

# KAVLI IPMU NEWS

wpi 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

UTIAS The University of Tokyo Institutes for Advanced Study  
東京大学国際高等研究所

Feature Intersection Numbers and Differential Equations  
Interview with Gerard 't Hooft



30

No. June 2015

# Kavli IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**  
Intersection Numbers and Differential Equations  
Todor Milanov
- 10 **Our Team**  
Chiaki Hikage  
Sho Saito  
Kohei Hayashi  
Akishi Ikeda  
Tadashi Ishibe  
David McGady  
Yuki Moritani  
Kyohei Mukaida  
Maresuke Shiraishi  
Benda Xu  
Kiyoto Yabe
- 14 **Interview** with Gerard 't Hooft
- 22 **Workshop Report**  
International Workshop on Condensed Matter  
Physics and AdS/CFT  
René Meyer
- 23 **News**
- 28 **Leptogenesis**  
Masataka Fukugita

## Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉  
近況
- 30 **Feature**  
交点数と微分方程式  
トードル・ミラノフ
- 36 **Our Team**  
日影 千秋  
齋藤 翔  
林 航平  
池田 暁志  
石部 正  
デビッド・マックギャディー  
森谷 友由希  
向田 享平  
白石 希典  
続 本達  
矢部 清人
- 40 **Interview** ヘーラルト・トホーフト教授に聞く
- 48 **Workshop Report**  
物性物理とAdS/CFTに関する国際ワークショップ  
レネ・マイヤー
- 49 **News**
- 52 **レプトジェネシス(宇宙の物質創生)**  
福来正孝

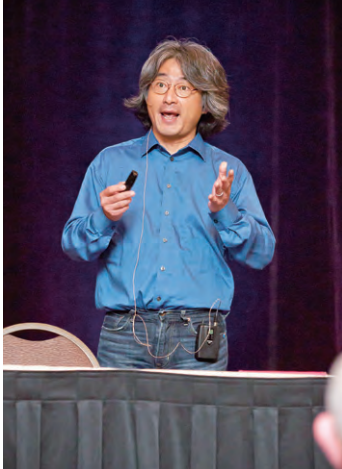


Todor Milanov is an Associate Professor at the Kavli IPMU. He graduated from the Sofia University, Bulgaria, and received M.A. in Mathematics in 2000. He obtained his Ph.D in Mathematics from the University of California at Berkeley in 2005. He became a Szegő Assistant Professor at the Stanford University in 2005, a Postdoctoral Fellow at the North Carolina State University in 2008, and at the University of Michigan in 2009. He then became a Kavli IPMU Assistant Professor in August 2010. Since December 2014, he has been a Kavli IPMU Associate Professor.

トードル・ミラノフ：東京大学 Kavli IPMU 准教授。2000年にソフィア大学を卒業し、数学の修士号を取得。2005年にカリフォルニア大学バークレー校より博士の学位を取得、同年、スタンフォード大学 Szegő 助教授。2008年にノースキャロライナ州立大学博士研究員、2009年にミシガン大学博士研究員。2010年8月に Kavli IPMU 助教、2014年12月より Kavli IPMU 准教授。

# Hitoshi Murayama at Work

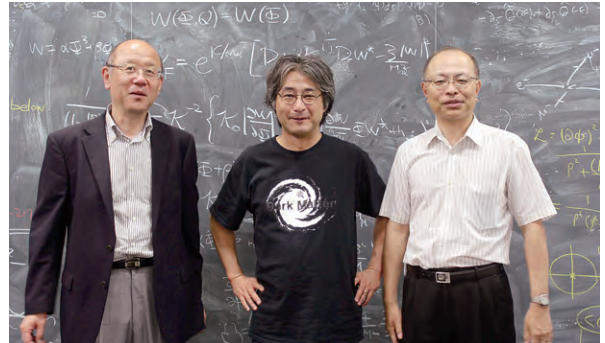
Director of Kavli IPMU  
Hitoshi Murayama



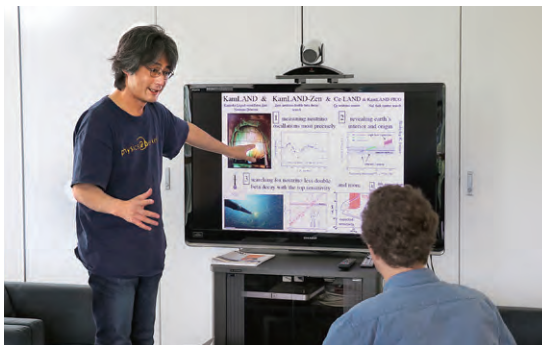
May 7: Lecture at the “Sixth International Particle Accelerator Conference, IPAC’15” held at the Greater Richmond Convention Center in Richmond, Virginia, U.S.A. (Credit: IPAC’15)



May 26: Address at the conference entitled, “International Workshop on Condensed Matter Physics & AdS/CFT,” held at the Kavli IPMU.



June 12: Photo with Masahiko Hayashi, Director General (right), and Hideyuki Kobayashi, Vice-Director General (left), of NAOJ .



June 29: Explaining an overview of the research at the Kavli IPMU to a Freelance Journalist George Musser who visited the Kavli IPMU.



# Intersection Numbers and Differential Equations

## Introduction

One of the most fundamental concepts in modern geometry is the notion of a manifold. It is very unlikely that someone who did not get a special training in mathematics has ever heard this word before. I am going to explain what a manifold is, but to begin with we can think of it as a specific part of the space around us, such as the circle that a little girl drew on the wall while her parents were not watching, the surface of a soccer ball, and even the entire Universe. Sometimes the shape of the manifold is easy to imagine, because we can see it, but most of the times it is impossible. For example, we can see only a small piece of the Universe. It looks like a box, but the true shape might be quite different. One mathematical approach to deal with things that we can't imagine is to find numbers, usually called invariants that capture as many geometrical properties as possible. The invariants that were studied quite extensively in the last 20 years are the so-called Gromov-Witten invariants. Although their origin goes back to classical problems in enumerative algebraic geometry, it is the recent developments in string theory that made them very interesting. The goal of string theory is to unify quantum mechanics and gravity. Its main idea is to model particles by little strings. In particular, trajectories are not lines but surfaces. That is why the problem of determining what types

and how many surfaces exist in a given manifold becomes very important in physics as well. I would like to write about one of the striking predictions of string theory, which has a unifying power in a sense that it suggests a relation between two quite different areas in Mathematics.

## What is a manifold?

The basic examples are called linear vector spaces. The examples that we can imagine are the line, the plane, and the 3-dimensional space. Alternatively, we can think of these spaces in terms of coordinates. Namely, we draw a coordinate system by choosing an arbitrary point as an origin and 1, 2, or 3 orthogonal axes. Every point has coordinates that correspond to projecting the point to each coordinate axes. This way the line is the same as all real numbers. The plane is the same as all pairs of real numbers, while the 3-dimensional space is all triples of numbers. The dimension corresponds to the number of coordinates. Our imagination cannot go beyond dimension 3, so that we have no way to say what a 4-dimensional linear vector space is except that it is just all quadruples of real numbers.

The manifold is made from linear vector spaces by gluing. The simplest example is the circle, but let me explain the next simplest example the sphere, because it is more relevant to us. If we remove the North Pole  $N$  of the sphere then every other point  $P$

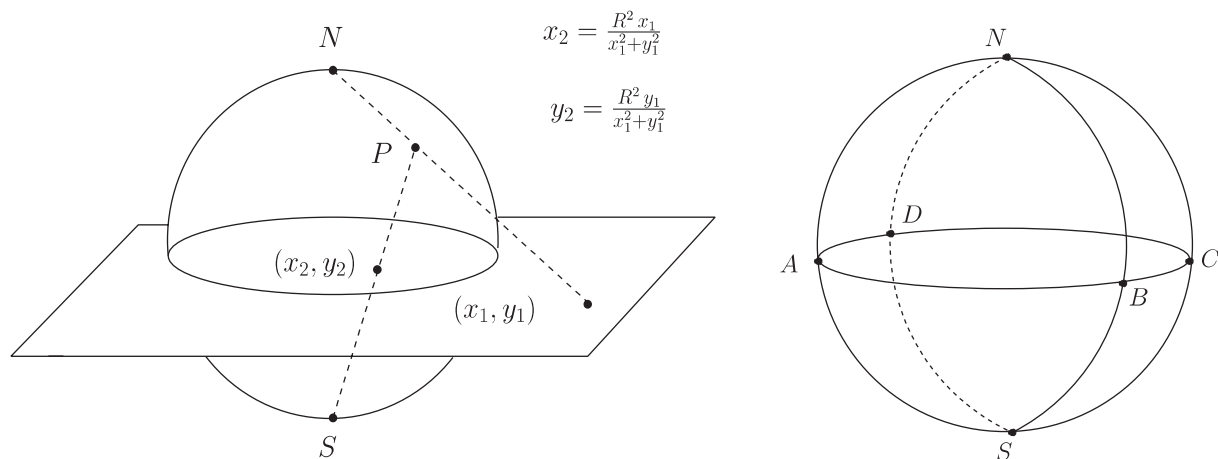


Figure 1: Coordinate charts and triangulation (with 8 triangles) of the sphere of radius  $R$ .

on the sphere corresponds to a unique point on the plane of the equator: take the straight line  $NP$  and look at the intersection with the plane (see Figure 1). In other words, the above rule allows us to wrap the equator plane around the sphere in such a way that it will cover all points of the sphere except for the north pole  $N$ . Similarly, we can do the same thing with the South Pole  $S$ . In other words, the sphere is made of banding and gluing two planes. Note that the two planes overlap on the sphere everywhere except for  $N$  and  $S$ . We can write what was just said in terms of coordinates. Namely the point  $P$  is obtained by gluing the points with coordinates  $(x_1, y_1)$  and  $(x_2, y_2)$ , which correspond respectively to the intersections of the lines  $NP$  and  $SP$  with the equator plane. The coordinates  $x_2$  and  $y_2$  can be expressed in terms of  $x_1$  and  $y_1$  (see Figure 1 for the answer). The precise formula is irrelevant for now. The main point is that the gluing consists of giving a mathematical formula to switch from the coordinates of one linear vector space into another one. The linear vector spaces are called coordinate charts, while the formulas to switch between the coordinates of the charts are called transition functions. The sphere can be constructed from 2 coordinate charts and 1 transition function.

### Can we comb a sphere?

It is very difficult to work with coordinates, because the formulas are usually quite cumbersome and the essential properties of the underlying manifold are hard to see. My favorite example is the problem of combing the sphere. Imagine that our sphere has hair, i.e., a piece of hair that comes out of each point on the sphere. Can we make all pieces of hair tangent to the surface of the sphere? The answer is no, and presumably we should be able to prove it using the coordinate charts and the transition functions, but there is a much more elegant approach.

The idea is to think of the tangent bundle of the sphere, i.e., all tangent planes of the sphere. Note that to specify a point on the sphere we need 2 coordinates and to specify a point on the corresponding tangent plane we need yet another 2 coordinates. We obtain a 4-dimensional manifold, so it is one of these things that we can't imagine. Nevertheless, we can clearly visualize an individual tangent plane. If we were able to comb the sphere then by moving the points of the sphere along the corresponding piece of hair we would obtain a surface inside the tangent bundle, which does not intersect the sphere itself. Now one can

Feature

prove that for every manifold  $X$  we can construct a deformation  $X'$  of  $X$  inside its tangent bundle, such that,  $X$  and  $X'$  have only isolated points of intersection. Moreover, the number of points of intersection is the Euler characteristic of  $X$ .

This fact would imply that the sphere has Euler characteristic 0.

The Euler characteristic of a manifold is a bit technical to define, but in the case of surfaces it amounts to triangulating the surface, i.e., choosing several points on the surface and connecting them with curves, so that if we cut the surface along the curves we would obtain (curved) triangles. The Euler characteristic is independent of the choice of a triangulation. It is defined by subtracting the number of curves from the number of points and triangles. For the triangulation depicted on Figure 1, since we have 6 vertices, 12 edges, and 8 triangles, the answer is  $6 - 12 + 8 = 2$ , which is the reason why we can't comb the sphere!

## Vector bundles and intersection numbers

As pointed out in the above example even if we know explicitly the coordinate charts and the transition functions of some manifold, usually it is very difficult to understand the main properties of the underlying manifold. One of the key ideas in geometry is to build vector bundles by installing a linear vector space, called a fiber, at each point on the manifold. For example, the cylinder and the Möbius strip are line bundles on the circle build by installing a line at each point on the circle (see Figure 2). While for the cylinder the line is installed in the same way, for the Möbius strip, as we move along the circle, the line is rotating clockwise (with respect to the plane of the circle) until it makes a full revolution as we return to the starting point. The vector bundle is also a manifold, but very special one since part of the linear structure of the charts is preserved under gluing. The basic algebraic

operations, such as addition and multiplication can be introduced as well, which makes it possible to study the geometry of the underlying manifold by the methods of algebra and to introduce numerical invariants.

Each vector bundle on a given manifold  $M$  gives rise to an intersection operation, which produces a new submanifold out of any given submanifold  $X$  of  $M$  as follows. Let us move the points of  $M$  along the fibers of the vector bundle in a continuous fashion, so that we obtain a submanifold  $Y$  of the vector bundle, such that,  $X$  and  $Y$  are transverse to each other. The result of the intersection operation is simply the intersection  $X \cap Y$  of  $X$  and  $Y$ . The transverse property, which will be explained below, is a sufficient condition for  $X \cap Y$  to be a submanifold of  $M$  contained in  $X$ . Starting with any given set of vector bundles, we can successively apply the intersection operations to  $M$ : the first intersection operation is applied to  $M$  and we obtain a submanifold  $X_1$  of  $M$ , the second intersection operation is applied to  $X_1$  and we obtain a submanifold  $X_2$  of  $X_1$ , etc. Each time the dimension is decreasing by the rank of the corresponding vector bundle, i.e., the dimension of the fiber. In particular, if the ranks of the vector bundles add up to the dimension of  $M$ , then the successive application of the intersection operations yields several isolated points. By counting the number of points we obtain numerical invariants, called intersection numbers.

The continuous deformations of a given submanifold are usually quite many. How to define intersection numbers independent of the choice of the deformations? First, we have to require that our manifolds and vector bundles are orientable. Otherwise, only the parity, i.e., even or odd, of the number of intersection points is well defined. Second, when executing an intersection operation, we are allowed to use only deformations, such that the corresponding intersection is transversal. The main idea behind introducing the notion of

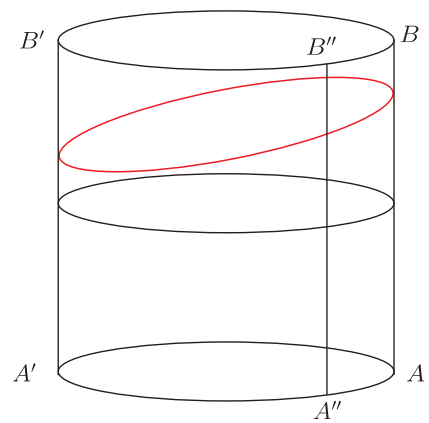
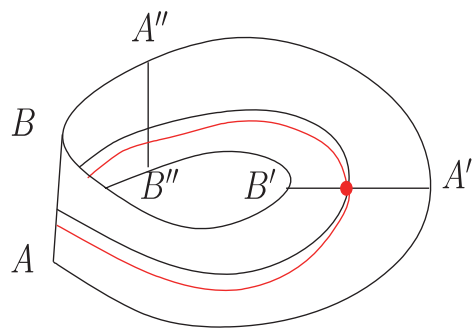


Figure 2: The Möbius strip and the Cylinder as vector bundles. The fibers are the lines  $AB$ ,  $A'B'$ ,  $A''B''$ , etc. The red curve is a small deformation of the circle along the fibers.

an orientable manifold is the following. If we have two coordinate systems in some linear vector space, then depending on whether we can or can't move continuously one into the other, we can split the set of all coordinate systems into two classes. For example, if we have two coordinate systems in the plane, then we can always move the first coordinate system in such a way that the origins and the 1st axes coincide, while for the 2nd axes there are two possibilities, they either have the same or the opposite directions. We say that the manifold is orientable if the coordinate systems in every two overlapping coordinate charts have the same orientation. Furthermore, two submanifolds of a given manifold intersect transversely if for every point in the intersection we can construct a coordinate system of the coordinate chart of the manifold at that point by using only coordinate axes from the two submanifolds. For example, if two circles in a plane are tangent to each other, then their intersection is not transverse, because the coordinate axes of the two circles at the tangent point have the same direction; so we can't construct from them a coordinate system of the plane. On the other hand, if the circles intersect at two points, then the tangent directions of the two circles at any of the two points of intersection are different; so we can construct a coordinate

system, i.e., the intersection is transverse. Finally, we can give the precise definition of an intersection number. If several orientable sub-manifolds intersect transversely in an isolated point, we can compare the orientations of the coordinate system of the manifold and the coordinate system obtained by adjoining the coordinate systems of the submanifolds. Note that the order in which we intersect the submanifolds is important, because this is the order in which we adjoin coordinate systems. If the orientations match then we assign to the intersection point  $+1$ , otherwise  $-1$ . The intersection number is defined by summing up the numbers associated with all intersection points.

For example, the Möbius strip is not orientable, so it makes sense to ask only about the parity of the intersection number. Moving the circle along the fibers of the Möbius strip (see Figure 2) gives a new circle. The number of points where the two circles intersect is always odd. On the other hand, the cylinder is orientable, so the intersection number is an integer. We can move the circle to a position (see Figure 2) where the two circles do not intersect, so the intersection number must be 0. In other words, the parity of the intersection number can be used to distinguish between the Möbius strip and the cylinder as vector bundles on the circle.

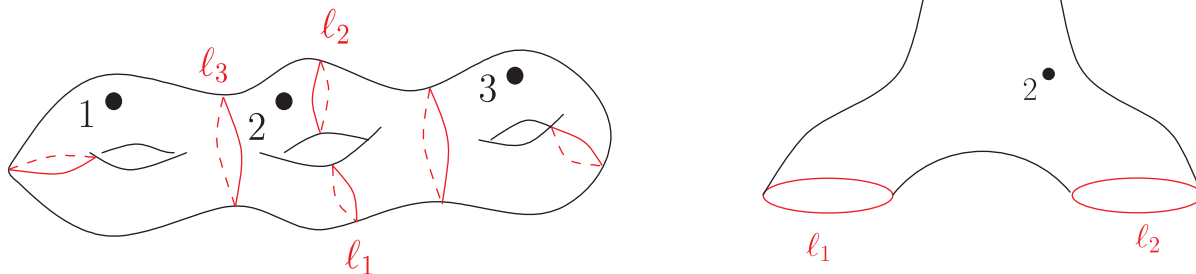


Figure 3: Genus 3 Riemann surface with 3 marked points. Cutting along the red loops gives a pairs of pants decomposition. Note that the number of loops is  $3g-3 = 6$ .

## The moduli space of Riemann surfaces

As a manifold every surface is uniquely determined from its Euler characteristic. The latter always has the form  $2-2g$ , where the number  $g$  is called the genus of the surface and it coincides with the number of holes. For example, the sphere has Euler characteristic 2 and genus 0, while for the donut the Euler characteristic is 0 (you can take a triangulation and make the same count as we did for the sphere) and genus 1. However, if we are interested in the shape of the surface, then it is important to have a measure for the distance between the points. Usually there is more than 1 way to measure distance and after fixing a measure the surface is called Riemann surface. The basic idea of the moduli space is to give a geometric structure to the entirety of the objects we are trying to classify. The geometry of a single Riemann surface is quite rich and non-trivial, so it is really remarkable that it makes sense to study the set of all Riemann surfaces by using their moduli space. What are the coordinates and what is the dimension of the moduli space of the Riemann surfaces? If you fix two different points on the Riemann surface, then there is a shortest path between them, called geodesic. For example for the sphere the geodesics are precisely the circles whose plane goes through the center of the sphere. The moduli spaces of

surfaces of genus  $g = 0$ , or 1 are much easier to describe. So let us concentrate on the case when  $g$  is at least 2. One possible approach is to cut the surface along simple closed geodesics in such a way that the surface will decompose into pairs of pants (see Figure 3). By remembering a reference point on each geodesic and measuring its length we can uniquely recover the surface and its metric provided we remember how to glue the different pieces. The moduli space is covered by charts that correspond to the various gluing schemes while the coordinates correspond to the length and the position of the reference point for each geodesic (so 2 parameters for each geodesic). It is not hard to see that the number of simple closed geodesics along which we have to cut the surface is  $3g-3$ , so the dimension of the moduli space is  $6g-6$ .

It is more convenient, however, to work with slightly more complicated spaces, namely we allow our surfaces to have punctures (also called marked points) and nodes. By forgetting the punctures we can recover the original moduli spaces, while the nodes are necessary in order for the intersection theory to work. Note that fixing a marked point on a surface requires 2 coordinates; so the dimension of the moduli space of genus- $g$  Riemann surfaces with  $n$  marked points is  $6g-6+2n$ . The moduli space has a natural set of vector bundles corresponding to the marked points. The fiber at a single point, i.e., a



Riemann surface with several marked points, is just the tangent plane of the Riemann surface at the marked point. Using intersection operations similar to the ones discussed earlier we can introduce many intersection numbers that reflect the geometry of the moduli space. What is surprising is that the same intersection numbers can be recovered from the system of differential equations known as the KdV hierarchy.

## The KdV integrable hierarchy

The KdV equation is the following partial differential equation  $u_t = uu_x + \varepsilon^2 u_{xxx}$ , where  $\varepsilon$  is a parameter whose value could be an arbitrary non-zero number and  $u = u(x, t)$  is a function in two variables. I am not going to attempt to describe the history of the KdV equation, but let me just say that it models the motion of a wave in shallow water:  $t$  plays the role of time and if we fix  $t$ , then the graph of the function  $u(x, t)$  with respect to  $x$  represents the shape of the wave. The most remarkable feature of the KdV equation is that it can be included into a larger system of equations by allowing additional time variables  $t_1 = t, t_2, t_3, \dots$ . The dependence of the function  $u = u(x, t_1, t_2, t_3, \dots)$  on each additional variable is given by an additional differential equation. We have an entire system of differential equations, which is called the KdV hierarchy. Note that we can't add arbitrary an additional time variable and a corresponding differential equation, because this would usually contradict the previous equations. Starting with the KdV equation there is a unique way to recursively extend the system to include as many time variables as we wish. Equations with such property, i.e., admitting a whole hierarchy of compatible differential equations are called integrable, while the corresponding hierarchy is called integrable hierarchy. Usually, it is very difficult to find integrable differential equations. The equations of the KdV hierarchy become more and

more complicated, but every solution depends only on the initial condition, i.e., the shape of the wave when all the time variables are 0. It turns out that if we choose as an initial condition  $u(x, 0) = x^3/6$ , then the Taylor's series expansion of the solution of the KdV hierarchy determines all intersection numbers on the moduli spaces of Riemann surfaces. The variable  $t_k$  corresponds to iterating  $k$  times the intersection operation with respect to the line bundles associated with the marked points, while the parameter  $\varepsilon$  keeps track of the genus of the Riemann surface.

## Conclusion

The relation between intersection numbers on the moduli space of Riemann surfaces and the KdV hierarchy was predicted by E. Witten and proved by M. Kontsevich. Nevertheless, it is still very mysterious why does the KdV equation, which we can observe in nature simply by watching the waves in a channel of shallow water, is so important for such a complicated space as the moduli space of Riemann surfaces. Furthermore, we can generalize the moduli space of Riemann surfaces by adding to a given surface the data of all possible ways to fit it (the mathematical word is to map it) in a given manifold. Depending on what manifold we choose we can obtain many other hierarchies of differential equations similar to the KdV hierarchy. These hierarchies are completely new and were never studied before. In fact, in the theory of integrable hierarchies, the construction of an integrable model is quite difficult, so it is very surprising that string theory leads to such a wide class of integrable hierarchies of differential equations. I think that investigating the role of integrability in the geometry of moduli spaces of Riemann surfaces is a very promising direction for the future development of Mathematics.

# Our Team

## Chiaki Hikage

Research Field: **Cosmology**

Kavli IPMU Assistant Professor

My research area is observational cosmology. I have used the observational data of cosmic microwave background and galaxy distribution to address fundamental questions of the universe such as How did the universe begin? What is the origin of the accelerated expansion in the universe? I have applied different statistics such as Minkowski Functionals, which probe morphology and topology, to the cosmological data to get new insight into structure formation in the universe. I am particularly interested in the SuMIRe project, galaxy imaging and redshift surveys using the Subaru 8-m telescope to



perform precision cosmology. The Kavli IPMU is a unique place in which researchers in mathematics, particle physics, and astronomy gather from around the world. I am very excited to work with many researchers in different backgrounds.

## Sho Saito

Research Field: **Mathematics**

Postdoc (Kavli Fellow)

I am studying algebraic K-theory, currently focusing on its applications to the geometry of formal loop spaces. A certain class of infinite dimensional vector bundles, called Tate vector bundles, plays a crucial role in this context. I showed in my Ph.D. thesis that there is a natural connection between Tate vector bundles and a certain kind of principal bundles, called torsors over the K-theory sheaf. To formulate and prove this connection I used the recently developed



theory of infinity topoi, which provides a higher categorical framework with a very wide and flexible geometric scope.

## Kohei Hayashi

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research interest is dark halo structures of dwarf galaxies in the Local Group. These galaxies are ideal sites for studying the fundamental properties of dark matter, because such satellites are the most dark-matter-dominated systems. In order to gain useful insight into dark halo structures on small-mass scales, I am studying the stellar dynamics of their member stars, mainly by using our constructed mass models. Using a number of the kinematical data



measured by Prime Focus Spectrograph attached to the Subaru Telescope, I hope to obtain stronger limits on dark halo structures and their dynamical evolutions.

## Akishi Ikeda

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interests are describing the spaces of Bridgeland stability conditions on the derived categories of Calabi-Yau algebras and to study the relationships between these spaces and Frobenius manifolds. In my recent work, I determined the spaces of stability conditions for two dimensional Calabi-Yau algebras associated with quivers by using the theory of root systems. And for higher dimensional Calabi-Yau algebras of type A, I made



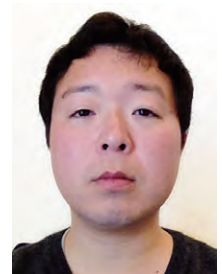
clear the relationship between the spaces of stability conditions and Frobenius manifolds.

## Tadashi Ishibe

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interests are in the study of the topology of the complement of the discriminant divisor of a semi-universal deformation of an isolated hypersurface singularity, of which homotopy groups are believed to have nice properties. For rational double points, the homotopy groups are fully understood. In other words, the fundamental group is an Artin group and the higher homotopy groups vanish. For the simply elliptic singularities,



very little is currently known. I attempt to understand the fundamental groups for these cases through a generalization of the theory of Artin groups.

Our Team

## David McGady

Research Field: **Theoretical Physics (String Theory)**

Postdoc

My current research is in two directions. I study the interplay between on-shell and off-shell formulations of observables in quantum field theories, in particular the massless  $S$ -matrix. Additionally, I am interested in novel symmetries present in exactly solvable limits of physically interesting theories. Specifically, I am working on both elucidating the fundamental cause of, and the consequences derived from, a recently discovered temperature-reflection symmetry in



large- $N$  gauge theories on compact four-dimensional manifolds—such as hidden modular invariance and vanishing Casimir energies.

## Yuki Moritani

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I am a new postdoc from Hiroshima University. I was a development member of optical and near-infrared astronomical instruments such as Subaru/FMOS, the Kyoto University 3.8m Telescope, and the Hiroshima 1.5m Kanata telescope/HONIR. Now I am in charge of the PFS project, mainly planning the commission of the instrument. My research interests also lie in high-energy binaries (X-ray binaries and gamma-ray binaries), which are comprised of a compact object and a star. By monitoring the optical



counterpart, the star, in these binaries, I probe the nature of the interactions and the relationship between the stellar activity and high-energy phenomena.

## Kyohei Mukaida

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My interests lie in the strong connection between particle physics and cosmology in the early universe. In particular, I have been focusing on its dynamical aspects from the viewpoint of quantum fields under extreme conditions. This is partly because the early universe was filled with very hot plasma as strongly suggested by the observations of CMB and the success of BBN. I try to refine understanding of various phenomena in the early universe, like



preheating/reheating, baryo/leptogenesis, dark matter production, and cosmological phase transition, which are closely tied with new physics.

## Maresuke Shiraishi

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

Higher spin fields have a great variety of impacts on our universe. For example, magnetic fields (spin 1) are deeply associated with structure formations of varied sizes, and gravitational waves (spin 2) generate distinctive signatures in CMB. A main goal of my research is to understand the origins of these cosmic spin dependencies, through phenomenological studies and parameter estimations based on observational data. My recent/ongoing activities are to find new observables for symmetry breakings



(non-Gaussianity, broken rotational invariance, parity violation) motivated by higher spin fields, to build these estimators, and to constrain these observables from new CMB temperature and polarization data in the ESA Planck collaboration.

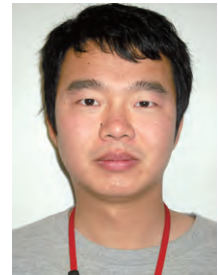
## Benda Xu

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

I set out to search for the particle side of dark matter, one of the most important open questions in modern physics.

My work is carried out with the world's largest single-phase scintillation liquid Xenon dark matter detector, named XMASS, located in Kamioka in Japan. If it exists, the dark matter signature from the detector will be extremely rare. At the heart of this experiment is the production of a supreme low radiation environment to a level not found anywhere



in nature.

I am also enthusiastic about free and open source software and hardware, together with their applications in physics experiments and the real world.

## Kiyoto Yabe

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research interests revolve around the formation and evolution of galaxies. I have tackled this topic from observational aspects. I am particularly interested in various properties of star-forming galaxies at redshift around 2, where star-formation in galaxies is in the most active phase. Near-infrared (NIR) spectroscopy is necessary to examine detailed properties of galaxies at this redshift. I have been involved with the FMOS project, which is a fiber multi-object spectrograph of the Subaru Telescope,



and NIR spectroscopic surveys by using FMOS. With this experience, now I am working on the PFS project, which is a new instrument of the Subaru Telescope and led by the Kavli IPMU.

Our Team



## Interview

# with Gerard 't Hooft

Interviewer: Shigeki Sugimoto

### Physics Had Been Primary Interest since Very Early Age

**Sugimoto:** Thank you very much for letting me have this opportunity to talk to you today. There are a lot of things that I wanted to ask you.

**'t Hooft:** Yes.

**Sugimoto:** First, I would like to ask you when and how you got interested in science.

**'t Hooft:** I think that I was somewhat exceptional. When I was still very young, maybe even at nursery school, I really knew that I was going to be interested in the world of nature. I had much more difficulty in understanding humans than nature. I also found adding and subtracting much easier

than learning to read and write. In Europe, in general, when you're 6 years old you learn how to read and write at least the basic stuff. Before that, I could not read or write but I could add and subtract, and I knew that I was interested in that.

**Sugimoto:** In mathematics?

**'t Hooft:** In mathematics and physics. Physics was running in my family to some extent. My uncle was a theoretical physicist. He was well known in his field. My grand uncle was Frits Zernike, who also had a Nobel Prize in physics. I was very much inspired by that and from an early age on I knew I was interested in physics.

**Sugimoto:** I see. When did you decide to be a physicist?

**'t Hooft:** Well, I don't know when I really decided to be a physical scientist but physics had been always my primary interest. Maybe 9, 10, or 11 years old. I knew that I was going to be a physicist.

**Sugimoto:** Then, you became a Ph.D. student of Veltman and soon after that you started to work on the renormalizability of Yang-Mills theories. Is that right?

*Gerard 't Hooft is Distinguished University Professor at Utrecht University (since July 2011). He shared the 1999 Nobel Prize in Physics with Martinus J. G. Veltman "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions." He has also received many other distinguished awards including the Dannie Heineman Prize in 1979, Wolf Prize in Physics in 1981, Lorentz Medal in 1986, Franklin Medal in 1995, Oskar Klein Medal in 1999, and Lomonosov Gold Medal in 2010. He received his Ph.D. from Utrecht University in 1972. In 1977, he became a full professor at Utrecht University.*

### Started to Work on the Renormalizability of Yang-Mills Theories

**'t Hooft:** Yes. Veltman was working on the problem of how to renormalize Yang-Mills theories and he had developed some very good, sound techniques which fascinated me. But he said, "This is very difficult" and "It may be better for you to work on something else." But my reaction was, "Well, I like the problem that you are working on very much. I want to understand more of that." From the beginning I said "I understand your difficulty, so I want to see what I can do about it."

**Sugimoto:** I heard that many people were skeptical about gauge theory at that time.

**'t Hooft:** At that time, yes. It is a bit difficult to say how the history developed because now people are very much tempted to say that there was such a thing as the electroweak theory and the only question was how to renormalize it. But that is not how they looked at their problems at that time. I mean the majority of physicists did not want to think in terms of field theory. They wanted

to replace it with something better, something where you don't have to renormalize away infinities. There were many electroweak theories. One approach was called the scattering matrix approach, another was called current algebra; there were all sorts of algebraic ideas about how to understand elementary particles, but field theory was not at all popular in those days.

**Sugimoto:** I see. What was the reason that Veltman and you believed in gauge theory?

**'t Hooft:** Veltman was very pragmatic. He understood there was a basic problem in understanding the weak interactions. He learned about the experimental observations. Experimentally, a lot was already known about the weak interactions and about other properties of particles and forces. Also, their symmetry structure was very well understood since Gell-Mann's group theory became a well-known topic. It was understood how important

*Shigeki Sugimoto is Professor at the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University. He is also Visiting Senior Scientist at the Kavli IPMU.*



group theory. Lie groups in particular, is for physics. That was clear but how to get the exact description of these particles was a big mystery. Now, Veltman even did not care pretty much about field theory although he liked the general formalism, but he just repeated what everybody else said that field theory is probably not going to be the answer. But in the meantime there was nothing better to do. He thought that field theory might not be the answer. But it was the thing I understood that I could do in principle, except we did not understand the details. We basically did not understand how to handle the renormalization effect of particles with the exception of the photon. The photon was understood; actually the best-understood particle.

**Sugimoto:** Right.

**'t Hooft:** That was a vector particle, so why was it so difficult to renormalize other vector particles? The problem was in the masses of these particles. Veltman understood that the weak interactions are caused by vector particles with mass, and he tried to understand how to make a unitary renormalizable theory for such particles. He had discovered many of the problems that were there. He had his own approaches to the problems using gauge invariance and he was intrigued very much by the Yang-Mills paper. He said this should be somehow the way

to do it.

**Sugimoto:** I see.

**'t Hooft:** He had all the ingredients but there was still no answer about how to renormalize this theory properly. At that time this was thought as just one possible approach to physics and it was not expected that this was going to be *the* way to understand all the forces in nature.

**Sugimoto:** Were there many people trying to prove the renormalizability at that time?

**'t Hooft:** No, there were not so many people who were studying renormalizability. There was Abdus Salam, there was Steven Weinberg, but they were asking more generic questions like "How in the world can these things hang together?" "How do we describe these forces?" "How can we understand what the next particle will be that is going to be discovered?" and so on. But, renormalization was not very fashionable.

**Sugimoto:** Did you think you would succeed when you started tackling this problem?

**'t Hooft:** Well, as long as I hadn't been able to answer the main questions I didn't know whether I would succeed or not, but I was very ambitious and I knew for sure I wanted to get the best answers I could find. So I thought "If this problem can be solved at all I will try to solve it."

**Sugimoto:** I see, so how did you feel when you

completed the proof of renormalizability?

**'t Hooft:** I first thought, "I will need to convince people that this is the way to do things," because there was a sentiment against renormalization. So I realized that people were going to criticize whatever I had done and Veltman had the same response as well. "Maybe you have something interesting here, but people will ask this and that. Do you have your answers ready?" I realized that people were going to ask quite a lot of questions which I could not answer. This is a very mathematical problem. Mathematicians are very accurate and I was somewhat sloppy in the way of phrasing things. He said, "This is where you have to be more precise. Otherwise nobody will believe you."

**Sugimoto:** Were you excited about this?

**'t Hooft:** Yes I was very excited because this was certainly the moment when I realized the importance of the Higgs mechanism. I didn't really call it that because I didn't know the papers by Higgs and Englert very well. I had heard that there were people thinking along these lines. So I accepted that I was not the first to write down these theories, but I did feel I was the first to understand how exactly the Higgs mechanism was solving the problem that Veltman had formulated.

**Sugimoto:** I see.

### Found the Way to Cancel All the Anomalies

**'t Hooft:** I realized, "Well, now I understand exactly how to do it and I have to fill in some details," but those were secondary details. The most important detail was the anomalies. It wasn't obvious that if you renormalize this diagram using this counter term, and that diagram using that counter term, if you combine the whole thing it will still be unitary; and indeed a counterexample was known. There were examples of theories where this would break down; that was the case when you have chiral symmetry; left and right particles are different.

**Sugimoto:** The chiral fermion.

**'t Hooft:** The chiral fermion has anomalies in it. Those anomalies would be disastrous. Now not every theory has such anomalies, at least not that we knew. But still there was this danger; maybe there are more such anomalies. While formulating the rules to renormalize the theory, we have to prove that everything hangs together without any anomalies because if they were there, we could understand that renormalization would destroy unitarity, which would imply that it would not really work.

**Sugimoto:** Right.

**'t Hooft:** I had some hopes that if there are anomalies, maybe you can find a way



to rephrase the theory such that it still is unitary, but that hope quickly evaporated. No, you have to cancel out all the anomalies but how restrictive *is* that? Will there be *any* theory where all the anomalies cancel out? This was not known.

**Sugimoto:** I see. At that time, the anomaly cancellation of the standard model was not known?

**'t Hooft:** No. Well, it was known that fermionic anomalies may be made to cancel. This was not certain, but I thought maybe the pure gauge part itself also has anomalies which we do not know how to cancel. It had to be proven that they cancel. The point is that the number of counter terms that can be used was not as large as the number of free parameters one has to renormalize. So, I realized there could be a clash, so that even though the theory looked renormalizable, things could go wrong if you try to work out all the details of all the diagrams; you will find that they are contradicting each other and then the theory will not be unitary. So this was still something that had to be proven. What was missing was a good way to regularize the theory and that was where basically I had the idea of varying the number of dimensions.

I first tried five dimensions, six dimensions, seven dimensions, and used these dimensions as regulators.

In itself that nearly worked but it just didn't and then I discovered the correct answer or a much better answer by taking four plus or minus epsilon dimensions and letting epsilon tend to zero. That was the correct answer. It was amazingly so because you can ask "What does it mean, four plus or minus epsilon dimensions?" Physically it makes no sense, and mathematically it makes no sense. But I noticed where epsilon comes in the expressions it is just a number in a diagram which you can tune any way you like. You can choose a complex number if you want, and you can choose to let it go to zero. **Sugimoto:** How long did it take for you to prove this renormalizability?

**'t Hooft:** One of the questions is, how long did it take to convince myself? That was fairly quick, a year or so. Certainly after dimensional renormalization was introduced, I realized this is the answer and I don't need any further proof but that is not exactly the same thing as a mathematical proof. *To prove that it works correctly to all orders:* that was the main thing really. The way we phrase the problem is: prove that all final diagrams up to any number of loops can be renormalized using dimensional renormalization. That required some extra work but it was quickly sorted out that this indeed was the best way to do it.

### Story of the Beta Function of Yang-Mills Theory

**Sugimoto:** I heard that you also knew that the beta function of Yang-Mills theory is negative before the work of Gross, Wilczek, and Politzer.

**'t Hooft:** Yes, that is a somewhat strange story. Of course I was approaching the problem from the physical point of view. As a physicist, I wanted to understand how these fields work in practice. And then, it's very important to know how this system works at very short distances and how it works at very large distances. Very early, well before the dimensional renormalization and such, I asked myself what happens in the short-distance limit.

**Sugimoto:** Before dimensional renormalization?

**'t Hooft:** Yes, because if the short-distance limit theory is sufficiently convergent, then all I need to do is to establish things at one or at most two loop levels. Everything else will become unimportant because if the theory is totally free that's all you need to know. So I did the calculation, I scaled, I had the final diagrams, and I could see how they scaled. I thought, "Well this is just fine." It has the right sign to be what are now called asymptotically free. I could clearly see that the sign implied what is now known as asymptotic freedom. So I couldn't understand why many people had such problems with it. There was an argument about Bjorken

scaling, but I never quite understood what Bjorken meant when he talked about scaling. People said, "Bjorken scaling proves that field theories don't work." I could not understand why they said that because I thought, "Well when I scale the theory, it just works fine. I don't understand your problem." But what I did not realize is that nobody had yet calculated that beta function.

**Sugimoto:** Why didn't you publish this?

**'t Hooft:** First of all, I thought there was a more urgent problem. The urgent problem was to understand why quarks are confined because this would be a theory for the strong interactions. The real problem of the strong interactions was the quarks. Why did they not come out as free particles? I thought we now had one half of the answer to this question, but the other half is what happens in the infinite distance region and that was much more difficult, of course. I think Veltman put me a little bit on the wrong track here in that he said, "Well as long as you don't understand why these quarks don't come out, you have nothing — it is not even worth publishing." That was a mistake. Of course, I should have. Yes, I believed in the theory but I hadn't understood that I was the only one who had calculated beta function correctly, and understood that it is negative and so the pure gauge theory

would serve very, very well as a candidate for the strong interactions. Now we all know how this leads to the confinement of quarks, but that was just a big conjecture in those days.

**Sugimoto:** I see. Was it easy for you to accept QCD despite the fact that quarks and gluons were not discovered?

**'t Hooft:** Oh, yes because I thought there's absolutely no reason for these quarks to come out as free particles because they have color and all physical states must be invariant under color. You can turn the question around. Why should there be free quarks? The answer is they are not there. I thought basically I understand that the theory doesn't have to have free quarks. But, the question is then what keeps those quarks together? How do you understand that such a theory will be unitary if you don't understand the physical states, the asymptotic states of the theory? That was basically answered by several pieces of insight. One was the fact that there are vortices and that the mechanism that keeps them stable was a dual opposite of monopole confinement, called the Meissner effect in superconductors. It's the dual Meissner effect, and the realization came slowly that you can understand everything with that.

The other thing was jet physics: that the asymptotic states are not free quarks but jets. Jets consist of hadronic

particles, but they behave as a single quark coming out with high energy. Those quarks will then manifest themselves as jets and the gluons also as jets. So you have quark jets and gluon jets. And that was how unitarity could be understood to be restored; but those items were quite complex. They need not just hand waving but some more rigorous mathematical treatment.

**Sugimoto:** Do you think confinement in QCD is understood well enough these days?

#### Confinement in QCD: Acceptable as a Physicist, But Unsatisfactory as a Mathematician

**'t Hooft:** I think the combination of these items to me as a physicist is quite acceptable and it explains everything. But as a mathematician, I would say, "Well the situation is not as good as it should be." QCD is not at the same level of accuracy as quantum electrodynamics and the confinement problem is part of that. It's now called the mass gap problem. That is, "Does a pure gauge theory, QCD, generate a mass gap?" The question immediately associated with that is, "Can we compute the mass gap?" "Can we understand what the lightest particles are in QCD?" The answer is that pions are basically the lightest particles of QCD, but can we prove this with mathematical accuracy

and can we mathematically even define what a mass gap is? The question is if you know how to define the theory and know how to define the question, can we prove this property of the theory?

The strange thing is that the best procedure we have today is that we prove it numerically. We simulate this theory on a big computer by putting the thing on a lattice. We take the lattice as fine mazed as possible and then we see that the theory behaves exactly as all physicists expect. So there is no problem. They say "We can prove everything in mathematics; the first 10 decimal places obey this theorem, so indeed all numbers obey this theorem." That doesn't go with mathematics. Mathematicians will not accept this as a proof. Of course not. They shouldn't. It's still a problem in physics, but I think it's an academic problem. We don't need that problem to be solved to understand how QCD works, but we do understand that it needs to be solved from a mathematical point of view. The importance of a mathematical proof may well be that if you have proved this mathematically you also might find new alleys to do faster and more precise calculations. It won't be a waste of time to prove mathematically that the mass gap exists because then you can actually make accurate computations for everything.

**Sugimoto:** Do you think it will be proven someday?

**'t Hooft:** I think it will be. I think what we need is some monk on an uninhabited island who sits in a monastery with his books and his computers and his laptop and his internet and he just works out the proof. There are hundreds of epsilons and deltas that you have to put in the right position and then I think you can prove it. I do believe that this is a property of our physical theory. We all believe it's true and therefore we all believe it can be proven, but it's going to be a very tough and very unrewarding work because after 20 years the monk would come out of his monastery and he says, "Look I have proven QCD to exist," and all physicists will stare at him and say "What's your problem? Why have you been doing all this work? We knew that QCD is a fine theory." So he will not be rewarded. Probably he might not get the Nobel Prize for it even though it's a very important mathematical question.

#### 1/N Expansion and String Theory

**Sugimoto:** I see. Another thing that I wanted to ask you is about 1/N expansion. How did you come to the idea of expanding amplitudes with respect to 1/N?

**'t Hooft:** At that time I was at CERN as a fellow and all these marvelous new ideas came along, and one question

was exactly the question which I mentioned, “How to have good approximation techniques for QCD?” Is there a small parameter in QCD? Is there a parameter you can tune even if physically it might not be so small such that, if you tune it to be very small, calculations can be done accurately? If the parameter will be larger, the theory is slightly less accurate but certainly you have a systematic expansion. Of all parameters, of course,  $1/N$  came along as a parameter and I asked myself now, “In what way does the large- $N$  theory distinguish itself from arbitrary  $N$  theories? What does the limit  $N$  to infinity look like?” I knew that a certain simplification took place in the diagrams. I wanted to understand “What kind of simplification is that?” I found the answer to that. Unfortunately, the answer was that even in the  $N$  to infinity limit, the final diagrams can still be so complex that you cannot compute them exactly. We cannot do the large  $N$  expansion explicitly. The power expansion in that expansion constant generates all the planar diagrams. They are too complicated to solve. I searched very hard to see if there is any way to get some sort of internal equation to solve the large  $N$  diagrams for QCD, but that, up to this day, didn’t work.

Of course, the question was extremely interesting because only the planar diagrams



survived and they looked very much like the world sheet diagrams of a string theory. By that time we understood that there will be vortices that connect the quarks together. So this will be a perfect way to understand where these vortices come from, in principle.

**Sugimoto:** So, this  $1/N$  expansion resembles the perturbative expansion of string theory.

**'t Hooft:** Yes.

**Sugimoto:** Did you think that it can be used to formulate string theory?

**'t Hooft:** That was certainly our hope, yes. I was hoping that this would also vindicate string theory. It would tell you why all the dual resonance models were so successful for the strong interactions. I wanted, in fact, string theory to solve my problem, which is, I want to understand the

$N$  to infinity limit of QCD. Maybe that’s a theory that can be written down in a closed form. The point is that the  $1/N$  to zero limit, or the  $N$  to infinity limit, is a limit where the mesons and the baryons do not interact. It is a free theory and for that reason, you might suspect it is exactly solvable. Free theory is basically trivial. All you need to know is the mass spectrum. I thought string theory should help me do this. Maybe the  $1/N$  expansion is equivalent to a string theory. I hoped to see that happen. But though I tried many times, I couldn’t identify any string theory that coincides with the  $1/N$  limit of QCD.

**Sugimoto:** Do you think string theory is a promising candidate for quantum gravity or…?

**'t Hooft:** Personally I think that it is a very good and

interesting mathematical approach to quantum gravity, but not sufficient. I think physically there’s got to be more. You have to make a distinction between the physical question and the mathematical question. Mathematically, string theory is a very interesting mathematical construction. It should be taken very seriously in trying to understand quantum gravity, but physically I think the ultimate underlying equations are not string theory. But I am in a minority here.

**Sugimoto:** You are the one who first proposed the idea of holography out of the consideration of black hole entropy. Later Maldacena and others refined this idea in the context of string theory. How do you think about this development?

## How to Understand Physical Degree of Freedom of Quantum Gravity at Planck Scale

**'t Hooft:** They really took off in a direction which was never my intention. They are using duality which is not quite the same as holography. I find dualities interesting but they are not going to be an answer to our physical questions. They are going to be helpful. They are going to relate one problem to another problem. Holography is being used in the sense that certain different theories are equivalent. But that really never was my problem. The problem is how to understand the physical degrees of freedom of quantum gravity, and, in particular, at the Planck Scale. I am convinced that at the Planck Scale we only have bits and bytes of information. We don't have a continuum anymore in which things live. String theory is still suggesting that you have to think in terms of real numbers and continua, and I have reached a stage now that I don't believe anymore that the real numbers are going to be the fundamental variables of all the ultimate theory. I think the ultimate theory would just be based on bits and bytes basically. But to understand how it works is now the big problem. We don't understand that.

Now holography tells you that the number of degrees of freedom is actually even less than what fits in the bulk.

It basically corresponds to what fits on the surface. Now the physical implementation, I think, is different from what you usually hear when people talk about string theory and holography and AdS/CFT and so on. I think the physical reason is in the fundamental origin of quantum mechanics itself; holography tells you that the degrees of freedom fit on a surface and not in a volume in a bulk of space-time. There must be a good reason for this. The reason I can find is called information loss. The point is that all information about a certain physical object in a volume of space is already to be found on its surface. You can think of taking a region of space and time. The region is bounded by a surface. If you look at all physical phenomena on that surface, you can actually reconstruct what happens inside. If you think a little bit you find that is not as strange as it sounds, because the gravitational field obeys Gauss's law, which really means that if you know the gravitational field on a surface, then you know exactly the amount of energy which is encapsulated by the surface. If you know the amount of energy, you have the Hamiltonian. In other words, strictly speaking Gauss's theorem for gravity will tell you that if you know the gravitational field accurately on the surface, whatever that surface is, you have got the Hamiltonian of

the entire system, in principle. That means the inside is also understood.

That is of course a very strange situation, and that tells you quantum gravity is going to be a very crazy theory, unless you do it my way. My way is that you have to re-evaluate our understanding of quantum mechanics itself. And, if you replace quantum mechanics by a deterministic theory, then I can understand the holographic principle much better. Then, it tells me that actually the underlying quantum theory is not keeping all the inside information intact. Information dissipates away. Imagine a surface, and the information that has dissipated away through the surface. Then if you know the data on the surface, you have all the information you need to be able to predict how the inside of the thing will evolve in time. That's counterintuitive, but I have all sorts of ideas now about how this can come about in the ultimate theory of quantum mechanics.

## The Best Theory Is a Theory That Explains Experimental Observations

**Sugimoto:** You have done so many ingenious works. Which one of your works do you like the best?

**'t Hooft:** Well, I think I am still very proud of what happened in the first few years of my career that I had the idea of renormalization of

gauge theories, of dimensional renormalization, and the role played by the Higgs mechanism in renormalization. The magnetic monopole was a very fortunate moment, and so was the  $1/N$  expansion, but also there are some very nice ideas about instantons and their role in explicit symmetry breaking of a theory. The standard model doesn't conserve baryon number even though it looks – if you look at Lagrangian – that baryon number must be conserved; but when you take the instanton effects into account, baryon number is not conserved. That's a very deep and beautiful observation that we made. Those are essential things, and so I think they are the best.

But also, in a different way, I am proud of what I did later on in gravity and quantum mechanics, although there are many that have to be proven. I would love to talk about gravity and quantum mechanics with anybody but I didn't have such great ideas there that solve the problem. I still see quantum gravity as a big problem that we don't understand. I want to make fundamental progress there. Of course, we have to realize physics is an experimental science in the very end. The best theory you can think of is a theory that proves or explains something that is being observed experimentally. What I would love to see is an explanation as to why physical constants

have the values they have, why the proton electron mass ratio has the value it has, or anything of that sort, to understand where constants of nature come from. That hasn't happened yet. That's why I think that there is much more work to be done.

### Advice to Young People Who Want to Be Scientists

**Sugimoto:** I see. Could you give some advice to young people who want to be scientists?

**'t Hooft:** Science is still extremely interesting as an activity. When you are a scientist you will discover things, but usually you discover very small things. If you are hitting something big that's of course even a nicer experience. But you should realize that when you do some research on some topic, you want to know how that research relates to the ultimate questions that we are really interested in, like solving quantum gravity, finding the theory of everything, understanding this and that. We won't answer those questions overnight and the young students we see today may not find answers to such questions overnight. But they might contribute some further steps towards finding answers. You can only contribute if you understand what those big questions are. I think you should work on the big questions and if you are lucky and you are not afraid

of asking difficult questions, then maybe you will find some interesting answers.

You have to be extremely critical. That's the other advice. In particular you have to be critical about your own results. You shouldn't be happy with what you have found or what you have understood so far. You should always ask more detailed questions, "Did I understand this?" "Did I understand that?" and "Why shouldn't the answer be formulated in a different way?" If you ask very critical questions to yourself, maybe you will find some new interesting answers.

**Sugimoto:** Okay, it's about time. I really enjoyed talking with you.

**'t Hooft:** Thank you.

**Sugimoto:** Thank you very much.

# International Workshop on Condensed Matter Physics and AdS/CFT

René Meyer

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

In 1997, a new duality between quantum field theories and gravity called the “gauge/string duality” (AdS/CFT correspondence) originated from string theory. It was quickly realized that this duality captures apparently universal features of certain strongly coupled systems. While first successfully applied to QCD, recent research started to apply this duality to strongly coupled and correlated states of condensed matter such as e.g. the electronic states present in high temperature superconductors. Conversely, real-world systems might be used to model gravity and in particular black holes, an approach dubbed “analogue gravity”. These results have been very promising and keep attracting the interest of string theorists, condensed matter physicists and the gravitational community. The goal of this joint workshop with the Institute for Solid State Physics (ISSP), the University of Tokyo held at the Kavli IPMU on May 25-29, 2015, organized by René Meyer (Kavli IPMU), Shin Nakamura (Chuo U./ISSP), Hiroshi Ooguri (Caltech/Kavli IPMU), Masaki Oshikawa (ISSP), Masahito Yamazaki (Kavli IPMU), and Hongbao Zhang (VUB Brussels), was to bring together key members from these three communities to foster exchange in this direction and ignite further collaboration.

The program of the workshop consisted of 20 hour-long talks by internationally recognized experts, who gave excellent overviews over their respective topics and at the same time presented cutting-edge research. In total 122 participants (80 from Japan) attended the workshop. 33 researchers from Japan and abroad used the opportunity to present their work in the gong show and poster presentation. The workshop focused on three topics: (1) AdS/CFT, non-Fermi liquid phenomenology and high temperature superconductivity, (2) non-equilibrium physics and AdS/CFT, and (3) topological states of matter and entanglement entropy. Concerning (1), the discussion largely revolved around the question of which aspects of the physics of high temperature superconductors are relevant for AdS/CFT, and what gravity theories can describe them. A very

interesting insight of (2) was that black holes in AdS/CFT share many features of non-equilibrium dynamics known from condensed matter systems. Finally, as regarding (3), entanglement entropy was discussed both as a tool to characterize topological states of matter and gauge theories, and as a way to better understand gauge/gravity duality in general.

This workshop was one of the key meetings in the field in this year. It was unique in bringing together condensed matter physicists and string theorists nearly in a half-half ratio, as well as gravitational theorists, which made it very successful. This workshop was financially supported by the Kavli IPMU, ISSP, and the EU ESF HoloGrav network. We are grateful to the administrative staff of the Kavli IPMU and ISSP for their hard work, as well as to the volunteers from ISSP for their help.

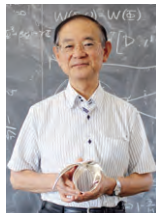


# News

## PI Ken'ichi Nomoto Received the Marcel Grossmann Award

Kavli IPMU Principal Investigator Ken'ichi Nomoto's work "for heralding the role of binary systems in the evolution of massive stars" has earned him a Marcel Grossmann Award. The Awards were established in

1985 to honor the contribution mathematician Grossmann made to Einstein's construction of general relativity. Grossman had helped Einstein overcome mathematical difficulties in Riemannian geometry. The two had been classmates at the ETH Zurich and had continued their friendship. The Grossmann Awards are presented at the Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theory, held every three years, to recipients who are recognized for their outstanding achievements in the fields covered in this Meeting. This year's Meeting was held at University of Rome "La Sapienza" in Rome. The award ceremony was held on July 13.



Ken'ichi Nomoto holding a silver casting of sculpture "Traction of Events in Space-Time," presented to each recipient.

## Nobel Laureate Gerard 't Hooft Visited Kavli IPMU

Utrecht University Distinguished University Professor Gerard 't Hooft visited the Kavli IPMU, and gave a colloquium talk entitled "The Large Hadron Collider and New Avenues in Elementary Particle Physics" on April 16. 't Hooft was awarded the 1999 Nobel Prize in Physics for elucidating the quantum structure of electroweak interactions. In his talk, he reviewed milestones in the development of the Standard Model of elementary particles in reference to the discovery of the Higgs boson at CERN's Large Hadron Collider (LHC), and then explained what we could expect in the future with the LHC, which has restarted experiments using higher energy and luminosity, for elucidating remaining mysteries in particle physics. For example, discoveries of new particles would lead to new physics.

In this issue of the Kavli IPMU News, Shigeki Sugimoto, Professor at the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, interviews Professor Gerard 't Hooft, see pp. 14 - 21.



Gerard 't Hooft giving a talk.

## Screening of a Documentary Film *Particle Fever*

A hundred people crowded into the Kavli IPMU's hall to watch a special screening of *Particle Fever* on April 5. This documentary film, distributed by ro\*co films international, follows the

lives of six physicists over the course of five years as they search for the Higgs particle at CERN. Interwoven with this story, the film illuminates how science and art are similar. It does this by emphasizing how they motivate us by driving curiosity, and they make us strive for what we don't have yet. In short, they make us human.

Kavli IPMU Professor and University of California Berkeley Professor Yasunori Nomura helped produce the Japanese subtitles for this special Kavli IPMU version, with permission from the movie company.

After the screening, participants were able to meet and hear behind the scenes stories from Johns Hopkins University Professor David Kaplan, who starred in and produced the film. While Professor Nomura served as interpreter, he kept the audience engaged with his wit and very liberal interpretations added with his own opinion.



Yasunori Nomura (left) and David Kaplan (right).



After screening, participants surround Yasunori Nomura and David Kaplan.

## Deciphering the Universe: Joint Public Event with ICRR

On April 18, 400 people squeezed into a hall at the Amuser Kashiwa,

near the JR Kashiwa station, to take part in the 12th joint public lecture event by two University of Tokyo institutes, the Kavli IPMU and the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR).

ICRR Associate Professor Shinji Miyoki gave the first talk on “The Last Homework from Einstein—Catch Gravitational Waves!” He explained the importance of the gravitational wave research and introduced the audience to experiments designed to find their direct evidence. Then, Kavli IPMU Professor and University of California Berkeley Professor Yasunori Nomura talked on “The Multiverse Cosmology—The Origin, Fate, and Outside of the Universe Predicted by the Latest Physics Theory.” He enthusiastically explained what the multiverse theory is about, a theory that postulates the existence of many universes, and touched on its philosophical aspect. He also touched on the possibility of universes under different laws of physics.



Yasunori Nomura giving a talk.

### Kavli IPMU Hosts Interaction Collaboration Meeting at Kamioka

On April 20–21, seventeen press officers from CERN, Fermilab, and eight other world-renowned particle physics research institutes traveled to the Kavli IPMU’s Kamioka Branch Office for the Interaction Collaboration Meeting. Joined by four guest press officers from three institutes including RIKEN and the ICRR, participants shared their recent

experiences, and there were updates on each institute’s activities. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama gave a talk about research at the Kavli IPMU, and a Kavli IPMU press officer gave an update on the institute’s outreach activities. The meeting ended with a tour of the Super-Kamiokande, EGADS, XMASS, KamLAND, and KAGRA guided by Kavli IPMU and ICRR researchers.



Meeting at the Kavli IPMU’s Kamioka Branch Office.



Participants visiting EGADS during the guided tour.

### Kavli IPMU Social Group Art Project Takes Over Piazza Fujiwara

From May 12 to June 9, the Kavli IPMU Arts Society hosted the 5th *Science and Everyday Life* project in the Piazza Fujiwara. In this project, all Kavli IPMU researchers and staff are invited to contribute pictures corresponding to a given theme. This time, 27 pieces were put on display corresponding to the theme “order,” including travel photos, photos of geodesic models, original composition of images, diagrams excerpted from published papers, formulae, and texts.

During the free drink (contributed by Director Murayama and Administrative Director Haruyama) get together on May 29, people enjoyed a night chatting and looking

at displayed pieces.



Kavli IPMU researchers and staff chatting in the Piazza Fujiwara.



Enjoying displayed pieces.

### Journalist in Residence in Mathematics Program at the Kavli IPMU

On May 14–16, the Kavli IPMU welcomed Sankei Shimbun reporter Takeshi Maeda as part of a Journalist in Residence (JIR) program coordinated by Professor Koji Fujiwara at the Department of Mathematics, Kyoto University, with the cooperation of the Mathematical Society of Japan.

The program has been running since 2010, and is designed to give journalists the opportunity to experience a mathematics department or institute, and interview working mathematicians. To date, more than 30 people, mainly journalists, but also including TV directors, artists, and a lawyer, have taken part in the program.

For Maeda, it was an eye-opening opportunity to get to know the mathematics community through hearings, teatime, and seminars. “Being here was like riding a



rollercoaster. I hope to use the things I've learned and spread the word to a wider audience," he said.

On June 29, US freelance journalist George Musser visited the institute on the same program. While he could only stay a day, the people here had a profound impact on him. "Talking to Kavli IPMU researchers was amazing, really mind-blowing," he said.

The Kavli IPMU hopes to continue to welcome these journalists into our institute.

### Science Café Universe 2015 Begins

On June 21, the Kavli IPMU teamed up with the Tamarokuto Science Center in Nishitokyo City to host the first of a three-part Science Café Universe 2015 running from June to July. Altogether, three researchers from different fields talk their stories about using physics and mathematics to solve the mysteries of the universe. The Science Café Universe series has been held every year since 2009, making this the seventh in its series.

On this day, more than 40 participants, mostly junior high and high school students, listened to Kavli IPMU Professor Yoichiro Suzuki, who talked in detail about what dark matter is, and how he and his colleague are trying to uncover its identity. The participants enjoyed his talk in a relaxed atmosphere with tea and cookies.



Yoichiro Suzuki giving a talk.

### Kavli IPMU Seminars

1. "Exploring the Higgs sector of Georgi-Machacek model at colliders"  
Speaker: Cheng-wei Chiang (NCU)  
Date: Apr 01, 2015
2. "The Multiverse—Emerging New View of Fundamental Physics"  
Speaker: Yasunori Nomura (UC Berkeley / Kavli IPMU)  
Date: Apr 01, 2015
3. "Oceans Of Data And Rosetta Stones: Understanding How The First Galaxies Formed"  
Speaker: Peter Capak (Caltech)  
Date: Apr 02, 2015
4. "Next obstacles in precision neutrino oscillations: neutrino-nucleus cross-sections"  
Speaker: Federico Sanchez (IFAE Barcelona)  
Date: Apr 03, 2015
5. "Lense-Thirring precession in strong gravitational fields"  
Speaker: Chandrachur Chakraborty (Saha Inst. of Nucl. Phys.)  
Date: Apr 03, 2015
6. "The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) Survey"  
Speaker: Stephen Bailey (LBNL)  
Date: Apr 07, 2015
7. "Modelling and reconstruction of the cosmological large-scale structure from galaxy redshift surveys"  
Speaker: Francisco-Shu Kitaura (AIP)  
Date: Apr 07, 2015
8. "Detecting Ultra-light Dark Matter with Precision Metrology"  
Speaker: Surjeet Rajendran (UC Berkeley)  
Date: Apr 08, 2015
9. "Lessons for Gravity from Entanglement"  
Speaker: Arpan Bhattacharya (IIS, Bangalore)  
Date: Apr 09, 2015
10. "A Higgs or the Higgs? A Detailed look at the Anomalous Higgs Couplings"  
Speaker: Banerjee Shankha (Harish-Chandra Research Inst)  
Date: Apr 15, 2015
11. "Gravitational Lensing with KiDS"  
Speaker: Konrad Kuijken (Leiden U)  
Date: Apr 16, 2015
12. "The Large Hadron Collider and New Avenues in Elementary Particle Physics"  
Speaker: Gerard 't Hooft (U Utrecht)  
Date: Apr 16, 2015
13. "Probing Physics behind Neutrino Masses"  
Speaker: Kaladi Babu (Oklahoma State U)  
Date: Apr 17, 2015
14. "Painleve equations and weight system"  
Speaker: Hayato Chiba (Kyushu U)  
Date: Apr 20, 2015
15. "Local Lyman alpha emitters: last results from the LARS project"  
Speaker: Daniel Kunth (IAP)  
Date: Apr 20, 2015
16. "Probing the relationship between Galaxies and Dark Matter with Lensing and Clustering in CFHTLenS/VIPERS"  
Speaker: Jean Coupon  
Date: Apr 21, 2015
17. "Analytic Bootstrap: Universality at large spin and large twist"  
Speaker: Kallol Sen (IIS Bangalore)  
Date: Apr 21, 2015
18. "The progenitors and environments of hydrogen-poor core-collapse supernovae"  
Speaker: Hanindyo Kuncarayakti (U Chile)  
Date: Apr 22, 2015
19. "Measuring Cosmic Shear with the Dark Energy Survey"  
Speaker: Matthew Becker (Stanford/KIPAC)

- Date: Apr 23, 2015
20. "Flat structure on isomonodormic deformations"  
Speaker: Tomoyuki Mano (Ryuukyuu U)  
Date: Apr 24, 2015
21. "The credibility of SUSY phenomenology: some silver linings"  
Speaker: Biswarup Mukhopadhyaya (Harish-Chandra Research Inst)  
Date: Apr 24, 2015
22. "The NeverEnding story of Cosmic Microwave Background and Large Scale Structure correlations"  
Speaker: Alessandro Manzotti (U Chicago)  
Date: Apr 24, 2015
23. "Torsion in the codimension-two Chow group of some toric varieties"  
Speaker: Wanshun Wong (U Ottawa)  
Date: Apr 28, 2015
24. "Latest results from the Planck satellite and implications for star formation properties"  
Speaker: Daisy Mak (KICC)  
Date: Apr 30, 2015
25. "The new results from Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)"  
Speaker: Sadakazu Haino (Academia Sinica)  
Date: May 07, 2015
26. "Surprises in gauge theories: temperature-reflection symmetry, hidden"  
Speaker: David McGady (Kavli IPMU)  
Date: May 12, 2015
27. "Beyond Thermodynamics: the Physics of Matter, Life, and Intelligence"  
Speaker: Piet Hut (IAS/ELSI)  
Date: May 12, 2015
28. "2HDM scalar potential and the role of symmetries"  
Speaker: Gautam Bhattacharyya (Saha Inst. of Nucl. Phys., Kolkata)  
Date: May 13, 2015
29. "The early evolution of the Milky Way's satellite system in CDM cosmology"  
Speaker: Gerhard Hensler (U Vienna/ NAOJ)  
Date: May 14, 2015
30. "Cohomological Fourier-Mukai transforms of abelian varieties"  
Speaker: Dulip Piyaratne (Kavli IPMU)  
Date: May 14, 2015
31. "Combining imaging and spectroscopy to reveal the hidden universe"  
Speaker: Jeffrey Newman (U Pittsburgh)  
Date: May 19, 2015
32. "Recent topics in rigorous proof of quark confinement"  
Speaker: Keiichi Ito (Rikkyo U)  
Date: May 20, 2015
33. "Towards understanding UV aspects of gravity"  
Speaker: Anupam Mazumdar (Lancaster U)  
Date: May 20, 2015
34. "Some explorations of a holographic Kondo model: quantum quench and entanglement entropy"  
Speaker: Jackson Wu (NCTS Hsinchu)  
Date: May 21, 2015
35. "Prospects of galaxy cluster studies with ASTRO-H"  
Speaker: Tetsu Kitayama (Toho U)  
Date: May 21, 2015
36. "How Bayesian Statistics Are Different And Better"  
Speaker: Ed Turner (Princeton U)  
Date: May 26, 2015
37. "MaNGA: how to run a successful survey (and not die trying)"  
Speaker: Jose Sanchez-Gallego (U Kentucky)  
Date: May 26, 2015
38. "Higgs physics as a probe of electroweak baryogenesis"  
Speaker: Eibun Senaha (NCU)  
Date: May 27, 2015
39. "Antineutrino Results from T2K"  
Speaker: Roger Wendell (ICRR)  
Date: May 27, 2015
40. "Star formation, gas and the ISM of high-z starburst galaxies"  
Speaker: John Silverman (Kavli IPMU):  
Date: May 28, 2015
41. "Horava gravity: Suppressing the Lorentz violations in the matter sector"  
Speaker: A. Emir Gumrukcuoglu (U Nottingham)  
Date: May 29, 2015
42. "From Massive Gravity to Bigravity and back"  
Speaker: Matteo Fasiello (Stanford U)  
Date: Jun 01, 2015
43. "A Zoo of Bayesian Priors"  
Speaker: Ed Turner (Princeton U)  
Date: Jun 02, 2015
44. "Holographic vortex pair annihilation in superfluid turbulence"  
Speaker: Hongbao Zhang (VUB Brussels)  
Date: Jun 02, 2015
45. "Inflationary Tensor Fossils in CMB and LSS"  
Speaker: Emanuela Dimastrogiovanni (Arizona State U)  
Date: Jun 03, 2015
46. "Dark Matter Dynamics"  
Speaker: Tom Abel (Stanford U)  
Date: Jun 03, 2015
47. "Obtaining and Understanding Bayesian Posteriors"  
Speaker: Ed Turner (Princeton U)  
Date: Jun 04, 2015
48. "Nuclear and host properties of local and distant radio galaxies (FRO-FRI-FRII): similarities and

- differences”  
 Speaker: Ranieri Baldi (Technion in Israel)  
 Date: Jun 08, 2015
49. “Practical and Philosophical Problems with Bayesian Statistics”  
 Speaker: Ed Turner (Princeton U)  
 Date: Jun 09, 2015
50. “4D  $N=2$  Galois symmetries”  
 Speaker: Michele del Zotto (Harvard U)  
 Date: Jun 11, 2015
51. “(Hsi-An Pan) What is a Giant Molecular Cloud? Are Observers and Simulators Discussing the Same Star-forming Clouds? (Alex Pettit) Armed and/or dangerous: the sensitivity of galactic spiral generation in tidal encounters”  
 Speaker: Hsi-An Pan & Alex Pettit (Hokkaido U)  
 Date: Jun 11, 2015
52. “A new approach to simulation of collisionless fluids (dark matter)”  
 Speaker: Oliver Hahn (Université de Nice)  
 Date: Jun 12, 2015
53. “ACM bundles and derived categories of cubic hypersurfaces.”  
 Speaker: Marti Lahoz (Université Paris)  
 Date: Jun 15, 2015
54. “Moonshine and Sigma Models”  
 Speaker: John F. Duncan (Case Western U)  
 Date: Jun 16, 2015
55. “Thermalization after Inflation”  
 Speaker: Kyohei Mukaida (Kavli IPMU)  
 Date: Jun 17, 2015
56. “Correlation Functions in Stochastic Inflation”  
 Speaker: Vincent Vennin (Portsmouth U)  
 Date: Jun 23, 2015
57. “Modelling the Milky Way Bar”  
 Speaker: Shude Mao (Tsinghua

U / NAOJ Chinese Academy of Sciences)  
 Date: Jun 25, 2015

58. “Scaling laws for thermo-electric transport at quantum criticality”  
 Speaker: Andreas Karch (U Washington)  
 Date: Jun 30, 2015

### Personnel Changes

#### Reappointment

Takahiro Nishimichi has appointed as a Kavli IPMU Assistant Professor on April 1, 2015. He had been at the Kavli IPMU from April 1, 2010 to March 31, 2013 as a Todai Postdoctoral Research Fellow (JSPS Postdoctoral Fellow). He then stayed at the Institut d’Astrophysique de Paris (IAP) for two years under the support of JSPS Postdoctoral Fellowship for Research Abroad Program. Nishimichi says he is excited to return to the Kavli IPMU. “I have been working on gravitational evolution of cosmic structures, and, more practically, cosmological information in galaxy clustering. At the Kavli IPMU, I would like to establish ‘big-data cosmology’ based on next generation survey projects, such as SuMIRe on Subaru, by exploiting advanced techniques in computational science and statistics.”



Takahiro Nishimichi

#### Expiration of Joint Appointments

Professor Yasunori Nomura at the University of California, Berkeley was jointly appointed as a Kavli IPMU Professor on January 1, 2015. This joint appointment expired on May 6, 2015.

Professor Edwin L. Turner at Princeton University was jointly appointed as a Kavli IPMU Professor

on March 6, 2015. This joint appointment expired on June 30, 2015.

#### Moving Out

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ivan Chi-Ho Ip has moved to the Graduate School of Science, Kyoto University as an Assistant Professor. He was with the Kavli IPMU from 16 August, 2012 to May 15, 2015.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Haruki Nishino has moved to the Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization as an Assistant Professor. He was with the Kavli IPMU from 1 April, 2013 to April 30, 2015.

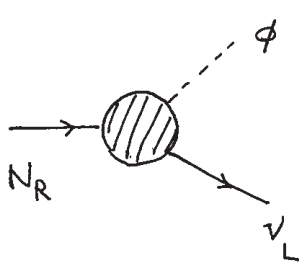
# Leptogenesis

Masataka Fukugita

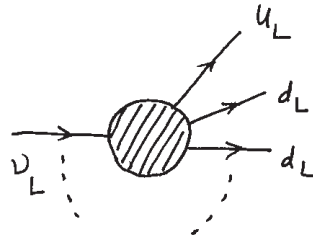
Kavli IPMU Professor

Generating baryons in the Universe requires violation of the conservation of baryon number. The most popular idea studied for some time was to invoke the grand unification of particle interactions. Actually, baryon number is violated, in principle, even within the Standard Model of particle physics, owing to quantum fluctuations. This effect was conceived to be only academic, since it is suppressed by a huge exponential factor, making it too small to cause any effects in nature. It was eventually realised, however, that this suppression is lifted at a temperature above the electroweak scale. This, at the same time, was a bad news to grand unification baryogenesis: baryon number generated, which equals lepton number, is all erased.

One idea to save the situation is to generate lepton number in an earlier universe. This is a natural possibility if neutrinos are massive and of the Majorana type. Decay of superheavy Majorana neutrinos produces lepton number, which is converted partially to baryon number when the Universe was above the electroweak energy scale. It is now conceived that the scenario should work if the neutrino mass is 0.1eV or less.



$$\#L \neq 0$$



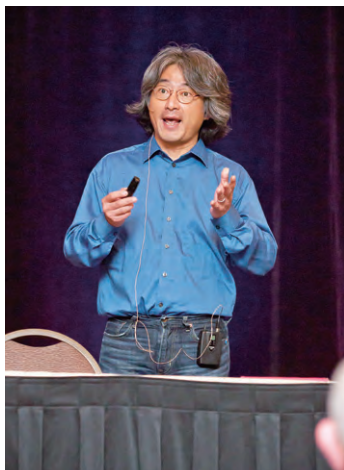
equil. for  $10^2 < T < 10^{12}$  GeV

$$\Delta(B-L) = 0$$

$$\#B = \frac{28}{79} \#(B-L) = \frac{28}{51} \#L$$

# 近況

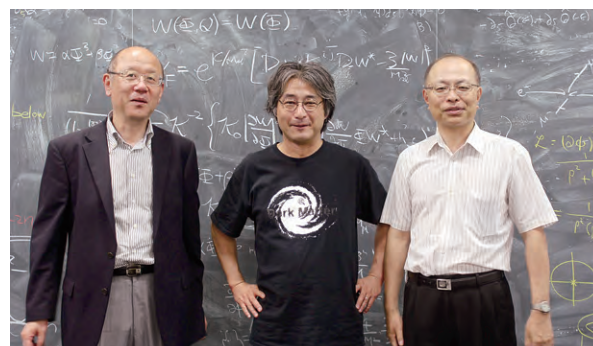
Kavli IPMU 機構長  
村山 斉 むらやま・ひとし



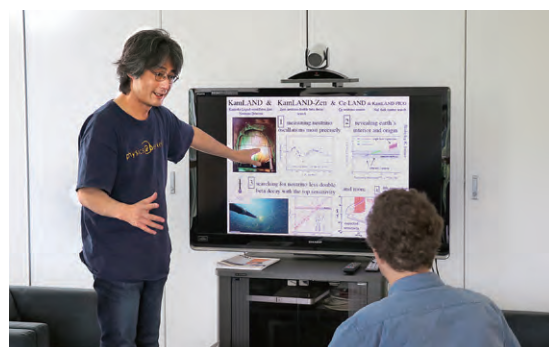
5月7日：米国バージニア州リッチモンド市の Greater Richmond Convention Center で開催された “The Sixth International Particle Accelerator Conference, IPAC’15” で講演。(Credit: IPAC’15)



5月26日：Kavli IPMU で開催された “International Workshop on Condensed Matter Physics & AdS/CFT” で講演。



6月12日：Kavli IPMU を訪問した林正彦国立天文台 台長(右)、小林秀行副台長(左) 両氏と。



6月29日：Kavli IPMU を訪れたフリーランスジャーナリスト George Musser さんに Kavli IPMU での研究 概要を説明。



Director's  
Corner

# 交点数と微分方程式

## はじめに

現代幾何学の最も基本的な概念の一つは多様体を考えるということです。数学について特段の訓練を受けたことのない人は、これまで多分この言葉を聞いたことはないと思われます。これから多様体とは何かを説明しますが、まずそれは私たちの周りの空間の特定の部分と考えることができるということから始めましょう。例えば、両親が見ていない間に小さな女の子が壁に描いてしまった丸い輪とか、サッカーのボールの表面とかです。宇宙全体だって構いません。多様体を見ることができるなら、その形を思い浮かべることが簡単ですが、ほとんどの場合、それはできません。例えば、私たちに見える宇宙は、そのほんの小さな一部分だけです。それから推し量ると宇宙は箱のように見えますが、本当の形は全然違うかもしれません。数学では、私たちが思い浮かべることのできないものを扱う方法の一つに、不変量と通常呼ばれている、幾何学的性質をできる限り捉える「数」を見つけるということがあります。いわゆる「グロモフ-ウィッテン不変量」は、過去20年、非常に熱心に研究されてきた不変量です。その起源は、数え上げ代数幾何学の古典的な問題に遡りますが、近年の超弦理論の進展のおかげで非常に興味深いものになりました。超弦理論は量

子力学と重力の統一を目標とします。そのアイデアの主要な点は、素粒子を小さなひもで表現することです。この場合、素粒子の軌跡は線ではなく、面となります。与えられた多様体の中にどのような種類の曲面が何個あるかを決定する問題が、物理でも非常に重要となる理由が、これなのです。私は本稿で超弦理論の顕著な予言の一つについて書いてみたいと思います。それは、数学の2つの非常に異なる分野の間に関係があることを示唆するという意味において、統一する力をもつものです。

## 多様体とは何か?

まず線形ベクトル空間と呼ばれる基本的なものを考えましょう。例として直線、平面、3次元空間を思い浮かべることができます。一方、これらの空間を座標を用いて考えることもできます。つまり、任意の点を原点とする1本（直線の場合）、あるいは互いに垂直な2本（平面の場合）または3本（3次元空間）の軸を選び、座標系を描きます。すると、どの点も、その点のそれぞれの座標軸への射影に対応する座標をもちます。このようにして、直線は実数全体と同じになります。平面は2個の実数のペア全体と同じであり、3次元空間は3個の実数の組全体と同じになります。

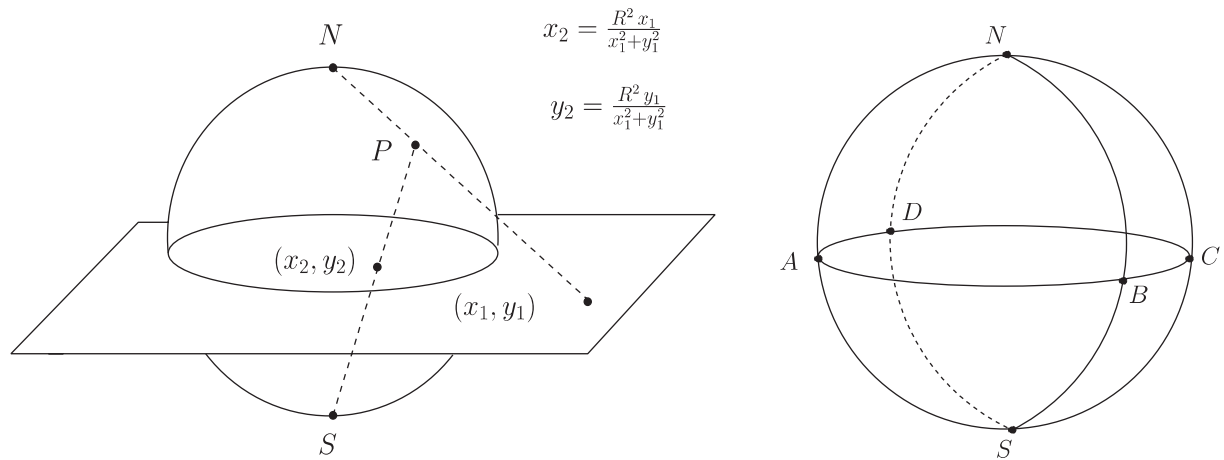


図1 半径  $R$  の球面の局所座標系と（8個の三角形による）三角形分割。

次元は座標軸の数に対応します。私たちは3次元を超える次元を思い浮かべることはできません。ですから、4次元の線形ベクトル空間がちょうど4個の実数の組全体ということを除き、どういふものか語ることができません。

多様体は線形ベクトル空間を貼り合わせて作られます。一番簡単な例は円ですが、これからお話する内容にふさわしいのはその次に簡単な例である球面の方なので、これを説明することにしましょう。球面から北極点  $N$  を取り除くと、残りの球面上の全ての点  $P$  は、直線  $NP$  と赤道面の交点を見れば分かる（図1参照）ように、赤道面上の唯一の点に対応します。言い換えると、この約束によって、北極点  $N$  を除く球面上の全ての点を赤道面で（点  $(x_1, y_1)$  が点  $P$  に重なるように）包むことができます。（ここで、赤道面は自由に伸び縮みし、曲げることができるものとします。）南極点  $S$  についても同様のことができます。つまり、2つの平面を曲げて貼り合わせると球面になります。ただし、2つの平面は、2点  $N$  と  $S$  を除き、球面上のあらゆる点で重なり合うことに注意して下さい。少し専門的になりますが、今述べたことを座標を使って言うと、こうなります。 $(x_1, y_1)$  と  $(x_2, y_2)$  を座標とする点は、それぞれ直線  $NP$  及び  $SP$  と赤道面の交点ですが、それら

の点を貼り合わせると点  $P$  が得られます。座標  $x_2$  と  $y_2$  は  $x_1$  と  $y_1$  によって表すことができます（答は図1を見て下さい）。ここでは厳密な公式は必要ありません。要点は、貼り合わせという操作は一つの線形ベクトル空間の座標から別の線形ベクトル空間の座標へ変換する公式を与えるということです。線形ベクトル空間は局所座標系と呼ばれ、異なる局所座標系の間での座標の変換公式は変換関数と呼ばれます。球は2つの局所座標系と一つの変換関数で構成することができます。

## 髪の毛の生えた球面を櫛で梳かす

通常、変換公式はとても厄介なもので、背後にある多様体の本質的な性質が見えにくいため、座標を用いた議論は非常に難しいものになります。ここでは、私のお気に入りの髪の毛の生えた球面に櫛を入れる問題を考えてみましょう。球面上のどの点からも毛が生えていると想像して下さい。からまないように櫛で梳いた髪の毛の1本1本全てを、球の表面に接するようにできるでしょうか？ 答はnoです。恐らく局所座標系と変換関数を用いてこれを証明できるはずですが、実はもっとエレガントな証明法があります。

そのアイデアは、球面の接束、つまり球面の全

での接平面を考えることです。球面上の点を指定するためには2つの座標が必要であり、また接平面上で点を指定するために更に2つの座標が必要であることに注意して下さい。すると接束は4次元の多様体となり、これは直感的に考えることができないものになります。それでも個々の接平面は、はっきり思い浮かべることができます。もし髪の毛の生えた球面を櫛で梳いて髪の毛の1本1本全てを球に接するようにできるなら、球面上の各点を対応する髪の毛に沿ってその端まで動かすと接束の中に曲面が得られますが、その曲面は球面自身とは交叉しません。ここで、次の定理があります。「任意の多様体 $X$ に対してその接束の中に $X$ の変形 $X'$ を、 $X$ と $X'$ が孤立した点のみで交叉するように構成でき、さらにその交点の数は $X$ のオイラー標数で与えられる。」この定理を用いると、もし(髪の毛の生えた)球面全体を櫛で梳くことができるなら、それは球面のオイラー標数が0であることを意味することになります。

多様体のオイラー標数の定義は多少技術的なところがありますが、曲面の場合にはその三角形分割に帰着します。つまり、曲面上に幾つかの点を取って曲線をつなぎ、その曲線に沿って曲面を切り開くと(曲がった)三角形が得られるようにします。オイラー標数は三角形分割に依存しません。その定義は、点の数と三角形の数の和から辺(曲線)の数を引いたものとして定義されます。図1に示す三角形分割の場合、頂点が6個、辺が12個、三角形が8個あるので、球面のオイラー標数は $6-12+8=2$ となります。従って、(髪の毛の生えた)球面全体を櫛で梳くことはできません。

## ベクトル束と交点数

上記の例で示したように、ある多様体の局所座標形と変換関数がはっきり分かっている場合でさえ、通常、その多様体の主要な性質を理解するのは非常に難しいといえます。多様体上の各点に、ファイバーと呼ばれる線形ベクトル空間を付随させてベクトル束を構成することは、幾何学における重要な考え方の一つです。

例えば、円筒とメビウスの帯は、円周上の各点に直線を付随させて構成した線束です(図2参照)。円筒に対しては、直線は常に同じ方向に取り付けますが、メビウスの帯に対しては、円周に沿って動くとき、直線が時計方向に回転するようにして、出発点に戻ったとき丁度一回転するようにします。ベクトル束もまた多様体ですが、貼り付ける際に局所座標系の線形構造の一部が保存されるため、非常に特殊な多様体といえます。また、加法や乗法のような基本的代数演算を導入することもできて、背後にある多様体の幾何学を代数の手法によって調べることと不変量を導入することを可能とします。

与えられた多様体 $M$ 上の各ベクトル束は、どれも以下に述べるような intersection operation と呼ばれる操作を行うことにより、 $M$ の任意の部分多様体 $X$ から新しい部分多様体を生成できます。 $M$ 上の各点をベクトル束のファイバーに沿って連続的に動かして、 $X$ と互いに横断的(transversal)なベクトル束の部分多様体 $Y$ を得ます。この intersection operation の結果は単純に $X$ と $Y$ の交叉(共通部分) $X \cap Y$ で与えられます。 $X \cap Y$ が $M$ の部分多様体であって $X$ に含まれるための十分条件が、後で述べる横断性(transversality)です。与えられた任意のベクトル束の集合から出発して、 $M$ に対し次々に intersection operation を行うことができます。最初は $M$ に対してこの操作を行い、 $M$ の部分多様体 $X_1$ を得て、次は $X_1$ に対してこの操作を行い、 $X_1$ の部分多様体 $X_2$ を得る、という具合です。この操作により、毎回得られる部分多様体の次元が対応するベクトル束のランク(これはファイバーの次元です)の数だけ減っていきます。特に、ベクトル束のランクを足し合わせると $M$ の次元に一致する場合は、次々に intersection operation を行った結果として幾つかの孤立点を得られます。その点の数を数え上げることにより「交点数」と呼ばれる不変量が得られます。

通常、与えられた部分多様体の連続変形は非常に数多くあります。連続変形の取り方によらず交点数を定義するためにはどうすればよいのでしょうか? まず



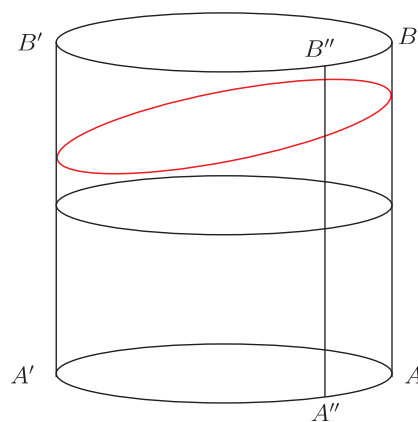
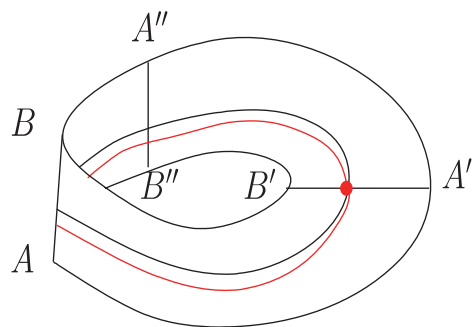


図2 メビウスの帯と円筒のベクトル束。ファイバーは直線 $AB, A'B', A''B''$ 等。赤い曲線はファイバーに沿った円周の小さな変形。

第1に、多様体とベクトル束が「向き付け可能」であることを要求する必要があります。向き付け可能でない場合は、うまく定義できるのは交点数が奇数か偶数かという「偶奇性 (パリティ)」だけということになります。第2に、intersection operation の操作を行う場合、対応する部分多様体の交叉が横断的な変形のみが許されるものとします。向き付け可能な多様体という概念を導入するのは、主として次の理由によります。ある線形ベクトル空間の2つの座標系を取ったとき、一方の座標系を連続的に動かして他方の座標系にできるか否かに応じて、座標系全体の集合を2つのクラスに分けることができます。例えば、平面上に2つの座標系があるとして、一方の座標系の原点と1番目の座標軸が他方の座標系のそれと一致するようにできます。その場合、2番目の座標軸の方向は、同じ向きか反対向きか2つの可能性があります。多様体の局所座標系について、どの2つの重なり合う局所座標系をとってもそれぞれの座標系の向きが同じ場合、その多様体は「向き付け可能」であると言えます。さらに、与えられた多様体の2つの部分多様体の交叉 (共通部分) の上のいかなる点に対しても、その点で2つの部分多様体の座標軸のみを用いて多様体の局所座標系の座標を構成できる場合に、2つの部分多様体は横断的

に交叉すると言います。例えば、平面内で2つの円が接する場合、2つの円の交叉は横断的ではありません。なぜなら接点で2の円の座標軸は同じ方向を向いているため平面の座標系を構成できないからです。他方、2つの円が2点で交叉する場合、どちらの交点でもそれぞれの円の接線方向は異なり、座標系を構成できるので、交叉は横断的です。これでやっと交点数を正確に定義できます。一つの孤立点で幾つかの向き付け可能な部分多様体が交叉する場合、多様体の座標系の向きと、部分多様体の座標系を接合した座標系の向きとを比較することができます。この際、部分多様体を交叉させる順番が重要です。その順番で部分多様体の座標系を接合するからです。もしも向きが一致する場合、交点に+1を、そうでない場合、-1を割り当てます。交点数は、全交点に割り当てられた数の総和として定義されます。

例えば、メビウスの帯は向き付け可能ではありません。従って、メビウスの帯の場合には意味をもつのは交点数が奇数か偶数かというパリティのみとなります。例えば、図2で見ると、メビウスの帯のファイバーに沿って円を動かすと新しい円を生じ、2つの円の交点の数は常に奇数です。一方、円筒は向き付け可能です。従って交点数は整数です。円筒の場合、図

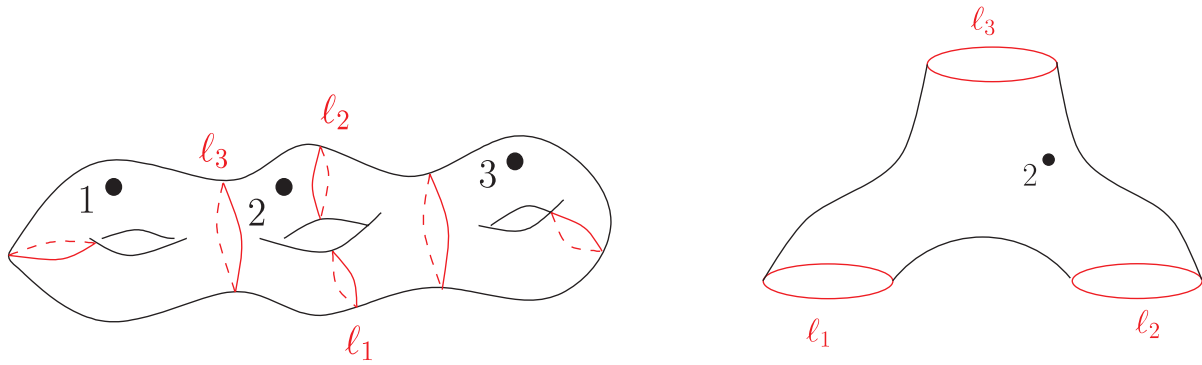


図3 種数3で3個の区別された点をもつリーマン面。赤い線で示す輪に沿って切断すると、パンツ型の図形に分解される。輪の数が $3g-3=6$ であることに注意。

2に見るように、赤い円を移動して2つの円が交わらないようにできます。従って、円筒の場合、(不変量である) 交点数は0でなければならないこととなります。言い換えると、交点数のパリティを用いて円周上のベクトル束としてのメビウスの帯と円筒を区別することができます。

### リーマン面のモジュライ空間

多様体としては、どんな曲面もそのオイラー標数から一意に決定されます。オイラー標数は常に $2-2g$ という形に書かれます。ここで $g$ は曲面の種数と呼ばれ、穴の数と一致します。例えば、球面のオイラー標数は2で種数は0ですが、ドーナツはオイラー標数0(球面に対して行ったように三角形分割して数えてみれば分かります) 種数1をもちます。しかし、もし曲面の形に興味があるなら、点の間の距離を測る「測度」を導入することが重要です。通常、距離を測る方法は一つに限りません。「測度」を決めた曲面をリーマン面と呼びます。モジュライ空間とは基本的に何かというと、私たちが分類をしようとしている対象全体に幾何学的構造を与えたものであるといえます。どの1つのリーマン面をとっても、その幾何学は非常に豊か

であり、自明ではありません。従って、全てのリーマン面の集合をそのモジュライ空間を用いて調べることには意味があるということは、何とも驚くべきことです。リーマン面のモジュライ空間の座標は、そして次元は何でしょうか? リーマン面上に異なる2点をとると、その間を最短で結ぶ「測地線」と呼ばれる経路があります。例えば、球面の場合、測地線は円弧で、その円弧を含む面は正確に球の中心を通ります。曲面の種数が0あるいは1の場合のモジュライ空間の説明は簡単です。従って、種数が少なくとも2の場合について考えましょう。一つの方法は、曲面を単純な閉じた測地線に沿って切り離し、パンツ型の図形に分解するやり方です(図3参照)。ここで、各測地線上の基準点を記憶し、またその長さを測っておけば、それぞれの断片をどのように貼り合わせるか覚えている限り、一意に曲面とその計量を元の状態に回復することができます。この場合、モジュライ空間は様々な貼り合わせ方に対応するチャートで被覆され、座標は各測地線の長さで基準点の位置(従って、各測地線に対して2個のパラメーター)に対応します。多様体の切断に用いる単純な閉じた測地線の数が $3g-3$ であることは、簡単に分かります。従って、モジュライ空間は $6g-6$ 次元となります。

しかし、puncture(区別された点とも呼ばれる)と

node (結節点) をもつ、もう少し複雑な空間を調べる方が都合が良いことがあります。Puncture を忘れれば元のモジュライ空間を再現できますが、交点理論が成り立つためには node が必要です。曲面上で区別された点を決定するには2つの座標が必要です。従って、 $n$  個の区別された点をもつ種数  $g$  のリーマン面のモジュライ空間は、 $6g-6+2n$  次元になります。モジュライ空間は、区別された点に対応するベクトル束の自然な集合をもっています。モジュライ空間の1点、つまり区別された点を何個かもつリーマン面におけるファイバーは、区別された点におけるリーマン面の接平面に他なりません。既にお話したものに似た intersection operation を用いることにより、モジュライ空間の幾何を反映する数多くの交点数を導入できます。驚くべきことに、KdV 階層として知られる微分方程式系から同じ交点数が得られます。

## KdV可積分階層

KdV方程式は  $u_t = uu_x + \varepsilon^2 u_{xxx}$  という偏微分方程式です。ここで  $\varepsilon$  は0でない任意の値を取り得るパラメーターで、 $u = u(x, t)$  は2変数の関数です。KdV方程式の歴史を述べるつもりはありませんが、この方程式は浅い水の中の波の運動をモデル化するものであるとだけ言っておきます。ここで  $t$  は時間の役割を果たし、 $t$  を固定した場合、関数  $u(x, t)$  の  $x$  に関するグラフは波の形を表します。KdV方程式の最も著しい特徴は、 $t_1 = t, t_2, t_3, \dots$  というように時間変数を追加することが許されて、より大きな方程式系に発展させることが可能であることです。

追加された個々の変数に対する関数  $u = u(x, t_1, t_2, t_3, \dots)$  の依存性は、追加された微分方程式によって与えられます。この微分方程式系全体をKdV階層と呼びます。ここで、追加する変数とそれに対応する微分方程式を勝手に与えることは、それまでに得られた方程式と矛盾するため、できないことに注意して下さい。KdV方程式から出発して、幾らでも時間変数を増やすには、

方程式系を再帰的に拡張する唯一の方法があるので。このような、整合的な微分方程式たちによる階層をもつような方程式を可積分であると言い、対応する階層を可積分階層と呼びます。可積分な微分方程式は、通常、見つけることが非常に難しいものです。KdV階層の方程式はどんどん複雑になりますが、どの解も初期条件、つまり全ての時間変数が0の場合の波形だけに依存します。初期条件として  $u(x, 0) = x^3/6$  を選べば、KdV階層の解のテイラー級数展開がリーマン面のモジュライ空間の交点数を全て決定します。変数  $t_k$  は区別された点に付随する線束に関して intersection operation を  $k$  回繰り返すことに対応し、パラメーター  $\varepsilon$  はリーマン面の種数を示します。

## 終わりに

リーマン面のモジュライ空間の交点数とKdV階層の関係は、E. ウィッテンによって予言され、M. コンセヴィッチによって証明されました。しかしながら、浅い水路の波を眺めることにより、自然の中で見いだせるKdV方程式が、なぜリーマン面のモジュライ空間のような複雑な空間にとってこれ程重要なのか、未だに深い謎に包まれています。さらに、与えられたリーマン面を与えられた多様体の中に移す、可能なあらゆる方法のデータを付け加えることにより、リーマン面のモジュライ空間を一般化することができます。多様体として何を選ぶかに応じて、KdV階層に類似した微分方程式の階層が他にも数多く得られます。これらの階層は完全に新しいものであり、これまで全く調べられていません。事実、可積分階層の理論で可積分模型を構成することは非常に難しく、従って、超弦理論がこのように広範なクラスの微分方程式の可積分階層を導くことは、非常に驚きです。私は、リーマン面のモジュライ空間の幾何学における可積分性の役割を研究することは、数学の将来の発展にとって非常に有望な方向であると考えます。

# Our Team

## 日影 千秋

ひかげ・ちあき 専門分野: 宇宙論

Kavli IPMU 助教

私の研究分野は観測的宇宙論です。宇宙マイクロ波背景放射や銀河分布などの観測データに基づいて宇宙の成り立ちを調べ、宇宙初期の物理やダークエネルギー問題の解明を目指す研究を行ってきました。また、構造の形状やトポロジーを定量化するミンコフスキー汎関数など、従来とは異なる新しい統計量を観測データに応用し、新たな宇宙論情報を引き出す研究を行ってきました。

すばる望遠鏡を使った大規模な銀河撮像・分光サーベイ計画「SuMIRe」プロジェクトに興味があり、



精密な宇宙論研究を行いたいと考えています。Kavli IPMU は、数学、素粒子物理、天文にわたる多くの分野の一流の研究者が集まる非常にユニークな場所です。多くの研究者と議論し、新しい研究分野に挑戦したいと考えています。

## 齋藤 翔

さいとう・しょう 専門分野: 数学

博士研究員 (カブリフェロー)

代数的K理論を研究しています。特に形式的ループ空間の幾何学へ応用することに関心をもっていますが、この文脈においては Tate ベクトル束と呼ばれる無限次元ベクトル束が重要な役割を担います。私は博士論文において、Tate ベクトル束と、K理論上の torsor と呼ばれるある種の主束との間に自然なつながりがあることを示しました。このつながりを定式化、証明するために、とても広い範囲で柔軟に幾何学を行うことを可



能にする高次圏的な枠組みとして無限大トポスの理論を用いました。

## 林 航平 はやし・こうへい 専門分野:天文学

博士研究員

私の主な研究テーマは、矮小銀河の暗黒物質ハロー構造の解明です。矮小銀河は淡く暗い銀河で、暗黒物質が沢山含まれていると考えられています。よって、暗黒物質の性質を調べる上で理想的な天体として注目されています。この銀河の星の運動や空間分布を詳しく調べて、暗黒物質ハローがどんな構造をもっているのかを研究しています。これを解き明かすことで暗黒物質の正体を探る重要な手がかりを得ることができません。現在 Kavli IPMU を中心に計画が進行しているすば



る超広視野分光器 (PFS) によって、矮小銀河にある星の沢山のデータが得られ、暗黒物質ハローにより強い制限を与えることが期待されています。

## 池田 暁志 いけだ・あきし 専門分野:数学

博士研究員

私の研究の興味は、カラビ-ヤウ代数の導来圏のブリッジランド安定性条件の空間を記述すること、及びその空間とフロベニウス多様体の関係性を調べることです。最近の私の研究では、籠に付随した二次元のカラビ-ヤウ代数に対して、ルート系の理論を用いて安定性条件の空間を決定しました。また、高次元のA型のカラビ-ヤウ代数に対して、安定性条件の空間とフロベニ



ウス多様体の関係を明らかにしました。

## 石部 正 いしべ・ただし 専門分野:数学

博士研究員

私の研究対象は超曲面孤立特異点の半普遍変形から構成したディスクリミナント因子の補集合の位相です。それらの空間のホモトピー群はよい性質を持つであろうと信じられています。孤立特異点有理2重点の場合は充分によく調べられています。すなわち、基本群はアルティン群に表示され、高次ホモトピー群は消えます。孤立特異点が単純楕円型特異点の場合はほとんど結果が知られていません。



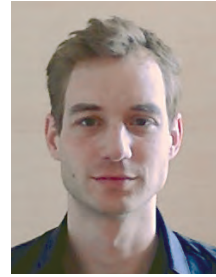
私はアルティン群論の一般化を通じてこれらのケースの基本群を理解しようと試みています。

Our Team

## デビッド・マックギャディー David McGady 専門分野:理論物理学(弦理論)

博士研究員

私は現在、2つの方向の研究を行っています。一つは場の量子論におけるオブザーバブルのon-shellおよびoff-shellの定式化の間の関係、特に質量0の場合のS行列の研究です。加えて、物理的に興味のある理論の厳密に解ける極限に存在する新しい対称性についても注目しています。特に、コンパクトな4次元多様体上のラーゼンゲージ理論において最近発見された温度反転対称性の根本的原因を明らかにすることと、それから



導かれる結果—隠れたモジュラー不変性やカシミアエネルギーが0になる等—の両方を研究しています。

## 森谷 友由希 もりたに・ゆうき 専門分野:天文学

博士研究員

広島大学より4月に異動して参りました。可視・近赤外観測装置の開発に携わってきており、京都大学岡山 3.8 m 望遠鏡や広島大学宇宙科学センターの観測装置の開発を行ってきました。すばる望遠鏡の観測装置FMOSの開発にも携わり、その経験をPFSのコミッション計画などプロジェクトの推進へ活かしていきたいと思います。一方で、高エネルギー連星系(X線連星系・ガンマ線連星系)の研究を行っています。可視・



近赤外観測から伴星の変化をモニターすることで系の相互作用の性質、伴星の活動と高エネルギー現象の関係性を解き明かしています。

## 向田 享平 むかいだ・きょうへい 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は素粒子論と宇宙論の密接な関係性を通じて、より基本的な理論ないし我々の宇宙の理解を深めることに興味をもっています。ビッグバン軽元素合成・宇宙マイクロ波背景放射が強く示唆するように、昔の宇宙は非常に高温の素粒子のプラズマで満たされていました。これを踏まえ、極限的状況下での場の振る舞いという観点から、初期宇宙のダイナミクスを研究してきました。再加熱、バリオン・レプトン数の生成、ダー



クマター生成、宇宙論的な相転移、といった初期宇宙における様々な現象の理解を深め、その背後にある素粒子理論に示唆を与えることを目的としています。

## 白石 希典 しらいし・まれすけ 専門分野: 宇宙論

博士研究員

スピンを持つ物理量は、我々の宇宙に多彩な影響を与えています。例えば、磁場（スピン1）は様々なスケールの構造形成に関わっており、重力波（スピン2）はCMB分布などに特殊なパターンを作ります。このようなスピン依存性の起源を、現象論解析かつ観測データを用いたパラメータ推定によって徹底的に明らかにすることが、私の主な研究目標です。最近、スピン場由来の対称性の破れ（非ガウス性、回転非対称、パリティ非対称）に関する新たな観測量の提言、観測デー



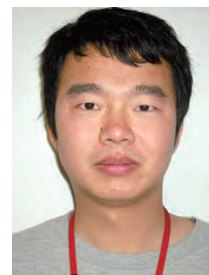
タからそれらを推定する手法の開発、ESA PlanckプロジェクトのCMB温度、偏光データを用いたそれらの制限、などを行っています。

## 続 本達 シュー・ベンダー 専門分野: 実験物理学

博士研究員

私は、現代物理学で最も重要な未解決の問題の一つであるダークマターの素粒子サイドでの探索を始めました。

私の研究は、XMASSと呼ばれる、神岡にある世界最大の1相式液体キセノンシンチレーション検出器をダークマターの検出に用います。たとえ存在するとしても、検出器からのダークマターの信号は非常に稀にしか起きません。自然界にはどこにも存在しないレベルの極



低放射能環境を作ることがこの実験の核心です。

また、私はフリーでオープンな、ソフトウェアおよびハードウェアの制作と、その物理実験や実社会への応用にも熱意をもっています。

## 矢部 清人 やべ・きよと 専門分野: 天文学

博士研究員

私の専門は観測天文学で、主に銀河の形成と進化に興味をもっています。特に、宇宙の歴史の中で銀河の平均的な星形成が最も活発であったと言われる、赤方偏移2付近の銀河に興味をもっていて、これまでに「すばる望遠鏡近赤外ファイバー多天体分光装置 FMOS」を用いて、この時代の銀河の詳細な性質を調べてきました。この経験を生かして、Kavli IPMUでは「すばる望遠鏡次世代ファイバー分光器 PFS」に関する様々な



検討に関わっていきたいと思っています。

Our Team



## Interview

# ヘーラルト・トホーフ教授 に聞く

聞き手: 杉本 茂樹

### 若い頃から一番の興味は物理学

**杉本**：今日お話しできる機会を頂き、ありがとうございます。伺いたいと思っていたことが沢山あります。

**トホーフ**：どうぞ聞いて下さい。

**杉本**：まず第一に、いつ、どのようにして科学に興味をもつようになったのですか？

**トホーフ**：私は多少例外的だったと思います。まだとても小さい時、多分保育園の頃だったかもしれませんが、自分が自然の世界に興味をもつようになるだろうと気がついていました。私には、自然よりも人間を理解する方がはるかに難しかったです。また、読み書きを習うより、足し算や引き算のほうがずっと易しいことに気がつきました。ヨーロッパでは、普通6歳で、少なくとも基本的な読み方、書き方を習います。それより前に、私は読み書きはできませんでしたが足したり引いたりでは

ヘーラルト・トホーフさんは2011年以来オランダのユトレヒト大学の名誉教授を務めています。1999年に「電弱相互作用の量子構造の解明」によりJ.G. フェルトマンと共にノーベル物理学賞を受賞したほか、1979年にハイネマン賞、1981年にヴォルフ賞、1986年にローレンツ・メダル、1995年にフランクリン・メダル1999年にオスカー・クライン・メダル、2010年にロモノソフ・金メダルなど、多くの輝かしい受賞歴があります。1972年にユトレヒト大学からPh.D.の学位取得し、1977年に同大学教授に就任しました。

きて、それを面白いと思っていました。

**杉本**：数学に興味があったのですか？

**トホーフ**：数学と物理でした。私の家族の中では、ある程度物理のことが話題になっていました。おじが理論物理学者で、その分野では良く知られていました。私の大おじのフリッツ・ゼルニケもノーベル物理学賞を受賞しました。それで私は大変刺激を受け、幼い頃からずっと物理に興味をもっていると気がついていました。

**杉本**：なるほど。物理学者になろうと決めたのはいつですか？

**トホーフ**：物理学者になろうと本当に決めたのがいつだったかは分かりませんが、物理はいつでも常に私の一番の興味の対象でした。多分、9歳、10歳、あるいは11歳の頃、私は物理学者になるだろうと意識していました。

**杉本**：その後、あなたは博士課程でフェルトマンの学生になり、すぐにヤン-ミルズ理論のくりこみ可能性についての研究を始められました。そうですね？

### ヤン-ミルズ理論のくりこみ可能性について研究を開始

**トホーフ**：そうです。フェルトマンはどうやってヤン-ミルズ理論のくりこみを行うかという問題について研究していました。彼は非常に良い健全な手法



を開発しており、私はそれに魅了されました。しかし、彼は「これは非常に難しいので、君は何か別の研究をする方が良いかも知れない。」と言ったのです。私は「いえ、あなたが研究を続けているその問題にとっても興味があります。その問題をもっと理解したいのです。」と答え、最初からこう言いました。「私は、あなたがどういう困難に直面しているか分かっています。ですから、私にできることをやってみたいのです。」

**杉本**：当時はゲージ理論に懐疑的な人たちが多かったそうですね。

**トホーフト**：当時はそうでした。今では、皆「電弱理論のようなものは存在していて、唯一の問題はそれをどうやってくりこむか、だった」と言いたがる傾向が強いので、歴史がどう展開したかを述べるのはいささか難しいのですが、当時その問題がどのように考えられていたかという、全然違っていました。つまり、大多数の物理学者は場の理論を研究に用いようとは考えませんでした。彼らは場の理論に代えて、何かもっと良いもの、無限大をくりこむ必要のないものを用いたがりました。幾つもの“電弱理論”があり、一つのアプローチは散乱行列、別のアプローチはカレント代数、といったように、素粒子を理解しようとする多くの代数的なアイデ

ィアがありました。しかし、その当時、場の理論は全く人気がありませんでした。

**杉本**：そうでしたか。では、フェルトマンとあなたはなぜゲージ理論を信じたのですか？

**トホーフト**：フェルトマンは非常に現実的な人でした。彼は弱い相互作用を理解するには基本的な問題が存在すると分かっていました。彼は実験結果について調べました。実験的には、弱い相互作用について、また素粒子と力のその他の性質について、既に多くが知られていました。また、それらのもつ対称性についても非常に良く分かっていました。群論を用いるゲルマン理論が知れ渡っていたためです。物理にとって、群論、特にリー群がいかに重要であるか、分かっていました。それは明らかでしたが、どうやって素粒子を厳密に記述するかは大きな謎でした。フェルトマンは場の理論の一般的な定式化は気に入っていましたが、彼も場の理論をそれほど重要視はしておらず、誰もが言っていたこと、つまり、「場の理論は多分正解ではないだろう」を繰り返すのみでした。しかし、とりあえず他にすべきこともありませんでした。彼は場の理論では恐らく答を得られないだろうと考えていました

杉本茂樹さんは京都大学基礎物理学研究所教授で、Kavli IPMUの客員上級科学研究員を兼ねています。



が、私は、細部を理解していない点を除けば、原理的には解くことができるものだと分かっていた。私たちは、光子を除いて素粒子のくりこみ効果をどう取り扱えばよいのか、基本的に理解していませんでした。光子は理解されていました。事実上、最も理解されていた素粒子でした。

**杉本**：そうですね。

**トホーフト**：光子はベクトル粒子です。では、なぜ他のベクトル粒子をくりこむことがそんなに難しかったのでしょうか？問題は質量でした。フェルトマンは、弱い相互作用が質量をもつベクトル粒子によって引き起こされることを理解しており、このような素粒子に対してユニタリ性を持ち、くりこみ可能な理論をどのようにして作るか理解しようと試みていました。彼はその過程で多くの問題を見出しました。彼はゲージ不変性を用いる独自のやり方でその問題に取り組み、ヤン-ミルズの論文に多大な関心を寄せていました。彼は、どうもこれが問題を解決する方法のようだと言いました。

**杉本**：なるほど。

**トホーフト**：彼は必要なものを全て手にしていましたが、この理論をどうやってくりこむかということについては、まだ答が得られていませんでした。当時、この理論は単に一つの可能性と

考えられていて、自然界の全ての力を理解する唯一の方法になるとは予想されていませんでした。

**杉本**：当時、その理論のくりこみ可能性を証明しようと試みる人たちは多かったのでしょうか？

**トホーフト**：いえ、くりこみ可能性を研究していた人たちはそれほど多くはありませんでした。アブダス・サラムがいて、ステイブーン・ワインバーグがいましたが、彼らは、「一体、どうやれば全てのつじつま合わせができるのだろうか？」「これらの力を記述するにはどうすればよいのだろうか？」「次にどういう素粒子が発見されるのか、どうすれば分かるだろうか？」等々のような、もっと包括的な問題を調べていました。くりこみは、それ程はやりのテーマとはいえなかったですね。

**杉本**：あなたは、この問題に取り組み始めたとき、うまくいくと思いませんか？

**トホーフト**：主要な問題に答えることができている以上、うまくいくかどうかは分かりませんでした。しかし、私は非常に意欲的でしたし、自分が見つかることのできる最高の答を得たいという思いは確かでした。ですから、私は「もしこの問題がなんとか解けるものならば、自分が解いてみよう」と考えていました。

**杉本**：なるほど。それで、くり

こみ可能性の証明を完成させたとき、どういう気持ちになりましたか？

**トホーフト**：最初考えたことは、「これが正しい方法であると他人を納得させなければならぬ」ということでした。くりこみには賛成しないという意見があったからです。ですから、私が出したことが何であるにせよ、批判しようとする人たちがいると悟っていましたし、フェルトマンも同じ反応を示しました。「多分君は何か面白いことをやったようだが、人からはあれやこれや聞かれるだろう。答を用意してあるのかね？」私は、私には答えられない非常に多くの質問をされるだろうと悟りました。これは非常に数学的な問題なのです。物事を述べる場合、数学者は非常に厳密ですが、私はややいい加減でした。彼はこう言いました。「ここは、もっと厳密でなければならないところだ。さもないと、誰も君を信じてくれないだろう。」

**杉本**：この成功に興奮しましたか？

**トホーフト**：ええ、これは私がヒッグス機構の重要性を確かに悟った時でしたので、非常に興奮しました。実際は、私はヒッグスとアングレールの論文を余りよく知らなかったため、それをヒッグス機構とは呼ばなかったのです。私は同じように考えた人たちがいたと聞きました。

それで、この理論を最初に論文に書いたのが自分ではないということを受け入れましたが、ヒッグス機構が正にフェルトマンが定式化した問題に対する解答であると理解したのは、間違いなく私が最初であると感じました。

**杉本**：そうでしたか。

### アノマリーを全て相殺する方法を発見

**トホーフト**：「今やどうやってやるべきかを正確に理解したが、細部を詰める必要がある」と私は悟りましたが、その細部は大して重要ではないことでした。最も重要な点はアノマリーでした。あるダイアグラムを対応する相殺項を用いてくりこみ、別のダイアグラムをやはりそれに対応する相殺項を用いてくりこみ、そうやって総和を取ったときにユニタリ性が保たれているかどうか明らかではなく、実際に反例も知られていました。このやり方が破綻する理論の例があったのです。左巻きの粒子と右巻きの粒子が別の粒子であるというカイラル対称性がある場合です。

**杉本**：カイラルフェルミオンですね。

**トホーフト**：カイラルフェルミオンはアノマリーを内在していて、それは非常に危険に見えます。どんな理論もそういうアノマリーをもっているわけではなく、少なくとも私たちが知って

いる理論はもっていません。しかし、それでもそういう危険はあったわけです。ひょっとするとまだもっと他にも危険なアノマリーがあるかもしれません。理論をくりこみ規則を定式化する過程で、アノマリーが存在せず、全てつじつまが合うことを証明する必要がありました。なぜなら、もしアノマリーが存在するとくりこみがユニタリ性を壊し、それはその方法が実際は機能しないことを意味するからです。

**杉本**：そうですね。

**トホーフト**：私はアノマリーが存在しても、多分ユニタリ性が保たれるように理論を書き換える方法があるのではないかというように多少の期待をもっていたのですが、その期待はたちまちのうちに消え去ってしまいました。そうではなく、アノマリーは全て相殺しなければならないのです。しかし、それはどれほど強い制限なのでしょう？ 一体、全てのアノマリーを相殺できる理論というものがあるのでしょうか？ これは知られていませんでした。

**杉本**：なるほど、当時は標準模型のアノマリー相殺は知られていなかったのですか？

**トホーフト**：そうです。ただ、フェルミオンのアノマリーは解消できる可能性があることが知られていました。これは確実ではありませんでしたが、私は純

粋なゲージ場の部分もどうやって相殺するか分からないアノマリーをもっているかもしれないと考えました。それが相殺できると証明することが必要でした。要点は、くりこまなければならない自由なパラメータの数よりアノマリーの相殺に使える項の数の方が少ないことでした。従って、齟齬が生じて、理論がくりこみ可能に見えても全てのダイアグラムを詳細にわたって計算しようとするとうまくいかないかもしれないことに気がつきました。アノマリーと相殺項が互いに矛盾していると、理論はユニタリになりません。ですから、これも証明しなければならない重要なことでした。欠けていたのは理論を正則化するうまい方法であって、実はこの点で私は次元の数を変えるアイデアをもっていました。

最初、私は5次元、6次元、7次元を試して、これらの次元を正則化因子として用いました。本質的にはほぼうまくいったのですが、完璧ではなく、それから私は $4+\epsilon$ 次元あるいは $4-\epsilon$ 次元を考えて、 $\epsilon \rightarrow 0$ の極限をとることが正しい答、あるいはもっとずっと良い答であることを発見しました。実際、それは正しい答でしたが、驚くべきことでした。なぜなら「 $4+\epsilon$ 次元とか $4-\epsilon$ 次元とは何を意味するのか？」と問われると物理的にも数学的にも意味をなさないか

らです。しかし、私は数式に $\epsilon$ が現れる部分は、ダイアグラム上で任意にとれるただの数にすぎないことに気がつきました。 $\epsilon$ として複素数を選び $\epsilon \rightarrow 0$ の極限をとってもかまわないのです。

**杉本**：そのくりこみ可能性を証明するには、どのくらい時間がかかりましたか？

**トホーフト**：一つの問題は、自分自身が納得するのにどれくらいかかったかです。それは結構早くて、1年程度でした。確かに、次元くりこみ\*を導入した後、私はこれが答であり、それ以上の証明は必要ないと悟りました。ただし、それは厳密には数学的な証明といえるものではありません。実際上大事な点は、「その方法で全てのオーダー(次数)に対してうまくいく」ことを証明することでした。この問題を私たちは次のように表現しました。「任意の数までのループを含む全てのダイアグラムが次元くりこみを用いてくりこめること。」これにはさらにある程度の作業が必要でしたが、この問題を解決するためには、実際この方法が最善であるとすぐに決着がつかしました。

#### ヤン-ミルズ理論のベータ関数について

**杉本**：あなたは、グロス、ウィルチェック、ポリツァーの論文より前にヤン-ミルズ理論のベ

ータ関数が負であることをご存知だったと聞きましたが…

**トホーフト**：はい、そうです。ちょっと変な話ですが。勿論、私はその問題に物理的観点から取り組んでいました。物理学者として、私はこれらの場が実際上どのように振る舞うのか理解したかったのです。それには、この系が非常に短距離でどう振る舞うのか、また非常に長距離でどう振る舞うのかが非常に重要です。非常に早い時期、次元くりこみなどよりずっと前に、私は短距離の極限で起こることを自問しました。

**杉本**：次元くりこみより前にですか？

**トホーフト**：はい、短距離の極限で理論が十分に収束するなら、1ループあるいは高々2ループのレベルで証明するだけで良い訳ですから。もし理論が全く相互作用をもたなければ、それを知るだけで良く、それ以外は全て重要ではなくなります。そこで私は計算し、距離を短距離にスケールさせ、最終的なダイアグラムを得て、それがどのようにスケールするか知ることができました。私は「これで良い」と思いました。それは、現在「漸近的自由性」と呼ばれているものとして正しい符号もっています。私はその符号が現在の漸近的自由性を意味していることをはっきり見て取ること

\* 次元正則化を用いたくりこみ処方

ができました。ですから、私は多くの人々がそれを大きな問題としていたことを理解できませんでした。ビョルケン・スケーリングについて議論がありましたが、ビョルケンがスケーリングについて述べた際、彼が意味したことが私には良く分かりませんでした。人々は「ビョルケン・スケーリングは場の理論がうまくいかないことを証明するものだ」と言いました。私はなぜ彼らがそう言うのか理解できませんでした。なぜなら「理論をスケールさせてみると完全にうまくいく。何が問題なのか分からない。」と考えたからです。しかし、私が悟っていなかったのは、まだ誰も理論のベータ関数を計算したことがなかったということでした。

**杉本:** なぜそれを論文として発表しなかったのですか？

**トホーフト:** まず第一に、私はもっと切迫した問題があると考えていました。もっと切迫した問題とは、これは強い相互作用の理論であろうから、なぜクォークが閉じ込められているかを理解することでした。強い相互作用の本当の問題はクォークでした。なぜ自由粒子として現れないのだろうか？ 私は、この問題に対して半分は答えたと思いましたが、残りの半分は無限遠で何が起きるかで、勿論その方がもっとずっと難しかったです。フェルトマンはここで

「なぜクォークが出てこないのか理解しない限り、君は何もしたことにならない。論文にする価値さえない。」と言ったことで、私をやや間違った方向に向けたと思います。それは誤りでした。勿論私は論文を書くべきでした。私は理論を信じていましたが、正しくベータ関数を計算して、それが負であり、従って純粋なゲージ理論が強い相互作用の理論の非常に有力な候補であると理解していたのは私ただ一人であったということに気がついていませんでした。現在、私たちは誰でもこれがどのようにクォークの閉じ込めに導くのか知っていますが、当時は全くの仮説に過ぎませんでした。

**杉本:** なるほど。クォークもグルーオンも発見されていなかったにもかかわらず、QCDを受け入れるのは容易なことでしたか？

**トホーフト:** はい、なぜならクォークはカラー量子数をもって、全ての物理的状態はカラー変換で不変でなければならぬので、私はクォークが自由粒子として出てくる理由は全くなかったと思っています。逆に、「なぜ自由なクォークが存在しなければならないのだろうか？」と問うこともできます。「それは存在しない。」が答です。私は理論が自由なクォークを含む必要はないということを基本的に理解したと考えました。し

かし、ここで問題は何かクォークを結びつけているのかということです。もし物理的状態、つまり理論の漸近的状态を理解していないなら、どうすればそのような理論がユニタリな理論であると分かるでしょうか。その問題は、基本的には幾つかの洞察によって解答が与えられました。その一つは、渦糸が存在するという事実、そして、それを安定に保つ機構が超伝導体のマイスナー効果と呼ばれる、モノポールの閉じ込めを引き起こす機構に対して双対な機構であるという事実でした。クォークを閉じ込めているのは「双対マイスナー効果」で、それで全てが理解できるということが徐々に認識されてきました。

もう一つは、漸近的状态が自由なクォークではなく、ジェットであるという、ジェットの物理でした。ジェットはハドロンの粒子で形成されていて、高いエネルギーで飛び出してきた単独のクォークのように振る舞います。クォークはジェットとして姿を現し、グルーオンも同様です。ですからクォークジェットとグルーオンジェットがあります。こうしてユニタリ性が回復し得ることが理解されました。しかし、こういったことは非常に複雑です。適当でいいだろう、というのではなく、もっと厳密な数学的取り扱いが必要です。

**杉本:** 現在、QCDの閉じ込めは十分に理解されていると思われませんか？

**QCDの閉じ込めは、物理学者には受け入れられるが数学者には不満足**

**トホーフト:** 物理学者としては、私はこれらの組み合わせは十分に受け入れられるものであり、それが全てを説明すると思います。しかし、数学者だったら、「この状況はまだ不十分だ」と言うでしょう。QCDは量子電磁力学の精度と同じレベルに達してはならず、その一部が閉じ込めの問題であって、現在では「質量ギャップ問題」と呼ばれています。それは「純粋なゲージ理論、QCDは質量ギャップを生成するか？」という問題で、そこからすぐに次の問題が派生します。「質量ギャップを計算できるか？」「QCDで一番軽い粒子が何か理解できるか？」答は、基本的にパイ中間子がQCDの一番軽い粒子ですが、私たちはそれを数学的に厳密に証明できるでしょうか？ また、そもそも質量ギャップとは何かを数学的に定義できるでしょうか？ 仮に理論をどのように定義するか、また問題をどのように定義するか、分かっていたとしても、果たして理論のもつこの性質を証明できるか、ということが問題です。

奇妙なことに、現在私たちが

できる最善の方法はその問題を数値的に証明することなのです。格子の上に理論を置いて、大きなコンピューターを用いてシミュレートします。できるだけ細かい格子をとると、正しく物理学者全員が期待するように理論が振る舞うことが分かります。ですから問題はなくて、「数学的に全て証明可能だ。最初の10桁がこの定理に従うのだから、どこまでもこの定理に従うに違いない」と物理学者は言うでしょう。しかし、数学者はこれを証明とは受け入れないでしょう。当たり前です。物理学でもやはり問題ですが、私はそれを観念的な問題と考えます。QCDがどのように振る舞うのか理解するためになら、私たちにその問題を解くことは必要ありません。しかし、数学的な観点から問題が解かれる必要があることは良く理解しています。恐らく数学的証明の重要性は、問題を数学的に証明したとすれば、より速く、より正確に計算する新しい途も見つかるかもしれないということです。質量ギャップの存在を数学的に証明することは、成功すれば全てを精密に計算できるので時間の浪費にはならないでしょう。

**杉本：**いつかその問題が証明されるとお考えでしょうか？

**トホーフト：**そう思います。必要なのは、いわば無人島の修道院に本とコンピューターとラッ



ブトップとインターネットと共に住み着いて、その証明のためだけに取り組む修道士です。何百個もの微小量 $\epsilon$ と $\delta$ があって、それらを正しい位置に置くことが必要で、そうすれば証明できると思います。私は、これが私たちの物理理論の性質であると強く信じています。私たちは皆、理論が正しいと信じており、従って証明可能であると信じていますが、それは非常に困難でしかも非常に報われない仕事となるでしょう。なぜなら、20年後に修道院から現れた修道士がこう言うとした。「ご覧下さい、ついに私はQCDの存在を証明しました。」すると、物理学者全員が彼を見つめて、こう言うでしょう。「何が問題なのですか？ あなたはなぜこの研究をずっと続けてきたのですか？ 私たちはQCDが立派な理論であると前から知っていました。」ですから、彼は報いられないでしょう。たとえそれが非常に重要な数学的問題だったとしても、それで彼がノーベル物

理学賞を受賞することは多分ないでしょう。

#### 1/N展開と弦理論

**杉本：**なるほど。次は1/N展開について伺いたいのですが。どうしてあなたは散乱振幅を1/Nに関して展開するアイデアを得たのですか？

**トホーフト：**当時私はCERNのフェローでしたが、こういった新しく素晴らしいアイデアが続々と浮かんできました。その一つが、正に今言った「QCDのための良い近似法を得るにはどうすればよいか？」という問題でした。小さい値をとるパラメータがQCDにあるだろうか？ 物理的にはそれほど小さくはないかもしれないが、もし非常に小さくチューニングできたら正確に計算できるような、そういうパラメータがあるだろうか？ もしパラメータの値がそれより大きければ理論はやや正確さを欠きますが、それでも系統的に展開できます。全てのパラメー

タの中で、勿論1/Nが浮かび上がり、そこで私はこう自問します。「ラーズNの理論は任意のNの理論とどのように違うのだろうか？ Nが無大の極限はどのようなになるのだろうか？」私はダイアグラムに何らかの単純化が起きることが分かっていました。「それはどういう種類の単純化なのだろうか？」私は答を見出しましたが、残念ながらその答は、Nが無大の極限でさえ得られるダイアグラムはまだ非常に複雑で厳密に計算することはできない、というものです。ラーズN展開を明示的に行うことはできません。結合定数についての級数展開はあらゆる平面的ダイアグラムを発生させ、それらは複雑すぎて解けません。QCDのラーズNダイアグラムを解くためにある種の内部方程式を得る何らかの方法がないか、私は随分一生懸命探しましたが、これまでのところ、うまくいっていません。

勿論、平面的ダイアグラムしか残らず、それが弦理論の世界

面ダイアグラムに非常によく似ているため、この問題は非常に興味深いものです。その時点までに、私たちはクォークを結びつける渦糸があることを理解していました。ですから、これは原理的には渦糸がどこから現れるのか理解するための完璧な方法となるでしょう。

**杉本**：この $1/N$ 展開は弦理論の摂動展開に似ています。

**トホーフト**：その通りです。

**杉本**：それを弦理論の定式化に使うことができると考えられましたか？

**トホーフト**：ええ、確かにそれは私たちの期待でした。それはまた、弦理論の正当さを立証するであろうと私は期待していました。どうして全ての双対共鳴模型が強い相互作用に対して非常にうまくいくのか、それが説明してくれるでしょう。実際、私は $N$ が無大の極限でのQCDを理解したいという私の問題を弦理論が解決すると期待していました。多分、それは閉じた形で書き表すことのできる理論です。要点は、 $1/N$ が0の極限、あるいは $N$ が無大の極限は、メゾンもバリオンも相互作用しない極限です。それは相互作用をもたない理論で、従って厳密に解けるのではないかと考えるかもしれません。相互作用をもたない理論は基本的に自明です。必要なのは質量スペクトルを知ることのみです。私は

弦理論でこれができるはずであると考えました。多分、 $1/N$ 展開はある弦理論と等価でしょう。私は実際そうであると分かることを期待していました。しかし、何度もやってみましたが、QCDの $1/N$ 極限と一致する弦理論を特定することはできませんでした。

**杉本**：弦理論は量子重力の有力な候補とお考えですか？ それとも…

**トホーフト**：個人的には、弦理論は量子重力に対する非常に優れた、また興味深い数学的アプローチですが、十分ではないと考えています。物理的にはもっと何かがあるはずで、物理的な問題と数学的な問題を区別しなければいけません。数学的には、弦理論は非常に興味深い数学的枠組みです。量子重力を理解しようとするには非常に真剣に受け止めなければなりません。物理的には究極の根本的方程式は弦理論ではないと私は考えます。しかし、この点では私は少数派です。

**杉本**：あなたは、ブラックホールのエントロピーについての考察からホログラフィーのアイデアを最初に提案されました。その後、マルダセナや他の人たちが弦理論の観点でこのアイデアを改良しました。この進展をどのようにお考えですか？

### プランクスケールにおける量子重力の物理的自由度をどうやって理解するか

**トホーフト**：彼らは私が全く考えていなかった方向に行っていました。彼らは双対性を用いていますが、ホログラフィーと全く同じものではありません。双対性は面白いと思いますが、私たちの物理的問題に対する答えにはならないでしょう。助けにはならないと思います。ある問題を別の問題に関係付けます。ホログラフィーは、ある異なった理論が同値であるという意味で用いられています。しかし、それは全く私の問題ではありませんでした。問題は、量子重力の物理的自由度を、特にプランクスケールでどうやって理解するかということです。私はプランクスケールではビットとバイトだけが情報として得られると確信しています。物が存在する容れ物としての連続体は、もはや存在しません。それでも弦理論は実数と連続体で考えるべきであると示唆しています。私は、今や、実数が全ての究極的理論の基本的変数であるとは、もはや信じない段階に達しました。私は、究極的理論は基本的にビットとバイトだけに基づくものであろうと考えます。しかし、それがどのように機能するのか理解することは、今、大問題です。私たちはそれを理解していません。

さて、ホログラフィーは、自由度が実際は空間で決まる自由度より小さいことを表します。それは、基本的に表面の自由度に対応します。私は、ホログラフィーの物理的な実体は、弦理論やホログラフィー、AdS/CFT対応、等々について通常聞くこととは違うと考えます。ホログラフィーが、自由度は時空の体積で決まるものではなく、表面の自由度であることを示すその物理的理由は、量子力学の根本的な起源そのものにあると考えます。もっともな理由があるはずで、私が見つけられる理由は、情報量損失です。要点は、ある体積の空間内に存在する物理的対象に関する全情報は、既にその空間の表面に見出されるはずであるということです。ある時空の領域を考えてみましょう。その領域は表面で囲まれています。その表面で起こる全ての物理的現象を観測すれば、実際は内部で起きていることを再構成できます。これは変に聞こえるかもしれませんが、ちょっと考えてみれば、変ではないと分かります。なぜなら、重力場はガウスの定理に従い、それは表面における重力場を知ればその内部に存在するエネルギーの大きさが正確に分かることを意味しています。エネルギーの大きさが分かれば、ハミルトニアンが分かります。厳密に言うと、重力に対するガウスの定理から、

どんな表面であっても表面における重力場を正確に知れば、原理的に全系のハミルトニアンを得たことになります。それは、内部も理解されることを意味します。

それは、勿論非常におかしな状況で、私のやり方で行わないと量子重力は常識外れの理論になってしまうことを意味します。私のやり方とは、量子力学の理解そのものを再評価しなければならないということです。もし量子力学を決定論的理論で置き換えれば、私はホログラフィック原理をもっとずっと良く理解できます。それは、実際は量子理論が全ての内部情報をそっくりそのまま保つものではないということを示します。情報は散逸します。表面と、それを通過して散逸した情報を考えてご覧下さい。すると、もし表面上でデータを知れば、その内部がどのように時間発展するか予言できるために必要な全情報もっていることになります。それは直感に反すると思いますが、今私には、量子力学の究極的理論でこれがどのようにして可能になるか、いろいろなアイデアがあります。

#### 最良の理論は実験的事実を説明する理論

**杉本**：あなたは大変多くの独創的な研究をされてきました。中でも一番気に入られているのは

何でしょうか？

**トホーフト**：私は今でも研究者生活の最初の数年間のこと、つまり、ゲージ理論のくりこみについて、次元くりこみについて、またヒッグス機構がくりこみで果たす役割について、アイデアを得たことを非常に誇りに思っています。磁気単極子を思いついたのは非常に幸運でした。1/N展開もそうでしたが、また、インスタントンと、理論の明示的な対称性の破れにおけるその役割についても幾つか非常に良いアイデアを得ました。標準模型はラグランジアンを見るとバリオン数は保存されなければならないように見えますが、実際はバリオン数を保存しません。インスタントン効果を考慮すると、バリオン数は保存されないことが分かります。これは非常に深遠で美しい発見でした。これらは本質的なことであり、従って私の仕事のうちではベストであると思います。

しかし、別の意味で、まだいろいろ証明しなくてはならないことはありますが、後の重力と量子力学についての仕事も誇りに思っています。重力と量子力学について、誰とでも喜んで議論しますが、問題を解決するような非常に優れたアイデアを出したわけではありません。私には、まだ量子重力は私たちが理解していない大問題で、それを根本的に進歩させたいと思

います。勿論、物理学は結局のところ実験科学であることを理解するべきです。考え得る最良の理論は、実験的に観測されている事実を証明あるいは説明する理論です。私が知りたいことは、なぜ物理定数とその値をもつのか、なぜ陽子と電子の質量比がその値なのか、等々、そのような自然の定数がどこから決まるのかを理解することです。それはまだできていません。それがまだこれからすべき仕事が多々あると私が考える理由です。

#### 科学者を志す若者へのアドバイス

**杉本**：分かりました。科学者になりたいと思っている若い人たちへのアドバイスをいただけないでしょうか。

**トホーフト**：科学はいまだに極めて興味深い活動です。科学者になれば、何かを発見するでしょうが、普通はとても小さいことです。もし何か大きなことを見つけたら、勿論それはもっと素晴らしい経験です。しかし、何かの課題について研究する場合、その研究が、重力を解き明かしたり、万物の理論を発見したり、あれこれを理解したりするような、私たちが真に興味をもつ究極的な問題にどのように関係しているかを知りたいと自覚する必要があります。私たちはこういった問題に一晩で答える

ことはできないし、また現在の若い学生たちがそのような問題に一晩で答を見つけることは多分ないでしょう。しかし、彼らは、答を得るために何歩か前進することに貢献するかもしれません。ただし、こういった大きな問題が何であるかを理解している場合にのみ貢献できるのです。あなたたちは大きな問題に取り組むべきです。幸運に恵まれ、困難な問題に取り組むことを恐れなければ、何か興味深い答を見出すかもしれません。

もう一つのアドバイスは、極めて批判的であれということですが、特に、自分自身の結果に批判的でなければいけません。それまでに見出したこと、あるいは理解したことに満足してはいけません。常に「これは理解したのだろうか?」「あれは理解したのだろうか?」「なぜこの答は違う方法で定式化できないのだろうか?」といった、もっと詳細にわたる疑問をもつべきです。もし自分に非常に批判的に問いかければ、多分、何か新しく興味深い答を見出すことでしょう。

**杉本**：予定した時間がきたようです。お話しできてとても楽しかったです。

**トホーフト**：ありがとうございました。

**杉本**：ありがとうございました。

# 物性物理とAdS/CFTに関する国際ワークショップ

レネ・マイヤー René Meyer

Kavli IPMU 博士研究員

1997年に、超弦理論から、場の量子論と重力の間の「ゲージ/ストリング双対」(あるいはゲージ/重力双対、AdS/CFT 対応)と呼ばれる新しい双対性がもたらされましたが、この双対性がある種の強結合系の普遍的と見える特徴を捉えていることが速やかに認識されました。当初はQCDに適用されて成功を収めましたが、最近ではこの双対性を、例えば高温超伝導体に存在する電子状態のような凝縮系の強相関状態に応用する研究が始まりました。逆に、現実存在する系を、重力、特にブラックホールのモデルとして用いることができるかもしれません。この方法を「アナログ(擬似)重力」と呼んでいます。これらの結果はこれまでのところ非常に有望で、超弦理論、物性物理学、重力の各研究者コミュニティの興味を惹きつけています。このワークショップは、これら3つの研究者コミュニティから主要メンバーを招き、この方向の研究交流を促進し、新たな共同研究に向けての刺激となることを目的として、Kavli IPMUと東大物性研究所の共催により、2015年5月25日～29日にKavli IPMUで開催されました。著者および中村 真(中央大学/東大物性研)、大栗博司(Caltech/Kavli IPMU)、押川正毅(東大物性研)、山崎雅人(Kavli IPMU)、およびHongbao Zhang(VUB Brussel)が組織委員を務めました。

ワークショップのプログラムは、国際的に名の通ったエキスパートによ

る20の1時間講演で構成され、各講演者はそれぞれが研究しているトピックスについて優れたレビューを行うと共に、最先端の研究について発表しました。ワークショップには計122名が参加し、内80名は国内からの参加者でした。また、ポスター形式およびポスター展示により、国内外からの参加者33名がそれぞれ研究発表の機会を得ました。このワークショップでは、次の3つのトピックスに集中して議論を行いました：(1) AdS/CFT対応と非フェルミ液体の現象論、および高温超伝導、(2) 非平衡物理とAdS/CFT対応、(3) 物質のトポロジカルな状態とエンタングルメントエントロピー。(1)については、主として高温超伝導体の物理のどのような側面がAdS/CFT対応に関係するのか、またそれを記述する重力理論は何かを巡って議論が行われました。(2)についての非常に興味深い洞察は、AdS/CFT対応において、ブラックホールが凝縮系から知られている

非平衡動力学と多くの特徴を共有するということでした。最後に(3)については、エンタングルメントエントロピーを物質とゲージ理論のトポロジカルな状態を特徴づける手段として、また一般的にゲージ/重力双対についての理解を深めるための方法として、両面について議論が行われました。

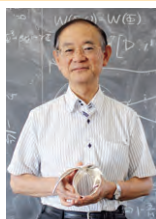
このワークショップは今年行われたこの分野の重要な研究集会の一つでした。そのユニークな点は、物性物理学の研究者と超弦理論の研究者の参加者数がほぼ半々であったこと、加えて重力理論の研究者も参加したことで、これがワークショップを非常に成功させたと言えます。本ワークショップの開催資金については、Kavli IPMU、東大物性研、および、EU ESF HoloGrav networkから支援を受けました。また、ワークショップの運営にご尽力いただいたKavli IPMU及び東大物性研の事務スタッフおよび東大物性研のボランティアに感謝します。





## 野本憲一主任研究員、2015年のマルセル・グロスマン賞を受賞

Kavli IPMU 主任研究員の野本憲一さんが「大質量星進化における連星系への役割に関する理論的予測」により、マルセル・グロスマン賞を受賞しました。この賞は1985年に創設されましたが、その趣旨は、



受賞者に贈られた銀製の彫刻、TEST (Traction of Events in Space-Time) を手にする野本憲一さん。

アインシュタインが一般相対論を構築するに当たり、チューリッヒ工科大学での同級生で友人の数学者、グロスマンからリーマン幾何学について助言を得たことから、その貢献を讃えるものです。同じく彼の名を冠し、一般相対論、重力、及び相対論的場の理論における理論及び実験の最近の発展を議論するため、3年に1度開催されるマルセル・グロスマン会議に合わせ、当該分野の研究で功績を挙げた研究者が表彰されます。今回の授賞式は、ローマ大学で開催された第14回マルセル・グロスマン会議の会期中の2015年7月13日に行われました。

## ノーベル物理学賞受賞者のヘーラルト・トーフトさんがKavli IPMUを訪問

電弱相互作用の量子構造の解明により、1999年にノーベル物理学賞を受賞するなど、理論物理学分野での数々の優れた業績で知られた、オランダのユトレヒト大学名誉教授、ヘーラルト・トーフトさんがKavli

IPMUを訪問し、4月16日のコロキウムで「The Large Hadron Collider and New Avenues in Elementary Particle Physics (大型ハドロンコライダーと素粒子物理学の新たな道筋)」と題し講演されました。

トーフトさんは、素粒子の標準理論の発展の歴史についてヒッグス粒子を発見した欧州合同原子核研究機構(CERN)のLHC加速器と絡めて説明し、さらに素粒子物理学にお残された謎の解明に向け、新しい物理につながる新粒子発見など、エネルギーとルミノシティが増強され、今年再稼働を始めたLHCの今後の成果に対する大きな期待を示されました。

なお、本誌40-47ページに京都大学基礎物理学研究所教授の杉本茂樹さんによるトーフト教授のインタビューが掲載されています。併せてご覧下さい。



コロキウムで講演するヘーラルト・トーフトさん。

## CERNでのヒッグス粒子発見のドキュメンタリー映画“Particle Fever”上映会開催

2015年4月5日に、Kavli IPMU主催による映画“Particle Fever”の上映会が研究棟の大講義室を会場として開催され、100名弱の来場者が鑑賞しました。

“Particle Fever”はro\*co films international が配給する、商業映画としても大変評価の高いドキュメンタリー映画です。縦糸にCERNを舞台としたヒッグス粒子発見までの5年間の6人の物理学者の物語が据えられ、横糸としてサイエンスと芸術の動機が共に好奇心にあることに光が当てられます。両者は“まだ我々が持たないものを発見

しようとし、人間を人間たらしめている”と、その存在意義が力強く語られます。この度、カリフォルニア大学バークレー校教授でKavli IPMU教授を併任する野村泰紀さんの監修のもと、ro\*co films internationalの了解も得てKavli IPMUが独自に日本語字幕を作成し、上映の運びとなりました。

上映後のアフタートークには、本作のプロデューサーであり主要登場人物の1人でもあるジョンズ・ホプキンス大学教授のデビッド・カプランさんを迎え、制作動機から苦労話まで映画の舞台裏をお聞きしました。一方カプランさんの通訳も兼ねた野村さんはユーモアと個人的見解も加味した『超訳』で会場を大いに賑わしました。



野村泰紀さん(左)とデビッド・カプランさん(右)。



上映後、野村さんとカプランさんを囲んで懇談する参加者。

## ICRRとの合同一般講演会「宇宙を読み解く」開催

2015年4月18日に千葉県柏市のアミューゼ柏にて、Kavli IPMUと東京大学宇宙線研究所(ICRR)が共催する第12回合同一般講演会「宇宙を読み解く」が開催され、約400名の来場者が会場を埋め尽くしました。

講演は、まずICRR准教授の三代木伸二さんが「アインシュタインからの最後の宿題～重力波をつかまえろ!」と題し、重力波研究の意義および重力

波を直接検出する実験について紹介しました。続いてカリフォルニア大学バークレー校教授でKavli IPMU教授を併任する野村泰紀さんが「マルチバース宇宙論～最新物理理論の語る宇宙の始まり、終わり、そして外側」と題し、宇宙が複数存在すると仮定する『マルチバース宇宙論』について、哲学的な側面や、これまでの物理学を否定する側面にも触れつつ、熱く語りました。



講演する野村泰紀さん。

### Kavli IPMU 神岡分室でInterAction Collaboration Meeting開催

4月20日と21日の2日間、Kavli IPMU 神岡分室においてInterAction Collaboration Meetingが開催されました。この会議は、欧州合同原子核研究機構(CERN)やフェルミ国立加速器研究所(FNAL)など世界中の素粒子物理学研究所の広報担当者が一堂に会し、情報共有や広報の在り方を議論する場で、今回は10機関からの17名に加えて、オブザーバーとして東京大学宇宙線研究所、理研など3機関から4名が参加しました。会議では、今回ホスト機関となったKavli IPMUから村山機構長が機構の研究活動について、広報担当者が昨年の事例を中心にアウトリーチ活動について紹介を行い、さらに、Kavli IPMU 神岡分室や宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設に所属する研究者の案内によりスーパーカミオカンデ(Super-Kamiokande)、イーガズ(EGADS)、エクスマス(XMASS)、カムランド(KamLAND)、カグラ(KAGRA)の5つの研究施設見学も実施されました。



会議風景。



イーガズ(EGADS)を見学する参加者。

### 藤原交流広場でKavli IPMU教職員のアートプロジェクト開催

2015年5月12日から6月9日まで、Kavli IPMU教職員の親睦団体Kavli IPMU Arts Societyが主催する“Science and Everyday Life”がKavli IPMU藤原交流広場にて開催されました。このプロジェクトは、テーマにそった画像を教職員が自由に貼り出すものです。5回目となる今回のテーマは“Order”で、日常や旅先の写真、幾何学模型の写真、画像を独自に組み合わせた作品、数式、テキスト、発表論文から抜粋した図形等、様々な画像27点が壁面に展示されました。

5月29日には村山機構長と春山事務部門長の寄付によるフリードリンクのパーティーが開催され、作品を眺めながら、集まった教職員は飲み物を片手に談笑を交わし、普段とは少し違うKavli IPMUの夜は更けていきました。



歓談するKavli IPMUの教職員。



壁面に張り出された作品を鑑賞。

### Kavli IPMUで数学のジャーナリスト・イン・レジデンスを実施

2015年5月14日から16日まで、京都大学理学研究科教授の数学者、藤原耕二さんが運営し、日本数学会が協力するJournalist in Residence (JIR) in Mathematicsプログラムの一環として、産経新聞社の記者の前田武さんがKavli IPMUに滞在しました。

数学のJIRプログラムは、ジャーナリストなどが大学の数学教室や数学関連の研究機関に滞在し、自主的な取材をする機会を提供するもので、2010年から運営されています。これまでに延べ30人以上の参加があり、参加者の職業も新聞記者を始めテレビのディレクター、アーティスト、弁護士など多岐にわたります。

前田さんは数学者へのヒアリング、ティータイムやセミナーへの参加など3日間をKavli IPMUの数学者と共に過ごしました。数学という学問に新たに触れ直す稀有な機会となったようで、「大変貴重な機会。ジェットコースターに乗っているようだった。ここでの経験をうまく咀嚼しぜひ社会に伝えていきたい。」と述べています。

2015年6月29日には同様に米国のフリージャーナリスト、George MusserさんをKavli IPMUに迎えました。僅か1日の滞在でしたが非常に刺激を受けた様子で、「様々なKavli IPMUの研究者の話聞いて非常に刺激を受けた。頭がパンクしそうだ。」と述べています。

今後もKavli IPMUでは受け入れを継続していく予定です。

## 「サイエンスカフェ宇宙2015」始まる

「サイエンスカフェ宇宙」は、『数学と物理で迫る宇宙の謎』を主題とし、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7年目となります。今年の「サイエンスカフェ宇宙2015」は、多摩六都科学館で6月と7月に全部で3回行なわれ、各回異なる分野の研究者が登場します。第1回目となる今回は6月21日に行われ、会場が中高生を主体とする40名以上の参加者で一杯となり、Kavli IPMUの鈴木洋一郎教授が「ダークマター（暗黒物質）の正体を探る」と題し、丁寧にわかりやすくダークマターとは何か、そして自身が携わるその正体に迫る実験について話しました。普段の講演とは異なり、終始お茶とお菓子で寛いだ雰囲気の中で行われた講演を来場者は満喫した様子でした。



講演する鈴木洋一郎さん。

## 人事異動

### 再任

2010年4月1日から2013年3月31日まで東京大学特別研究員（日本学術振興会特別研究員）としてKavli IPMUで研究した西道啓博さん



西道啓博さん

がパリ天体物理学研究所（IAP）に滞在後、2015年4月1日付でKavli IPMU助教に採用されました。西道さんは、「Kavli IPMUの一員として戻ってこられたことを大変うれしく思います。私は宇宙大規模構造の重力進化の基礎研

究や、銀河の空間分布から宇宙論的情報を引き出す応用研究を行ってきました。Kavli IPMUでは、SuMIRe計画やその先の次世代観測を舞台とした『ビッグデータ宇宙論』の確立を目指し、計算機科学、統計学を駆使して理論と観測の橋渡しをしていきたいです。」と抱負を述べています。

### 兼務終了

カリフォルニア大学バークレー校教授の野村泰紀さんは2015年1月1日からKavli IPMU教授を兼務していましたが、2015年5月6日で任期満了により兼務を終了しました。

プリンストン大学教授のEdwin L. Turnerさんは2015年3月6日からKavli IPMU教授を兼務していましたが、2015年6月30日で任期満了により兼務を終了しました。

### 転出

Ivan Chi-Ho IpさんがKavli IPMU博士研究員から京都大学理学研究科特任助教に転出しました。在任期間は2012年8月16日から2015年5月15日でした。

西野玄記さんがKavli IPMU博士研究員から高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所特任助教に転出しました。在任期間は2013年4月1日から2015年4月30日でした。

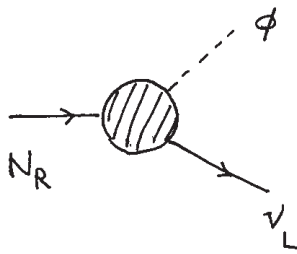


## レプトジェネシス (宇宙の物質創生)

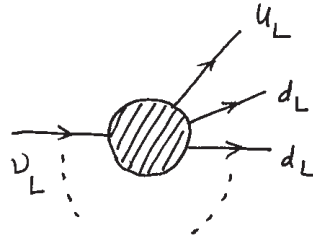
福来 正孝 Kavli IPMU 教授

宇宙のバリオン生成には、バリオン数保存の破れが必要です。しばらくの間研究された最もポピュラーなアイデアは、素粒子の相互作用の大統一を利用するものでした。実は、素粒子の標準模型の範囲内でも量子揺らぎのため、原理的にはバリオン数は破れています。この効果は、巨大な指数関数的ファクターによる抑制のため非常に小さく、自然の状態では何の影響も及ぼさない単なる観念的なものと考えられていました。しかし、やがて電弱相互作用スケールより高い温度ではこの抑制が解消されることが理解されました。同時に、これは大統一によるバリオン数生成には悪い報せでした。この場合生成バリオン数と生成レプトン数は等しいのですが、折角生成されても全部消し去られてしまうからです。

この状況を救う一つのアイデアは、宇宙初期にレプトン数を生成するものです。もしニュートリノが質量をもち、かつマヨラナ型であるならば、これは自然な可能性です。超重マヨラナニュートリノの崩壊がレプトン数を生成し、宇宙の温度が電弱エネルギースケールより高い時代にレプトン数の一部がバリオン数に転換されます。現在は、もしニュートリノの質量が0.1 eVかそれ以下の場合はこのシナリオが成り立つであろうと考えられています。



$$\#L \neq 0$$



$$\text{equil. for } 10^2 < T < 10^{12} \text{ GeV}$$

$$\Delta(B-L) = 0$$

$$\#B = \frac{28}{79} \#(B-L) = \frac{28}{51} \#L$$