

KAVLI IPMU NEWS



World Premier International Research Center Initiative
世界トップレベル研究拠点プログラム

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe
カブリ数物連携宇宙研究機構

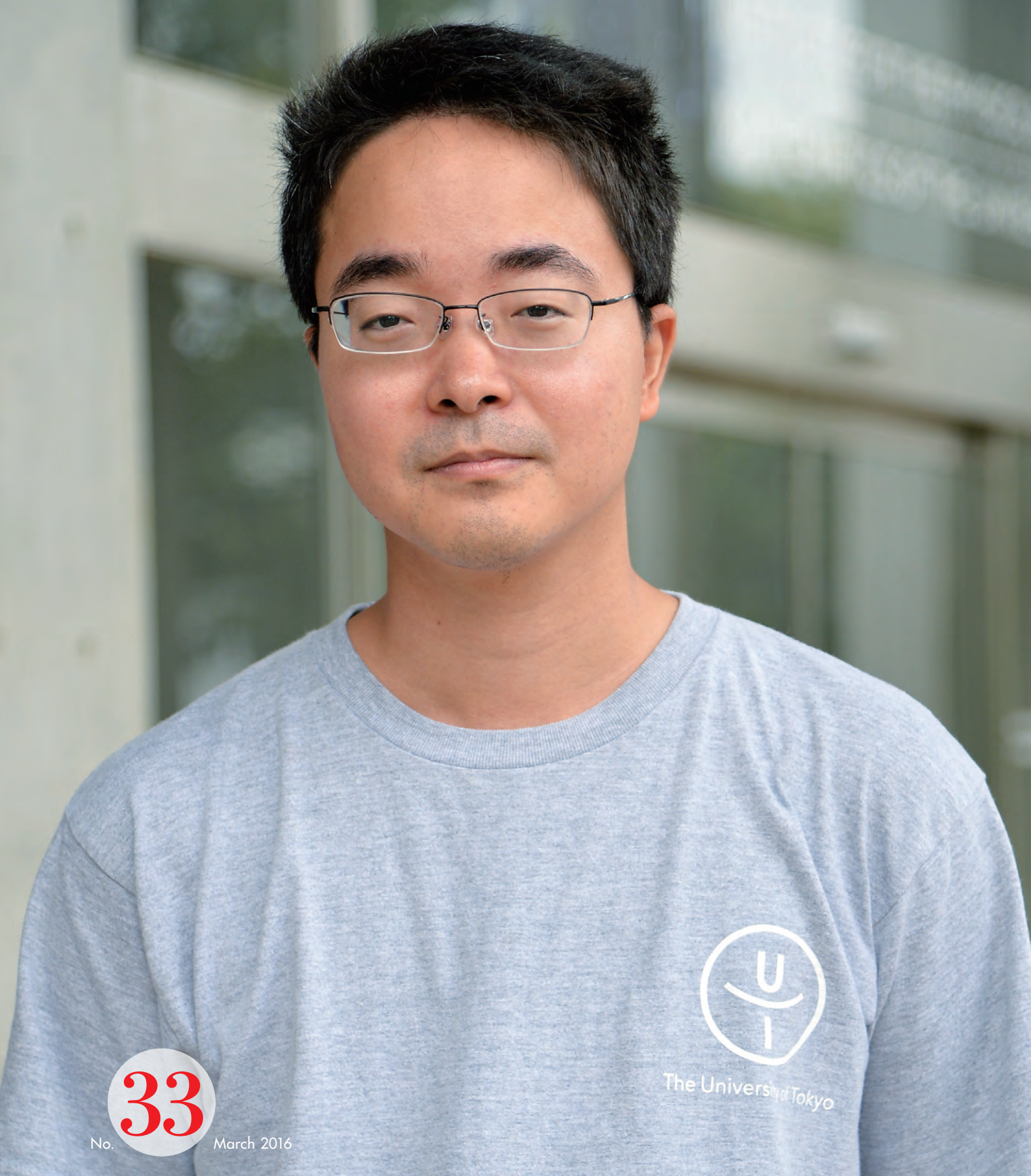


The University of Tokyo Institutes for Advanced Study
東京大学国際高等研究所

Feature

A Theoretical Physicist's Take on Spacetime Dimensions

Interview with Shing-Tung Yau



33

No.

March 2016


The University of Tokyo

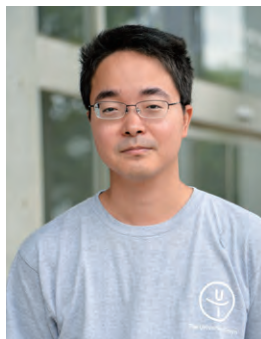
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
A Theoretical Physicist's Take on Spacetime Dimensions
Masahito Yamazaki
- 8 **Our Team** Krzysztof Gorski
Ryu Makiya
Yuki Sakurai
- 9 **Tea Break**
Mathematicians Joke about Themselves
- 10 **Interview** with Shing-Tung Yau
- 18 **Workshop Report**
10th Asian Winter School on Superstring Theory
Hirosi Ooguri
- 20 **Workshop Report**
Berkeley Week @ IPMU
Yasunori Nomura
- 21 **News**
- 26 **Super-Luminous Supernovae (SLSNe)**
Melina Bersten

Japanese

- 27 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 28 **Feature**
時空の次元：或る理論物理学者の思考
山崎 雅人
- 32 **Our Team** クリストフ・ゴルスキー
真喜屋 龍
桜井 雄基
- 33 **Tea Break**
数学者についての数学者好みのジョーク
- 34 **Interview** シン-トゥン・ヤウ教授に聞く
- 42 **Workshop Report**
第10回超弦理論アジア冬の学校
大栗 博司
- 44 **Workshop Report**
Berkeley Week @ IPMU
野村 泰紀
- 45 **News**
- 48 **超高輝度超新星 (SLSNe)**
メリーナ・バーステン



Masahito Yamazaki is an Assistant Professor at the Kavli IPMU. He graduated from the University of Tokyo in 2006. He received his Ph.D in Physics in 2010 from the University of Tokyo. Then, after staying at the IPMU as a JSPS Postdoctoral Fellow, he moved to the Princeton Center for Theoretical Science, Princeton University as a Postdoctoral Fellow in September 2010. He became a Kavli IPMU Assistant Professor in June, 2013, and a Postdoctoral Member at the Institute for Advanced Study, Princeton in September, 2013. In August, 2014, he was reappointed as a Kavli IPMU Assistant Professor. He received the Inoue Research Award for Young Scientists in 2012 and the Particle Physics Medal: Young Scientist Award in Theoretical Particle Physics in 2013.

山崎雅人：Kavli IPMU助教。2006年3月、東京大学理学部物理学科卒業。2010年3月、東京大学理学系研究科より博士の学位を取得。2010年4月、日本学術振興会特別研究員としてIPMUに所属、同年9月、プリンストン大学理論科学センター博士研究員。2013年6月Kavli IPMU助教、2013年9月よりプリンストン高等研究所博士研究員、2014年8月Kavli IPMU助教に再任。井上研究奨励賞(2012年)、素粒子メダル奨励賞(2013年)受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



January 18: Kavli Foundation Science Program team visit Kavli IPMU (see p. 21). (Left) From left to right Dr. Christopher Martin, Dr. Miyoung Chun, Hitoshi Murayama, and Dr. Sharif Taha. (Right) Presenting an overview of the research at the Kavli IPMU to the team.



March 10: (Left) Hitoshi Murayama with Dr. Ralph Eichler, former President of ETH Zurich. (Right) Explaining an overview of the Kavli IPMU.



March 27: Takaaki Kajita Nobel Prize Commemorative Lecture Series, "Where do we come from? – Beyond the Nobel Prize in Neutrinos" (see p. 22). (Left) Hitoshi Murayama giving a talk. (Right) Photo with fellow speaker Mark Vagins in front of the Yasuda Auditorium.

A Theoretical Physicist's Take on Spacetime Dimensions

Privilege of a Theoretical Physicist

When you hear the word “physicist,” what kind of person comes to mind? Is he or she a crazy person dressed in a white lab coat, stuck in a messy lab and playing around with fancy equipment? “Doc” from the movie *Back to the Future* is one famous manifestation of such a wide-spread stereotype.

While I am a physicist, I am not a physicist of that kind: I have not worn a lab coat in the last ten years, and I almost never deal with reagents in the lab (in fact, I am bad at these things). I spend the bulk of my daily life working on a computer or talking with my fellow researchers, and I really am not doing experiments in the lab—yes, you might by now realize that I am a theoretical physicist.

As the name suggests, the work of a theoretical physicist is to come up with a theory in physics. A theory in physics, roughly speaking, is a theoretical framework which naturally and uniformly explains the essence of a variety of natural phenomena.

Theoretical physicists like me cannot do experiments ourselves: even if I come up with an ingenious theory, I myself cannot do the final verification of the theory, so I turn to my experimental colleagues for help. This is what is meant by the familiar expression “experiment and theory develop hand in hand in the research of physics.”

While it is often the case that theoretical physicists need to rely on experimental physicists, we theoretical physicists have our own strengths. We can use our minds to ponder a wide variety of

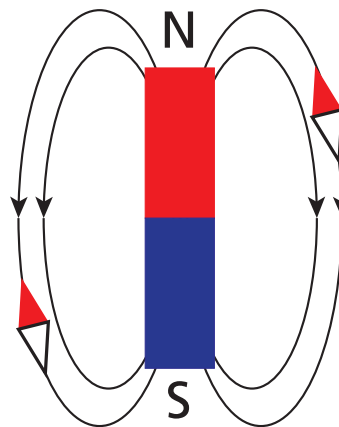


Figure 1. A magnet creates a magnetic field around it. This in turn affects the surrounding matter, e.g., the direction of the compass.

natural phenomena, deepen our understanding and sometimes even make new predictions, without ever realizing the phenomena in the lab with complicated experimental apparatus (which often requires a lot of labor and money, by the way). With only paper and pen (and sometimes a handy laptop), we can indulge in deep thought, on topics ranging from the beginning of the Universe to the behavior of tiny elementary particles, all in a tiny corner of a coffee shop! I would say it is a rare privilege of a theoretical physicist to have such absolute freedom in our thinking.

Let me give you an example of such a line of thinking, coming from my research experience—I can promise that this will be fun!

Let us begin with a simple example. You might have learned this at school: when we place iron scraps near a magnet, the iron scraps align in a beautiful pattern. Since I am a physicist, I can restate this phenomenon in physics jargon. First,

when we place the magnet, it creates a magnetic field in the space around it, where a “field” can be thought of as a set of arrows at each point of the space, specifying the strength and orientations of the magnetic field (see Figure 1). Then, when we place iron scraps around the magnet, the iron scraps “feel” the magnetic field, and align in the directions dictated by the field. When we move the magnet, the magnetic field created from the magnet also changes as a result, which in turn causes a change in the patterns of the iron scraps. To state this in a fancier way, we can say that the two physical systems, namely the magnetic field and the iron scraps, are not independent and “interact” with each other.

What happens if we use another metal, or another material, instead of the iron scraps? We know that some materials are very strongly pulled by a magnet, while others are not pulled much. To restate this, the strength of the interaction depends on the types of materials we have.

With real-world materials it is often not easy to change the strength of interactions. However, a theorist has no trouble imaging a hypothetical material for which we can freely tune the strength of interactions. When the interaction length is zero, the magnetic field and the material are completely decoupled; as we increase the interactions the two physical systems begin to have more and more mutual effects on each other.

Theorists Like Generalization

Since a theorist often likes the idea of generalization, let us try to make this setup slightly more general. First, we assume that there are several different types of electromagnetic fields. Moreover, we assume that matter also comes in several different types. This is a natural generalization of electromagnetism.

For simplicity, let us assume that there are no direct interactions between electromagnetic fields of different types. Note that this does not exclude

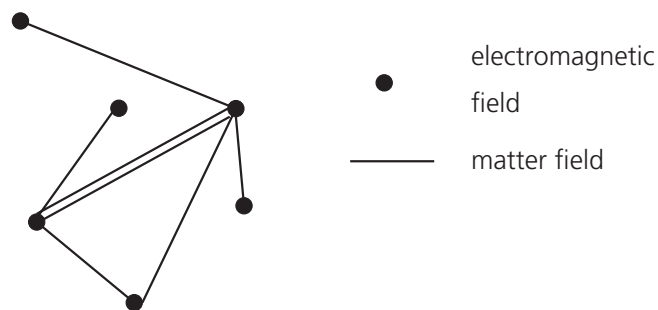


Figure 2. A graph (the so-called quiver diagram) representing the types of electromagnetic fields as well as matter interacting with them. Here a vertex represents a type of the electromagnetic field, and an edge the matter transforming under the electromagnetic field.

more indirect interactions mediated by matter. Namely, an electromagnetic field causes a change in the nearby matter, which then causes change in another electromagnetic field. In such a generalized setup, all the electromagnetic fields and matter eventually interact with each other in a complicated manner, and it becomes in general a difficult problem to figure out their behavior exactly.

In order to concisely describe such a theory with interacting electromagnetic fields and matter, we introduce the concept of a graph,¹ which is often called a quiver diagram in the literature (see Figure 2). A vertex of this graph represents an electromagnetic field, whereas an edge connecting between two vertices represents matter interacting with the electromagnetic fields associated with the two vertices. This means in particular that a matter field always interacts with two electromagnetic fields, even when there are many electromagnetic fields. Given a graph, a theorist can in this manner consider a corresponding theory (often called the quiver gauge theory in the literature). A graph is something even a small child can draw. But a trained theoretical physicist can associate a complicated physical theory to a graph, and spend hours and hours thinking about the theory.

We have to introduce a graph as technical shorthand for a complicated theory. While this might be useful, in physics one often asks the “physical meaning” of various mathematical gadgets. Is the graph only a technical tool, or can

¹ In the literature we often consider an oriented graph. However, readers can ignore this feature for the purposes of this article.

we associate a more physical substance to it?

One might quickly conclude that this is a nonsense question. At least, even if a graph lives in some space, that space is completely different from our time and space, like another world. In fact, even when we draw an edge, we do not necessarily have in mind a particle moving in our spacetime; rather, an arrow is simply shorthand for the matter content of the theory we are interested in.

It is too early to give up, however. What happens if the “other world” really exists? What happens if a graph in that other world represents the choice of the theory in “our world” ?

Superstring Theory and Extra Dimensions

Very interestingly, in the field of superstring theory (which I have been working on), something as absurd-sounding as “the other world” is realized as “extra dimensions.” An extra dimension is a “rolled-up” dimension which is too small to observe, and is different from our familiar dimensions (one time and three spatial dimensions). In superstring theory, a number of properties of “our space,” such as the types of matter we have, can be translated into the properties of the extra dimensions. Since it is natural to draw graphs in two-dimensional planes, we should have (at least) two extra dimensions. We thus have total of $3+1+2=6$ spacetime dimensions; we will live in a six-dimensional world (see Figure 3).

In superstring theory, there exists a natural six-dimensional brane (membrane).² If we wrap this brane along two spatial directions, we have four remaining directions, which gives us four spacetime dimensions (one for time, and three for spatial directions). The graph appears in two-dimensional spatial directions, where the graph represents how the branes spread in the two-dimensional extra dimensions (see Figure 4).³ It turns out that this is correct in the precise technical sense, as shown by detailed studies of the shapes of the branes. This is what I worked on for my Master’s thesis many years ago.⁴

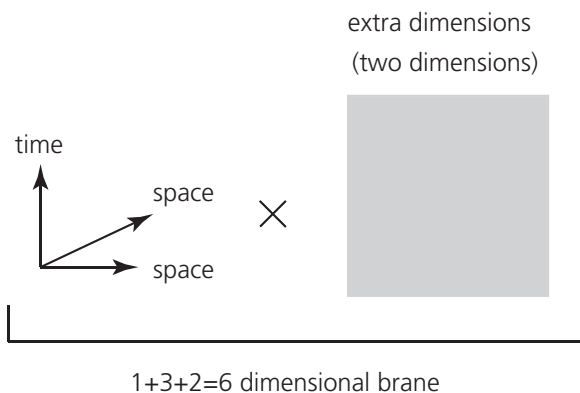


Figure 3. In addition to our one-dimensional time as well as three-dimensional spatial directions, we have two extra dimensions, where the graph of Figure 2 lives. We then have total of $1+3+2=6$ dimensions, which in the superstring theory is realized on a 6-dimensional “brane.”

That we can speculate about six spacetime dimensions at the corner of a coffee shop is what makes the life of the theoretical physicist exciting. We can however go further and be even more brave. Suppose that we make the size of one of our spatial dimensions smaller and smaller, to the extent that it is eventually so small that nobody (or nothing) can see it. This means that we are eventually confined to a world with spatial two dimensions only, like on a piece of paper.

Having only two spatial dimensions causes all sorts of troubles for our daily lives (for example, there are no airplanes or pedestrian overpasses), but let us neglect these matters here, and ask what happens to the graph we introduced earlier. Recall that our graph was drawn in two spatial dimensions, which requires two extra dimensions. Now that our spatial directions are reduced from three to two, we have a new extra dimension, and hence in the end we have a total of three extra dimensions. This should mean that the two-dimensional graph should be replaced by a three-dimensional graph. We can formulate this statement in a mathematically more precise manner.⁵

² These are called D5-branes and NS5-branes in our jargon, where “5” here denotes the spatial dimensions.

³ To be more precise, we have two different types of branes along the two extra dimensions, and the graph represents how these two branes intersect with each other.

⁴ M. Yamazaki, Fortsch. Phys. **56** (2008) 555-686, arXiv:0803.4474 [hep-th].

⁵ M. Yamazaki, JHEP **1205** (2012) 147, arXiv:1203.5784; Y. Terashima and M. Yamazaki, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 091602, arXiv:1203.5792.

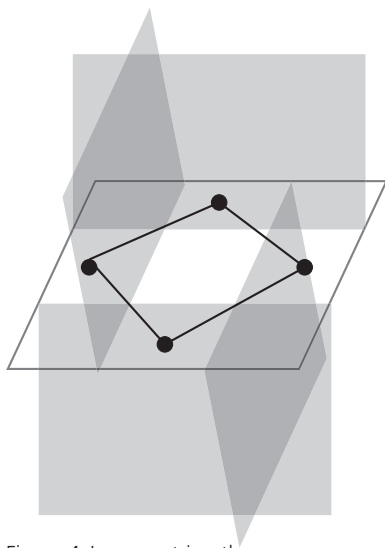


Figure 4. In superstring theory, a 6-dimensional brane (represented here as a white plane in the horizontal direction) intersects in a complicated manner with a different type of branes (represented here as gray planes in vertical directions). The graph drawn on the two-dimensional extra dimensions represents this intersection pattern of the two different types of branes.

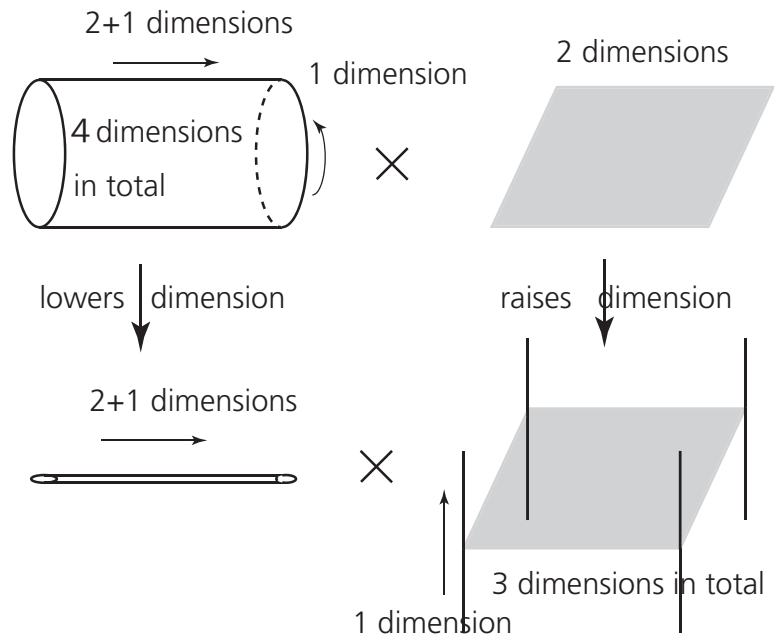


Figure 5. In the starting setup (above), we start with four-dimensional spacetime (which we know well), as well as 2 extra dimensions, leading to a total of 6 dimensions. Let us now choose one of the 3 spatial dimensions, curl it up, and make it very small. The spacetime as we know it then reduces to the total of 3 dimensions, with 1 time direction and 2 spatial directions. All is not lost, however; the dimension of the extra dimension goes up, leading to three spatial dimensions (below). Note that the total number of dimensions is always 6, and does not change. Note that we find the following curious phenomenon: in the left of this figure the dimension decreases by one, whereas on the side of extra dimensions (right hand side) the dimension goes up.

Joy of Theoretical Physicists

If you think about it, this is a rather dramatic and counterintuitive conclusion. In one side of the six-dimensional theory, namely in “our” world, the number of spacetime dimensions decreases from four to three, and we have less space for our lives. However, on the other sides of the six-dimensional theory (i.e. in the directions of the “extra dimensions”), the number of spatial dimensions increases from two to three, and an inhabitant of the extra dimensions have more directions to go for a walk! In the world of superstring theory, a number of surprising things happen, even to the fundamental concept of dimensions of spacetime.

Starting with the familiar electromagnetism, we arrived at graphs and extra dimensions, all the way to the dramatic insights concerning the

dimensions of our spacetime and extra dimensions. This is one illustration of the joy of research in theoretical physics, where a theoretical physicist talks to himself/herself, discusses with his/her fellow researchers, and after hours of work finally arrives at fascinating conclusions. Any physicist knows well that it is a challenging problem to better understand Nature, and quite often he or she spends days and months being stuck in research. Despite numerous failures and frustrations, however, theoretical physicists never stop thinking and doing research. By being ambitious and patient and sometimes thinking outside the box to eventually contribute to mankind’s progress in better understanding Nature—however small the result may be—we can make such contributions, and this fact is a source of pleasure and pride for theoretical physicists, including myself.

Our Team

Krzysztof Gorski

Research Field: *Cosmology and Astrophysics*

Kavli IPMU Professor

I am visiting Kavli IPMU on leave from Caltech/JPL in Pasadena, where I am a Senior Research Scientist since 2003, and where I am working in the ESA/NASA Planck mission collaboration. Most of my career was focused on studies of the cosmic microwave background (CMB) radiation. After I completed my education in Poland, I came to Berkeley to work with Joseph Silk, and Marc Davis on cosmology and large scale structure in the universe. Afterwards I joined the COBE team and NASA/Goddard Space Flight Center to work on the characterization of the pioneering measurements of the CMB anisotropy.

Since then I continued to develop the analysis and science extraction methods for CMB applications. Amongst those, the one that I originally created and that became very broadly used is HEALPix (<http://healpix.sourceforge.net>), a method for efficient discretization and analysis of data distributed on the sphere.

I took part in a wide array of science projects that were spawned by acquisition of the remarkable Planck data set, including (1) the studies of temperature and polarization of foreground emission

and its separation, (2) assessments of statistics of the primordial CMB fluctuations, (3) and isotropy of the universe, (4) as well as estimation of the CMB anisotropy spectrum and its parametrization, which became a pinnacle of modern cosmology.

Now, that Planck project is nearing its completion, we are looking forward to new avenues for pushing ahead with CMB measurements. LiteBIRD satellite mission proposed to JAXA is one of such exciting prospects for delivering space based measurements of CMB polarization of sufficiently high fidelity to reveal the coveted background of primordial gravity waves leftover from the inflationary inception of our universe.

I am visiting Kavli IPMU to interact with the Japanese team of LiteBIRD to share our Planck experience with space exploration of the CMB, and to establish prospects for the future collaboration.



Ryu Makiya

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

My research interests lie in observational cosmology and cosmological galaxy formation. I have developed a phenomenological model of cosmological galaxy formation in order to gain insights into the physics of galaxy formation through observation.

I am also interested in the accelerated expansion of the universe. In the Kavli IPMU, I will tackle this greatest mystery in the Universe by using the



theoretical galaxy formation model and various observational data sets, including the 3D galaxy map which will be obtained by the Subaru PFS.

Yuki Sakurai

Research Area: **Experimental Physics**

Postdoc

I am working on a Cosmic Microwave Background (CMB) polarization observation satellite, LiteBIRD mission. With LiteBIRD it is possible to perform a verification of typical inflation models, searching for primordial gravitational waves generated in the early universe through all-sky observation of CMB polarization. The mission is now in the stage of feasibility verification and detector development, aiming to launch in the 2020s. My research focuses



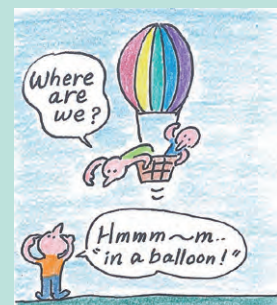
on the development of optical system which leads CMB to focal plane detectors. I am challenging an observation of ultrahigh energy physics of the early universe, using my background in particle physics.

Tea Break:

Mathematicians Joke about Themselves

Two physicists are lost riding in a hot air balloon. They spot a man on the ground and shout: "Where are we?" The man on the ground thinks for a few long minutes and then yells back: "You are in a balloon!" The physicists in the balloon are stunned by the unexpected answer. One physicist says to the other, "Just our luck to run into a mathematician." "How do you know he is a mathematician?" asks the other. "Well, first of all, the man took a long time to figure out the answer. Second, his answer was absolutely precise. And third, it was totally useless!"

(Contributed by Alexander A. Voronov)



© Tom Haruyama

Our Team



Interview with Shing-Tung Yau

Interviewer: Shinobu Hosono

Found a Theorem Soon after Entering UC Berkeley Graduate School at Twenty

Hosono: It's my great pleasure to have this opportunity to have an interview with you

today.

Thank you very much for sparing your time.

Needless to say, you are one of the greatest mathematicians in the world.

Yau: Thank you.

Hosono: At the same time, I can say that you are one of the most important persons in the universe because of Calabi–Yau manifolds in string theory.

Let me start by asking how you became interested in this special manifold. I brought a book you wrote, *The Shape of Inner Space*.^{*} According to this book, it says that you were in the second year of the Chinese University of Hong Kong when you decided to go to the U.S. At that time, were you already interested in differential geometry or

physics?

Yau: During that year in Hong Kong, I was much more interested in a subject called functional analysis. I spent a lot of time studying that there. I had some education in geometry but not that much, mostly in classical geometry studying surfaces, curves in three dimensions. I knew nothing about what a manifold means, so I had no modern knowledge about geometry, but I gradually learned later.

Hosono: How about physics?

Yau: I had reasonably good training in physics in the Chinese University of Hong Kong, but I had pretty poor training in physics in high school which I regret very much. I didn't obtain enough intuition that I should have learned when I was in high school. I always feel I am lacking in physics training, despite the fact that I did quite well in physics in the Chinese University of Hong Kong.

Hosono: Then, in 1969, when you were 20 years old, you

Shinobu Hosono is Professor of Department of Mathematics, Gakushuin University, and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist. He worked with Shing-Tung Yau as his postdoctoral fellow in 1992 – 1993.

^{*} *The Shape of Inner Space—String Theory and the Geometry of the Universe's Hidden Dimensions*, Shing-Tung Yau and Steve Nadis, Basic Books, New York, 2010.

went to Berkeley and actually went into the graduate school there. Right?

Yau: Right.

Hosono: Soon after entering the graduate school, you found a theorem and it's quite amazing. Could you tell us a little bit about that?

Yau: I went to Berkeley and so I enrolled in many classes because I felt I didn't know many different areas of modern mathematics and I started to be interested in geometry. I learned quite a lot of things from different faculties in Berkeley and during the first semester I learned about manifolds, I learned Riemannian geometry, but not enough; it was just elementary.

Then, during the Christmas term, I didn't realize in America everybody went home, so I was basically left by myself and I spent most of my time in Berkeley in the library. We didn't have an office in those days. I went through all the books and journals and I found a journal which was quite readable for me, the journal was called the *Journal of Differential Geometry*. The second issue of the journal had some

interesting papers written by a great mathematician called John Milnor and I found it fascinating reading his paper.

The paper was about how curvature influences the fundamental group of the manifold. I learned what the fundamental group of the manifold means during my course in algebraic topology but I barely learned what curvature means in the geometry class. But then I found these two things can be linked together and I found it very interesting.

I studied the paper by Milnor. It was so well written, I could understand the whole thing and then he referred to some other

Shing-Tung Yau is Professor of Department of Mathematics, Harvard University. He is also Director of the Yau Mathematical Sciences Center of Tsinghua University in China and Director of the Shing-Tung Yau Center of National Chiao Tung University in Taiwan. He received his doctorate in mathematics from the University of California, Berkeley in 1971. Since then, he was appointed as a faculty member at the State University of New York at Stony Brook, Stanford University, Institute for Advanced Study, the University of California, San Diego, and in 1987 he became a professor at Harvard University. He was awarded the Fields Medal in 1982. He has also received many other distinguished awards including the Crafoord Prize (1994), the United States National Medal of Science (1997), and the Wolf Prize (2010).



paper, some older paper by a man called Alexandre Preissman. I looked at the paper and I decided I could understand it. Not only that I could understand it, but I could try to generalize some of the arguments to a more general case. I kept on doing it. Surprisingly to me, after a week or so, I was able to do something reasonably interesting (they later called it flat torus theorem) using some fundamental group of the manifold which depends on group theory. I happened to learn something about it when I was in the Chinese University of Hong Kong. I went through the library and looked up all these references by myself. It was a very interesting period of time, living alone, away from other people, and spending all my time on studying. That was good.

Hosono: Just half a year after you went to the U.S.?

Yau: Yes.

Hosono: That's quite amazing for us.

Yau: No, it was just exciting. So I found it interesting.

Encountered the Calabi Conjecture; Not Believed It Could be True for a Long Time

Hosono: Good. After that, you encountered Calabi

conjecture.

Yau: Right. In the first year, I spent a lot of time studying Riemannian geometry including this thing that I just mentioned, but I also studied complex manifolds and there were some seminars I went to and then I decided I would ask Shiing-Shen Chern to be my advisor; he was on leave the first year. When he came back, I said "I want to be your student." He agreed and I started to spend most of my time studying complex manifolds.

Then, I also spent my time in the library and I looked up some of the papers written by Eugenio Calabi. He mentioned this as the Calabi conjecture. This was fascinating to me because I was taking a course in general relativity and I looked at Einstein's field equation describing geometry in terms of Ricci tensors. I found it interesting because the Ricci tensor only represents part of the curvature, and yet in physics it means matter. So, I said "If there is no matter, I wonder whether there will be gravity." Well, this means in a Ricci curvature you can see whether there is still nontrivial gravity. This was very difficult to understand in just purely Riemannian geometry. Then, I

looked at this paper by Calabi. He asked, even gave a way, to try to understand this problem in a special class of manifold called Kähler geometry. I found it fascinating because now I felt it would help me to understand Ricci curvature much better.

I was extremely excited about it because I studied Riemannian geometry at the beginning, but with Ricci curvature, I didn't know how to study it or what to do. But this gave me a way to understand it. After that, I wanted to understand this problem. But, at that time there were almost no examples, basically no examples of such manifold. Then, Calabi proposed that you can find a huge number of them by making use of algebraic geometry. Nobody believed that it could be true because it was just too good to be true. And perhaps I myself also didn't think that it could be true. I was struggling to try to see whether it was true or not for a long time.

Hosono: Do you mean at first you didn't believe it?

Yau: For quite a long time I didn't believe it. Many of my friends are very brilliant geometers, but none of them believed that it was true.

Hosono: None of them?

Yau: Right.

Hosono: That was the first year.

Yau: It was the first year when I learned about this problem. On the other hand, I felt it was such an essential, important question that it had to be solved one way or the other. If it was not true, I should find a counterexample. If it was true, it would be great. At that point, I really believed that it would be the greatest theorem to prove it is true, but I didn't believe it could be true.

Hosono: Eventually you came to the conclusion. I mean you completed the proof.

Yau: Oh, it took a long time.

Hosono: That means the problem was so difficult.

Developed Geometric Analysis, the Basic Idea to Understand the Calabi Conjecture

Yau: Yes. Actually, Calabi told me later, when he was trying to solve this problem, a famous mathematician, one of the greatest mathematicians in the 20th century, André Weil told Calabi that the major tools to understand, or to solve this problem were not there yet. It was premature to solve this problem because the tools were not there. Indeed, when I tried to solve the problem in a positive way (at the beginning I

tried really hard to give a counterexample, and when I decided it was probably true) I needed to build up the fundamental tools to solve it. Nowadays everybody looks at it and says it's almost trivial, but before that, people were not even doing a differential equation on the manifold and people were just solving an equation in a domain. But I was working on my manifold to develop all the basic tools in order to solve it. That took quite a while. But I had some good friends like Shiu-Yuen Cheng and also Richard Schoen and Leon Simon, and we were working together. All these are very good friends. We started to understand what geometric analysis means on a manifold. At the same time, we developed a subject which is now called geometric analysis. This was the basic idea needed in order to understand the Calabi conjecture.

Hosono: I see. How many years did you spend on the problem?

Yau: To solve it?

Hosono: Yes. Originally you thought you would disprove it.

Yau: From 1970 to 1973, 1973 around September to November I thought it was wrong, and I tried to give a counterexample. Starting

around November, I decided it must be right. I was struggling to try to give a counterexample. I announced a counterexample in a big conference in Stanford, 1973, and then it was found to be wrong. I felt very bad about it because I had made a big announcement and it turned out that it was wrong. I spent 2 weeks, basically day and night, without doing anything, just trying to give a counterexample. Every time I gave a counterexample, it failed in a very delicate manner, so I felt it cannot be that delicate unless God had fooled me; so it had to be right now. I changed my mind completely, and then I prepared everything to try to solve it. From the fall of 1973, I solved it after 3 years, in 1976. So, 3 years of preparation and doing estimate by estimate.

Hosono: I see. All the necessary stuff you prepared.

Yau: Studying and preparing the tools.

Hosono: I see. It's very interesting. In 1982, because of that theorem you were awarded the Fields Medal, at the same time with Alain Connes and William Thurston.

Yau: Yes.

Hosono: What is very interesting to us is that

a historically big event in physics, a breakthrough in string theory, occurred soon after. What was the situation? I mean what was the communication between mathematicians and physicists around that time?

Calabi-Yau Manifolds Met String Theory in 1984

Yau: Actually, starting in 1973 in a big conference in Stanford, I met some physicists who gave a talk about general relativity. They posed some questions about gravity, which is called a positive mass conjecture. It turned out that it was an old problem starting from Einstein to prove that Einstein's equation is stable. That means the total energy of spacetime is actually positive with the assumption of what Einstein laid out; if the total mass were negative, the system would be unstable, and the whole universe would not hold together. It was a fundamental question to answer so as to make sure that that cannot happen. It was a beautiful question in geometry by itself. I worked on that until around 1977 to 1978, and we solved it. I solved it with my former student Schoen. We solved it together. I had known him from Berkeley. Because

of that I had been in close contact with people studying general relativity. That was after the Calabi conjecture. In fact, in 1979, I went to Princeton where many people were interested in general relativity. Famous physicist Malcolm Perry and many others were there, and after 1 year I became a faculty in the Institute of Advanced Study and then I had postdocs, my first postdoc was Gary Horowitz. I invited him to come as a postdoc in general relativity. Then, in the same year, I also met Andrew Strominger. After a year, Ed Witten came and showed me how to give a different proof of the positive mass conjecture. All of them were there. I said I constructed this manifold which is now called the Calabi-Yau manifold. I said, "To me it's motivated by physics. You know, vacuum still has gravity. This must be useful for physics." But, at that time it had not matured enough in physics. So nobody believed that it was true. It's interesting.

In 1984, I was still in the Princeton institute, but I visited my wife; my wife worked in San Diego at that time. San Diego is beautiful, and I was in her office which looks out over the beautiful



blue ocean. I received a phone call from them; from Horowitz, Strominger, and Witten. They said "It's exciting. We are developing a new subject of quantum gravity; it's called string theory. This is great, but we need to know one thing for the vacuum solution — because we are building a model vacuum. What kind of manifold is it? A six-dimensional manifold meets all the conditions. Well, somehow you have mentioned something close to the truth but we are not so sure." They asked me whether I know how to do it, and I said "This is exactly what I told you before. That's exactly what I can do." So they were very pleased. In fact, Ed Witten wanted to know much more. So he flew from Princeton to talk with me for one day. We had a very good conversation for the whole day. Then, in the same year, 1984, there was a big conference on string theory at the Argonne Laboratory in Chicago. I went there and I met many more people who were very excited about the subject. I started to get much more interested in Calabi-Yau manifolds after

that. Before that, we actually did not know many examples; on the other hand when the physicists joined, it became a big industry and I started to construct many more Calabi-Yau manifolds for them. At one point, I said that there are at least 10,000 of them; they were somewhat disappointed. At the beginning they thought there are only 3.

Mirror Symmetry of the Calabi-Yau Manifolds Discovered around the End of the 80s

Hosono: Only 3?
Yau: Yes. Then, I told them there are many more. But, anyway after that we became much closer in developing the properties of these manifolds.

Hosono: I see, it's interesting. So, in any case, activities for string theory had started. Around the end of the 80s, one of the big discoveries was the mirror symmetry of Calabi-Yau manifolds. Right?
Yau: Right.
Hosono: Mirror symmetry seems to be strange for mathematicians. What did you think about it?
Yau: Oh yes. Starting in 1984, we were interested in Calabi-Yau manifolds. We were

exploring the construction; exploring some properties of them. Postdocs and all of us were talking together. We made some progress. Around 1988, I moved from San Diego to Harvard, and in 1988 there was a young guy called Brian Greene, who is now of course very popular. He became a postdoc. We talked about the Calabi-Yau manifold, we wrote some papers, and the study was going quite well. Suddenly, one day he came to my office. He said, "I think that each Calabi-Yau manifold has a mirror." I thought about it and I said, "That cannot be true."
Hosono: Oh, you said that cannot be true?
Yau: Yes. That was a mistake because most of the Calabi-Yau manifolds we constructed had a negative Euler number. So I said, "This is not symmetry because a mirror manifold means that the Euler number has a different sign, but there are more negative Euler numbers than positive Euler numbers." But, then I was wrong because I did a calculation just on a piece of paper and it's not so easy to do a large-scale calculation. Then, Philip Candelas and his co-authors did a large search based on a computer, and they found a diagram which is symmetrical.

Hosono: Yes, the famous diagram.
Yau: We started to have a good hint about what was going on, and then Brian Greene and Ronen Plesser, who was a student of Cumrun Vafa, developed the theory of mirror symmetry on a special class of manifold called the Gepner model. They were based on physical intuition and physical reasoning on symmetry. They actually proved "in a physical way" that a mirror for the quintic is good and verified some interesting examples, I mean, properties that are good. I was convinced that it looked very good, and what I'd said was wrong. But, the most amazing thing is the fact that Candelas, actually after 1 year of calculation, said that they got a really precise calculation of the mirror conjecture — starting with a conjecture, they did a lot of interesting calculations which was amazing to me.
Hosono: Calculations for the famous quintic?
Yau: For the quintic, yes. The instanton correction (to Yukawa couplings), which turned out to be beautifully done. I was extremely impressed by that.
Hosono: And then, soon after the work by Candelas et al.,

there was a development.

Berkeley Conference, a Big Turning Point for the Development

Yau: Right after that time, Isadore Singer asked me something without knowing about this mirror symmetry. He said that there would be some kind of special program on mathematical physics at the Mathematical Sciences Research Institute in Berkeley. He asked me to go there to organize something. I told him something suddenly occurred, namely the mirror symmetry calculation, and I thought it would be very good to have a conference on this. Both physicists and mathematicians should come together and communicate among themselves to see what should be done and what should not be done. We changed the original plan which was for another subject on mathematical physics mostly on gauge theory at that point. Singer was more interested in gauge theory at that point. We turned that into a mirror symmetry conference. That was the first conference that we had.

Hosono: I think after that conference many mathematicians changed their attitude.

Yau: That was a very dramatic conference because I decided something. After talks, which were rather formal, people did not communicate that much. So, one night, after dinner, I called physicists to come and algebraic geometers to come. We spent 2 hours discussing things. The most dramatic thing was that the calculation of the instanton number, calculation that Candelas and his group came up with, turned out to be different from the calculation given by two algebraic geometers in Norway. There was a big discrepancy. Then, there was a big debate because algebraic geometers thought that everything they did was so rigorous, every step was done right, and there could not be any mistake in their calculation. They started humiliating Candelas and others, saying your ideas cannot be true.

I remember very well that physicists were actually much more humble because of their normalizations in the Yukawa couplings and everything. I talked with Brian Greene and I talked with Candelas. We looked at all the possible normalizations and everything that seemed to be fixed, and we couldn't find any problem at the end



of that. We were very puzzled, wondering what's wrong. We thought something had to be fixed, but we didn't know how to fix it. The conference ended up with something puzzling. We all went home. After a couple of months, it was great because our two colleagues from Norway who were very honest sent us a letter saying that the program they used (they needed a computer program to do the calculation), the program they'd developed, had a gap, something wrong, and after fixing that they came up with exactly the number that Candelas had. This is not a simple quiz — because the number is a big number and they were exactly the same. Now, it became very convincing to our algebraic geometers friends that there was something in the physics of this calculation. Immediately, many algebraic geometers, especially David Morrison who was very critical of the calculation at the beginning...

Hosono: Was he critical?

Yau: Oh extremely critical. He said "You guys cannot be right," but after that he

turned 180 degrees and he very faithfully started supporting this whole subject. And he has made a huge number of contributions since then. Especially, he started to work with Brian Greene who is a very good writer in the first place. After being my postdoc, I recommended Brian Greene to go to Cornell and he was in Cornell. Then, I think Morrison went to Cornell to work with him and started to understand what is going on. Brian Greene later went to Columbia. I helped him to get a job there and since then he has become very happy.

Hosono: Good. That workshop must be a very big turning point for the development.

Yau: Oh yes. After that both Greene and Morrison, and Candelas kept on doing very good works. And then, people started to work on it — many people started to look at the problem.

Hosono: After that people tried to understand what mirror symmetry is and now there are two major ways to understand mirror symmetry. One of them is

your construction, named SYZ (Strominger-Yau-Zaslow) mirror construction. That's very attractive and seems to be very promising, but still very mysterious.

Yau: Right.

Hosono: What do you expect for future developments or what do we need to make developments?

Physical Intuition Helped Mathematicians Understand a Geometric Subject; Otherwise It Would Be Impossible

Yau: We were always interested in mirror symmetry; you came and Albrecht Klemm came in early 90s. The SYZ construction somehow was related to the brane theory which Joe Polchinski and all these people developed. I was talking with Eric Zaslow who was my postdoc. Then I was visiting Trieste actually, and in Trieste Ed Witten asked me, "Andy Strominger and (Katrin) Becker and (Melanie) Becker just came up with this supersymmetric cycles in a Calabi-Yau manifold. We are not sure that is the right thing, but could you give an opinion? What do you think?" He said, "Andy has been talking for quite a while about trying to get such a cycle, but this time seems to be interesting." He wrote down whatever – he

would draw on a blackboard what it looks like. I said "This looks very good. I mean this is a minimal submanifold."

I have been working on minimal submanifolds for a long, long time. These are special Lagrangian cycles. At that point, it was called supersymmetric cycles because we didn't know (and I should have known, but I forgot) some of this work was done independently by Blaine Lawson and Reese Harvey many years ago. But they had no idea what it meant for physics. In the brane theory developed by Strominger and Becker and Becker, they did not know that this happened before. So I suggested it looked very good, and once you should look in it.

Then, when I came home, Strominger came to visit. Harvard was thinking to make an offer to him. He did very important work on conifold transition of black holes at that time. He came to my office and we had a long discussion about what it is and we decided from the point of view of the brane theory there should be a mirror which is constructed using the brane duality. So we came up with this idea of the SYZ construction; the T-duality would be the right one. It was good in many ways because

the time was just right and then brane theory developed. We felt that was the right thing.

I am very excited about it because it is geometric interpretation of something and I always like to see geometry and physics mixed together anyway. But the problem of course is that in the whole development there is always some quantum correction, which takes a lot of intuition to build on. This quantum correction has been always important and yet not understood and it keeps on giving some hints about what is simply true and what is to be done. But it's never precise mathematically. So we keep on developing some mathematics to understand it; each time we are going the right way, basically we see some very interesting mathematics that come up from that. Each time the mathematics comes out to be right and supports this conjecture. I think up till now there have been many, many accumulated supporting effects.

I must say I was very surprised and very happy — physical intuition helped us to understand a geometric subject which otherwise would be impossible to understand because many of

the problems had someone to do with a singularity. The SYZ fibration has many singularities and up till now we still don't know how to deal with it. But somehow the quantum field theory basically says that although there is a singularity that should be fine, intuitively. The calculations always come out to show there is some way that we can overcome the problems. We are still very excited about it and now much more progress has been made on the homological mirror symmetries (HMS) proposed by Maxim Kontsevich. I think these two approaches will mix together and hopefully it will give very good intuition. A mathematical proof of some important statement will come up from the merging of these two approaches, I think. As I said, many interesting beautiful mathematics have emerged from this understanding; some of them were totally surprising to me when they came up and what's even more surprising is when we can actually prove that it's true.

Hosono: Yes, that's right. Somehow from the mathematics side mathematicians developed, I mean, for example, Harvey and Lawson developed a

theory for special Lagrangian submanifolds and, on the other hand, physicists got the idea of brane or something like that. Then you connected those two ideas into the same thing.

Yau: That's very good, I think.

Hosono: This is actually the question that I would like to ask you. My question is whether this is a typical example of the relation between mathematics and physics. If you looked at those two subjects, there was no difference between the two for a long time in the history. But, in the 20th century somehow those two subjects went in different directions.

Yau: At the beginning, yes.

Hosono: But somehow the string theory suggests us something, though I don't know exactly what it should be. What do you think about the relation between mathematics and physics?

Need to Build Geometry That Can Understand Quantum Gravity in the 21st Century

Yau: I think it's fascinating. I mean it's always a subject that many great mathematicians tried to understand both sides and get ideas from both sides to make some advance. I think in the 21st century, we need to build geometry

that can understand quantum gravity, something very big, which is governed by gravity, by Einstein's equation and something very small, which is governed by quantum mechanics. Of course, the major question then is something Einstein wanted to solve. But I think having just physicists is not enough, we need good geometers; and having just geometers is not good enough because we need extremely deep physical intuition. I think we are building the theory more and more on both sides, and hopefully at the end we can have a bridge.

But right now I think it is still not mature enough to build out right quantum geometry, because we don't understand many important questions like the Calabi-Yau manifold and many, many details. And on the physics side, also there are many things we still don't understand; I mean, black holes which create a lot of paradoxes and all that we still need to understand. I think maybe after 20 or 30 years we will understand much more; we will see a bridge in a clearly ordered view. I believe that will be the goal of many mathematicians and physicists put together. This will involve

many subjects, I mean, algebraic geometry, analysis, representation theory, number theory from the geometry side, and from the physics side, of course, many ideas from quantum field theory and from statistical physics, from many, many different subjects. So it will be a merger of many, many subjects; not just one subject. It will involve many, many people. Not just one single person can understand all. I think this is a beautiful, important period of time in history.

Hosono: Yes, that's right. Finally, as you know, IPMU is an abbreviation of the Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. Based on your experience, could you give us some words for the people doing research related to physics and mathematics?

Yau: I was there in the very beginning (in the opening symposium in 2008), when they were building up the center of the subject and I was very excited about it. I think it's very good and even essential and important for mathematicians, physicists, astronomers to come together, and listen to each other to develop theory. We need to have strong curiosity, and inspire each other. As for

me, for example, I liked going to a physics department to listen to seminars. Although most of the seminars I couldn't understand, after 10 times I started to get something and that something could be very useful for my development in mathematics or even to physics eventually. I think people should be patient and not say "I cannot solve this problem today. So I am giving up." That's not right, because it's just like language. After you listen to some language for 1 year, you will know how to speak it. It's the same kind of problem. Going to a physics department we have to know the language and vice-versa, and mathematicians produce many things which are exciting for nature and vice-versa. I think we should understand each other. I hope people in the institute will do the same thing.

Hosono: Thank you very much. The words from you, a great mathematician who has experienced the great interplay between mathematics and physics in the last 50 years, will have a big influence on the people in the institute and for all of us. Thank you very much for this interview.

Yau: You are welcome. Thank you.

10th Asian Winter School on Superstring Theory

Hirosi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

Since 2007, the Asian Winter School on Superstring Theory has been hosted in turn by Japan, China, India, and Korea. It was initiated by researchers of the four countries during the Strings 2003 conference in Kyoto, to offer opportunities of professional growth for young researchers in the Asia region and to enhance their interactions and collaborations within the region. As the result, the 1st Winter School was held in Korea in 2006. This year, the 10th School was co-hosted by the Kavli IPMU and the Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST) and held at OIST from January 6 to 16.

There were nine courses of lectures on subjects ranging from fundamental issues in superstring theory and quantum field theory to applications of superstring theory to cosmology, particle physics model building and phenomenology. Each lecturer representing a forefront of each area

gave four x 75 minute lectures. At the end of each day, we had a discussion session for students to ask questions to lecturers and for the lecturers to expand on topics discussed in their lectures. The lecturers and their titles of their courses are:

Miranda Cheng (University of Amsterdam) “(Mock) Modular Forms in String Theory and Moonshine”; Ron Donagi (University of Pennsylvania) “Super Riemann Surfaces and Supermoduli Spaces”; Rajesh Gopakumar (International Center for Theoretical Sciences, India) “Higher Spins and Strings”; Daniel Harlow (Harvard University) “The Emergence of Bulk Physics in AdS/CFT”; Seok Kim (Seoul National University) “5d and 6d SCFTs”; Slava Rychkov (CERN and University of Paris VI) “Conformal Bootstrap”; Gary Shiu (University of Wisconsin and Hong Kong University of Science and Technology) “Inflation in String Theory”; Jaroslav Trnka (California Institute of Technology)

“Scattering Amplitudes”; Angel Uranga (Instituto de Física Teórica UAM-CSIC) “String Phenomenology.”

Lecture notes and reading materials have been posted on the School website to help students learn more on these subjects (<https://groups.oist.jp/ja/aws/lecturers>).

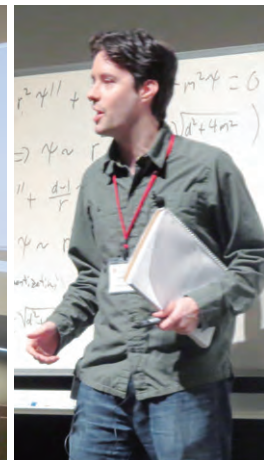
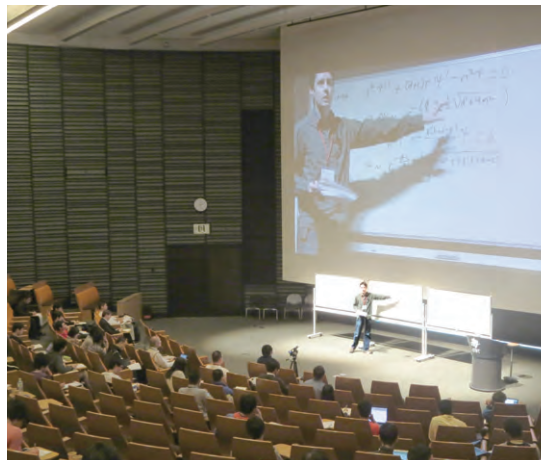
Initially, we were planning to accept 80 graduate students and postdoctoral fellows. It turned out we received more than 200 applicants, and we expanded the size of the School. In the end, 91 students attended the School. They were 41 from Japan, 21 from Korea, 14 from China (including Taiwan), 9 from India, and 6 from US and Europe. To give opportunities for students to present their research results, we had two “Gong Shows,” with 5 minute oral presentations. 31 students made Gong Show presentations (<https://groups.oist.jp/ja/aws/gong-show>). In addition, we set up poster boards outside of the Auditorium for students to make poster presentations during



coffee breaks.

Over the past 10 years, the Asian Winter School has contributed significantly in education, exchanges, and collaborations of young researchers in the Asia region. We thank the Kavli IPMU and OIST for administrative and financial supports and OIST for use of its facility for this 10th School. We also acknowledge financial supports from Sokendai and APCTP in Korea. Student volunteers from Osaka University and KEK also helped us run the School smoothly.

In recognition of the success of the Asian Winter School over the past 10 years, the Kavli Foundation has decided to support the School by providing an annual fund to cover a majority of the cost of the School, ensuring its stable future. We are grateful to the Foundation for its support to our effort to educate and mentor future generations of theorists in Asia.



Workshop

Berkeley Week @ IPMU

Yasunori Nomura

Professor, Department of Physics, University of California, Berkeley
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

This workshop was held in the framework of the program for Strategic Partnership between the University of Tokyo and the University of California, Berkeley. We invited 4 postdoc researchers from Berkeley to enhance interactions between researchers in the two institutions and 3 students to help organizing the workshop. The workshop consisted of 3 days of talks, on 3/22 (Tue), 24 (Thu), and 25 (Fri), and a reception in the evening of 22 Tuesday. The subject of the workshop was about future of particle physics. Young researchers presented what they consider most interesting. Audience included students at the University of Tokyo, senior faculty members at the Kavli IPMU, Hongo campus, ICRR, KEK, and University of California, Berkeley.

From the Kavli IPMU side, Masaki Yamada, Kazuya Yonekura, Koji Ichikawa, Michihisa Takeuchi, Hajime Fukuda, and Kyohei Mukaida

presented talks. Yamada discussed the possibility of building cosmologically safe QCD axion models using monopole condensation. Yonekura presented strongly coupled field theories which may be interpreted as $U(1)$ gauge theories with massless magnetic monopoles and electrons. Ichikawa discussed the future dark matter halo survey of the dwarf spheroidal galaxies and effect of the foreground stars. Takeuchi talked about probing new physics in the top Yukawa sector. Fukuda presented a model which realizes a heavy visible axion, instead of usual light invisible axions. Mukaida discussed the fate of our electroweak vacuum during the preheating era after inflation.

From the Berkeley side, Daniele Bertolini, Yonit Hochberg, Thomas Melia, and Keisuke Harigaya gave talks. In addition, Eric Kuflik from Cornell presented his work. Bertolini discussed a method of doing precision

cosmology using effective field theory of large scale structures. Hochberg presented the idea of detecting light dark matter using superconducting detectors. Melia described a method of figuring out operator basis in effective field theories using conformal algebra. Harigaya presented a model in which dark matter of mass of order 10 MeV - 1 GeV is obtained from a light chiral sector. Kuflik discussed displaced vertices at the LHC, especially in the context of R-parity violated supersymmetry and neutral naturalness.

The topics covered by the workshop spanned a wide range of particle physics and cosmology. There were lots of interesting and lively discussions, helping attendees to have new visions on various problems. The workshop was highly successful, and we hope to have similar programs in the future.



News

Kavli IPMU Signs MOU with The Institute of Statistical Mathematics

The Institute of Statistical Mathematics (ISM) and the Kavli IPMU agreed to broaden research collaborations during an MOU signing on January 5, 2016. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama, Professor Naoki Yoshida, and ISM Director-General Tomoyuki Higuchi were present on the day. Both institutes have already been collaborating on a Japan Science and Technology Agency CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) project “Statistical Computational Cosmology with Big Astronomical Imaging Data” (Research Director: Naoki Yoshida), which started in October 2014. The new partnership will drive development of a new field of statistical computational cosmology.



Kavli IPMU Director Murayama and ISM Director-General Higuchi signing the MOU, with the presence of Professor Yoshida.

Kavli Foundation Science Program Team Visits Kavli IPMU

Kavli Foundation Executive Vice President and Science Program team

leader Miyoung Chun, and Science Program Directors Christopher Martin and Sharif Taha visited the Kavli IPMU on January 18, 2016. The guests first heard 30 minute presentations from Kavli IPMU Professor Masashi Hazumi, Professor Masahiro Takada, Professor Mark Vagins, and University of Tokyo's School of Science Associate Professor and Kavli IPMU Scientist Yuji Tachikawa. Following this, five minute presentations were given by Kavli IPMU Postdoctoral Fellows Teppei Okumura, Dulip Piyaratne, Ran Huo, Yuki Moritani, James Wallbridge, Itamar Yaakov, and Lluís Magro.

The guests enjoyed taking part in tea time before listening to Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama's talk about the latest developments at the institute, and ending with a dinner with researchers.



Masashi Hazumi presenting research activities.

Researchers Find Galaxy Cluster Environment Not Dictated by Its Mass Alone

An international group of researchers including Kavli IPMU Assistant Professor Surhud More, Professor Masahiro Takada, NASA Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology Researcher Hironao Miyatake (formerly a JSPS Fellow at the Kavli IPMU), and Princeton University Professor and Kavli IPMU Principal Investigator David Spergel divided almost 9000 galaxy clusters from the Sloan Digital Sky Survey DR8 galaxy catalog into two samples based on the spatial

distribution of galaxies inside each cluster (on an order of 1 million light years scale).

By using gravitational lensing they confirmed the two samples have similar masses, but that the distribution of clusters was different, and the difference is a result of the different dark matter environment in which they formed. Galaxy clusters in which member galaxies bunched up towards the center were less clumpy than clusters in which member galaxies were more spread out. They found the total amount of dark matter extending to an order of 100 million light year scale around the member of the former sample of galaxy clusters was about 1.5 times less than that around the member of the latter sample.

Their findings showed for the first time that the connection between a galaxy cluster and surrounding dark matter is not characterized solely by the mass of clusters, but also by their formation history. The results were published in *Physical Review Letters* on January 25, 2016 as an Editor's Suggestion.

Magnetar Could Have Boosted Explosion of Extremely Bright Supernova

A group of researchers led by Melina Bersten, Researcher at Instituto de Astrofísica de La Plata, Universidad Nacional de La Plata in Argentina and Kavli IPMU Visiting Associate Scientist, and including Kavli IPMU Principal Investigator Ken'ichi Nomoto, tested a model that suggests that the energy to power the luminosity of two recently discovered unusual super-luminous supernovae, SN 2011kl and ASASSN-15lh, is mainly due to the rotational energy lost by a newly born rapidly rotating and strongly

magnetized neutron star called a *magnetar*.

For more details, see page 26 of this issue of the Kavli IPMU News. The group's paper was published in *Astrophysical Journal Letters* on January 20, 2016.

Honors at the 2015 UTokyo President's Special Award for Operational Improvement

For their part in improving international researcher support, Kavli IPMU International Relations and Researcher Support Section members, Rieko Tamura and Hisami Kuboshima, were commended at the 2015 University of Tokyo President's Special Award for Operational Improvement on December 18, 2015, held at the Yasuda Auditorium on the university's Hongo campus. Tamura and Kuboshima were part of a strategy team led by Midori Ozawa, Specialist at the International Affairs Department's International Planning Group, and including two members from that Group. The team developed a website designed to help university staff and overseas researchers understand the paperwork needed when coming to Japan. The website uses many features used at the Kavli IPMU, and it is hoped these will spread across the university and improve globalization.

The team leader Midori Ozawa served as Head of the Kavli IPMU



University of Tokyo President Gonokami (front row center) and all the recipients of 2015 University of Tokyo President's Awards for Operational Improvement

International Relations and Researcher Support Section since its launch in October 2007 to March 2014.

Nobel Prize in Physics Commemorative Lectures for the UTokyo Students and Personnel

Around 600 students and university personnel crowded into the University of Tokyo's Yasuda Auditorium in the evening of January 18, 2016, to commemorate Institute for Cosmic Ray Research Director and Kavli IPMU Principal Investigator Takaaki Kajita on receiving the 2015 Nobel Prize in Physics. The event was broadcast live to a total of five places on the Hongo, Komaba, and Kashiwa campuses and the Kamioka Observatory. University of Tokyo President Makoto Gonokami started by announcing Professor Kajita would be the fifth person in the university's history to be given the title Special University Professor/Professor Emeritus. Following this was a talk by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama titled "Our Father, Neutrinos," and another by Professor Kajita titled "Discovery of Neutrino Mass." Professor Kajita made it a personal presentation, describing the moment he realized his analysis of Kamiokande's atmospheric neutrino data was indicating neutrino oscillations, to moving from Kamiokande to Super-Kamiokande, and finally discovering neutrino oscillations. To finish the night, Professor Kajita was given a bouquet of flowers, and a special message board representing Super-Kamiokande and filled with messages from fellow faculty members and students.

Kavli IPMU Opens "Takaaki Kajita Nobel Prize Commemorative Lecture Series"

As part of the University of Tokyo's

celebrations in commemorating Takaaki Kajita's Nobel Prize in Physics, the Kavli IPMU hosted a public event titled, "Where do we come from? – Beyond the Nobel Prize in Neutrinos" at the Yasuda Auditorium on March 27, 2016.

About 470 people came to hear about the latest developments in neutrino research from a theoretical and experimental perspective, with Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama talking about "Neutrinos as our father who protected us from a complete annihilation," and Professor Mark Vagins talking about "Supernovae as our mother who gave birth to the elements of nature." The audience was most excited when Professor Vagins explained how last year, permission was granted within the Super-Kamiokande collaboration to inject gadolinium into the Super-Kamiokande's pure water in order to begin a new project to detect supernova relic neutrinos. The event was a great success in introducing the future of research in the field.

The next lecture in this event series will be cohosted by the School of Science and the Institute for Cosmic Ray Research on April 24.



Mark Vagins giving a talk.

Kavli IPMU and ELSI Host Joint Public Lecture "Question of Origins"

For the first time, two WPI (World Premier International Research Center Initiative) centers studying "origins," the Kavli IPMU and Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science

Institute (ELSI), hosted a public event presenting the latest developments in research, and discussing the question about origins using philosophy. WPI Program Director Toshio Kuroki opened the event on January 10, 2016, where 300 people came to the Miraikan (The National Museum of Emerging Science and Innovation) in Odaiba, Tokyo to hear Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama's talk "The Origin of the Universe and the Birth of Stars," and ELSI Director Kei Hirose's talk "The Origin of Earth and the Birth of Life," and lastly University of Tokyo Center for Philosophy Director Shinji Kajitani's talk "Genealogy of Science and World Views – Historical Meaning behind Human Existence." Afterwards, the three speakers took part in a round table "What Does It Mean to Question Origins?" The event ended with conversations between the lecturers and the audience.



From left to right: Kei Hirose, Hitoshi Murayama, and Shinji Kajitani.

Kavli IPMU Hosts "East and West Views of the Universe"

The Kavli IPMU lecture hall reached full capacity on March 20, 2016, when the institute hosted the public lecture "East and West Views of the Universe." To begin with, University of California, Berkeley Professor and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist Yasunori Nomura gave a talk titled, "Multiverse Theory – The Universe as Explained by Theoretical Physics." Then, Chinese philosophy expert and Institute for Advanced Studies on

Asia, the University of Tokyo Professor Takahiro Nakajima gave a talk titled, "The Ins and Outs of Cosmologia – Imagination of China's Theory of the Universe." Following the talks, both speakers discussed the East and West views of the Universe, and how physicists and philosophers regard the cosmos. The day ended with tea time, where speakers and members of the audience crowded around one another with tea and coffee, asking more questions and discussing ideas.



Yasunori Nomura (left) and Takahiro Nakajima (right) discussing.

Taking Part in the AAAS Annual Meeting

This year's American Association for the Advancement of Science (AAAS) Annual Meeting (February 11 – 15) was held in Washington, D.C. MEXT, JSPS, and the nine WPI centers took part in it and jointly hosted the WPI booth for three days (February 12 – 14) to further promote the research being carried out at each WPI center to an international audience. For the first time, questionnaires were handed out at the WPI booth in order to see how much the American public was aware of the program. The results revealed that the Kavli IPMU was the most well-known among visitors. During three days, the WPI booth was visited by more than 320 people including researchers, journalists, students, and families.

Japanese Class Completion Ceremony

The Kavli IPMU has been offering Japanese classes to researchers and

their families. To date, a lot of people have completed their 40 hours of Introductory Japanese Course taught by Kavli IPMU's Japanese Language teacher Masami Nishikawa.

This time, four students celebrated finishing their Japanese classes on March 29, 2016, and received their certificates. They are Kavli IPMU Postdoctoral Fellows David Stark, Luo Feng, Han Chengcheng, and Kavli IPMU Academic Support Staff Joshua Speagle's fiancée Rebecca Bleich.



Photo of four Japanese class students having their certificates, with Japanese Language teacher Masami Nishikawa (back row, second from the right) and other attendants.

Kavli IPMU Seminars

1. "Supersymmetric Casimir Energy and the Anomaly Polynomial"
Speaker: Hee-Cheol Kim (Perimeter Inst)
Date: Dec 15, 2015
2. "Some Examples of Projective 4-Folds with Primitive Automorphisms of Positive Entropy"
Speaker: Keiji Oguiso (U Tokyo)
Date: Dec 21, 2015
3. "Affleck-Dine Sneutrino Inflation & SU(5) Grand Unification in Pure Gravity Mediation"
Speaker: Jason Evans (KIAS)
Date: Dec 24, 2015
4. "Exponential Networks and BPS State Counting"
Speaker: Richard Eager (U Heidelberg)
Date: Dec 29, 2015
5. "Phenomenology of vectorlike lepton extensions of the SM or two

- Higgs doublet model”
Speaker: Seodong Shin (Indiana U)
Date: Jan 06, 2016
6. “Four dimensional N=2 SCFT and singularity theory”
Speaker: Dan Xie (Harvard U)
Date: Jan 07, 2016
7. “The role of General Relativity and stellar tides in few-body interactions involving stars, neutron stars, white-dwarfs and black holes”
Speaker: Johan Samsing (Princeton U)
Date: Jan 07, 2016
8. “Homological projective duality for $Sym^2 P^n$ ”
Speaker: Jorgen Rennemo (ASC Oxford)
Date: Jan 12, 2016
9. “Hamiltonian approaches to strongly coupled quantum field theory”
Speaker: Slava Rychkov (CERN & U Paris 6)
Date: Jan 13, 2016
10. “Exact quantization conditions for relativistic integrable systems”
Speaker: Yasuyuki Hatsuda (U Geneva)
Date: Jan 14, 2016
11. “Type II-P supernovae as primary distance indicators in cosmology”
Speaker: Petr Baklanov (ITEP Moscow)
Date: Jan 14, 2016
12. “Dark Matter Searches with Neutrinos”
Speaker: Carsten Rotts (Sungkyunkwan U)
Date: Jan 19, 2016
13. “Wormholes, Emergent Gauge Fields, and the Weak Gravity Conjecture”
Speaker: Daniel Harlow (Center for the Fundamental Laws of Nature, Harvard U)
Date: Jan 19, 2016
14. “P-functors”
Speaker: Timothy Logvinenko (Cardiff U)
Date: Jan 19, 2016
15. “A Charged Membrane Paradigm at Large D”
Speaker: Mangesh Mandlik (TIFR)
Date: Jan 20, 2016
16. “Physics of extended Higgs sectors”
Speaker: Shinya Kanemura (Toyama U)
Date: Jan 20, 2016
17. “Stars on death row”
Speaker: Sam Jones (HITS)
Date: Jan 20, 2016
18. “Contraction algebra and invariants of singularities”
Speaker: Zheng Hua (U Hong Kong)
Date: Jan 21, 2016
19. “Modeling Dynamic Phases in Stellar Evolution using Multidimensional Hydrodynamics Simulations”
Speaker: Philipp Edelmann (HITS)
Date: Jan 21, 2016
20. “Physics of the early universe using the measurement of comics microwave background polarization and path forward in next 15 years using a satellite”
Speaker: Tomotake Matsumura (ISAS/JAXA)
Date: Jan 22, 2016
21. “Stroll along the Walls with Python - BPS spectra of supersymmetric theories”
Speaker: Chan Youn Park (Rutgers U)
Date: Jan 25, 2016
22. “Comparison of LIGO / Virgo upper limits with predicted compact binary merger rates”
Speaker: Chris Belczynski (Warsaw U)
Date: Jan 27, 2016
23. “Probing the Early Universe: Innovative Approaches in Millimeter Wavelength Cosmology”
Speaker: Abby Crites (Caltech)
Date: Jan 28, 2016
24. “Phenomenology of low-energy flavour models: rare processes and dark matter”
Speaker: Lorenzo Calibbi (Chinese Academy of Sciences)
Date: Feb 02, 2016
25. “A new spin on the stellar content of the Carina dSph galaxy”
Speaker: Giuseppe Bono (U Rome Tor Vergata / U Tokyo)
Date: Feb 03, 2016
26. “Towards the discovery of CP violation in neutrinos”
Speaker: Hiro Tanaka (U British Columbia)
Date: Feb 03, 2016
27. “Constrain Galaxy Formation Physics from Large-Scale Structure Measurements and Weak Lensing”
Speaker: Ying Zu (CMU)
Date: Feb 04, 2016
28. “The REsolved Spectroscopy Of a Local VolumE (RESOLVE) Survey and its Environmental COntext (ECO) Catalog”
Speaker: Sheila Kannappan (U North Carolina)
Date: Feb 04, 2016
29. “About the structure of the moduli space of Higgs pairs with nilpotent residues”
Speaker: Denis Degtyarev (HSE, National Research U)
Date: Feb 04, 2016
30. “Minimal Dark Matter, reloaded”
Speaker: Marco Cirelli (LPTHE)
Date: Feb 05, 2016
31. “A Holographic Study of Chern-Simons Defects”
Speaker: Charles Melby-Thompson (Fudan U)
Date: Feb 09, 2016
32. “6 vertex quantum integrable system and cohomology of Grassmanian”
Speaker: Vassili Gorbounov (U Aberdeen)
Date: Feb 10, 2016
33. “Surface defects as transfer matrices”

- Speaker: Junya Yagi (U Warsaw)
Date: Feb 16, 2016
34. "The $AdS_5 \times S^5$ String Field Theory vertex and integrability"
Speaker: Romuald Janik (Jagiellonian U)
Date: Feb 23, 2016
35. "Determinant line bundles, chiral fermions, and equivariant cohomology"
Speaker: Xiaoyi Cui (U Göttingen)
Date: Feb 25, 2016
36. "Counting open curves via closed curves"
Speaker: Tony Yue YU (Institut de Mathématiques de Jussieu - Paris Rive Gauche)
Date: Mar 01, 2016
37. "The Palomar Transient Factory and the Discovery of Incredibly Young Supernova"
Speaker: Peter Nugent (LBNL)
Date: Mar 02, 2016
38. "Study of double beta decay using $ZnMoO_4$ cryogenic scintillating bolometers and $^{116}CdWO_4$ crystal scintillators"
Speaker: Cherniak Dmytro (Inst for Nuclear Research, Kyiv)
Date: Mar 02, 2016
39. "Inflationary Magnetogenesis with Broken Local $U(1)$ Symmetry"
Speaker: Chunshan Lin (YITP)
Date: Mar 04, 2016
40. "Mysteries in the Bootstrap"
Speaker: David Poland (Yale U)
Date: Mar 08, 2016
41. "LHC 750 GeV diphoton excess and some interpretations"
Speaker: Jin Min Yang (ITP)
Date: Mar 09, 2016
42. "The wild youth of galaxy clusters"
Speaker: Emanuelle Daddi (CEA-Saclay)
Date: Mar 10, 2016
43. "Future multi-objects spectrographs at ESO"
Speaker: Vincenzo Maineri (ESO)
Date: Mar 11, 2016
44. "Exact results for 5D supersymmetric theories on toric manifolds"
Speaker: Maxim Zabzine (Uppsala U)
Date: Mar 15, 2016
45. "Perspectives for Particle Physics beyond the Standard Model"
Speaker: John Ellis (KCL)
Date: Mar 16, 2016
46. "Hydrogen deficient peculiar supernovae"
Speaker: Devendra Sahu (Indian Inst of Astrophysics, Bangalore)
Date: Mar 17, 2016
47. "(Lecture 1) Supersymmetry and its breaking"
Speaker: Nathan Seiberg (IAS)
Date: Mar 21, 2016
48. "(Lecture 2) Supersymmetry and its breaking"
Speaker: Nathan Seiberg (IAS)
Date: Mar 22, 2016
49. "Where are we heading?"
Speaker: Nathan Seiberg (IAS)
Date: Mar 23, 2016
50. "(Lecture 3) Anomalies, conformal manifolds, and spheres"
Speaker: Nathan Seiberg (IAS)
Date: Mar 24, 2016
51. "Large-scale magnetic fields can explain the baryon asymmetry of the universe"
Speaker: Tomohiro Fujita (Stanford U)
Date: Mar 24, 2016
52. "(Lecture 4) On gapped boundary phases of topological phases"
Speaker: Nathan Seiberg (IAS)
Date: Mar 25, 2016
53. "Universal vertex algebras and free field realisations"
Speaker: Simon Wood (ANU)
Date: Mar 29, 2016
54. "Reheating and Primordial Gravitational Waves in Generalized Galilean Genesis"
Speaker: Sakine Nishi (Rikkyo U)
Date: Mar 30, 2016

Personnel Changes

Reappointment

Former Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Wiphu Rujopakarn was reappointed on March 1, 2016

Moving out

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

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Shamik Banerjee [April 16, 2014 – February 29, 2016] moved to the Institute of Physics, Bhubaneswar in India as a Reader-Faculty.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Kaori Hattori [July 1, 2015 – March 31, 2016] moved to the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology as a Researcher.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Tadashi Ishibe [April 1, 2015 – March 31, 2016] moved to the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo as a Postdoctoral Researcher.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yu Nakayama [September 1, 2015 – March 31, 2016] moved to Rikkyo University as an Associate Professor.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Shun Saito [April 1, 2013 – March 31, 2016] moved to the Max Planck Institute for Astrophysics as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yasuhiro Takemoto [April 1, 2014 – March 31, 2016] moved to the Research Center for Nuclear Physics, Osaka University as an Assistant Professor.

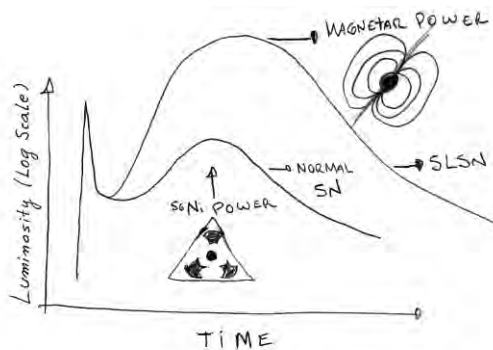
Also, Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Amir Aazami resigned the Kavli IPMU at the expiration of his term, from January 16, 2013 to January 15, 2016.

Super-Luminous Supernovae (SLSNe)

Melina Bersten

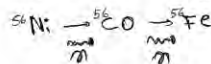
Researcher, Instituto de Astrofísica de La Plata, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, Argentina, and Kavli IPMU Visiting Scientist

Super-luminous supernovae (SLSNe) are stellar explosions that overshadow normal supernovae by 10 to 100 times. They are so rare that they were discovered only one decade ago. Their high luminosity makes them potentially useful to study the early universe and to measure distances to much further distance than normal events. However, their physical origin remains elusive. Radioactivity, the main power source among normal supernovae, cannot explain the large luminosities of most SLSNe. Some alternative mechanisms have been proposed that explain the extra energy required to produce a SLSN. The most plausible ones involve a strong shock between the supernova ejecta and dense surrounding material, or a newly born rapidly rotating and strongly magnetized neutron star called *magnetar*. We have recently analyzed two unusual SLSNe, SN 2011kl and ASASSN-15lh, and found that they can be understood in the context of magnetar-powered SNe.



NORMAL SNe

$$L \sim 10^{42-43} \text{ erg/s}$$



SLSNe = $L \sim 10^{44} \text{ erg/s}$

- ⇒ MAGNETARS WITH
- MAGNETIC FIELD $B \sim 10^{14} \text{ G}$ AND
- ROTATIONAL PERIOD $\sim 2-20 \text{ ms}$

BUT \exists EROT MAX $\sim 10^{52} \text{ erg}$

$$\Rightarrow P_{\text{min}} \sim 1 \text{ ms}$$

近況

Kavli IPMU 機構長
村山 斉 むらやま・ひとし



1月18日：カブリ財団研究担当チームによる研究進捗状況および研究環境視察（本誌45ページ）。
 (写真左)左よりクリストファー・マーチンさん、ミヨン・チュンさん、村山機構長、シャリフ・タハさん。(写真右)最新のKavli IPMU 研究概要の説明を行う。



3月10日：(写真左)Kavli IPMUを来訪したスイス連邦工科大学前学長ラルフ・アイヒラーさんと。(写真右)Kavli IPMUの概要説明を行う。



3月27日：梶田教授ノーベル賞受賞記念連続講演会第1回「私たちはどこから来たのか？ -ニュートリノのノーベル賞の先」（本誌46ページ）。
 (写真左)講演する村山機構長。(写真右)会場となった安田講堂前にて、もう一人の講演者、マーク・ベイギンズさんと。

時空の次元：或る理論物理学者の思考

理論物理学者であることの魅力

読者の皆さんは、物理学者と聞いてどのような人を思い浮かべるでしょうか？ やはり白衣を着て実験室にこもって、なにやら怪しげな装置をいじっている人でしょうか？ 映画「バック・トゥ・ザ・フューチャー」での博士（ドク）は、そのようなイメージの典型かもしれません。

私は物理学者の端くれですが、実はそのような物理学者ではありません。白衣はもう10年近くも着ていませんし、試薬を使うこともありません。毎日たくさんの時間をパソコンで仕事をしたり、人と話したりして過ごしていて、普通の意味での装置を作って実験することはありません。そう、私は「理論物理学者」なのです。

理論物理学者の仕事は、その名前が示すように「物理理論」を作ることです。物理理論とは、大まかに言って、この世界の様々な自然現象の本質を統一的に記述する理論的な枠組みのことです。

私のような理論物理学者は自分で実験することができないので、自分で理論を作ったとしてもそれを自分で最終的に検証することはできません。この意味で、物理学の研究においては実験と理論とが助け合って進んでいくものです。

理論家が実験屋に頼らなければならないというのはしばしば正しいですが、一方で理論家には、理論家ならではの強みもあります。実際に実験装置をつかっ

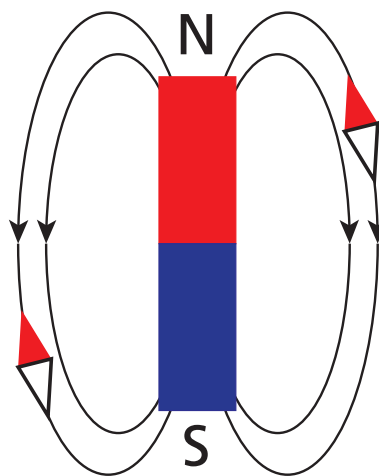


図1 磁石があると、その周りに電磁場が作り出され、その効果によって周りの物質に影響を及ぼす。例えば、方位磁針の向きが変わる。

て現象を構成しなくとも、頭の中でそのような状況を自由自在に考え、考えを深めていくことができます。紙とペン（と時には計算機）さえあれば、コーヒーションの片隅でも、宇宙の始まりから微細な素粒子の振る舞いに至るまで、心の赴くままに思考できること、この自由さは、理論物理学者であることの魅力の一つではないかと思います。

このような自由な思考の例として、私がどのような理論を考えているのか、そしてそれを使ってどう楽しむことができるのかを説明してみましょう。

まずは簡単な例から始めましょう。みなさんは、磁石の周りに鉄くずを置くと、鉄くずが綺麗な模様を示すということを学校で学んだのではないのでしょうか。物理学の言葉では、まず磁石を置くと、その周りの空間の各点に向きを持った「磁場」がつくられます(図

1)。そして、そこに鉄くずを置くと、その磁場の効果によって鉄くずが模様を示すと理解します。もちろん、磁石を動かすと、それに伴って磁場も変化し、鉄くずも移動する。これはちょっともったいぶって言い換えると、磁場と鉄くず、この二つの異なる物理系が独立ではなく、「相互作用している」ことになります。

それでは、鉄くずの代わりに別の金属、あるいは別の物質を使ったらどうでしょうか？ 物質の種類によっては、磁石にとっても強く引き付けられるものもあれば、逆に全く引き付けられないものもあります。これは、先ほどの言い方で言えば、相互作用の強さが物質によって異なることになります。

実際の物質では、磁石との相互作用の強さを変えることは容易ではありませんが、理論家は相互作用の強さを自由自在に変えることができる仮想的な物質を考えることができます。相互作用の強さがゼロの時は磁場と物質の二つの系は全く独立の物理系ですが、相互作用を強くしていくに従って二つの系はより強い影響を及ぼしあうことになります。

理論家は一般化して考える

理論家（の一部？）は一般化して考えるのが好きなので、この状況をもっと一般的にしてみましょう。まず、磁場に複数種類が存在するとしましょう。また、物質場にも複数種類が存在するとしましょう。これは、電磁気学がちょっと一般化されたような状況です。

ここでは、簡単のため異なる種類の電磁場の間には直接の相互作用はないものとしましょう。ただし、これは直接の相互作用がないというだけで、物質を通じて相互作用することは起こるかもしれません。つまり、一つの種類の電磁場がその周りの物質場に変化を引き起こし、この変化が今後は別の電磁場の変化を引き起こすのです。このように一般化された状況では、全ての電磁場と物質場は複雑に相互作用し、その振る舞いを正確に理解することはより難しい問題になります。

このように、電磁場と物質場が複雑に相互作用する

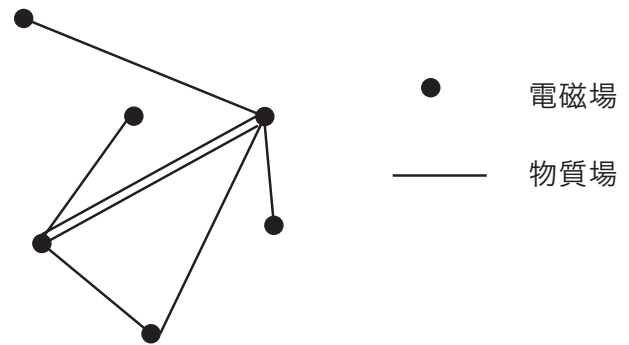


図2 電磁場及びそれと相互作用する物質の種類を表したグラフ（筋グラフと呼ばれる）。頂点は電磁場の種類を、辺はその電磁場の下で変換する物質場を表す。

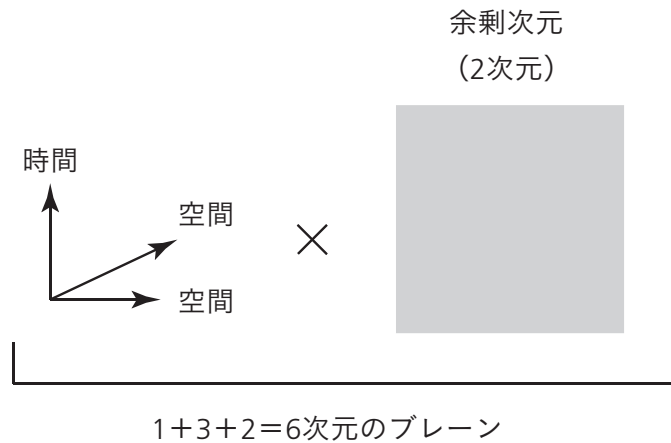
理論の構造を表したものとして筋（えびら）ダイアグラムと呼ばれるグラフ¹があります（図2）。このグラフにおいては、頂点は電磁場を表しており、その間をつなぐ線は、その二つの頂点に対応する電磁場と相互作用する物質場を表しています（ですから、電磁場に沢山種類があっても、物質場はそのうち2種類としか相互作用しないことになります）。このように、グラフさえ与えられれば、理論家に対応する物理系（筋ゲージ理論）を考えることができます。グラフは小さな子供でも書けます。しかし、僕のような理論家はそこから複雑な物理系を想像でき、その性質について思いを巡らすことができるのです。

ここまで、グラフを複雑な理論を覚えておくための道具として導入してきました。しかし、物理学では、しばしば様々な数学的道具の「物理的意味」が問題になります。グラフは単なる道具なのでしょうか、それとも単に道具を超えて、グラフにもっと物理的な実体としての意味をつけることはできないのでしょうか？

ちょっと考えると、それは無理な相談のように思えます。何と言っても、グラフが住んでいるのは、我々の知っている時間や空間とは全く別の空間、あの世の世界のようなものだからです。我々が線を書くと、それはあくまで物質の種類を覚えておくためのもので、我々の知覚する3次元空間を何かの粒子が線に沿って動いているわけではありません。

¹ より正確には、向き付きのグラフを考えるが、ここではそれは問題にしない。

図3 我々の時間1次元、空間3次元の他に、余剰次元2次元が存在し、図2のグラフはその余剰次元方向に存在する
と考える。この時、合計の時空の次元は $1+3+2=6$ となり、それは6次元のブレーンと呼ばれる超弦理論の膜上に実現される。



しかし、「あの世」が実際にあったとしたらどうでしょう？「あの世」でのグラフが、我々の世界の物理理論を記述しているとしたらどうでしょう？

超弦理論と余剰次元

面白いことに、私の研究している超弦理論という分野においては、この抽象的な「あの世の」方向を、「余剰次元」として理解することができます。余剰次元というのは、我々が考えているような空間三つ、時間一つの他に、小さいけれども見えない「丸め込まれた」空間方向が存在するという考えです。超弦理論においては、我々の世界での様々な性質（例えば、物質の種類）が、この余剰次元での様相に置き換えて理解できるのです。

いま、膜ダイアグラム（グラフ）は2次元平面に書くのが自然なので、そのような余剰次元は（少なくとも）二つ存在することになります。つまり、次元の数は全部で $3+1+2=6$ あることになり、6次元の世界を考えることになります（図3）。

超弦理論では、6次元的に広がった膜（ブレーン）が自然に存在します。² この6次元のブレーンを2次元の余剰次元方向に巻きつけてやり、その大きさがとても小さいとすると、4次元分が残ることになります。この残りの4次元部分は我々の4次元時空（時間1次元、

空間3次元）にあたります。そして、2次元の膜ダイアグラムは2次元理論の空間にあらわれます。このように考えてみると、グラフの構造は、2次元分の余剰次元の方向に、ブレーンがどう広がっているかを表していることとなります（図4）。³ 実は、このことは、実際に、ブレーンの形を詳細に調べてやると、基本的には正しいことがわかります。筆者が修士論文で詳しく調べたのはまさにこのことでした。⁴

6次元などと突飛なことについてコーヒーショップの片隅で考えられるのは理論物理学者の楽しみの一つですが、どうせならもっと突拍子もないことを考えてみましょう。仮に我々の3つの空間方向のうち、一つの大きさをだんだん小さくしていき、ついにはとても小さくなったとしましょう。この時、我々は最終的に空間2次元（例えば、紙の上）に閉じ込められてしまうこととなります。

空間が2次元しかない歩道橋も飛行機もなくなって色々不便ですが、ここではそのことを忘れて、先ほどのグラフに何が起こるか考えてみましょう。グラフの方向は元々2次元で、これは余剰次元が二つあったからでした。空間が3次元から2次元になった時、

² 専門的には、これらはD5ブレーンやNS5ブレーンと呼ばれています。ここで5というのは空間次元の数のことです。

³ より正確には、二つの余剰次元の方向には2種類のブレーンが存在し、グラフはそれらがどう交わるかを表現しています。

⁴ M. Yamazaki, Fortsch. Phys. 56 (2008) 555-686, arXiv:0803.4474 [hep-th].

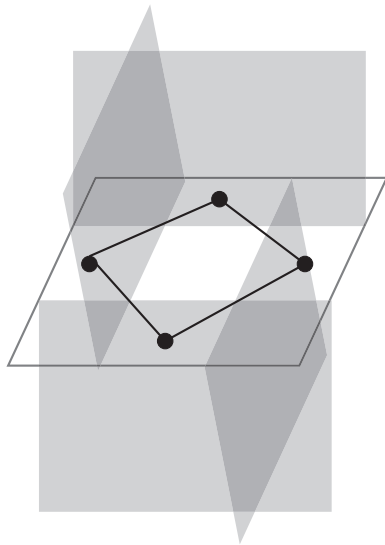


図4 超弦理論における6次元のブレン（この図では水平方向の白い平面）が、種類の異なるブレン（垂直方向の灰色の平面）と複雑に交差する。2次元余剰次元方向に描かれていたグラフは、このブレンの交差の仕方を表したものである。

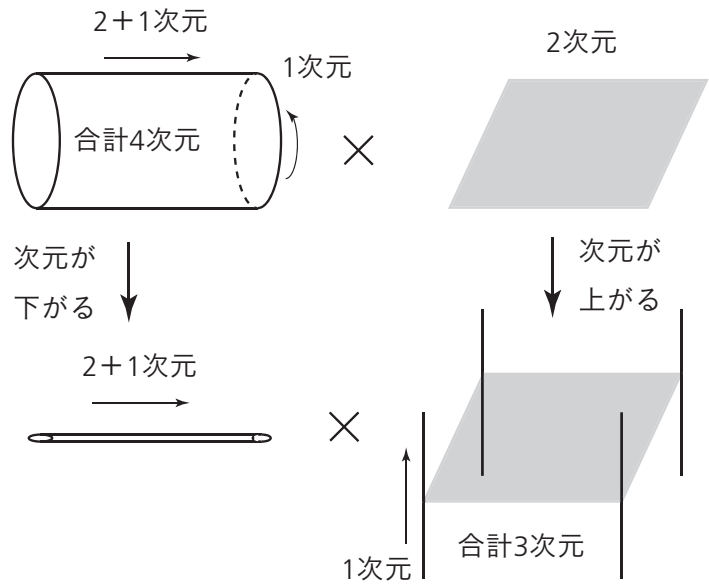


図5 元の設定（上側）では、合計4次元の我々の良く知っている時空と、余剰次元2次元分で合計6次元になっていた。今、我々の3つの空間方向の一つを丸めあげ、とても小さくすると、我々の知っている時空は時間1次元、空間2次元の合計3次元に減ってしまう。しかし、そのかわり、余剰次元の次元は一つ増え、合計3つの余剰次元が現れる（下側）。この時、合計の次元は6のまま変化しないことに注意しよう。図の左側では次元は減るが、対応する余剰次元の側（右側）では次元が上がるという興味深い現象が起こっている。

余剰次元が一つ増えたので、余剰次元は3つになります。つまり、2次元のグラフが3次元のグラフに置き換わるのです（図5）。この主張は、より数学的に精密な主張として定式化することができます。⁵

自由な発想は理論物理学者の喜びであり、誇りである

改めて考えてみると、これはものすごいことです：6次元理論の片側（我々の世界）では、4次元時空から3次元時空へと、次元が下がって窮屈になりました。ところが、逆側（余剰次元の世界）では、空間2次元から空間3次元へと次元が上がって、散歩に行ける方向が増えたことになります。超弦理論の世界では、次元という根本的な概念についても色々と思議なことが起こるのです。

我々は素朴な電磁気学から出発してグラフと余剰次元にたどり着き、さらには我々の世界とあの世の次元をめぐるドラマにまでたどり着きました。これらは、理論研究者達が自分の頭で思考し、また別の研究者と議論する中で生まれてきた成果です。この自然界を理解することは容易ではありませんが、幾多の挫折にも関わらず、理論家が考えるのをやめることはありません。自由な発想を通じて、自然界を理解しようとする人類の営みにささやかながらも貢献できること、そのことが理論物理学を研究する我々の喜びであり、誇りなのです。

⁵ M. Yamazaki, JHEP 1205 (2012) 147, arXiv:1203.5784; Y. Terashima and M. Yamazaki, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 091602, arXiv:1203.5792.

クリストフ・ゴルスキー

Krzysztof Gorski 専門分野: 宇宙論、天体物理学

Kavli IPMU教授



私は、カリフォルニア州パサデナのカリフォルニア工科大学・ジェット推進研究所で、2003年以来上級科学的研究員としてESA（欧州宇宙機関）とNASA（アメリカ航空宇宙局）のプランクミッション共同研究に携わっていますが、現在サバティカル休暇を取って特任教授としてKavli IPMUに滞在しています。研究歴の大部分は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）を中心としたものです。私は、ポーランドで教育を受けた後、バークレーに来てJoseph Silk、Marc Davisと宇宙論および宇宙の大規模構造を研究しました。その後、COBEチーム及びNASA・ゴダード宇宙飛行センターに所属して、CMB非等方性の先駆的測定の評価に従事しました。

それ以来、私はCMBに応用するための解析法および科学的結果の抽出法の開発を続けてきました。中でも、球面上に分布したデータの離散化と解析を効率的に行う方法であるHEALPix (<http://healpix.sourceforge.net>) は独自に創ったもので、広く利用されるようになりました。

私はプランクが取得した素晴らしいデータセットによって生み出された、多岐にわたる科学プロジェクトに参加しましたが、それらは（1）前景放射の温度

と偏光の研究、及び前景放射分離、（2）CMBの原始揺らぎの統計の評価、（3）宇宙の等方性、それに（4）CMBの非等方スペクトルの評価とそのパラメータ化などで、現代宇宙論の頂点を為したものです。

今、プランクプロジェクトの完了を控えて、私たちはCMB観測を更に推し進める新たな途に期待をかけています。このようなエキサイティングな宇宙実験の一つがJAXA（宇宙航空研究開発機構）に対して提案されているLiteBIRD衛星のミッションです。これは、十分な高精度のCMB偏光測定を実現し、我々の宇宙が加速度的膨張（インフレーション）によって始まった痕跡として観測が待ち望まれている背景原始重力波を明らかにしようというものです。

私の今回のKavli IPMU滞在は、LiteBIRDの日本チームと交流し、プランク衛星による私たちのCMBの宇宙探査の経験を共有し、将来の共同研究に向けての展望を開くことを目的としています。

真喜屋 龍 まきや りゅう 専門分野:天文学

特任研究員

私はこれまで、観測的宇宙論及び銀河形成の分野で研究を行ってきました。現象論的な銀河形成モデルを構築し、それを観測データと比較することで、宇宙論的銀河形成史に対する何らかの理解を得ることを目指しています。

最近では宇宙の加速膨張にも興味を持っています。Kavli IPMU では、すばるPFSで得られるであろう三次



元銀河マップなど、様々な観測データを活用しながらこの宇宙最大の謎に挑みたいと考えています。

桜井 雄基 さくらい ゆうき 専門分野:実験物理学

特任研究員

私は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光観測衛星LiteBIRD計画に参加し、研究を行っています。LiteBIRDはCMB偏光の精密全天観測を行うことで、初期宇宙において生成された原始重力波を探索し、代表的インフレーションモデルを検証する科学衛星です。現在、LiteBIRD計画は2020年代の打ち上げを目指し、実現性の検証、及び検出器の開発段階であり、私は特にCMBを焦点面検出器に導く光学系システムの開発を



行っています。自分のバックグラウンドである素粒子物理学の知見を活かし、初期宇宙の超高エネルギー物理の観測に挑戦しています。

Tea Break:

数学者についての数学者好みのジョーク

二人の物理学者が熱気球に乗っているうちに、どこを飛んでいるのか分からなくなった。彼らは地上に一人の男を見つけて「ここはどこだ?」と叫んだ。地上の男は何分間もかけて考えた末、「君たちのいる場所は気球の中だ!」と大声で返事した。気球の中の物理学者は、思いもよらない答に唾然とした。一人の物理学者が言った。「ついてないなあ、どうも我々は数学者に出くわしたようだ。」もう一人の物理学者が質問した。「なぜ彼が数学者だと分かったんだ?」「まず第1に、彼は答を出すまで長いこと考えた。第2に、彼の答は完全に正しい。そして第3に、その答は全く役に立たない!!」
(アレクサンダー A. ポロノフ)



© Tom Haruyama

Our Team

Interview

シン・トゥン・ヤウ教授 に聞く

聞き手・細野 忍

UCバークレー校の大学院入学
直後に20歳で定理を見出す

細野 言うまでもありませんが、先生は世界でトップレベルの数学者の一人で、今日は先生にインタビューする機会が得

られたことを大変うれしく思います。お時間をお取りいただき、ありがとうございます。

ヤウ どういたしまして。

細野 超弦理論のカラビ・ヤウ多様体のことを考えると、私は先生は宇宙での最重要人物の一人とも言えると思います。

では、まずこの特別な多様体に興味を持たれたのはなぜかということからお聞きしたいと思います。ここに先生の著書の *The Shape of Inner Space** を持参しましたが、そこに先生は香港中文大学の2年生の時にアメリカに行くことを決心したと書かれています。その時既に微分幾何学あるいは物理学に興味をもたれていたのでしょうか？

ヤウ 香港でのその年、私は関数解析と呼ばれる科目の方にもっとずっと興味があり、その勉強に多くの時間を費やしました。幾何学もそれ程ではありま

せんが多少は勉強していました。主に3次元の曲面と曲線を調べる古典的幾何学でした。私は多様体が何を意味するのか何も知らず、従って現代的な幾何学の知識は持ち合わせていませんでしたが、後に徐々に身につけました。

細野 物理学についてはいかがでしたか？

ヤウ 香港中文大学では、まずまずと言える程度の物理学のトレーニングを受けましたが、高校で受けた物理学のトレーニングは相当不満足なもので、それは今思うととても残念です。高校の時に習得しておくべきであったと思われる物理的な直感を、十分身につけることができませんでした。香港中文大学では物理の成績は結構良かったのですが、それにもかかわらず、私はいつも自分には物理のトレーニングが不足していると感じています。

細野 そして、1969年に20歳でカリフォルニア大学 (UC) バークレー校に行かれて大学院に入学されたのですか？

ヤウ その通りです。

細野 忍さんは学習院大学数学科教授で、Kavli IPMUの客員上級科学的研究員を兼ねています。1992年～1993年にシン・トゥン・ヤウさんの下で博士研究員を務めました。

* *The Shape of Inner Space—String Theory and the Geometry of the Universe's Hidden Dimensions*, Shing-Tung Yau and Steve Nadis, Basic Books, New York, 2010 : 邦訳は「見えざる宇宙のかたち—ひも理論に秘められた次元の幾何学」、シン・トゥン・ヤウ、スティーヴ・ネイディス著、水谷淳訳、岩波書店、2012



細野 先生は大学院に入学後すぐに定理を発見されました。驚くべきことだと思います。それについて少しお話しただけませんかでしょうか。

ヤウ パークレーに行って、私は現代数学の色々な分野で知らないものが多いと思いました。それで、数多くの講義を取り、幾何学に関心をもち始めました。パークレーの先生達からは非常に多くのことを学びましたが、最初の学期で多様体について勉強しました。リーマン幾何学でしたが、ほんの初歩的なもので十分とは言えませんでした。

その後、クリスマスの期間でしたが、私はアメリカではこの時期学生も教授も皆帰省するということに気がつきませんでした。それで、私は基本的に一人で取り残されてほとんどの時間をパークレーの図書室で過ごしました。当時はオフィスをもってはいなかったのです。私は本と雑誌を全部ざっと見通して、とても読み易い *Journal of Differential Geometry* という雑誌を見つけました。その第2巻に、偉大な数学者のジョン・ミルナーが書いた数篇の面白い論文があって、それを読んでとても興味深いと思いました。その論文は、曲率が多様体の基本群にどのような影響を及ぼすかについて書かれたものでした。私は多様体の基本群とは何を意味

するのか代数的トポロジーの講義で学びましたが、曲率が何を意味するかは幾何学の講義でほとんど学んでいませんでした。しかし、これら2つを結びつけることができると知り、そのことをとても面白いと思ったのです。

そこで、私はミルナーの論文を勉強しました。それはとても良く書かれた論文で、全部理解することができました。ミルナーは参考文献としてアレクサンドル・プリスマンという人の書いた古い論文を挙げていたので、それも読んで理解しようと思いました。更に、単に理解するだけではなく、幾つかの議論をより一般的な場合に拡張を試みることにしました。私はそれを続け、自分でも驚いたのですが1週間ほどでかなり面白いことを導くことができました（後に「平坦トラス定理」と呼ばれ

シン-トゥン・ヤウさんはハーバード大学数学科の教授で、中国の清華大学 [Yau Mathematical Sciences Center](#) (丘成桐数学科学中心) 所長、台湾の国立交通大学 [Shing-Tung Yau Center](#) (丘成桐中心) 所長を兼ねています。1971年にカリフォルニア大学パークレー校から数学の博士号を取得し、その後ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校准教授、スタンフォード大学教授、プリンストン高等研究所教授、カリフォルニア大学サンディエゴ校教授を経て1987年より現職。1982年にフィールズ賞を受賞した他、1994年にクラフォード賞、1997年に米国国家科学賞、2010年にヴォルフ賞受賞などの輝かしい受賞歴があります。

るようになりました)。私は香港中文大学で偶々群論についてある程度勉強していたのですが、結果を導くには群論に基づいて多様体の基本群を調べたのです。私は図書室を探しまくって、全ての参考文献を自分で調べたのです。他の人たちから離れて一人で生活し、自分の時間全てを使って研究し、それは非常に興味深いとても楽しいものでした。

細野 アメリカに行かれてたった半年後ですね？

ヤウ そうです。

細野 それは本当に驚くべきことだと思います。

ヤウ いや、それ程のことではありませんが、わくわくして面白かったです。

カラビ予想との出会い：長い間本当とは信じられなかった

細野 その後、カラビ予想に出会ったのですね。

ヤウ その通りです。最初の年、私は今言ったことを含め、多くの時間を費やしてリーマン幾何学を研究しましたが、複素多様体も研究し、幾つかセミナーも聞きに行きました。それからシンシェン・チャン (S.S. チャー) に指導教員になってもらおうと決めたのです。彼は最初の年はサバティカルで不在でしたので、彼が戻ってから私は「あなたの学生にして下さい。」と頼みました。彼は承知してくれ

て、私はほとんどの時間を複素多様体の研究に費やし始めました。

それから、また私は図書室で過ごして、エウジェニオ・カラビの書いた論文を何篇か調べました。彼がカラビ予想と言っていたものは、私には魅力的でした。というのは、私は一般相対論の講義を取っていて、幾何学をリッチ・テンソルで記述するアインシュタインの場の方程式を調べていたからです。私が面白かったのは、リッチ・テンソルは曲率の一部しか表していないのに、物理学では物質を意味していることです。それで、「もし物質が存在しないとして、重力は存在するのだろうか」と問いました。その意味は、リッチ曲率が消えるときにまだ非自明な重力が存在するかということです。この問題は純粋にリーマン幾何学の範疇で答えるには非常に難しいことでした。そこで私はカラビのこの論文を調べたのです。彼は、ケーラー幾何学と呼ばれる特別な種類の多様体の範疇でこの問題に答えることを試みるように提起し、その方法さえも与えていたのです。私はその論文に興味をそそられました。私はリッチ曲率についてより良く理解するために役立つであろうと感じ、カラビの論文に魅了されたのです。

私はとても興奮しました。なぜなら、最初リーマン幾何学を

研究したのですが、リッチ曲率をどうやって調べるか、あるいはどう扱えば良いのか分からなかったからです。しかし、それを理解する方法をこの論文が与えてくれたのです。その後、私はこの問題を理解したいと思いましたが、当時、このような多様体の例は、ほとんど、というより実質的には全く存在しませんでした。そこにカラビが代数幾何学を用いて膨大な数のこのような多様体を見出すことができると提案したのです。ところが、話がうますぎるとして誰もそれが本当とは信じなかったのです。恐らく、私自身もそれが本当だろうとは思っていませんでした。私がかどうか調べようとして、長い間悪戦苦闘しました。

細野 最初は先生もそれが本当と信じていらっしやなかったのですか？

ヤウ 随分長い間、本当とは信じていませんでした。私の友人達の多くは非常に優れた幾何学者ですが、誰も皆それが正しいとは信じていませんでした。

細野 誰も信じなかったのですか？

ヤウ その通りです。

細野 それが最初の年ですね。

ヤウ 私がこの問題について知った、最初の年でした。私はその一方で、これは非常に本質的で重要な問題なので、何とかして解かなければならないと思

ました。もしそれが真でなければ、反例を見つけなければならぬ。もし正しければ、素晴らしいことだ。私はその時点で、もし真であると証明されたならそれは最も偉大な定理となるであろうと本当に思っていました。一方でそれが真であろうとは信じていませんでした。

細野 先生は最終的には結論に到達され、証明を完成なさいました。

ヤウ いや、それには長いことかかりました。

細野 非常に難しい問題だったということですね。

カラビ予想を理解するための基礎的な概念、幾何解析を開拓

ヤウ そうです。実際、後でカラビが私に話してくれたのですが、彼がこの問題を解こうと試みていた時、20世紀の偉大な数学者の一人であるアンドレ・ヴェイユが、この問題を理解し、あるいは解くための主要なツールがまだ存在していないと彼に言ったそうです。ツールが存在していないため、この問題を解くには、時期尚早だったので。実際、私がこの問題を肯定的に解決しようと試みていた時(初めは本当に一生懸命反例を与えようとしていたのですが、しかし、多分それは正しいだろうと考えを変えた時)は、問題を解くための基本的なツールを作り上げることが必要となりま

した。今日では誰もがほとんど自明だとみなしますが、当時は多様体上で微分方程式を解くことさえしていなくて、単に領域で方程式を解くだけでした。しかし、私はその問題を解くために全ての基本的なツールの開発を多様体上で行いました。それにはかなりの時間を要しましたが、私にはシャオユエン・チェン (S.Y. チェン)、それからリチャード・シェーン、レオン・サイモンのような良い友人がいて、一緒に研究しました。彼らは、皆本当に良い友人でした。私たちは、多様体上の解析が意味することを理解し始め、現在幾何解析と呼ばれている分野を開拓したのでした。これはカラビ予想を理解するために必要な基本的な概念でした。

細野 なるほど。その問題に何年かかりましたか？

ヤウ 解くためにですか？

細野 そうです。最初は否定しようと考えられました。

ヤウ 1970年から1973年にかけて、1973年の9月から11月頃まで私はそれが間違っていると考え、反例を与えようとしたのですが、11月頃からそれは正しさに違いないと考え始めました。それまで私はずっと反例を与えようと悪戦苦闘してきましたが、1973年にスタンフォード大学で行われた大きな国際会議で反例ができたことと公表し、それが間違いだと分かったので

す。私は最悪の気分でした。重要な公表をしたつもりが間違っているということになったのですから。2週間というものは基本的に昼も夜も反例を挙げようとする以外何もせずに過ごしました。反例を考える度に非常に微妙なところでうまくいきませんでした。それで、神の仕業でなければそんなに微妙ではあり得ない、従ってそれは正しいに違いないと思ったのです。私は完全に考えを変え、その問題を解こうとするために必要なものを全て準備しました。そして、1973年の秋から3年後の1976年に問題を解決しました。ですから、準備し、推論を積み重ねた3年間でした。

細野 なるほど、必要なものを全て準備されたのですね。

ヤウ 研究しつつ、ツールを準備したのです。

細野 なるほど。とても興味深いお話です。1982年にその定理でフィールズ賞を授与されました。同時に受賞したのはアラン・コンヌとウィリアム・サーストンでしたね。

ヤウ その通りです。

細野 私たちにとって非常に興味深いのは、そのすぐ後に物理学で歴史的な大事件である超弦理論のブレイクスルーが起きたことでした。一体、どんな状況だったのでしょうか。つまり、その頃の数学者と物理学者のコミュニケーションはどんな様子だった

のでしょうか。

1984年にカラビ・ヤウ多様体と超弦理論が会った

ヤウ 実は、1973年が始まりでしたが、スタンフォード大学で開催された大きな国際会議で、私は一般相対論について講演した数人の物理学者に会いました。彼らは重力についてのあの問題を提起しました。正質量予想と呼ばれるものです。それはアインシュタインから始まる古い問題で、アインシュタイン方程式が安定であることを証明することです。その意味するところは、アインシュタインが設定した仮定の下で時空の全エネルギーが正であるということです。もし全エネルギーが負だったとすると、その系は不安定で、宇宙全体が消え去ってしまうでしょう。問題は、そうはならないと確証を与えるという基本的なものでした。また、それ自体が幾何学の美しい問題でした。私は1977年から1978年頃までその問題に取り組み、以前私の学生だったシェーンと一緒にそれを解きました。彼のことはパークレー時代から知っています。そういう訳で、私は一般相対論の研究者と密接な関係を保っていました。カラビ予想に取り組んだ後のことです。実際、1979年にプリンストン高等研究所に行きましたが、そこには有名な物理学者のマルコ

ム・ペリーや、他にも一般相対論に興味をもつ研究者が大勢いました。1年後に私はプリンストン高等研究所の教授になり、ポストドクを採用しました。私の最初のポストドクはゲイリー・ホロヴィッツでした。私は彼を一般相対論のポストドクとして招いたのです。同じ年、私はアンドリュー・ストロミンガーにも会いました。1年後、エド・ウィッテンがやってきて、正質量予想の別の証明法を示してくれました。そういった人たちが皆そこに集まっていたのです。私は、現在カラビ・ヤウ多様体と呼ばれる多様体を構成したことを話し、「私にとって、これは物理学に触発されたものです。真空にも重力が存在するのですよ。これは物理学にとっても役に立つに違いない。」と伝えたのでした。しかし、それは当時の物理学では十分成熟していない事柄でした。それで、誰もそれが本当とは信じなかったのです。面白いことです。

1984年に私はまだプリンストン高等研究所に所属していましたが、当時UCサンディエゴに勤務していた妻を訪ねていました。サンディエゴは美しい街です。私は美しい青い海を見下ろす彼女のオフィスにいましたが、そこにホロヴィッツとストロミンガーとウィッテンから電話がかかってきました。「興奮しています。超弦理論と呼ばれる



量子重力の新しい分野を切り拓いているところです。素晴らしい理論ですが、モデルの真空を構成しているところで、真空解について一つ知りたいのです。それはどんな多様体なのかです。6次元の多様体で必要な条件を満たすもので、余り自信はないのですが、どうもそれらしきものをあなたから聞いたような気がします。」彼らは、私にどのようにすれば良いのか知っているかと尋ねました。私は「それは正に私が以前話したものですよ。正に私にできることです。」と答えました。それで彼らは非常に喜びました。実は、エド・ウィッテンはもっと詳しいことを知りたくて、1日中私と話すためにプリンストンから飛行機でやってきました。私たちは丸1日非常に有益な議論を交わしました。それから同じ1984年に、シカゴのアルゴンヌ国立研究所で超弦理論に関する大きな国際会議が開催されました。私はその会議に出席し、このテーマに非常に興奮しているもっと多くの人たちに会いました。それ以後、私はカラビ-ヤウ多様体にそれまでよりもずっと興味をもち始めたのです。

それ以前は、実のところ私たちは余り多くの例を知らなかったのですが、一方、物理学者が参加してからこの分野は巨大産業となり、私は彼らのためにもっとずっと多くのカラビ-ヤウ多様体を構成し始めました。ある時点で、少なくとも10,000はあると言ったところ、彼らは少しがっかりしていました。最初、彼らはたった3個しかないと考えたのです。

細野 たった3個と考えたのですか？

ヤウ そうです。そこに私がもっとたくさんあると言ったのです。しかし、とにかくその後私たちはこれらの多様体の性質を明らかにするため、それまでより緊密に協力するようになりました。

1980年代末頃に発見されたカラビ-ヤウ多様体のミラー対称性

細野 なるほど、興味深い話です。そうこうして超弦理論に対する研究活動が開始されたのですね。1980年代の終わり頃、大発見の一つがカラビ-ヤウ多様体のミラー対称性でしたね？

ヤウ その通りです。

細野 数学者にとってミラー対

称性は不思議なことに思えます。先生はどう思われましたか？

ヤウ 全くその通りです。始まりは1984年でしたが、私たちはカラビ-ヤウ多様体に興味をもちました。構成法を調べ、性質を調べました。ポストドクも含め、私たちは皆一緒に議論し、幾つか進展がありました。1988年頃、私はUCサンディエゴからハーバード大学に移りましたが、同じ1988年にブライアン・グリーンという若手がいて、ポストドクになりました。勿論、彼は今非常に有名です。私たちはカラビ-ヤウ多様体について議論し、論文を書き、研究は非常に順調でした。ある日、突然彼が私のオフィスに来て言いました。「カラビ-ヤウ多様体には、それぞれミラーがあるようです。」私は考えて、こう言いました。「それは真ではあり得ない。」

細野 なんと、先生は、それは真ではあり得ないと仰ったのですか？

ヤウ そうなのです。それは誤りでした。なぜそうなったかと言うと、私たちが構成したほとんどのカラビ-ヤウ多様体は、負のオイラー数をもっていたからです。私は「ミラー多様体は異なる符号のオイラー数を意味するので、これでは対称にならない。」と言いました。「負のオイラー数の方が正のオイラー数より多いのだから。」しかし、

私は紙の上で計算しただけで、それでは大規模な計算をするのは簡単ではなく、その時は私の間違いでした。それからフィリップ・カンデラスと彼の共著者がコンピューターで大規模な探索を行い、対称なダイアグラムを発見しました。

細野 有名なダイアグラムですね。

ヤウ その時起きていたことについての良い手がかりが得られ始めました。そしてブライアン・グリーンと、カムラン・ヴァッファの学生だったローネン・ブレッサーが、ゲブナー模型と呼ばれる、特別な部類の多様体の上でのミラー対称性の理論を展開しました。彼らの仕事は対称性に関する物理的な直感と推論に基づいていました。彼らは実際は5次超曲面に対するミラーが良い性質を持つことを「物理的に」証明し、興味深い幾つかの例で正しいことを確かめました。私はその性質が非常に良いこと、自分が言ったことが間違っていたことを納得しました。しかし、最も驚いたのは、カンデラスが言ったことです。1年間の計算の後に、彼らはミラー予想から出発して実際に正確に計算したと言いました。彼らは多くの興味深い計算結果を出し、私を驚かせました。

細野 あの有名な5次超曲面の計算ですか？

ヤウ そうです。5次超曲面の

計算です。見事に計算できたことが判明した(湯川結合に対する)インスタント補正です。これに私は非常に大きな感銘を受けました。

細野 カンデラスたちの仕事のすぐ後で進展がありました。

転換点となったパークレー国際会議

ヤウ その直後にイサドール・シンガーがミラー対称性のことを知らずに、私にこういうことを頼んできました。UCパークレーの数理科学研究所で数理論理学のある特別な研究集会が催されるので、それを組織してほしいということでした。私は彼に、最近ミラー対称性についての計算が行われたので、これを主題とする会議とするのが非常に適切と思うと言いました。物理学者と数学者の双方が集まって、今後何をすべきか、何はすべきではないのかを見極めるため、意見を交わすのです。当初の計画では別の数理論理学の主題、主として当時のゲージ理論についての会議でした。その当時、シンガーはゲージ理論の方に興味をもっていたのです。私たちはそれをミラー対称性についての会議に変更しました。それがミラー対称性についての最初の会議でした。

細野 その会議の後、多くの数学者が考え方を改めたと思います。

ヤウ その会議は、私が次のようなことにしたため、非常に劇的なものになりました。初めのうちは、かなり形式的な講演の後で参加者はそれ程意見を交わすことはしませんでした。そこで、私はある晩の夕食後に物理学者と代数幾何学者に集合をかけ、2時間にわたって議論を交わしました。一番劇的だったことは、カンデラスとそのグループの計算で得られたインスタント数が2人のノルウェーの代数幾何学者の計算結果と大きく食い違っていることが判明したことです。代数幾何学者は、計算を非常に厳密に、各段階で正しく行い、間違いの入り込む余地はないと考えたため、激しい論争になり、彼らはカンデラスたちの考え方は間違っているとその面目を失わせるようなことを言い始めました。

私ははっきり覚えていますが、実際は物理学者達は湯川結合の規格化等、諸々の理由で、もっとずっと控えてました。私はブライアン・グリーンと話をし、カンデラスと話をしました。そして、修正が必要に見えた全ての規格化因子その他を検討し、その結果問題は何も見つけられませんでした。私たちは何が間違っているのか分からず、困惑しました。何かを修正しなければならぬと考えたのですが、どうやって修正するのか分からなかったのです。会議は疑



問を残して終了し、解散しました。2ヶ月後のことです。素晴らしいことがありました。ノルウェーの2人の数学者が非常に正直な人で、私たちに次のような手紙を送ってきました。彼らは計算に必要なコンピューターのプログラムを自分たちで開発して使ったのですが、それに何か欠陥があり、それを修正した結果、カンデラスが得たものと完全に一致する数が得られたのです。これは簡単なクイズとは違います。その数は非常に大きな数で、それが完全に一致したのです。今や、我々の友人の代数幾何学者にとって、この計算の物理には何か重大な意味があるということが非常に説得力のあるものとなりました。多くの代数幾何学者、特に当初その計算に非常に批判的だったデイビッド・モリソンは、直ちに…

細野 彼は批判的だったのですか？

ヤウ もう非常に批判的でした。彼は「君たちは間違っている」と言ったのですが、その後180度方向転換して、非常に誠実にこの研究課題全体を支持するようになりました。そして、それ以来非常に多くの貢献をし

てきました。特に、彼はブライアン・グリーンと一緒に研究を始めました。ブライアン・グリーンは、なんとと言っても筆の立つ人です。私のポストドクを終えた後、私はブライアン・グリーンにコーネル大学に行くように勧め、彼はコーネルに勤務していました。そこで彼と一緒に研究するためにモリソンはコーネルに行き、何が起きているかを理解し始めたのです。後にブライアン・グリーンはコロンビア大学に行きました。私は彼がその職を得るのを助けましたが、それ以来彼は非常に満足しています。

細野 それは良かったですね。ミラー対称性の進展にとってその会議が間違いなく非常に大きな転換点だったのですね。

ヤウ 全くその通りです。その後ブライアン・グリーンとモリソン、それからカンデラスは非常に良い成果を出し続けました。そして、多くの人々がその研究を始め、問題を調べ始めたのです。

細野 その後、人々はミラー対称性とは何かを理解しようと試み、現在、それを理解するための主要な方法が2つあると思

ます。一つはSYZ (Strominger-Yau-Zaslow) ミラー構成と呼ばれる先生の構成法です。非常に魅力的な方法で、非常に有望に見えますが、まだまだ非常に謎に満ちているように思われま

す。**ヤウ** その通りです。

細野 将来どのような進展があると期待されておられますか？あるいは、進展するためには何が必要でしょうか？

物理学者の直感が数学者の幾何学的課題の理解を助けた：さもなければ不可能だった

ヤウ 私たちはずっとミラー対称性に興味をもっていました。1990年代初期に君が来て、アルブレヒト・クレムが来ましたね。SYZ構成はどうやらジョー・ポルチンスキーや他の人達が発展させたブレン理論に関係がありました。私はポスドクのエリック・ザスローと議論しました。それからトリエステを訪れ、そこでエド・ウィッテンから次のように質問されました。「アンディー・ストロミンガーとカトリン・ベッカー、メラニー・ベッカーが丁度カラビ-ヤウ多様体の超対称サイクルを提案したところですが、それが正しいことなのか確信がもてません。あなたのご意見を聞かせていただけますか？どのように考えられますか？随分長い間、アンディーがこういうサイクルを得よ

うとしていることを話していましたが、今回は面白そうに見えます。」彼は何であれ、黒板にそれがどのように見えるかを描くのが常でした。私は「これは非常に良さそうに見えます。つまり、これは極小部分多様体です。」と答えました。私は非常に長い間極小部分多様体を研究してきていました。それは特殊ラグランジュサイクルで、その時点では超対称サイクルと呼ばれていました。それは私たちがこの研究のある部分は何年も前にブレイン・ローソンとリース・ハーヴェイによって独立に行われたことを知らなかったためです（私は知っているべきでしたが、忘れていました）。しかし、彼らはそれが物理に何を意味するか何も分かっていませんでした。ストロミンガーとベッカー姉妹は、彼らが展開したブレン理論が以前にも発表されていたことを知りませんでした。それで、私は大変良い研究のように見えるので、一度調べるように勧めました。

それから、私がハーバード大学に戻ったところにストロミンガーが訪ねてきました。彼は当時ブラックホールのコニフォールド転移に関する非常に重要な研究をしたところで、ハーバード大学は彼を採用することを考えていました。彼は私のオフィスにやってきて、私たちは超対称サイクルが何かについて長時

間議論し、ブレン理論の観点からブレン双対性を使って構成されるミラーがあるべきであると結論しました。このようにして私たちはT双対性（ミラー対称性の）正しいものであろうというSYZ構成のアイデアを見出しました。これは色々な意味で良いことでした。なぜなら丁度機が熟しており、その後ブレン理論が発展したので。私たちはそれが正しいことであると感じたのでした。

それは何かの幾何学的解釈であり、私はいつも幾何学と物理学が何らかの形で混じり合ったものが好きなので、大変興奮しました。しかし、勿論問題は、全ての進展を通じて常に何らかの量子補正が必要なことで、それは多くの直感に頼ることを必要とします。この量子補正は常に重要でありながら理解されていないものであり、単純に真であることと、取り組まなければならないことに関してヒントを与え続けてくれています。しかし、決して数学的に正確ではありません。従って、私たちはそれを理解するための数学を展開し続けています。基本的に、正しい方向に進む度にそこから何か非常に興味深い数学が現れます。現れた数学はその都度正しく、この予想を支持します。これまでに何度も何度もこの予想を支持する結果が積み重ねられてきたと思います。

これには私は非常に驚き、また非常に喜んでいと言わざるを得ません。物理的直感に助けられて私たちは幾何学的な課題を理解しましたが、問題の多くは特異点を処理しなければならぬものであり、このような物理的直感がなければ理解は不可能であったでしょう。SYZファイブレーションには多数の特異点があり、これまでのところそれをどのように扱えば良いのか分かっていません。しかし、どういうわけか、場の量子論は特異点があるけれどもそれは基本的には問題無いということを直感的に主張します。計算してみると、いつも問題を克服できる方法が見つかるという結果になるのです。私たちはその事実に対して、今でも非常に興奮しています。また、現在はマキシム・コンツェヴィッチによって提案されたホモロジカル・ミラー対称性 (HMS) についてもずっと多くの進展が見られています。私は、これら2つのアプローチが融合し、多分非常に優れた直感的な洞察を与えてくれ、そして、そこから重要な命題の数学的証明が生まれてくるであろうと思います。先程言ったように、このような物事の理解からとても多くの興味深く美しい数学が出現しているのです。出現すること自体がまったくの驚きであるものもありますが、出現した数学が実際に正し

いと証明できて、更に大きな驚きとなるのです。

細野 その通りだと思います。なぜか数学側からは、数学者、例えばハーヴェイとローソンが特殊ラグランジュ部分多様体の理論を発展させ、一方物理学者はブレーンといった類のアイデアを得ました。それから先生がこれら2つのアイデアを同一のものとして結びつけました。

ヤウ それは良い例だと思います。

細野 先生のご意見を伺いたいのですが、これは数学と物理学の間の関係として典型的なものでしょうか。歴史的には長い間この2つの学問分野に異なる点はありませんでしたが、どういうわけか20世紀に入って違う方向に進んでしまいました。

ヤウ 初めはそうでした。

細野 しかし、どうも超弦理論は私たちに、それが正確には何なのか分からないのですが、重要なことを示唆していると思います。数学と物理学の関係をどのようにお考えでしょうか。

21世紀には量子重力の理解を可能とする幾何学の構築が求められる

ヤウ 非常に魅力的だと思います。つまり、それは常に多くの偉大な数学者が進歩を得るため両方を理解しよう、両方からアイデアを得ようと努めたテー

マでした。私は、21世紀には量子重力の理解、即ち重力つまりアインシュタイン方程式に支配される非常に大きなものと量子力学に支配される非常に小さなものの理解を可能とする幾何学の構築が求められていると思います。この大問題は、勿論アインシュタインが解決したかったものです。しかし、このためには物理学者だけでは十分ではなく、優れた幾何学者を必要とし、また極めて深遠な物理的直感を必要とするため、幾何学者だけで済むものでもないと思います。数学と物理はそれぞれの側で更なる理論の構築を進め、最後にはその間に橋を架けることができると期待したいと思います。

しかし、今現在は正しい量子幾何学を構築するにはまだ十分に機が熟していないと思います。例えばカラビ-ヤウ多様体と多岐にわたるそのディテールのような重要な問題を理解していないためです。物理の側でもまだ私たちが理解していないことが数多くあります。つまり、多くのパラドックスを生み出すブラックホールや、まだ理解しなければならない諸々のことです。多分、20年ないし30年後にはもっとずっと理解が進んでいると思います。私たちは、整然とした景色の中に架かる橋を見ることでしょう。私は、それが多くの数学者と物理学者を糾

合して目指すゴールであると信じます。これは、たった一つの分野ではなく、幾何学の側からは代数幾何学、解析、表現論、数論などの多くの分野、物理学の側からは、勿論、場の量子論、統計物理学、その他数多くの分野からの多くのアイデアを必要とするものです。そして、非常に多くの人々を必要とするものです。たった一人の人間が全てを理解できることはありません。私は、これは歴史上美しく重要な時期になると思います。

細野 仰る通りと思います。最後に、IPMUとはthe Institute for the Physics and Mathematics of the Universeの略称です。先生のご経験に基づいてKavli IPMUで物理学と数学に関連した研究を行っている人たちにメッセージをいただけますでしょうか。

ヤウ 2008年の発足記念シンポジウムに出席しましたが、その名前通りの研究センターを立ち上げているところで、私も大変興奮を覚えました。数学者と物理学者と天文学者が集結し、理論を発展させるために互いの話に耳を傾けることは非常に良いことであるだけでなく、本質的に重要であると考えます。私たちは強い好奇心をもち、互いに触れあうことが必要です。例えば、私について言えば、物理学科にセミナーを聞き

に行くのが好きでした。大多数のセミナーは理解できませんでしたが、10回も聞くと分かり始める何かがあり、その何かが私が数学を進展させる上で非常に役に立ったことがあり、あるいは結局物理に対してさえ役に立ったことがあります。私たちは忍耐強くあるべきで、「今日この問題を解くことはできないので、私はもう降参する。」とは言うべきではありません。それは正しいやり方ではないのです。外国語のようなものなので、外国語でも1年も聞いていると話せるようになるものです。同じ類の問題なのです。(数学者が)物理学科に行くには言葉を知る必要がありますし、その逆の場合も同じことです。数学者は自然を理解する上で驚嘆するようなことを数多く生み出すし、物理学者も同様です。Kavli IPMUの皆さんがそれを実現なさることと期待しています。

細野 ありがとうございます。過去50年間数学と物理学相互の関わりを経験された偉大な数学者である先生から頂いたお言葉は、Kavli IPMUの研究者と、それだけでなく私たち全てに大きな影響を与えてくれます。このインタビューをお受けいただき、本当にありがとうございました。

ヤウ どういたしまして。私からもありがとうございました。

第10回超弦理論アジア冬の学校

大栗博司 おおぐり・ひろし

Kavli IPMU主任研究員

超弦理論アジア冬の学校は、日本、中国、インド、韓国の4カ国が毎年交代で開催する素粒子論の大学院生やポストドクトラル・フェロー向けの学校です。2003年に超弦理論国際会議が京都で開催されたときに、アジア地域の若手研究者の育成と学術交流を促進するために、4カ国の研究者によって提案されたのがきっかけで始まりました。第1回は2007年に韓国で開催され、第10回になる今回は、Kavli IPMUと沖縄科学技術大学院大学 (OIST) の共催で、1月6日から16日までOISTで開催されました。

超弦理論や場の量子論の基礎的・数理的な問題から、素粒子現象論や宇宙論にわたる幅広い話題について、各分野の最先端の講師を9名招聘し、各講師には75分×4回の講義をお願いしました。また、毎日1時間のディスカッション・セッションを設けて、学生

からの質問を受け付け、また各講師には講義でカバーできなかった話題をさらに詳しく説明してもらいました。講師と講義題目は：

Miranda Cheng (アムステルダム大学)「弦理論のモック・モジュラー形式とムーンシャイン」、Ron Donagi (ペンシルバニア大学)「超リーマン面と超モジュライ空間」、Rajesh Gopakumar (インド国際理論科学センター)「弦理論と高階スピ理論」、Daniel Harlow (ハーバード大学)「AdS/CFTにおけるバルク物理の創発」、Seok Kim (ソウル国際大学)「5次元と6次元の超共形理論」、Slava Rychkov (CERNとパリ第6大学)「共形ブートストラップ」、Gary Shiu (ウィスコンシン大学と香港科技大学高等研究院)「弦理論におけるインフレーション」、Jaroslav Trnka (カリフォルニア工科大学)「散乱振幅」、Angel

Uranga (マドリッド自治大学)「弦理論の現象論」

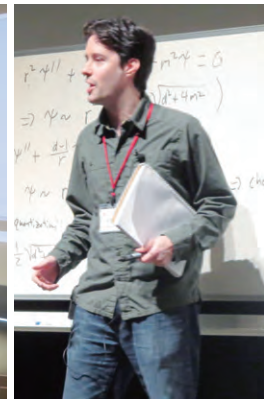
冬の学校のウェブサイトには、各講義の講義ノートや参考文献を掲載し、学生の予習や復習の助けとしました (<https://groups.oist.jp/ja/aws/lecturers>)。

当初は80名程度の大学院生やポストドクトラル・フェローの参加を想定していましたが、200名以上の応募があったので、参加枠を広げ、最終的には91名が参加しました。国別には、日本41名、韓国21名、中国14名(台湾からの2名も含む)、インド9名、米国やヨーロッパからの学生は6名でした。若手に研究発表の機会を与えるため、Gong Showと称して、各自5分間の口頭発表のセッションを2回開き、31件の発表がありました (<https://groups.oist.jp/ja/aws/gong-show>)。また、講義室の外にはポスターによる研究発表の会場を設けました。



超弦理論アジア冬の学校は、過去10回の開催により、若手研究者の育成に大きく貢献し、この学校で学んだ学生が最先端の研究者に育っています。今回は、Kavli IPMUとOISTからの資金援助と事務サポート、OISTの施設のおかげで開催が可能になりました。また、総合研究大学院大学や韓国のAPCTPからの資金援助、大阪大学やKEKの大学院生のボランティアにも感謝します。

過去10年間の成功を受けて、今後毎年、カブリ財団がこの冬の学校の予算の大部分を援助して下さることになりました。これで、アジア冬の学校も安定した財政基盤の上で運営できるようになりました。アジアの若手理論物理学者の育成への、財団のご支援に感謝します。



Workshop

Berkeley Week @ IPMU

野村 泰紀 のむらやすのり

カリフォルニア大学バークレー校 教授、
Kavli IPMU 客員上級科学的研究員

このワークショップは東京大学とカリフォルニア大学 (UC) バークレー校の間の戦略的パートナーシップ・プログラムの枠組みで開催され、バークレーから両機関の研究者の交流を促進するために4名の博士研究員とワークショップの運営要員として3名の大学院生を招待しました。ワークショップは2016年3月22日(火)、24日(木)、25日(金)の3日間を講演にあて、22日の夕方にはレセプションが行われました。ワークショップの主題は「素粒子物理学の将来」で、若手研究者がそれぞれ最も興味のあるテーマについて発表しました。聴衆は大学院生を含む東京大学、Kavli IPMU、東京大学本郷キャンパス、宇宙線研究所、KEK、そしてUCバークレーの教授陣等でした。

Kavli IPMUからは山田将樹、米倉和也、市川幸史、竹内道久、福田朝、向田享平が講演しました。山田はモノポール凝縮を用いて宇宙論的に自然なQCDアクシオンモデルを構築する可能

性について、米倉は質量をもたない磁気単極子と電子のU(1)ゲージ理論と解積可能な強結合の場の理論について、市川は矮小楕円銀河のダークマターハローのサーベイ観測の将来と前景の星の影響について、竹内はトップクォークの湯川セクターでの新しい物理の探索について、福田は普通の軽くて「見えない」アクシオンの代わりに重くて「見える」アクシオンを実現する模型について、向田はインフレーション後の予加熱 (preheating) 期における我々の電弱理論の真空の運命について、それぞれ議論しました。

バークレーからはDaniele Bertolini、Yonit Hochberg、Thomas Melia、張ヶ谷圭介が講演し、加えてコーネル大学のEric Kuflikが研究発表を行いました。Bertoliniは宇宙の大規模構造の有効場の理論を用いて精密な宇宙論を展開する方法について、Hochbergは超伝導検出器を用いて軽いダークマターを検出するアイデアについ

て、Meliaは共形代数を用いて有効場の理論の基底演算子を求める方法について、張ヶ谷は軽いカイラルセクターから質量10 MeV - 1 GeVオーダーのダークマターを得る模型について、KuflikはLHCでの衝突点からずれた崩壊 (displaced vertex) について特にRパリティの破れた超対称性および“neutral naturalness”との関連で、それぞれ議論しました。

このワークショップでは素粒子物理と宇宙論の広い領域にわたる話題が取り上げられました。興味深く活発な議論が繰り広げられ、参加者が色々な問題について新しいビジョンを得る上で役立ちました。このワークショップが非常に成功したことから、将来も同様のプログラムを実施したいと考えています。



統計数理研究所と研究協力に関する協定を締結

2016年1月5日、Kavli IPMUと情報・システム研究機構統計数理研究所（統数研）との研究協力に関する協定締結の調印式が行われ、村山斉 Kavli IPMU 機構長と樋口知之統計数理研究所長が協定書に署名しました。調印式には Kavli IPMU の吉田直紀教授が同席しました。Kavli IPMU は既に科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「広域撮像探査観測のビッグデータ分析による統計計算宇宙物理学」(研究代表者：吉田直紀、2014年10月開始) において統数研と融合研究プロジェクトを進めています。今回の協定締結によって、両機関は宇宙観測によるビッグデータと情報統計学を融合させた「統計計算宇宙物理学」という新しい領域の確立を目指し、研究交流の更なる促進を図ります。



協定書に署名する村山機構長と樋口統数研所長、および同席の吉田教授

カブリ財団研究担当チームが Kavli IPMU を視察

2016年1月18日にカブリ財団副理事長で研究担当チームリーダーのミヨ

ン・チュンさん、研究担当チームのサイエンスプログラムディレクター、クリストファー・マーティンさんとシャリフ・タハさんが研究進捗状況および研究環境視察のため Kavli IPMU を訪問しました。

当日は、まず Kavli IPMU 教授の羽澄昌史さん、高田昌広さん、マーク・ベイギンズさん、東京大学大学院理学系研究科准教授で Kavli IPMU の科学研究員の立川裕二さんが各30分、続いて Kavli IPMU 博士研究員の奥村哲平さん、デュリッパ・ピヤラトナさん、ラン・フオさん、森谷友由希さん、ジェームス・ウォルブリッジさん、イタマール・ヤーコヴさん、ルイス・マグロさんが各5分の研究紹介を行いました。

視察団はティータイムで Kavli IPMU の研究者との歓談を楽しんだ後、村山機構長による Kavli IPMU の概要説明を聞き、夕方からの研究者との懇談会で全視察日程を終了しました。



研究紹介を行う羽澄さん

世界初! 銀河団の内部構造とダークマターの深い関係が明らかに

Kavli IPMU のスルド・モレ助教と高田昌広教授、NASA ジェット推進研究所/カリフォルニア工科大学の宮武広直研究員 (元 Kavli IPMU 博士研究員)、及び Kavli IPMU の主任研究員を兼ねるプリンストン大学のデイビッド・スパーゲル教授らの研究グループは、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) のデータリリース8 (DR8) から得られた約9000個の銀河団のサンプルを用いて、重力レンズ効果によるダークマターの分布と銀河団

の空間分布の測定結果を組み合わせることで、約100万光年のスケールの銀河団の内部構造の特性と約1億光年のスケールに及ぶダークマターの分布に関係性があることを世界で初めて発見しました。

研究グループは、まず銀河団内の構造に着目し、その銀河団に属するメンバー銀河が各々の銀河団内で中心に集中して分布しているか、あるいは広がって分布しているかという指標に基づき、2つのサンプルに分けました。そして、銀河団が背後の銀河に及ぼす重力レンズ効果の測定から、2つのサンプルの銀河団が同じ質量を持つことを示し、一方、銀河団周辺の重力レンズ効果と銀河団の空間分布の両方から、銀河団の周辺の約1億光年のスケールに渡るダークマター分布の総量は、メンバー銀河が中心に集中している銀河団では少なく、広がって分布している銀河団では多く、2つのサンプル間で約1.5倍も異なることが分かりました。

この発見は、銀河団の個数密度や空間分布などの特性が、従来考えられていた銀河団の質量によってだけでなく、銀河団の形成史と銀河団周辺のダークマターの分布といった大規模な環境の影響を受けていることを明らかにしたもので、アメリカ物理学会の発行する *Physical Review Letters* の注目論文として Editors' Suggestion に選ばれ、2016年1月25日に掲載されました。

超高輝度超新星のエネルギー源をマグネターで説明

アルゼンチン国立ラプラタ大学天体物理学研究所研究員で Kavli IPMU の客員准科学研究員のメリーナ・パーステンさんと野本憲一 Kavli IPMU 教授らの研究チームが、最近発見された2つの極めて特異な超高輝度超新星 SN2011kl と ASASSN-15lh がマグネターと呼ばれる高速回転し強い磁場をもつ中性子星をエネルギー源とするものとして理解できることを発表しました。詳細は本誌の裏表紙をご覧ください

い。この研究成果は2016年1月20日に *Astrophysical Journal Letters* に掲載されました。

2015年度東京大学業務改革総長賞特別賞受賞

東京大学本部国際企画課国際企画チームの小澤みどり専門職員を代表とし、同チームの職員2名とKavli IPMU事務部門国際交流係・研究者支援チームの田村利恵子さん、久保島尚美さんからなる戦略的外国人研究者サポートチームが「UTokyo-atlas（東京大学事務手続き案内サイト）内において外国人研究者が直接理解できる英文ページの作成」により2015年度東京大学業務改革総長賞の特別賞を受賞しました。外国人研究者の受入れ担当者に加え、研究者自身にとって必要な手続きを理解しやすい英語ページを作成し公開したことが評価されたものです。このページにはKavli IPMUの従来の取り組みやノウハウも生かされており、東京大学の国際化に大きな役割を果たすことが期待されています。

表彰式は2015年12月18日に東京大学本郷キャンパスの安田講堂で行われました。なお、代表の小澤さんはKavli IPMUで発足以来2014年3月末まで国際交流係長を務めました。



五神総長と総長賞受賞者全員の記念撮影

学内向け「ノーベル物理学賞受賞記念学術講演会」

2016年1月18日、東京大学本郷キャンパスの安田講堂で東京大学の学生と教職員を対象としたノーベル物理学賞受賞記念学術講演会が開催され、約600名が参加し、また会場の映像は東京大学の本郷、駒場、柏、神岡にある

計5会場に学内LANを通じてライブ配信されました。冒頭で、東京大学の五神真総長による挨拶があり、続いて総長からノーベル物理学賞を受賞した東京大学宇宙線研究所所長でKavli IPMU主任研究員を兼ねる梶田隆章さんに5人目となる東京大学特別栄誉教授の称号が授与されました。その後、Kavli IPMUの村山機構長が「父なるニュートリノ」と題し、梶田さんが「ニュートリノ質量の発見」と題して講演を行いました。梶田さんは、カミオカンデの大気ニュートリノ観測のデータ解析中にニュートリノ振動が起きている可能性に気づき、スーパーカミオカンデによる観測を経てニュートリノ振動発見に至るまでのエピソードを紹介するなど、ご本人ならではの講演内容でした。最後に、梶田さんに花束とスーパーカミオカンデの展開図を模した教職員や学生からのメッセージボードが贈られ、閉会しました。

一般向け「梶田教授ノーベル賞受賞記念連続講演会」第1回を開催

2016年3月27日、東京大学本郷キャンパスの安田講堂において、梶田教授ノーベル賞受賞記念連続講演会「私たちはどこから来たのか？ -ニュートリノのノーベル賞の先」が開催されました。この講演会は梶田さんのノーベル物理学賞受賞を記念して企画された一般向け連続講演会の第1回としてKavli IPMUの主催で行ったものです。会場には約470名の参加者が集まりました。

講演会では、まずKavli IPMUのマーク・ベイギンズ教授が「母なる超新星は私たちの素になる元素を産んでくれた？」と題して英語で講演（同時通訳付き）、続いてKavli IPMUの村山齊機構長が「父なるニュートリノは私たちを完全消滅から救ってくれた？」と題して講演し、それぞれ元素の起源と物質の起源をテーマにニュートリノ物理学の最先端を分かりやすく解説しました。特に、マーク・ベイギンズ教授は、スーパーカミオカンデの超純水にガド

リニウムを加えて超新星背景ニュートリノ探索を目指すプロジェクトを紹介しました。このプロジェクトは、スーパーカミオカンデ実験グループ内で昨年正式に実施が認められたものであることから、ノーベル賞の先となるニュートリノ物理学の未来を語るにふさわしい講演会となりました。

なお、連続講演会の第2回は、2016年4月24日に東京大学理学系研究科と東京大学宇宙線研究所の主催により「カミオカから宇宙をみる」と題して安田講堂で開催される予定です。



講演するベイギンズさん

Kavli IPMU / ELSI合同一般講演会「起源への問い」開催

2016年1月10日、東京都お台場の日本科学未来館未来館ホールにおいて、Kavli IPMUと東京工業大学地球生命研究所（ELSI）との合同一般講演会「起源への問い」を開催しました。この講演会は、WPI（世界トップレベル研究拠点プログラム）採択拠点のうち、「宇宙の起源に迫る」ことを目的とするKavli IPMUと「地球と生命の起源に迫る」ことを目的とするELSIが、人類にとって根源的な「起源への問い」という共通テーマのもと、最新の研究内容を平易に紹介するとともに、哲学も



左より廣瀬さん、村山さん、梶谷さん

交えた多様な視点を提供するイベントとして企画されたもので、約300名が参加し、会場は満席となりました。

WPIの黒木登志夫プログラム・ディレクターの挨拶で始まった講演会は、村山斉 Kavli IPMU 機構長が「宇宙の起源と星の誕生」、廣瀬敬 ELSI 所長が「地球の起源と生命の誕生」、梶谷真司 東京大学共生のための国際哲学センター (UTCP) センター長が「科学と世界観の系譜－人間の存在意義の歴史性－」と題してそれぞれ話をしました。その後講師3名による鼎談「起源を問うとはどういうことか」、さらに講師を囲んでの懇談会があり、盛りだくさんの内容の講演会でした。

Kavli IPMU一般講演会「宇宙観の東西」を開催

2016年3月20日、Kavli IPMUの 大講義室において一般講演会「宇宙観の東西」が開催され、定員一杯の約140名が参加しました。はじめに、カリフォルニア大学バークレー校教授で Kavli IPMU 客員上級科学者を兼ねる野村泰紀さんが「マルチバース宇宙論－最新物理理論の語る宇宙」と題して講演し、続いて東京大学東洋文化研究所教授で中国哲学が専門の中島隆博さんが「コスモロギア、その内と外－中国の宇宙論的想像力」と題して講演しました。その後の「宇宙観の東西」と題した2人の講師の対談は、それぞれの講演で語られた西洋と東洋、さらには科学と哲学の宇宙観について参加者も交え深く掘り下げる機会となりました。講演後のティータイムでも、講師への熱心な質問が絶えず、多くの参加者と講師の語らいのうちに閉会となりました。



対談する野村さん(左)、中島さん(右)

アメリカ科学振興協会 (AAAS) 年次大会に参加

2016年2月11日から2月15日までワシントンD.C.でアメリカ科学振興協会 (AAAS) 年次大会が開催されましたが、2月12日から14日の3日間、文部科学省と学術振興会、および Kavli IPMU を含む9つのWPI (世界トップレベル研究拠点プログラム) 拠点が合同でブース展示を行い、WPIの国際的認知度の向上を目指して、各拠点の研究成果や研究環境を紹介しました。さらに、今回はブースを訪れた来場者に対して、WPI事業そのものや各拠点に関する知名度を測る目的で初めてアンケートを実施しました。このアンケートの結果から、Kavli IPMU はWPI 拠点の中で最も高い知名度を得ていることが分かりました。3日間で、研究者、ジャーナリスト、学生、家族連れ等を含む約320名以上がWPIブースを訪れました。

日本語クラス修了式

Kavli IPMU では外国人研究者やその家族等に向けて独自に日本語の講座を開設しています。これまで多くの受講者が事務部門の日本語教師西川正美さんが開講する計約40時間の日本語入門集中コースを終えて修了証書を手にしてきましたが、今回は2016年3月29日に行われた日本語クラス修了式を紹介します。Kavli IPMU 博士研究員のデイヴィット・スタークさん、ルオ・フォンさん、ハン・チェンチェンさん、学術支援職員のスピーグル・ジョシュアさんの婚約者であるレベッカ・ブライクさんの4名が、それぞれ日本語の



修了証書を手にはほえむ外国人研究者らが事務部門職員と記念撮影

スピーチを行い、修了証書を授与されました。

人事異動

再任

元 Kavli IPMU 博士研究員の Wiphu Rujopakarnさんが2016年3月1日付けで Kavli IPMU 博士研究員に再任されました。

転出

次の方々が転出しました。[括弧内は Kavli iPMU 在任期間です]

Shamik Banerjee さん [2014年4月16日 - 2016年2月29日]、Kavli IPMU 博士研究員からインドのプバネーシュワル物理研究所准教授 (Reader-Faculty) へ。

服部香里さん [2015年7月1日 - 2016年3月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から産業技術総合研究所研究員へ。

石部正さん [2015年4月1日 - 2016年3月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から東京大学大学院数理科学研究科協力研究員へ。

中山優さん [2015年9月1日 - 2016年3月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から立教大学准教授へ。

斎藤俊さん [2013年4月1日 - 2016年3月31日]、Kavli iPMU 博士研究員からマックスプランク天体物理学研究所博士研究員へ。

竹本康浩さん [2014年4月1日 - 2016年3月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から大阪大学核物理研究センター特任助教へ。

また、Amir Aazami さん [2013年1月16日 - 2016年1月15日] が任期満了で退職しました。



超高輝度超新星 (SLSNe)

メリーナ・バーステン

アルゼンチン国立ラプラタ大学-CONICET 天体物理研究所研究員、Kavli IPMU 客員准科学研究員

超高輝度超新星 (SLSNe) は超新星の一種ですが、通常の超新星の10倍から100倍の明るさで輝くものです。非常にまれにしか発生しないため、たった10年前に発見されました。超高輝度超新星は極めて明るいので、普通の超新星爆発よりはるかに遠方までの距離の測定と初期宇宙の研究に有用です。しかし、その物理的起源はまだよく分かっていません。通常の超新星の主たるエネルギー発生源である放射能は、ほとんどの超高輝度超新星の高い輝度を説明することができません。超高輝度超新星を輝やかせるために必要とされるエネルギーを説明する機構としていくつかの提案がありますが、妥当と考えられる機構は、超新星から放出された物質と超新星を取り巻く高密度の物質の衝突が作る強い衝撃波、あるいは新たに生成された、マグネターと呼ばれる高速回転し強い磁場をもつ中性子星のいずれかを伴うものです。最近、私たちは2つの極めて特異な超高輝度超新星である SN 2011kl と ASASSN-15lh を解析して、これらがマグネターをエネルギー源とする超新星であるとして理解できることを見出しました。

