

# 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

TODIAS Today Institutes for Advanced Study

The University of Tokyo  
東京大学国際高等研究所

Feature Impact of Large-Mixing-Angle Neutrino Oscillations

Interview with Kenji Fukaya



22

No.

June 2013

# Kavli IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
Changing of the Guard
- 4 **Feature**  
Impact of Large-Mixing-Angle Neutrino Oscillations  
Taizan Watari
- 12 **Our Team**  
Mark Hartz  
Masahito Yamazaki  
Hanindyo Kuncarayakti  
Mitsutoshi Fujita  
Miho N. Ishigaki  
Sho Iwamoto  
Kunio Kaneta  
Lluis Marti Magro  
Haruki Nishino  
Ryoichi Nishio  
Yoshiki Oshima  
Shun Saito  
Yefeng Shen  
Norihiro Tanahashi
- 18 **Interview** with Kenji Fukaya
- 26 **Workshop Report**  
MaNGA Focus Week  
Kevin Bundy
- 28 **Special Contribution**  
Kavli IPMU Arts Society  
Aya Tsuboi
- 32 **News**
- 36 **Properties of the Higgs Particle**  
Mihoko Nojiri

## Japanese

- 37 **Director's Corner** 村山 斉  
衛兵の交代
- 38 **Feature**  
ニュートリノ振動の大角度混合がもたらした衝撃  
渡利泰山
- 46 **Our Team**  
マーク・ハーツ  
山崎 雅人  
ハニンデョ クンチャーロヤッティ  
藤田 充俊  
石垣 (新田) 美歩  
岩本 祥  
金田 邦雄  
ルイス・マルティ マグロ  
西野 玄記  
西尾 亮一  
大島 芳樹  
斎藤 俊  
沈 焯鋒  
棚橋 典大
- 52 **Interview** 深谷 賢治教授に聞く
- 60 **Workshop Report**  
MaNGA フォーカスウィーク  
ケビン・バンディ
- 62 **Special Contribution**  
Kavli IPMU Arts Society  
坪井 あや
- 66 **News**
- 68 **ヒッグス粒子の性質**  
野尻 美保子



Taizan Watari is an Associate Professor at the Kavli IPMU. He graduated from the Department of Physics, The University of Tokyo in 1998. He received a Doctorate in Physics from the School of Science, The University of Tokyo in 2003, and became a JSPS (the Japan Society for the Promotion of Science) postdoctoral fellow. After working at the University of California, Berkeley, and then the California Institute of Technology, as a researcher, he became an Assistant Professor at the School of Science, The University of Tokyo in January, 2007. Since January 2009, he has been an IPMU Associate Professor.

渡利泰山：Kavli IPMU准教授。1998年3月東京大学理学部物理学科卒業。2003年3月東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士の学位を取得。2003年4月より日本学術振興会特別研究員。カリフォルニア大学バークレー校研究員、カリフォルニア工科大学研究員を経て2007年1月に東京大学理学系研究科助手（同年4月より助教に呼称変更）、2009年1月よりIPMU准教授。



## Changing of the Guard

Director of Kavli IPMU

Hitoshi Murayama

When IPMU was launched back on October 1, 2007, there were no scientists on site. The very first scientist that arrived a half month later was our founding Administrative Director Kenzo Nakamura. He stepped down from his role this April.

Kenzo did an amazing job. He took the requirements of the WPI program very seriously, which called for interdisciplinary research environment, a significant international membership, and minimum administrative duties for scientists. Even just one of them poses a significant challenge. He quickly assembled an army of bilingual administrative staff members to aid non-Japanese scientists to settle down and start working quickly and efficiently. He negotiated hard with the University to create flexible employment schemes. In fact, without his persistent work to overcome many challenges with the system, I could not receive an appointment letter from then President Komiyama, and most of us would not be here today! And he even translated my rusty Japanese to our staffs.

Kenzo was a renowned experimentalist in neutrino physics. He played a major role to realize the first long-baseline neutrino oscillation experiment in the world called K2K, which sent a beam of neutrinos from KEK to the Super-Kamiokande detector 250 km away. His consistent work on Particle Data Group demonstrates his service spirit. It is rare to find such a combination of scientific prowess, service spirit, political skill, careful management, and strong devotion. We all owe him a lot.

Actually, Kenzo hasn't left us. He actually still

comes in every day, editing this by-now very popular Kavli IPMU News. Whenever we are not sure about what to do, he is the wise man to advise us.

But what about his successor? Very fortunately, we discovered another such rare breed. Tom Haruyama also came from KEK, and he is a well-known researcher in cryogenics. He contributed to many important experiments in fundamental science, such as XMASS looking for dark matter and KAGRA trying to detect gravitational wave from merging black holes. He has a significant management experience, having served as the Deputy Director of the Institute of Particle and Nuclear Studies within KEK and chaired the Cryogenics Society of Japan. And he is such a joyful person!

We are very lucky to be supported by such amazing individuals. Thanks to them, we enjoy our incredible research environment with peace of mind.

Kenzo compiled yet another issue of Kavli IPMU News that is simply a joy to read. This one features Kenji Fukaya, distinguished mathematician on symplectic geometry, discussing connection between mathematics and physics with our PI Kyoji Saito. Taizan Watari describes his research on flavor physics that involved our mathematician Yukinobu Toda. You'll enjoy this issue. Thank you, Kenzo!



(Left) Kenzo Nakamura  
(Right) Tom Haruyama

# Impact of Large-Mixing-Angle Neutrino Oscillations

## 1. Atoms, Electrons, and Mass

Everything that we encounter daily is made of atoms. There are as many as some hundred species of atoms, all having different properties. These different species of atoms are named hydrogen, helium, carbon, oxygen, iron, copper, silver, gold, uranium, etc. It is known that all species of atoms have a structure depicted in Fig. 1, namely, electrons are circulating around the nucleus which comprises tightly packed protons and neutrons; the different properties of different species of atoms such as carbon, hydrogen, and iron solely originate from the different number of protons in the respective nucleus. The properties of various materials such as chemical changes and superconductivity can be understood based on the properties of these atoms, nuclei, and the electron, and in particular, based on the properties of the positively charged protons and the negatively charged electrons.

Why, then, the protons and neutrons are tightly packed on the one hand, and the electrons circulate around them on the other hand? Actually, the radius of the nucleus that comprises the protons and neutrons is about five orders of magnitude smaller than the electron's radius of activity. Suppose that the size of the nucleus is enlarged to 1 cm, then the electron's range of activity would be 1 km. Where

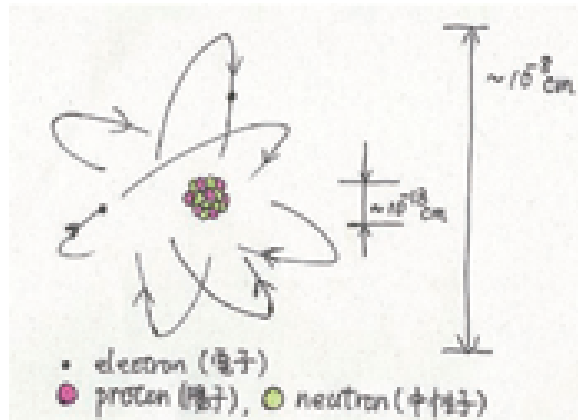


Figure 1. A conceptual diagram showing an atom and a nucleus inside it. In this figure, the size of the nucleus is illustrated as if it were about 1/10 of the size of the entire atom, instead of the actual ratio of 1/100,000.

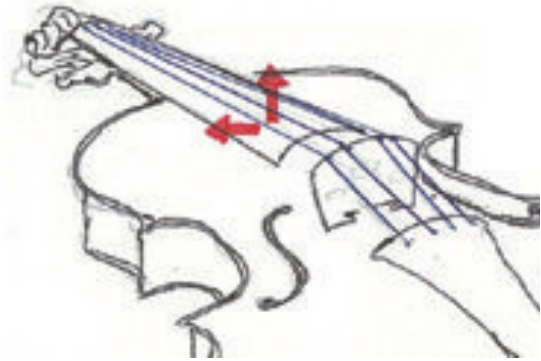
does this significant difference come from?

Hideki Yukawa's meson theory in 1934 was motivated to find, within the framework of quantum mechanics, the mechanism that enables the nucleus, which comprises a number of protons and neutrons, to be tightly packed. Meson theory claimed that if there should be a new particle which was yet unknown at that time, it would do the job, and the size of the packed nucleus was determined by the new particle's mass. It was expected that the new particle's mass had to be about 200 times that of the electron for the radius of the nucleus to be five orders of magnitude smaller than the electron's radius of activity.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The reason why the meson's mass should be 2, and not 5, orders of magnitude heavier than the electron's mass is that the value of the "strength of the electromagnetic force" is also to do with the ratio of the nucleus's radius to the electron's radius of activity.



Figure 2. The sea wave is described by a single number—the “wave height”—at each point on the surface of the sea. On the other hand, the movement of the chord of a violin is described by the two numbers at each point along the chord, namely, “the position (or deviation) in the two directions shown by the red arrows in the figure.” Therefore, it is described by the wave having 2 degrees of freedom.



## 2. Discovery of the Muon: “Who Ordered That!?”

An orthodox method to prove the validity of meson theory is to show the existence of the new particle that was called the *meson*. With the experimental technique in those days, it was difficult to create the mesons in the laboratory. There was a hope, however, that the mesons could be found among high-energy particles coming down from the top of the atmosphere. Therefore, experiments to observe the properties of the fast particles coming down in the atmosphere were conducted in the latter half of the 1930’s. Strangely enough, experiments by Anderson-Neddermeyer, Street-Stevenson, and Yoshio Nishina did find a new particle having nearly the same predicted mass of, but different properties from, the meson. Later, people celebrated the discovery of the predicted meson in such experiments and the unexpected new particle was named the muon for the time being. Scientists at that time were all puzzled, however. The muon had exactly the same properties as the electron such as the charge, etc. Only the muon mass was different from the electron mass. It was entirely unknown why such a particle had to exist and for what it would be useful. I. Rabi, who won the Nobel Prize in Physics, said: “Who ordered that?”

It looks too simple a question, but even present-

day particle physics does not have an answer at all.<sup>2</sup>

## 3. What is the Height of a Wave?

The behavior of the “light = electromagnetic wave” is determined by the equations for the waves of electric and magnetic fields. Likewise, the behavior of the particles such as the electrons, protons, etc. is determined by the equations for the electron waves, proton waves, etc. It is quantum mechanics that gives those equations.

Even though we put aside the question, “Why a new particle called the muon exists?” for the time being, it is certain at least that we have to introduce the “muon waves” newly to describe the behavior of the particles. What are these waves of electromagnetic fields, electron waves, proton waves, muon waves, and so on?

If we are talking about “sea waves,” it is a simple story. It goes like this: at any given time, at each point on the surface of the sea, the sea wave is high/low according to the extent that the height of the surface of the sea deviates from the mean sea level. Also, you may not feel uneasy even if there are different types of waves. For the “waves of the

<sup>2</sup> There might be a close relationship between the fact that muons exist in nature and the fact that antimatter scarcely remains in our universe. It is controversial, however, whether or not it is appropriate to say that it is the answer to Rabi’s question.

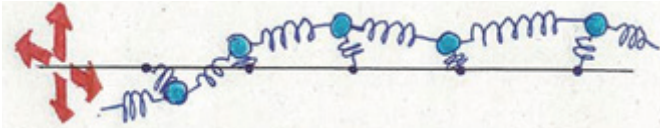


Figure 3-1. A dynamical model reproducing the movement of the chord of a violin. Each weight (blue bead) can move into the two directions shown by the red arrows. They are tied to the respective stable position by a spring. Also every adjacent pair of weights is connected by a spring.

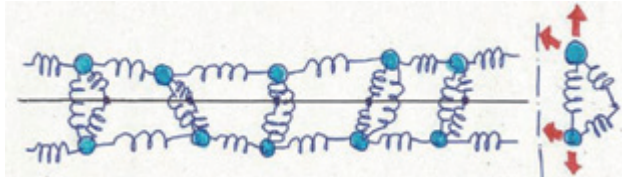


Figure 3-2. A slightly more complicated dynamical model. A dynamical system sitting at each point is replaced by what is comprised of the two weights and 3 springs shown at the right end. This is called a dynamical system with 4 degrees of freedom, because the configuration of this dynamical system at each point is described by the "4 movements (numbers) shown by the red arrows." The behavior of this dynamical model as a whole is described by using 4 kinds of waves.

chord of a violin," we can interpret the deviation of the chord in the two directions from its standard position as the heights of the two different types of waves as shown in Fig. 2. It is said that the tones (wave types) of the violin are a bit different depending on the direction to which the chords vibrate.

As a preparation for thinking on a bit more complicated example, let me point out that the behavior of the chord of a violin can be reproduced by a dynamical model, as shown in Fig. 3-1. If you hold and shift one of the weights from the "normal position" and then release it, "2 kinds (2 directions) of the deviations from the normal position" of the weight will be propagated into the space (horizontal axis) through springs. Next, let us consider a bit more complicated model, as shown in Fig. 3-2. In this model, a certain dynamical system sits at each point along the horizontal axis; the adjacent systems are connected to each other. We now need more than one number to describe "the deviation from the stable configuration = that from the normal position" of the dynamical system at each point. For the model shown in Fig. 3-2, four numbers are needed. Therefore, the behavior of this model is described by using more than one wave. The quantum mechanical version of such a model is called quantum field theory.

At present, it is known that if we only make some

assumptions on the properties of the "complicated dynamical system sitting at each point in space" in quantum field theory, we can explain very well all the experimental results on the behavior of the particles such as the electrons, electromagnetic fields, muons, and so on. In a quantum field theory model called the Standard Model, we use 58 kinds of waves, namely, 45 kinds of particles = waves such as the electron, muon, and so on, 12 kinds of electromagnetic waves and other waves having similar properties to them, and one wave called the Higgs field. Roughly speaking, therefore, the particle world in our universe is described by, "a set of dynamical systems, each having 58 degrees of freedom and sitting at one of the points in space, and the adjacent systems are connected to each other (as shown in Fig. 3)."

In the language of quantum field theory, this means that the question, "Why the particle called muon is necessary to describe our world?" can be replaced with the question "Why the dynamical system sitting at each point in space is so complicated (multiple degrees of freedom)?" Before taking on this difficult problem, however, it would be an orthodox method to ask, "What is the nature of the dynamical system sitting at each point in space and giving the description of our world?" Certainly, it is much more complicated than the dynamical

Figure 4-1. Neutron decay. The current understanding of the neutron is an entangled state of a  $u$  quark and two  $d$  quarks. Likewise, the proton is understood as an entangled state of two  $d$  quarks and a  $u$  quark. An isolated neutron decays spontaneously into three particles, a proton, an electron, and a neutrino. (In the figure, the decay reaction proceeds from left to right.) The reaction essentially results from the interactions between the quarks, electron, and neutrino.

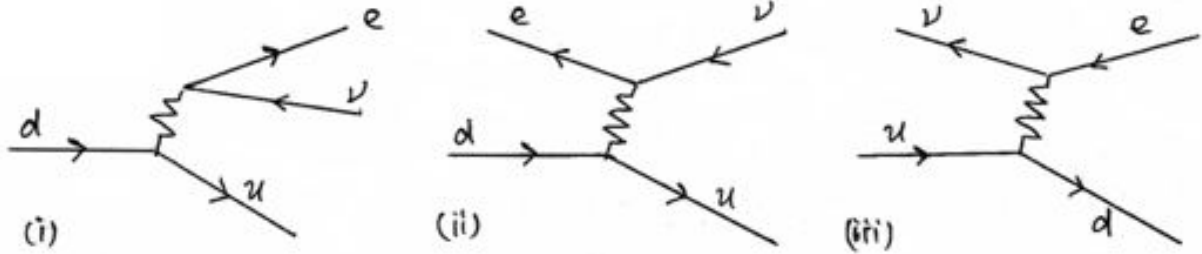
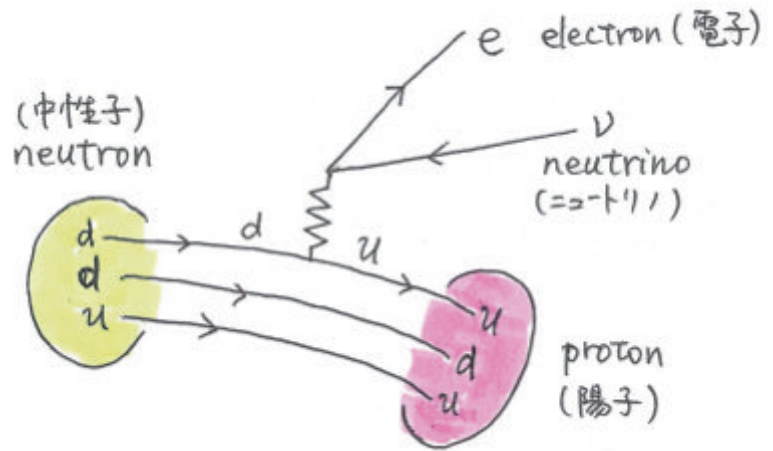


Figure 4-2. In (i), only the quarks directly involved in the neutron decay reaction shown in Figure 4-1 are focused. In nature, it is known that not only the reaction (i), but also reactions (ii) and (iii) occur. All the reactions proceed from left to right. In (ii), a reaction is shown in which an antiparticle of the electron disappears after the reaction, instead of the appearance of an electron after the reaction in (i). The reaction (iii) corresponds to the reaction (ii) if the direction of the time is inverted. As can be seen from (ii) and (iii), the weak interaction is something like the game of "Old Maid" in the following sense. Namely, in the case of reaction (ii), if one receives a "joker," one's complexion changes (the quark changes from  $d$ -type to  $u$ -type), but at the same time there is another one who is relieved by passing the "joker" to someone else (the antiparticle of the electron changes to the antiparticle of the neutrino). A jagged line connecting particles describes the transfer of the joker.

system shown in Fig. 3-2, because it has as many as 58 degrees of freedom! In order to challenge this question, we have to start with sorting out "what we can learn from the nature (experiments) about that dynamical system." We wish to extract not only the "degrees of freedom" of the dynamical system, but also as much information as possible. What can we learn from various experiments?

#### 4. Weak Interactions and the neutrino

It is known that an isolated neutron is not stable;

in a few minutes it decays into three particles, a proton, a positron (an antiparticle of the electron), and a neutrino. It is also known that the neutron and the proton are bound states of smaller particles called quarks. According to our understanding in today's particle physics, neutron decay is a phenomenon resulting from the interactions between the two kinds of quarks, the electron, and the neutrino, as shown in Fig. 4-1. It is also known that there are interactions shown in Fig. 4-2 (ii) and (iii) simultaneously with that shown in Fig. 4-1 (or Fig. 4-2 (i)).



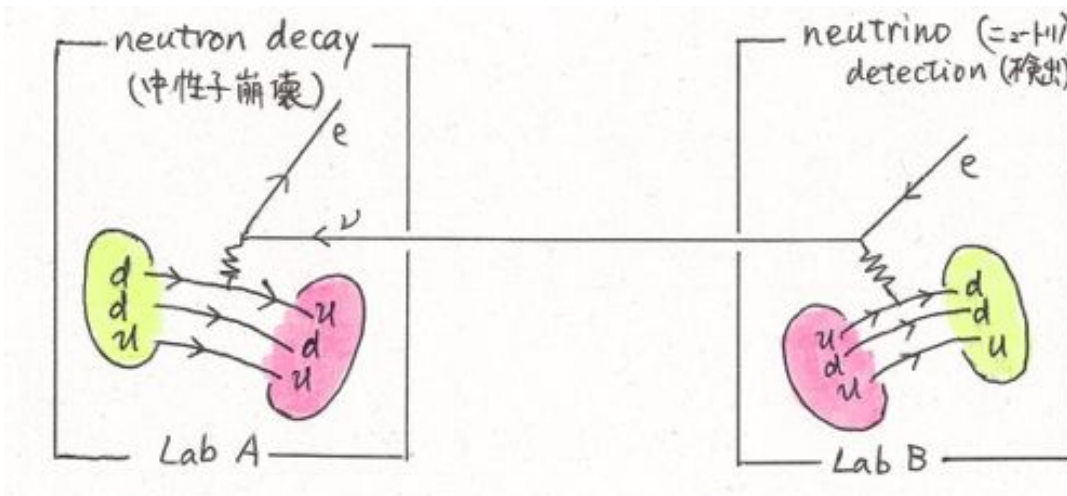


Figure 4-3. To confirm the existence of a neutrino produced in the neutron decay (at Lab A on the left side), we detect a neutron (shown in yellow) and an antiparticle of the electron produced in the inverse reaction in another laboratory (Lab B on the right side). In most of the neutrino detection experiments, a charged particle, converted from a neutrino by the weak interactions (or, received a joker), is detected.

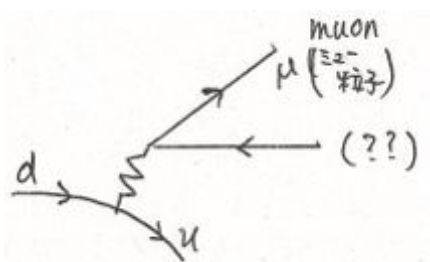


Figure 4-4. A muon can appear instead of an electron in the reaction similar to the one shown in Fig. 4-1. At the same time, the other particle denoted by (??) appears after the reaction. This particle denoted by (??) does not have a charge in the same way as the case of neutron decay.

The neutrino does not have a charge, and it interacts with other particles only via these weak interactions. This also means that we must make use of weak interactions to detect the neutrino. In fact, the neutrino, which came out from the neutron decay, was first detected by Reines and Cowan, who used the inverse reaction shown in Fig. 4-3 in their experiment in 1959.

In Section 2, it has been explained that a particle called the muon exists, which has a different mass but otherwise the same properties as the electron; they interact with the same forces, and make the

same reactions, with other particles. As for the force, now it is known that their weak interactions are also the same. This means that from the weak interactions of a muon, a neutral particle that has only weak interactions comes out like the electron's case (see Fig. 4-4).

In an experiment in 1962, it was shown that the particle coming out in association with muon's weak interactions is different from the particle (neutrino) coming out in association with electron's weak interactions. It turned out that even if the particle coming out from the muon hit a nucleus as shown in Fig. 4-3, it did not (necessarily) cause an electron to come out via the inverse reaction. From this experimental fact, quantum field theory, which has been explained in Section 3, concludes this: in addition to the 2 degrees of freedom corresponding to the electron and the muon, the dynamical system sitting on each point in space has an additional 2 degrees of freedom corresponding to electrically neutral and only weakly interacting particles. These additional 2 degrees of freedom are now called the neutrinos.

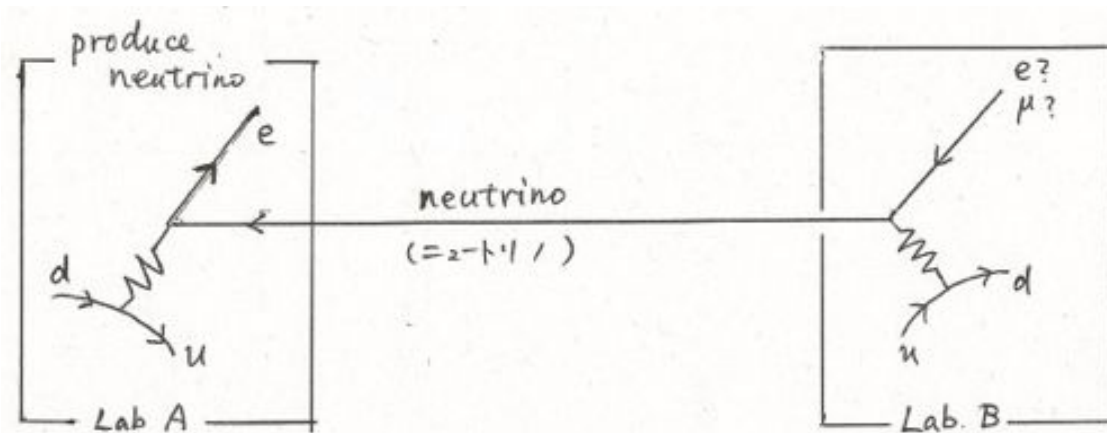


Figure 5. Neutrino oscillation experiment. At Laboratory A, an antiparticle of the neutrino is produced together with an electron. This antiparticle of the neutrino is detected at the very remote Laboratory B. Depending on the neutrino's energy and the distance between the two laboratories, either an antiparticle of the electron or that of the muon is detected at Laboratory B from the weak interactions of the antiparticle of the neutrino. This phenomenon is called the neutrino oscillation.

## 5. Neutrino Oscillations and the Mixing Angles

Does the neutrino that comes out via weak interactions of the electron always return to the electron via weak interactions? Is the same true for the muon and its neutrino? Actually, it is not true. A neutrino that came out from the electron sometimes returns to the electron, but sometimes it becomes a muon (if its energy is sufficiently high). Please refer to Fig. 5. If you put a rabbit in a hat, sometimes it comes out as a pigeon!! The neutrino oscillation is academic terminology for this phenomenon. (See IPMU News No. 15, pp. 4-9.)

Magic (presumably) always involves a trick. Likewise, this phenomenon has a simple explanation. Let us consider the dynamical system shown in Fig. 6-1. Let us put a marble on an oval dish and release it. The marble will then draw the trajectory shown in Fig. 6-2. As time goes on, the direction of the marble's oscillation will change. Let's rotate Fig. 6-2 in such a way that the initial direction of the marble is now the horizontal axis and its orthogonal direction is the vertical axis, see Fig. 6-3. Fig. 6-4 shows the time dependence of the marble's horizontal position and

the vertical position. You can see the decreasing horizontal motion and the increasing vertical motion as time goes on. This marble's motion describes the time variation of the neutrino wave, which has 2 degrees of freedom. The horizontal amplitude of the wave describes the component that returns to the electron via weak interactions, and the vertical amplitude describes the component that converts to the muon.

There are two essential points in this oscillation phenomenon: "1. The shape of the dish is oval" and "2. The initial motion of the marble is not along the direction of the major nor the minor axis of the ellipse, but rather along a diagonal direction." Using technical terms, the first point means that "the neutrinos have the masses and their values are different." The second point expresses that, "the mixing angle is non-zero." The mixing means the rotation angle between Figs. 6-2 and 6-3.

## 6. Impact of the Large Mixing Angles, and...

As has been explained in Section 3, we have to introduce many kinds of particles (degrees of



Figure 6-1. Rolling a marble on an oval dish.

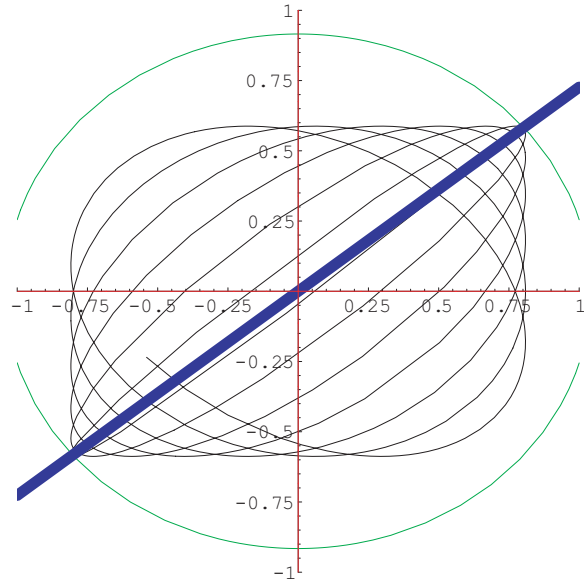


Figure 6-2. Movement of a marble on an oval dish. The green curve represents the ellipse, and its major and minor axes are shown by the red lines. If the marble is released at first from the upper right point on the blue line, it moves along the black curve.

freedom) to describe the particle reactions according to the present understanding of particle physics. Given that there are not a few, but more than 50 kinds of particles, it would be natural to consider whether or not more microscopic particles exist, as well as a fundamental (simple) description. It might be similar to the case that the existence of more than 100 kinds of atoms can be derived from “the only three kinds of building blocks, namely, the protons, neutrons, and electrons, and a single theory of quantum mechanics.”

If we consider the discovery of the periodic table of the elements as a taxonomy prior to the discovery of quantum mechanics, it would be a natural idea to try to introduce taxonomy to the many kinds of standard-model particles. Using the values of the masses, the particles have been classified into 3 groups: the groups of light, medium, and heavy particles are named as the first, second, and third generations, respectively. Most researchers had thought this taxonomy to have some meaning,

until the neutrino oscillation was discovered. Let me explain in a bit more detail. Before the discovery of the neutrino oscillation, most researchers supposed that in Fig. 6-3 the two red axes (corresponding to the masses of the neutrinos) would not have deviated much from the blue axes (corresponding to the electron and muon), and they grouped those particles having similar directions of mass axes and classified them as one of the “generations.” This means that they supposed that the particles in a given generation would change their appearance within the same “generation = direction of the mass axes,” even though a neutrino converted to either an electron or muon, and conversely, an electron or muon converted to a neutrino, via weak interactions. If this had been true, the taxonomy would have been meaningful.

The neutrino oscillation experiments have developed remarkably in these 10 years, however, and they have indicated that the red and blue axes are pointing in quite different directions, as shown



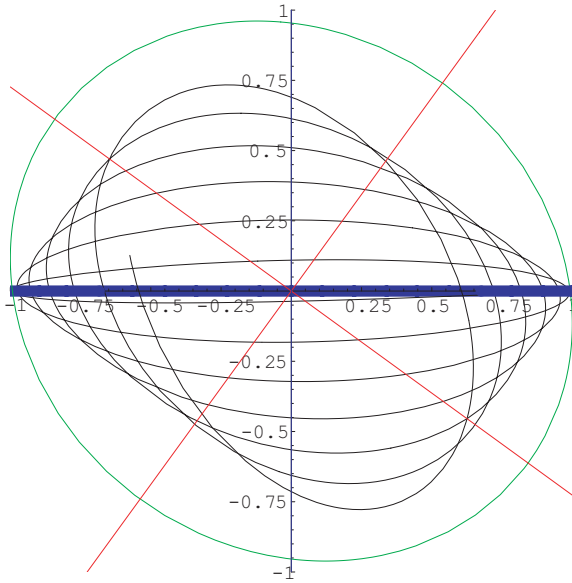


Figure 6-3. Fig. 6-2 is rotated so that the blue line becomes horizontal. At first, the trajectory along the black curve moves in the horizontal direction, but gradually, vertical movement increases.

in Fig. 6-3. Actually, the mixing angle is large. This means that, “the particle taxonomy based on the concept of the ‘generations’ is broken at least to some extent.” If a rabbit can easily metamorphose into a pigeon, the taxonomy to classify mammals and birds should be meaningless. We have to reconsider from the beginning.

From now on, how do we have to proceed in order to obtain a more fundamental understanding of the nature of particles? Today’s particle physicists have been searching for a solution to this problem. Because a few pages up to here cover the development of particle physics in the past several decades, we have to be prepared that it will take as long as ten years to write only the next one page. Even so, researchers should explore the next step forward.

At the end of Section 3, we have set the question, “What is the nature of the complicated dynamical system sitting at each point in space?” If we ask ourselves a philosophical question “What are we?”

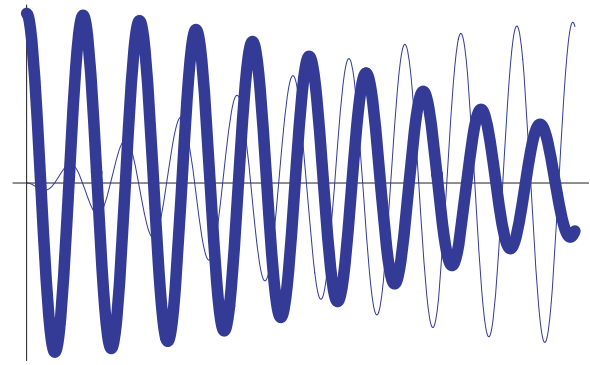


Figure 6-4. The movement along the black curve in Fig. 6-2 is decomposed into the horizontal movement shown by the thick curve and the vertical movement shown by the thin curve. They are shown as functions of time.

very seriously, we finally arrive here. In response to this question, what superstring theory suggests is the way of thinking: “The nature of the complicated dynamical system sitting at each point in space is a six-dimensional space which is so small that no previous experiments have succeeded in looking at it.” Although there have still been no experimental results to support this suggestion from superstring theory, there have been no results either, which give a hint that it might be wrong. If so, it can be a reasonable form of theoretical investigation to introduce such a way of thinking so as to put limits on our thinking and to try to make intellectual adventures within that framework.

In this way, we hope that we can obtain some constraints on the “realizable dynamical system.” Is it possible for us to find something that is not intrinsic to quantum field theory, when particle physics encounters mathematics? Is that useful to give an answer to the question “What are we?” For years, I have been working on such things in my research.

Feature

# Our Team

## Mark Hartz

Research Area: **Experimental Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor



Experimental observations of neutrino oscillations through the mixing of their mass and flavor states have established that neutrinos have mass. Recently, T2K and other experiments have established the mixing of neutrinos through the third and smallest mixing angle, which opens the door for CP violation in neutrino oscillations. If CP violation is present, neutrinos and their antimatter counterparts, antineutrinos, will oscillate differently. This CP violation signature can be observed by experiments which produce beams of muon neutrinos (antineutrinos) that oscillate to electron neutrinos (antineutrinos).

I am participating in the T2K experiment, which aims a beam of muon neutrinos produced at the

J-PARC accelerator facility towards the Super-Kamiokande detector, 295 km away. We make measurements of muon neutrino to electron neutrino oscillations, the first step in detecting CP violation, and make precision measurements of neutrino oscillation parameters. I am particularly interested in the ability of T2K to search for CP violation by producing a beam of antineutrinos, and future experiments that will be necessary to more precisely measure the amount of CP violation.

## Masahito Yamazaki

Research Area: **Theoretical Physics**

Kavli IPMU Assistant Professor



The goal of theoretical physics is to uncover the fundamental principles governing a vast variety of phenomena in nature, ranging from tiny elementary particles to the whole Universe. As a theoretical physicist working on elementary particle physics, I have been studying supersymmetric field theories and string theories from a number of different perspectives, and I am trying to identify physical and mathematical structures necessary for the better formulation of quantum field theory and for a consistent framework of quantum gravity.

I have been recently working on supersymmetric gauge theories in 2, 3, 4, 5, and 6 dimensions, and in particular, the exact results and string theory realizations for them. In this approach, the IR fixed points of the theories are characterized

by geometrical/combinatorial structures, such as 3-manifolds, cluster algebras and the cells of the positive Grassmannian. This gives a manifestly duality-invariant formulation of new classes of supersymmetric field theories (with and without Lagrangians), whose properties could be further elucidated with the help of mathematicians.

I am excited to join the Kavli IPMU, which provides the ideal interdisciplinary environment for this ambitious research project.

## Hanindyo Kuncarayakti

Research Area: **Astronomy**

Postdoc



I have been working on the close environments of supernovae, to search for the clues on the physical properties of the progenitor stars. For this purpose, I used the technique called integral field spectroscopy, which enables the observations of the supernova explosion sites in both spatial and spectral dimensions simultaneously. This provides an insight never obtained before into the immediate

surroundings and the parent stellar populations of the supernova progenitor stars.

Our Team



## Mitsutoshi Fujita

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

I have studied the gauge/gravity correspondence in the background of superstring theory. The important point of the gauge/gravity correspondence is that the strong-coupling Yang-Mills theory that is difficult to analyze can be analyzed by using weak-coupling dual supergravity. In particular, I apply the gauge/gravity correspondence for understanding the difficult physics of a strongly-correlated system



and condensed matter physics, such as strongly-correlated electrons. For example, we derived some FQHE and edge states from superstring theory by using the gauge/gravity correspondence.

## Miho N. Ishigaki

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

My research interest is how chemical elements are synthesized in various astrophysical sites and how these elements are distributed over the Milky Way Galaxy. For these purposes, I'm studying chemical abundances of metal-deficient stars in the Milky Way and its surrounding dwarf satellite galaxies, mainly by stellar spectroscopy. Using observed chemical abundances in combination with theoretical



nucleosynthesis calculations in stars and supernovae, I hope to make constraints on how these galaxies are formed and chemically evolved.

## Sho Iwamoto

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

Dark matter, inflation, the neutrino mass—we still have mysteries, and many hypotheses have been proposed to solve these problems.

I am interested in examinations of these hypotheses at collider experiments and astrophysical observations. Topics of my recent interest are the collider test of hypotheses in which the Higgs and/or the lepton sectors are extended, and the indications from cosmic-ray observations towards the dark



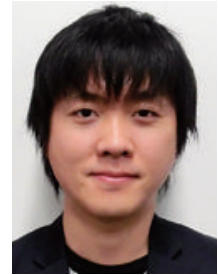
matter problem. I want to see which models are true, and which are not.

## Kunio Kaneta

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My primary research interest is particle physics beyond the standard model. I have investigated signals of new physics by focusing on parity violation in QCD process at LHC. There is no parity violation in the standard model QCD, but it can be induced by new physics, which is supersymmetry and extra



dimension, for example. I am also interested in Higgs physics, dark matter, and neutrino physics.

## Lluís Martí Magro

Research Area: **Experimental Physics**

Postdoc

Since I joined the Super-Kamiokande (SK) collaboration in 2009, my main motivation has been the detection of core collapse supernova (ccSN) neutrinos. This includes those from all the past ccSNe, the diffuse supernova neutrino background (DSNB). Currently having the best world limit, some SK collaborators have been working on EGADS, a project to realise GADZOOKS!. By loading the SK



water with gadolinium, we will be able to detect DSNB, our main motivation, and improve SN detection and other studies.

## Haruki Nishino

Research Area: **Cosmology**

Postdoc

My current research focuses on an experimental cosmology. I am working on the Cosmic Microwave Background (CMB) polarization experiment, POLARBEAR. CMB observations in the last decades have provided us with rich information about our universe. Recently the polarization measurement of CMB has attracted much attention because it is considered as a new probe for the epoch of inflation, the exponential expansion of the early universe. We deployed our telescope with polarization sensitive



detectors in the Atacama Desert in Chile, and we have been observing CMB since 2012. We aim to measure undetected polarization pattern called “B-mode” and acquire new insight on the beginning of the universe.

Our Team

## Ryoichi Nishio

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

One of my research interests is hadron physics. Hadrons are particles that compose an atomic nucleus, such as protons, nucleons, and mesons. It is natural for me to be interested in hadron physics because most of the matter around us, and we ourselves, are hadrons. Particle theorists have known for several decades that the hadron physics is ruled by a fundamental theory called *QCD*. Many properties of hadrons, however, have not been derived from the fundamental theory yet. This is



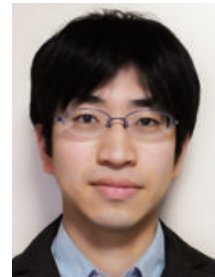
the problem which should be solved. I expect that essence of hadron physics may be understood by means of the holographic principle. My result based on the idea is in agreement with the experimental data of scattering processes of the hadrons.

## Yoshiki Oshima

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

My research interest lies in the representation theory of Lie groups, particularly branching laws of representations. The branching law describes how a given representation decomposes when restricted to a subgroup, which is a mathematical formulation of the breaking symmetry. In my thesis, I studied the branching laws of a certain class of representations of real reductive groups (the so-called derived



functor modules) in terms of a geometric realization of representations by using D-modules on the flag variety.

## Shun Saito

Research Area: **Cosmology**

Postdoc

My research interest lies in observational cosmology, and my goal is to obtain various insights into fundamental physics through cosmological observations. I am currently focusing on the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey in the Sloan Digital Sky Survey III, which provides us with the largest 3-dimensional galaxy map, in order to extract information on gravity theory at cosmological scales



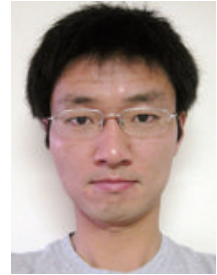
and the neutrino mass. Meanwhile, I have been working on the cosmic microwave background and gravitational wave.

## Yefeng Shen

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

My research area is geometry and mathematics related to string theory. More precisely, I am interested in mathematical theories related to  $N = (2,2)$  supersymmetric quantum field theory. Mathematically, Gromov-Witten invariants virtually count stable (or orbifold stable) maps to projective varieties and symplectic manifolds (or symplectic orbifolds). It gives a description for the non-linear sigma model. Fan-Jarvis-Ruan-Witten invariants virtually count solutions of Witten equations and can be viewed as a mathematical description for



Landau-Ginzburg model of quasi-homogeneous hypersurface singularities. Currently, my works focus on Gromov-Witten theory, Fan-Jarvis-Ruan-Witten theory and global mirror symmetry in a broad sense, including topics such as Landau-Ginzburg/Calabi-Yau correspondence, integrable hierarchies and number-theoretic aspect of Gromov-Witten theory.

## Norihiro Tanahashi

Research Area: **Cosmology**

Postdoc

I have been working on the theoretical study of general relativity and its applications to various topics such as fundamental aspects of black hole physics, dynamical phenomena in the gauge/gravity correspondence and modified gravity theories including massive gravity theories and their relatives. Being in the interdisciplinary environment of Kavli IPMU, in my future research I will study modified



gravity theories and their observational implications, and also consider further applications of gravity theory studies.



## Interview with Kenji Fukaya

Interviewer: Kyoji Saito

### Interaction of Present-Day Geometry with Physics Was a Dream in the 70's

**Saito:** Today I would like to ask you how you started studying mathematics, how you come up with the geometric structure called the Fukaya categories as well as its past development and its future perspective, and the relation between physics and mathematics. What shall we begin with?

**Fukaya:** Shall we start from my recent work, because it is related to Kavli IPMU?

**Saito:** I very much wish to ask you about it. Also, I wish to ask what you think about physics and mathematics. First, could you tell me how you have developed your study of mathematics?

Kenji Fukaya is a permanent member (Professor) at the Simons Center for Geometry and Physics, Stony Brook University since April 2013. He is also a visiting senior scientist of the Kavli IPMU since February, 2013. He graduated from the University of Tokyo (UT) in 1981. He received a Doctorate in Mathematics from UT in 1986. He became Assistant Professor at UT in 1983, and Associate Professor in 1987. He moved to Kyoto University as Professor in 1994. Since 2009, he has been a member of the Japan Academy. He received the Inoue Prize for Science (2002), the Japan Academy Prize (2003), the Asahi Prize (2009), and Fujihara Award (2012).

**Fukaya:** From the beginning I have been interested in studying various aspects of the relation between mathematics and physics.

**Saito:** That sounds interesting.

**Fukaya:** I think that there is a difference between my generation and yours, or, between the mathematics of the time when I started to study and that of the time when you started. According to my impression when I was a student, I always heard that something new would emerge from interactions between physics and mathematics. But, I didn't have an impression at that time that something new really did begin.

**Saito:** What period was that?

**Fukaya:** It was probably in the 70's or the 80's when I was a student. Of course, functional analysis emerged and developed simultaneously with quantum mechanics, and the study of partial differential equations has been always connected with physics. There are such fields which are closely connected with physics.

**Saito:** The Schrödinger equation is an example.

**Fukaya:** Yes. Also in



representation theory, the relation between quantum mechanics and group theory has been known for a long time. On the other hand, the higher-dimensional global geometry that I have been studying emerged and developed in the 20th century, and has been hardly applied in physics.

**Saito:** It really was just as you say.

**Fukaya:** Not to mention physics, it has hardly been used in any fields.

**Saito:** That's true. When we were students, it looked as if Hilbert space for solving the Schrödinger equation and analysis for solving equations in classical mechanics, electromagnetics, and so on were main mathematical fields that had real contacts with physics. It is only a very recent trend that global geometry, or complex geometry and algebraic geometry, in particular, have come into contact with physics.

**Fukaya:** Exactly. But, I think the extent to which they obtain citizenship in physics is not clear yet. Since around those days, however, there have been a lot of people who told a rumor, or something like a dream, that contemporary geometry would really have contact with physics.

**Saito:** What are those days? Do you mean the 70's?

**Fukaya:** Yes. I suppose that there were such dreams. Rather, I should say certainly

there were. But, somehow people had an impression that these were nothing but dreams, and that none of them was decent mathematics. So, I kept at a distance from them. It was probably in the 80's through the 90's that I regarded them as developing into the real thing.

**Saito:** At that time, epoch-making gauge theory by Atiyah and Donaldson and topological field theory emerged.

**Fukaya:** Yes. So, around that time I started to think that now I could work on such things...

**Saito:** Then, have you been always aware of it?

**Fukaya:** Yes, I actually wanted to do things like that. When I was a graduate student, however, a prevailing impression was that such subjects were not the sort of things to do.

**Saito:** That's unexpected! As for me, I was surprised later to know that the theory of primitive forms, which I started with a purely mathematical interest, had to do with physics. But, you have always been conscious of the relation with physics from the beginning, haven't you?

**Fukaya:** I'm not sure. Even if I have been conscious of it, it was only something like a dream.

*Kyoji Saito is Principal Investigator at the Kavli IPMU. He is also Professor Emeritus of the Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS), Kyoto University. He served as Director of RIMS from April 1996 to March 1998.*



**Saito:** Could you tell me more about that?

#### Hoped to See Topology Become a Language for Physics

**Fukaya:** Probably I hoped to see the times when topology would become a language for physics. I think this has not been achieved yet, but now an atmosphere to make one feel that it may happen, has appeared.

**Saito:** For instance, V. I. Arnold's *Mathematical Methods of Classical Mechanics*, though this is not modern. He actively introduced topology to the study of mechanics. Certainly there was already that kind of trend at that time, but isn't it what you are talking about?

**Fukaya:** Arnold was a pioneer, but he could not establish the application of topology to classical mechanics. For example, *symplectic topology*, which is a field close to what I am studying, was first suggested by Arnold and he developed it by even setting some concrete problems. But it had not been realized until Gromov did it, after all. Not only that, there were pioneers who advocated doing this and that in various fields. Lots of pioneers have always told their dreams. This is not a bad thing, of course, but rather, it is important. Dreams, however, are not enough to develop new fields into the ones which allow normal mathematical studies. It took some more

time for symplectic topology, for example, to have become a field allowing normal mathematical studies. When I was young, I felt it a bit scary to go into that field immediately. Rather, I had the impression that it was better to refrain from it.

**Saito:** Then what was the turning point?

**Fukaya:** In those days, when Donaldson and other people studied gauge theory in mathematics, they put physics aside a bit when they wrote articles, even though their sources of ideas originated from physics. Though they learned physics, they were strongly conscious that they were not physicists.

**Saito:** Are you talking about the Atiyah school?

**Fukaya:** Yes. For example, I think Donaldson never wrote a paper directly dealing with physics. Conversely, physicists later used the Donaldson theory in gauge theory.

**Saito:** I do not have a clear idea about those circumstances, but am I right to say that although he was not conscious of it, physics played a role behind the scenes for having induced his awareness of the problem?

**Fukaya:** I think so, probably. In that school, Atiyah had always been strongly aware of the relation between physics and geometry, and the same was true for Hitchin. Therefore, physics had always been behind the mathematics of the Atiyah school at Oxford. Nevertheless, they

had not brought physics to the forefront when they wrote articles.

**Saito:** It was as you say.

Then what was your own response?

**Fukaya:** I think it was from around 1990 that I started to explicitly describe the motivations and ideas that were originated from physics, in my articles. As for geometry, in particular, the relation between gauge theory and topology, that between string theory and duality, and that among homological algebra, physics, geometry, and the like have started from the end of the 80's through the 90's. From around that time, mathematically meaningful results, which directly involve ideas from physics, gradually appeared in geometry.

**Saito:** Could you give an example?

**Fukaya:** Mirror symmetry is a typical one. I think mirror symmetry would be a theorem in mathematics, if established, and not a theorem in physics after all. I think such a situation that things like that emerged from physics and became very significant both physically and mathematically did not happen before, say, in the days when gauge theory was developing.

**Saito:** Gauge theory, which superseded the "gauge theory" in the days of Atiyah, is a treasury full of yet-unknown treasures for mathematics. Putting this

aside, mirror symmetry is terribly amazing. The same physical quantity either comes from invariants in complex geometry or from those in symplectic geometry, in mathematics. Admittedly, such a viewpoint has never emerged from mathematics. At what stage did you come to realize this?

**Fukaya:** I remember that I heard the mirror symmetry for the first time when Professor Eguchi talked about it at a workshop held at Keio University.

**Saito:** Around what year?

#### Instinctively Felt D-Brane Is Equivalent to Floer Homology

**Fukaya:** It was probably the 80' or the early 90's. So it was before the appearance of the Seiberg-Witten theory. At that time, it seemed something like algebraic geometry. Because of that, I didn't think of it as my research subject. It was after I had heard about D-branes that I myself started to study it. I think that I heard about D-branes around 1992 or 1993.

**Saito:** Yes, I remember that it was around that time.

**Fukaya:** At that time it came to me that the D-brane is equivalent to Floer homology.

**Saito:** Was that idea your own?

**Fukaya:** No, probably many people were aware of it. I think. But few specialists in symplectic geometry were seriously thinking of studying mathematics having to do

with D-branes.

**Saito:** Had you been working on the Arnold conjecture before that time?

**Fukaya:** No, it was a bit later. I was involved with Arnold conjecture as an application of Floer homology which I had long been studying.

**Saito:** I didn't have a clear idea about that situation. How did you relate Floer homology, the Arnold conjecture that we just talked about, D-branes, and mirror symmetry? And at what stage did these things start to converge to a focal point?

**Fukaya:** It was a matter of course that Floer homology is applicable to the Arnold conjecture, for this is the reason why Floer homology was introduced. On the other hand, we were able to readily understand that D-branes and Floer homology are related when D-branes appeared. D-branes are the boundary conditions for strings. On the other hand, it is Floer homology that takes into account the same boundary conditions and the same nonlinear Cauchy-Riemann equations. However, few people told such an interpretation that the D-brane is equivalent to Floer homology at that time. It may well be that at that time people did not believe that combining the topology of geometry that goes into an infinite dimensional analysis, with newly emerged D-branes in physics, would produce successful

mathematical theory. When we heard D-branes at first, they were presented in the contexts completely different from sort of Floer homology.

**Saito:** Well, at that time I did not quite understand such a situation, either. Certainly I remember that Professor Eguchi and many other physicists had been talking D-branes, but they gave geometrical image that D-branes are the objects, onto which strings are winding. I remember that I repeatedly asked questions because I couldn't get what that meant.

**Fukaya:** It took about 10 years since then for us to clearly realize the relation between D-branes and Floer homology. For me, it was not very clear at that time, either, though from the beginning they seemed to be related.

**Saito:** Oh, indeed.

**Fukaya:** The problem, however, was to what extent we would be able to develop rich mathematics based on that relation. It had also taken 10 years before we reached the level where we were able to calculate what could be one of the most important examples, not merely exploratory pilot trials. Probably that was one of the things that I wanted to do.

**Saito:** From what time, then, did you realize things like that and start collaboration with various people like Hiroshi Ota and Kaoru Ono?

**Fukaya:** In the first half of the 90's, the situation was the

following. Although we were able to do a variety of things in geometry, which utilizes moduli space, we were quite afraid to study it in a general way because its foundation was extremely difficult. However, when I studied the Arnold conjecture with Kaoru Ono, we came to think with confidence that we would be able to build the foundation of mathematics with which we can tackle that problem.

**Saito:** Was that in the 90's?

**Fukaya:** Yes it was in the 90's. I studied Arnold conjecture with Ono in 1996. Around the same time, some other people were also developing the method, which is now called *virtual techniques*. When the virtual techniques turned out to be applicable, only little technical difficulties of that sort seemed remaining. Then we had to write detailed articles. It required hard work, but somehow we thought it was manageable. We gradually changed our minds to do it systematically rather than blindly, for the case of pseudo holomorphic curves. For the case of Donaldson invariants in the gauge theory, at first we also started calculating the most important things for finding new revolutionary examples for application. On the other hand, problems such as finding the structure of all of the Donaldson invariants was too difficult at that time, when we did not know the Kronheimer-Mrowka structure theorem, Seiberg-

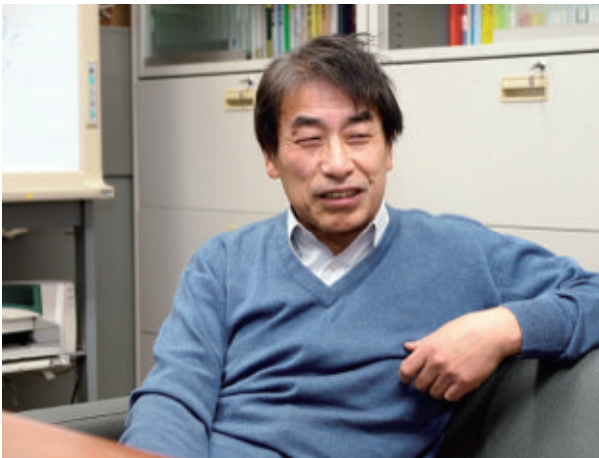
Witten theory, its relation with the monopole equation, and so on. So, at first we had been working hard only on what we could do one way or another. In this way, we managed to derive very significant things, which was a tremendous breakthrough. As for symplectic geometry utilizing pseudo holomorphic curves, it turned out that the virtual techniques allowed us to overcome technical difficulties if we work hard. With this situation, our motivation turned to the directions such as "What is the most significant algebraic structure?" "As a whole, what does it mean?" and so on. From around 1990, such a way of thinking had gradually emerged, and it was realized in about 10 years over the latter half of the 90's to the 21st century.

**Saito:** So that was the turning point.

**Fukaya:** Yes.

#### Preference for Transcendental Aspects in Mathematics

**Saito:** By the way, I have strong impression that at first your style of doing mathematics inherited that of Gromov who introduced dynamic new ideas to geometry such as approximating manifolds by taking some points on them or collapsing manifolds with Riemannian metrics. I feel some gap between such mathematics and what you said now.



**Fukaya:** Well, once I told a joke to you about something like that. Yes, I like transcendental matters. In some sense the mathematics that Gromov has been doing is utmost in transcendental mathematics.

**Saito:** It's great. I also like it.

**Fukaya:** I believe that among those mathematicians studying geometry of mathematical physics such as symplectic geometry utilizing pseudo holomorphic curves, I am studying its aspects in close proximity of the most transcendental part.

**Saito:** Really?

**Fukaya:** I mean, there are many people studying in more algebraic aspects such as the calculations of Gromov-Witten invariants.

**Saito:** Well, it's true.

**Fukaya:** Compared to those who are studying in the area where they can rigorously calculate things like Gromov-Witten invariants, we are studying somehow abstract and general... I think it's kind of like..., analysis...

**Saito:** Well, it is rather

genuine geometry, than analysis.

**Fukaya:** Right. So, I have an impression that I am studying transcendental aspects. That is something that I have been intending to do, and I have been doing for a long time. I am quite confident in myself on this point.

**Saito:** That is what I like about your mathematics. People often think that I am studying algebraic aspects, but I am always watching over from where transcendental structures come in. For this reason, I am really attracted to your mathematics because you are always engaged in such aspects.

**Fukaya:** But as for Riemannian geometry, which I studied at first, extractable algebraic structures are poor. (laughs)

**Saito:** Oh, you speak harsh words. (laughs)

**Fukaya:** Although they are poor, we have to work hard. These days, kinds of mathematics such as analytic geometry on metric spaces are increasingly studied and developing well.

**Saito:** Really?

**Fukaya:** Yes. I think geometry of just the opposite type to algebraic geometry is developing quite actively.

**Saito:** Could you give me an example?

**Fukaya:** For example, the problem of optimal transportation.

**Saito:** Hmm... I have never heard of it.

**Fukaya:** It is something like analysis on metric spaces, such as defining the Ricci curvature in this setting. The optimal transportation problem is, for example, "Suppose there is oil around here, and there are consumers and gas stations around there. Then, how can you transport oil in the shortest time?" In short, you are dealing with metric measure spaces. On a metric space which is the so-called Earth, there are two measures. One is the measure at the oil producing district, and the other is the one at the consumption facility. Evaluating the distance between the two is the transportation problem. So, the best way is the connection by a geodesic.

**Saito:** So what?

**Fukaya:** So we are just asking "What is the geodesic between the two points on a very wild space, such as the space of metric measure spaces?"

**Saito:** Do you mean considering the space of all geometries rather than fixing geometry?

**Fukaya:** So what?

**Fukaya:** So we are just asking "What is the geodesic between the two points on a very wild space, such as the space of metric measure spaces?"

**Saito:** Do you mean considering the space of all geometries rather than fixing geometry?

**Fukaya:** Yes. Because we

think all the geometries, our object is wild and measures are not necessarily smooth.

**Saito:** Is it related to Finsler geometry?

**Fukaya:** Shinichi Ohta as well as other people is studying it. Once I also studied a bit about metric measure spaces in the 80's. Other currently active fields of geometry similar to it include geometric group theory.

**Saito:** I am also interested in it.

**Fukaya:** At present, those areas of mathematics dealing with objects which have little structure, if any, are quite hot.

**Saito:** Are they developing?

**Fukaya:** Yes, they are.

#### Hoping to Explore the Root of Geometry of Moduli Structure

**Saito:** Now, back to the topic of extracting an algebraic structure using the virtual techniques, what perspective do you have about your future mathematics?

**Fukaya:** Well, some time ago I thought I would go back to what I studied before—namely, studies of transcendental aspects of mathematics. But, because I am already over 50 years old, I probably wouldn't make significant achievements even if I return to that direction. So now I am inclined to think that the current direction is better.

**Saito:** What do you mean?

**Fukaya:** I think there are a lot of things to do in developing the methods of constructing algebraic structures from



moduli spaces using the virtual techniques. If we should complete the whole program, it would lead to a significantly large body of theory. I think probably this is what we should do.

**Saito:** In some sense, you are going to explore the most fundamental aspect of geometry of moduli spaces. It seems quite tough.

**Fukaya:** As I said before, since 1996 we have been able to deal with theory even if we give it something similar to an algebraic structure, or rather complicated algebraic structure, but to go one step forward, it would be required to extract all the algebraic structures they have.

**Saito:** What do you mean by algebraic structure?

**Fukaya:** For example, it was the A-infinity structure that we used. It is like a study of thinking all the numbers that can be extracted from the moduli space, deriving all the structures it has, and then asking “What is this set of all the structures?” and “What symmetry should all these structures have?” Further, because the numbers themselves are not well-defined, we need to consider what kind of algebra controls this ambiguity.

**Saito:** So you also look at the structures closely.

**Fukaya:** Yes, for the moment. The virtual techniques are sort of tools to construct structures.

**Saito:** This may be wandering from the topic

of this interview a bit, but S. Mochizuki is studying the ABC conjecture these days, and he is trying to extract things from the most primitive part having few additional structures as possible. I think this is amazing...

**Fukaya:** I agree.

**Saito:** As you just said, however, you are considering to give structures, aren't you?

**Fukaya:** For example, let's consider the definition of field theory, or that of a space. There are two ways of thinking. One way of thinking is this. We have lots of quantities from field theory. We define all these quantities and consider their symmetries and in what sense these quantities are well-defined. We consider all these things. In some sense, we can say that it is a computational definition of field theory. Or, probably it is an algebraic definition. It is not transcendental. Now, the other way of thinking is this. It is possible to describe field theory in a truly fundamental way, by creating transcendental, completely different language. The latter is certainly preferable. However, we have been hearing these arguments for about 30 years that new geometry is needed for studying quantum field theory, quantum mechanics, string theory, and so on. But it doesn't seem to be possible at all (laughs). In other words, the latter definition is not possible at all.



**Saito:** What do you mean by new geometry?

#### Can a New Geometry Explain the Standard Model Intuitively?

**Fukaya:** I don't know it very well. As for general relativity, for example, we can say that only one word, *curved space*, explained the geometrical background of gravity pretty well. In the same way, can we explain very complicated equations in the standard model all at once, by developing some new notion of spaces? Is there such an amazing, new type of geometry, of which we simply haven't noticed? Similarly to the fact that general relativity is explained all at once by writing out the definition of Riemannian manifolds, is it possible that writing down the beautiful and simple definition of the new geometry would ultimately lead to the appearance and explanation of everything that are very complicated now, through painstaking calculations starting from

that definition? It is probably a dream of hoping such geometry of the 22nd century. I believed in it to a great extent 20 years ago, but now I am skeptical about it, probably because of my age.

**Saito:** Why do you think so?

**Fukaya:** In the history of scientific developments, there have been many occasions when a new breakthrough occurred and it made the old things easy to understand. I am skeptical, however, about further and further iterations of such a situation in future. For example, when quantum mechanics and relativity appeared, they looked quite different from our daily life though they were truth. They made things very clearly understandable, however, and they were found not very complicated. This is particularly true for relativity. In the end, it was distilled into a very simple equation. I am doubtful, however, that the so-called standard model etc. would be similarly...

**Saito:** Are you doubtful that we can generate and



formulate a new geometry?

**Fukaya:** Well, I doubt that the new geometry, even though it is generated, would make everything so easy.

**Saito:** I can't say it properly, but I think geometry provides humans with a picture when they create an image of the world from various experiences. Speaking about the Riemannian geometry that we have just mentioned, I dare say that Gauss had done huge amount of calculations in electromagnetics and ground survey before it appeared. For instance, it seems that Gauss posed Riemann, one of his students, an assignment to formulate calculations of curvatures from surface triangulation, and Riemann did it. In that sense, though I can't say it properly, it would not change in future that humans necessarily create new geometry corresponding to the amount of experiences they accumulate. So, about what you just said...

**Fukaya:** There is a distance between our experience and the real world. There is a world where we are living as ordinary people, and which is sensible by our sense organs. In old times, mathematics or any learning was closely connected to the directly sensible world and people directly formulated what they saw into the body of theory. Probably, however, people became unable to do so from a certain stage. I think, this is probably related to

abstraction of mathematics: people gradually began to formulate, using logical language, things which were a bit different from what they saw, in such a way that they allowed considering, for instance, curved spaces which looked like Euclidian if seen by human eyes. Then, as we go ahead, we are more and more separated from our intuition.

**Saito:** Nevertheless, isn't our intuition itself going to change? Don't you think that a new generation of people would take those things into their intuition, which seem logically complicated for us now?

**Fukaya:** But, there should be a biological limitation for human beings. What you just said means learning by brain. I also think that it would help us to some extent. For instance, mathematicians, having received mathematical training, have intuition that becomes active when they think over mathematics on manifolds. Of course, ordinary people do not have such intuition (laughing). This intuition is what is acquired from learning, rather than what a human being as a creature has by nature.

**Saito:** I think human beings will take experiences and structures into their intuition.

**Fukaya:** Well, it may be that we will be able to do it as we go one more step forward, but the required energy will also increase by one step more. You mentioned Dr.

Mochizuki before. It is not possible for ordinary people to understand his theory by intuition. Training is needed.

**Saito:** I agree to some extent, but it depends on the sensitivity of the times. The next generation may be able to reach there, though I cannot.

**Fukaya:** Well, in the past Grothendieck, for instance, introduced broad perspectives in mathematics. I have managed to understand a bit of them, such as topoi and stacks, through learning, but it is not so easy to understand such things even today.

**Saito:** Hmm...

**Fukaya:** About 40 years have passed since then.

**Saito:** Possibly, at some time in the future they will be integrated into some kind of structure, and people will think the next step without being aware of them...

**Fukaya:** No, they were constructed in that way with great effort. This is the reason why you find them as you say. But, I think it will not be possible to bring them beyond that.

**Saito:** We cannot judge unless we try.

**Fukaya:** Even the definition of manifolds itself is not easy.

**Saito:** Somehow, I am also doubtful whether it is even natural. But...

**Fukaya:** We cannot give easier definitions any more.

**Saito:** Today, 3 years of learning mathematics is somehow enough to understand the definition of

manifolds to some extent, though at least a century ago mathematicians at that time were not able to think of it.

**Fukaya:** Yes, they learn it in the third year at the university. Therefore, it would be in the graduate course that they learn notions of the next level. My concern is the next to next level, and so on. This might be the fate of a human being as a creature.

### Ideal Relation between Mathematics and Physics for the Future

**Saito:** Oh, you are talking about your concern (laughing). I am more optimistic than you. Now let me return to our original topic. What is your perspective on the relation between mathematics and physics in future?

**Fukaya:** It will be a difficult problem for mathematicians at Kavli IPMU, that to what extent they keep a distance from physicists.

**Saito:** Do you have any concern about the relation between physics and mathematics? Please don't hesitate to say what you think.

**Fukaya:** In the study of mathematics, the most dangerous problem would be finding motivation only from physics and giving up mathematics. It is absolutely wrong and should be avoided to say "Though this is not very important in mathematics, it is useful in physics" to mathematicians,

and the opposite to physicists. In the fields of mathematics directly related to physics, how to find motivation is important for mathematicians to study mathematics.

Every physicist has his/her own sense acquired from training, regarding physical phenomena, or what is really meaningful for physics theory. We mathematicians don't have this sense, and even if we work hard and acquire it to some extent, we are amateurs after all.

**Saito:** This point is related to our discussion before. Do physicists get their intuition from great amount of calculations they make behind the scene?

**Fukaya:** I think so. On the other hand, we made another kind of training which formed our sense of mathematical problems and sense of values regarding what is important in mathematics. I think it is quite important to get ideas from physics properly, while retaining our sense of values. So, mathematicians and physicists should firmly keep the respective sense of values, and on the basis of that both should interact with what they can contribute to each other in mind.

**Saito:** I agree with you on this point. But, is there really a serious concern as you point out?

**Fukaya:** Yes, I have a feeling to hear such things frequently, though I don't know what physicists are thinking about mathematics.

It is sometimes difficult for us to understand physicists' sense of values which are different from ours. Returning to what I've just said, I think the most important physicists' ability that forms their foundations as physicists is to grasp the essence of physical phenomena, or what is the most important in physics. Likewise, mathematicians also have their foundations as mathematicians; they are different from those of physicists. Mathematicians and physicists can understand respective foundations to some extent, but it is difficult and not easy to have both.

**Saito:** Certainly it is quite difficult to have both...

**Fukaya:** For example, let's ask if Witten can have both. Simply speaking, it is quite high-level and difficult a thing in the sense that Witten may have both, but only to some extent.

**Saito:** But, depending on the individual work, do we have to switch between mathematical and physical motivations?

**Fukaya:** Witten as well as those comparable to him can do that way, because he solved many mathematical problems that are of sufficient value in mathematics. But, even in such cases, their fundamental interests cannot be both physical and mathematical. For mathematicians it is more difficult to acquire sense of physical phenomena. Probably, it's nearly

impossible.

**Saito:** Do you mean it's almost impossible for mathematicians to have intuition on physics?

**Fukaya:** Yes.

**Saito:** But if you talk about mathematical phenomena, the situation is different, isn't it?

**Fukaya:** That's right. So, mathematicians should be conscious about their sense of mathematical phenomena, or awareness of the problems, and to what extent they contribute to understand the most important problem. I have been thinking it is important for mathematicians whether they can properly do so when they go along with physicists.

**Saito:** Certainly it is a valuable suggestion, or caution, to young people who are about to start learning. I think every established researcher has necessarily chosen one of them in his or her career, but certainly those who are about to begin may not understand it. By the way, you are going to the U.S. to work hard. Do you have any aspiration?

**Fukaya:** Probably, the Simons Center is in some sense a similar place to Kavli IPMU. Compared to Kavli IPMU, it has slightly bigger mathematics department and similar-sized physics department, but it has no experimental physics department. So I think it is a nice place for me to study what I said.

**Saito:** Are there physicists?

**Fukaya:** Yes, at present Michael Douglas is working there. The plan is to have the same number of physicists and mathematicians eventually. The same is true for postdoctoral fellows. I think physicists will be all theoretical physicists. In the Stony Brook University where the Simons Center is located, there is C.N. Yang Institute for Theoretical Physics. Also I think there are experimental physicists in the University. In the Simons Center, I am planning to focus on constructing structures using geometry. I'd like to make a thorough investigation about the extent to which we will be able to reach.

**Saito:** You are still young, so I have high hopes for you to accomplish another great achievement. Thank you for today.

— · —

**Note by Saito:** On February 20, 2013, I visited Professor Fukaya while he was busy preparing for his departure to the U.S., and I talked with him in his office where his books were piled high. Though usually he speaks very fluently, in this interview it was impressive that he carefully chose his words. It was also impressive that he had been interested in physics from the beginning of his carrier. Does it reflect, as Fukaya said at the beginning, the difference between his generation and mine?

# MaNGA Focus Week

Kevin Bundy

Kavli IPMU Assistant Professor

The Kavli IPMU “MaNGA Focus Week” concluded with great success on Friday, May 24th. MaNGA stands for “Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory,” a new Sloan Digital Sky Survey that will begin in 2014 and run for six years with the aim to obtain resolved spectroscopy for an unprecedented sample of 10,000 nearby galaxies.\* Kavli IPMU’s own Kevin Bundy is the

Principal Investigator. The focus week served not only as an all-hands team meeting designed to advance preparations for the project but also as the Critical Design Review of the MaNGA instrumentation upgrades that are being planned for the Sloan 2.5m telescope.

An external committee of prominent experts reviewed over 200 pages of original material developed by the MaNGA team and evaluated presentations on aspects of the project that ranged from the hardware design to the observing strategy and software tools. The primary focus was a new type of “integral field unit” (IFU) design innovated by the MaNGA team, which combines up to 127 optical fibers into a tightly packed and highly regular



hexagonal array. The team demonstrated through results both in the lab and with prototypes taken on sky that their design could regularly achieve the theoretical maximum throughput of 96% in a cost-effective solution that integrates seamlessly into the existing infrastructure at Apache Point Observatory.

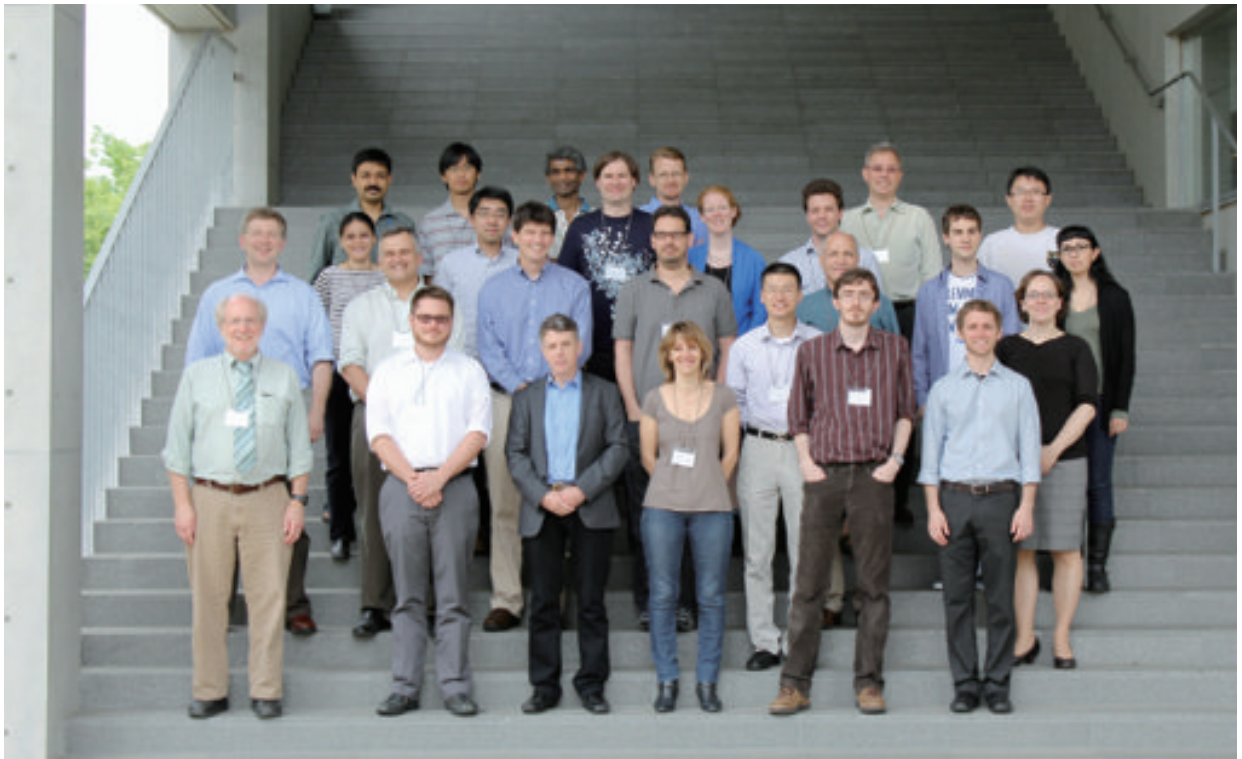
The review committee was highly impressed with the team's preparation and mature design, the result of an impressive and rapid effort over the last 14 months. They recommended the project proceed on track to full production and deployment in August 2014. At the same time, they helpfully identified a potential weak point in the quality of skyline subtraction that MaNGA hopes to achieve, an issue that the team is now aggressively addressing. With this positive feedback from the review, MaNGA can look forward to the first of its IFUs being constructed

\* See, *Kavli IPMU News No.20*, pp. 16-17.

over the summer of 2013, and the first of ultimately six “cartridges” of MaNGA hardware ready for testing at the observatory in February 2014.

Also discussed were MaNGA's next steps which include refinements to the sample selection and observing strategy as well as the development of software analysis tools which are crucial for providing data products that will eventually be released to the public. For each of the 10,000 galaxies in the sample, MaNGA will provide maps of the internal properties

of stars and gas as well as the velocity fields of both constituents. This information will provide valuable new constraints on the life cycle of galaxies, including the physical processes that regulate their birth, continued growth at late times, and their “death” through the cessation of star formation. The ability to use velocity maps to “weigh” galaxy components will also constrain the amount of dark matter in galaxies and possibly provide tests of the dark matter profile shape and alternate gravity theories.





# Kavli IPMU Arts Society

Aya Tsuboi

Kavli IPMU Academic Support Specialist

At Kavli IPMU, the “Kavli IPMU Arts Society” organizes art exhibitions a few times per year as a social activity involving researchers and administrative staff. I am one of its promoters, and I’d like to introduce its activities so far as well as some recent interesting Art and Science programs in Japan and overseas.

From January 21 to 28, 2013, “Science and Everyday Life Series 2 Masses and Sizes” was held in the Kavli IPMU building. The program consisted of a wall exhibition of 58 images contributed by 17 researchers and staff members, a wine and cheese party, and an installation piece produced from the contributed images. First, let’s have a look at some of the contributed images (Fig. 1). You can find images from our everyday life, and images from research activities are shown together. Once you take a look at all of them, you can find

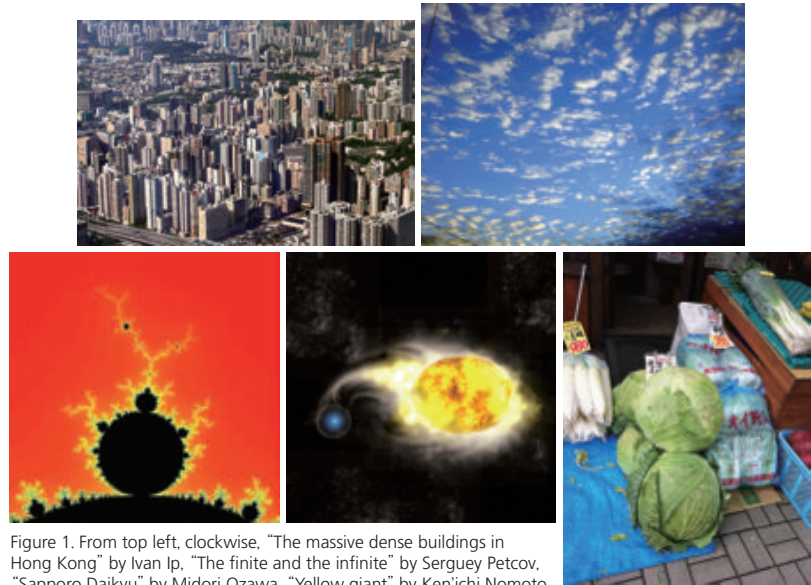


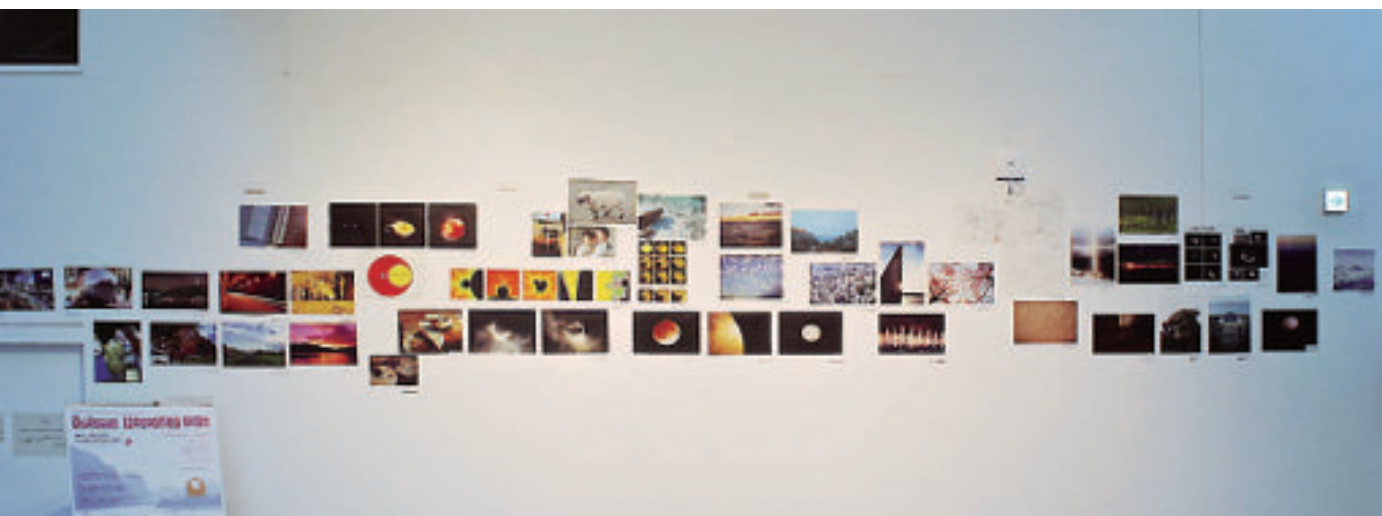
Figure 1. From top left, clockwise, “The massive dense buildings in Hong Kong” by Ivan Ip, “The finite and the infinite” by Serguey Petcov, “Sapporo Daikyu” by Midori Ozawa, “Yellow giant” by Ken’ichi Nomoto and Melina Bersten, and “Mandelbrot set” by Toshitake Kohno.

some relationship between them unexpectedly. This is the main point of the exhibition.

Actually this program was planned with two ambitions. Basically, researchers tend to make a group of people from the same country, or in the same research field. One ambition was to provide these researchers with opportunities to get together. The other ambition was to bridge the deep valley that separates extremely specialized Science from our everyday life. For each

exhibition in this series, therefore, we ask people at Kavli IPMU to contribute theme-based images. “Pattern” was the theme for the first exhibition and “Masses and Sizes” is the theme this time. There are two focuses in these exhibitions. One is that we deal with images from both research work and everyday life. The other is that we choose neither linguistic medium nor mathematical formula, but rather image, as the method of expression. Although you might see that this trial is acrobatic, let

Figure 2. A view showing the wall exhibition. There were 58 contributions from 17 people, including special contributions from Professor Toshio Kuroki, the WPI Program Director.





me remind you that *Morphologie*, developed by Johann Wolfgang von Goethe in the 19th century, for instance, focuses on the form of objects.

For the wall exhibition, contributors themselves printed out their images, and posted them on the specified wall with captions prepared in a prescribed format. In the first exhibition, it was Arts Society members that printed out and posted all the images. For this time, however, a different procedure was adopted in anticipation of encouraging more people to join this program. During the first couple of days after the announcement, the wall was empty except for my contributions, but the posted images increased day by day, and at last, they filled the wall (Fig. 2). At the middle of the exhibition period, we invited researchers and staff of Kavli IPMU to a wine and cheese party. Many people attended and enjoyed chatting as they appreciated the exhibition. It may well be that they were interested in the day-by-day change of the display on the wall. In addition, Arts Society displayed an installation piece on the floor of the entrance hall of the Kavli IPMU building, consisting of 14 outdated iMacs showing slideshows of



Figure 3. A view showing the installation piece. With 14 iMacs, 9 kinds of slideshows and 2 kinds of index movies were looped continuously.

the contributed images (Fig. 3). Actually, we sorted these images into nine categories<sup>\*1</sup> characterized by “sphere,” “light,” “fractal,” and so on, and made nine slideshows corresponding to these categories. Each slideshow was looped continuously with an iMac, carefully pairing iMacs together for two related categories (Fig. 4).<sup>\*2</sup> Whereas it was fun for you to have a look at all the images on the wall and think about the relationship among them, here was another kind of fun for you to see images inspired by the suggested gentle relationship. Fortunately, through the courtesy of the organizer of an international workshop that was held simultaneously with our program, we had a chance to explain about the exhibition to the workshop participants. It seemed that they also enjoyed the exhibition.

Now, let me tell you how to enjoy this exhibition. First of all, you



Figure 4. A closer view of the installation. “Fractal” (left) and “Discrete” (right).

can enjoy attractive photographs by hidden photo lovers at Kavli IPMU. Then you can guess the relationship between the images, which intimate the concept, “Masses and Sizes.”<sup>\*3</sup> You can also join the party and share thoughts with others. You can think about the difference between the wall exhibition and the installation piece...and so on. Naturally, contributing images to the exhibition would double your fun.<sup>\*4</sup>

It seems that the exhibition was completed satisfactorily with our aim achieved. The party stimulated lots of conversations (Fig. 5). I also

Figure 5. A view of the wine and cheese party. Cheese seemed to have disappeared “in the blink of an eye.”



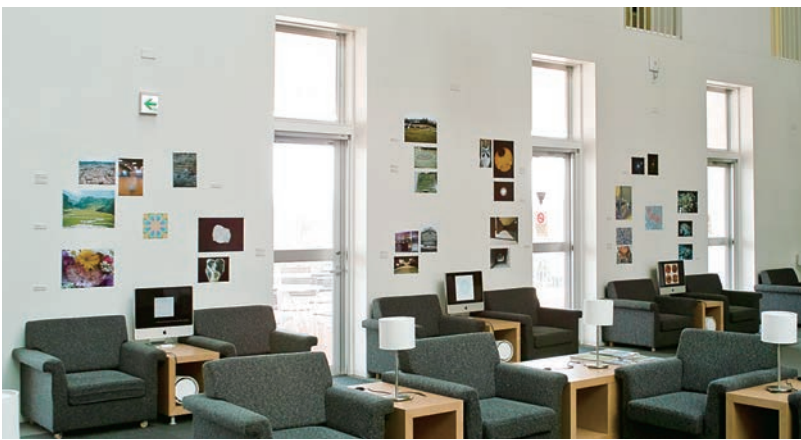


Figure 6. A view of the wall exhibition at "Science and Everyday Life, Series 1, Pattern." 16 people contributed.

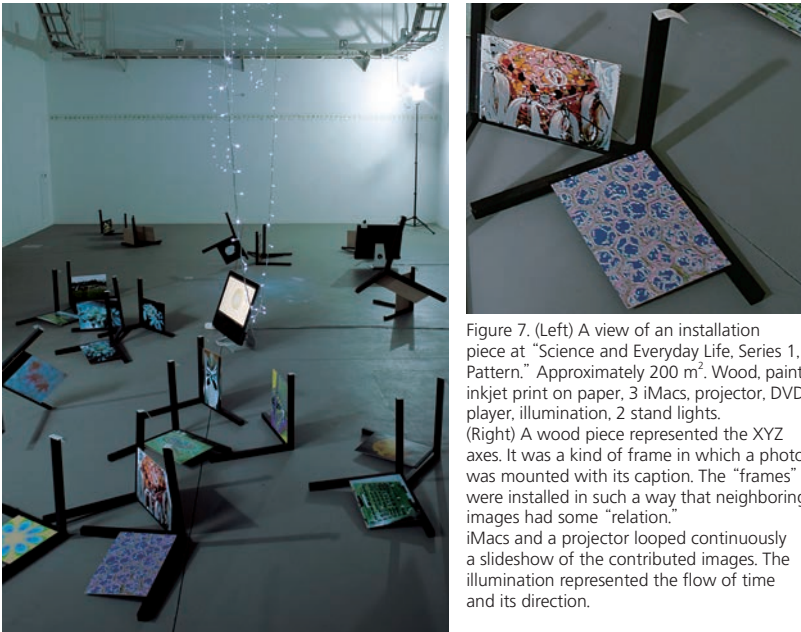


Figure 7. (Left) A view of an installation piece at "Science and Everyday Life, Series 1, Pattern." Approximately 200 m<sup>2</sup>. Wood, paint, inkjet print on paper, 3 iMacs, projector, DVD player, illumination, 2 stand lights. (Right) A wood piece represented the XYZ axes. It was a kind of frame in which a photo was mounted with its caption. The "frames" were installed in such a way that neighboring images had some "relation." iMacs and a projector looped continuously a slideshow of the contributed images. The illumination represented the flow of time and its direction.

heard that a group of researchers admired the installation piece as they chatted casually, which then led to discussion on their research.

- So far, the Arts Society has organized several exhibitions.
  - "Science and Everyday Life, Series 1, Pattern", March to April, 2011 (Figs. 6, 7)
  - "Searching for the other physics -an art exhibition at a science lab-vol. 02", June 29 to July 11, 2010 (Fig. 8)
  - "Searching for the other physics -an art exhibition at a science lab-vol. 01", February 3 to 27, 2010
- What is the role of this trial

of the Arts Society at the Kavli IPMU? In these years, it seems that a new tide has been appearing to bring Science and Art closer together. It may be that our attempt also contributes a bit to this tide. Let me introduce some examples. In September 2012, some administrative staff members of the Kavli IPMU visited research institutions in the US. They reported that they were impressed by the excellent support services and, in addition, the implementation of art programs. In particular, the Simons Center for Geometry and Physics in New York has its own Advisory

Board for the art program and organizes exhibitions in its building, Artists in Residence program,<sup>\*5</sup> and the like. CERN, a high-energy physics research center in Switzerland, started the Artists in Residence program in 2011, in partnership with Ars Electronica, which organizes one of the most famous international media art festivals annually in Austria.

How about scientists themselves? How do they think about Art? There was a bit unusual program on the Riken public open day in 2013. It was a sort of performance piece: real, serious scientific discussion by physicists was "displayed" in front of the audience. This program was coordinated based on the idea of a physicist, "Science is a kind of creative activity. Just as with Art, people can feel and gain something from Science, even if they can't understand its entirety."<sup>\*6</sup>

An event called "Cocktail and Science" is another example. This event has been held at a cinema in the city center of Copenhagen since 2010. At this event, scientists give talks, bartenders serve a fantastic menu of craft cocktails and experimental musicians play. The event is organized by a physicist, in cooperation with the Niels Bohr Institute, who says that, "A new definition of art: a person's individual science. A new definition of science: an art with concrete boundaries. Common to both is the method: an endless attempt to describe concepts/ideas/phenomena either subjectively or

objectively with increasing accuracy which can either be vouched for individually or collectively.”<sup>\*7</sup>

There is a notable new approach from the Art side, too. Central Saint Martins in London, one of the hottest colleges in the art world, newly opened up an MA Art and Science as a postgraduate course in 2011. Although Art and Technology or Design Science is popular, Art and Science in a fine arts course is totally new.

I'd like to point out that it is common to each of these attempts that the scientists and artists concerned have worked for themselves. Although many art exhibitions have traditionally been held at art museums and the like, with the theme of “Science,” it was generally a third party that worked for the exhibition,<sup>\*8</sup> for instance, in evaluating and arranging the exhibits. In contrast, it can be said that the attempt by the scientists and artists concerned who try to re-identify their activities by placing themselves in the respective framework is a new trend that has not been observed in modern times, as Science and Art goes their own ways, and the split between them has grown wider and wider.<sup>\*9</sup>

Science or Art had been a sort of attempts with which we were eager to touch something called “Truth” or “Knowledge” in some way. Science, however, has achieved a great success in modern times, and because of this, the responsibility of the scientific community has become too heavy a burden for the community alone.



Figure 8. A view of “Searching for the other physics -an art exhibition at a science lab- vol.02” exhibition. It was a group show concentrating on moving images. 4 young artists (including myself) from Japan and the UK showed their works. It was open to the public.

Art, on the other hand, has kept extending its framework, and it led to the present situation in which no one seems to find what Art is any more. Amidst such a conflict, I am excited at the thought of catching a glimpse of the new horizons that may again lead us to the “Knowledge.”

At the Kavli IPMU, researchers are challenging the mysteries of the universe by means of Mathematics, Physics, and Astronomy. It may be said that these are attempts to inherit the learning before the modern era, and they have high affinity with Art, Philosophy, and Aesthetics. The Arts Society will

continue with various activities bearing in mind possibilities to collaborate with other institutions, hoping that this approach will help activate the research activities at the Kavli IPMU, and furthermore, to contribute to “Knowledge.”

Finally, I would like to express my sincere gratitude to Director Murayama and former Administrative Director Nakamura for giving me this opportunity, to the administrative staff for giving me a boost, and Professor Mukohyama, the organizer of the workshop, for his generous permission for me to explain the exhibition to the participants.

<sup>\*1</sup> The nine categories are “the one,” “dual,” “multi,” “sphere,” “light,” “plane,” “The Sun,” “fractal,” and “discrete”. Some images belong to more than one category.

<sup>\*2</sup> We used an iMac for “the one,” 2 iMacs for “dual,” and 3 iMacs for “multi.” For “dual” and “multi,” the respective slideshow was duplicated and played in synchronization.

<sup>\*3</sup> “Masses and Sizes” can be broken down into the terms like light/heavy, small/big, single/multiple, constant/variable, finite/infinite, part/whole, continuous/discontinuous.

<sup>\*4</sup> Unfortunately, images contributed from research work were fewer than expected. I suppose that many of researchers think images from research work would be boring to be shown at exhibitions. One of the most interesting points of this program, however, is to take a look at many kinds of images. We hope more images from research work will be contributed next time.

<sup>\*5</sup> Host institutes invite artists for a certain period (for instance, a few months), and artists create and exhibit some pieces there.

<sup>\*6</sup> <http://d.hatena.ne.jp/D-brane/20130422>

<sup>\*7</sup> <http://www.jacomearmas.com/scicom.html>

<sup>\*8</sup> Nowadays, a lot of art exhibitions, both domestic and overseas, are held at museums, based on the museums' resources.

<sup>\*9</sup> In ancient Greece, Science and the humanities/social sciences were parts of a study. Up to now, they had gone their own ways and the split between them had grown wider and wider. During the Renaissance, Science and Art were close, but now, where Art also treats the same subjects as the humanities/social sciences, there is also a big split between Science and Art just as there is between Science and the humanities/social sciences. But of course this doesn't mean that there has been no relationship between Science and Art. In modern times, there have also been myriad art pieces that were created by viewing Science as a source of inspiration.



## Director Murayama Elected to the American Academy of Arts and Sciences

On April 24th, 2013, the American Academy of Arts and Sciences announced 198 newly elected members including Hitoshi Murayama, Director of the Kavli IPMU. It was founded in 1780 to cultivate every art and science, and from the latter half of the 20th century, it has been an independent policy research center that conducts multidisciplinary studies of complex and emerging problems. Past members include George Washington, the first President of the United States, Albert Einstein, Nobel Laureate in Physics, as well as leaders in a broad range of areas including politics, business, science, and art at all times. The newly elected members include David Weinland, 2012 Nobel Laureate in Physics, Robert De Niro, a renowned actor, and many other distinguished scientists, artists, and politicians.

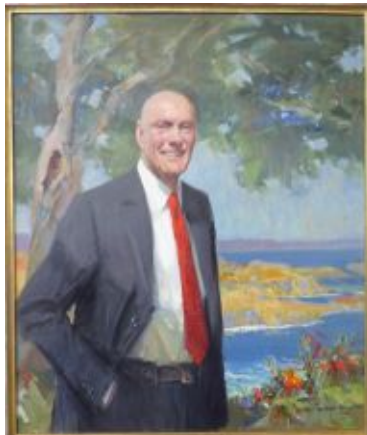
The Academy has selected as members the finest minds and most influential leaders from each generation, and selection by the Academy has always been one of the highest honors in the United States. Director Murayama said, "I never imagined that I would be among such a distinguished list of scientists. This will be a great opportunity for

me to advance science in this area of research, as well as to promote the contribution of those with Japanese ancestry."

The induction of new members will take place on October 12, 2013, in Cambridge, Massachusetts, where the Academy's headquarters is located.

## Fred Kavli's Portrait Hung on the Wall of Interaction Area at Kavli IPMU

A portrait of Fred Kavli, founder and Chairman of The Kavli Foundation, arrived at Kavli IPMU in May, 2013. The portrait was drawn by New York-based noted portrait painter, Everett Kinstler and dedicated to Fred Kavli for his support to the 16th Kavli Institute, Kavli IPMU. The portrait is hung on the wall of the Kavli IPMU's interaction area, Piazza Fujiwara, as if Fred Kavli is watching researchers gathering and discussing there.



Portrait of Fred Kavli

## The 4th Yoji Totsuka Prize to Kunio Inoue

The Fourth Yoji Totsuka Memorial Prize (2012) has been awarded to Kunio Inoue, Director of the Research Center for Neutrino

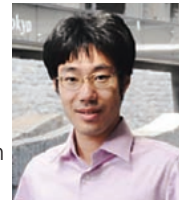


Kunio Inoue

Science (RCNS), Tohoku University, and Principal Investigator at the Kavli IPMU, and Atsuto Suzuki, Director General of High Energy Accelerator Research Organization (KEK), for their neutrino research using liquid scintillator. In particular, the first observation of terrestrial antineutrinos (geoneutrinos) in the KamLAND experiment in 2001, which showed evidence that Earth's primordial heat supply has not yet been exhausted and established the foundation of "neutrino geophysics," has been recognized. This prize is awarded annually aiming at recognizing outstanding achievements in neutrino physics experiments, non-accelerator particle physics experiments, or related theoretical studies. The award ceremony was held on March 20 at the Koshiba Hall at the University of Tokyo.

## Tomoyuki Abe Received 2013 MEXT's Young Scientists' Prize

On April 8, 2013, the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT) announced that the 2013 Young



Tomoyuki Abe

Scientists' Prize went to Kavli IPMU Assistant Professor Tomoyuki Abe for his, "Fundamental work on theory of arithmetic D-module and research on the Langlands correspondence." This award is given to young scientists under 40 years old in recognition of their outstanding original, or, challenging exploratory, research accomplishments, which show their ability for high-level research. In 2013, 89 young scientists, including Abe, won the award. The award ceremony was held on April 16, 2013 in Tokyo, JAPAN.

### Yoichiro Suzuki Receives Giuseppe and Vanna Cocconi Prize

The European Physical Society announced to award the Giuseppe and Vanna Cocconi Prize to Yoichiro Suzuki, Director of Kamioka Observatory at the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo and Deputy Director of the Kavli IPMU, and Professor Art McDonald “for their outstanding contributions to the solution of the solar neutrino puzzle by measuring the flux of all neutrino flavors from the Sun with the SNO and Super-Kamiokande experiments.” The Giuseppe and Vanna Cocconi Prize has been awarded every two years since 2011 by the High Energy and Particle Physics Division of European Physical Society. The Prize is awarded to an individual or individuals who have made outstanding contributions to Particle Astrophysics and Cosmology in the past fifteen years. The prize ceremony will be held on Monday July 22, at the 2013 EPS-HEP Conference in Stockholm.



Yoichiro Suzuki

### Gravitational Lensing Observation of Galaxy Clusters Shed New Light on Dark Matter

Professor Masahiro Takada is a member of an international team of astronomers from Academia Sinica, Taiwan, University of Birmingham, England, Kavli IPMU, and Tohoku University, which has used the Subaru Telescope to measure the distribution of dark matter in fifty galaxy clusters by means of gravitational lensing and found that its density gradually decreases from the center of these cosmic giants to their diffuse outskirts. This new evidence about

the mysterious dark matter that pervades our Universe conforms to the predictions of cold dark matter theory, known as “CDM.”

Past research based on a small number of clusters did not conform to CDM theory. In contrast, the fact that this research sampled as many as 50 clusters led to a successful measurement of the average shape of the dark matter density distribution.

In future, further progress is expected from the measurement of the distribution of dark matter in many more galaxy clusters using the Subaru Telescope’s new Hyper Suprime-Cam (HSC) for gravitational lensing studies.

This result has been published online in *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 769, on June 1, 2013.

### “Standard Candle” Supernova Extraordinarily Magnified by Gravitational Lensing

A team of researchers at the Kavli IPMU including Robert Quimby, Marcus Werner, Masamune Oguri, Ken’ichi Nomoto, and others has identified PS1-10afx, a “superluminous” supernova observed at a distance of about 9 billion light years is actually a Type Ia supernova (SNIa) 30 times magnified by a strong gravitational lens.

The supernova PS1-10afx, discovered by the Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System 1 (Pan-STARRS1), was very luminous (about 100 billion times greater than our Sun), and the Pan-STARRS1 team concluded that PS1-10afx was intrinsically very luminous, namely, a “superluminous” supernova. Soon after the findings were announced, Robert Quimby, a Kavli IPMU postdoctoral fellow, independently analyzed the data and found that the features seen in the spectra and the light curve of PS1-10afx are almost identical to those of normal

SNIa, which is known as the “standard candle” to measure cosmological distances. As Marcus Werner specializes in mathematical theory of gravitational lensing, the Kavli IPMU team found an explanation that the anomalously high brightness could indicate that PS1-10afx was a SNIa gravitationally lensed by an object between us and the supernova.

Gravitational lensing is one of a few means to “observe” invisible astronomical objects such as dark matter, dark energy, and black holes. As the “standard candle” property of SNIa is successfully used to directly measure the magnification due to gravitational lensing in this work, it is expected this method can be used to study the nature of dark matter, test theories of gravity, and help reveal what our universe is made of.

This result appeared in *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 768, on May 1, 2013.

### Students of Leiden University Visited Kavli IPMU

On May 1, 2013, graduate and undergraduate students from Leiden University in the Netherlands visited Kavli IPMU as a part of their study abroad program in Japan. Following the Associate Director Nobu Katayama’s introduction of Kavli IPMU, they heard academic lectures by Kavli IPMU postdoctoral fellows, Rene Meyer, Cornelius Schmidt-Colinet, Surhud More, and Robert Quimby. They also enjoyed a guided tour of the Kavli IPMU building and a Q&A session





surrounding Kavli IPMU Professor Masahiro Takada. Students who major in physics and astrophysics asked questions about gravitational lensing, superstring theory, and the like. Some students said that they wish to stay at Kavli IPMU for research in future.

### Kavli IPMU Seminars

1. "On semi-continuity problems for minimal log discrepancies"  
Speaker: Yusuke Nakamura (U Tokyo)  
Date: Apr 02, 2013
2. "Logarithmic conformal field theory and the Verlinde formula"  
Speaker: Thomas Creutzig (TU Darmstadt)  
Date: Apr 03, 2013
3. "Complementarity or Firewalls: the Emergence of Classical Worlds"  
Speaker: Yasunori Nomura (UC Berkeley)  
Date: Apr 05, 2013
4. "A (Working) Verlinde Formula for Fractional Level WZW Models"  
Speaker: David Ridout (Australian National U)  
Date: Apr 09, 2013
5. "The Gamma Ray Line and Some Tests"  
Speaker: Xiaoyuan Huang (NAOC)  
Date: Apr 10, 2013
6. "The First billion years of History – Star-forming galaxies at the end of the dark ages"  
Speaker: Andrew Bunker (U Oxford)  
Date: Apr 10, 2013
7. "Ideas for lab tests of dark energy"  
Speaker: Robert Caldwell (Dartmouth College)  
Date: Apr 11, 2013
8. "Tidal disruption flares from stars on eccentric orbits"  
Speaker: Kimitake Hayasaki (Korea Astronomy & Space Science Inst.)  
Date: Apr 11, 2013
9. "Symplectic cohomology and mirror symmetry"  
Speaker: Daniel Michael Pomerleano (Kavli IPMU)  
Date: Apr 11, 2013
10. "Renyi entropy and Entanglement spectrum"  
Speaker: Shunji Matsuura (McGill U)  
Date: Apr 16, 2013
11. "Search for New Physics at Belle II by Global Fit"  
Speaker: Ryosuke Itoh (KEK)  
Date: Apr 17, 2013
12. "Horizon instability of an extreme Reissner-Nordstrom black hole"  
Speaker: Norihiro Tanahashi (Kavli IPMU)  
Date: Apr 17, 2013
13. "Supersymmetric Boundary Conditions in Three Dimensional N=2 Theories"  
Speaker: Satoshi Yamaguchi (Osaka)  
Date: Apr 19, 2013
14. "Possible Effects of Galactic Cosmic Rays on Climate and Weather"  
Speaker: Hiroko Miyahara (ICRR)  
Date: Apr 22, 2013
15. "Dualities through the orbifold equivalence in Chern-Simons-matter theories"  
Speaker: Mitsutoshi Fujita (Kavli IPMU/Washington U)  
Date: Apr 23, 2013
16. "An Introduction of the Higgs Particle to Astrophysicist and Mathematician"  
Speaker: Tsutomu Yanagida (Kavli IPMU)  
Date: Apr 24, 2013
17. "Novikov homology and its geometric applications"  
Speaker: Andrei Pajitnov (U Nantes)  
Date: Apr 25, 2013
18. "Topological-antitopological fusion and gauged linear sigma models"  
Speaker: Mauricio Andres Romo Jorquera (Kavli IPMU)  
Date: Apr 25, 2013
19. "An introduction to the theory of primitive forms (Part 1)"  
Speaker: Todor Milanov (Kavli IPMU)  
Date: Apr 26, 2013
20. "An introduction to the theory of primitive forms (Part 2)"  
Speaker: Todor Milanov (Kavli IPMU)  
Date: Apr 26, 2013
21. "SUSY (with explaining the muon g-2 anomaly) at the LHC"  
Speaker: Sho Iwamoto (Kavli IPMU)  
Date: May 01, 2013
22. "Possible existence of viable models of bi-gravity with detectable graviton oscillations by gravitational wave detectors"  
Speaker: Takahiro Tanaka (YITP, Kyoto U)  
Date: May 02, 2013
23. "Parity violation in QCD process via SUSY"  
Speaker: Kunio Kaneta (Kavli IPMU)  
Date: May 08, 2013
24. "Quantum tunneling in the inflationary era and its observational consequences"  
Speaker: Kazuyuki Sugimura (YITP, Kyoto U)  
Date: May 09, 2013
25. "Finite-dimensional representations over a quantum loop algebra and their classical limits"  
Speaker: Katsuyuki Naoi (Kavli IPMU)  
Date: May 09, 2013
26. "The singularity theorems in general relativity. I"  
Speaker: Amir Aazami (Kavli IPMU)  
Date: May 10, 2013
27. "Quantum quench in matrix models: Dynamical phase transitions, equilibration and the Generalized Gibbs Ensemble"  
Speaker: Takeshi Morita (KEK)  
Date: May 10, 2013
28. "The SFR-M\* relation from low to high redshift"  
Speaker: Alvio Renzini (INAF)  
Date: May 13, 2013

29. "Minimal SUSY SU (5) GUT in the high-scale SUSY scenario"  
Speaker: Natsumi Nagata (Nagoya)  
Date: May 15, 2013
30. "Structure and kinematics of starforming galaxies at  $z \sim 2$ "  
Speaker: Alvio Renzini (INAF)  
Date: May 15, 2013
31. "Superstring theory and integrations over moduli space"  
Speaker: Kantaro Omori (U Tokyo)  
Date: May, 2013
32. "Galaxy Formation and Evolution through Metals"  
Speaker: Lisa Kewley (ANU)  
Date: May 16, 2013
33. "The singularity theorems in general relativity. II"  
Speaker: Amir Aazami (Kavli IPMU)  
Date: May 17, 2013
34. "Twisted spacetime reduction in large N QCD with adjoint Wilson fermions"  
Speaker: Masanori Okawa (Hiroshima U)  
Date: May 20, 2013
35. "Witten deformation and Morse category"  
Speaker: Ziming Nikolas Ma (CUHK)  
Date: May 20, 2013
36. "Color Confinement and Emergent Higgs"  
Speaker: Ryuichiro Kitano (KEK)  
Date: May 22, 2013
37. "The Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment"  
Speaker: Gary Hill (McDonald Observatory)  
Date: May 22, 2013
38. "Search for C-odd partner of X (3872) at Belle"  
Speaker: Tomoko Iwashita (Nara Women's U)  
Date: May 23, 2013
39. "Khovanov-Lauda-Rouquier algebras and the symmetric groups (survey)"  
Speaker: Shunsuke Tsuchioka (Kavli IPMU)  
Date: May 23, 2013
40. "The singularity theorems in general relativity. III"  
Speaker: Amir Aazami (Kavli IPMU)  
Date: May 24, 2013
41. "Precision Event Generation for LHC Physics"  
Speaker: Stefan Hoeche (SLAC)  
Date: May 29, 2013
42. "Construction of Explicit de Sitter vacua in Type IIB Flux compactifications"  
Speaker: Markus Rummel (DESY)  
Date: Jun 04, 2013
43. "Usage of Mathematica Beyond a Calculator"  
Speaker: Yi Wang (Kavli IPMU)  
Date: Jun 04, 2013
44. "Global mirror symmetry for invertible simple elliptic singularities"  
Speaker: Yefeng Shen (Kavli IPMU)  
Date: Jun 06, 2013
45. "The Gamma class and perturbative sigma models"  
Speaker: David R. Morrison (UCSB)  
Date: Jun 07, 2013
46. "First cosmological results from the Planck satellite"  
Speaker: Francois R. Bouchet (IAP)  
Date: Jun 07, 2013
47. "Displaceability of Lagrangian submanifolds and Hamiltonian Floer theory"  
Speaker: Morimichi Kawasaki (U Tokyo)  
Date: Jun 11, 2013
48. "M-strings"  
Speaker: Cumrun Vafa (Harvard U)  
Date: Jun 11, 2013
49. "Study of top-quark anomalous couplings through polarization"  
Speaker: Saurabh Rindani (INSA)  
Date: Jun 12, 2013
50. "Lattice QCD —achievements and perspectives —"  
Speaker: Akira Ukawa (U Tsukuba)  
Date: Jun 12, 2013
51. "Computing the fundamental group of a Complex hyperbolic orbifold"  
Speaker: Thatagata Basak (Iowa State U)  
Date: Jun 13, 2013
52. "Neutron Star Thermal Evolution and Properties of Ultra-High Density Matter"  
Speaker: Sachiko Tsuruta (Montana State U)  
Date: Jun 13, 2013
53. "New applications of de-Sitter geometry in astrophysics I"  
Speaker: Marcus Werner (Kavli IPMU)  
Date: Jun 13, 2013
54. "The next-generation infrared space mission SPICA"  
Speaker: Takao Nakagawa (JAXA)  
Date: Jun 13, 2013
55. "3d dualities from 4d dualities"  
Speaker: Shlomo S. Razamat (IAS)  
Date: Jun 14, 2013
56. "Green function approach to self-force calculations"  
Speaker: Barry Wardell (U College Dublin)  
Date: Jun 18, 2013
57. "New 3d CFTs with 8 supersymmetries from topological gauging"  
Speaker: Bengt Nilsson (Chalmers U of Technology)  
Date: Jun 18, 2013

#### Kavli IPMU Komaba Seminars

1. "Calabi-Yau threefolds of Type K"  
Speaker: Atsushi Kanazawa (U British Columbia)  
Date: Apr 24, 2013

#### Personnel Change

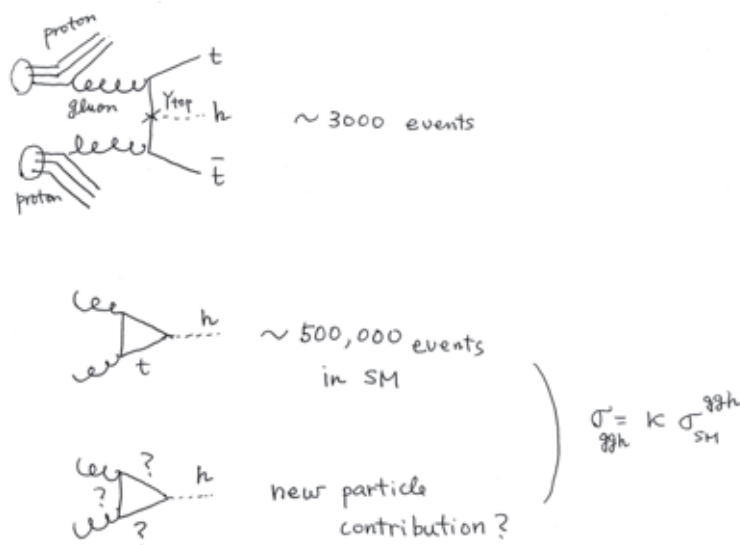
Kavli IPMU postdoctoral fellow Sourav Mandal has taken a position as staff scientist at the Institute for Defense Analyses, USA. He was at Kavli IPMU from July 1, 2010 to June 30, 2013.

# Properties of the Higgs Particle

Mihoko Nojiri

Principal Investigator of Kavli IPMU

After the discovery of “Higgs boson”, the study of the nature is going on. In the standard model of particle physics, Higgs boson couples to the top quark most strongly, but the coupling has not been proven yet because the rate to produce the top quarks with Higgs boson is rather small. The coupling is indirectly observed though the Higgs production cross section, because virtually produced top quarks may return to Higgs boson, but there might be the effect of unknown particle contribution as well. Higgs nature is not known precisely, because backgrounds are so high at LHC. The proposed  $e^+e^-$  collider, ILC, might bring the crucial information to understand the nature of Higgs boson, and new particles behind it. The ideas to reveal the Higgs nature will be discussed in the school, “The future of collider physics” to be held in July.



## 衛兵の交代

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

2007年10月1日にIPMUが発足したときは、研究者は一人もいませんでした。その半月後、最初に着任した研究者が初代事務部門長、中村健蔵さんです。彼はこの4月、この仕事から退きました。

中村さんは目覚ましい仕事ぶりでした。WPIプログラムの要求事項を胸に刻み、分野を融合する研究環境、国際的なメンバーシップ、研究者への最小限の雑用、という組織の実現に取り組みました。このどれ一つをとっても簡単なことではありません。すぐさまバイリンガルな職員を集め、外国人研究者がすぐに日本に落ち着き仕事を始められるようなサポート体制を築きました。大学本部と交渉を重ね、柔軟な雇用体制を作りました。実際、様々なシステム上の障害を乗り越える彼の努力なくしては、私自身当時の小宮山総長から辞令を戴くこともなく、今のメンバーのほとんどは今ここにいなかったことでしょう。しかも私の怪しい日本語を事務のために翻訳までしてくれました。

彼はそもそもニュートリノ物理学で有名な実験家でした。世界で初めての長基線ニュートリノ振動実験K2Kが実現するために、大きな働きをしています。KEKからニュートリノのビームを250km離れたスーパーカミオカンデへ打ち込んだのです。またParticle Data Groupでの長年の貢献は、彼のサービス精神を良く顕しています。深いサイエンスの知見、サービス精神、政治的技量、慎重なマネジメント、そして献身的な態度、こうした組み合わせを持つ人は稀にしか見当たりません。私達は皆彼に感謝すべき点がたくさんあります。

実は彼は私達から離れてしまったのではありません。毎日出勤し、このKavli IPMU Newsの編集を続け

てくれています。そして色々判断に迷ったときは、アドバイスをくれる賢人です。

ところで彼の後継者が気になるでしょう。大変幸運なことに、こうした稀な才能を持つ人がもう一人見つかりました。春山富義さんです。彼もKEKからの異動で、低温技術の著名な研究者です。暗黒物質を探索するXMASSや、ブラックホールの合体から来る重力波を探るKAGRAなど、基礎物理学の実験に大事な貢献をしてきました。またKEKの素粒子原子核研究所の副所長や日本の低温工学会会長を務める等、マネジメントの経験も豊富です。しかも何とも楽しい人です！

こうした素晴らしい人たちに支えられているのは、大変ありがたいことです。彼らのお蔭で、安心して最高の環境で研究できるのです。

この中村さんが編集した今号のKavli IPMU Newsも楽しい読み物です。高名なsymplectic幾何学の数学者深谷賢治氏が、我が齋藤恭司主任研究員と数学と物理の関係について対談しています。また渡利泰山氏が数学者の同僚、戸田幸伸氏を巻き込んだフレーバー物理の研究について書いています。皆さんも楽しんでお読み下さい。そして中村さん、ありがとうございます！



中村前事務部門長



春山事務部門長



# ニュートリノ振動の大角度混合がもたらした衝撃

## 1. 原子、電子、質量

日常的に私たちが接する物質は、すべて原子からできています。ひとくちに原子といっても、100種類ほどの性質の違った原子があって、その種類ごとに、水素、ヘリウム、炭素、酸素、鉄、銅、銀、金、セシウム、ウラン、などといった名前がつけられています。どの種類の原子も、図1のように、「陽子と中性子がギュッとかたまりあってできた原子核の周りを、電子が飛び回っている」、という姿をしています。炭素、水素、鉄、という各種の原子の性質の違いは、陽子の数の違いだけから来ていることが分かっています。そして、いろいろな物質の化学変化や、超伝導といった物質の性質は、これらの原子、原子核や電子の性質、とくに、陽子がプラスの電気を持ち、電子がマイナスの電気を持つ、という性質から出発して、理解することができます。

それでは、なぜ、陽子や中性子は小さくギュッと固まりあう一方で、電子はその周りを飛び回る、という振る舞いを示すのでしょうか？ 実際のところ、陽子や中性子が構成する原子核の半径は、電子の行動半径に比べて、5桁ほど小さいのです。原子核を1 cmの大きさに拡大すると、電子の行動範囲は1 kmになります。この大きな差はどこから来るのでしょうか？

1934年の湯川秀樹による中間子論は、数多くの陽

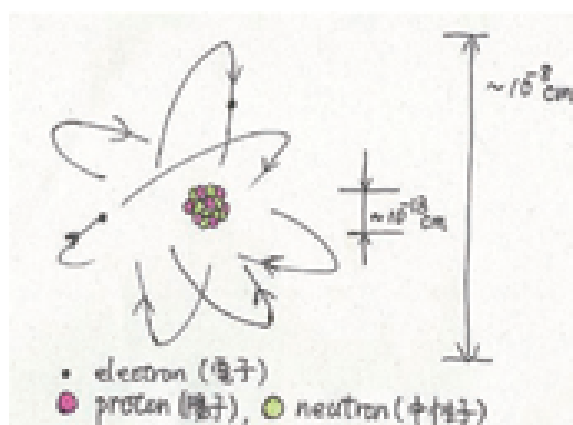
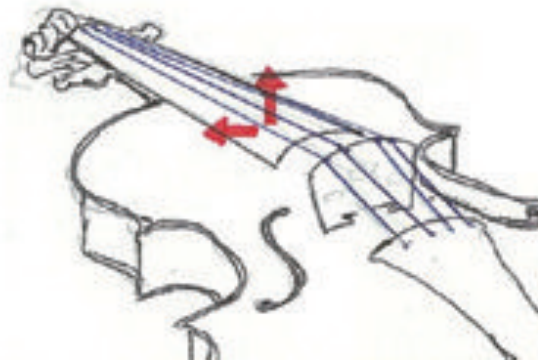


図1 「原子とそこにある原子核」のイメージ図。原子の全体の大きさに比べて、原子核の大きさを、この絵では10分の1くらいに描いてありますが、実際には10万分の1くらいの大きさです。

子や中性子からなる原子核がギュッと固まっていられる仕組みを、量子力学の枠内で見つけようとするものでした。「ギュッと固まっていられるためには、当時はまだ未発見の新粒子があればよい、そして、原子核の固まるサイズは、新粒子の質量によって決まる」、ということを中間子論は主張したのです。原子核の半径が電子の行動半径の5桁も小さくなるためには、新粒子の質量は電子の200倍ほどのはずだ、と予想されました。<sup>1</sup>

<sup>1</sup>なぜ中間子の質量は電子の質量の5桁上、ではなく2桁上、なのかというと、「電磁気力の強さ」の値も、原子核の半径と電子の行動半径の比率に関わっているからです。

図2 海面の波は、海面の各点での「波面の高さ」という1つの数値で表されますが、バイオリンの弦の動きは、弦の上の各点で、「図中の赤色矢印の2方向への位置（ずれ）」からなる、2つの数値で表されます。すなわち2自由度の波で表されます。



## 2. ミュー粒子の発見、「だれがこんなもの頼んだのだ!？」

中間子論の正しさを立証するには、そのような新しい粒子—中間子と呼ぶ—が存在することを実証するのが正攻法です。中間子を実験室で作り出すのは、当時の実験技術では困難だったのですが、大気の上から降ってくる高いエネルギーの粒子の中には、中間子が含まれているかも、という期待が持てました。そのため、大気中を降ってくる高速粒子の性質を観測する実験が1930年代後半に行われました。Anderson-Neddermeyer, Street-Stevenson、そして仁科芳雄らによる実験は、不思議なことに、中間子の予言された質量とほぼ同じくらいの質量の、しかし、中間子とは異なる性質を持った新しい粒子を発見してしまったのです。その後、中間子そのものも、観測実験の中でめでたく発見されるのですが、この予想外の新しい粒子には、とりあえずミュー粒子、と名前をつけてみたものの、当時の研究者はみな困惑させられました。ミュー粒子は、電気量などの性質が、電子と全く同じ。ただ、質量だけが電子と違う。なぜこんな粒子が存在しなければならないのか、何の「役に立つ」のか、全く分からない。ノーベル物理学賞を受賞した研究者、I. Rabi は、「Who ordered that?」という言葉を残しました。「誰

<sup>2</sup> 我々の自然界にこのミュー粒子が存在するという事実と、我々の宇宙には反物質がほとんど残っていないという事実の間には、実は、密接な関係がある可能性があります。ただ、それをもって Rabi の問いに対する答であると言うのが適切か否かは、議論の余地があります。

がこんなもの頼んだのだ??」といった感じでしょうか。

この単純過ぎるほどの問い、現代の素粒子物理学においても、答えがまったくわかっていないのです。<sup>2</sup>

## 3. 波の「高さ」とは何か?

「光=電磁波」のふるまいは、電場と磁場の波に対する方程式によって決まっていますが、電子、陽子、といった粒子のふるまいも、同様に、電子の波、陽子の波、といったものに対する方程式によって決まっています。その方程式を与えてくれるのが、量子力学です。

ミュー粒子という新たな粒子が「なぜ存在するのか」、という問いは当面脇においておくとしても、少なくとも、素粒子たちの振る舞いを記述するのに、「ミュー粒子の波」というものを新たに導入しなければならないことは確かです。これらの、「電磁場の波」、「電子の波」、「陽子の波」、「ミュー粒子の波」、..とはいったい何者なのでしょう?

「海の波」ならば、話は簡単です。海面の各点で、その時刻、海面の高さが平均海面から大きくずれているほど、海の波が高い/低い、ということにあたります。また、種類の違う波が複数ある状況も、さほど違和感はないでしょう。「バイオリンの弦の波」では、図2にあるように、弦の通常的位置から2方向へのずれを2種類の波の高さとして捉えることができます。バイ

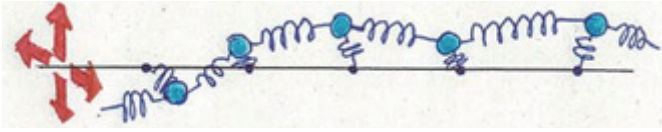


図3-1 バイオリンの弦の動きを再現する力学模型。錘(水色の玉)が赤色矢印の2方向に動けますが、各々の錘は、各自の通常安定位置にバネでつながっていて、かつ、隣接する錘の間もバネでつながっています。

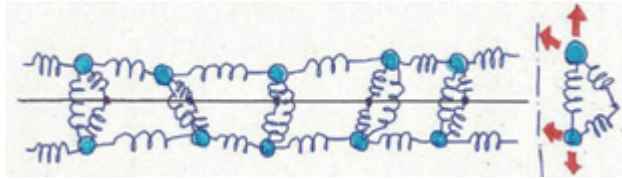


図3-2 もう少し複雑な力学模型。各点に載っている力学系が、錘2つとバネ3つからなるもの(図の右端)に置き換えられています。この各点の力学系の配位は「赤矢印で示した4つの動き(数値)」で表されるので、これを4自由度の力学系、と言います。力学模型全体のふるまいは、4種類の波を用いて記述されます。

オリンの弦がどちらの方向に揺れているかによって、いくらか音色(つまり種類)がちがう、のだそうです。

もう少し複雑な例を考えるための準備として、バイオリンの弦の振る舞いは、図3-1のような力学模型で再現することができる、ということをおさえておきましょう。錘の一つをつまんで「通常位置」からずらして、手を離せば、ばねを通じて、錘の「2種類(2方向)の通常位置からのずれ」が、空間(横軸)方向に広がって伝わっていきます。では、次に、この模型をもう少し複雑にして、図3-2の模型を考えるとどうでしょう? 空間(横軸)の各点に、ある決まった力学系が載っていて、それが互いにつながっている、という仕組みになっています。その空間各点に載っている力学系について、「安定配位からのずれ=通常位置からのずれ」をあらわすには、複数の数値を用いねばなりません。図3-2の模型の場合、4つの数値が必要なので、この模型の振る舞いは、複数の波を用いて記述されます。このような模型の量子力学版を、場の量子論と言います。

現在のところ、場の量子論に、「空間の各点に載っている複雑な力学系」についていくつかの性質を仮定しさえすれば、電子や電磁場、ミュオンなどの素粒子の振る舞いについての既存の実験結果を非常によく説明する、ということが分かっています。標準模型、

と呼ばれる場の量子論の模型では、電子、ミュオン、といった粒子=波が45種類、電磁波とそれに似た性質をもつ波が12種類、そしてヒッグス場、と呼ばれる波が1種類、あわせて58種類の波を用います。ですから、乱暴に言ってしまうと、我々の宇宙では、「空間の各点に58の自由度がある力学系が載っていて、それが隣接各点の力学系とつながっている(図3のように)」というのが素粒子の世界の姿だということになります。

ですから、この場の量子論の言葉を用いれば、「なぜミュオンという粒子が我々の世界の記述に必要なのか」という問いは、「なぜ空間各点の上に乗っている力学系はそんなに複雑(多自由度)なのか」という問いに置き換えられます。ただ、その難問に挑む前に、「我々の世界の記述を与えている、空間各点の力学系の正体は何者なのか」を問うのが正攻法でありましょう。確実なのは、図3-2の絵にあるような力学系よりは相当に複雑なことです。58も自由度があるのですから! そして、その問いに挑むには、「その力学系について、何を我々は自然(実験)から学べるのか」を整理するところから始める必要があります。力学系の「自由度の数」、だけではなく、より多くの情報を引き出したい。どのような実験から、何を学べるのでしょうか?

図4-1 中性子の崩壊。中性子はu型のクォーク1つとd型のクォーク2つが絡み合っている状態、と現在では理解されています。同様に、陽子は、u型のクォーク2つとd型のクォーク1つが絡み合った状態と理解されています。単独で存在する中性子は、陽子と電子とニュートリノの3つの粒子に自然に崩壊します。(图中、崩壊反応は図の左から右へと進みます。) その反応は、本質的には、クォークと電子、ニュートリノの間の相互作用です。

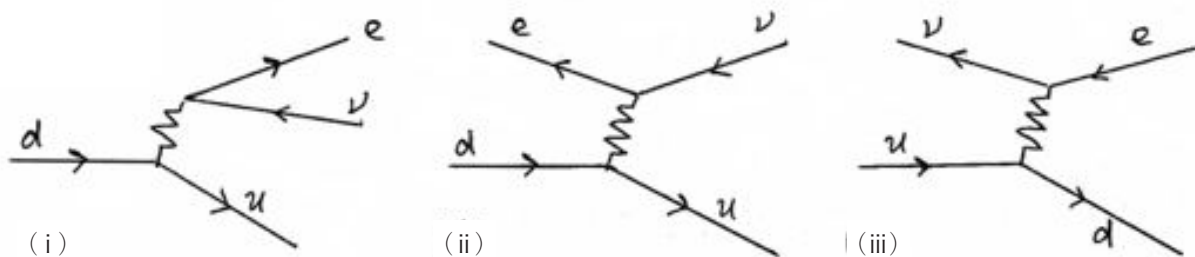
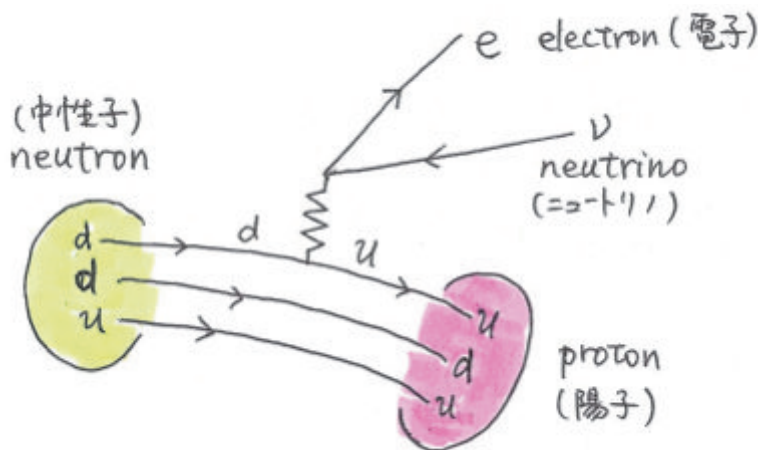


図4-2 (i) は、中性子の崩壊反応(図4-1)のうち、反応に直接関与しているクォークのみを取り出したものです。(ii)では、(i)の反応のように反応後に電子が出てくる代わりに、電子の反粒子が反応後になくなる反応を描いています。(iii)の反応は、(ii)の反応での時間の進み具合を逆向きにしたものです。いずれも、反応は図の左側から右側へと進みます。自然界では、(i)の反応だけでなく、(ii)や(iii)の反応も起きることが知られています。この弱い相互作用とは、(ii)、(iii)で分かるように、「パパ抜き」のようなもので、例えば(ii)の反応の場合、「パパ」を貰い受けると顔色が変わります(d型がu型に転換する)が、同時に、「パパ」を他の人に渡してホッとしている人もいます(電子の反粒子がニュートリノの反粒子に転換)。粒子間をつなぐギザギザは、パパの受け渡しを表します。

#### 4. 弱い相互作用とニュートリノ

単独で存在する中性子は、放っておくと安定ではなく、数分くらいで、陽子と陽電子(電子の反粒子)とニュートリノという3つの粒子に崩壊することが知られています。さらに、中性子や陽子は、クォークと呼ばれる、より小さな粒子の結合状態であることも知られています。中性子の崩壊現象は、図4-1のような2種類のクォーク、電子、ニュートリノの間の相互作用に由来するもの、というのが、現在の素粒子物理での理解です。また、図4-1(あるいは図4-2(i))の相互作

用だけでなく、図4-2(ii)、(iii)などの相互作用も同時に存在することが分かっています。

ニュートリノという粒子は、電気量を持たず、この弱い相互作用のみを通じて他の粒子と力を及ぼしあいます。このことは、ニュートリノという粒子を検出するためには、弱い相互作用を用いなければならない、ということも意味します。実際、中性子の崩壊で出てきたニュートリノを初めて検出したのは、図4-3のように逆反応を利用した、1959年のReines-Cowanの実験でした。

さて、2節で、ミュー粒子という、電子と(質量は



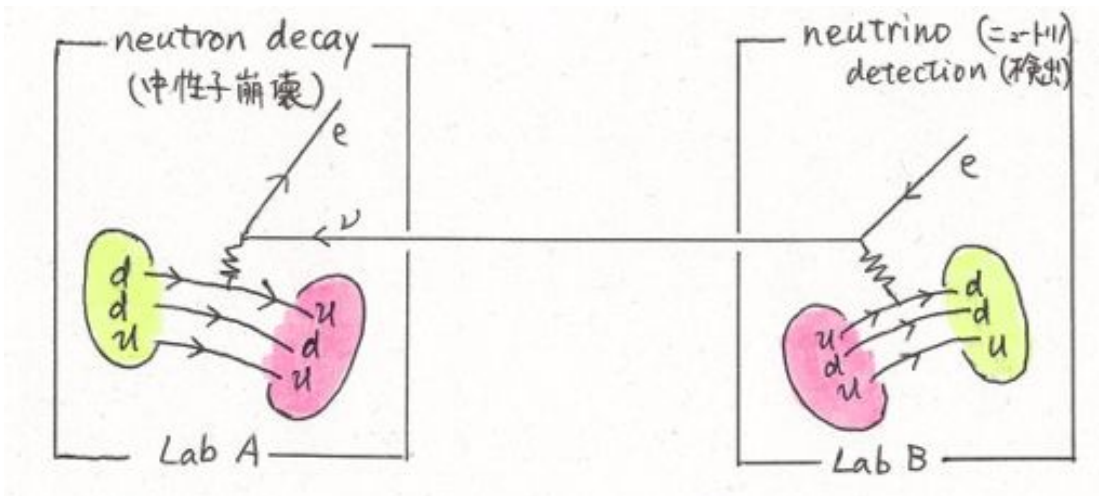


図4-3 中性子の崩壊で作られたニュートリノ（左側の実験室A）の存在を確かめるためには、もう一つの実験室（右側の実験室B）で逆反応を起こさせ、中性子（黄色）と電子の反粒子を検出します。ニュートリノの検出実験は、多くの場合にはこのような形をとっていて、弱い相互作用で転換された（ババをもらった）後の、電気をもった粒子を観測しています。

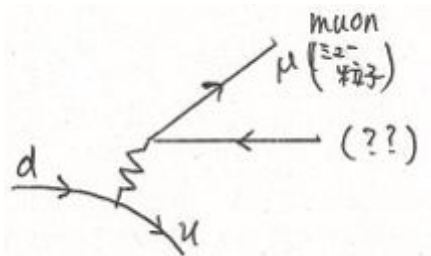


図4-4 図4-1と同様な反応で、電子のかわりにミュオンが出てくることも可能です。その際、図中、(??)で記したもう一つの粒子が反応後に出てきます。中性子の崩壊のときと同様、この(??)の粒子は、電気量を持っていません。

違うものの) 全く同じ力の及ぼし方、反応の仕方をする粒子が存在する、ということ述べました。力の及ぼし方が同じ、という点では、弱い相互作用も例外ではない、ということが現在は分かっています。すなわち、ミュオン粒子が弱い相互作用をすれば、電子のときと同様、電気量を持たず、弱い相互作用のみをする粒子が出てくるのです(図4-4)。

ミュオン粒子の弱い相互作用に伴って出てくる粒子と、電子の弱い相互作用で出てくる粒子（ニュートリノ）は、別の粒子である、ということが1962年の実験で示されました。ミュオン粒子から出てくる粒子を図4-3のように原子核に当てても、電子が逆反応を通じ

て出てきたりは（必ずしも）しないことが分かったのです。この実験事実からすると、3節で述べた場の量子論の言葉では、空間各点の上に載っている力学系には、電子とミュオン粒子に対応する自由度だけでなく、電気量を持たず弱い相互作用のみをする自由度もまた、2つ分ある、ということになります。現在では、これら両方の自由度をまとめて、ニュートリノと呼んでいます。

## 5. ニュートリノ振動と混合角

電子の弱い相互作用で出てきたニュートリノは、弱い相互作用で必ず電子に戻り、ミュオン粒子の弱い相互作用で出てきたニュートリノは必ずミュオン粒子に戻るか、といいますと、現実にはそうではありません。電子から出てきたニュートリノは、電子に戻ることもあ

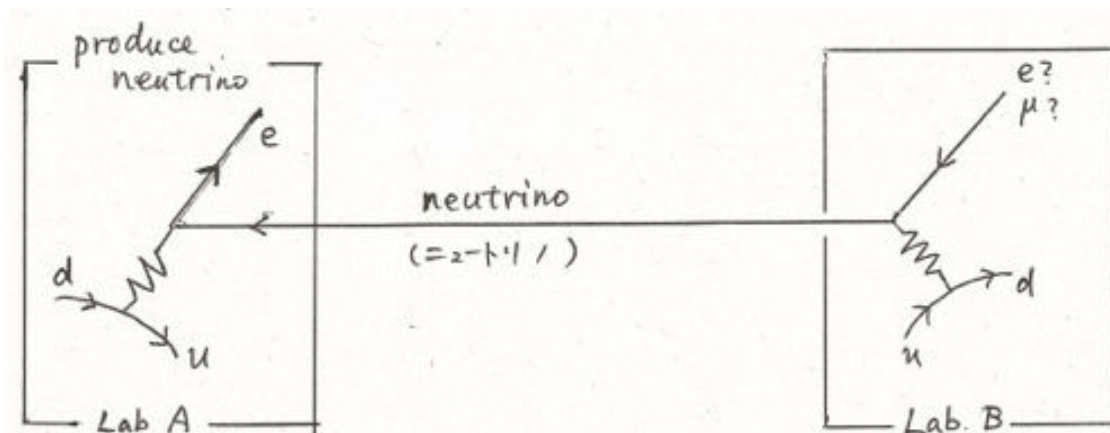


図5 ニュートリノ振動実験。実験室Aで、電子とともに作られたニュートリノの反粒子を、遠く離れた実験室Bで検出します。ニュートリノのもつエネルギーや、2つの実験室の間の距離によっては、実験室Bで弱い相互作用の反応によって出てくるのは電子の反粒子だったり、ミュー粒子の反粒子だったりします。この現象をニュートリノ振動と言います。

りますが、時にはミュー粒子になることもあります（十分にエネルギーが高ければ）。図5を参照して下さい。帽子にウサギを入れたら、鳩になって出てくることもある!! この現象を、学術的には、ニュートリノ振動と呼んでいます。（IPMU News No.15, 28-33ページ参照。）

（おそらくは）全ての手品に種や仕掛けがあるように、この現象も簡単に説明がつきます。図6-1の力学系を考えてみましょう。楕円形のお皿の上に、ビー玉を置いて、手を離す。ビー玉は図6-2のような軌跡を描くはずですが、時間が経つにつれ、ビー玉の振動方向が変わっていきます。この図6-2を回転させて、最初にビー玉が投入された方向を横軸に、その直交方向を縦軸にとって図示すると図6-3、このビー玉の横方向の位置、縦方向の位置の時間変化をグラフにすると図6-4になります。時間の経過とともに横方向の動きが減って、縦方向の動きが増えてきますね? このビー玉

の動きは、ニュートリノの2自由度分の波の時間変化を表し、そのうち、横方向への波の振幅が、弱い相互作用を通じて電子に戻る成分、縦方向への波の振幅が、ミュー粒子に転換する成分、となるのです。

この振動現象の本質は、「1. お皿が楕円形であること」、そして「2. ビー玉を投入した方向が、楕円の長軸方向でも短軸方向でもなく、斜めだったこと」の2点です。このうち1点目は、専門用語では、「ニュートリノには質量があり、かつ、その値が異なる」ことにあたります。そして、2点目を、「混合角がゼロではない」と表現します。混合角とは、図6-2と図6-3の間の回転角度のことです。

## 6. 大角度混合の衝撃、そして...

3節で述べたように、現在の素粒子物理の理解では、



図6-1 楕円形の皿の上でビー玉を転がす。

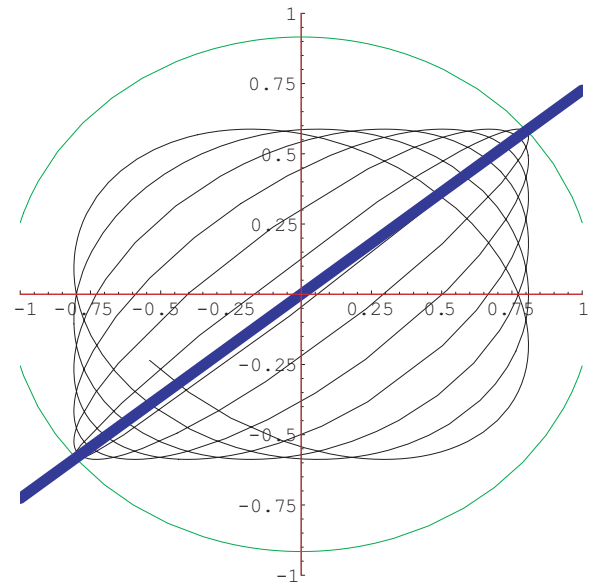


図6-2 楕円形の皿の上でのビー玉の動き。緑色の曲線が楕円形を表し、赤線が楕円の長軸、短軸にあたります。最初に青の線の上の右上の点から玉を放すと、黒の曲線の上を動きます。

少なくない数の粒子（自由度）を導入して、素粒子反応の記述をせざるを得ません。その粒子の数が、2、3個などではなく、50個を超えるのだとすれば、より微視的かつ基礎的（単純）な記述が存在するのではないか、と考えるのは自然なことでしょう。100種類を超える原子の存在が、「陽子、中性子、電子というたった3つの構成要素と量子力学という1つの理論」だけから導かれるように。

元素の周期律の発見を以って、量子力学の発見の前段階の分類学とするならば、たくさんある標準模型の素粒子にも、分類学を導入できないかと試みるのは自然な発想です。素粒子の質量の値を用いて、軽い素粒子、中くらいの重さの素粒子、重い素粒子、と3分類して、それぞれ、第1世代、第2世代、第3世代、という名前をつける。この「世代」による分類学が、何らかの意味をもっているだろう、と多くの研究者は考えていたのです。ただし、ニュートリノ振動現象が発見される前までは、もう少し詳しく説明すると、

ニュートリノ振動の発見以前には、図6-3の青線の軸（電子とミュオン粒子）に対して、赤線の2つの軸（ニュートリノの質量の軸）はほとんどずれていないだろう、と多くの研究者が想像していたのです。そして、その質量軸の方向が似ている粒子同士を集めて、ひとつの「世代」として分類していたのです。だから、弱い相互作用によってニュートリノが電子やミュオン粒子に転換したり、逆に電子やミュオン粒子がニュートリノに転換したりしても、同じ「世代=質量軸の方向」の中にとどまったまま、姿をかえていただけだろうと考えていたのです。それならば、分類学に意味があろうというものです。

しかし、ここ数十年の間に飛躍的進展を遂げたニュートリノ振動の実験は、図6-3にあるくらいに、赤線の軸と青線の軸がまったく違う方向にある、ということを示していました。すなわち、混合角は大きいのです。これは、「『世代』という概念の下での素粒子の分類学が、少なくともある程度は破綻している」、

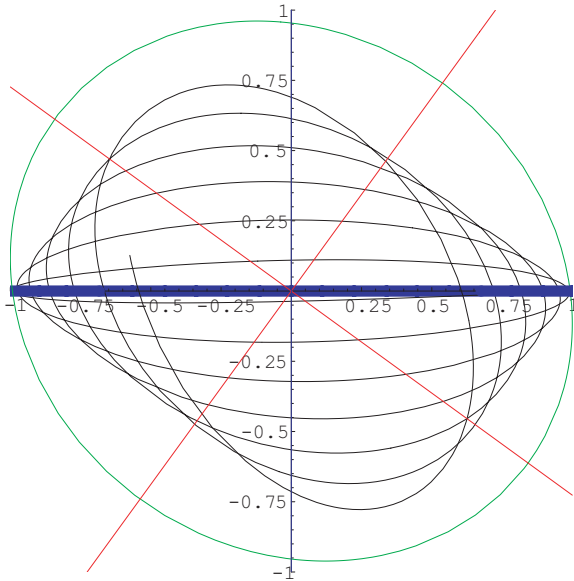


図6-3 図6-2を回転させて、青線を水平になるようにしたもの。当初は水平方向に黒の曲線が動くが、次第に縦方向の動きが出てきます。

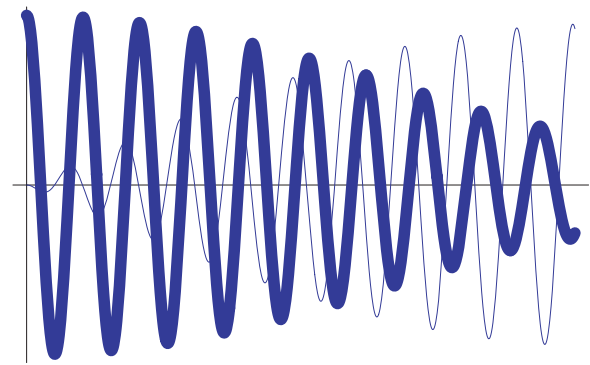


図6-4 横方向の動き(太線)と縦方向の動き(細線)に分解して、それらを時間の関数として図示したもの。

ということを意味しています。もしウサギが鳩に容易に化けられるなら、哺乳類と鳥類という分類学は無意味ですよ？一から考え直さざるを得ないのです！

素粒子の正体についてのより基礎的な理解を得るには、今後、どのように進めばよいのでしょうか？現代の素粒子物理の研究者は、この問題について模索を続けています。ここまでの数ページが過去数十年の素粒子物理の進展をカバーしているのですから、次の1ページを書くのにも10年かかると覚悟すべきなのでしょう。そうであっても、前向きに次の一步を模索するのが研究者というものです。

3節の終わりに、標準模型の記述では、空間各点の上に力学系が載っている、その「複雑な力学系の正体は何か？」という問いを設定しました。「我々とは何か？」という哲学的問いを突き詰めれば、ここにたどり着くのです。この問いに対して、超弦理論が示唆するのは、「空間各点に載っている複雑な力学系の正体は、既存の実験では見る事ができていないほどに小

さな6次元の空間である」、という考え方です。この超弦理論からの示唆を裏付けるような実験結果が現時点であるわけではありませんが、間違っていると暗示する結果があるわけでもありません。ならば、このような考え方を導入して、思考に枠をはめてみて、その中で知的冒険を試みる、というのは、理論研究の一形態として成立し得ます。

そこでは、空間の幾何に関する数学から、「実現可能な力学系」に対して制約が得られることを期待できます。素粒子物理が幾何学に出会うとき、場の量子論には内在していなかった何かを見つけることができなにか。それが「我々とは何か」という問いに答えることに役立つのか。そのようなことを、私自身はここ数年の研究の中で試みています。



# Our Team

## マーク・ハーツ

Mark Hartz 専門分野: 実験物理学

Kavli IPMU 助教

ニュートリノ振動は質量が決まった状態とフレーバーが決まった状態が混合することによって起きますが、その実験的観測によりニュートリノが有限の質量を持つことが確立しました。最近、T2K実験及びその他の実験により、一番小さな3番目の混合角によるニュートリノの混合が確立し、これによってニュートリノ振動でCPの破れを研究する途が開けました。CPが破れていると、ニュートリノとその反粒子の反ニュートリノは異なる振動をします。このCPの破れの実験的観測は、ミューニュートリノのビームを発生させ、その電子ニュートリノへの振動を調べることと、反ミューニュートリノのビームを発生させ、その反電子ニュートリノへの振動を調べることの両方を行うことにより可能となります。

私は、J-PARCの加速器施設でミューニュートリノ



ビームを発生させ、295 km離れたスーパーカミオカンデ検出器に打ち込むT2K実験に参加しています。私たちはCPの破れを検出するための第一段階であるミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の測定と、ニュートリノ振動パラメーターの精密測定を行っています。私が特に興味をもっているのは、反ニュートリノビームを発生させることによりCPの破れを探索することのできるT2K実験の能力と、CPの破れの大きさを精度を上げて測定するために必要な将来の実験です。

## 山崎 雅人 やまざき まさひと 専門分野:理論物理学

Kavli IPMU 助教

理論物理学が目指すのは、微少な素粒子から宇宙全体にまで多岐にわたる自然界の現象を支配する根本的な原理を発見することです。素粒子物理学を研究する理論物理学者として、私は超対称場の理論や弦理論を様々な角度から調べ、量子場の理論のより良い定式化や量子重力を記述する自己無撞着な枠組みのために必要な物理的ないし数学的構造を見出そうとしています。

私が近年研究しているのは、2、3、4、5、6次元における超対称ゲージ理論、特にその厳密な結果や弦理論からの実現です。このアプローチでは、理論の赤外固定点は幾何的・組み合わせ論的な構造、例えば3次元多様体やクラスター代数、正グラスマニアン多様



体のセルで指定されます。これによって新しいクラスの（ラグランジアンを持つとは限らない）超対称ゲージ理論をその双対性を明白にしたままで定式化することができ、さらに数学者の助けを借りることでその理論のより深い性質を明らかにすることができます。

この野心的な研究計画のためにこの上のない学際的環境を持つKavli IPMUの一員として加わることを嬉しく思います。

## ハニンデョ クンチャーロヤッティ Hanindyo Kuncarayakti 専門分野:天文学

博士研究員

私は超新星爆発を起こした星の物理的性質について手がかりを得るため、超新星近傍の環境を研究してきました。この目的のために私が用いた技術は「面分光」と呼ばれ、超新星爆発の起きた領域の撮像とその領域全体（の色々な部分）の分光観測を同時に行えるものです。これにより、爆発した星の直近の環境と種



族について従来得られなかった洞察が得られます。

Our Team

## 藤田 充俊 ふじた・みつとし 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は、超弦理論を背景としてゲージ/重力対応を研究してきました。ゲージ/重力対応の重要な点は、直接解析するのが難しい強結合のYang-Mills理論を弱結合の双対な超重力理論を用いて調べることができる点です。特にゲージ/重力対応を応用して、強相関系の難しい物理や、強相関電子系のような物性物理を理解するための研究を続けています。例えば、分数量子



ホール効果 (FQHE) を記述する理論のいくつかや、FQHEの端状態の理論を、超弦理論とゲージ/重力対応を用いて導出しました。

## 石垣(新田) 美歩 いしがき(にった)・みほ 専門分野:天文学

博士研究員

化学元素がどこでつくられ、銀河系の中にどのように分布し、銀河系の進化とともに組成がどのように変化してきたかに興味をもっています。それらを明らかにするために、金属欠乏星と呼ばれるヘリウムより重い元素の組成が低い星々の化学組成を、主に星の分光観測によって調べています。金属欠乏星は宇宙で銀河ができはじめて間もないころに生まれた星々で、その表面大気の化学組成は星をつくったガスの組成を反映



していると考えられています。観測される化学組成を、超新星爆発などによる元素合成の理論計算と比べることで、その星が生まれた当時の元素合成過程や星形成史に何らかの制限をつけたいと考えています。

## 岩本 祥 いわもと・しょう 専門分野:理論物理学

博士研究員

暗黒物質の正体、インフレーションのしくみ、ニュートリノの質量が軽い理由……。これらに代表される「謎」を解くため、さまざまな新理論が開発され、提唱されています。

私は、それらの新しい仮説をどうやって証明できるか、を研究しています。LHC や ILC などの加速器実験の結果、あるいは宇宙線の観測データから、どのような理論が示唆され、あるいは却下されるのか。特に

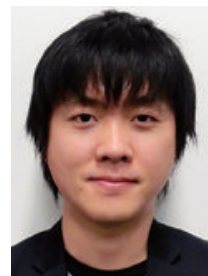


最近、宇宙線観測からの暗黒物質への示唆、および、ヒッグスセクターやレプトンセクターを拡張する新理論に対して加速器実験でどのようなアプローチが可能か、に興味を持っています。

## 金田 邦雄 かねた・くにお 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は素粒子物理、特に標準模型を超える物理の現象論を専門に研究しています。最近は主に、QCD過程におけるパリティの破れに着目し、LHCで間接的に標準模型を超える物理の手がかりを探る研究をしています。標準模型のQCDにはパリティを破る相互作用はありませんが、もし超対称性や余剰次元が存在すると、量子効果によりパリティが破れ得ます。これを利用し、LHCによる新粒子の直接観測なしに、間接的



に標準模型を超える物理を検証することを目指しています。私は他にも、ヒッグスの物理や暗黒物質、ニュートリノなどのトピックスに興味があり、研究しています。

## ルイス・マルティ マグロ Lluís Martí Magro 専門分野:実験物理学

博士研究員

2009年にスーパーカミオカンデ (SK) 共同実験に参加して以来、私は主として重力崩壊型超新星爆発からのニュートリノ検出を目指してきました。検出対象には、過去の全ての重力崩壊型超新星爆発からのニュートリノ、つまり超新星背景ニュートリノ放射 (DSNB) が含まれます。現在、そのフラックスに関してSKが世界で最も良い上限値を得ていますが、共同研究者の一部はSKの純水にガドリニウムを溶かし



込むGADZOOKS!実験の実現を目指すプロジェクト、EGADSに参加してきました。これにより、私たちの主目的であるDSNB検出とともに、超新星爆発の検出やその他の研究の改善も可能となります。

## 西野 玄記 にしのみ・はるき 専門分野:宇宙論

博士研究員

私は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光観測実験 POLARBEARに参加し、実験・観測による宇宙論の研究を行っています。CMBの観測はこれまでも我々の宇宙に関する豊かな情報をもたらしてきましたが、近年では、宇宙初期の指数関数的な宇宙の膨張 (インフレーション) を検証する新たな手段として偏光成分の観測が注目を集めています。我々はチリ・アタカマ砂漠に設置された望遠鏡と偏光に感度のある検出器を



用いて2012年からCMBの観測を行っています。これらの観測データを元にBモードと呼ばれる新たな偏光モードを見つけ出し、宇宙の始まりに関する新たな知見を得ることを目指しています。

Our Team



## 西尾 亮一 にしお・りょういち 専門分野:理論物理学

博士研究員

私の研究テーマの一つはハドロン物理学です。ハドロンとは陽子、中性子や中間子などの原子核を構成する粒子の総称です。我々の身の回りの物質と我々自身の大部分がハドロンなので、ハドロン物理学に興味を持つことは私にとって自然なことです。素粒子理論家は、ハドロン物理学は「QCD」と呼ばれる基礎理論によって支配されていることを何十年も前から知っています。ところがハドロンの性質の多くについて、基礎理論から導出する方法は知られていません。これは解



決すべき問題です。私はホログラフィック原理を用いることでハドロン物理学の本質を理解できるかもしれないと考えています。このアイデアに基づく私の研究は、ハドロンの散乱実験のデータと一致する結果を与えました。

## 大島 芳樹 おおしま・よしき 専門分野:数学

博士研究員

私はリー群の表現論、とくに表現の分岐則について研究してきました。表現の分岐則とは、与えられた群の表現を部分群に制限したときにどのように分解するかを記述するものです。群の作用が対称性を表すならば、分岐則は対称性の破れの数学的定式化と考えられます。実簡約リー群の表現は旗多様体上のD加群を使った実現を持つことが知られていますが、私は学位論



文でこの幾何学的実現を通して導来関手加群とよばれるクラスの表現の分岐則を調べました。

## 斎藤 俊 さいとう・しゅん 専門分野:宇宙論

博士研究員

私の専門は観測的宇宙論で、様々な宇宙論的観測を通して基礎物理学に対する示唆を得ることを目的としています。現在は特に、史上最大の3次元銀河地図を提供するスローンデジタルスカイサーベイの第III期にあたるバリオン振動赤方偏移サーベイ (BOSS) を用いて、宇宙論的スケールでの重力理論の検証やニュートリノ質量の制限に関する研究を行っています。他に

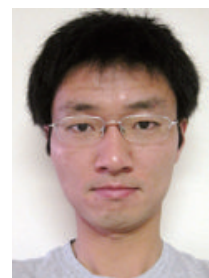


は、宇宙マイクロ波背景放射や重力波を通して、極初期宇宙の兆候やダークエネルギーの性質に迫る研究も行ってきました。

## 沈 焯鋒 シェン・イエフエン 専門分野: 数学

博士研究員

私の研究分野は、弦理論に関わる幾何学及び数学です。より正確には、 $N=(2, 2)$ 超対称量子場理論に関わる数学理論に興味を持っています。数学的には、グロモフ・ウィッテン不変量は射影的代数多様体やシンプレクティック多様体（あるいはシンプレクティックオービフォールド）への安定（あるいはオービフォールド安定）写像を仮想的に数えています。これは非線形シグマ模型の記述を与えます。ファン・ジャービス・ルアン・ウィッテン不変量はウィッテン方程式の解を仮想的に数えていて、これは準斉次超局面特異点のランダウ・ギンズブルグ模型の数学的な記述であると捉



えられます。現在、私の仕事はグロモフ・ウィッテン理論、ファン・ジャービス・ルアン・ウィッテン理論、そして広い意味での大域的ミラー対称性に焦点を絞っていて、ランダウ・ギンズブルグ/カラビ・ヤウ対応、可積分階層、そしてグロモフ・ウィッテン不変量の数論的側面といった題材を含んでいます。

## 棚橋 典大 たなはし・のりひろ 専門分野: 宇宙論

博士研究員

私はこれまでに一般相対性理論とその応用に関する様々な研究に取り組んできました。ブラックホール物理に関する基礎研究、ゲージ/重力対応の検証とその動的現象への応用、massive gravity模型やそれと関連する種々の修正重力理論などがその対象として挙げられます。私の今後の研究においては、Kavli IPMUという学際的な環境を生かしつつ、修正重力理論の観測



的検証に向けた研究、ならびに重力理論研究の他分野へのさらなる応用などについて取り組んでいきたいと考えています。



## Interview

# 深谷賢治教授に聞く

聞き手：斎藤恭司

70年代はまだ夢だった—現代幾何と物理の関わり

**斎藤** お伺いしたいことは、どういうふうに数学を始めたかというところから始めて、やはり今日、深谷圏と呼ばれている幾何構造に到達した流れ、その後の発展や今後の展望、物理と数学との関係について。そんなところでしょうか。どこから始めましょうか。

**深谷** 今私がやってる数学ではどうでしょうか。Kavli IPMUとも関係がありますし。

**斎藤** ええ、そこも是非伺いたいです。物理と数学についてどうお考えなのか。では、深谷さんの数学はどういうふうに育ってきたかあたりから伺いたいと思います。

**深谷** 私は、もともと物理との関係はいろいろやりたいと思っていました。

**斎藤** そうですか。それは面白いですね。

**深谷** 我々の時代と斎藤先生のスタートした時代とは、世代は

深谷賢治さんは今年（2013年）4月から、米国ストーニー・ブルック大学（ニューヨーク州立大学ストーニー・ブルック校）のThe Simons Center for Geometry and Physics の教授（permanent member）に就任、2月からはKavli IPMUの客員上級科学研究員を兼ねておられます。1981年、東京大学卒、1986年、同大学より理学博士の学位取得。1983年、東京大学助手、1987年、同助教授、1994年、京都大学教授。2009年より日本学士院会員。井上芸術賞（2002年）、日本学士院賞（2003年）、朝日賞（2009年）、藤原賞（2012年）などを受賞。

違うと思います。私の学生時代くらいの頃の印象だと、物理と数学の間からまた何か新しいことが生まれるだろうというような話はずっとありました。しかし、本当に特に何か始まっているという印象は、当時はまだなかったんです。

**斎藤** それ、いつ頃ですか？

**深谷** 私が学生時代、多分70年代か80年代だと思います。例えば関数解析は、もちろん量子力学と一緒に始まって発展したわけですし、偏微分方程式の研究は常に物理と関わってきました。そういう分野というのはあると思います。

**斎藤** シュレーディンガー方程式とか。

**深谷** ええ。表現論でも、量子力学と群論の関係などは昔からありました。私が今やっている幾何学では、特に20世紀になってから発達した次元の高い大域的な幾何学は、物理に使われるということは、ずうっと余りありませんでした。

**斎藤** そうですね、それは本当にそのとおりでしたね。

**深谷** 物理だけでなく、ほとんどどこにも使われてなかったですね。

**斎藤** ええ、僕らの学生時代は本当に物理との接点をもつ数学といたら、ヒルベルト空間でシュレーディンガー方程式を解くとか、あるいはもっと古典力学とか電磁気学とか、方程式を



解くための解析が主という感じでした。大域幾何、あるいは特に複素幾何や代数幾何と接点が出てきたというのは非常に最近の流れですね。

**深谷** そうですね。それがどのくらい定着するかは不明です。まだ完璧に定着してはいないと思います。一方、その頃から、現代の幾何が物理と関わることはあるはずだ、という風評というか、夢みたいなことを語る人はたくさんいたと思います。

**斎藤** その頃？ 70年代のことですか？

**深谷** はい、夢はあったと思いますね。いや、ありました。でも、何となくそれはやっぱり夢で、どれもちゃんとした数学ではないというイメージがありました。それで私などは敬遠していたと思います。それが本物になりつつあるなと感じたのが、恐らく80年代から90年代です。

**斎藤** アティヤ・ドナルドソンのゲージ理論やtopological field theory (位相的場の理論)が出てきて、一時代を築きますね。

**深谷** そうですね。ですから、あの頃、何かもうそういうことをやってもいいんじゃないかと思いはじめた。

**斎藤** では深谷さんは、やはりそれを意識しながらやってきたのですか？

**深谷** そういうのもやりたかったけれども、最初の、私が大学

院生の頃には、あまりやるようなものではないという印象がありました。

**斎藤** それはびっくり。実は僕自身は原始形式の話は完全に数学の興味だけで始めて、後で物理とつながるといことにびっくりした方ですが、深谷さんの場合はむしろ物理との関係は最初から意識の中にいつもあったのですか？

**深谷** どうでしょうね。あったといっても夢みたいなものとしてだけだったと思います。

**斎藤** 例えばどんな？

トポロジーが物理の言葉になる時代が来ることを期待

**深谷** トポロジーが物理の言葉になる時代が来てほしいな、とは多分、思っていました。それは、今でもそこまでは行ってないと思います。一方、本当にそこまで行くかもしれないという雰囲気は現れてきています。

**斎藤** モダンなものとは違うけれども、例えばアーノルドの古典力学。[『古典力学の数学的方法』(ウラジミール・イーゴレヴィッチ・アーノルド)] アーノルドはトポロジーというものを非常に積極的に力学研究に取り入れた人でしょう。ああいう流れは確かにあの頃既にあった

斎藤恭司さんはKavli IPMUの特任教授で数学の主任研究員を務めています。京都大学数理解析研究所名誉教授。1996年4月から1998年3月まで同研究所長。





とは思いますが、それとはまた別ですか？

**深谷** アーノルドは先駆者です。しかし、例えば、アーノルドがトポロジーの古典力学への応用を確立したところまでは行かなかった。例えば、私の研究に近い分野であるシンプレクティック・トポロジーは、アーノルドが「シンプレクティック・トポロジー」のようなものがあるんじゃないかって言い出し、さらに具体的な問題まで提唱して進めて、しかし、それは、グロモフが出てきてやっと実現しました。それに限らず、いろんなところで先駆者の人たちがいて、やるべきだといういろいろ言った。夢を語る人はずっといっぱいいました。それはもちろん悪いことではなくて大切なことです。一方、そのような分野を、普通に研究していける分野にするには夢だけでは不十分で、そうなるのはもう少し後です。私が若い頃は、自分がそこにいきなり突っ込むのはちょっと怖くて、よした方がいいかなという印象を持っていました。

**斎藤** では、どこでそこに突っ込むことになったのですか？

**深谷** ドナルドソンとか、あの頃のゲージ理論の数学などが研究されていた時代には、まだ物理をアイデアの源泉としては使うけれど、例えば論文を書くときはそれは横に置いておく、といったところがありました。物理は、勉強はするけれども、自分たちは物理学者じゃないよということを強く意識していました。

**斎藤** アティヤスクールのことですか？

**深谷** そうですね。例えばドナルドソンは物理を直接やっているような論文は書いてないんじ

ゃないかと思います。逆に、後から物理学者がゲージ理論のドナルドソン理論を使ったりしています。

**斎藤** そういふのは僕はよく分からないけれど、本人は意識しなくても、その問題意識が生まれた背景にはやはり物理があったという言い方はできるでしょう？

**深谷** あると思いますね。多分。あのスクールは、アティヤはずっと物理と幾何の関係を強く意識していたし、ヒッチンもそうでしょう。だから、物理はオックスフォードのアティヤ学派の数学の背景にずっとあった。しかし、彼らは、論文を書くときには物理を表だって出さなかった。

**斎藤** それはそうですね。それで深谷さん自身はどう対応されたのですか？

**深谷** 私が物理からのモチベーションとかアイデアを論文などで言うようになってきたのが90年くらいからじゃないかと思います。特に幾何に関して言えば、80年代の終わりから90年代くらいにかけて、ゲージ理論とトポロジーの関係とか、ストリング理論やデュアリティーとの関係とか、ホモロジー代数と物理と幾何とかが始まった。そのころから、物理からのアイデアが直接出てくる数学の中身のある結果が、幾何学で出てくるようになってきた。

**斎藤** 例えばどういうことですか？

**深谷** ミラー対称性はその典型だと思います。結局、ミラー対称性というのは確立すれば数学の定理で、物理の定理ではないと思います。そういうものが物理の方から出てきて物理学的にも数学的にも、大きな意味があるものになるというようなこと

は、以前には、例えば、前のゲージ理論の頃にはなかったように思います。

**斎藤** アティヤの時代の意味でのゲージ理論を超えたゲージ理論は数学的には未だに未知の宝庫ですが、それはひとまず置いて、ミラー対称性は確かにすごい。物理的には同一の量が、数学では複素幾何学側の不変量であったりシンプレクティック幾何学側の不変量でもあるという話ですね。ああいう視点はさすがに数学からは出てこなかった。それでは深谷さん自身は、それをどの辺の時点で自覚し出したんですか？

**深谷** 私がミラー対称性の話を聞いたのは、慶応大学の研究集会での江口先生の講演が最初だと思います。

**斎藤** 何年頃？

Dブレーンとフレアホモロジーが同じものと直感

**深谷** 80年代か90年代初めですかね。だからサイバーク・ウィッテンが出る前です。その頃、それは代数幾何だと思いました。そのせいもあって、私はすぐには自分の研究対象とは思いませんでした。自分でやり始めたのはもっと後、Dブレーンの話を聞いた後だと思います。Dブレーンという話を聞いたのは92年か93年くらいだと思います。

**斎藤** そう、その頃ですね。

**深谷** そのとき、フレアホモロジーとDブレーンが同じものではないかなと思ったんです。

**斎藤** それは深谷さんの御自身の考えもあったのですか？

**深谷** いや、多分それはいろんな人が分かっていたと思います。一方、特にシンプレクティック幾何の専門家には、Dブレーンに関わる数学を本気でやろ

うとしている人は余りいなかった。

**斎藤** その前にアーノルド予想とか関わってきたんですか？

**深谷** それはもう少し後です。私がアーノルド予想と関わったのは、フレアホモロジーをずっとやっていたので、その応用でした。

**斎藤** 僕はそのところがよく分からなかったのですが、フレアホモロジー、それから今言ったアーノルド予想、それからDブレーン、ミラー対称性。深谷さんの中ではどういうふうにつながって、どこではっきり焦点を結び始めたのですか？

**深谷** フレアホモロジーがアーノルド予想に使えるのは、もともとフレアホモロジーはそのために作られたので、当たり前なんです。一方、Dブレーンとフレアホモロジーが関係あるというのは、Dブレーンが出てきたときにでも、見れば分かることなんです。ストリングの境界条件がDブレーン。一方、同じ境界条件を考えると同じ非線形コーシーリーマン方程式を考えるのがフレアホモロジーなので。しかし、Dブレーンすなわちフレアホモロジーというような言い方は、当時余りされていませんでした。多分、当時はフレアホモロジーのような、無限次元の解析に突っ込むような幾何のトポロジーと、物理の新しく出てきたDブレーンみたいなものを、本当にくっつけて、それがちゃんとした数学になるとは思われていなかったかもしれません。最初Dブレーンの話が出てきた時は、そういう（フレアホモロジーのような）ものとは全然違う話が多かったですね。

**斎藤** いや、僕もあの当時、そんな風につながっているという

ようには全く受け止めていなかったですね。確かに江口さんとか物理側のいろんな人たちがDプレーンということを言われていましたが、それはストリングが巻き付いている対象という「幾何的」描像で、その意味が分からず何度も質問したことを覚えています。

**深谷** Dプレーンとフレアーホモロジーが関係あるということが明確になるには、それから10年くらいかかりました。私にも、当時はそんなに明確になっていた訳ではないですね。そうだろうというのは始めからそういうふうに見えるけれど。

**斎藤** あ、そうでしたか。

**深谷** ただ、その関係をもとにどのぐらい中身がある数学ができるが問題です。萌芽的な計算を試しにしてみましたというタイプの結果ではなく、一番大事な例の一つになり得るようなものを計算しているというレベルのことができるようになるのには、やはり10年かかっています。それは、多分、やりたいなと思っていたことのひとつでした。

**斎藤** では、その辺のことを深谷さんとしてはいつ頃から自覚して太田啓史さんとか小野薫さんとか、いろんな方々と一緒に仕事を始めたのですか？

**深谷** 90年代の前半には、モジュライ空間を使う幾何学では、基礎が難しく、いろいろとできるころはあるけども、一般にやろうとするととても怖くてとてもできないという状況がありました。アーノルド予想の研究を小野さんとやった時に、そういうことをやるための数学の基礎付けは、これでできるという確信ができました。

**斎藤** 90年代？

**深谷** 90年代です。小野さん

とアーノルド予想の研究をしたのは96年です。同じ頃に、他の人たちもいろいろとやっていました。それは今ではバーチャルテクニック (virtual techniques) といわれています。バーチャルテクニックができることが分かった時には、もう他の状況でも、その種の技術的な問題は余りないだろうと思いました。細かいところを書かなくてはいけなくて、それは大変なんだけど、それはまあ頑張れば良いと思いました。それで、手探りでやるよりはもう組織的にやる方が筋だろうと、我々の考え方は段々変わってきました。それは擬正則曲線についてですが、ゲージ理論のDonaldson invariantsでも、最初はやはり1つか2つ一番大事なものを計算して新しい画期的な応用例を見つけ出すという方向から始まりました。一方、例えばDonaldson invariants全体がどのような構造を持つとかは、Kronheimer-Mrowkaの構造定理とか、サイバーク・ウィッテン理論とか、サイバーク・ウィッテンのモノポール方程式との関係とか、そういうのが出てこないと見えなくて、最初は難しすぎました。最初は、必死で何かできるところだけやっていました。それで何か本当に非自明なものを引っ張り出したという意味で、すごいブレイクスルーなんです。擬正則曲線を使うシンプレクティック幾何に関しては、バーチャルテクニックが出てきて、技術的障害は頑張れば越えられるとなって、そうになると、例えば一番いい代数構造は何かとか、全体が何を意味してるかとか、そういう方向に頭が動くわけです。段々そういう風な考え方が出てきたのが90年くらいから、それが実現され

ていったのが90年代後半から21世紀です。その間は10年くらいかかっています。

**斎藤** やはりそこが変わり目だったわけですね。

**深谷** ええ。

#### 超越的な数学を好む

**斎藤** 少し戻ると、僕の深谷さんの数学に対する印象は、最初、グロモフがやってるような幾何学、従来の方向とは違う、例えば多様体をその上の有限個の点で近似してみたり、一方、リーマン計量をつぶしたりしてコラプスさせるとか、ああいうグロモフ流のダイナミックな数学をずうっと引き継いでるなって感じが強かったのです。それと今言われた数学との間には、僕はちょっとギャップを感じるけれど、そうではないんですか？

**深谷** いやあ、斎藤先生には一回どこかで冗談でそんなようなことを言いましたが、私はトランセンデンタル (超越的) なものが好きなんです。グロモフのやってる数学って、トランセンデンタルな数学の極限ですよ。

**斎藤** すごいですよね、僕もそこが好きですね。

**深谷** だから私は、数理物理の幾何学のところ、例えば擬正則曲線を使うシンプレクティック幾何学のところ、例えば擬正則曲線を使うシンプレクティック幾何に近いうちの中では、一番トランセンデンタルに近いところをやっているつもりでいるんです。

**斎藤** 本当に？

**深谷** だって、もっと代数的なことをやってる人はいっぱいいますよね。グロモフ・ウィッテン不変量の計算などのところで。

**斎藤** それはそうですね。

**深谷** それに比べると、グロモ

フ・ウィッテン不変量の計算のようにちゃんと確かなところで、計算ができるところで研究している人と比べると、我々は何となく抽象一般の、何ていうんですかね、解析をやってる、**斎藤** まあ、解析っていうか、本当に幾何っていうことですね。

**深谷** ええ、それでトランセンデンタルのところをやっている印象をもっています。私は昔からずっとそれをやりたいと思ってやってきていて、そこを譲る気はないんです。

**斎藤** いや、僕は実は深谷さんの数学で好きなのは、そういうところなんです。僕自身も代数的なことをやってるようには人には思われているけど、やっぱりトランセンデンタルな構造が一体どこから入ってくるのかはいつも気にしてるわけです。そういう意味で言うと、深谷さんはいつもそういうところと向き合ってる部分があるというのは、やはり好きなのところなんです。

**深谷** ただ、最初私が研究していたリーマン幾何だと、取り出す代数構造が寒いですよね。(笑い)

**斎藤** それは厳しいことを言う。(笑い)

**深谷** いや、寒いんだけど頑張るしかないところがある。でも、最近はそういう数学がどんどん増え、やはり良く発展しています。距離空間上の解析幾何とか。

**斎藤** え、本当に？

**深谷** 本当に。代数幾何の正反対のタイプの幾何は今十分に活発に発達していると思います。

**斎藤** 例えばどんなところ？

**深谷** 最適輸送の問題とか。

**斎藤** え？ そんな話、知らないですね。

**深谷** 測度付き距離空間上の解



析学というのがそんな感じなのです。そういうところでのリッチ曲率の定義だとか。最適輸送というのは、ここらへんに石油があって、このへんに消費者が、ガソリンスタンドがあったときに、どうやったら最短時間で運べるかだとか。要するに測度付き距離空間ですね。いわゆる地球という距離空間があって、2つ測度があるんです。1つは例えば石油の産地の測度で、もう1つは消費施設です。で、その間の距離を調べなさいというのが輸送です。だから、ジオデシックで結ぶのが一番いいですよ。

**斎藤** それはそうだけど。

**深谷** ものすごくワイルドな空間、たとえば測度付き距離空間全体みたいなものの2点をもってきておいて、測地線は何ですかとか、そういう話ですよ。

**斎藤** あ、1つのジオメトリーを固定するより、ジオメトリーの全部の空間を考えるととか？

**深谷** ええ。ジオメトリー全部

だから、それは対象としてワールドで、測度も別にスムーズなわけじゃない。

**斎藤** フィンズラー幾何とは関係ありますか？

**深谷** 太田慎一さんとか、そういうことをされています。私も、昔、80年代に測度付き距離空間とかは、少しやったことがあります。それに近い幾何学で今盛んなのは、ほかには幾何学的な群論などがあります。

**斎藤** それは僕も興味あるけど。

**深谷** 構造があるかないかの瀬戸際みたいなのに突っ込む数学って、今はすごくホットですね。

**斎藤** 発展してますか？

**深谷** はい。

#### モジュライ構造の幾何の根源に分け入りたい

**斎藤** ひとまずパーチャルテックから代数構造を読む話題に戻って、深谷さん自身は今後、自分の数学とか発展方向をどう

いう風に見ています？

**深谷** いや、昔そういうトランセンデンタルな研究を少しやっていた、しばらく前には、そっちの方にまた戻ろうかなとも思ったのです。ただ、今はやはり自分ももう50を過ぎたし、そっちに戻っても多分大した成果が出ないだろうから、今の路線の方がやはりいいかなと思ひめています。

**斎藤** というと？

**深谷** パーチャルテックを使ってモジュライ空間から代数構造を作るというのをどんどん進めていくという方向は、まだいくらでもやることあると思います。それ全体をやると相当大きい理論体系になるはずで、多分それをやるのは自分たちの仕事だろうと思っているんです。

**斎藤** ある意味でモジュライ構造の幾何の一番根源的なところに入っていきわけですね。大変ですね。

**深谷** さっきも言ったように、

96年以後は代数構造みたいなもの、割と難しい代数構造を入れても話ができるようになったわけですが、多分もう1つ先に行くには、それこそ全ての代数構造みたいなものを、それらがもっているような代数構造を全部引っ張り出すようなことをしないとイケないはずですよ。

**斎藤** 今の場合、代数構造という言葉で、どういうことをイメージしてるわけですか？

**深谷** 例えば、我々の使ったのはA-infinity構造というものです。モジュライ空間から引っ張りだせる数全部を考えて、それがもつ構造を全部もってきておいて、それで、その全ての構造は何かということ、その全ての構造がもつべき対称性は何かということを考えるような研究です。あるいは、数そのものはwell-definedではないので、そのアンビギュエーターを制御するためには、どういう代数を考えれば良いかということも考える必要があります。

**斎藤** やはり構造の方に着目するわけですね。

**深谷** そうですね、今のところ。パーチャルテックは構造を作るための道具みたいなものですから。

**斎藤** このインタビューからはちょっとずれるかもしれないけれど、望月さんが、最近、ABC予想を研究されてるでしょう。つまり、できるだけいろんな付加構造がない一番原始的なところから物を読み出そうとしているわけですね。そういうところは、僕はすごいと思うけれど、、、

**深谷** そうですね。  
**斎藤** だけど、深谷さんは今みたいに構造をとにかく与えようというわけですね？

**深谷** 例えば、場の理論の定義について考えてみます。場の理



論でも、空間の定義でもいいですが、それが何かには2通りの考え方があります。一つは、場の理論だと、そこからいっぱい量が出てきます。その量を全部与えて、その対称性とその量がどういう意味でwell-definedかというのを全部考える。それは、場の理論の、ある意味、計算的な定義と言えます。あるいは、多分、代数的定義です。それは超越的ではありません。もう一つの考え方は、超越的な、もっと全く別の言葉を作ってしまうと、その場の理論とは何かを根源的に書くという定義があり得ます。後者の方が確かに望ましい。しかし、場の量子論なり、量子力学なり、ストリングセオリーなりやるためには新しい幾何学が必要だというのは、もう30年くらい聞いている話で、しかし一向にできそうにない(笑い)。つまり後者の定義は一向にできない。

**斎藤** その新しい幾何ってどういうことを想定して言われているわけですか？

新しい幾何で標準理論が簡単に説明できるか？

**深谷** 私にはよく分からないんです。たとえば、一般相対論は空間が曲がっているという言葉で、一発で重力の幾何的な背景を説明したと言えるわけですが、相当程度に。それで、同じような形で、標準理論の非常に複雑な方程式とかを、何か新しい空間概念を発展させることによっていっぺんに説明できるのでしょうか。そんなうまい幾何学が、我々が気付かなかっただけで、何か新しいタイプの幾何学があって、そのきれいな定義をパンと書いて、(例えばリーマンの多様体の定義をガンと書き下して一般相対論がいっぺんに出て



くるように)、それは単純なもので、しかし、そこから頑張って計算していくうちにいろんなものが全部出てきて、最終的に今は複雑なものが全部説明できるようになるのか？ 多分、それが、そういう22世紀の幾何学があれば良いという夢だと思うんです。それを、私も20年前には大分信じてたんですが、でも年取ったせいか、今は余り信じていないんです。

**斎藤** ということ？

**深谷** 科学の進歩の歴史には、何か新しいブレークスルーが起こって、前のが全部簡単になってしまうという瞬間が何回もあったと思います。しかし、そういうことが今後どんどん起こるのか、ということに対しては懐疑的です。例えば、量子力学と相対性理論というのは、ちょっと我々の日常とは違った形での真実であったけれども、それが出てくると、非常に明確な形でぱっと物事が分かってしまう、結局は余り複雑ではなかった、

というものだったと思います。特に相対論がそうですね。最終的にはすごく単純な方程式になった。しかし、いわゆる標準理論とか、ああいうものがそういう風に、、、

**斎藤** 新しい幾何を生み出し得るかどうかという疑問があるということ？

**深谷** 生み出してそれですべてがさーっと簡単になるかというのが疑問です。

**斎藤** いや、うまく言えないけれど、幾何というのはやはり人間がいろんな経験を積んで、ある世界像を作ったときに1つの描像を与えるわけでしょう。さっきのリーマン幾何だって、あえて言えばその前にガウスがいろんな膨大な計算を、電磁気学の方からも地上の測量からもやっていた、例えば曲率というのは地上の三角測量から計算するわけですが、どうも彼の学生であったリーマンに、こういうことを理論化せよと宿題として出したようです。その答をリーマ

ンがやった訳です。そういう意味で言えば、やはり今のだって、僕もうまくは言えないけれど、人間は経験を積み重ねれば必ずそれに応じて新しい幾何を生み出すことは将来とも変わらないということが、、、

**深谷** 経験や現実との距離というものがあります。我々が普通の人間として暮らしていて、感覚器官が直接感じることができるといえる世界というのがありますね。昔の数学なり学問なりというのは、そういう直感的な世界に密着していて、そのまま見たことを、そのものを理論体系として作るというような形だった。しかし、恐らくやはりどこかからそうはできなくなって、多分、数学の抽象化はそういうことと関係あると思うけれど、論理の言葉を使って少し見たものとは違うようなものを、例えば普通に見るとユークリッド空間に見えるけれども、曲がった空間も考えても良いみたいな形で定式化することを少しずつやるわけ

ですね。そうすると、進むに従って段々直感と離れていく。

**斎藤** それでも直感そのものも変わってくるのではないですか？新しい世代、新しく育った人間にとっては、今、僕らが論理で複雑だと思っていることが直感の世界に取り込まれていくのでは？

**深谷** しかし、生物としての人間の限界というのがあります。今斎藤先生が言われたのは、頭で勉強することですよね。私もそれのできるころはあると思います。例えば数学者になれば、なるための訓練を相当受けるわけだから、例えば多様体上の数学をいろいろ考えるのは直感が自然に働きますよね。それは普通に生活してる人にはもちろん働かないと思う（笑）。それは生物としての人間のもってる直感というよりは、勉強してできた直感ですよね。

**斎藤** そうかなあ。人間は、経験を、構造を、また直感に取り込んでいくと僕は思うけど。

**深谷** いや、もう1段階いくと、それを取り込めるかもしれないけれども、取り込むためのエネルギーはまた1段階増えてくる。さっき望月さんの名前を出されましたけれど、あれを直感するのは、普通の人ではできなくて、やはり修行がいるわけです。

**斎藤** まあ、そうだけど、それは時代の感性で、少なくとも僕にはできなくても、次の世代の人ならそこに行くかもしれない。

**深谷** でも、昔の世代で、例えばグロタンディークが作った、ああいう大規模なもの、トポスとか、スタックとか私は勉強して少しは分かってきたけれども、やはり今の時代でもああいうものはそう簡単に分かるものではないですね。

**斎藤** うーん。

**深谷** あれからもう40何年くらいも経ったのですがね。

**斎藤** どこかである種の構造の中に自然に組み込まれてしまっていて、それはあえて意識しなくてもその次を考えるとということに、、、

**深谷** いや、あれはそういう風にできるように一所懸命組み立ててあるわけですよ。だからあそこまで行くだと思うんです。でも、あれ以上行かないのではないかなって。

**斎藤** それはやってみなければ分からない。

**深谷** 多様体の定義そのものがね、易しくはないですよ。

**斎藤** 自然かどうかさえも僕は疑問に思ってるけれども。でもまあ、それはでも、、、

**深谷** あれは、あれ以上易しくならないですよ。

**斎藤** 少なくとも100年前の数学者には考えられなかったことだけれど、今の数学者なら平均的に大学で3年数学を学べば多様体というのは一応それなりに理解するわけじゃないですか。

**深谷** ええ、大学3年ですよ。だから次のは大学院1年になるかもしれない。だからその次は、というのが私が気になってるところです。それは生物としての人間の宿命ではないか。

#### 今後の数学と物理の理想的な関わり合い

**斎藤** そう（笑）、深谷さんは心配を、懸念を述べられているけど、僕はもう少し楽観的。また戻って、深谷さん自身は今後の数学と物理との関わり合いをどういう風に展望するのですか？

**深谷** Kavli IPMUの中で数学者が物理学者とどのくらいの距離を置くかっていうのは難しい問

題でしょうね。

**斎藤** 物理と数学との関係で何か？どうぞ遠慮なく教えてください。

**深谷** やはり数学の研究の中で一番問題（危険）だと思うのは、物理だけをモチベーションにしてしまって数学を捨てることだと思います。してはいけないことは、数学者の前では「これは数学的には大したことないけど、物理の方で役に立つんです」と言い、物理学者には逆のことを言うことですね。物理に直接かわる数学の分野で、数学をやっていくには、数学者としてのモチベーションをどうやって作るかが大事な点だと思います。物理学者というのは、例えば現象に関する感覚とか、何をやれば実際に物理理論として意味があるかということに関する修行を積んでいます。我々数学者はそれをもっていないんです。頑張るって身に付けてもしよせんは素人だと思うんです。

**斎藤** それはさっきの議論と関係がある。物理学者は背景に膨大な計算があって、そこが彼らの直感を作ってるわけではないですか？

**深谷** ええ、我々は逆に別の修行を積んでいて、数学の問題に対する感覚とか、何が大事かに関する別の価値観もっている。その価値観をもち続けて、しかし、物理からちゃんとアイデアをもらっていくということから、一つ大事なことだと思います。だから、インタラクションは、それぞれの価値観をしっかりとった上で、そこでお互いに何をコントリビュートするかを考えながらやらないといけないと思います。

**斎藤** それはご指摘のとおりだけれど、やはりそういうことを懸念と述べるくらい心配はありま

す？

**深谷** はい。そうっていない話をしばしば聞く気がしますね。物理の人が数学に対してどう思ってるか分からないんだけど。われわれとは違う物理学者の価値観みたいなものを理解しろと言われても難しい場合があるんです。さっきの続きをいうと、現象との関係とか、物理として何が大事かということを見てとるのは、物理学者の一番大事な能力、その人の物理学者としての根源を作っている能力だと思うんです。数学者にも同じようなことがあって、違うところで数学者の根源というものがある。それはお互いにある程度は理解し合うことはできるけれども、一人の人が両方どちらをもつことはやはり難しい、というか、そんな楽なものではない。

**斎藤** 両方もつことは……ちょっと難しいですよ。

**深谷** 例えばウィッテンにそれができるかって言われたときに、やはり早い話がまあウィッテンならば少しはできるかもしれないくらいのレベルの難しいことですね。

**斎藤** でも、個別の仕事の中ではこれは数学的な動機だからとかいうように使い分けせざるを得ないのでは？

**深谷** ウィッテン級の人だと、数学の中で十分に意義がある問題をたくさん解いているわけだから、そうやっていると思うけれども、ただ、やはり根源的に本人がもっている関心といえれば両方ということはないでしょう。数学者にとっては、もっと難しく、物理の現象に関する感覚を身に付けるのは、多分無理に近いですね。

**斎藤** 物理の現象に対する直感をもつことが？



**深谷** ええ。

**斎藤** でも数学の現象に対してなら違うでしょう？

**深谷** そうそう、だから数学の現象に対する感覚、つまり問題意識とか、一番大事で理解すべきことにどのくらい貢献するか、を考えながらやるべきですね。僕はそこをきちんとできるかどうか、数学者が物理と付き合う中で大事だとずっと思っています。

**斎藤** 確かに、若い、これから学ぼうという人に対しては、それは重要な忠告、警告ですね。ちゃんと研究者として確立した人はその過程の中で自ずと必ずどちらかを選んでいると思うけれども、これから始めようという人はそれが分からないところが確かにありますね。さて、深谷さん自身はこれからアメリカに行って頑張られるのですが、何か抱負とかありますか？

**深谷** サイモンセンターという所は、多分Kavli IPMUとある意味似たような所です。Kavli IPMUから実験部門が全部なくなったような、要するにKavli IPMUの数学部門よりもちょっと大きいぐらいの数学部門と、それと同じぐらいの大きさの物理部門がある場所だと思うので、さっき言ったような研究をやるには良い所だろうなと思っています。

**斎藤** 物理学者はいるんですか？

**深谷** ええ、今はダグラス (Michael Douglas) という人がいて、最終的には物理学者と数学者と同じ人数になる予定です。ポストドクでもそうです。ただし物理学者は理論物理学者しかいないと思います。サイモンセンターがあるStony Brook大学にはヤン研究所という理論物理の研究所があり、また実験物理もあると思います。サイモン

センターでは、先ほど言いましたように幾何を使って構造を作るという話の方向を専念したい、そこでどこまで行くのかというのを突き詰めたいと思っています。

**斎藤** 僕から見ると深谷さんはまだお若いし、是非もう1つ大きい仕事をしてほしいですね。頑張ってください。今日はありがとうございました。

— · —

**後記 (斎藤)** 2月20日に深谷さんを訪ね、アメリカ出発の準備でお忙しい中、本がうず高く積まれている研究室で話を伺った。普段は立て板に水の話しぶりの深谷さんであるが、このインタビューでは慎重に言葉を考えながら話をされるのが印象的であった。また、研究当初から物理に興味を持たれていたということで、物理に対する積極的姿勢が印象的であった。これは、深谷さんが初めに言われたように、僕と彼との世代の違いを表すものなのだろうか。

# MaNGA フォーカスウィーク

ケビン・バンディ Kevin Bundy

Kavli IPMU 助教

5月20日(月)から24日(金)まで Kavli IPMUで開催された「MaNGA フォーカスウィーク」は大成功でした。「MaNGA」とは“Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (アパッチ・ポイント天文台における近隣銀河のマッピング)”の略称です。従来にない10,000個もの近隣銀河のサンプルについて空間分解分光観測を行う目的で、2014年に開始され6年間観測を続ける新たなスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) プロジェクト\*で、Kavli IPMU所属の筆者が研究責任者を務めています。このフォーカスウィークは、プロジェクトの準備を進めるために企画された研究チームの全体会議としてだけでなく、スローン2.5m望遠鏡のために計画されているMaNGA観測装置の改良についての詳細設計審査を兼ねて開催されました。

著名な専門家で構成された外部評価委員会は、MaNGA研究チームが用意した200ページを超える原本資料を検討するとともに、ハードウェアの設計から観測の戦略及びソフトウェアのツールに渡るプロジェクトの様々な側面に関する口頭発表を評価しました。主に焦点となったのは、MaNGAチームによって新たに導入された、127本までの光ファイバーを一束として断面が六角形の最密充填配列になるように束ねる新しいタイプの積分視野ユニット(IFU)の設計でした。その設計について、研究チームは実験室およびプロト

\*Kavli IPMU News No.20の44-45ページ参照。



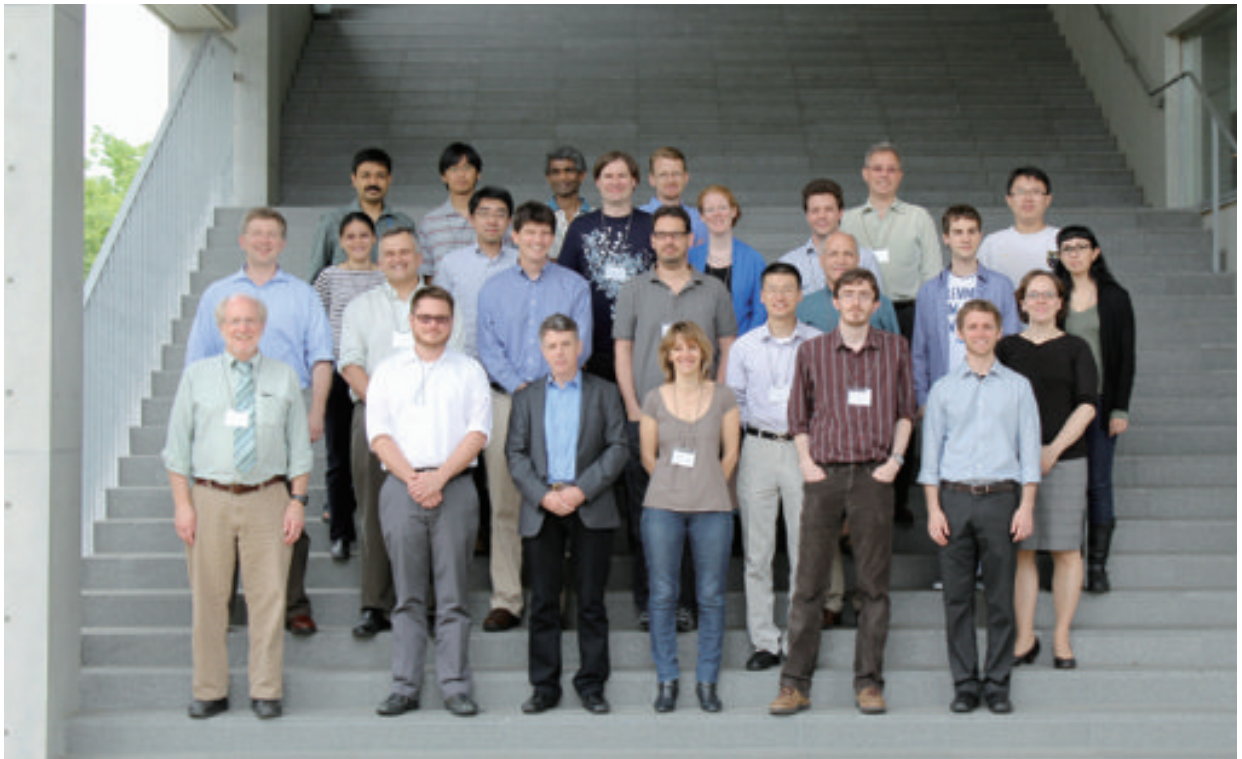
タイプの試験観測の両方の結果によって次のことを実証しました。アパッチ・ポイント天文台の現存する基盤施設に隙間をあげずに組み込む、費用対効果の高いこの方法では、スループット（この数値が高い程光の損失が少ない）の理論的上限は96%ですが、それが定常的に得られることです。

評価委員会は、準備状況と十分に練り上げられた設計に非常に感銘を受けていましたが、これは研究チームが過去14ヶ月に渡り驚くほど急ピッチで成し遂げた努力の成果です。委員会は、装置の全体製作と2014年8月設置に向けてプロジェクトを軌道に乗せるように助言しました。また、委員会はMaNGAが達成を望んでいる夜光輝線差し引きの質に関する潜在的な弱点を見つけ出してくれました。研究チームは、現在この問題に積極的に対処しています。このように評価の結果をポジティブに取り入れることにより、今やMaNGAチームは、2013年夏の間にも最初のIFUが組み立てられること、および最終的には6台になる

MaNGAハードウェア「カートリッジ」の最初の1台を2014年2月の天文台での試験に向けて準備できることを期待できるようになりました。

また、次の段階のMaNGAプロジェクトについても議論が行われ、サンプルの選定と観測に関する戦略に磨きをかけることと、やがては一般に公開されるデータを提供する上で極めて重要なソフトウェア解析ツールを発展させること等が議題に取り上げられました。MaNGAはサンプルされる10,000個の銀河の一つ一つについて、含まれる星とガスの内在的性質及び両成分

の速度場のマッピングを与えます。この情報は銀河のライフサイクル—誕生、その後の連続的な成長、星生成の終了による“死”—を司る物理過程について、新しい貴重な制約条件を与えてくれます。また、銀河内の成分に“重み付け”するために速度場のマップを用いる能力は、銀河内のダークマターの量について制約条件を与えると同時に、ダークマターの輪郭形状や代替重力理論を調べる手段を与えてくれる可能性もあります。



# Kavli IPMU Arts Society

坪井あや つばい・あや

Kavli IPMU 学術支援専門職員

Kavli IPMU には Kavli IPMU Arts Society という団体があり、年に数回自主企画展示を行っています。その発起人の一人でもある筆者が、国内外のいくつかのサイエンス／アートの事例とあわせ、これまでの活動内容をご案内しましょう。

2013年の1月21日から2月28日にかけて、Kavli IPMU Arts Society が企画運営した“Science and Everyday Life, Series 2, Masses & Sizes”展が IPMU 棟で開催されました。この企画は、教職員有志17名からの投稿画像58点の壁面展示、それに伴うパーティー、さらにその投稿画像を空間構成した（インスタレーション）展示、から成ります。まずは少し実際の投稿画像からご紹介しましょう（図1）。身の回りの画像と研究活動分野の画像とが隣同士に展示されているのがおわかりになるでしょう

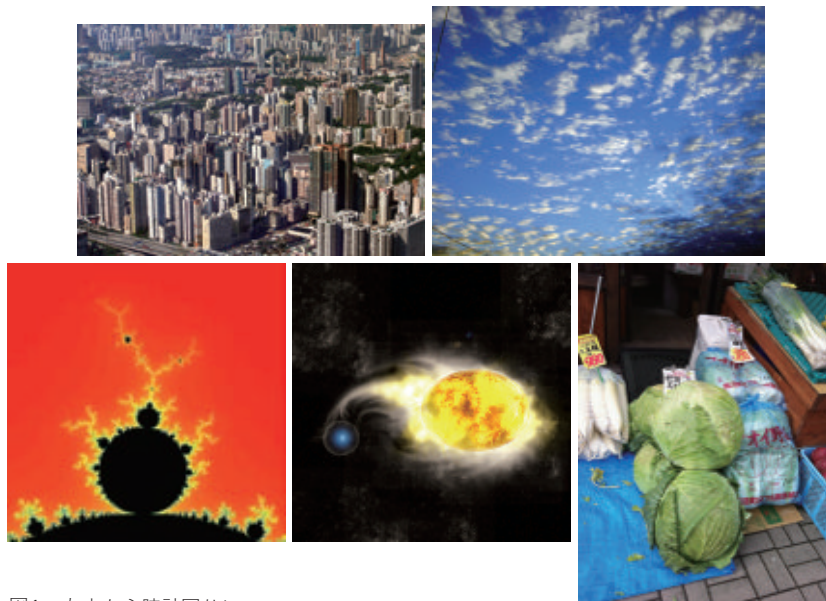


図1 左上から時計回りに Ivan Ip “超過密建築 香港”、Serguey Petcov “有限と無限”、小澤みどり “札幌大球”、野本憲一/Melina Bersten “黄色巨星”、河野俊丈 “マンデルブロ集合”（部分）

か。これら一見雑多なものが壁に一覧されると、不思議と何らかの関係性を発見できる点が面白味です。

この企画の背景には、どうしても出身国同士、専門分野同士で固まってしまうがちな研究者間の交流を促すこと、そして高度に専門化した学問と日常生活との間にできた深い溝に橋を渡そうという、野望に満ちた

意図が2つあります。展示会のたびに、テーマを設けて画像の投稿を募っています。初回のテーマは“パターン”でした。今回は“量-masses & sizes-”です。この展示会のポイントは、サイエンスの活動と日常生活の活動の双方を扱っていること。そして、用いるメディアに、言語ではなく、数式でもなく、画像を選択



図2 壁面展示風景。最終的に17名58点の投稿で賑わいました。黒木WPIプログラムディレクターも特別参加されています。



していることにあります。強引な試みと思われるかもしれませんが、“形態”つまりはその見た目に注目するという手法は、例えば19世紀に「形態学」がありました。

実際の壁面展示では、投稿者自らが身近にあるプリンターを使って画像を出力し、規定のキャプションを付け、指定の壁に貼りだしています。第1回目の展覧会では応募のあった画像をArts Societyが出力し、展示を構成しましたが、より参加の敷居を下げることを期待して今回の方法を採用しました。告知当初は寂しい様相を呈していましたが、日々壁面の様子は変化してゆき、最終的には一面が埋まりました(図2)。会期中にはパーティーを開催。語らいを楽しむ多くの姿がみられました。毎日変化してゆく壁面という点が、研究者の興味をひいたのかも知れません。さらに空間構成した(インスタレーション)展示として、古くて使われなくなったiMac14台を、1Fのエントランス空間に構成しました(図3)。応募のあった画像に、“天体”、“光”、“フラクタル”といった9個の共通項<sup>\*1</sup>を見出し、各画像をそのカテゴリに振り分け、9種の映像にまとめました。各映像はそれぞれiMacでループ再生し、関係の深いカテゴリの映像2



図3 空間に構成した(インスタレーション)展示風景。iMac14台で9種の映像と索引をループ再生しています。

台で1組のペアにして設置しました<sup>\*2</sup>(図4)。壁面展示には自分で関係性を見出す楽しみがありますが、こちらは暗示されるゆるやかな関係性から想起するのが面白味です。嬉しいサプライズとしては、同時期に開催されていた国際会議において、本企画を説明するセッションを設けていただきました。結果、背景を知らなかった多くの会議参加者の方にも楽しんでいただけたようです。

それではこの企画の具体的な楽しみ方をご紹介します。まずは、IPMUの隠れ写真愛好家(今までその存在を知られていなかった!)による美しい写真を愛でること、そして画像が暗示する“量-masses & sizes-”にまつわる概念<sup>\*3</sup>を推測してみる、パーティーに出かけて感想

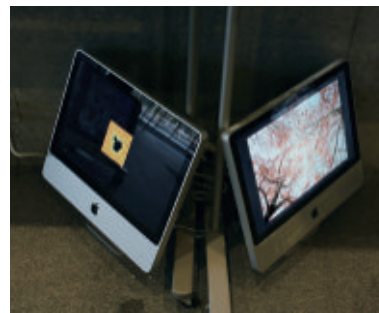


図4 1階展示風景(部分)。“フラクタル”(左)。“離散”(右)。

を交換する、壁面展示とインスタレーション展示との違いを考えてみる、などが挙げられると思います。もちろん画像を投稿し、自ら参加者になることで楽しみは倍増します。<sup>\*4</sup>

実施してみたところ、当初の目的は果たせたように思います。パーティーでは展示を眺めながらの会話が広がりました(図5)。また、展示を眺めて談笑していた研究者グルー



図5 パーティーの様子。ワイン片手に展示を見て談笑するメンバー。チーズを用意したが、「一瞬で消え失せた」とのことです。





図6 “Science and Everyday Life, Series 1, Pattern” 壁面展示風景。16名が投稿。



図7 (左) 同展、空間に構成した展示風景。約200m<sup>2</sup>。木片、ペンキ、紙、紙にインクジェット・プリント、iMac、プロジェクター、DVDプレーヤー、電飾、スタンドライト。  
(右) XYZの3軸を表す木軸に画像とキャプションを構成し、関連の深い画像を近くに配置しました。

iMacとプロジェクターでは投稿映像を再生し、流れる時間とその方向を表すため電飾を導入しました。

プが、そこから想起して研究の議論をはじめていたよ、という目撃談も寄せられています。

Arts Societyではこれまでもいくつか展示を企画しています。

- ・ “Science and Everyday Life, Series 1, Pattern”, 2011年3月-4月 (図6、7)
- ・ “Searching for the other physics

-an art exhibition at a science lab- vol. 02”, 2010年6月29日-7月11日 (図8)

- ・ “Searching for the other physics -an art exhibition at a science lab- vol. 01”, 2010年2月3日-27日

さてこういったIPMUでの試みはどのように位置づけられるでしょう

か? ここ数年来、サイエンスとアートが歩み寄る新しい潮流があるように思います。Arts Societyでの試みも、ささやかながらその流れに与するものであると言えるかもしれません。2012年の9月に数名の事務スタッフが米国の研究所を視察しました。充実したサポート・サービス体制と並んでアートプログラムの実施が目をつけたという報告を受けています。中でもニューヨークにある数理論理学研究所 Simons Centerは、組織内部にアートプログラムについての諮問委員会を持ち、施設内での作品展示、およびアーティスト・イン・レジデンスプログラム<sup>\*5</sup>等を定期的に行っているとのこと。他の例では、スイスにある素粒子物理学の研究所 CERN は、オーストリアで毎年開催されるメディアアートの祭典を主催する Ars Electronica と提携し、アーティスト・イン・レジデンス事業を2011年から始めています。

科学者自身が捉えるアートとの関わりはどのようなものでしょうか? 2013年の理化学研究所の一般公開に、一風変わったコンテンツが提供されました。科学者同士が実際に議論を行っている、その現場を来場者に公開するというものです。「科学は創作活動であり、中身を全部理解できなくても、それを人間として感じることができる。芸術と共通の側面を持ち合わせている。」<sup>\*6</sup>というある物理学者の問題意識から企画されたとのこと。もう1つ。2010年からコペンハーゲン中心部にある映画館で Science & Cocktails というイベ

ントが実施されています。科学者による講演をカクテルと実験的な音楽イベント等と共に提供するという企画で、Niels Bohr Institute もその運営に携わるものです。オーガナイザの1人である物理学者はこう述べます。「芸術の新しい定義：一個人によるサイエンス。サイエンスの新しい定義：明確な境界を設けた芸術。双方に共通するのはその方法である：つまり、コンセプト/概念/現象を主観的あるいは客観的に記述しよう、そしてその正確さを1個人あるいは共同で保証しようという、終わり無き試み。」<sup>\*7</sup>

アートの側からのアプローチにも見るものがあります。ロンドンに、Central Saint Martins という名高い美術大学があります。2011年にその名も“Art and Science” 学科を大学院に創設しました。Art & Technology や Design Science の例は多くありますが、美術大学における Art & Science は大変新しい試みです。

これらの試みに共通するのは、いずれもサイエンス/アートを生み出す当事者の元で起きているということです。サイエンスをテーマにしたアート展が過去に美術館等で開催された例は多くありますが、それらは第三者により成果物が評価/提供される場<sup>\*8</sup> でした。サイエンス/アートを生み出す当事者が相互の枠組に身を置くことで、自らの活動を再定義しようという試みは、両者の分断<sup>\*9</sup>が顕著になるばかりだった近代以降では新しい傾向だと言えるでしょう。

サイエンス、アート、そのいずれも、そもそもは現在私たちが“真実”

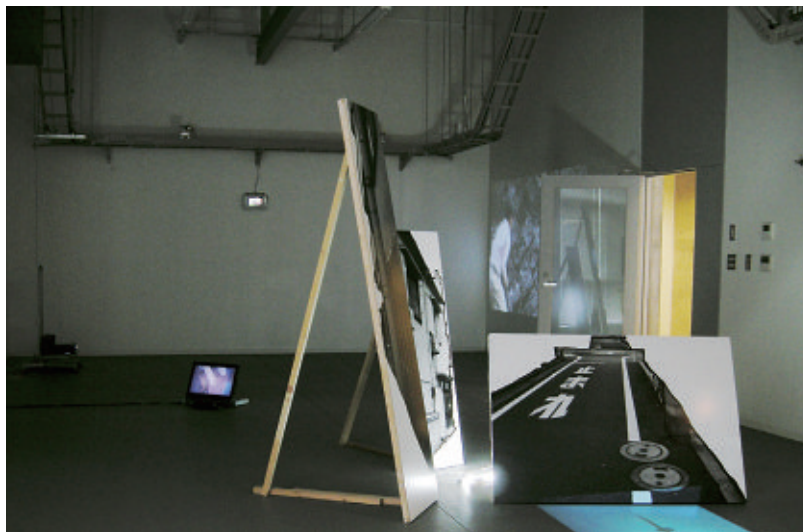


図8 “Searching for the other physics –an art exhibition at a science lab– vol.02” 展示風景。日英4名の若手現代美術作家による映像を中心としたグループ展示（筆者を含む）。一般公開も行いました。

や“知”と呼んでいる何かに何とかして触れたいという多様な試みの1つであったと言えます。しかし近代以降、サイエンスは巨大な成功を収め、その共同体だけで負うにはあまりに荷は大きくなり過ぎてきており、一方、アートは常に自らの定義を拡大し続けた結果、今やその本分というものを誰も見いだせなくなりつつあるようです。そんな中、筆者はここに再び“知”へとつながり得る新しい地平が姿を現しはじめたのかもしれないと胸を躍らせています。

Kavli IPMU は数学、物理学、天文学で宇宙の謎に迫ろうという、あ

る種近代以前からの学を継承する試みと言えます。必然、芸術全般、哲学、美学等と親和性は高いと言えるでしょう。Arts Society では、他機関と協力することも視野に入れ、これからも様々なアプローチを継続的に試みることで、Kavli IPMU の活性化に、延いては広い意味での“知”へ貢献してゆけることを願っています。

最後になりましたが、機会を与えてくださった村山機構長、中村前事務部門長、後押しして下さる事務スタッフの皆様、そして今回の国際会議オーガナイザの向山特任准教授に深くお礼申し上げます。

<sup>\*1</sup> 9個の共通項は、“1つ”、“2つ”、“多数”、“天体”、“光”、“面”、“太陽”、“フラクタル”、“離散”。複数項目に属する画像もあります。

<sup>\*2</sup> “1つ”、“2つ”、“多数”についてはそれぞれ1台、2台、3台のiMacを用い、複製した映像を同期再生させました。

<sup>\*3</sup> “量-masses & sizes-” は、軽/重、小/大、1/多、不変/変量、有限/無限、部分/全体、連続/不連続、などにかみ砕けるでしょう。

<sup>\*4</sup> 残念ながら研究活動分野からの投稿が少なめです。“展覧会”と聞いて研究活動で扱う画像を投稿してはつまらなからう、と躊躇う方が多いようです。しかしこの企画では、個々の投稿を楽しむことももちろんですが、様々なものが並列した様を一覧するのが面白味です。今後の増加に期待しています。

<sup>\*5</sup> アーティストが数ヶ月間滞在して現地で作品を制作しその成果展を行うものです。

<sup>\*6</sup> <http://d.hatena.ne.jp/D-brane/20130422>

<sup>\*7</sup> <http://www.jacomearmas.com/scicom.html>

<sup>\*8</sup> 近年では、国内外で、博物館のリソースを使用した博物館におけるアート展なども盛んです。

<sup>\*9</sup> 古代ギリシア期、同じ学の一部であったサイエンスと人文/社会科学は、特に近代以降各自独自の道を歩いており、当時のように近いことはありません。Artはルネサンス期にサイエンスとの距離を縮めたこともありますが、人文/社会科学が扱う対象をもその対象とする現在は、人文/社会科学とサイエンスにあるのと同様の別離の一面があります。勿論、中世以降交流が皆無というわけではなく、近現代にサイエンスをインスピレーションの源として制作されたアートは多くあります。

## 村山機構長、アメリカ芸術科学アカデミー会員に

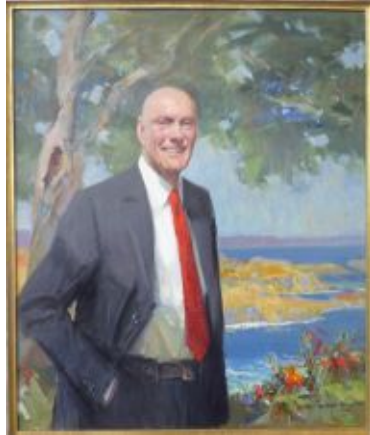
2013年4月24日に Kavli IPMU の村山 齊機構長がアメリカ芸術科学アカデミーの会員に選出されたことが発表されました。同アカデミーは学芸の振興を目的として1780年に創設され、20世紀後半からは政策研究を中心課題とする組織であり、歴代の会員としてジョージ・ワシントン米国初代大統領、アルバート・アインシュタイン博士をはじめとした政治、ビジネス、科学、芸術など幅広い分野の会員が名を連ねています。今回の新会員にも2012年のノーベル物理学賞受賞者のデービッド・ワインランド博士、俳優のロバート・デニーロさんなど多くの著名な科学者、芸術家、政治家などが含まれています。同アカデミーの会員には各時代の最高の知性と最も影響力を有する指導者が選出され、アメリカでは最高の栄誉とも言われており、村山機構長は「このような名誉ある団体の終身会員に入れていただけたとは想像もしていませんでした。これを機に、日本発の学術を広め、更に世界の学術の環境づくりを頑張っていきたいと思えます。」とコメントしています。

今回選出された新会員198名の就任式典は2013年10月12日に同アカデミー本部のある米国マサチューセッツ州ケンブリッジで行われます。

## フレッド・カブリさんの肖像画を交流広場に掲示

2013年5月、カブリ財団会長で創立者のフレッド・カブリさんの肖像画が

Kavli IPMUに到着しました。この肖像画は、IPMUがカブリ財団から基金の寄付を受けてKavli研究所の一員となったことを記念するもので、米国ニューヨーク州在住の著名肖像画家、エベレット・キンスラーさんによって制作されました。Kavli IPMU研究棟の藤原交流広場に掲げられ、研究者が集い議論を重ねる様子を見守っています。



## 井上邦雄主任研究員、第4回戸塚洋二賞受賞

東北大学ニュートリノ科学研究センター長でKavli IPMU主任研究員を兼ねる井上邦雄さんが高エネルギー加速器研究機構長の鈴木厚人さんと共に第4回（2012年度）戸塚洋二賞を受賞しました。戸塚洋二賞は、ニュートリノ実験または非加速器素粒子実験、あるいは関連する理論研究で優れた成果をあげた研究者に授与されるものです。鈴木さんと井上さんの受賞理由は、カムランド実験でのニュートリノ研究、特に2011年に地球内部に地球創成時の原始の熱が残っていることを初めて示し、『ニュートリノ地球物理学』を創設したとも言える研究業績です。同賞の受賞式は2013年3月20日に東京大学小柴ホールで行われました。



井上邦雄さん

## 阿部知行特任助教、文部科学大臣表彰・若手科学者賞受賞

2013年4月8日、文部科学省は平成25年度の「科学技術分野の文部科学大臣表彰」各賞受賞者を発表し、Kavli IPMU 助教の阿部知行さんが『数論的D加群の理論の基礎付けとラングランズ対応の研究』の業績により若手科学者賞を受賞しました。



阿部知行さん

文部科学大臣表彰・若手科学者賞は萌芽的な研究や独創的視点に立った研究など高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた40歳未満の若手研究者を対象とする賞で、平成25年度は阿部さんを含め89名の若手研究者に授与されました。表彰式は平成25年4月16日に文部科学省で行われました。

## 鈴木洋一郎副機構長、ジュセッペ・コッコ二賞受賞

2013年5月17日、ヨーロッパ物理学会高エネルギー物理学部門は東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長で、Kavli IPMU 副機構長を兼ねる鈴木洋一郎さんに2013年のジュセッペ・コッコ二素粒子天体物理学・宇宙論賞 (Giuseppe and Vanna Cocconi Prize for Particle Astrophysics and Cosmology) を授与することを発表しました。同賞は、ヨーロッパ物理学会高エネルギー素粒子物理学部門が2011年に設立した賞で、素粒子天体物理学と宇宙論の分野で過去15年間に優れた業績を挙げた研究者に隔年で授与されます。



鈴木洋一郎さん

鈴木さんと共同受賞者のアーサー・マクドナルドさん (SNO実験代表) は、それぞれスーパーカミオカンデ、SNO (カナダのサドベリーニュートリノ観測所) での実験によって、太陽ニュートリノの謎の解明に貢献したことを高く評価され、今回の受賞となりました。



同賞の授賞式は、スウェーデンのストックホルムで7月18日から22日に開催されるヨーロッパ物理学会高エネルギー物理学国際会議にて行われます。

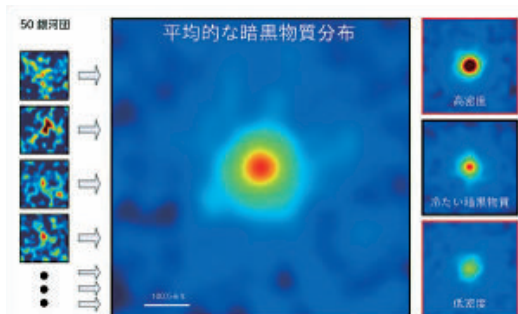
### 銀河団の観測で捉えた「冷たい暗黒物質」の証拠

Kavli IPMU教授の高田昌広さんが参加する台湾中央研究院、イギリス・バーミンガム大学などからなる国際研究チームは、すばる望遠鏡で撮影した50個の銀河団の観測データから重力レンズ効果を通して暗黒物質の密度分布を測定した結果、観測された暗黒物質の平均的な分布が「冷たい暗黒物質」(Cold Dark Matterを略してCDM)モデルのシミュレーションから得られる「中心に質量ピークをもち、対称な分布である」ことがわかり、CDMモデルの予言する特徴と一致する新たな証拠を発見しました。

これまでの研究ではCDMモデルと一致しない暗黒物質の分布が報告されていましたが、今回の研究では50個という最大数の銀河団をサンプルとしたことにより、暗黒物質分布の平均的な姿を導くことに成功しました。

今後、新しい超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC、ハイパー・シュプリム・カム)を用いたすばる望遠鏡での観測で、より多くの銀河団を対象に重力レンズを用いて暗黒物質の分布を調査することにより、研究の更なる発展が期待されます。

この研究成果は*Astrophysical Journal Letters* 2013年6月1日号に掲載されました。



個々の銀河団の暗黒物質分布(左)、50個の銀河団を平均した暗黒物質分布(中央)、暗黒物質モデルによるシミュレーション(右)。冷たい暗黒物質モデル(右パネル中央)が観測された平均の暗黒物質分布と一致することが分かります。青→緑→黄→赤の色の順に暗黒物質の密度が高くなります。また、中央パネルの白い線は100万光年の長さを表します。(Credit: NAOJ/ASIAA/School of Physics and Astronomy, University of Birmingham/Kavli IPMU/Astronomical institute, Tohoku University)

### 謎の超高輝度超新星、実は標準光源だった

Kavli IPMU 博士研究員のロバート・クインビーさんとマーカス・ワーナーさん、大栗真宗特任助教、野本憲一主任研究員らを始めとするKavli IPMUの研究チームは、地球から約90億光年の遠方に見つかった超高輝度超新星 PS1-10afxが、実は重力レンズ効果で30倍明るく見えていたIa型超新星であることを発見しました。

全天サーベイ観測バンスターズで発見された超新星PS1-10afxは、当初太陽の1000億倍の明るさを持つ「超高輝度超新星」と考えられていました。しかし、今回、Kavli IPMUの研究チームは観測データを解析し、PS1-10afxからの光の波長分布と明るさの時間変化曲線が、宇宙の標準光源として知られるIa型超新星と一致することを発見し、さらに数学的理論により重力レンズ効果についての考察を進めた結果、PS1-10afxが重力レンズで30倍増光されたIa型超新星であることを突き止めました。

重力レンズ効果は、暗黒物質、暗黒エネルギーやブラックホールなど光で直接観測できない天体を観測する数少ない手段のひとつです。今回明るさが一定の「宇宙の標準光源」、Ia型超新星であるPS1-10afxの重力レンズによる増光率の直接測定に成功したことは、今後様々な天体の重力レンズ効果を利用した研究への応用が期待でき、暗黒物質や暗黒エネルギー、重力理論の解明を進める足がかりとなることが期待されます。

この研究成果は*Astrophysical Journal Letters* に2013年5月1日に発表されました。また、研究チームは4月23日に

東京大学本郷キャンパスでこの研究成果について記者発表を行い、主要新聞各紙にニュースが掲載されました。

### オランダのライデン大学学生がKavli IPMUを訪問

2013年5月1日、オランダのライデン大学の大学生および大学院生が日本での学習旅行の一環としてKavli IPMUを訪れました。片山伸彦副機構長によるKavli IPMUの紹介に続いて、Kavli IPMU博士研究員のレネ・マイヤーさん、コーネリアス・シュミットさん、スルド・モレさん、ロバート・クインビーさんらによる専門分野の講義や機構内の見学ツアー、また高田昌広教授を囲む質疑応答が行われました。講義に参加した物理学・天体物理学専攻の学生からは、重力レンズや超弦理論など研究内容に加え、日本での生活に関する質問もあり、「将来Kavli IPMUで研究したい」との声も聞かれました。



### 人事異動

Kavli IPMU 博士研究員の Sourav Mandal さんが米国の Institute for Defense Analyses のスタッフ研究員に転出しました。在任期間は2010年7月1日から2013年6月30日でした。



PS1-10afxの増光のメカニズムの模式図。超新星と地球との間にある大質量の天体による重力が、丁度ガラスのレンズが光を集めるように光を曲げたと考えられます。重力レンズが無かった場合には別の場所に届くはずだった光も地球上の観測者に届き、超新星が明るく見えます。



## ヒッグス粒子の性質

野尻美保子 Kavli IPMU主任研究員

“ヒッグス粒子”の発見の後、その性質についての詳しい研究が進んでいます。標準模型ではヒッグス粒子に最も強く結合しているのはトップ粒子ですが、この結合は、直接は確認されていません。トップ粒子がLHCで生成するにはやや重い粒子なので、図のようにトップ粒子 $t$ とヒッグス粒子 $h$ を同時に生成するようなプロセスは起こり難いためです。標準模型では、グルーオンとグルーオンの衝突によって真空からごく短時間作られる粒子が真空に戻るときに、ヒッグス粒子が作られます。この意味では、トップ粒子との結合は間接的には測定されていますが、未知の粒子の寄与もあるかもしれません。ヒッグス粒子の性質は、詳しくは明らかになっていません。LHCではヒッグス生成の観察の邪魔をする事象が多いからです。このような問題を避けるために、ILCという計画も提案されています。ヒッグス粒子の性質を調べることで、さらに新しい粒子の存在の手がかりを掴むことができるかもしれないからです。7月のスクール“Future of collider physics”では、ヒッグス粒子を調べる将来計画が議論されます。

