性を破ることが可能となる。ニュートリノ振動において「CP対称性の破れ」は見つかっておらず、その破れ

の大きさを表すパラメータCP位相角はまだ測られていない。CP対称性を調べるには、ニュートリノがどの種類に変化したか、つまり変化後のニュートリノ出現事象を測定することが必要で、加速器で作り出すニュートリノビームを使った実験で測定が可能となる。加速器ニュートリノビームの最大の特徴は素性（種類、エネルギー、飛行距離）がそろっていることで、検出の難しい稀な出現事象を観測することができる。

2.2 T2K (Tokai-to-Kamioka)実験

T2K実験は、茨城県東海村にあるJ-PARC陽子加速器でミューオンニュートリノないし反ミューオンニュートリノのビームを生成し、295 km離れた岐阜県飛騨市神岡のスーパーカミオカンデ検出器でニュートリノを観測している。生成した時にはミューオンニュートリノであったものが電子ニュートリノに振動した割合と、反ミューオンニュートリノであったものが反電子ニュートリノに振動した割合を測定し、比較することでCP対称性の破れを調べる。CP対称性が破れていると、その割合がニュートリノの場合と反ニュートリノの場合で異なる。または、CP位相角がゼロの場合（CP対称性が破れていない場合）のこの割合の予想値からのずれを見ることでもCP位相角を測ることができる。反ニュートリノと物質との反応頻度がニュートリノに比べて約3分の1と小さいため、ニュートリノビームで実験を行う方がより多くの電子ニュートリノへの振動事象を観測できる。

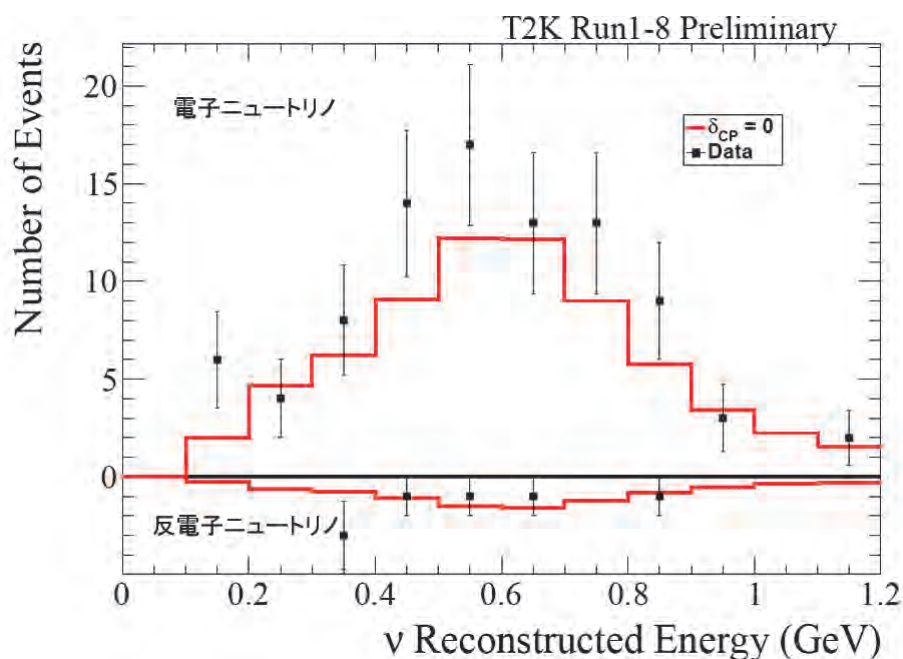


図1 電子ニュートリノ（上側）と反電子ニュートリノ（下側）のエネルギー分布。赤線はCP位相角がゼロの場合の予想値。

2010年にニュートリノビームで実験を開始し2013年に7 σ の信頼度で電子ニュートリノ出現事象を確立した。その後、2016年前半まで反ニュートリノビームで実験を行い、CP対称性が破れていそうな兆候が見えてきた。2016年の10月から2017年4月は、ニュートリノビームでデータを取得し、加速器のビーム強度が480キロワットにパワーアップしたことで、1年でニュートリノビームのデータを倍増することができた。

2.3 CP対称性の破れが見えてきた？

今回の新しい解析では、従来に比べて電子ニュートリノ事象を選ぶ効率を30%向上させることに成功した。その主な改善点は検出器内で使える体積を増やしたことである。これまでに取得したすべてのデータから、電子ニュートリノとして観測されたのは89個あった。「CP対称性の破れがない」場合の予想数は約67個で、観測数はこの予想を上回る。一方、反電子ニュートリノについても、「CP対称性の破れがない」場合の予想数は約9個であるのに対し、観測数は7個と、こちらは予想よりも少なめだ。図1は観測された電子ニュートリノ事象と反電子ニュートリノ事象のエネルギー分

布である。これに加えて、ミューニュートリノと反ミューニュートリノの観測結果、また原子炉や太陽ニュートリノ実験の結果も考慮し、総合的な解析を行った結果、データを最も再現するCP位相角は -105° となった。そして、統計的に95% (2 σ)で許容される範囲は、 -171° から -70° という結果が得られた。これは、CP対称性が破れていない（CP対称性が保存している）仮説を95%の信頼度で棄却したということである。T2K実験では、今後データ量を増やして、CP対称性が大きく破れている場合には、3 σ の信頼度で発見することを目指している。この秋からは反ニュートリノビームで更なるデータ取得を行う予定である。

3. ハイパーカミオカンデ計画の現状

ハイパーカミオカンデ計画は、スーパーカミオカンデの10倍の有効体積をもつ26万トン（有効体積は19万トン）の超大型水チェレンコフ検出装置を岐阜県飛騨市神岡町に建設し、ニュートリノ研究を広く発展させると共に、大統一理論の証拠となる陽子崩壊を世界最高感度で探索する実験の計画である。日本学術会議の

「学術の大型計画に関するマスタープラン（マスタープラン2017）」に選択され、このたび文部科学省のロードマップ2017にも採択され、いよいよ予算化が近づいてきた。

3.1 ハイパーカミオカンデ実験の目標

今夏、T2K実験が 2σ の有意度でCPの破れを観測したが、より明確な答えを得るためには、ハイパーカミオカンデ実験で 5σ を超える測定が期待されている。また、ハイパーカミオカンデ実験では大気ニュートリノの地球内部での振動を観測することで、3種類の質量の順序に関して明確な答えが得られると予想される。さらに、ハイパーカミオカンデ実験で精密にニュートリノ振動を測定することで、ニュートリノが3世代を超えて存在する可能性も探求できる。太陽ニュートリノの観測による太陽内部でのニュートリノ振動の測定も可能である。その他、我々の銀河で起こる超新星ニュートリノを観測できれば、超新星の爆発メカニズムに関して重要な情報が得られると期待できる。より遠方では、アンドロメダ銀河くらいまでの超新星爆発の探索が可能となる。さらに、宇宙に漂う過去の超新星爆発ニュートリノを捉えることで、宇宙の進化史にも重要な観測が可能となる。

これらのニュートリノ研究に加えて、ハイパーカミオカンデ実験の重要な物理の目標が、「陽子は壊れるか？」という、素粒子物理学の最重要課題に挑むことである。素粒子の大統一理論は、陽子の崩壊を予言する。これまでスーパーカミオカンデでは陽子の崩壊は見つかっておらず、大統一理論の証拠はまだ見つからない。しかし、素粒子物理学者の多くは大統一理論を信じている。ハイパーカミオカンデ実験では、その大体積を有効活用し、陽子崩壊をこれまでの10倍以上の感度で探ることが可能となる。

以上のように、ハイパーカミオカンデ計画は、ニュートリノ物理に残った問題を解決し、ニュートリノを使った宇宙観測を進展し、素粒子物理学者の夢である「大統一理論」の発見可能性を秘めた、他に類のない実験提案である。

3.2 ハイパーカミオカンデ実験装置

ハイパーカミオカンデ実験装置の概略図を図2に示

す。26万トンの超純水を蓄えたタンクに約4万本の光センサーが設置され、ニュートリノの信号や陽子崩壊の信号を、チェレンコフ光を使って観測する。光センサーはその直径が50 cmあり、光に対する感度、時間応答性、エネルギー分解能がスーパーカミオカンデのものに比べて2倍の性能を誇る。この光センサーが内面の40%をカバーしていて、微弱なニュートリノや陽子崩壊の信号を捉えるのである。

3.3 ハイパーカミオカンデ計画の現状と予定

ハイパーカミオカンデ実験は、宇宙線研究分野と高エネルギー物理学研究分野で、重要計画と位置付けられている。実験グループは世界15カ国・総勢300名からなる国際共同研究グループである。実験の草案（Letter of Intent）は2011年に出され、2015年にデザインレポートがまとめられた。現在、東京大学から予算要求が行われている。予算が認められるには、文部科学省においてハイパーカミオカンデ計画の重要性を確認する必要があり、今回文部科学省のロードマップ2017に採択されたことは、その実現に向けての大きな一歩を踏み出したと言える。ハイパーカミオカンデ計画の予算が2018年度に認められれば、そこから8年の建設期間を経て、実験は2026年に開始できる予定である。

4. まとめ

ニュートリノ研究は日本がこれまで世界をリードしてきた研究分野である。2017年も、T2K実験からCP対称性の破れに関する重要な研究結果が世界に向けて発信された。近年、基礎研究を取り巻く日本の財政状況は厳しいが、基礎研究は未来への投資であり、将来の日本のために今こそ大きな研究の進展が望まれる。ハイパーカミオカンデ実験は、建設に8年、その後10年以上の観測と、非常に長期の計画であるが、それゆえ重要な未来への投資となっている。若い研究者に夢を与え、日本の基礎研究が10年、20年先でも発展していくように、関係する方々の協力を得て、近い将来にハイパーカミオカンデ計画が実現することを期待している。

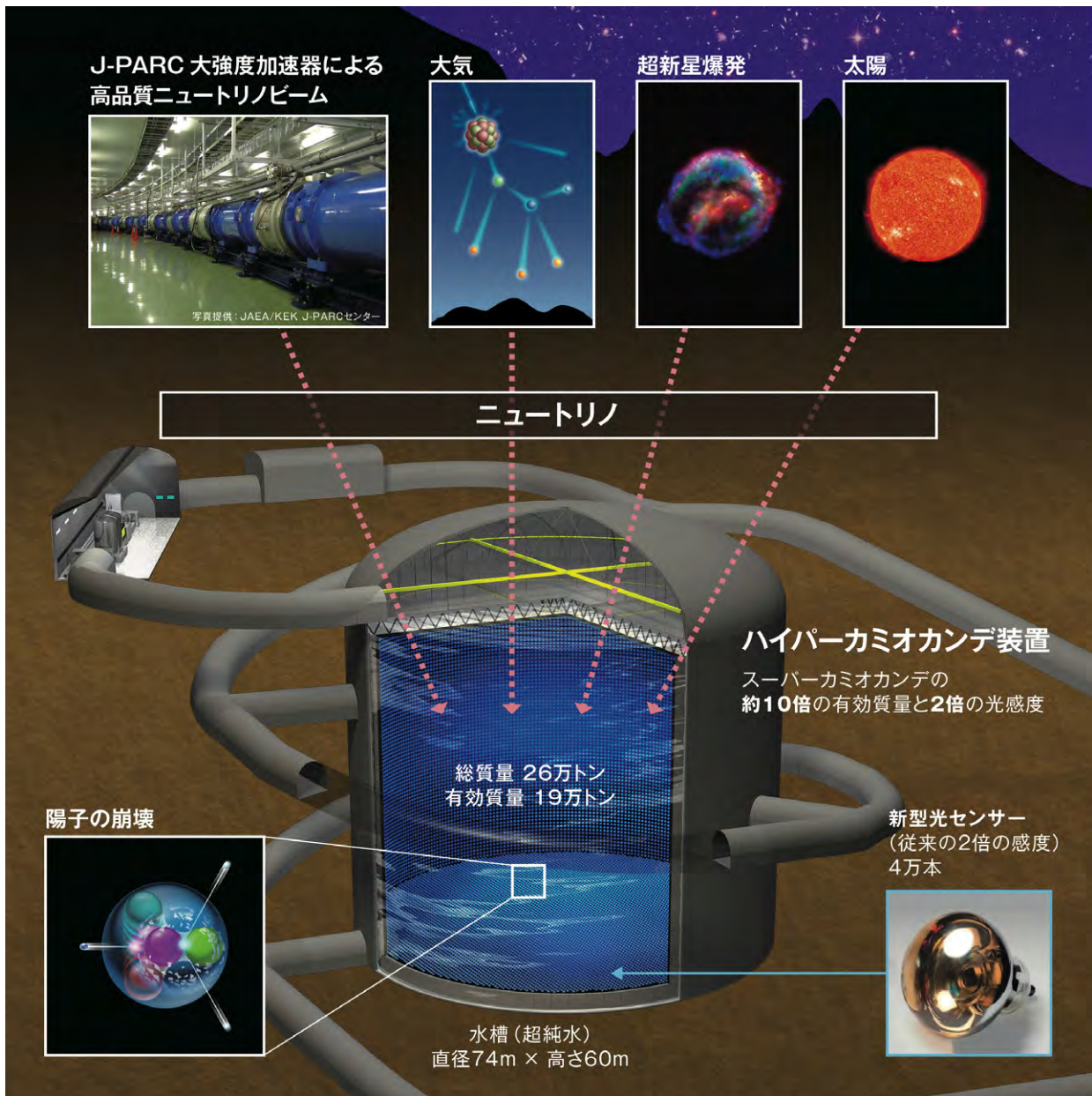


図2 ハイパーカミオカンデ実験装置の概略図とその研究対象

Stellar Evolution, Supernova and Nucleosynthesis Across Cosmic Time

前田 啓一 まえだ・けいいち

京都大学准教授、Kavli IPMU客員科学的研究員

小林 千晶 こばやし・ちあき

University of Hertfordshire Senior Lecturer,
Kavli IPMU客員科学的研究員

2017年9月18日—29日の二週間にわたり、カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) において、“Stellar Evolution, Supernova and Nucleosynthesis Across Cosmic Time” が開催された。本研究会は野本憲一氏 (Kavli IPMU上級科学的研究員) が70歳を迎え2017年3月にKavli IPMUの主任研究員の任期を終えられた機会に、同氏が開拓された恒星進化・超新星爆発の様々なトピックの最新の進展を俯瞰する意味も込め、世界一線の研究者を多数招聘し非常に活発な議論を行ったものである。出席者総数は81名、うち外国機関からの参加者が46名 (うち24%が女性研究者) という非常に国際色の強い参加者間で、“大質量星進化と重力崩壊型超新星爆発”、“小・中質量星進化とIa型超新星爆発”、“漸近巨星分枝星進化と電子捕獲型超新星”、“化学進化と銀河考古学” について活発な講演・議論が行われた。

本研究会はワークショップ形式とし、午前中にはレビューを含めた講演を行い、午後は自由な議論の時間およびトピックを決めての全体での議論の時間とした。また、野本憲一氏の企画により、一日の終了時にはキャンパス内カフェテリアにおいて議論の時間が設定され、リラックスした雰囲気の中で活発な議論が行われた。午前中の講演は2週間で39講演におよび、午後の議論の時間には25名が講演を行い最新の結果が報告された。このワークショップ形式は普段

Kavli IPMUで行っていない形式ということもあり事務の方々にも多大な負担をかけたが (そのサポートなしには研究会の成功は不可能であった)、参加者から非常に好評であり多くの共同研究開始のきっかけとなった。Kavli IPMUにおける新しいスタイルの研究会として、一つの例を示せたのではないかと思う。

第1週目においては、主に大質量星の進化および超新星爆発を題材とした。9/18 (月) にはNorbert Langer氏が大質量星進化の現状の理解と未解明問題のレビューを行い、これに引き続き大質量星の超新星爆発についての観測の現状が報告された。9/19 (火) にはAdam Burrows氏が重力崩壊型超新星爆発の現状の理論的理解をまとめたほか、大質量進化と超新星爆発機構の関係についての講演が行われた。9/20 (水) にはChris Sneden氏をはじめとし、銀河系内の非常に古い金属欠乏星の観測に基づく銀河考古学の現状についての講演が行われた。同日には、野本憲一氏も第一世代星の超新星爆発による宇宙最初の化学汚染についての講演を行った。9/21 (木) は主に超新星爆発における元素合成に焦点をあて、Marco Limongi氏らが講演を行った。9/22 (金) には最新の理論・観測研究の結果を受け、Chris Fryer氏などを中心とし、超高輝度超新星、ガンマ線バースト、中性子星合体の電磁波対応天体などの放射理論を中心に講演・議論が行われた。

第2週目は主に小中質量星の進化とIa型超新星をトピックとした。9/25（月）には野本憲一氏が中質量星の進化と電子捕獲型超新星の基本についてレビューを行ったほか、最新の成果が報告された。9/26（火）にはIa型超新星に至る主要な進化経路の二つのシナリオについての理論研究についての講演（蜂巢 泉氏によるSingle Degenerateシナリオ、Ashley Ruiter氏によるDouble Degenerateシナリオについての講演）が行われたほか、Mark Sullivan氏らにより観測的制限が議論された。9/27（水）は爆発機構の理論研究に焦点が当てられ、Friedrich Roepke氏のレビューに続き、それぞれのモデルについての講演が行われた。9/28（木）にはPeter Nugent氏がiPTFサーベイにより発見された新しいタイプの超新星について講演を行い、超新星の光度曲線・スペクトルについて活発な議論がなされた。9/29（金）には小中質量星進化とIa型超新星の影響を中心に銀河化学進化についての考察が小林千晶氏によって発表されたほか、安田直樹氏によるHSCを用いた突発天体サーベイの紹介がなされた。また、Wolfgang Hillebrandt氏とPhilipp Podsiadlowski氏により、本研究会のまとめをかねIa型超新星の未解決問題と今後の方向性についての可能性が提示された。

また、研究会期間中には、本研究会参加者によるAPECセミナーも企画された。Philipp Podsiadlowski氏は現在非常にホットなトピックである重力波天体、連星ブラックホール連星や連星中性子星についての講演を行い、Francesca Matteucci氏は銀河化学進化と銀河考古学について基礎から最新の話まで含めた迫力のあるレビューを行った。ともに大盛況であった。

9/20（水）と9/27（水）には、IPMU近くの和食レストランにおいて、寿司の屋台も出る立食形式のバンケットが開催され、同伴者も含めそれぞれ50名ほどの参加者が交流を楽しんだ。Friedel ThielemannとMelina Bersten (9/20)、Francesca MatteucciとWolfgang Hillebrandt (9/27) の各氏からは、野本憲一氏の70歳を祝うスライド付きのスピーチがあった。

本研究会を通し、恒星進化・超新星・突発天体研究という、野本憲一氏らを筆頭に切り開かれた研究分野が今まさに加速度的に発展する様を肌で感じることができた。Kavli IPMUが中心の一つとなり推進するすばるHSCを用いたサーベイにおいても、突発天体研究は大きな成果を上げつつある分野であり、今後のますますの発展に期待している。



研究会第1週の9月20日に行われたバンケット



研究会第2週の9月27日に行われたバンケット

大栗博司主任研究員、日本文藝家協会の会員に選出される

カリフォルニア工科大学教授でKavli IPMU主任研究員を兼ねる大栗博司さんは、研究の傍らこれまでに一般向けの著作を数多く世に送り出しており、この活動が評価されて2017年6月23日付で日本文藝家協会の会員に選出されました。



大栗博司さん

日本文藝家協会は、1926年（大正15年）に菊池寛を初代会長として設立された文藝家協会を前身とし、第2次世界大戦中の1942年（昭和17年）に一度解散した後、1946年（昭和21年）に再発足の文芸を職業とする会員の職能団体です。作家、劇作家、評論家、随筆家、翻訳家、詩人、歌人、俳人等を会員とし、文芸家の権利保護に加え、日本の文芸文化全般の隆盛を目的として活動しています。

WPIのPD・POによる平成29年度現地視察

2017年7月19日にWPIのPD（プログラムディレクター）、PO（プログラムオフィサー）による平成29年度現地視察が実施され、10年間の拠点の成果を踏まえた今後5年間の延長期間における進展計画、および大学のビジョンと支援についての確認が行われました。視察団は、今年度からWPIのPDに就任された宇川彰氏、設立当初からIPMU / Kavli IPMU担当POを務め

る三田一郎氏、昨年度までWPIのPDを務められ、今年度新しくWPIのAD（アカデミーディレクター）に就任された黒木登志夫氏、および日本学術振興会WPI事務局の方々でした。

初めに村山機構長の延長期間における9つの挑戦項目とその進捗状況の報告、続いてホスト機関である東京大学の小関敏彦研究担当理事・副学長による東京大学のビジョンとKavli IPMUのシステム改革の大学への波及効果および大学の今後の支援についての説明があり、その後視察団とKavli IPMU/東大の間で活発な質疑応答が行われました。

今回の現地視察は2時間という短時間のもので、最後にPD、PO、ADからの講評があり、無事終了しました。



文科省から戸谷次官、関局長、大洞室長がKavli IPMUを視察

2017年7月、8月、9月にそれぞれ文部科学省から次の方々東京大学柏キャンパスを訪れ、Kavli IPMUを視察されました。本誌25ページのDirector's Cornerに掲載されている写真も併せてご覧下さい。

7月21日には研究振興局から関靖直局長と随行の錦泰司学術機関課専門官、加藤久乃基礎研究振興課企画調整係研/国際研究拠点形成支援係係員が大気海洋研究所、宇宙線研究所、新領域創成科学研究科、物性研究所に続いてKavli IPMUを訪れました。Kavli IPMUでは村山機構長から概要と研究内容の説明を受けた後、研究棟内とティータイムを視察しました。

8月21日には同じく研究振興局から大洞龍真基礎研究振興課基礎研究推進室長と重田佑樹基礎研究振興課企画調整係長/国際研究拠点形成支援係長が

Kavli IPMUを訪れました。村山機構長の説明に続く研究棟内の視察中に、3階のティータイムが行われる交流スペースのテーブルの上に置かれていた大栗博司主任研究員が著者の一人である「真理の探究－仏教と宇宙物理学の対話」(幻冬舎)に大洞基礎研究推進室長が興味を示される一幕もありました。

9月15日には戸谷一夫文部科学省事務次官がKavli IPMUを視察され、大洞室長と出塩進総務課事務次官室課長補佐が随行しました。定番の村山機構長による概要と研究内容の説明の後、戸谷次官は、大学のシステム改革の内容に特に関心を示され、外国人研究者を受け入れる際の年金や保険の問題などに関して村山機構長と意見を交わされました。続く研究棟内を視察ではティータイムで研究者とも歓談され、終始和やかな雰囲気ですべて視察を終えられました。

「サイエンスカフェ宇宙2017」の第2回開催

「サイエンスカフェ宇宙」は、毎年Kavli IPMUと東京都西東京市にある多摩六都科学館の共催で行われ、今年で9年目となります。今年の「サイエンスカフェ宇宙2017」においては、これまでKavli IPMUの主催・共催で行われてきた一般向け講演会での初めての試みとして、通訳無しで外国人研究者が英語で講演を行うスタイルにより、第1回を6月24日に実施しました(Kavli IPMU News No. 38の39ページ参照)。7月8日には同じスタイルで第2回を実施し、Kavli IPMU博士研究員のデイヴィッド・スタークさんが「銀河の誕生・成長・死」と題して講演しました。参加者は約40名で、その40%は中高生でした。

講演の前半では銀河の誕生と成長を話題とし、ダークマターが寄り集まってきたダークマターハローの中にガスが入り込んでいき、銀河が成長して行く様子を豊富な画像やシミュレーションで紹介しました。後半は銀河の死についての話題で、成長した銀河が

どのようなメカニズムで星の形成を停止し、不活発な銀河になっていくのか説明しました。併せて、銀河が星の形成をなぜ停止するのかは諸説あり、はっきりとした理由はまだ解明されておらず、デイヴィッドさん自身も銀河が星の形成をなぜ停止するのかに関する研究に携わっていることを最後に紹介しました。

講演から質疑応答まで全て英語で行われましたが、アンケートからは「英語が難しかったが、先生の熱意が伝わりました」「またこういった英語での講演を聞きたいです」という声が見られました。また、イベント終了後も英語で個別に質問する参加者もいるなど、「英語でサイエンスカフェ」の試みは今後につながる成果が得られたものと思われま



Kavli IPMU サイエンスカフェ「加速器実験っておもしろい？」開催

2017年7月15日にKavli IPMU主催のサイエンスカフェ「加速器実験っておもしろい？」を研究棟で実施し、中高生を含む約40名が参加しました。

このイベントでは、まず大講義室で欧州原子核研究機構(CERN)を舞台としたヒッグス粒子発見までの5年間、6人の物理学者を追ったドキュメンタリー映画“Particle Fever”のKavli IPMUが独自に制作した日本語字幕版(その経緯についてはKavli IPMU News No. 30の49ページ参照)を上映しました。

その後、3階の交流スペース、藤原交流広場に会場を移し、シカゴ大学教授でKavli IPMU主任研究員を兼ねるヤンキー・キムさんを講師として通訳を介さず英語でサイエンスカフェを行いました。ヤンキー・キムさんは、加速器を用いた高エネルギー物理学実験に

長年携わり、ヒッグス粒子発見に貢献したATLAS実験にも参加しており、その立場からヒッグス粒子の発見の重要性やヒッグス粒子発見後の次世代の高エネルギー実験について述べました。更に、日本で実施され、あるいは計画されている実験、SuperKEKB/Belle II実験、ハイパーカミオカンデ計画、ILC計画などに言及しました。講演後の講師と参加者との交流の時間には、お菓子を片手に積極的に英語で質問をする参加者の姿が見られました。



SSH全国大会でブース展示

2017年8月9日と10日の2日間、Kavli IPMUはWPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)の他の8拠点と共に、神戸国際展示場(兵庫県神戸市)で開催された「平成29年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会(通称:SSH全国大会)」においてブース展示を実施しました。

「物理を学ぶ、物理を作る—高校物理から宇宙研究の最先端へ—」開催

2017年8月19日、理科を教える中学校・高校教員を対象とした「物理を学ぶ、物理を作る—高校物理から宇宙研究の最先端へ—」が東京大学本郷キャンパスの弥生講堂アネックス セイホクギャラリーで開催されました。このイベントは東京大学高大接続研究開発センター高大連携推進部門CoREFユニット*とKavli IPMUの共催によるもので、約30名の教員が参加しました。

プログラムは体験型演習から開始され、「ダークマター」について高校1年生に分かりやすく説明するという課題が提示され、グループに分かれて資料を基に考えて発表しました。その

後、村山機構長が講演し、なぜダークマターが存在すると言われているのか解説したほか、高校生の授業範囲で取り上げられそうな身近な現象、例えば二次曲線と惑星軌道、炎色反応と吸収線のつながりなどいくつかの事例を紹介しました(25ページの写真参照)。

最後に、参加者と高大接続研究開発センターの白水始教授、Kavli IPMUの村山機構長との意見交換の時間が設けられ、最先端科学を普通の授業に取り入れるにはどのようにすれば良いか等について話し合われました。

人事異動

副機構長の異動

2017年6月7日付けで春山富義事務部門長が副機構長兼務となりました。

また、2017年7月13日付けで片山伸彦Kavli IPMU教授が副機構長を退任しました。今後は研究に専念します。

昇任

Kavli IPMU准教授の戸田幸伸さんが2017年7月16日付けでKavli IPMU教授に昇進されました。



戸田幸伸さん

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。]

Edmond Cheungさん[2014年10月1日—2017年9月30日]、Kavli IPMU博士研究員からRaise.meのLead Data Scientistへ。

Dulip Piyaratneさん[2014年10月16日—2017年8月13日]、Kavli IPMU博士研究員からアリゾナ大学のPostdoctoral Research Associateへ。

Wiphu Rujopakarnさん[2014年3月16日—2015年8月7日および2016年3月1日—2017年7月10日]、Kavli IPMU博士研究員からタイ王国のチュラーロンコーン大学理学部物理学科講師へ。

*大学発教育支援連携ユニット(Consortium for Renovating Education of the Future)



キロノバ

田中 雅臣

国立天文台理論研究部 助教、Kavli IPMU客員准科学的研究員

キロノバとは中性子星合体の後に放たれる可視光・赤外線放射です。中性子星が合体すると、強い重力波が放たれるとともに、一部の物質が宇宙空間に飛び出していきます。その物質の中では速い中性子捕獲反応により、金やプラチナなどの重元素が合成されることが予想されています。キロノバは、それら重元素の放射性崩壊エネルギーによって輝く現象です。2017年8月、中性子星合体からの重力波が初めて捉えられました(GW170817)。さらに、重力波に続いて様々な電磁波シグナルも観測されました。観測された可視光・赤外線の性質はキロノバの予想と似たもので、天文学者たちは重元素ができる現場を目撃したのかもしれない。

