

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



Today Institutes for Advanced Study



The University of Tokyo
東京大学国際高等研究所

Feature
Science for Peace and Development Today and Tomorrow
Round Table Conversation with Edward Witten



28

No.

December 2014

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Science for Peace and Development Today and Tomorrow
Hitoshi Murayama
- 7 **Our Team** Richard Calland
Edmond Cheung
William Donovan
Dongmin Gang
Dulip Piyaratne
Naonori Sugiyama
Michihisa Takeuchi
- 10 **Round Table Talk**
Conversation with Edward Witten
- 27 **Workshop Report**
Mini-Workshop: Towards Quantum Primitive Form Theory
Kyoji Saito
Workshop on CLASS and MontePython
Eiichiro Komatsu
Kavli IPMU-RIKEN iTHES-Osaka TSRP Symposium
"Frontiers of Theoretical Science-MATTER, LIFE and COSMOS-"
Tsukasa Tada
The 24th Workshop on General Relativity and
Gravitation in Japan (JGRG24)
Tomohiro Fujita, Shinji Mukohyama,
Ryo Namba, Rio Saitou
Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing
Masamune Oguri
- 32 **News**
- 36 **Discovery of Electron Neutrino Appearance in a Muon
Neutrino Beam**
Tsuyoshi Nakaya

Japanese

- 37 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 38 **Feature**
平和と発展のための科学: 今日と明日
村山 斉
- 41 **Our Team** リチャード・カランド
エドモンド・チャン
ウィリアム・ドノバン
姜 東泯
デュリッパ・ピヤラトナ
杉山 尚徳
竹内 道久
- 44 **Round Table Talk**
エドワード・ウィッテン博士に聞く
- 60 **Workshop Report**
Mini-Workshop: 量子原始形式理論に向けて
齋藤 恭司
CLASS とMontePythonに関するワークショップ
小松 英一郎
Kavli IPMU-RIKEN iTHES-Osaka TSRP Symposium
Frontiers of Theoretical Science-MATTER, LIFE and COSMOS-
多田 司
The 24th Workshop on General Relativity and
Gravitation in Japan (JGRG24)
齋藤 亮、難波 亮、
藤田 智弘、向山 信治
強い重力レンズからみた銀河研究と宇宙論
大栗 真宗
- 65 **News**
- 68 **ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の
発見**
中家 剛

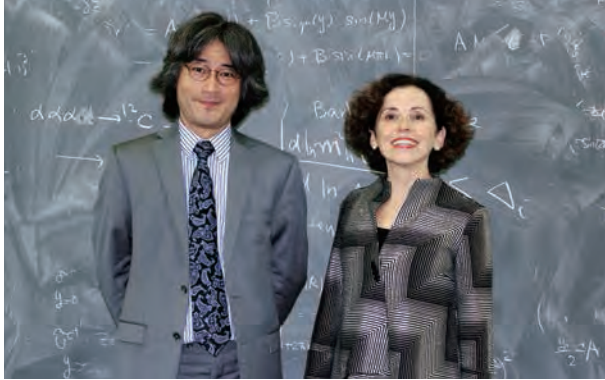


Hitoshi Murayama, Director of the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe at the University of Tokyo and Professor at the University of California, Berkeley, makes a keynote statement at the special event marking the 60th anniversary of the establishment of the European Organization for Nuclear Research (CERN), held on October 20, 2014, in the Economic and Social Council Chamber, United Nations Headquarters – New York. The event highlighted the role that science has played in peaceful collaboration, innovation and development. (Image credit: UN Photo/ Evan Schneider.)

村山 斉(カブリ数物連携宇宙研究機構長およびカリフォルニア大学バークレー校教授): 2014年10月20日にニューヨークの国連本部経済社会理事会会議場で開催されたCERNの設立60周年を記念する特別行事で基調講演を行う。この行事は科学が平和とイノベーションと発展のために果たした役割を浮き彫りにした。(Image credit: UN Photo/Evan Schneider)

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



October 3: Photo with France Córdova, Director of the National Science Foundation



October 25: Lecture at Kashiwa Open Campus 2014



November 20: Discussing with Edward Witten. Behind them, Principal Investigator Hiroshi Ooguri (left) is talking with Chiara Nappi.



November 25: Presenting an overview of The Kavli IPMU to Robert Conn, President and CEO of The Kavli Foundation (right by the window), and Irwin Jacobs, co-founder of Qualcomm Technologies, Inc. (left by the window).



December 12: Photo with Rashid Sunyaev, Director of the Max-Planck-Institute for Astrophysics (right), and Wayne Hu, Professor of the University of Chicago (left)



December 17: Answering questions asked by a high school student at the 4th Annual WPI Joint Symposium held at the Yurakucho Asahi Hall

Science for Peace and Development Today and Tomorrow*

Your Excellencies, Distinguished Guests, Ladies and Gentlemen.

It is an incredible honor for me to speak at the headquarters of the United Nations, which I admire as the guardian of world peace. The theme of this session is "Science for Peace and Development." I'd like to share my own thoughts on this theme.

Peace is about different nations working together toward a common goal, rather than fighting against each other. Development is to bring the state of humankind to a better and humanely acceptable condition from what it is today. How can science contribute to these two important objectives of the United Nations and thus all of humankind? Most people would say it's through technology, innovation and medicine. And I would clearly agree with that answer. But today I would like to offer an additional answer to this question.

Concerning peace, I'm fortunate enough not to have experienced a war personally - but not too distant. My father was born in Korea during Japanese occupation. And when the Japanese occupation ended, his family tried to flee Korea in a big chaos, and my father was nearly left behind. Very fortunately he was reunited with his parents at the last minute

*A keynote speech presented at an event celebrating CERN's 60th anniversary, "CERN: SIXTY YEARS OF SCIENCE FOR PEACE AND DEVELOPMENT - The role of science and scientific intergovernmental organizations in bringing people and cultures together," held on October 20, 2014, in the Economic and Social Council Chamber, United Nations Headquarters - New York.

before boarding a boat. I wouldn't exist here today without this miracle.

I myself was born in Japan but grew up in West Germany, then a divided country. I once visited the divided Berlin. West Berlin was a thriving metropolis with fancy shops, streets busy with cars and pedestrians. After passing the checkpoint into East Berlin, I've seen a minefield and watch towers, followed by deserted ruins left over 30 years after World War II. This sight is etched vividly into my memory. The world has experienced wars, and is not an easy place.

In my scientific career mostly in Berkeley, California, I have worked with many colleagues and friends who had been caught in various conflicts or suffered persecutions. I worked with an Israeli who witnessed a suicide bombing a block away from his home; a Serb whose village was bombed by NATO; an Iranian who fled the Islamic revolution on foot to Turkey; a Russian who fled his country because of his Jewish origin; and a Ukrainian whose mother had to flee Crimea. I have worked with these people for a very simple reason: because we had a common goal, namely, to solve the mysteries of the universe.

I firmly believe that basic scientific research is a true peacemaker for humankind. I'm sure every one of you here today has this experience: you look up at the beautiful night sky, watch the stars, and suddenly your mind is filled with all these profound questions

about the universe. The awe of the beautiful universe makes differences in cultures, languages, colors, genders, religions, and ideologies simply disappear.

We live on a tiny piece of rock called the planet Earth that circles around an average star called the Sun, in a rural area 27,000 light years away from the center of the Milky Way galaxy, which is only one out of a hundred billion galaxies in the visible universe. If you see the big picture, our differences seem so small. This perspective makes me think differently about all the wars, conflicts, tragedies, poverty, and diseases we read in newspapers every day. There must be a way for us human species on this tiny piece of rock to work together.

CERN embodies this idea that basic science unifies people from all nations. I serve on its Scientific Policy Committee that reports to its governing body, the Council, even though neither of my countries, Japan nor the United States, are a member state of CERN. CERN only cares about my scientific expertise, not about where I am from or how much my countries pay. During my numerous stays at CERN, I've seen people from India and Pakistan, Israel and Iran, Russia and Ukraine working together. I was told that even at the height of the Cold War, CERN brought scientists from both sides of the iron curtain together. These days, thousands of people from friendly or warring nations come to CERN and build amazing scientific instruments. Some of them discovered the Higgs boson in 2012 - as has been mentioned already several times in this session - after nearly half a century of hunting. By the way, this Higgs boson is quite important to you; it fills the entire universe and it is keeping your body from evaporating in a nanosecond.

I recently listened to a talk by my colleague Eliezer Rabinovic from Jerusalem on a project in Jordan called SESAME. This is a project where people from



Bahrain, Cyprus, Egypt, Iran, Israel, Jordan, Pakistan, the Palestinian Authority, and Turkey are working together to build a new particle accelerator as an intense light source for basic research in biology, material science, and medicine. Eliezer said, "In our region, the wars are not over. There are different perspectives on who won and who lost, who won yesterday and who wins tomorrow." Eliezer also said SESAME actually started in the CERN cafeteria, where the initial idea was hatched, like so many other science projects. Toward the building of an international laboratory for SESAME, the design based on the CERN model but tailored to the nations involved, required many negotiations and compromises. I was glad to learn that Berkeley as well as Japan provided the project with help to go over some big hurdles. He also emphasized the importance of generating public awareness about the project because "people don't believe Israeli, Arabs, Iranians, Pakistanis can work together... They are cynical about projects in Middle East." But now the light source is expected to be ready in late 2015 to prove that optimism wins and literally for people to "see the light."

So, CERN, I'm very impressed, has a history of uniting people in quests that have nothing to do with power but everything with knowledge.

I also believe that the quest for knowledge and the fascination with the mysteries of the universe

would be the key to development. This is because the fascination with stars and planets and outer space gets the children excited about learning more about science. If we nurture their curiosity properly, it leads to a more educated and scientifically minded population. To raise the standard of living requires scientific knowledge to all people. Everybody needs to understand that resources available on our planet are finite and not very much for billions of us. My friends in America need to accept that we are responsible for climate change and recent natural disasters. We need to convince still some skeptical people in West Africa that the threat of Ebola is real. My fellow Japanese should understand what the nuclear incidents in Fukushima really mean. And this development, based on curiosity for Mother Nature, can start with just looking up at the night sky, and sharing our awe of the beautiful universe.

Again, CERN embodies this type of science. I've read that this excitement with the discovery of the Higgs boson increased enrollment of high school students in science by twenty percent in Europe. CERN brings in thousands of students and high-school teachers every year. They witness people from all over the world working together peacefully to solve the most profound mysteries of the universe we live in. They bring their stories back to their classrooms and beyond. They simply get excited. And this excitement is contagious.

I myself play a small part in getting young people excited about science. Several years ago, the University of Tokyo asked me to start an international science institute in Tokyo. To attract young and ambitious scientists from around the world, I've raised five basic questions I've always wondered about from my childhood. How did the universe begin, what is it made of, what is its fate, what are its basic laws, and why do we exist in it. These questions resonate well with scientists from all cultures. We attract nearly a

thousand job applications for about ten positions we can offer every year. Now 60 percent of the members are international, roughly equally split among Asians, Americans, and Europeans. And we have our own Russians and Ukrainians, Chinese and Indians working together.

Also, I've lectured students from developing countries many times. Recently, I've given online lectures on our research on the universe, and attracted 75,000 people from 150 countries. They are from all over. Many of them are from the U.S., Europe, and Japan, but also from Pakistan, Western Sahara, the Bahamas, and Swaziland. They get excited to see that science now addresses these truly basic questions of humankind. And this way, they grow up knowing the methodology of scientific approach. This, I believe, is the key to making sure that future of whatever nation you are from can rest on the scientifically minded population.

I believe the world needs more places like CERN. Personally, I'd love to see the United States and Japan host similar international organizations for basic research, where people from all around the world come together. It will surely open up local population to a global mindset, especially the children. I'm eager to make sure that science contributes to peace and development of the entire planet.

To make it clear that the institute I founded in Japan is open to anybody irrespective of their origins, I named it the Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. Laws of physics, and mathematics that describe these laws, are not only applicable to the entire planet Earth, but also throughout the whole universe. One day, I hope to see a job application from a different planet. I would think it is only a matter of time.

Thank you so much for your attention.

Our Team

Richard Calland

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

I am a member of the SuperK and T2K experiments, which study neutrinos generated from the sun, in the upper atmosphere and from an intense human-made neutrino beam. The study of neutrinos enables us to understand mysteries about the universe such as why there is more matter than anti-matter. Neutrinos can help with this by potentially exhibiting CP violation, which manifests in a measured difference in the properties of neutrinos and anti-neutrinos. Currently T2K is beginning to study anti-neutrinos, which will lead to interesting



results in the near future. My interests are using advanced statistical techniques to make optimum use of our data to extract the most sensitivity to the physics parameters we measure, along with improving the detector reconstruction algorithms to enhance our physics reach.

Edmond Cheung

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I am a new postdoctoral researcher from the University of California Santa Cruz, and my research focuses on galaxy evolution. Specifically, I am interested in the interplay between galaxy structure, e.g., bulges and bars, and galaxy evolution. I am a member of several teams, including AEGIS, CANDELS, Galaxy Zoo, and now, MaNGA. And with MaNGA, I plan to continue exploring this link between galaxy



structure and galaxy evolution in new and interesting ways.

Our Team

William Donovan

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research is in the field of algebraic geometry. I focus on applying ideas from physics and non-commutative algebra to study varieties, with examples including homogeneous spaces and their Calabi-Yau relatives, and complex 3-folds and their birational modifications. Mirror symmetry provides much of the motivation for this work, and homological algebra provides many of the tools. Currently, I am working on problems on higher-



dimensional varieties, and applying homological algebra to better understand moduli spaces associated to them.

Dongmin Gang

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My main interest is studying the low-energy theories appearing from intersecting M2/M5 branes in M-theory. M-theory is so rich that it can provide new insights on various topics in physics and mathematics. Especially, the system of multiple M5-branes wrapping on 2 and 3-dimensional manifolds is my current research topic. The topic is closely related to the AGT conjecture, 3d/3d correspondence,



holographic principle, quantum Teichmüller theory and volume conjecture.

Dulip Piyaratne

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research is primarily concerned with studying geometry of algebraic varieties using homological algebraic methods. In particular, the theory of derived categories provides an efficient algebraic platform to investigate the “hidden” geometric information of a variety. Also they have emerged as important objects in string theory. My recent research is focussed on constructing categorical stability conditions, and also studying associated moduli problems using Fourier-



Mukai theory. I am also interested in investigating counting invariants on varieties and wall crossing phenomena.

Naonori Sugiyama

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

My research interest lies in the field of theoretical cosmology, especially for the origin of primordial density fluctuations in the inflationary period of the early universe, and the cosmic large scale structures which are formed as a result of amplification of the primordial density fluctuations due to gravitational instability.

I have studied the statistical feature of the primordial density fluctuations, and developed analytical models to describe the evolution of the



cosmic structures. One goal of my research is to clarify the evolution of the cosmic structures through comparing my models with some of large galaxy surveys.

Michihisa Takeuchi

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interests are: what is dark matter, what is the nature of the Higgs boson and physics beyond the Standard Model (BSM). To explore these questions, I am mainly working on collider phenomenology. Besides working on general BSM physics searches at the LHC, I also have worked on top physics as it is likely that signals of new physics first appear in the top sector. The optimal use of the data is important, and I am working on the use



of jet substructure information. The LHC will start operating again from this year, and it will be a very exciting time.

Round Table Talk: Conversation with Edward Witten

Edward Witten

Professor, the School of Natural Sciences, The Institute for Advanced Study

Hiroshi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

Yukinobu Toda

Kavli IPMU Assistant Professor

Masahito Yamazaki

Kavli IPMU Assistant Professor

Kyoto Prize and Fourth Visit to Kyoto

Ooguri: First I would like to congratulate Edward on your Kyoto Prize. In every four years, the Kyoto Prize goes in the field of mathematical sciences, and this is the first prize in this category awarded to a physicist.

Witten: Well, I can tell you I'm deeply honored to receive this prize.

Ooguri: It is wonderful that your work in the area at the interface of mathematics and physics has been recognized as one of the most important progress in mathematics as well as in physics. For those of us working in this area, this is also very gratifying. As Yuji Tachikawa said at the workshop yesterday, you're like sunshine for all of us in this area of research.

Witten: Actually in my acceptance speech a couple of days ago, I remarked that I regard it also as a recognition of the field, not just of me.

Ooguri: This conversation will appear as an article in this Japanese magazine, *Sugaku Seminar*, as well as in the *Kavli IPMU News*. *Sugaku Seminar* is widely read among high school students, undergraduate



Right to left: Edward Witten, Hiroshi Ooguri, Masahito Yamazaki, and Yukinobu Toda.

students, professional researchers, and general public interested in mathematics, a broad range of people. The magazine has been particularly inspirational for high school students. I enjoyed reading it when I was a high school student, and I still subscribe to it. Yuji Tachikawa said he read your interview in 1994 in the magazine, which partly inspired him to go into this area.

Witten: I was very pleased to hear that from Yuji. It was very nice of him to say that.

Ooguri: It is my hope that the magazine article about the conversation today would also inspire the next generation of young students to go into, not necessarily mathematics, but more broadly science and engineering. I thought this would be a good opportunity to

discuss the current state of the field and opportunities in research.

You have already given two interviews for *Sugaku Seminar*. In 1990, at the International Congress of Mathematicians in Kyoto, you received the Fields Medal. On that occasion, Tohru Eguchi had an interview with you. You also had a discussion with Vaughan Jones, another Field Medalist at the Congress, and I remember, you expressed interest in generalizing your work in the Chern-Simons theory with a spectral parameter, which is very natural from the point of view of integrable models.

Witten: Yes, I very much wanted to find an explanation along these lines of the "integrability" that makes it possible to get exact solutions of two-dimensional lattice models such

as the Ising model. I was completely unsuccessful, but just in the last couple of years, something in the spirit of what I wanted to do was done by Kevin Costello.

Ooguri: We were just talking about Costello's work before you arrived here. Do you think that it achieved what you wanted to do at that time?

Witten: Yes. Integrable models have many facets, and there is no one way to understand everything. But I would say that specifically the kind of explanation I was looking for is what Costello found.

Ooguri: I see.

Witten: What Costello did involves a very simple but beautiful twist on the three-dimensional Chern-Simons theory, in which he simply replaced one of the three real dimensions of space by a complex variable z .

Ooguri: Going to four dimensions.

Witten: This is a four-dimensional world with two real coordinates and a complex coordinate z . Costello defined a 4-form which was the wedge product of the Chern-Simons 3-form with the 1-form dz . He studied this as the action of a 4-dimensional theory. There is a crucial technical detail: for this theory to make any sense, the differential operator that is obtained by linearizing the equations of motion must be elliptic modulo the gauge group. I think that this is a little surprising, but it is true. And given that, he then has a generalization of the Chern-Simons theory that does not have the full three-dimensional symmetry, but it does have a complex variable, namely z .

If you think carefully, you will see that integrability, the Yang-Baxter equation, involves two-dimensional symmetry, but not really three-dimensional symmetry. The reason

I was unable to incorporate the spectral parameter was that I was working in the context of three-dimensional topological field theory. In three-dimensional topological field theory, in addition to the moves where knots cross—that is, in addition to the Yang-Baxter relation—you have further relations involving creation and annihilation. There are Reidemeister moves that are valid in topological field theory, but are not relevant for integrable systems. I couldn't find the spectral parameter because I was trying to use topological field theory. Costello made a very simple twist, replacing a real variable by a complex variable and then everything worked beautifully. I definitely regard that as the explanation I was trying to find, unsuccessfully, around 1990.

Ooguri: I see. So, after 23 years, finally your question was answered. Now, in 1994, you visited Japan for the second time and gave a public lecture here in Kyoto.

Witten: In fact, I have had several opportunities to visit Kyoto, including a visit for the Strings 2003 conference that you organized and also this current visit.

Ooguri: So, for every one of your four visits to Japan including this one, you have actually come to the Kyoto International Conference Center.

Witten: Yes, but I know that there is a trip to Okinawa lined up.

Ooguri: That would be the Strings 2018 Conference that we are planning at the Okinawa Institute of Science and Technology. We surely hope that you will be back in Japan in 2018.

At the time of your visit in 1994, you were just finishing your work on the Seiberg-Witten theory and also the Vafa-Witten theory. I remember

a discussion session we had at RIMS, Kyoto University, with you and Hiraku Nakajima, where Nakajima explained his work on the action of an affine Lie algebra on the cohomology of the moduli space of instantons. In the interview you had with Tohru Eguchi, you mentioned progress in mirror symmetry and S-duality at the time and expressed a hope of a more unified view on duality encompassing gauge theory and string theory. Some of this hope has been achieved in the last 20 years, I think.

Witten: Definitely some of it has been achieved. One thing that was achieved in the couple of years after that second interview was simply that there emerged a picture of non-perturbative dualities in string theory, generalizing what happens in field theory. However, there are other aspects that are still mysterious and not clearly understood.

On the bright side, the fact that four-dimensional gauge dualities and a lot of dualities in lower dimensions comes from the existence of a six-dimensional conformal field theory is a major insight in understanding dualities better. We haven't gotten to the bottom of things because we don't really understand the six-dimensional theory, but just knowing that the matter should be understood in terms of the properties of the six-dimensional theory is an advance in understanding duality that certainly wasn't there at the time of this last interview.

I Was a Skeptic about Duality

Ooguri: I should introduce our discussants today. Yukinobu Toda is a mathematician and an Associate Professor at the Kavli IPMU, and he received his Ph.D. in 2006. Masahito

Yamazaki is a physicist and a new Assistant Professor at the Kavli IPMU, and he entered graduate school in 2006. They represent the young generation of mathematicians and physicists working on the interface of string theory and gauge theory.

At your Commemorative Lecture the other day that was one of the Kyoto Prize events, you reviewed your career in this area. You said that you entered graduate school in 1973, when the asymptotic freedom was just theoretically being discovered. You came to Japan the second time in 1994 and gave the interview we were just talking about, and it was roughly 20 years after that. Now it is 20 years after that, so I thought we should start up by trying to catch up with the second 20 years of your career and see what your thoughts have been on some of the most important progress, and then we can start from there and discuss them.

We have already started to talk about some of the developments since the interview in 1994, but maybe you can expand on that and tell us what you think have been the highlights in this area in the last 20 years.

Witten: Certainly, one of the highlights has been the understanding on non-perturbative dualities in string theory, as a result of which we have a much wider picture of what string theory is. In 1994, we knew about mirror symmetry and other two-dimensional dualities that arise in string perturbation theory, and we were really just beginning to think that there are similar dualities in space-time: four-dimensional gauge theory dualities that are analogous to the two-dimensional dualities. But in 1994, it was really just a guess that something analogous might happen

in string theory.

By this time there were clues in the literature, and a number of new ones had been discovered in the early 1990's. The clue that influenced me the most was the work of John Schwarz and Ashoke Sen, who showed that the low-energy effective action of the heterotic string on a six-torus had properties consistent with the existence of a non-perturbative $SL(2, \mathbf{Z})$ duality. They didn't have what I regarded as really decisive evidence for that conjecture, but their ideas were very suggestive.

It still was not clear to me how one could find decisive evidence for non-perturbative dualities in spacetime. At least to me, the first such evidence appeared in a short but brilliant paper by Ashoke Sen on a two monopole bound state in $N=4$ super Yang-Mills theory. To me, that was fundamentally new evidence for the Montonen-Olive duality conjecture. It convinced me that the duality had to be right, and equally important, it convinced me that it was possible to understand it better.

Ooguri: I thought that Sen's paper gave a strong evidence for the S-duality, but it was your paper with Vafa that convinced us.

Witten: Thank you. Sen's paper showed that you could actually go well beyond the suggestive but somewhat limited arguments about electric-magnetic duality that had been known, and learn something fundamentally new. Until Sen's paper, I had felt that what we understood about electric-magnetic duality, even the work of Sen and Schwarz, which had definitely influenced me, was in the framework of what Montonen and Olive had understood 20 years before. But Sen did a simple and elegant calculation, finding a bound

state of two monopoles whose existence was predicted by the duality. That inspired me to believe that one could do more.

With this inspiration, and trying to find more evidence for the duality conjectures, Cumrun Vafa and I started to study the Euler characteristics of instanton moduli spaces. It was not too hard to see that electric-magnetic duality of supersymmetric Yang-Mills theory implied that the generating function of those Euler characteristics should be a modular function. Luckily for us, mathematicians in a number of cases – and this includes the work of Nakajima that you mentioned before – had computed these Euler characteristics, or had obtained closely related results from which the Euler characteristics could be understood. We found that the expected modularity held in all cases. (In one case – the four-manifold CP^2 – we ran into a “mock modular form,” a concept that was new to us at the time but has made many subsequent appearances in gauge theory and string theory.)

Also during this period, Nathan Seiberg had been using holomorphy as a tool to analyze the dynamics of supersymmetric gauge theories. He wanted to understand what happened in $N=2$ theories. We started talking about it, and the Sen paper inspired us to think that duality would play a role. That was one of the clues that actually led to our work on what became Seiberg-Witten theory.

Ooguri: It may be hard to believe for young people like Masahito Yamazaki or Yukinobu Toda, but before 1994, S-duality at least for me was something very hard to believe. It was like a beautiful dream. It would

be nice to have, but you cannot realistically hope that something like that could possibly happen. As I said, the first evidence was Sen's paper and in some sense Edward's work with Vafa nailed it. After that, everybody believed it.

Yamazaki: That's surprising, because I thought that the paper of Claus Montonen and David Olive is quite old. Were people skeptical about the idea?

Witten: This might make you laugh, but I'll tell you my early history with the Montonen and Olive paper. First of all, I hadn't heard of it until I was visiting Oxford at the end of 1977. Michael Atiyah showed this paper to me and said I should go to London to discuss it with Olive. So, I looked at the paper and got in touch with David Olive and arranged to visit him. But by the time I got to London, I was pretty skeptical. Have you looked at their original paper?

Yamazaki: Yes, I have.

Witten: In their original paper, they considered a bosonic theory of a gauge field and a real scalar (valued in the adjoint representation). They assumed that the potential energy for the scalar field is identically zero, and they found remarkable formulas for particle masses that are valid precisely in this case. Their proposal of electric-magnetic duality was based on the fact that their mass formula was symmetrical between electric and magnetic charge.

However, I knew quantum field theory well enough to know that saying that the potential energy for the scalar field is 0 is not a meaningful statement quantum mechanically. If it were, we would not have a gauge hierarchy problem in particle physics. So, by the time I got to London to see Olive, I definitely

was a skeptic. But since I was there to see him, I didn't want to just say that his idea was nonsense. We tried to make sense out of it. So we discussed it in the context of supersymmetry, simply because with supersymmetry the mass renormalization (and even the full effective potential) of a scalar can be zero. This was the only context in which it seemed to me that the brilliant idea of Montonen and Olive could make sense. By the end of the day, we found that their formulas are valid in the context of $N=2$ supersymmetry. So we wrote a paper on that, and it was quite a satisfying paper to write, but I drew the wrong conclusion from that paper. The conclusion I drew was that we had explained their formulas without needing to assume non-perturbative duality.

Ooguri: Right. That was the message I got by reading your paper with Olive, too. The seemingly miracle phenomenon was explained simply by supersymmetry.

Witten: So at the time, and for many years after, I felt that there was not really a lot of evidence for non-perturbative duality in four dimensions.

Thus, to return to Masahito's question, I was a skeptic about electric-magnetic duality during these years, but actually I was a skeptic on two levels. One, I was skeptical that it was true, and two, I was skeptical that you could really say anything about it even if it were true.

To give a more complete picture, in the early 1990s, there were various novel clues, some from the work of people like Mike Duff, and also Curt Callan, Jeff Harvey, and Andy Strominger, studying solitons in string theory, and then also there was the work of Sen and Schwarz that I

already mentioned. I remember that, at the Strings '93 meeting in Berkeley, John Schwarz was more excited than I had ever seen him since January 1984. In January 1984, telling me about his latest work with Michael Green, he said "We are getting close," but I didn't understand what he thought he was getting close to. It turned out, however, that that was a few months before they canceled the anomalies. When John was so excited at the Strings meeting at Berkeley, I decided that I should better take him seriously.

If you had looked at it with the same skepticism I had had since the Montonen and Olive paper, you would have said that Sen and Schwarz were just discussing low energy physics and did not have solid evidence about strong coupling behavior. But John's enthusiasm put enough of a dent in my skepticism that I started looking more closely to the papers of Duff and other authors on solitons in string theory. At some point, I think in the fall of 1993, Duff sent me an assortment of his papers and I took them to heart. I don't remember right now all of the papers on solitons in string theory that I looked at during this period, but certainly one important one was by Callan, Harvey, and Strominger.

There is another part of the background to this period that I should explain.

Mike Duff, Paul Townsend, and other physicists working on supermembranes had spent a couple of years in the mid-1980s saying that there should be a theory of fundamental membranes analogous to the theory of fundamental strings. That wasn't convincing for a large number of reasons. For one thing a three-manifold doesn't have an



Euler characteristic, so there isn't a topological expansion as there is in string theory. Moreover, in three dimensions there is no conformal invariance to help us make sense of membrane theory; membrane theory is non-renormalizable just like General Relativity.

There are all kinds of technical objections, but at some point around 1990 or 1991, instead of trying to think of membranes as fundamental objects, people working in this area started thinking of membranes and other p -branes as non-perturbative objects that might exist in string theory. In general terms, this idea did make sense. In more detail, the situation was more complicated. If you actually looked at the papers, some of them made a lot of sense because they had a classical soliton solution with good properties. (Even then, the solutions usually had unusual properties that in some cases were clues to later discoveries.) Other papers made a little bit less sense, because the classical solution involved a singularity that appeared in a region in which the classical

approximation wasn't good. But the idea of membranes as non-perturbative soliton-like objects in string theory made a lot of sense even if the details in some papers were dubious. I was still a bit of a skeptic about what one can do with this idea, but for reasons I've been explaining, I was paying a lot more attention. And that is actually why, when the Sen paper on the two-monopole bound state came out, I was ready to completely change my outlook.

Sen's paper showed that one can do something new about strong coupling and it was clear that if one had been inspired the way Sen was, one could have done what he did 10 or 15 years before. So, it showed that we had been missing opportunities. That definitely changed the direction in my work. It led to the paper with Vafa that you've been kindly mentioning, and it helped put Seiberg and me on the right track for doing what we did in 1994 and then...

Ooguri: This is a great story that shows that chance favors the prepared mind, as Pasteur said.

After that, you even went to string dualities.

String Duality Revolution

Witten: By the end of 1994, we had the experience of non-perturbative dualities in field theory both in two dimensions and in four dimensions. In the two-dimensional case, for example, if you study a sigma-model with Calabi-Yau target space (such as is important in studying the compactification of string theory), one finds that the quantum theory can be extended far beyond the classical geometry of the Calabi-Yau manifold. One finds a web of phase transitions between different geometrical and non-geometrical descriptions of the sigma-model, which represent different semi-classical limits of the theory. The Montonen-Olive duality conjecture, as refined by later authors, said that something similar happens in $N=4$ super Yang-Mills theory in four dimensions, and Seiberg and I in 1994 had found something somewhat similar for $N=2$.

Certainly there was a dream that something similar might happen in string theory. Not only there was a dream, but there were a lot of papers in which people had pointed out pieces of such a story. I have already mentioned some of these papers. Another important paper was written by Chris Hull and Paul Townsend in the spring of 1995. They wanted to say that Type IIA superstring theory is the same as M-theory on a circle. The only thing they really didn't do was to try to make it more quantitative. There's a potential contradiction which is that in Type IIA superstring theory you don't see 11 dimensions. But it turns out, as I realized a little later, that this question has a very

simple answer. The 11-dimensional limit is a region of strong coupling from the point of view of Type IIA superstring theory, and the eleventh dimension isn't visible for weak coupling.

It soon became clear that the same thing was true in other cases. For example one might hope that Type I superstring theory and the $SO(32)$ heterotic string will be the same. There is an obvious immediate contradiction: the theories have the same massless spectrum and low energy interactions, but beyond the low energy limit they look completely different. The answer is simply that if you match up the low energy field theories, you will find that weak coupling in one is strong coupling in the other.

Once one starts thinking along those lines, it turns out that everything works. What were the implications? This way of thinking certainly led to a more unified picture of what string theory is. But very soon, there were further developments showing that the traditional ways of asking questions were probably inadequate. In the 1980s, I was really convinced that in some sense string theory should be based on a Lagrangian that would generalize the Einstein-Hilbert Lagrangian for gravity; it would have a symmetry group which would generalize the diffeomorphism group. So there would be a new classical theory of geometry – with non-perturbative two-dimensional dualities built in as classical symmetries. One would then generate string theory by quantizing this classical theory.

But by the early 1990s, there was a troublesome detail that I personally did not pay much attention to.



In the moduli space of Calabi-Yau manifolds, there are a variety of singularities. Some questions involving such singularities had been important in my own work.

Ooguri: You are referring to the work involving linear sigma-models.

Witten: That is correct, and also my work (with Harvey, Vafa, and Lance Dixon) on orbifolds. I had been interested in cases in which the classical geometry has a singularity but the quantum sigma-model does not; these cases illustrate the difference between ordinary geometry and its generalization in the classical limit of string theory. What I had not taken seriously is that in general, as one deforms the moduli of a Calabi-Yau manifold, one can find singularities of the classical geometry that *do* also lead to singularities of the corresponding sigma-model.

Such a singularity appears in string theory even in the classical limit, so if you try to interpret string theory as a classical theory that then gets quantized, it looks like the classical theory has a singularity, which is

strange. I personally didn't focus on that question, but Strominger explained that such a singularity actually reflects a non-perturbative quantum effect. The singularity arises when a charged black hole becomes massless and it shows that quantizing a classical theory can't do justice to string theory: there are non-perturbative quantum effects even in what one might have wanted to call the classical limit.

Ooguri: You say there's no analogous result in field theory, this is a genuinely string theory phenomenon.

Witten: I think so.

Ooguri: So, did you think this was an evidence that there is no Lagrangian description in string theory?

Witten: It is evidence that you can't fully do justice to string theory in terms of quantizing a classical theory. I don't want to say that there isn't a classical theory, because I believe that from some point of view there is.

Ooguri: Yes, as an approximate description, but you're saying that you cannot start from classical theory and apply quantization procedure...

Witten: We can't fully understand

string theory by quantizing an underlying classical theory. In some sense it is an intrinsically quantum mechanical theory.

I don't want to say you can't derive string theory by quantizing a classical theory, but you can't fully do justice to it that way, I think.

But let us remember that even in field theory, Montonen-Olive duality means that the same theory has different classical limits, showing that no one classical limit is really distinguished.

Ooguri: But in that case, you have a Lagrangian description.

Witten: Yes, in the Montonen-Olive case, one has a classical Lagrangian, in fact many of them. String theory is a little bit worse because even in what you want to call the classical limit, there are phenomena that you really can't make much sense of from the classical point of view.

Ultimately, Strominger's work illuminated something I'd missed. In the talk I gave at the Strings Conference in 1995 about non-perturbative dualities in string theory, and also in the corresponding paper ("String Theory Dynamics In Various Dimensions"), there was one detail that didn't completely make sense. Type IIA superstring theory on a $K3$ manifold was supposed to be dual to the heterotic string on a four-torus, and in that context, I could see that enhanced gauge symmetry resulted from the $K3$ surface developing an ADE singularity. But an ADE singularity in classical geometry is just an orbifold singularity, and perturbation theory remains valid in string theory at an orbifold. The orbifold does not generate a non-perturbative gauge symmetry. For a few months, I was puzzled. Actually, I was making a simple mistake which

was corrected by Paul Aspinwall in a paper that he wrote in the summer of 1995. Aspinwall explained the following: In M-theory at an ADE singularity, you have only the hyper-Kahler moduli, but in string theory at an ADE singularity, there also are B -field moduli. The conformal field theory becomes singular when the B -field moduli are zero; the orbifold describes a non-singular situation in which the B -field moduli are not zero.

When the B -field moduli vanish, there is a breakdown of the classical description that's just analogous to what Strominger had shown in his paper on the Calabi-Yau singularity. It leads to enhanced gauge symmetry that, from the standpoint of Type IIA superstring theory, has a non-perturbative origin.

Strominger had considered a charged black hole that arises from a wrapped three-brane, while here the relevant particle is a wrapped two-brane. But the idea is similar.

Ooguri: So this was the beginning of interaction between gauge theory idea and string theory idea where non-Abelian, non-perturbative dynamics of gauge theory can emerge from limits of string theory.

Witten: Right. Another important but extremely simple paper that helped show the implications of string theory for non-perturbative duality in gauge theory was written by Michael Green in 1996. By this time, Joe Polchinski and his collaborators had basically shown that in modern language a system of n parallel branes has $U(n)$ gauge symmetry. I had written a paper at the end of 1995 showing why that was useful, but Green wrote a very simple paper with the following observation. Type IIB superstring theory has a non-perturbative duality symmetry –

a fact which we were convinced of by this time – and on the other hand $N=4$ super Yang-Mills theory in four dimensions with gauge group $U(n)$ can arise from a system of n parallel D3-branes in Type IIB superstring theory. Combining these two facts and taking the low energy limit, Green was able to deduce the Montonen-Olive duality of $N=4$ super Yang-Mills theory with gauge group $U(n)$. It is simply inherited from the Type IIB superstring theory specialized to the D3-branes.

That was an important early example of deducing a gauge theory duality from a string theory duality.

Even before all of this had happened, Mike Duff and Ramzi Khuri in 1993 had written a paper on what they called string/string duality. They had said there should be a self-dual string theory in six dimensions which looked at in two different ways would give electric-magnetic duality of gauge theory in 4 dimensions. It was actually a brilliant idea. The only trouble was they didn't have an example in which it worked.

I realized in mid-1995 that if one took the heterotic / Type II duality on $K3$ and T^4 and compactified on another two-torus, one would get an example rather similar to what Duff and Khuri had suggested. They had had in mind self-duality of a string theory, but the example that I considered was a duality between two different string theories. Still the idea was similar. By the end of 1995, Duff and I and some other authors had an example that followed even more precisely what had been proposed two years before. That involved the $E_8 \times E_8$ heterotic string on a $K3$ surface with equal instanton numbers in the two E_8 's. In all of these cases, one could deduce

Montonen-Olive duality from a string theory duality.

As we're talking, I remember more and more papers from the years 1995-6 that were very dramatic at that time, but that were also, honestly, pretty easy to do in most cases. I was reminded of this yesterday by the lecture by Hiraku Nakajima at the Kyoto Prize Workshop. Hiraku started by kindly remembering three lectures I gave at the Newton Institute in 1996. The lectures concerned three papers that I had written (respectively with co-authors Lev Rozansky, Ami Hanany, and Nathan Seiberg). The papers fit together nicely. They were fun to write and the lectures were also fun to give. But what stands out in my memory is that at that time insights like that were more or less out on the surface. It was quite a fun time to be working in this field. I am hoping that during my active career, there will be another period like that.

Difference between Knowing What Is True and Why It Is True

Toda: I am an algebraic geometer. I was originally working on some classical aspect of algebraic geometry, but I became interested in some relationships between algebraic geometry and string theory inspired by your work. You have been discussing S-duality and modular forms. This was surprising from a mathematical point of view - I cannot see why modularity appears. Do you have an insight about that from a mathematical point of view?

Witten: Vafa and I, of course, had a reason, which was the Montonen-Olive duality conjecture. What we did was to show that modularity of a certain generating function of Euler characteristics is a kind of corollary of Montonen-Olive

duality. This is somewhat analogous to saying that some statement in number theory follows from the Riemann conjecture. If somebody shows that something follows from the Riemann conjecture, one may or may not view this as an explanation of the statement in question, but at least it puts the statement in a bigger framework. Montonen-Olive duality provided an analogous bigger framework in my work with Vafa, and soon afterwards there was a still bigger framework, which was that the Montonen-Olive duality follows from the existence of a certain six-dimensional theory. It also follows in various other ways from string theory dualities and I have mentioned a few of these constructions. But most physicists would probably say the most complete framework that we have for Montonen-Olive duality is its relation to the six-dimension theory.

Ooguri: Yukinobu was asking for some mathematical explanation. At that time, some hint of the mathematical explanation was Nakajima's work, about the symmetry of the moduli spaces of instantons. From the mathematical point of view, what the Vafa-Witten theory was computing were generating functions of the Euler characteristics of instanton moduli spaces.

Witten: Nakajima's discovery of the affine Lie algebras was a kind of proof, and actually a miraculous discovery. But it still leaves one wondering where the affine Lie algebra symmetry came from.

Toda: Right. After computations of the Euler characteristics, we know that it's a modular form but we don't know why it is modular, even for the simplest example.

Witten: I completely agree. What you're saying is actually something I

tried to say in my Commemorative Lecture for the Kyoto Prize. There is a difference between knowing what is true and knowing why it is true. In this case, you have a mathematical proof, but you're still asking why, and physicists ultimately don't know. All that we can do is to offer bigger conjectures, of which this is a manifestation. But we don't really understand the bigger conjectures.

Ooguri: In physicists' perspective, this duality has been geometrized as symmetry in six dimensions.

Witten: But the six-dimensional theory is pretty mysterious.

Toda: Is it not difficult to understand the relationship between S-duality and six dimensional theory?

Ooguri: The relation is very clear, but then you have to make sense of the six-dimensional theory itself.

Witten: We actually know quite a lot about the behavior of the six-dimensional theory, though we do not understand much about how it should be constructed or understood microscopically.

One of the deepest discoveries about the behavior of the six-dimensional theory was made by Juan Maldacena in 1997. He showed that it could be solved for large N in terms of supergravity. Unfortunately, the regime in which the theory is solved by supergravity isn't the same regime in which we usually have to study it to understand the questions you're asking.

Ooguri: I understand that the large N limit is not S-duality invariant.

Witten: Yes, that is correct.

Maldacena's solution of the theory for large N works and makes complete sense. It does not directly help us in understanding Montonen-Olive duality, because it involves studying the theory in a different

region of parameters that is not invariant under duality. Or to put it differently, if one tries to apply Maldacena's solution to understand Montonen-Olive duality, one has to work in a region of parameters in which the description that Maldacena gave is not useful.

But the existence and success of Maldacena's solution definitely increases the confidence of physicists that the six-dimensional theory exists and that all the canonical statements about it are true, even though we don't understand everything. It's a little bit like mathematicians discovering that some new consequences of the Riemann conjectures are true. This gives one more confidence in the Riemann conjecture, but it doesn't mean one understands the Riemann conjecture.

Ooguri: Yukinobu, what is your view on current activities in physics? For example, yesterday Nakajima was saying that it took him 18 years to understand what Edward was doing in his lectures in Cambridge, and Kenji Fukaya was saying that sometimes he doesn't understand even the statement because you don't understand the right-hand side and left-hand side of equations physicists write, for example. You have been at the Kavli IPMU for several years, interacting with physicists, so do you have any perspective to offer...?

Toda: Of course, I don't know anything about string theory, but sometimes I look at papers and some calculations, and try to translate physics words into mathematics, say D-branes to sheaves or BPS states to stable objects. Then I have lots of things to learn from the physics side, and lots of problems to solve, although I don't understand their physics origin. I also found that they

are related to the classical problem in algebraic geometry.

Ooguri: You also attend string theory seminars. What do you gain by attending them and interacting with physicists?

Toda: I think there are many kinds of people in string theory. Some people's works are close to me, like Donaldson-Thomas invariants and derived category of coherent sheaves. In their seminars, I can learn something, but that is almost a seminar of mathematics.

Ooguri: A mathematician told me that physicists are like generating functions of conjectures. Some physicists are more useful for mathematicians than others. For example, Hiraku Nakajima was telling me that he particularly likes Edward's lectures, because even though he doesn't understand the motivations and where ideas come from, some of the statements Edward makes have sharp mathematical meanings to them, just like the equation that Tachikawa was quoting yesterday at the workshop and these are something that mathematicians can work on.

Yamazaki: But then sometimes people want to know the logic behind it. I can make a statement that makes sense mathematically, and mathematicians can try to prove it. But they definitely want to know what's happening.

Witten: In any given case, I can't guarantee that there isn't a simpler answer. But the view of most physicists about many of the problems that we have been discussing is going to be that the best setting for these questions is in the quantum field theories that are important in physics.

Quantum Entanglement

Ooguri: We are still discussing what was happening in the '90s. Now, we should move on to the new millennium. What do you think have been highlights in the past 14 years?

Witten: Part of the answer is that the gauge-gravity duality that was introduced by Maldacena is very deep. Even today people are still discovering interesting new facets of it. An important example was the work of Shinsei Ryu and Tadashi Takayanagi on entanglement entropy in gauge/gravity duality. They discovered a really interesting generalization of the Bekenstein-Hawking entropy of a black hole. Although I have not personally worked on this subject, the developments have been pretty interesting and may contain deeper clues about quantum gravity. If I could see the right way to do this, then I would probably work in this area myself, but at least so far I don't. But it's one of the things I'd recommend watching most closely.

Apart from Ryu and Takayanagi, I also would definitely recommend the papers of Horacio Casini, in some cases co-authored with Marina Huerta. One of these papers addressed the following question. A black hole has a Bekenstein-Hawking entropy. Roughly 20 years ago, Jacob Bekenstein considered the following question. Suppose an object falls into a black hole. The object has an entropy. When it falls into a black hole, its entropy disappears into the hole. The black hole gains mass when it absorbs the object, so its entropy goes up. The second law of thermodynamics says the total entropy should increase in this process, so in other words the black hole entropy increases by at least

the entropy that the infalling object had before approaching the black hole. This tells you basically that if an object has given energy and is small enough to fit inside a black hole of given mass, then there's an upper bound to its entropy. Bekenstein proposed such a bound, and people called it the Bekenstein bound, but for a long time no one could formulate precisely what this bound was supposed to say.

I am reminded here of what Fukaya said about the relationship between physics and mathematics, where he remarked that it can be hard to formulate precisely the terms that enter some of the statements made by physicists. In the case of the Bekenstein bound, the situation was as follows. In a situation in which the concepts (the size, energy, and entropy of the infalling object) have clear meaning, the Bekenstein bound was trivially true and not very interesting. For example, consider a gas consisting of many particles bouncing around in a box. Here the size of the system and its energy and entropy all have a clear meaning. The Bekenstein bound was true but not very interesting because it was satisfied by a very wide margin. You could ask, could you find a situation where the Bekenstein bound is close to being saturated? You can accomplish this by considering not a whole gas of particles but a single particle in a box. More exactly, this gets close to saturating the Bekenstein bound if we can ignore the mass of the box, but that is an unrealistic assumption. To get close to saturating the Bekenstein bound, we really should consider a single particle that at a given time is almost certainly contained in a certain region in spacetime even though

there is no box keeping it there. (I say "almost certainly" because relativistic quantum mechanics does not permit us to say that a particle is definitely present in a given region.) Here for a single particle, we can define its energy, and we can identify (within general limits of relativistic quantum mechanics) the region that it is confined in, but it is hard to make sense of the entropy of a single particle. For a long time, there were many papers discussing this, many dozens and probably hundreds of papers, for the most part with limited insight. Then, there was a simple and quite brilliant paper by Horacio Casini, who showed that the right concept is entanglement entropy and that it can always be defined in a natural way and does enter in a universal Bekenstein-like bound. This paper was well ahead of the prevailing thinking in the field and it was a number of years, I think, before people widely appreciated it.

Ooguri: For example, Casini's paper solved the species problem that I had been puzzled about for some time and gave a convincing explanation that it's not an issue.

Witten: There were what people thought were counter-examples to the Bekenstein bound, and so some people, and I was one, thought that if the bound was true, it was a statement about quantum field theories that can be coupled to gravity, not about all quantum field theories. But Casini showed that this was completely wrong. He gave a precise meaning to all the terms that entered the Bekenstein bounds, and he showed that it was a universal statement of quantum field theory that follows from general principles. That was extremely illuminating and like other work on entanglement

entropy, one suspects it's probably an important clue, but it might take a younger person than me with fresh thinking to see what it is an important clue to.

I do want to mention one more contribution in that direction, which is by Casini and Maldacena with Rafael Bousso and Zachary Fisher (BCFM). Years ago, Bousso had formulated a covariant version of the Bekenstein bound; it is well adapted to problems in cosmology. Everything I have said about the Bekenstein bound has an analog for the Bousso bound. When you understood what it meant, it wasn't very interesting, and when it was interesting, you couldn't understand what it meant. In the recent work of BCFM, a precise formulation and proof of the Bousso bound is given, at least for quantum field theory in flat spacetime.

Ooguri: I see that this new joint activity between quantum gravity and quantum information theory has become very exciting. Clearly entanglement must have something to say about the emergence of spacetime in his context.

Witten: I hope so. I'm afraid it's hard to work on, so in fact, I've worked with more familiar kinds of questions. I have spent a lot of the last decade or maybe even little bit more than a decade maybe by now working on a succession of problems that probably were a little bit more out of the mainstream than most of my previous work. Also, I simply worked on these problems much longer than I usually worked on any one problem in the past. I guess the three problems that best fit what I have just said have been gauge theory and the geometric Langlands program, gauge theory and Khovanov homology, and superstring perturbation theory.

Superstring perturbation theory is best understood in terms of super Riemann surfaces, a fascinating mathematical subject that I hope mathematicians will get interested in. Super Riemann surfaces are a generalization of ordinary Riemann surfaces to include odd or anticommuting variables. There is a fascinating algebro-geometric theory that people partially developed in the 1980s and then abandoned. It would be great if it gets revived. By the way, we are having a workshop next May at the Simons Center for Geometry and Physics in Stony Brook and algebraic geometers might be interested in it.

Ooguri: Do you think there will be a genuine new mathematics coming out in these fermionic dimensions?

Witten: I am sure that the algebraic geometry of super Riemann surfaces is exciting, and unfortunately, a lot of what was understood in the 1980s existed only in the form of unpublished notes or letters. I hope that our workshop will help change this situation.

Khovanov Homology

Yamazaki: I was attending your lecture yesterday and you were explaining how you came to the idea that Khovanov homology can be written as $N=4$ super Yang-Mills integrated over an unusual integration cycle. One thing that impressed me there was that your previous papers were the crucial input, namely your work with Anton Kapustin in which you formulated the Kapustin-Witten equation, and also subsequent work you did with Davide Gaiotto on boundary conditions in $N=4$ super Yang-Mills theory. When you worked on these papers, did you

already have in mind application to Khovanov homology?

Witten: The answer is “no”: in those years, I knew about Khovanov homology and I was frustrated to not understand it, but I had no idea it was related to geometric Langlands. I was frustrated at not understanding Khovanov homology, because I felt that my work on the Jones polynomial ought to be a good starting point for understanding Khovanov homology, but I just could not see how to proceed. (From a mathematical point of view, Khovanov homology is a refinement or “categorification” of the Jones polynomial of a knot.) Actually, Sergei Gukov, Albert Schwarz and Vafa had already given (in 2004) a physics-based interpretation of Khovanov homology, drawing in part on earlier work of Ooguri and Vafa. But I found it perplexing and a little frustrating that the relation of this to gauge theory was so indirect and remote. I wanted to find a more direct route but for several years I found this difficult.

Eventually, however, some developments in the mathematical literature helped me understand that Khovanov homology should be understood using the same ingredients that are used to understand geometric Langlands. I didn’t understand all of these clues, but I learned from two of them. One was the work of Dennis Gaitsgory on what mathematicians call quantum geometric Langlands (I am not sure this is the name a physicist would use) showing that the q parameter of quantum geometric Langlands is related to the q parameter of quantum groups and the Jones polynomial. The other was the work of Sabin Cautis and Joel Kamnitzer

constructing Khovanov homology using a space of repeated Hecke modifications. I did not initially know what to make of those clues but they were a sort of red flag hanging out there.

Hecke transformations are one of the most important ingredients in geometric Langlands. What they mean in terms of physics had bothered me for a long time, and eventually had been the last major stumbling block in interpreting geometric Langlands in terms of physics and gauge theory. Finally, while on an airplane flying home from Seattle, it struck me that a Hecke transformation in the context of geometric Langlands is simply an algebraic geometer’s way to describe the effects of an “’t Hooft operator” of quantum gauge theory. I had never worked with ’t Hooft operators, but they were familiar to me as they had been introduced in the late 1970s as a tool in understanding quantum gauge theory. The basics of how to work with ’t Hooft operators and what happens to them under electric-magnetic duality were well-known, so once I could reinterpret Hecke transformations in terms of ’t Hooft operators, many things were clearer to me.

Cautis and Kamnitzer had interpreted Khovanov homology in terms of the B-model of a space of repeated Hecke transformations. Kamnitzer also conjectured in another paper that there would be an alternative description in terms of an A-model of the same space. Technically, it was hard to find the right A-model. I really wanted to understand the A-model, because that was the approach in which one could expect to achieve manifest three- or four-dimensional symmetry.

My main goal in studying Khovanov homology was to find a description with manifest symmetry and a clear relationship to the gauge theory description of the Jones polynomial. I eventually succeeded in doing this. One of the trickiest elements was that the gauge fields have to obey a subtle boundary condition that I call the Nahm pole boundary condition. (The basic idea that leads to the Nahm pole boundary condition was introduced by Werner Nahm more than 30 years ago, in his work on magnetic monopoles.) Luckily for me, I was familiar with the Nahm pole boundary condition and its role in electric-magnetic duality because of work that I had done with Davide Gaiotto a few years earlier.

I suspect that the mathematics world could appreciate my work on Khovanov homology in the short to medium term and that the obstacle to this is largely a lack of familiarity with the Nahm pole boundary condition. With this in mind, I have been working with Rafe Mazzeo trying to give a detailed mathematical theory of that boundary condition. We have written one paper formulating rigorously the Nahm pole boundary condition in the absence of knots, and we are trying to generalize this to include the knots. The necessary inequalities are available but some details are not yet in place.

Yamazaki: I see. That's a very nice story of the physics-mathematics interaction. You were partly motivated by the important papers in mathematics and interpreted them as a physicist. Then you have your own physics story and you are now trying to bring it back to mathematics.

Witten: As I have mentioned, the version that Cautis and Kamnitzer were actually able to understand

was the B-model. Since it doesn't have manifest three-dimensional symmetry, I decided to concentrate on the A-model, but if I ever have a couple of months to spare, I would try to explain as a physicist the Cautis and Kamnitzer B-model. I'm reasonably optimistic I could do that and I think it would be illuminating. The only problem is that there are a lot of things like that – interesting loose ends that I think I could clarify if I spend a few months on them.

Langlands Correspondence and Gauge Theory Dualities

Ooguri: That the Langlands correspondence has something to do with S-duality was there even in the late '70s. When was it that you actually realized the significance of it?

Witten: I didn't give the complete explanation of my interaction with Michael Atiyah in 1977. He told me about two things that were new to me. One was the Montonen-Olive paper and the other was the Langlands correspondence, which plays a central role in number theory but which I had never heard of. He had noticed that the dual group of Langlands and the dual group that enters the Montonen-Olive conjecture (and which had been introduced earlier by Peter Goddard, Jean Nuyts, and Olive) were the same. On this basis, Atiyah suspected that the Langlands correspondence has something to do with the Montonen-Olive conjecture.

Ooguri: So that was in the late '70s?

Witten: It was December of 1977 or January of 1978. That was when I visited Oxford for the first time.

Ooguri: Did you take that seriously already at that time that the Langlands correspondence had

something to do with this gauge theory dynamics?

Witten: Well, I didn't forget about it, but since – as I already told you – I was skeptical about Montonen-Olive duality, I didn't seriously try to relate it to Langlands duality and I didn't try to learn what Langlands duality was. I did not learn anything more about these matters until the late 1980s. Then I learned just superficially about the Langlands correspondence. If one knows even a little bit about the Langlands correspondence and a little bit about conformal field theory on a Riemann surface, one can see an analogy between them. I wrote a paper that was motivated by that but then I realized that my understanding was too superficial to lead to anything deep, so I abandoned the matter for a number of years.

Ooguri: I remember when I was a postdoc at the Institute for Advanced Study in 1988 and 1989, Robert Langlands himself was actually quite interested in conformal field theory. I am not sure exactly which aspect he was interested in, however.

Witten: I don't think he was motivated by the Langlands correspondence. But I think his work was influential. Even though in a sense he didn't precisely make any major breakthrough himself, he helped to find the questions that stimulated the later development of Stochastic Loewner Evolution, which has had a major impact on mathematics and has even enlightened physicists about new ways to think about some questions in conformal field theory. I think Langlands was an influence behind this work, but I do not believe his interest in conformal field theory was motivated by the the Langlands correspondence or by gauge theory

dualities. This is my impression from interacting with him over the years.

As I have already remarked, in the late 1980s, after spending some time trying to develop the analogy between conformal field theory and the Langlands correspondence, I concluded reluctantly that the analogy in the form I was developing was way too superficial, so I stopped. But then around 1990, I heard about new work of Alexander Beilinson and Vladimir Drinfeld on the geometric Langlands correspondence. This had a few consequences. First of all, it confirmed that my understanding of what the duality would mean in physics was way too superficial. What they had was much more incisive and much more detailed than my rather primitive analogy between the Langlands correspondence and conformal field theory. Their work confirmed that physics that I knew was relevant. But I was troubled, because they were using conformal field theory in a way that didn't make any sense to me. They studied conformal field theory at negative integer levels – in physics positive integers are more natural here – and used it in ways that looked quite strange.

As I explained yesterday in my lecture at the Kyoto Prize Symposium, for a number of years, the “volume conjecture” concerning the Jones polynomial (formulated and developed starting around 2000 by Rinat Kashaev, Hitoshi Murakami, and Jun Murakami, among others, and explained to me in large part by Sergei Gukov) bothered me. Although their statements bore a superficial resemblance to physically well-motivated statements – in fact to statements that I myself had made in my original paper on

the Jones polynomial in 1988 – there was a crucial difference. They seemed to have complex critical points that made exponentially large contributions, and this normally is not possible in physics. I am not sure if this point bothered anyone else, but it bothered me. It turned out that this was a good question to think about, since I eventually found a nice explanation, and this was a turning point in enabling me to understand Khovanov homology via gauge theory.

The work of Beilinson and Drinfeld on geometric Langlands bothered me in much the same way. They were using familiar ingredients of physics but they were using them in ways that did not seem to fit. It looked like somebody had taken a bunch of chess pieces, or perhaps here in Japan I should say a bunch of shogi pieces, and placed them on the board at random. The way that the pieces were arranged did not make any sense to me. That bothered me but I could not do anything about it.

Actually, the very little bit of what Beilinson and Drinfeld were saying that I could understand made me wonder if the work of Nigel Hitchin would be relevant to them, so I pointed out to them Hitchin's paper in which he had constructed commuting differential operators on the moduli space of bundles on a curve. Differently put, Hitchin had in a certain sense quantized the classical integrable system that he had constructed a few years before. Although I understood scarcely anything of what Beilinson and Drinfeld were saying, I did put them in touch with Hitchin's work, and actually, in their very long, unpublished foundational paper on geometric Langlands that you

can find on the web, Beilinson and Drinfeld acknowledged me very generously, far overestimating how much I had understood. All that had really happened was that based on a guess, I told them about Hitchin's work, and then I think that made all kinds of things obvious to them. Maybe they felt I knew some of those things, but I didn't. But anyway, there were ample reasons in those years to think that geometric Langlands had something to do with physics, but as you can see I still couldn't make any sense out of it.

Ooguri: So, what inspired you to return to this?

Witten: A decade later there was a workshop at the Institute for Advanced Study on geometric Langlands for physicists. Were you there?

Ooguri: I was invited, but there was a conflict of schedule, so I couldn't go. I missed it.

Witten: There were two long series of lectures and then there were a couple of outliers. The long series were very well done, but they did not help me very much. Mark Goresky gave a long series of lectures aiming to tell physicists what is the Langlands correspondence. The only trouble for me was that to the extent that one can explain this topic in a couple of lectures, assuming essentially no knowledge of algebra beyond the definition of a field (in the algebraic sense), I was familiar with the Langlands correspondence already. Namely I didn't really know anything about it, but I knew as much as one could explain in a few hours starting from zero. So I couldn't really get much out of those lectures.

In addition, Ed Frenkel (who had been the prime mover behind the occurrence of this workshop) gave

a series of lectures that, as far as I was concerned, were basically about the shogi board on which the pieces have been arranged at random. I really couldn't get much out of those lectures either because I already knew that people working on the geometric Langlands were taking familiar pieces from the shogi set and arranging them on the board at random as far as I was concerned.

There were a couple of additional lectures that weren't part of any series. One of them was by David Ben-Zvi. He told us about what was supposed to be an approximation to the geometric Langlands correspondence. I think he was talking largely about the work of another mathematician, Dima Arinkin. What was supposed to be the approximation to the geometric Langlands correspondence was T-duality on the fibers of the Hitchin fibration. This was described by Ben-Zvi in a complex structure in which the fibers of the Hitchin fibration are holomorphic, so the T-duality is a holomorphic duality. It was already known to physicists that the T-duality on the fibers of the Hitchin fibration comes from Montonen-Olive duality in four dimensions, and of course ever since Atiyah's observations of 1977-8, I had been aware of the possibility that some version of the Langlands correspondence might be associated to Montonen-Olive duality. But what about the fact that Ben-Zvi was only claiming to deduce from T-duality an *approximation* to geometric Langlands duality, rather than the real thing? At a certain point, I started to suspect that the reason for this was simply that Ben-Zvi was describing the situation in the wrong complex structure. The idea was that the same T-duality of Hitchin's

moduli space, viewed differently, would give a mirror symmetry between a B-model in a certain complex structure and an A-model in a certain symplectic structure. This mirror symmetry was supposed to be the true geometric Langlands duality, not the approximation. Actually, the reason I started working on geometric Langlands with Anton Kapustin was that he had studied generalized complex geometry in two-dimensional dualities. In that world, a family of dualities can degenerate, and a mirror symmetry can degenerate to a holomorphic duality.

When one starts thinking along these lines, it soon makes a lot of sense that the geometric Langlands duality is really a mirror symmetry, which can degenerate to a holomorphic duality, and that this is the approximation Ben-Zvi taught us about. I became convinced that that had to be right. There were still a few hurdles to overcome. The most difficult one I already described earlier. One does not get to first base with the Langlands correspondence without Hecke operators, so it was necessary to have a physical interpretation of Hecke operators in terms of 't Hooft operators of gauge theory. It was also necessary to know how to interpret the A-model of the cotangent bundle of a complex manifold M in terms of differential operators on M . This actually was fairly close to things that Kapustin had done earlier. Once these points were understood, it was pretty clear to me as a physicist what is geometric Langlands duality.

But it was very hard to write a paper about it. It took about a year. For that year, I felt like someone who had discovered the meaning of life

and couldn't explain it to anybody else. And in a sense, I still feel that way for the following reason. Physicists with a background in string theory or gauge theory dualities can understand my paper with Kapustin on geometric Langlands but for most physicists this topic is too detailed to be really exciting. On the other hand, it is an exciting topic for mathematicians, but difficult to understand because too much of the quantum field theory and string theory background is unfamiliar (and difficult to formulate rigorously). That paper with Kapustin may unfortunately remain mysterious to mathematicians for quite some time.

Yamazaki: Maybe that means that we have to wait an extra 10 or 15 years before...

Witten: We indeed may have to. I think it's actually very difficult to see what advance in the near term could make the gauge theory interpretation of geometric Langlands accessible for mathematicians. That's actually one reason why I'm excited about Khovanov homology. My approaches to Khovanov homology and to geometric Langlands use many of the same ingredients, but in the case of Khovanov homology, I think it is quite feasible that mathematicians could understand this approach in the near future if they get excited about it. I believe it will be more accessible. If I had to bet, I think I have a decent chance to live to see gauge theory and Khovanov homology recognized and appreciated by mathematicians, and I think I'd have to be lucky to see that in the case of gauge theory and the geometric Langlands correspondence – just a personal guess.

Toda: Do you think your idea of the S-duality and the

geometric Langlands can be somehow applied to the honest Langlands program?

Witten: I see that as being far away. For me personally – it’s a dream that eventually number theory would make contact with physics some time, but I doubt it will be soon.

There are all kinds of areas where specific number theory formulas appear in physics, and these may be clues that the dream will come true one day. But to really get me excited, somehow the number theory would have to enter the physics in a more structural way. I’m not that interested in a specific formula that comes out of a physics calculation in a more or less ad hoc fashion. Number theory would have to be more integrated with the physics to get me excited, and I don’t see that happening soon.

In my work, I concentrated on the geometric form of the Langlands correspondence because I could see that there was hope to really understand it in the context of the physics-based tools that were at hand. There might be something like that one day for the Langlands correspondence of number theory, but probably a lot is missing and we do not know what has to happen first. I feel that the reason I was able to make progress was that my focus was much more narrow than trying to understand the Langlands correspondence of number theory.

Toda: The relationship between S-duality and geometric Langlands was surprising to me, as the number theory seems to be a research area far from physics.

Witten: Nevertheless there have been many developments, which one day may be seen as important clues. One of the deepest was started roughly fifteen years ago by

Savdeep Sethi and Michael Green and then continued by Green with many collaborators. In the original work, Sethi and Green were trying to understand certain low energy R^4 interactions in Type IIB superstring theory in ten dimensions (here R is the Riemann tensor). They made an amazing discovery, I would say: the answer is given by a certain non-holomorphic Eisenstein series of weight $3/2$. Although my knowledge of number theory is very superficial, I think that this sort of thing is much closer to the interests of modern number theorists than the kind of classical modular forms that usually appear in two-dimensional conformal field theory.

Ooguri: Those objects which are not totally modular have also appeared in number theory.

Witten: That is correct. A lot of things that number theorists like have appeared in physics, and some have even appeared in my own work. Plenty has been found to show that the physics theories that we work on as string theorists are interesting in number theory. They know something about number theory but personally I don’t see an opportunity to really make contact in a structural way with number theory in the foreseeable future. I can’t even formulate what it would mean to make such contact, so I can’t even properly tell you what we can’t do but I think the time is not right to do it.

Anyway, that’s why I personally concentrated on geometric Langlands rather than on number theory, and geometric Langlands was hard enough. It was a lot of work to understand it, but I think that having understood it, many things that mathematicians do involving geometric aspects of representation

theory are much more accessible as part of physics. For example, I did not understand what Hiraku Nakajima explained yesterday at the Kyoto Prize Workshop, but I think that an understanding might involve some of the things that were clear after working with geometric Langlands. I can’t promise but it is worth a try.

Just one obvious thing is that although Nakajima did not have time to explain the whole picture, at the end of his lecture he was telling us about the affine Grassmannian. Isomorphism classes of t ’ Hooft operators are associated to cycles in the affine Grassmannian, so if a mathematician tells you about the affine Grassmannian, you probably want to think about at least part of what you are hearing in terms of t ’ Hooft operators. I can make no promises, but I feel it would definitely be worth a try to understand what Nakajima was saying from a physicist’s viewpoint.

I am sure, at any rate, that there is much more that can and should be done to understand much more of geometric representation theory from a physical viewpoint. In fact, part of the original work of Beilinson and Drinfeld on geometric Langlands has still not been understood to my satisfaction. Here I have in mind the use of conformal field theory at what they call the critical level (level $-h$, where h is the dual Coxeter number) to construct the A-model dual of certain B-branes (the ones that are associated to opers, in the language of Beilinson and Drinfeld). Davide Gaiotto and I obtained a few years ago a reasonable understanding of what electric-magnetic duality does to the variety of opers, but I still do not really feel I understand its relation to conformal field theory. However, in

the last few years physicists working on supersymmetric gauge theories in four dimensions and their cousins in six dimensions have made several discoveries involving the role of conformal field theory at the critical level, so the time may well be right to resolve this point.

Ooguri: I think we have about 10 more minutes. Is there any final question?

How to Work with Mathematicians

Toda: I have some general question. What kind of problems mathematicians should work on?

Witten: Well, there are lots of problems that algebraic geometers study that involve dualities studied by physicists. In many of those cases, I will not be able to give much advice as I am not an expert on recent developments. In some cases, I am still struggling to understand things that physicists did quite some time ago that are very relevant. Just to give one example, the Gopakumar-Vafa and Ooguri-Vafa formulas have been very influential for algebraic geometers, but as a physicist, I was never satisfied that I understood them. So I actually spent a lot of time in the last year with a student (Mykola Dedushenko) trying to understand these formulas better. In this work, I was doing some of the homework that I'd have to understand before even trying to answer your question.

We more or less have the paper finished on the Gopakumar-Vafa and Ooguri-Vafa formulas, I am glad to say.

Ooguri: You will talk about it next week at the Kavli IPMU (later published as a paper, <http://arxiv.org/abs/1411.7108>).

Witten: Going back to Yukinobu's

question, although there are many areas of current interest on which I probably cannot give useful advice, there is one bit of advice that I actually would offer to algebraic geometers. I do recommend super Riemann surfaces. I'm sure there's a deep theory there. I can't promise anything about how quickly it will emerge. A deep theory will probably only be developed in the near term if enough people get excited about it. Maybe the workshop we are having next spring at the Simons Center will help make that happen but I can't promise anything.

Ooguri: It's certainly true that, when people were working on the finiteness and vanishing of the cosmological constant in perturbative string theory 25 - 30 years ago, it was not totally satisfactory. The complete understanding only came after your proper description in terms of geometry of super Riemann surfaces.

Witten: Thank you, Hiroshi, and I'm glad you think so. Not all physicists agree, because it is possible to express everything in terms of picture-changing operators and so on, hiding the super Riemann surfaces. I think personally that when one does that, one doesn't understand properly what the formulas mean. But not everybody agrees.

I think one reason that the theory of super Riemann surfaces stopped developing in the 1980s was that physicists became satisfied with their partial understanding in which the super Riemann surfaces were hidden. There is a tremendous beauty to this subject that I think is simply missed if you try to understand things that way. I care about it enough to have spent several years by now on spelling out details of the description in terms of super Riemann surfaces.

It has seemed unclear that a lot of physicists would really get excited about the sort of details that I was trying to fill in. So one of my hopes has been that mathematicians will get excited about developing super Riemann surface theory. I can't promise but I think they should.

Ooguri: Do you expect also new physics insight coming out from the more precise understanding of perturbative string theory?

Witten: The answer may depend on what you mean by physics insight. I think that one understands better what superstring perturbation theory means if one formulates it in terms of integration on the moduli space of super Riemann surfaces. That is insight of a sort. However, I do not see any evidence at the moment that incorporating super Riemann surfaces in the way that we understand perturbation theory will help us with non-perturbative questions, for example, or with understanding better the symmetry structure of string theory, or whatever may be the correct concept.

Yamazaki: Let me ask my last question. You're working partly in the area of mathematical physics. You have a lot of discussion with mathematicians, and also write math papers.

Witten: Well, I write math papers in very special cases where I think something I could actually do would be illuminating. Recent examples have been my work with Ron Donagi on some foundational questions about the moduli space of super Riemann surfaces, and the work with Rafe Mazzeo that I mentioned before on the Nahm pole boundary condition.

Yamazaki: I see. So, my question is – what's the advice if a physicist wants to work with a mathematician

effectively?

Witten: It's really difficult to give advice. Usually producing rigorous proofs requires very detailed methods. That makes it hard for a physicist and so I myself have only done that in very special cases where I thought something was really missing that was actually simple enough that I could help do it, if I had the right collaborator. Some physicists would want to go into more detail and learn the techniques for rigorous proofs in a particular area, but most physicists I think will only be happy and successful doing that in very special cases like the ones I've picked.

Yamazaki: I see. Is it also true that in many of your works, the conversation with some mathematicians has been an inspiration for you?

Witten: This usually happens when something a mathematician has done involves an aspect of the physics that hasn't been understood and which doesn't make sense to me. I mentioned earlier one case involving the volume conjecture. For years I could not understand the results in this area because complex critical points were making exponentially large contributions. I kept putting it aside, not able to make progress.

Finally, in the summer of 2009, I attended a conference at the Hausdorff Institute in Bonn on the 20th anniversary of the Chern-Simons theory. I heard more lectures on the volume conjecture. To me, it was just embarrassing to not understand why exponentially large contributions were coming in. I feel vindicated in hindsight for worrying so much about this question because the answer turned out to be really useful.

Yamazaki: I see. In that case the feeling that the pieces are not in the

right place led you to the question, which you eventually solved and also it led to new developments.

Witten: Yes. Another case was when I felt that Beilinson and Drinfeld had the shogi pieces jumbled on the chessboard.

Message to Young Students

Ooguri: Pieces are placed in a wrong way, but, if you look at it in different dimensions, perhaps they are totally aligned.

I have a final question. In the interview with Tohru Eguchi, 20 years ago in *Sugaku Seminar*, he asked you about the prospects at the interface of mathematics and physics, and you replied saying that the area had been certainly growing very strongly and you predicted that the progress would continue in the foreseeable future. Certainly your prediction has been amply verified in the last 20 years. Given this, my question is, again, what is your prospect for the next 20 years? Can you also give advice on the future of the field for young students who will be reading this article?

Witten: First of all, in the last 20 years, not only has this interaction of math and physics continued to be very rich but it has developed in such diversity that very frequently exciting things are done which I myself am able to understand embarrassingly little about, because the field is expanding in so many directions.

I am sure that this is going to continue and I believe the reason it will continue is that quantum field theory and string theory, I believe, somehow have rich mathematical secrets. When some of these secrets come to the surface, they often come as surprises to physicists because

we do not really understand string theory properly as physics – we do not understand the core ideas behind it. At an even more basic level, the mathematicians are still not able to fully come to grips with quantum field theory and therefore things coming from it are surprises. So for both of those reasons, I think that the physics and math ideas generated are going to be surprising for a long time.

I think there are definitely exciting opportunities for young people to come and help explain what it all means. We don't understand this properly. We got a wider perspective in the 1990s when it became clear that the different string theories are unified by non-perturbative dualities and that string theory in some sense is inherently quantum mechanical. But we're still studying many different aspects of a subject whose core underlying principles are not clear. As long as that is true, there are opportunities for even bigger discoveries by today's young people. But if I could tell you exactly what direction you had to go in, I would be there.

Ooguri: Thank you very much for taking time to talk to us. It has been fun. Congratulations again for your Kyoto Prize.

Witten: Thank you so much for your kind words on the Kyoto Prize, and also thank you for the discussion, because the discussion has helped me remember how much we have advanced in the last 20 years.

Ooguri: Let's meet again 20 years from now to assess our progress in the next 20 years.

Witten: Let's try. For that we will have to all exercise and keep fit.

Mini-Workshop: Towards Quantum Primitive Form Theory

Kyoji Saito

Kavli IPMU Principal Investigator

As a joint program of the Kavli IPMU and the FMSP Program, a mini-workshop, “Towards Quantum Primitive Form Theory,” was held on October 8-10, 2014 at the Kavli IPMU (organizers: Toshitake Kohno and Kyoji Saito). The aim was to cover some recent developments related to period maps for primitive forms, which may lead to understanding of the quantization of primitive forms. The schedule and the contents of the talks are as follows.

Oct. 10:00-11:30	13:30-15:00	15:30-17:00
8 Kapranov1	Iwaki1	Ikeda1
9 Ikeda2	Kapranov2	Iwaki2
10 Iwaki3	Ikeda3	Kapranov3

Akishi Ikeda (Graduate School of Mathematical Sciences, Univ. of Tokyo): **Stability conditions on N -Calabi-Yau categories associated to A_n -quivers and period maps**

Recently, Bridgeland and Smith constructed stability conditions on some 3-Calabi-Yau categories from meromorphic quadratic differentials with simple zeros. In this talk, generalizing their results to higher dimensional Calabi-Yau categories, he described the space of stability conditions on N -Calabi-Yau categories associated to A_n -quivers as the universal cover of the complement of the discriminant-loci of the universal deformation space of

the simple singularity of type A_n . In particular, central charges of stability conditions on N -Calabi-Yau categories are constructed as the periods of quadratic differentials.

Kohei Iwaki (RIMS, Kyoto Univ.): **Theory of exact WKB analysis and relation to cluster algebras**

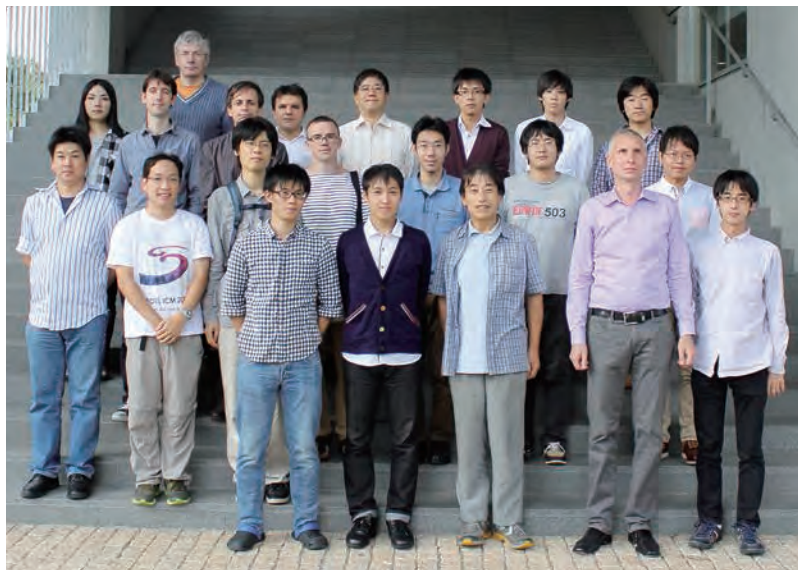
Exact WKB analysis is an effective method for the global study of differential equations (containing a large parameter) defined on a complex domain. On the other hand, a cluster algebra is a particular class of commutative subalgebra of a field of rational functions with distinguished generators. He first gave an exposition of the theory of exact WKB analysis. In the third lecture he explained the main result on a hidden cluster algebra defined by a quiver associated with the Stokes graph in exact WKB analysis (a joint work with T. Nakanishi). The Voros symbols realize the cluster variables, which are

generators of the cluster algebra.

Mikhail Kapranov (Kavli IPMU, Univ. of Tokyo):

Secondary polytopes and Landau-Ginzburg models

The secondary polytope of a point configuration A was originally introduced to describe the Newton polytope of a multivariate discriminant. The point configuration appeared as the set of exponents of the monomials of a polynomial. In these talks, based on joint work with M. Kontsevich and Y. Soibelman, he discussed a new appearance of secondary polytopes, when A is the set in the complex plane formed by the critical values of a complex Morse function. To these polytopes, he associates homotopy Lie algebras, which provide algebraic framework for a deformation theory construction of Picard-Lefschetz theory as proposed by the work of Gaiotto, Moore and Witten on the “Algebra of infrared.”



Workshop on CLASS and MontePython

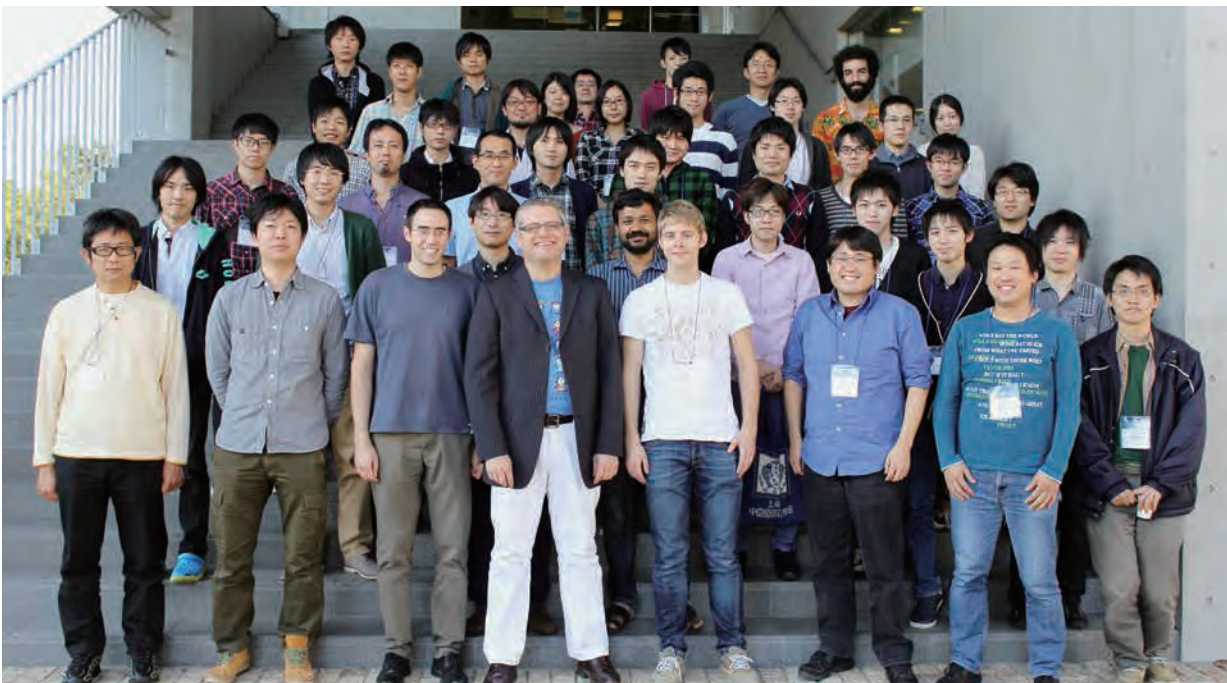
Eiichiro Komatsu

Director, Max Planck Institute for Astrophysics / Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

We organised a workshop on “CLASS and MontePython” (October 27-31, 2014), where participants can learn how to use the latest cosmological linear Boltzmann code “CLASS” and the Markov Chain Monte Carlo wrapper “MontePython,” via lecturers and intensive hands-on exercises. The lecturers were the authors of the codes: Drs. Julien Lesgourgues, Benjamin Audren, and Thomas Tram. The linear Boltzmann code and the Markov Chain Monte Carlo code are indispensable tools in the research of modern cosmology, as the former is necessary to make theoretical predictions, and the latter is to compare the predictions with the data. However, developing these tools from scratch is redundant, and simply downloading and understanding the existing codes written by someone

else is painful and takes an enormous amount of effort. This is why we invited the authors of the latest, user-friendly codes such as CLASS and MontePython, in order to provide students and junior researchers with one-and-only opportunities to master these codes. We had 42 participants from institutions all over Japan. The participants were enthusiastic and eager to learn, asking many questions and working hard on the exercises provided by the lecturers. While the original program for each day was supposed to end at 16:30, many participants stayed in the lecture hall until they were kicked out at 18:00. We would like to thank the participants for their enthusiasm, as well as the lecturers for their hard work in preparing for such a wonderful program. The

lecturers were completely exhausted by the end of the workshop, but they were thoroughly impressed by the enthusiasm of the participants. Overall, the workshop was a great success, making a large impact on students and junior researchers working on cosmology in Japan. However, there is one thing that we must improve: we were disappointed to see that less than 10% of the participants were female. We used mailing lists such as tennet and rironkon to advertise this workshop broadly, but somehow we failed to encourage the participation of female students and scientists. We must work to more actively encourage the participation of females. We would like to thank the Kavli IPMU and the staff for generous support, which made this workshop possible.



Kavli IPMU–RIKEN iTHES–Osaka TSRP Symposium

Frontiers of Theoretical Science–MATTER, LIFE and COSMOS–

Tsukasa Tada

Vice Chief Scientist, Riken

A symposium entitled, “Frontiers of Theoretical Science–MATTER, LIFE and COSMOS–,” was held on November 6th at the lecture hall of the Kavli IPMU. It was organized jointly by the Kavli IPMU, Riken iTHES (RIKEN interdisciplinary Theoretical Science Group), and Osaka TSRP (Theoretical Science Research Project, Osaka University). Research cooperation among these three institutes is founded on two bilateral agreements between the Kavli IPMU and iTHES, and also between the Osaka TSRP and iTHES respectively. This symposium was the first significant manifestation of the cooperation among these three research institutes, which are actively pursuing theoretical study on a broad range of science.

The symposium started with introductory remarks by Tetsuo Hatsuda, Director of the RIKEN iTHES, followed by the commendation for the research cooperation among the institutes from Yasuhiro Yukimatsu, Director of Basic Research Promotion Division, Research Promotion Bureau, MEXT.

Then, Hirosi Ooguri from the Kavli IPMU and Caltech delivered the first scientific lecture, which covered various topics of string theory and its applications. Also, Hitoshi Murayama, Director of the Kavli IPMU, talked

on the Nambu-Goldstone theorem and the Higgs mechanism in non-relativistic systems. The other three presentations by younger researchers, Mauricio Romo and Jonathan Malts from the Kavli IPMU, and Masakiyo Kitazawa from Osaka University, comprised the session before the lunch.

The first session in the afternoon was opened by an entertaining lecture by Franco Nori from RIKEN on quantum circuits. Yuji Sugita, also from RIKEN impressed the audience with his computer simulation of biological systems. Yoshitomo Kamiya of the RIKEN iTHES and Shinichiroh Matsuo from Osaka University also gave short presentations in this session.

After the tea break held at Piazza Fujiwara, the symposium resumed for the last session. In this session,

Koichi Fujimoto from Osaka University shared his perspectives on theoretical biology. Shinya Wanajo and Koichiro Uriu from RIKEN as well as Ryo Namba from the Kavli IPMU also gave short presentations. A talk by Eiichiro Komatsu from the Max Planck Institute and the Kavli IPMU on the Early Universe and the observation of the cosmic microwave background concluded the symposium.

The symposium attracted more than a hundred keen audiences and every talk was followed by perceptive questions and lively discussions. The discussions went on over lunch, coffee break, and the banquet held at the cafeteria after the symposium. The success of the symposium yields a great deal of hope for fruitful cooperation among three institutes in future.



The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG24)

Tomohiro Fujita

Kavli IPMU Graduate Student

Shinji Mukohyama

Professor of the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

Ryo Namba

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

Rio Saitou

Postdoctoral Fellow, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG24) was held at Kavli IPMU from November 10 through 14, 2014. The JGRG is a series of annual workshops that have continued since 1991 with the aim of comprehensive understanding of the General Relativity (GR) and gravity through various approaches.

The recent progress on cosmological and astrophysical observations has been outstanding. The space-based observations of the Cosmic Microwave Background (CMB) have determined cosmological parameters with unprecedented precision, and the ground-based observations of the CMB polarizations have provided various hints to the existence and nature of gravitational waves (GWs). Based on several proposed projects for direct detection of GWs, the construction of GW interferometers is already underway. Moreover, observational techniques have been progressively improved to search for the neutrinos that emerge from various astrophysical objects and to probe the detailed nature of dark

energy.

On the theoretical side, there have been extensive studies on inflationary models that predict the amount of primordial GWs consistent with the observations. The models in bigravity and massive gravity theories, which have recently been developed, are only a few of the examples. Theories of various fields, such as modified gravity, string, quantum gravity, and mathematical relativity, have also been experiencing intriguing advances. For example, new scalar-tensor theories have been proposed, and the properties of black holes in different space-times and/or dimensions have been explored.

The JGRG24 hosted approximately 180 attendants from 15 different countries, with 9 invited talks, 67 contributed talks, and 38 poster presentations. The topics spanned a broad range in both observational and theoretical aspects, such as dark matter, axion cosmology, string theory, black holes, modified gravity, GW experiments, stellar formations, CMB, large-scale structure, topological defects, inflation, gravitational lensing, and neutrinos. Each subject received intensive discussions with enthusiasm. A few young researchers and students were selected and received awards for their outstanding presentations at the end of the workshop.



Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing

Masamune Oguri

Assistant Professor of Graduate School of Science, the University of Tokyo
and Kavli IPMU Associate Scientist

Gravitational lensing continues to grow in importance as a tool to explore the Universe which is dominated by dark components. In particular, strong gravitational lensing plays an important role in studying small-scale structure of dark matter distributions, distant objects with help of lensing magnifications, and cosmological parameters by taking advantage of its simple physics. This is why we held the workshop, “Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing,” from November 17 to 21. This workshop has successfully attracted a great deal of attention, probably because workshops focusing on strong lensing have been rare. As a result, the workshop was truly international, with 70 participants, about 50 of which were from outside Japan.

In this workshop, we assigned different topics for different days. On Monday we discussed (mostly time delay) cosmology, Tuesday was devoted to dark halo substructures and fine structure of sources, Wednesday to galaxy and cluster structures, Thursday to distant galaxies, and Friday featured strong lens searches. One unique feature of this workshop was that we had an hour of open discussion time at the end of each day, in addition to many

invited and contributed talks.

One of the main discussion points was the role of simulations and mock data. It was suggested that blind analysis of mock data is very useful in checking the presence of any bias in the results, and in understanding the true uncertainties of the analysis of strong lensing data that are usually limited. It was also argued, on the other hand, that very detailed analysis of strong lens systems may not be practical as it is sometimes very time-consuming. Another important point in the discussions was how to make lens searches and lens mass modeling more efficient, possibly in automated

way, given the fact that ongoing and future surveys will easily find hundreds of new strong lens systems. The discussions were held in a critical but friendly atmosphere, which were so fulfilling that the discussion time passed very quickly.

This workshop would not have been possible without the help of the other organizing committee members, Eiichiro Komatsu, Anupreeta More, Surhud More, Sherry Suyu (ASIAA), and Masahiro Takada. I also thank the Kavli IPMU administrative office members, especially Shoko Ichikawa, for their dedicated support.



News

Katsuhiko Sato Named a Person of Cultural Merit in 2014

President of the National Institutes of Natural Sciences and a Visiting Senior Scientist of the Kavli IPMU, Katsuhiko Sato, who had served as a Principal Investigator at the IPMU from its launch to the end of March, 2010, has been selected as a Person of Cultural Merit (*Bunkakoroshu*) in 2014 for his outstanding contributions to astrophysics and cosmology research, and for promotion of science.



Katsuhiko Sato

Yuji Tachikawa Receives the 29th Nishinomiya-Yukawa Memorial Prize

Yuji Tachikawa, an Associate Professor at the School of Science, the University of Tokyo and a Scientist at the Kavli IPMU, has won the 29th Nishinomiya-Yukawa Memorial Prize for “the discovery of the correspondence relation between quantum field theories in different dimensions.”



Yuji Tachikawa

Tsuyoshi Nakaya Receives 2014 Nishina Memorial Prize

Tsuyoshi Nakaya, a Professor at the Graduate School of Science, Kyoto University and a Kavli IPMU Visiting Senior Scientist, has been awarded the 2014 Nishina Memorial Prize, together with Takashi Kobayashi, a Professor at KEK, for “the discovery of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam,” in the T2K long-baseline neutrino experiment.



Tsuyoshi Nakaya

Yukinobu Toda Receives the 11th JSPS Prize

Yukinobu Toda, an Associate Professor at the Kavli IPMU, has won the 11th JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Prize for his work on “the derived category of coherent sheaves and curve counting invariants.”



Yukinobu Toda

Tadashi Takayanagi Receives 2015 New Horizons in Physics Prize

Tadashi Takayanagi, a Professor at the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, and a Visiting Senior Scientist at the Kavli IPMU, has been awarded the 2015 New Horizons in Physics Prize, together with Ryu Shinsei, an Associate Professor at the University of Illinois at Urbana-Champaign, for “fundamental ideas about entropy in quantum field theory and quantum gravity.”



Tadashi Takayanagi

Robert Quimby among the Recipients of 2015 Breakthrough Prize in Fundamental Physics

The Fundamental Physics Prize Foundation has announced that the recipients of the 2015 Breakthrough Prize in Fundamental Physics are: Saul Perlmutter and members of the Supernova Cosmology Project; Brian P. Schmidt, Adam Riess, and members of the High-Z Supernova Team. Their discovery of the accelerating expansion of the universe is recognized. Robert Quimby, now an Associate Professor at San Diego State University, Director of Mount Lagna Observatory, and a Visiting Scientist at the Kavli IPMU, is among the recipients, as he is a member the Supernova Cosmology Project.



Robert Quimby

Roger Wendell Receives the 2015 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan

Roger Wendell, an Assistant Professor at the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo and an Associate Scientist at the Kavli IPMU, has won the 2015 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan for his outstanding contributions to “Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande,” a paper published by the Super-Kamiokande Collaboration in *Physical Review Letters* **110** (2013) 181802.



Roger Wendell

NSF Director France Córdoba Visited the Kavli IPMU

On October 3, 2014, Dr. France

Córdoba, Director of the National Science Foundation (NSF) visited the Kavli IPMU in the company of Dr. Graham Harrison, Program Manager, Office of International and Integrative Activities, NSF, and Dr. Kellina Craig-Henderson, Director, NSF Tokyo Regional Office. They heard Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama's presentation of the research activities at the Kavli IPMU including past experience of accepting researchers supported by NSF grants, and exchanged frank opinions with Director Murayama regarding the support to basic science.

Subsequently, the guests joined the tea time held in Piazza Fujiwara and enjoyed the interactions with young researchers from many countries. In particular, Dr. Córdoba, talked with female astronomers to share her own scientific contributions in the areas of observational and experimental astrophysics.



From left to right: Dr. France Córdoba, Kavli IPMU postdoctoral fellows, Claire Lackner and Edmond Cheung, and Hitoshi Murayama, discussing at tea time

Director Murayama Delivered a Speech at the UN Headquarters

CERN was established in 1954. In 2014, it has been celebrating its 60th anniversary with a series of events, and the celebrations have been brought to a close with a special high-level event at the United Nations Headquarters in New York, on October 20: "CERN: Sixty Years of Science for Peace and Development," organized by CERN and the United

Nations Economic and Social Council (ECOSOC). In this event, Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama has delivered a keynote speech entitled, "Science for peace and development today and tomorrow." The program also included the speeches of UN Secretary-General Ban Ki-moon and CERN Director-General Rolf Heuer, and the keynote speeches of Nobel Physics Prize Laureate and former CERN Director-General Carlo Rubbia, Nobel Peace Prize Laureate and former UN Secretary-General Kofi Annan.

For Murayama's key note speech, see the cover photo and pp. 4-6 in this issue of the Kavli IPMU News.

Kashiwa Campus Open House 2014

An open house on the Kashiwa campus of the University of Tokyo was held on October 24 (Friday) and 25 (Saturday), 2014. In two days, the entire Kashiwa campus was visited by about 8,000 people, and the Kavli IPMU attracted about 2,000 people.

The Kavli IPMU's program included two public lectures by Professor Masashi Hazumi and by Director Hitoshi Murayama, introductory poster presentations of the research conducted at the Institute, math puzzles, 3D movie program "Story of the Origin of the Universe," guided building tours, and Science *Onsen* (Spa). (For Science *Onsen*, see the next news item.)



At a seminar room, graduate students explained poster presentations of the research conducted at the Kavli IPMU as well as math puzzles



Prof. M. Hazumi talked on "Probing the Origin of the Universe — Towards the LiteBIRD Satellite"



Director Murayama gave a lecture entitled, "Together with Chiba-kun (a mascot character of Chiba prefecture), Listen to Professor Murayama about the Story of the Universe"

Kavli IPMU Held "Science *Onsen* (Spa)" in Science Agora 2014

"Science Agora" is an annual event, aimed at building good relations between Science and the future Society. Its program includes science experiments for children, talking with top scientists, science discussion with public participation — they are open to anyone who wants to participate. On November 7-9, 2014, Science Agora 2014 was held in the Tokyo waterfront region of Odaiba, and the Kavli IPMU participated on November 9 by holding "Science *Onsen* (Spa)—Science and Art, Do They Actually Share Things Similar?!" at the Miraikan Hall, on the 7th floor of the National Museum of Engaging Science and Innovation (*Miraikan*).

What is Science *Onsen*? Adapting from Science Café, which is believed to have started in England, Science *Onsen* aims at discussion between scientists and people in a relaxing mood in an *onsen* (spa), which is

very popular in Japan. Actually, such a relaxing mood may be created by participants wearing towels around their necks, and in particular, speakers and facilitators wearing yukata (an informal cotton kimono for summer wear), as if they were bathing in a real *onsen*.

At this Kavli IPMU's Science *Onsen*, a contemporary artist (painter) Mr. Yusuke Asai and an Assistant Professor at the Kavli IPMU Masahito Yamazaki, both wearing yukata, had a sincere talk on a serious subject, "The Method to Approach the Object." An audience of about 30 listened to their talk in a relaxing mood, wearing Kavli IPMU original *onsen* towel around their necks. The audience looked impressed by having witnessed how they approach certain aspects of their complex worlds, and the similarities of their methods. After the talk, there were a lot of questions from the audience until the time ran out.



A scene of Science *Onsen* in Science Agora 2014

The 11th Kavli IPMU-ICRR Joint Public Lecture — Look into the Universe

On November 15, 2014, the Eleventh Kavli IPMU-ICRR (Institute for Cosmic Ray Research) joint public lecture, "Look into the Universe— Approaching the Nature of Dark Matter—," was held at the West Lecture Hall of the 21 Komaba Center for Educational Excellence (KOMCEE) on the University of Tokyo's Komaba campus with audience of about 200

people. The first lecture entitled, "On the Nature of Dark Matter," was a review of the present investigations of dark matter, given by a theoretical physicist Shigeki Matsumoto, a Kavli IPMU Associate Professor. The second lecture, "Underground Search for Dark Matter," was given by an experimental physicist Masaki Yamashita, an ICRR Associate Professor and a Kavli IPMU Scientist. He is a member of XMASS, an underground experiment in search for dark-matter. After the lectures, the two lecturers presented their frank conversation about "How Interesting Is Dark Matter?" The audience also enjoyed teatime surrounding the lecturers.



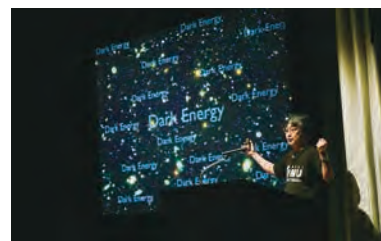
Professor Yamashita (left) and Professor Matsumoto (right)

The Fourth Annual WPI Joint Symposium Held in Tokyo

The Fourth Annual WPI Joint Symposium has been held on December 13, 2014 at the Yurakucho Asahi Hall in Tokyo, hosted by Kavli IPMU and co-hosted by the other eight WPI centers. The main purpose of this series of joint symposia is to attract, in particular, high school students to leading-edge scientific research.

The Symposium was opened by speeches by Junichi Hamada, President of the University of Tokyo, and Yutaka Tokiwa, Director-General of Research Promotion Bureau, MEXT. Subsequently, there was a presentation of video recording in which a young researcher from each

of the nine WPI centers features his/her research. Lectures were then given by three top-level researchers from WPI centers. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama was among them, giving a talk on "Is There an End to the Universe?" Some high school students also presented their research results. In addition, there were poster presentations of researches at the WPI centers and those of high school students on their daily research activities.



Lecture by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama



Exhibition room for poster presentations

Santa Claus Is Coming to Donguri from the Kavli IPMU

Every year, near Christmas, Kavli IPMU Professor Mark Vagins visits Donguri Nursery School on the Kashiwa campus, dressed up as Santa Claus. This year, Professor Vagins has visited Donguri with his wife and his son, and they had a joyful time with children in Donguri.



Professor Mark Vagins and his family with staff of Donguri

Kavli IPMU Seminars

1. "The Great Inflationary Debate: Inflation in a Post-Planck World"
Speaker: Joseph M. Fedrow (Palomar College / UCSD)
Date: Jul 16, 2014
2. "Large-scale structure formation with massive neutrinos and dynamical dark energy"
Speaker: Amol Upadhye (IEU)
Date: Jul 17, 2014
3. "Two proofs of modularity of Gromov-Witten correlation functions for elliptic orbifold curves"
Speaker: Yefeng Shen (Kavli IPMU)
Date: Jul 22, 2014
4. "The Direct Collapse Black Holes during the Early EoR and the Neutral Islands during the Late EoR"
Speaker: Yidong Xu (Chinese Academy of Sciences)
Date: Jul 24, 2014
5. "Beyond ADE integrable hierarchies"
Speaker: Yongbin Ruan (U Michigan)
Date: Jul 24, 2014
6. "Kac-Wakimoto hierarchies and W-symmetries"
Speaker: Bojko Bakalov (North Carolina State U)
Date: Aug 05, 2014
7. "Axion Monodromy Inflation"
Speaker: Timm Wrase (Stanford U)
Date: Aug 06, 2014
8. "Anisotropic inflation reexamined"
Speaker: Atsushi Naruko (Titech)
Date: Aug 06, 2014
9. "Moonshine and String Theory"
Speaker: Timm Wrase (Stanford U)
Date: Aug 07, 2014
10. "Millisecond pulsar interpretation of the Galactic center gamma-ray excess"
Speaker: Yuan Qiang (IHEP)
Date: Aug 08, 2014
11. "Skeletons in tropical and non-Archimedean geometry"
Speaker: Andrew MacPherson (IHES)
Date: Aug 12, 2014
12. "Hypercommutative operad as a homotopy quotient of BV"
Speaker: Anton Khoroshkin (HSE)
Date: Aug 13, 2014
13. "Quantum Dimension as Entanglement Entropy in 2D RCFTs"
Speaker: Song He (YITP)
Date: Aug 19, 2014
14. "Causal Structures in Gauss-Bonnet gravity"
Speaker: Keisuke Izumi (LeCosPA)
Date: Aug 19, 2014
15. "Type Ia supernovae: Explosions and Progenitors"
Speaker: Wolfgang Kerzendorf (U Toronto)
Date: Aug 20, 2014
16. "Deconfinement transition as black hole formation by the condensation of QCD strings"
Speaker: Jonathan Maltz (Kavli IPMU)
Date: Aug 26, 2014
17. "Nerves and Group Completion for Categories and Operads: A beginner's guide"
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Aug 29, 2014
18. "Nerves and Group Completion for Categories and Operads: A beginner's guide Part 2"
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Sep 01, 2014
19. "Solitons on intersecting 3-branes"
Speaker: Akikazu Hashimoto (U Wisconsin)
Date: Sep 01, 2014
20. "Supersymmetric theories on manifold with boundary and localization"
Speaker: Yutaka Yoshida (KIAS)
Date: Sep 02, 2014
21. "Nerves and Group Completion for Categories and Operads: A beginner's guide Part 3"
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Sep 02, 2014
22. "When is a top quark a parton?"
Speaker: Ahmed Ismail (ANL)
Date: Sep 10, 2014

(For further list of seminars, see the next issue.)

Personnel changes

Promotion

Todor Milanov, previously a Kavli IPMU Assistant Professor, was appointed as a Kavli IPMU Associate Professor on December 1, 2014.



Todor Milanov

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 Marcus Werner [October 1, 2011 – December 31, 2014] will be appointed as an Assistant Professor at the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University on April 1, 2015, after staying at CTC/DAMTP, the University of Cambridge, as a visiting researcher.

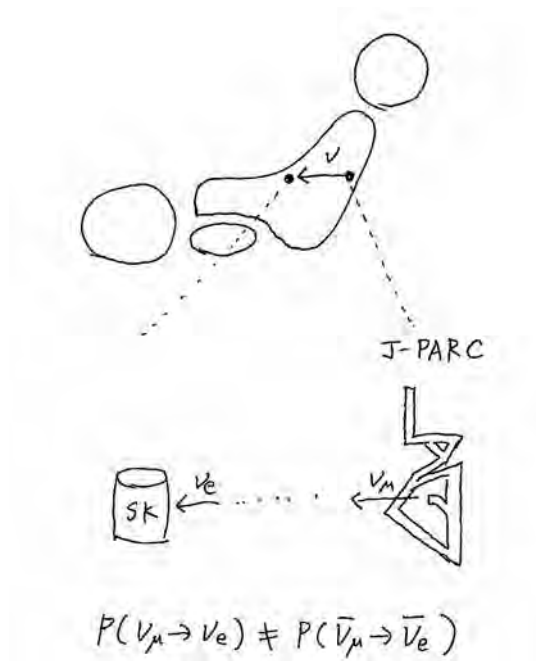
JSPS postdoctoral fellow Norimi Yokozaki [April 1, 2012 – October 31, 2014] moved to Università degli Studi di Roma "La Sapienza" as a postdoctoral fellow.

Discovery of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam

Tsuyoshi Nakaya

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

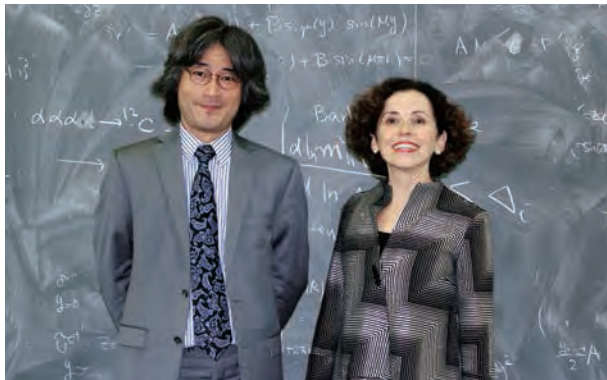
The T2K experiment conducted in the Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC, discovers a new type of neutrino oscillation. T2K is an abbreviation of Tokai-to(2)-Kamioka. The muon neutrino beam is produced at Tokai, and is observed by Super-Kamiokande 295km away at Kamioka. In 2011, T2K found the indication of electron neutrino appearance and reported that the third neutrino mixing angle θ_{13} is large for the first time. Later, in 2013 after taking more data, the electron neutrino appearance is firmly established—with more than 7σ significance. This discovery makes it possible to measure the symmetry between a particle and an anti-particle (CP symmetry) in neutrino oscillation. In the future, by improving the beam power of T2K, we will search for the CP violation in neutrinos. As the final goal, the Hyper-Kamiokande gigantic neutrino detector could discover the CP violation.



近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



10月3日：来訪したフランス・コルドパ米国立科学財団
長官と



10月25日：柏キャンパス一般公開2014で講演



11月20日：エドワード・ウィッテン夫妻、大栗博司主任
研究員と歓談



11月25日：来訪したカプリ財団理事長ロバート・コン（右
端）、クアルコム共同創設者アーウィン・ジェイコブス（右
から二人目）両氏にKavli IPMUの概要を説明



12月12日：マックス・プランク宇宙物理学研究所所長ラシ
ード・スニヤエフ博士（右端）と。左端はシカゴ大学のウ
ェイン・フォー博士



12月17日：第4回WPI合同シンポジウムで高校生の質問に
答える

Director's
Corner

平和と発展のための科学: 今日と明日*

国連大使、来賓の方々、全ての皆様、

世界平和の守護者であるこの国連の本部でスピーチをするよう招待されたことは大変光栄なことです。このセッションのテーマは「平和と発展のための科学」です。このテーマについて、私なりの考えについてお話ししたいと思います。

平和とは、異なった国々がお互いに対して戦うのではなく、共通の目的のために一緒に行動することです。発展とは人類の置かれている状態の現在のものから、よりよい人道的に納得できる状況にまで改善していくことです。この国連の重要な目的と人類全体のために科学はどのように貢献できるのでしょうか? ほとんどの人は、技術とイノベーションと医学によって、と答えるでしょう。しかし今日私はもう一つの答えを加えたいと思います。

平和に関して言うと、私は幸運な人間で、直接戦争に巻き込まれたことはありませんが、無関係でもありません。私の父は日本占領下の韓国で生まれました。日本占領が終わるとき、家族が大混乱の中、韓国から逃げようとする際、父は取り残されそうになりました。しかし大変運の良いことに船に乗る直前に見つかったのです。この奇跡が無かったら私は存在しなかった訳です。

*2014年10月20日にニューヨークの国連本部経済社会理事会会議場で開催された、CERNの60周年記念行事「CERN: 平和と発展のための科学の60年—多様な文化と民族を結びつける上での科学と科学国際機関の役割」における基調講演。

私自身は日本で生まれましたが、分断国家であった西ドイツで子供時代を過ごしました。あるとき分断されたベルリンに旅行しました。西ベルリンは高級な店が並び、人と車でごったがえす活気のある大都市でした。しかし東ベルリンへの検問を通り過ぎると、地雷原と監視塔があり、そのあとは第二次大戦後30年も放置された廃墟が並んでいました。この光景は私の記憶に鮮明に刻まれています。世界は戦争を経験し、決して安穏と出来る場所ではありません。

私はカリフォルニア、バークレイでの研究生生活の中で、様々な紛争や迫害にあった友人と働く機会がありました。例えば自宅から一ブロック先で自殺テロを目撃したイスラエル人、村の郊外がNATOに爆撃されたセルビア人、イスラム革命から逃げてトルコまで歩いたイラン人、ユダヤ系であるためにアメリカに亡命したロシア人、そしてお母さんがクリミアから逃げだしたユクライナ人。こうした人たちと働くことになったのはとても単純な理由があります。私たちには宇宙の神秘を解きたい、という共通の目的があったからです。

私は基礎科学の研究は、人類にとって真に平和をもたらす役割をすると固く信じています。ここの皆さんは全員、美しい夜空を見上げ、星を見たときに、宇宙について深遠な疑問で頭が一杯になった経験があるはずです。美しい宇宙の荘厳な姿の前では、文化、言語、肌の色、性別、宗教、そして思想の違いは消えてしまいます。

私たちは地球という名前の小さな岩の上に住み、その岩は太陽と呼ばれるごくごく平均的な星の周りを公転し、太陽は天の川銀河の中心から27,000光年離れた田舎にあり、天の川銀河は観測可能な範囲の宇宙にある1000億個の銀河の一つです。大きな目で見ると、我々の間の違いはとても小さく見えます。新聞で毎日のように読む戦争、紛争、悲劇、貧困、疫病について、違った見方をさせられます。この小さな岩の上に住む私たちヒトという生物は、手を取り合って行動することが出来るはずだと思うのです。

CERNは、基礎科学が全ての国の人々を一つにする、というアイデアが目に見える場所です。私はCERNの運営を担う理事会に諮問される科学政策委員会のメンバーですが、私の国、日本もアメリカも、CERNのメンバー国ではありません。CERNは私の専門家としての判断を仰ぎたいのであって、私の国がどこで、どれだけCERNの予算に貢献しているのかは気にしません。CERNでの数多くの滞在では、インドとパキスタン、イスラエルとイラン、ロシアとウクライナの人たちが一緒に仕事をしているのを見ることができました。冷戦の一番厳しいときでも、CERNでは鉄のカーテンの両側から来た科学者が一緒に仕事をしていたと聞いています。今では友好的な関係の国々、または戦争中の国々から何千人という人がやってきて、一緒にものすごい実験装置をくみ上げています。そのうちの二つは半世紀の探索を経て、2012年にヒッグス粒子を発見しました。ちなみに、ヒッグス粒子は皆さんにとって重要なのです。宇宙空間に満ち満ちていて、私たちの体がナノ秒の間に蒸発してしまわないように押さえ込んでいてくれるのです。

最近ヨルダンのセサミというプロジェクトについて、同僚エリエザー・ラビノビチが講演するのを聞く機会がありました。セサミはバーレーン、キプロス、エジプト、イラン、イスラエル、ヨルダン、パキスタン、パレスチナ自治区、そしてトルコの政府と一緒に



なって、生物学、物質科学、医学の基礎研究のための放射光施設である新しい粒子加速器を建設するというプロジェクトです。エリエザーが言うには、「私たちの住む中東では、戦争は終わってはいません。誰が勝って誰が負けたのか、昨日勝ったのは誰で明日勝つのは誰なのか、はっきりした答えは無いのです。」そしてこのセサミ計画は、他の沢山のプロジェクトのように、CERNのカフェテリアで始まったのだそうです。CERNのモデルに基づいて、しかし関係する諸国の事情に合うように工夫した上で、この国際研究所を作るにあたっては数多くの交渉と譲歩が必要だったようです。このプロジェクトが大きなハードルを超えるために、パークレイも日本も援助したと聞いて嬉しくなりました。彼が強調した点の一つは、プロジェクトについて一般の人に知ってもらう必要性です。「イスラエル人、アラブ人、イラン人、パキスタン人が一緒に仕事ができるとは、とても信じるのができない人ばかりなのです。中東でのどんなプロジェクトも、うまく行くわけ無いさ、と思っているのです。」と言います。とはいえ2015年には文字通りこの加速器で「光」が見え、前向きな見方が勝つことを証明できるはずです。

このように、CERNは権力とは無関係に、知識の探求のために人々を結びつけてきた歴史があり、とても感心します。

そして私は、星、惑星、そして宇宙の神秘についてのわくわくする気持ちは、世界の発展の鍵だと信じてい

ます。このわくわく感は子供たちの興味を引き、その好奇心をうまく育てることができれば、教育のある科学的な考え方ができる国民を作り出すからです。生活のレベルを上げるためには、「全て」の人たちが科学的な知識を持つことが必要です。我々の惑星が提供できる資源は有限であって、何十億という人口にとっては充分ではありません。私のアメリカの友人たちは、人間の活動が地球温暖化をもたらし、最近の大きな自然災害の元になっているという事実を受け入れなくてはなりません。西アフリカで未だ懐疑的な人たちに、エボラ熱の脅威が現実であることを説得する必要があります。私と同じ日本人は、福島原発事故が一体何を意味するのかを理解しなくてはなりません。こうした母なる自然への好奇心に基づく科学への理解は、夜空を見上げ、美しい宇宙の荘厳さを一緒に感じるころから始まるのです。

CERNはまさしくこのような研究をする所です。ヒッグス粒子の発見によるこの興奮で、ヨーロッパの高校生の中で科学を専攻する人数が2割増えたという話を聞いたことがあります。CERNには毎年何千人もの高校生や先生たちがやってきます。世界中から来た研究者が平和的に一緒に仕事をし、宇宙についての最も深遠な謎を解こうとしている姿を見ていきます。そしてその驚きを教室に持ち帰り、更にその話は学校の外へ広まっていきます。みんな単純にエキサイトするので、そしてそのエキサイト感はどんどん伝染していきます。

私自身、科学について青年たちにエキサイトしてもらうことに少しだけ貢献しています。数年前東京大学に、新しい国際的な科学の研究所を作りたいので助けてくれ、と頼まれました。若くてやる気満々な研究者を集めるために、私は子供の頃からずっと疑問に思っていた五つの質問を挙げることにしました。宇宙はどうやって始まったのか、その運命は何か、何で出来ているのか、その基本法則は何か、そしてその宇宙にどう

して我々が存在するのか。こうした疑問は、どの文化から来る人にも共鳴してもらうことができました。これで毎年10個程のポジションに、世界中から1000人近くの応募があるようになりました。今はこの研究所の6割の人は外国人で、アジア、アメリカ、ヨーロッパがそれぞれ約2割ずつを占めます。そしてここでは実際ロシア人とユクライナ人、中国人とインド人が一緒に仕事をしています。

また、発展途上国の学生に講義もしてきました。最近では私たちの宇宙についての研究について、オンラインの講義を行いました。世界150カ国から75,000人が受講しました。文字通り世界中から来ています。多くはアメリカ、ヨーロッパ、日本ですが、パキスタン、西サハラ、バハマ諸島、スワジランドからも来ています。人類の長年の疑問に今や科学が迫っていることをみて、みんなエキサイトしてくれています。みなさんがどの国から来たにしても、科学的な思考ができる国民を育てるためには、これが鍵だと思います。

世界にはCERNの様な場所がもっとあるべきです。個人的には、アメリカや日本がこうした基礎科学のための国際組織をホストして欲しいと思います。特に子供たちを含め、近辺の住民がグローバルな視点を持つようになります。このように科学が、惑星地球の平和と発展に貢献できるように、私も努力していきます。

私が日本に作った研究所は、出身に関係ない場所だとはっきりさせるために、研究所を「数物連携宇宙研究機構」と名付けました。物理法則と、それを記述する数学は、地球という惑星全体に当てはまるだけではなく、宇宙全体に通用するのです。いずれ、他の惑星からも応募が来るのを待ち望んでいます。単に時間の問題だと思っていますが。

ご清聴ありがとうございました。

Our Team

リチャード・カランド Richard Calland 専門分野: **実験物理学**

博士研究員

私は太陽および大気上層部で生成されたニュートリノや、強力な人工ニュートリノビームを用いてニュートリノを研究するスーパーカミオカンデ実験とT2K実験の一員です。ニュートリノの研究により、なぜ物質の方が反物質より多く存在するのか、といった宇宙の謎を理解することが可能になります。ニュートリノがこのような謎の解明に役立つのは、測定されたニュートリノと反ニュートリノの性質が異なるCPの破れを示す可能性があるからです。現在、T2K実験は反ニュートリノを調べ始めており、近い将来興味深い結果が得



られます。私が興味をもっているのは、測定器の再構成アルゴリズムを改良して物理に対する感度を高めるとともに、データを最適利用するために先端的な統計手法を用い、測定すべき物理のパラメータに対する感度を最大とすることです。

エドモンド・チャン Edmond Cheung 専門分野: **天文学**

博士研究員

私はカリフォルニア大学サンタクルーズ校からやってきた新任の博士研究員で、主として銀河の進化を研究しています。特に私が興味をもっているのは、バルジやバー（棒状構造）のような銀河の構造と銀河の進化の相互関係です。私はAEGIS、CANDELS、Galaxy Zooなどの観測チームの一員で、現在はMaNGAにも参加しています。MaNGAでは、新たな興味深い方法



により銀河の構造と進化の関連を探る研究を続けることを計画しています。

Our Team

ウィリアム・ドノバン William Donovan 専門分野: 数学

博士研究員

私は代数幾何学分野の研究をしています。主として、物理と非可換幾何学からのアイデアを多様体の研究に応用していますが、その例としては等質空間とそのカラビ-ヤウ多様体の種類、および複素3次元多様体とその双有理変形があります。ミラー対称性がこの研究の動機の大部分を与え、ホモロジー代数が道具の大部分を与えます。現在、私は、高次元の代数多様体に関する問題を研究しており、それに付随するモジュライ



空間をより良く理解するためにホモロジー代数を応用しています。

姜 東泯 ガン・ドンミン 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は主としてM理論において交叉するM2/M5ブレーンから現れる低エネルギー理論の研究に興味を持っています。M理論には非常に豊かな内容があり、物理と数学のいろいろなテーマに新しい洞察をもたらすことができます。特に、2次元と3次元の多様体に巻き付く2枚以上のM5ブレーンの系が私の現在の研究テーマです。このテーマはAGT予想、3d/3d対応、ホログラフ



イー原理、量子タイヒミュラー理論、体積予想と密接に関係しています。

デュリップ・ピヤラトナ Dulip Piyaratne 専門分野: 数学

博士研究員

私は主にホモロジー代数の手法を用いて代数多様体の幾何学に関する研究を行っています。特に、導来圏の理論は代数多様体の「隠れた」幾何学的情報を調べるための有効な代数的基盤を与えてくれます。代数多様体は弦理論においても重要な対象となっています。最近、私は、圏論的安定性条件の構成と、それに付随するモジュライ問題のFourier-Mukai理論を用いた研究



に焦点を合わせています。また、私は代数多様体の数え上げ不変量と壁越え現象にも興味があります。

杉山 尚徳 すぎやま・なおのり 専門分野:宇宙論

博士研究員

私の主な研究テーマは、宇宙論への理論的なアプローチです。特に、初期宇宙におけるインフレーション期に現在の宇宙の構造の“タネ”となる原始密度揺らぎがどのように生成されたのか、そしてその揺らぎをもとにして現在の宇宙の大規模構造が重力の不安定性に従ってどのように形成されてきたのかに関心があります。宇宙の階層構造は主に重力によってのみ引き起こされるので、その進化を追うということは、ひいては過去から現在まで宇宙を支配してきた重力について調べることにつながります。

私はこれまでインフレーション期において生成さ



れた揺らぎの統計的性質を研究し、そしてそれをもとに宇宙大規模構造における銀河の統計的空間分布を解析的に解くことを試みてきました。自分の研究の中で作った理論モデルを用いて、重力の様々な性質を明らかにすることを最終的なゴールとして、今後も研究に邁進していきたいと思っています。

竹内道久 たけうち・みちひさ 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は暗黒物質の正体は何か、ヒッグス粒子の性質はどんなものか、また、その先にある標準模型を超える物理はどのようなものかということを探り明かしたいと考えています。これらの疑問に答えるため、主にコライダー現象論という分野で研究してきました。LHCにおける一般的な新物理のシグナル探索に加え、特にトップセクターにおける新物理の探索に力を入れてきました。また、LHCで得られるデータを最大限に生かすことが重要となっており、ジェットの内部構造



を利用した解析等も行ってきました。LHC実験は、今年からエネルギーを13TeVに増強し再稼働し、新たなデータが続々と得られる予定です。とても刺激的な時期になるはずで、楽しみにしています。

Round Table Talk : エドワード・ウィッテン博士に聞く

エドワード・ウィッテン Edward Witten
プリンストン高等研究所教授

大栗 博司 おおぐり・ひろし
Kavli IPMU 主任研究員

戸田 幸伸 とだ・ゆきのぶ
Kavli IPMU 准教授

山崎 雅人 やまさき・まさひと
Kavli IPMU 助教

京都賞と4度目の京都訪問

大栗 京都賞受賞おめでとうございます。京都賞基礎科学部門では、4年に1回、数理科学の分野に受賞されますが、この分野で物理学者への受賞は今回が初めてでした。

ウィッテン この賞をいただいたことを、私は本当に光栄に思っています。

大栗 数学と物理学の境界におけるあなたの業績が、物理学だけでなく、数学においても最も重要な進歩の一つとして認められたのは素晴らしいと思います。また、私ども、この分野の研究をしているものにとっても、うれしいことです。昨日のワークショップで、立川裕二さんがおっしゃったように、この分野にとって、あなたは太陽の光のようなものですから。

ウィッテン 一昨日の受賞スピーチでも申し上げましたが、私だけではなく、この分野も共に表彰されたのだと思います。

大栗 この座談会の記録は、Kavli IPMU Newsとともに、雑誌『数学セミナー』の記事にもなります。『数学セミナー』は、高校生、学部学生、研究者から、数学に興味を持つ一般の人々まで幅広い読者層を持ち、特に、高校生など若い世代に数学に興味を持ってもらう重要な役割をしています。



右から左へ：ウィッテンさん、大栗さん、山崎さん、戸田さん

私自身も高校生のときに愛読し、今でも定期購読しています。立川裕二さんは、1994年のあなたのインタビューを読んだことが、この分野に進む動機のひとつとなったと言っています。

ウィッテン 立川さんから親切にそう言っただいて、とても嬉しいです。

大栗 今日の座談会についての記事も、次世代の若い学生を刺激し、数学に限らず、科学や工学の分野に興味を持ってもらう役に立てばと思っています。この分野の現在の状況と将来の展望をするよい機会としたいです。

あなたは、すでに『数学セミナー』誌上で、2回インタビューを受けられていますね。1990年に京都で国際数学会議が開かれ、フィールズ賞を受賞なさった際には、江口 徹さんがインタビューをなさっています。同じ号には、同じくフィールズ賞を受賞されたボン・ジョーンズさんとの対談も掲載されています。その対談では、あな

たのチャーン・サイモンズ理論に、スベクトル変数を持たせる拡張に興味があるとおっしゃっていました。これは、可解模型の見地からは自然なことですね。

ウィッテン はい、イジング模型のような二次元格子模型の厳密解を得るときに使う可積分性と同じような筋の説明を見つけ出したいということでした。私は全く成功しなかったのですが、ついこの2、3年の間に、ケヴィン・コストロが、私がこうしたいと思っていた趣旨に沿ったことをなし遂げてくれました。

大栗 ちょうどいらっしゃる前に、コストロの仕事についてお話をしていたところでした。この仕事は、あなたが望んでいらしたことを達成したとお考えになりますか。

ウィッテン はい、可解模型にはいろいろな側面があって、一つの方法で全てを理解することはできません。しか

し、私が探し求めていた説明については、コストロが発見したと言えます。

大栗 なるほど。

ウィッテン コステロがしたことは、3次元チャー・サイモンズ理論で3つの実数空間の次元の一つを単純に複素変数 z で置き換えるという、簡単だけれど美しいアイデアを含んでいます。

大栗 4次元に行くということですね。

ウィッテン 2つの実変数と一つの複素座標 z をもつ4次元の世界です。コストロはチャー・サイモンズ3形式と1形式 dz の外積で4形式を定義し、これを4次元理論の作用 (action) として調べました。技術的で細かいことですが、次の点が重要でした。この理論が意味をもつためには、運動方程式を線形化して得られた微分作用素をゲージ群で割ったものが楕円型作用素でなければなりません。これはやや驚くべきことと思いますが、本当なのです。それを考慮して、彼はチャー・サイモンズ理論を一般化しました。その理論は完全な3次元対称性をもっていませんが、強調したいのは複素変数 z をもっていることです。

よく考えてみると、可積分性に関するヤン・バクスター方程式は2次元の対称性をもっていますが、3次元の対称性はありません。私がスペクトル変数を取り入れられなかった理由は、3次元の位相的場の理論を用いていたからです。3次元の位相的場の理論では、結び目が交叉する移動に加えて (つまりヤン・バクスター関係式に加えて)、生成・消滅を含む関係式が含まれます。ライデマイスター移動の中には、3次元の位相的場の理論には当てはまりませんが、可積分系には必要ではないものがあります。私は3次元の位相的場の理論を使おうとしていたので、スペクトル・パラメータを見つけられなかったのです。コストロは一つの実変数を複素変数で置き換えるという非常に簡単なアイデアで、全てをうまく説明したのです。1990年頃、私がやろうとしてできなかった理由は、それだと

思います。

大栗 なるほど。1990年のインタビューであなたが提起された問題は、23年たってようやく答えられたということですね。1994年には、再度日本を訪問され、京都で一般講演をなさっています。

ウィッテン あなたが組織された超弦理論国際会議 Strings 2003と今回も含め、何度か京都を訪れる機会がありました。

大栗 今回も含めた4回のご訪問では、毎回京都国際会議場にいらしているということですね。

ウィッテン ええ、その通りですが、次は沖縄訪問が準備されていると伺っています。

大栗 沖縄科学技術大学院大学で私たちが開催を予定している超弦理論国際会議 Strings 2018のことをおっしゃっているのですね。2018年には、ぜひまたご来日ください。

1994年に来日された際には、ちょうどザイバーク - ウィッテン理論やバッフア - ウィッテン理論を完成させつつあるときでしたね。京都大学の数理論理学研究所で、中島 啓さんと議論をしたことを覚えています。中島さんは、ゲージ理論のインスタント解のモジュライ空間への、アフライン・リー代数の作用に関する最新の成果をご説明になっていました。また、『数学セミナー』誌上での江口 徹さんのインタビューでは、当時のミラー対称性やS-双対性の進展について触れられ、ゲージ理論や弦理論における双対性の統一的理解への期待を語っていらっしゃいました。その期待の一部は、過去20年の間に実現されたといっただいでしょうか。

ウィッテン 間違いなく幾つかは実現されました。一つは2度目のインタビューの後2、3年の間に達成されたことで、弦理論における非摂動的な双対性が明らかになったことです。これは場の理論で起きていたことの一般化になりました。しかし、未だに謎に包まれていて、きちんと理解されていない

側面もあります。

その一方で、4次元のゲージ双対性とそれより低い次元の多くの双対性が、6次元の共形場理論の存在に由来するという発見は、双対性を理解する上で重要な洞察となりました。私たちは6次元の理論を本当には理解していないので、完全な解決ではありませんが、6次元の理論の性質から理解されるべきだということは、前回のインタビューの時点では知られていなかったことで、双対性を理解する上での確かな進歩だといえるでしょう。

双対性には懐疑的でした

大栗 今日の座談会参加者をご紹介します。戸田幸伸さんは、数学者で Kavli IPMU の准教授です。2006年に博士号を取得されました。山崎雅人さんは物理学者で、Kavli IPMU の助教です。2006年に大学院に入学されました。2人とも、ゲージ理論や弦理論に関する、数学と物理学の境界領域で活躍されています。

京都賞関連行事の記念講演で、あなたは、これまでの経歴を振り返られ、1973年に、ゲージ理論の漸近自由性が発見された直後に大学院に入学されたとおっしゃっていました。日本に2度目にいらして、インタビューを受けられたときには、それから20年たっていました。今年は、それから、またちょうど20年目になります。そこで、あなたの学者としての2度目の20年間を振り返り、その間の最も重要な進歩のいくつかについてお考えをうかがいたいと思います。

すでに、1994年以降の発展について話し始めたところでしたので、そこから始めて、過去20年間のハイライトは何だったか、お話いただけますか。
ウィッテン 確かにハイライトの一つは弦理論での非摂動的な双対性の理解でした。その結果、私たちは弦理論とは何かということについて、はるかに広い描像を持っています。私たちは1994年に摂動的な弦理論に現れるミ

ラー対称性と他の2次元の双対性を知っていましたが、時空間にも似たような双対性があること、つまり2次元の双対性に類似の4次元ゲージ理論の双対性を、実は丁度考え始めたところでした。しかし1994年には弦理論で何か似たようなことがあるかもしれないというのは、本当に単なる臆測でした。

この時点までに文献に手がかりが現れており、また1990年代初期に多くの新しい手がかりが発見されました。私が最も影響を受けたのは、ジョン・シュワルツとアショク・センの仕事でした。彼らは、6次元トラス上のヘテロティック・ストリングの低エネルギー有効作用が、非摂動論的SL(2, Z)双対性の存在と矛盾しない性質をもつことを示しました。彼らの示した証拠は決定的なものとはいえませんでした。非常に示唆に富んでいました。

どうすれば時空間における非摂動論的雙対性の決定的証拠を発見できるのか、私にはまだはっきりしませんでした。少なくとも私にとって、最初の証拠は、アショク・センの $N=4$ 超対称ヤン・ミルズ理論における2個のモノポールの束縛状態に関する、短いけれども素晴らしい論文に現れました。それは私にとって、モントネン-オリープの双対性予想に対する本質的に新しい証拠でした。それは私に双対性は正しく違いないと確信させ、また同様に重要なのですが、双対性をもっと良く理解することが可能であると確信させたのです。

大栗 センの論文はS-双対性の強い証拠を与えましたが、私たちを確信させたのは、あなたとパツファの論文だったと思います。

ウィッテン ありがとうございます。センの論文は、既知の電磁双対性に関しての、示唆的ではあるが限定的な議論の遙か先に進むことができること、何か本質的に新しいことを知ることができることを示すものでした。センの論文を読むまでは、電磁双対性について理解していることとしては、はっきり私に影響を与えたセンとシュワ

ルツの仕事すら、モントネンとオリープが20年前に理解した枠組みの中に留まっていると感じていました。しかし、センは簡単でエレガントな計算を行い、双対性が予言する2個のモノポールの束縛状態を見つけました。私はそれに触発され、もっと先に行けると信じるようになったのです。

このインスピレーションがあり、また双対性予想に関する証拠をもっと見つけようとして、カムラン・パツファと私はインスタントンのモジュライ空間のオイラー指標を調べ始めました。超対称ヤン・ミルズ理論の電磁双対性が、これらのオイラー指標の生成関数がモジュラー関数でなければならないことを意味することを知るのはそれほど難しくはありませんでした。私たちにとって幸運だったのは、(あなたが触れた中島さんの仕事も含め) 種々の場合について数学者がこれらのオイラー指標を計算していたか、あるいは密接に関わりのある結果を得ていて、それからオイラー指標を知ることができたことです。私たちは予想したモジュラリティが全ての場合に成り立つことを見出しました。(その一つ、4次元多様体 CP^2 の場合、私たちは偶然「擬モジュラー型式」という、その時は私たちにとって新しい、しかしその後ゲージ理論と弦理論に度々現れた概念に行き当たりました。)

また、この時期にネーサン・ザイバークが正則性を超対称ゲージ理論のダイナミクスを解析する手段として使っていました。彼は $N=2$ 理論で起きていることを理解しようとしていました。私とザイバークはそれについて話を始め、センの論文に触発されて、双対性に関わっているのではないかと考えました。それがザイバーク・ウィッテン理論となった私たちの仕事への手がかりの一つになりました。

大栗 山崎さんや戸田さんのように若い人には信じられないかもしれませんが、1994年以前には、少なくとも私にとっては、S-双対性はとても信じられない話でした。美しい夢のようなも

ので、あったらいいけれど、とても現実には起きるとは考えられない。先ほど申しましたように、センの論文は最初の証拠を与えましたが、あなたとパツファの仕事が決定的だったと思います。それ以後は、誰もが信じるようになりました。

山崎 それは驚きました。クラウド・モントネンとデビッド・オリープの論文はかなり古いと思ったので。皆は彼らのアイディアに懐疑的だったのでしょうか？

ウィッテン 今から考えると笑い話のようですが、私がモントネンとオリープの論文に出会った頃のことをお話ししましょう。まず1977年の末にオックスフォード大学を訪れるまではこの論文のことは知りませんでした。マイケル・アティヤが私にこの論文を示し、それについてオリープと議論するため、ロンドンに行くように言いました。そこで私は論文を読み、デビッド・オリープと連絡を取って彼を訪ねる手配をしました。しかし、ロンドンに着いた時には私はかなり懐疑的になっていました。あなたは彼らの原論文を読みましたか？

山崎 はい、読んだことがあります。**ウィッテン** 彼らはその論文でゲージ場のボゾンの理論と(随伴表現に値を取る)実スカラー場を考慮しました。スカラー場に対するポテンシャルエネルギーは恒等的にゼロと仮定し、この場合のみ成り立つ注目すべき質量公式を見出しました。そして、質量公式が電荷と磁荷の間で対称であるという事実に基づいて、電磁双対性を提案したのです。

しかし、私は、スカラー粒子に対してポテンシャルエネルギーがゼロというのは量子力学的に意味のないということを見抜く程度には、場の量子論を知っていました。もしゼロにできるのなら、素粒子物理にはゲージ階層性問題はないはずだからです。ですからオリープに会うためにロンドンに到着した時には、私ははっきり懐疑的でした。しかし、私はせっかく彼に会いに来た

のですから、彼のアイデアがナンセンスだだけ言うことにはしたくありませんでした。私たちは、何か意味のあることをしようと試みました。そこで私たちは超対称性の観点から議論しました。超対称性があればスカラー粒子の繰り込まれた質量が（および全有効ポテンシャルでさえ）ゼロに成り得るからです。私には、モンテンとオリープの素晴らしいアイデアが意味をもち得るのは唯一この場合のみと思えたのです。その日のうちに私たちは $N=2$ 超対称性の場合に彼らの公式が成り立つことを見出しました。そこで私たちはそれを論文にしました。それは論文としては十分なものでしたが、私はその論文から間違った教訓を引き出してしまいました。それは、非摂動的な双対性を仮定しなくても、彼らの公式は説明できるという結論です。

大栗 私も、あなたとオリープの論文を読んでそう思いました。S-双対性という不思議な現象の証拠ではなく、単に超対称性で説明できてしまうことなのだ。

ウィッテン それで、その時及びそれ以降何年もの間、私は4次元における非摂動的な双対性の証拠は、たいしたものはないと思っていました。

そういう訳で、山崎さんの質問に戻ると、その間私は電磁双対性について懐疑的でした。しかし、私は実際には2つのレベルで懐疑的だったのです。第1はそれが本当かどうかについて懐疑的であり、第2は仮にそれが本当だったとしても、実際にそれについて何か言うことができるかどうか懐疑的でした。

もっと全体的な描像をお話しますと、1990年代初期に、多くの新たな手掛かりが浮かび上がってきました。その幾つかは弦理論におけるソリトンを研究していたマイク・ダフのような人たち、それからカート・カラン、ジェフ・ハーヴェイ、アンディー・ストロミンジャーの仕事から得られ、また既にお話したようにセンとシュワルツの仕事もありました。パークレーで

の超弦理論国際会議 Strings '93のことでしたが、ジョン・シュワルツがとても興奮していました。彼があんなに興奮したのを見たのは、1984年の1月以来でした。1984年1月に、彼は私にマイケル・グリーンとの最近の仕事について話していて、「我々は近づいている」と言ったのですが、私には彼が何に近づいているのか見当が付きませんでした。しかし、後でそれは彼らがアノマリーを解消する数か月前だったことが分かりました。それで、ジョンがパークレーでの Strings 会議でとても興奮していた時、私は彼のことを真剣にとるべきだと決めたのです。

もし私がモンテンとオリープの論文を読んで以来もち続けたのと同じ懐疑主義で見たとすれば、センとシュワルツは低エネルギーの物理を議論しているだけで、強結合の振る舞いに関しては確かな証拠をもっといえないと言ったことでしょうか。しかし、シュワルツが余りにも熱心なので私の懐疑主義もゆらぎ、私は弦理論のソリトンに関するダフやその他の論文をもっと綿密に調べ始めました。ある時点で、1993年の秋だと思いますが、ダフが自分の論文をいろいろ取りそろえて送ってきました。私はそれを心に留めました。今、私は、この時期に読んだ弦理論のソリトンに関する論文を全部は覚えていませんが、間違いなく重要な論文の一つはカラン、ハーヴェイ、ストロミンジャーのものでした。

この時期の背景にはもう一つの部分があることを説明しておかなければなりません。

1980年代半ばに2、3年の間、スーパー・メンブレン（超膜）を研究していたマイク・ダフ、ポール・タウンゼント、その他の物理学者が、基本的な超膜の理論は基本的な弦の理論に似ていると言いつづけていましたが、私には多くの理由で納得がいきませんでした。一つには、3次元多体はオイラー指標をもたないので、弦理論のように摂動展開（位相展開）ができません。さらに、3次元では膜の理論に意味を

もたせるために必要な共形不変性がありません。丁度一般相対論がそうであるように、膜の理論はくりこみ不可能です。

技術的な問題点はいろいろありました。しかし、1990年か1991年頃のどこかで、この分野を研究する人たちは、膜を基本的な対象と考えようとする代わりに、膜と、その他に p -ブレーンも、弦理論に存在するかもしれない非摂動的な対象と考えるようになりました。このアイデアは、一般論としては筋が通っています。しかし、細部では状況はもっと複雑でした。実際に論文を読まれると、その幾つかには良い性質をもつ古典的ソリトン解があり、十分に意味があることがわかるでしょう。（そうであっても、その解には異常な性質があり、幾つかの場合は、それが後の発見につながる手がかりとなりました。）他の論文はやや意味がつけにくかったのですが、それは古典的に古典的近似の良くない領域で現れる特異点が含まれていたためでした。しかし、膜を弦理論における非摂動的なソリトン類似の対象とするアイデアは、たとえ幾つかの論文に細部では疑問があったにせよ、非常に意味のあるものでした。このアイデアで何ができるか、私はまだ幾分懐疑的でしたが、今説明したような理由で、以前より多くの注意を払っていました。実際、2つのモノポールの束縛状態に関するセンの論文が現れたとき、私が完全に自分の見方を変える用意ができていたのは、それが理由です。

センの論文は強結合に関して何か新しいことができることを示しており、もしセンと同じような閃きがあれば彼がしたことを10年か15年前にできていたであろうということは明らかでした。ですから、彼の論文は私たちが機会を逸したことを示すものでした。それははっきり私の研究の方向を変えました。そして、あなたが指摘くださったパツファとの共著論文に導き、1994年の私とザイバーグの研究を正しい方向に導いてくれました。



大栗 これは素晴らしい話です。まさしくパスツールが言ったように、幸運は準備された心にだけやってくるということですね。これから、さらに弦理論の双対性に進まれたわけですね。

超弦理論の双対性革命

ウィッテン 1994年の終わりまでには、2次元と4次元の場の理論の両方で、非摂動論的双対性の理解が進んでいました。例えば2次元の場合、(弦理論のコンパクト化を調べるのに重要なものの一例として)カラビ-ヤウ多様体を標的空間とするシグマ模型を調べると、量子論によって、カラビ-ヤウ多様体の古典的幾何が大きく拡張されることが判ります。シグマ模型の異なる幾何学的及び非幾何学的記述は、理論の異なる半古典的極限を表しますが、その間に相転移がくもの巣のように張り巡らされていることが判ります。モントネン-オリープの双対性予想でも、これと同じようなことが $N=4$ 超対称ヤン・ミルズ理論で起きているのだということが、後の研究でわかりました。そして、ザイバークと私は1994年に $N=2$ 超対称性の場合に、やや類似のものを見出しました。

同じようなことが弦理論でも起きる

かもしれないという夢は、確かにありました。夢だけではなく、このようなストーリーの断片を著者が指摘する論文が数多くありました。先ほどまでに幾つかそういう論文を挙げました。1995年の春にクリス・ハルとポール・タウンゼントがもう一つの重要な論文を書きました。彼らの言いたかったことはIIA型超弦理論は円周上のM理論と同じであるということでした。彼らが実際はしなかった唯一のことは、それをもっと定量的にすることでした。IIA型超弦理論には11次元は現れないという潜在的な矛盾がありました。しかし、少し後に私が気がついたように、この問題には非常に簡単な答えがあることがわかりました。IIA型超弦理論の観点からは11次元の極限は強結合領域で、弱結合には11番目の次元は見えないのです。

同じことが他の場合にも成り立つことがすぐに明らかになりました。例えば、I型超弦理論とSO(32)ヘテロティック・ストリングが同じであろうと期待するかもしれませんが、直ちに分かる明らかな矛盾があります。両方の理論は同じゼロ質量のスペクトルと低エネルギー相互作用をもっていますが、低エネルギー極限を超えた所では全く違って見えます。答えは単純で、もし

低エネルギーの場の理論を一致させると、一方の理論の弱結合が他方の強結合になっていることがわかります。

一度このように考え始めると、全てがうまくいくことがわかります。それは何を意味していたのでしょうか。この考え方は、弦理論とは何か、についてより統一的な描像に導いてくれました。しかし、直ちに、これまでの考え方が不適切であることを示す、更なる発展がありました。私は、1980年代には、弦理論は、重力のアインシュタイン-ヒルベルト・ラグランジアンを一般化するラグランジアンに基づくべきであると本当に信じていたのです。それは微分同相群を一般化する対称群をもつでしょう。従って、非摂動論的な2次元双対性が古典的な対称性として組み込まれた、幾何学の新しい古典論が存在するでしょう。そして、この古典論を量子化することにより、弦理論が生成されるでしょう。

しかし、1990年代初期までに細部で問題が見つかってきましたが、私は個人的には余り注意を払いませんでした。カラビ-ヤウ多様体のモジュライ空間にはいろいろな特異点があります。このような特異点を含む幾何の問題が私の仕事では重要でした。

大栗 線形シグマ模型に関する仕事のことをおっしゃっているのですね。

ウィッテン そうです。それから私の(ハーヴェイ、パッファ、ランス・ディクソンと共同で行った)オーピフォルドに関する仕事もそうです。私は古典的な幾何の特異点をもつが、量子シグマ模型は特異点をもたない場合に興味をもっていました。これらの場合には、通常幾何とその弦理論の古典的極限での一般化の違いが重要になります。カラビ-ヤウ多様体のモジュライを変形すると、古典的幾何の特異点で、対応するシグマ模型の特異点にも導くものも表れますが、私はそれを重視していませんでした。

弦理論では、古典的極限でさえそういう特異点は現れますから、もし弦理論を古典論が量子化されると解釈しよ

うとすると、古典論が特異点をもつように見えて、それは変です。私は個人的にはその問題に考えを集中させることはしませんでした。ストロミンジャーはそういう特異点は実は非摂動論的な量子効果を反映しているのだと説明しました。その特異点は、電荷をもつブラックホールが質量ゼロとなるときに発生します。古典的極限のはずなのに非摂動論的な量子効果があるので、古典論の量子化では弦理論を正しく取り扱えないことになります。

大栗 場の理論には類似の結果はない。本質的に弦理論的現象だということでしょうか。

ウィッテン そう考えます。

大栗 これは、弦理論にはラグランジアンによる記述はありえないという証拠だとお考えになりましたか。

ウィッテン それは古典論の量子化という立場では弦理論の真価を十分に発揮できないことの証拠です。私は古典論の存在を否定したくはありません。ある観点からは存在すると信じていますから。

大栗 近似的な記述としてはあるかもしれませんが、古典論からはじめて量子化の手続きを当てはめることはできないと…。

ウィッテン 背景にある古典論を量子化することでは弦理論を十分に理解することはできません。ある意味、弦理論は本質的に量子力学的理論なのです。

私は、弦理論が古典論の量子化では得られないとは言いたくはありませんが、その方法では弦理論のすべてを理解することはできないと考えます。

場の理論でさえモンテン-オリープの双対性は同じ理論が異なる古典的極限をもつことを意味し、どれか一つの古典的極限を区別することはできません。

大栗 しかし、その場合には、ラグランジアンによる記述はありますね。

ウィッテン ええ、モンテン-オリープの場合、古典的ラグランジアンはあります。実は、いくつもあります。弦



理論では、古典的極限と呼びたい場合でさえ古典的な観点からは余り意味のない現象があるため、もう少し事情は悪いと言えます。

結局、ストロミンジャーの仕事は、私が見逃していたものを照らし出しました。1995年の超弦理論国際会議での弦理論における非摂動論的双対性に関する私の講演と、それに対応する論文（“弦理論の多様な次元におけるダイナミクス”）には、細部で一つ、意味の通らないところがありました。K3多様体上でのIIA型超弦理論は4次元トラス上のヘテロティック・ストリングと双対であると思われ、K3曲面にADE特異点が現れると、ゲージ対称性が大きくなるはずだと予想できました。しかし、古典的幾何のADE特異点は単にオービフォールドの特異点であって、オービフォールドでは弦理論の摂動論が使えます。オービフォールドは非摂動論的ゲージ対称性を生成しません。数ヶ月の間、私は戸惑っていました。実は、私は単純なミスをしていて、ポール・アスピノールが1995年の夏に書いた論文により訂正されました。アスピノールはこう説明したのです。M理論ではADE特異点で超ケーラー・モジュライだけが存在しますが、弦理論ではADE特異点で

B-場のモジュライも存在します。共形場理論はB-場のモジュライがゼロの場合、特異性をもつようになります。一方、オービフォールドは、B-場のモジュライがゼロにならないので、特異性をもたないのです。

B-場のモジュライがゼロになる場合、ストロミンジャーがカラビ-ヤウ特異点に関する論文で示したものと類似した、古典的記述の破綻が生じます。その結果、ゲージ対称性が強くなりますが、IIA型の超弦理論の観点から見れば、それは非摂動論的な起源をもつものです。

ストロミンジャーは巻き付いた3次元ブレンから生じる、電荷を持つブラックホールを考察しましたが、ここで粒子として適切なものは巻き付いた2次元ブレンです。しかし、アイディアは同じようなものでした。

大栗 これは、ゲージ理論の非可換・非摂動論的ダイナミクスが弦理論の極限から現れるという、ゲージ理論と弦理論の深い関係のはじまりだったように思います。

ウィッテン その通りです。もうひとつ、ゲージ理論の非摂動論的双対性に対して弦理論がもつ意味を示すのに役だった、重要であるのに極めて簡単な論文が、1996年にマイケル・グリー

ンによって書かれました。この時点までにジョン・ポルチンスキーが共同研究者と共に、最近の言葉で言えば n 個の平行なブレーンは $U(n)$ ゲージ対称性をもつことを基本的に示していました。私は1995年の年末に、なぜそれが有用かを示す論文を書きましたが、グリーンは次のことに注目して、非常に簡単な論文を書いたのです。この時点までに私たちが確信した事実ですが、IIB型超弦理論は非摂動論的の双対性を対称性としてもっています。一方、ゲージ群 $U(n)$ の4次元 $N=4$ 超対称ヤン-ミルズ理論はIIB型超弦理論における n 個の平行なD3-ブレーンから生じます。これら2つの事実を併せ、かつ低エネルギー極限を取り、グリーンはゲージ群 $U(n)$ の $N=4$ 超対称ヤン-ミルズ理論のモントネン-オリープ双対性を導くことができました。それは単にD3-ブレーンに特化したIIB型超弦理論から受け継いだものです。

それは、ゲージ理論の双対性を弦理論の双対性から導出する、初期の重要な例でした。

こういったこと全てが起きる前ですえ、マイク・ダフとラムジー・クーリが1993年に彼らがストリング/ストリング双対性と呼んだものについての論文を書きました。彼らは、6次元に自己双対な弦理論があって、これを2つの異なる見方をすると、4次元のゲージ理論の電磁双対性が説明できることを示しました。それは実は素晴らしいアイデアでした。唯一の問題は、うまい例がなかったことです。

1995年の中頃、私は、もし $K3$ と T^4 上のヘテロティック/II型双対性を取り、別の2次元トラス上でコンパクト化すれば、ダフとクーリが示唆したものに似たような例が得られるだろうと気がつきました。彼らは弦理論の自己双対性を念頭においていましたが、私が考えた例は2つの異なる弦理論の間の双対性でした。それでもアイデアは似通っています。1995年の末までにダフと私、さらに他の人たちも、2年前に提案されたものをもっと厳密

な形で引き継ぐ例を挙げました。それは $K3$ 曲面上の $E_8 \times E_8$ ヘテロティック・ストリングを含み、ここで2つの E_8 は同じインスタントン数をもちます。これら全ての場合に弦理論の双対性からモントネン-オリープの双対性を導くことができました。

1995年から96年は非常に劇的だった頃ですが、こうして話をしていると当時の論文が次々に思い出されます。しかし正直なところ、たいていの場合はかなり簡単に書けた論文でした。私は昨日、京都賞の記念講演会の中島啓さんの講演を聴いて、このことを思い出しました。中島さんは、1996年に私がニュートン研究所で話した3つの講演を振り返ることから始めてくださいました。それは私が書いた3つの論文（それぞれ、レフ・ロザンスキー、アミ・ハナニー、ネーサン・ザイバグとの共著）についての講演でした。それらの論文は内容的にぴったりと組み合わせさせたものでした。書いていて楽しく、また講演することも楽しいものでした。しかし、記憶の中で際だっているのは、当時、そういった洞察を簡単に手に入れることができたということです。この分野で研究していることが実に面白い時期でした。私の研究生活の間に、もう一度そういう時期があることを望んでいます。

何かを知ることと、なぜかを知ることの違い

戸田 私は代数幾何学者で、元々は代数幾何学の古典的な問題に関心がありましたが、あなたの仕事に触発されて代数幾何学と超弦理論の関係に興味を持つようになりました。S-双対性とモジュラー形式が話題に挙がりましたが、これは数学的視点からはとても驚くべきことだと思います。何故モジュラー形式が出現するのか、とても不思議です。数学的視点から、この点に



ついてどの様に洞察されているのでしょうか？

ウィッテン



勿論バッファと私は、モントネン-オリープの双対性予想から説明しました。私たちがしたことは、オイラー指標のある種の生成関数のモジュラー性が、モントネン-オリープ双対性から導かれることを示したのです。これは、リーマン予想から数論のある種の命題が導かれることと似ています。もしリーマン予想から何かに従うことがわかった場合、それを問題となっている命題の説明と見るべきかどうかはわかりませんが、少なくともその命題をより大きな枠組みに持ち込むこととなります。モントネン-オリープの双対性は、それに類似した、より大きな枠組みを私とバッファとの仕事に用意してくれました。すぐその後、ある6次元の理論の存在からモントネン-オリープの双対性が従うという、さらに大きな枠組みが出現しました。また、他にもいろいろな道筋で、弦理論の双対性からモントネン-オリープの双対性が従い、その幾つかの構成法を既にお話ししました。しかし、恐らく大抵の物理学者は、モントネン-オリープの双対性を得る最も完全な枠組みは、その6次元の理論との関係であると言うでしょう。

大栗 戸田さんは、数学的説明を求めていらっしゃるのですね。当時、数学的説明のヒントとしては、インスタントン解のモジュライ空間の対称性に関する、中島さんの仕事が知られていました。数学的観点からは、バッファ-ウィッテン理論が計算しているのは、インスタントン解のモジュライ空間のオイラー指標の生成関数でした。

ウィッテン 中島さんの発見したアフィン・リー代数は一種の証明ですが、実際は驚くべき発見でした。しかし、まだ一つ不思議なのは、アフィン・リー代数の対称性がどこから来るのかと

いうことです。

戸田 確かに、オイラー指標の計算の後にモジュラー形式になることは確認できますが、何故それがモジュラー形式となるのか最も単純な例でさえ概念的な説明が出来ません。

ウィッテン 全く同意見です。実は、私は京都賞の記念講演であなたが言われていることと同じようなことを述べようとしました。何が真実か知ること、なぜそれが真実かを知ることには違いがあります。この場合、数学的証明があるのに、それでもあなたは「なぜか」と質問し、結局、物理学者は答えを知りません。私たちができることは、より大きな予想を提供することが全てで、これがその一つの現れです。しかし、実際は、私たちは「より大きな予想」を理解していません。

大栗 物理学者の見地からは、双対性が、6次元の対称性として幾何学化されたといえるでしょう。

ウィッテン しかし、6次元の理論は大きな謎に包まれています。

戸田 S-双対性と6次元の理論の関係は容易に理解されるのでしょうか？

大栗 関係自身は明らかなのですが、今度は、6次元理論自身に意味をつける必要があるのです。

ウィッテン 実は、私たちは6次元の理論について、どのように構成するべきか、あるいはどのように微視的に理解するべきか、余り分かっていないにもかかわらず、その振る舞いについては非常に多くのことを知っています。

6次元の理論の振る舞いに関する深遠な発見の一つは、1977年のファン・マルダセナによるものです。彼は、 N が大きいときには、この理論が超重力理論で解けることを示しました。残念ながら、6次元の理論が超重力理論により解ける領域は、あなたの質問を理解するために通常私たちが理論を調べなければならない領域と同一ではありません。

大栗 ラージ N の極限は、S-双対不変ではないということですね。

ウィッテン ええ、そうなのです。

マルダセナのラージ N に対する理論の解は、きちんと機能して、意味があります。しかし、モントネン-オリープの双対性を理解する直接の助けにはなりません。なぜなら、双対性の下で不変でないパラメータ領域で理論を調べているからです。言い換えれば、もしモントネン-オリープの双対性を理解するためにマルダセナの解を応用しようとする、マルダセナの記述が役に立たないパラメータ領域を調べなければなりません。

しかし、マルダセナの解の存在と成功は、全ては理解していないものの、6次元の理論は存在し、その理論に関する標準的な主張は全て真であるという物理学者の自信を明確に深めました。リーマン予想の何か新しい結果が真であると発見した数学者に幾分似ています。それはリーマン予想により大きな信頼を与えますが、しかし、リーマン予想を理解したことは意味しません。

大栗 戸田さん、現在の物理学の研究の状況をどのようにご覧になりますか。昨日のワークショップでは、たとえば、中島さんはウィッテンさんのケンブリッジ大学での講演を理解するのに18年かかったと語っていました。また、深谷賢治さんは、物理学者の書く方程式は、右辺も左辺も何のことも分からないことがあると言っていました。あなたは、Kavli IPMUに何年もいらしたのですから、この点についてどのようにお考えですか。

戸田 勿論、私は弦理論について何も理解していませんが、時々弦理論の論文や計算を眺めることはあります。そしてそれらに含まれる物理用語を数学用語に置き換えて考えます。例えば、D-ブレーンを層に、BPS状態を安定対象に置き換える等です。これらの物理的背景は理解していませんが、こうすることで物理の側から多くを学

ぶことができ、また数学者が解くべき問題を見つけることができると思います。これらが代数幾何学の古典的問題と関連することを発見したこともありました。

大栗 弦理論のセミナーにも出席されていますが、物理学者と交流することで得ることはありますか。

戸田 弦理論の研究者には様々なタイプが存在すると思います。中には دونالدソン-トーマス不変量や接続層の導来圏といった、私の研究に近い事を物理的側面から研究している人もいます。その様な人のセミナーからは何かしら得ることはありますが、これはほとんど数学のセミナーと言って良いものだと思います。

大栗 物理学者は、数学的予想の生成関数だという数学者もいます。しかし、数学者にとって有用な物理学者とそうでない物理学者もいるでしょう。たとえば、中島 啓さんは、ウィッテンさんの講演から得ることが多いが、それは、研究の動機やアイデアがどこから来ているのかはわからなくても、ウィッテンさんの主張の一部には、数学的に厳密な意味をつけることができるからだと言っています。たとえば、昨日のワークショップで、立川さんが引用していた数式がその例で、数学者はそこから研究を始めることが出来るわけです。

山崎 でも、しばしば数学者は背後の論理を知りたがるのではないのでしょうか。私が数学的に意味のある主張をすると、数学者はそれを証明しようとすることができます。でも彼らはもちろん何が起きているのか知りたいのではないのでしょうか。

ウィッテン 任意の与えられた場合について、もっと簡単な答えがないとは保証できません。しかし、私たちが議論している問題の多くについて、大抵の物理学者の見解は、こういう質問に



対する最善の道具立ては、物理学で重要な場の量子論の中にあるということになるでしょう。

量子エンタングルメント

大栗 まだ、1990年代の出来事について話をしていますが、そろそろ新しい世紀に入りましょう。過去14年間のハイライトは何だとお考えになりますか。

ウィッテン 答えの一部ですが、マルダセナによって導入されたゲージ/重力双対性は非常に深遠なものです。今日でさえ、その興味深い新たな面が発見されています。重要な例としては、笠 真生（りゅう・しんせい）さんと高柳 匡（たかやなぎ・ただし）さんのゲージ/重力双対性における「量子もつれ量」（エンタングルメント・エントロピー）に関する仕事です。彼らはブラックホールのベッケンシュタイン-ホーキング・エントロピーの、実に興味深い一般化を発見しました。私は個人的にはこのテーマを研究したことはありませんが、これまでの進展はとても興味深いものでした。そして、量子重力について、より深い手がかりを含んでいるかもしれません。もし私にその研究の正しい方向が分かれば、恐らく自分自身この分野の研究を行うでしょうが、少なくともこれまでは私はそうしていません。しかし、それは私が最も注目することを勧めるものの一つです。

笠さんと高柳さんの他に、私はオラシオ・カシーニの論文、幾つかはマリナ・フェルタとの共著ですが、これもはっきりお勧めしたいと思います。一つの論文では次の問題に取り組みました。ブラックホールはベッケンシュタイン-ホーキング・エントロピーをもちます。ざっと20年前、ヤコブ・ベッケンシュタインは次の問題を考えました。物体がブラックホールに落ち込むとしましょう。その物体はエントロピーをもちます。物体がブラックホールに落ち込むと、そのエントロピー

はブラックホールの中に消えてしまいます。ブラックホールは物体を飲み込むと質量を得ますから、エントロピーが増えます。熱力学の第2法則は、この過程で全エントロピーが増えるべきことを主張します。言い換えると、ブラックホールのエントロピーは少なくとも落下した物体がブラックホールに近づく前にもっていたエントロピーの分は増大します。もし物体が与えられたエネルギーをもち、十分に小さくて与えられた質量をもつブラックホールの内部に収まるならば、ブラックホールのエントロピーには上限がありません。ベッケンシュタインはこのような上限を提案し、ベッケンシュタイン限界と呼ばれましたが、長い間、この限界が意味すると思われることを誰も正確に定式化できませんでした。

ここで私は深谷さんが物理と数学の関係について言われたことを思い出します。彼は物理学者による幾つかの主張に用いられる用語を正確に定式化することは難しいかもしれないと言われました。ベッケンシュタイン限界の場合は、その状況は次の通りです。概念（大きさ、エネルギー、落下する物体のエントロピー）が明確な意味をもつ状況では、ベッケンシュタイン限界が正しいことは自明で、余り興味はありません。例えば、箱の中で飛び回る多数の粒子から成るガスを考えましょう。ここで、系の大きさとエネルギーとエントロピーは全て明確な意味もっています。ベッケンシュタインの限界はかなりの余裕をもって満足されるため、正しいが興味はありません。ベッケンシュタインの限界に近づくような状況を見つけれられるかと質問してみてください。これは、ガスの粒子全体ではなく、箱の中の単一の粒子を考えることにより、達成できます。もっと厳密に言えば、箱の質量を無視すればベッケンシュタインの限界に近づきますが、これは非現実的な過程です。ベッケンシュタインの限界に近づくためには、実際、入れる箱がないのに、与えられた時間にほとんど確実に

時空間のある領域の中にいる単独粒子を考えることが必要です。（「ほとんど確実に」と言ったのは、相対論的量子力学が、粒子が与えられた領域に確かに存在する、と言うことを許さないからです。）ここで単独粒子に、そのエネルギーを定義することができ、（相対論的量子力学の一般的な限界内で）閉じ込められている領域を特定できますが、単独粒子のエントロピーに意味をもたせることは困難です。長い間、数多くの、多分何十、何百という論文がこれを議論してきましたが、その洞察はほとんどの場合限られたものでした。そして、オラシオ・カシーニが、簡単ですが非常に素晴らしい論文で、正しい概念はエンタングルメント・エントロピーであり、それは常に自然な方法で定義でき、普遍的なベッケンシュタインの限界が現れることを示しました。この論文はかなり前に出版されましたが、研究者に広く認識されるようになるのに何年もかかりました。

大栗 このカシーニの論文は、たとえば、「種の問題」に解答を与えました。この問題は、私自身が長い間不思議に思っていたのですが、カシーニの論文は、これが問題ではないということを確認に示したのです。

ウィッテン ベッケンシュタイン限界には反例と考えられたものがあり、ある人たちは、私もその一人なのですが、もしその限界が正しいなら、それは全ての場の量子論に関する主張ではなく、重力と矛盾なく統合できる場の量子論に関する主張であると考えたのです。しかし、カシーニはこれが完全に間違いであることを示しました。彼はベッケンシュタイン限界に関する全ての言葉に厳密な意味を与え、それが、すべての場の量子論について成り立つ一般的な主張であることを示しました。それは極めて明快であり、エンタングルメント・エントロピーに関する他の研究と同じように、多分重要な手がかりかもしれないと思われます。しかし、それが何に対する重要な手がかりなのかを調べるには、恐らく私より

若くて新鮮なアイデアをもつ研究者を必要とするのかもしれませんが。

その方向への寄与について、もう一つお話ししたいと思います。それはカシーニとマルダセナ、ラファエル・ブッソ、ザカリー・フィッシャー (BCFM) によるものです。何年か前にブッソが、ベッケンシュタイン限界の共変版 (covariant version) を定式化しました。それは宇宙論の問題にうまく当てはまる方法です。私がベッケンシュタイン限界について言ったことは、ほとんども、ブッソ限界にもあてはまります。それが意味することを理解した場合は、それは余り面白いものではなく、それに興味がある場合は、その意味することを理解できていなかったのです。最近のBCFMの仕事で、少なくとも平坦な時空間の場の量子論に対してブッソ限界の厳密な定式化と証明が与えられました。

大栗 この、量子重力と量子情報理論の交流は、ますます刺激的になっていますね。量子エンタングルメントは、時空間がどのようにより基本的な概念から発現されるのかを理解するのに重要なヒントを与えるように思います。**ウィッテン** そう期待します。その研究は難しいので、実は私はもっとよく知られた類いの研究をしています。これまでの10年間、あるいはもう少し以前の私の仕事と比べると、恐らく幾分主流から外れた問題に次々に取り組んでいます。また、過去に何か一つの問題に取り組むときにかけた時間よりも単純にずっと長くこれらの問題に時間をかけています。私が今言ったことに最も良く当てはまる3つの問題は、ゲージ理論と幾何学的ラングランズ・プログラム、ゲージ理論とコバノフ・ホモロジー、摂動的超弦理論だと思います。

摂動的超弦理論を理解する最も良い方法は、超リーマン面を用いることです。超リーマン面は魅力的な数学的テーマで、私は数学者が興味をもつことを望んでいます。超リーマン面は普通のリーマン面をoddな変数、言い換え

ると、反交換関係をもつ変数を含むように一般化したものです。魅力的な代数幾何学的定理がありますが、部分的には1980年代に発展し、その後見捨てられました。もしそれが復活すれば素晴らしいことです。ところで、来年の5月にストーニーブルックのサイモンズ幾何学・物理学センターで私たちが行うワークショップでは、代数幾何学が取り上げられるのかもしれませんが。**大栗** このフェルミオンの次元から、本質的に新しい数学が生まれるとお考えですか。

ウィッテン 超リーマン面の代数幾何学はとても面白いと確信していますが、残念ながら1980年代に理解されたことの多くが未出版のノートや手紙の形で存在しています。私たちのワークショップがこの状況を変える助けになることを望んでいます。

コバノフ・ホモロジー

山崎 昨日あなたの講演に出席しました。コバノフ・ホモロジーが $N=4$ 超対称ヤン・ミルズ理論を、普段考えない積分サイクルの上で積分したものと書かれるということの説明をしていましたね。ひとつ印象的だったのは、そこで重要なインプットとなったのが、あなたがそれ以前に書いた論文だったことです (カプスティン・ウィッテン方程式を定式化したアントン・カプスティンとの論文、またその後ダヴィデ・ガイオットとの $N=4$ 理論の境界条件についての論文)。これらの論文を書いた時、既にコバノフ・ホモロジーへの応用は念頭にあったのでしょうか？

ウィッテン 答えは“no”です。この年月、私はコバノフ・ホモロジーについて知っていたけれども、理解していませんでした。しかし、それが幾何学的ラングランズ対応に関係があるとは知りませんでした。私がコバノフ・ホモロジーを理解していないことにフラストレーションを感じた理由は、ジョー

ンズ多項式に関する仕事がコバノフ・ホモロジーを理解するための良い出発点となるはずであると感じていたのに、どうやって進めばいいのか全く分からなかったからです。(数学的観点からは、コバノフ・ホモロジーは結び目のジョーンズ多項式の改良、あるいは「圏化」(categorification) です。) 実際は、既に2004年にセルゲイ・グーコフとアルバート・シュワルツとバッファが、部分的にはそれ以前の大栗とバッファの仕事を利用してコバノフ・ホモロジーの物理に基づく解釈を与えていました。しかし、私はそのゲージ理論との関係は、まだ間接的で、謎が残されていると思っていました。私はもっと直接的な道筋を見出したかったのですが、何年もの間、それは難しいと思っていました。

しかし、結局、数学の文献に現れた進展に助けられ、コバノフ・ホモロジーが、幾何学的ラングランズを理解するために用いられたものと同じ要素を用いて理解できるだろうと気がつきました。私はこれら全ての手がかりを理解したわけではありませんが、そのうちの2つから学びました。一つはデニス・ゲイツゴリの、数学者が「量子幾何学的ラングランズ対応」と呼ぶもの (この名前を物理学者が使うようになるかどうかは分かりません) についての仕事で、量子幾何学的ラングランズ対応の q パラメータが量子群およびジョーンズ多項式の q パラメータと関係があることを示しています。もう一つは、サビン・コーティスとジョエル・カムニツァーの反復ヘッケ変換の空間を用いてコバノフ・ホモロジーを構成する仕事です。最初、私はこれらの手がかりをどう解釈したらいいのか分かりませんでした。それらは戦闘開始の旗が掲げられているようなものでした。

ヘッケ変換は幾何学的ラングランズ対応の最も重要な要素の一つです。物理の観点からそれが何を意味するのか長い間私を悩ませ、結局、幾何学的ラングランズ対応を物理とゲージ理論

の観点から解釈する上で最後の主要な障害となっていました。しかし、遂に、シアトルから帰宅途中の飛行機の中で、幾何学的ラングランズ対応と言うヘッケ変換は、単に代数幾何学者が量子ゲージ理論のトホーフト作用素の効果を記述する方法であるという考えが閃きました。私はそれまでトホーフト作用素を用いる研究は行っていませんでしたが、1970年代末に量子ゲージ理論を理解するための手段として導入されたもので、私は良く知っていました。トホーフト作用素をどのように扱うか、電磁双対性の下で何が起きるか、に関する基礎知識は良く知られていましたから、ひとたびヘッケ変換をトホーフト作用素の観点から解釈し直すことができると、私には多くのことがそれまでより明確になりました。

コーティスとカムニツァーは反復ヘッケ変換の空間のB-模型の立場でコバノフ・ホモロジーを解釈しました。また、カムニツァーは別の論文で、同じ空間のA-模型によるもう一つの記述があるだろうと予想しました。技術的には、適切なA-模型を見つけるのは困難でした。私は本当にA-模型を理解したいと思いました。なぜかという、それは露わな形で3次元あるいは4次元の対称性を得ることを期待できる方法だからです。コバノフ・ホモロジーの研究での私の主な目標は、露わな対称性をもつ記述と、ジョーンズ多項式のゲージ理論による記述との明らかな関係を見出すことでした。結局、私はこれに成功しました。最も難しかった要素の一つは、ゲージ場が、私が「ナーム極境界条件」と呼んでいる微妙な境界条件に従わなければならないということでした。(ナーム極境界条件に導く基本的な考えは、30年以上前にウェルナー・ナームが磁気単極子に関する研究で導入しました。)幸運にも、私はナーム極境界条件とその電磁双対性での役割について、数年前にダヴィデ・ガイオットと共同研究をしたことにより、良く知っていました。

私は数学の世界がコバノフ・ホモロ

ジーについての私の仕事を、中、短期的に認識できるだろうか、また、そのための障害は、主としてナーム極境界条件に馴染みがないことではないか、と思っていました。それを念頭に、その境界条件の詳細な数学的理論を与えようと、ラフェ・マゼオと共に研究を進めてきました。私たちは、結び目の無い場合にナーム極境界条件を厳密に定式化する論文を書き、また、結び目を含むように一般化しようと試みています。必要な不等式は得られていますが、まだ詳細については整っていないところがあります。

山崎 なるほど。それは物理と数学の間に交流が生まれた良い例ですね。あなたは数学の重要な論文に動機づけられ、物理学者としてそれらに解釈を与えました。そこで自分の物理のストーリーができたので、今度は数学に還元しようとしています。

ウィッテン 既に触れましたが、コーティスとカムニツァーが理解できたのは、実はB-模型でした。それは露わな3次元対称性をもたないので、私はA-模型に集中することにしましたが、もし2ヶ月ほどの時間があれば、私は物理学者としてコーティスとカムニツァーのB-模型の説明を試みるでしょう。私は、自分にはそれができようであろうということ、それが明解であろうということについて、結構楽観的です。唯一の問題は、そういう類の、数ヶ月かければ明らかにできると思うやり残しの仕事の数多くあることなのです。

ラングランズ対応とゲージ理論の双対性

大栗 1970年代の後半には、ラングランズ対応がS-双対性となんらかの関係があるというヒントがあったように思います。その重要性に気づかれたのは、いつのことですか。

ウィッテン 1977年の私とマイケル・アティヤーの交流をきちんと説明していませんでした。彼は私の知らなかった2つのことを語ってくれました。一つはモンテン-オリープの論文で、

もう一つは、数論で中心的役割を果たしているが、私が聞いたことのないラングランズ対応でした。彼はラングランズ双対群と(以前にピーター・ゴダード、ジャン・ナイツ、およびオリープによって導入されていた)モンテン-オリープ予想に登場する双対群は同じものであると指摘しました。これに基づいて、アティヤーはラングランズ対応がモンテン-オリープ予想と関係があるのではないかと考えました。

大栗 それは、1970年代の後半ということですね。

ウィッテン 1977年の12月か1978年の1月のことでした。私が初めてオックスフォードを訪問した時でした。

大栗 当時すでに、ラングランズ対応がゲージ理論のダイナミクスと関連があるということを実感に捉えていらっしゃいましたか。

ウィッテン そうですね、気にはしていましたが、先ほどお話したように、私はモンテン-オリープの双対性に懐疑的だったので、ラングランズ双対性とは何か、調べようとはしませんでした。1980年代の終わり近くまで、この件について何も調べませんでした。その後、ラングランズ対応について、ほんの表面的に調べてみました。もしラングランズ対応についてほんの少しでも知っており、また、リーマン面上の共形場理論について少し知っていれば、それらが類似していることに気がつきます。それが動機となって論文を一つ書きましたが、その後で、私の理解は余りに表面的で何も深い内容が得られなかったことに気がつき、それで何年もの間その件は放っておきました。

大栗 私は1988年から1989年にかけて、プリンストンの高等研究所のポストドクトラル・フェローでしたが、ローバート・ラングランズ自身が共形理論に強い興味を持っていたことを覚えています。どの側面に興味があったのかは、よくわかりませんが、

ウィッテン 彼の動機がラングランズ

対応だったとは思いません。しかし、彼の仕事は影響力があったと思います。ある意味で、彼自身が明確に大きな突破口を切り開くことは無かったにせよ、彼が手助けをして見出した問題は、後に「確率論的レブナー発展方程式」の進展を刺激しました。確率論的レブナー方程式は、これまで数学に大きなインパクトを与え、物理学者に対して共形場理論の幾つかの問題について考える新しい方法を教えてきました。私は、この仕事の裏でラングランズが影響を及ぼしていたと思いますが、彼の共形場理論に対する興味はラングランズ対応あるいはゲージ理論の双対性が動機であったとは信じていません。これは何年かに渡る彼との交流から得た印象です。

既に言ったように、1980年代の終わり近くに共形場理論とラングランズ対応の間の類似という考えを発展させようとして時間を費やした後、私が発展させようとしていた形式は非常に表面的であると本意ながら結論し、そこで中止しました。しかし、その後1990年頃、アレクサンダー・ベイリンソンとヴラジーミル・ドリinfeldの幾何学的ラングランズ対応に関する新しい仕事について耳にしました。これには幾つかの結果がありました。まず第一に、物理で双対性が何を意味するかについての私の理解が非常に表面的であることが確認されました。ラングランズ対応と共形場理論の間の、私のやや素朴な類似よりは、彼らの結果ははるかに的を得ており、はるかに詳細なものでした。彼らの仕事は、私の知っている物理が関連していることを確認しました。しかし、彼らの共形場理論の使い方は、私には無意味と考えられるようなもので、困惑させられました。彼らは共形場理論を負の整数のレベルで調べており（物理では正の整数の方が自然）、とても奇妙に見えるような方法で使っていました。

昨日、京都賞の記念ワークショップでの私の講演で説明したように、何年もジョーンズ多項式に関する「体積予

想」（2000年頃からリナート・カシャエフ、村上 斉、村上 順などにより定式化、発展が行われ、私は主にセルゲイ・グーコフから説明をうけました）が私を悩ませました。彼らの主張は、表面的には物理的にしっかりした動機をもつ主張（実は1988年にジョーンズ多項式に関する原著論文で私自身が行った主張）に似ていましたが、決定的な違いがありました。彼らの主張では、複素臨界点が指数的に増加する寄与を与えるように見えたのですが、通常これは物理では不可能です。誰か他にも悩んだ人がいるかどうかははっきりしませんが、私はこの点について悩みました。これは熟考に値する良い問題であることが分かったのですが、その理由は、結局私はうまい説明を発見し、それがゲージ理論を通じてコバノフ・ホモロジーを解明するきっかけになったからです。

ベイリンソンとドリinfeldの幾何学的ラングランズ対応に関する仕事は、ほとんど同じように私を悩ませました。彼らは物理で良く知られたことを使っていましたが、その使い方は、適切とは見えませんでした。いわば、誰かがチェスの駒を、あるいは日本では将棋の駒と言うべきでしょうか、一握りつかみ、盤上に無秩序に置いたように見えました。私には駒の並べ方が全く意味を為さないと思えました。私はそれで悩んだのですが、何もすることはできませんでした。

実は、ベイリンソンとドリinfeldが言っていたことのうち、ほんの僅かだけ理解できたことから、私はナイジェル・ヒッチンの仕事に彼らに関係があるのではないかと思い、そこで彼らにヒッチンがその論文で曲線上のファイバーのモジュライ空間で可換微分作用素を構成したことを指摘しました。言い換えると、ヒッチンはある意味で彼が数年前に構成した古典的可積分系を量子化したのです。私はベイリンソンとドリinfeldが言っていたことをほとんど何も理解していませんでしたが、ヒッチンの仕事に彼らの目

を向けさせたのです。そして、実はベイリンソンとドリinfeldは、彼らの幾何学的ラングランズ対応に関する非常に長い、未出版の基礎的な論文（ウェブ上で見られます）の中で、私の理解の程度を実際よりはるかに過大評価する、非常に寛大な謝辞を述べてくれました。実際に起きたことは、私が推測に基づいて彼らにヒッチンの仕事について述べたことが全てでした。それで彼らにはあらゆるものが明白になったのだと思います。多分、彼らは私がそれについて何かを知っていたと思ったのでしょうか。しかし、そうでは無かったのです。いずれにせよ、当時は幾何学的ラングランズ対応が物理と関係があると考える十分な理由がありました。しかし、お分かりのように、私はまだそれから意味のあることは何もできませんでした。

大栗 では、この問題に戻るきっかけになったのは、何だったのですか。

ウィッテン 10年後に、高等研究所で物理学者のための幾何学的ラングランズ対応のワークショップがありました。あなたは出席されましたか？

大栗 招待されていたのですが、予定が合わなかったのでいけませんでした。

ウィッテン 2つの長い連続講義と、それとは違った話題が2つほどありました。長い連続講義は非常に立派なものでしたが、私には余り役立ちませんでした。その一つはマーク・ゴレスキーが物理学者にラングランズ対応とは何かを話すものでした。彼は（代数的な意味での）体の定義以上の知識はないものと仮定して講義をしました。しかし、私は、2、3の講義で彼が説明できる程度までは、既にラングランズ対応を知っていました。つまり、私は本質的には何も知らないにもかかわらず、ゼロからスタートして数時間で説明できる程度のことは知っていたのです。ですから、この講義からは大したことは得られませんでした。

このワークショップを仕切っていたエド・フレンケルが、もう一つの連続

講義をしましたが、私に関する限り、それは基本的に駒が無秩序に並べられた将棋盤に関するものでした。私は実際この講義からも得るものがありませんでした。その理由は、私に関する限り、幾何学的ラングランズ対応を研究している人たちが馴染みの将棋の駒を取り、盤上に無秩序に並べていることを既に知っていたからです。

他に、連続講義とは違う2つの講義がありました。一つはデイビッド・ベン-ツピが幾何学的ラングランズ対応の近似と考えられたものについて話しました。彼は主には別の数学者、ディマ・アリンキンの仕事について話したと思います。幾何学的ラングランズ対応の近似と考えられたものとは、ヒッチンのファイバー構造の、ファイバー上のT-双対性です。ベン-ツピは、これをヒッチンのファイバーが正則になるような複素構造の上で記述したので、T-双対性は正則性を保つ双対性です。ヒッチン・ファイバーのT-双対性が4次元のモントネン-オリープ双対性から来ることは既に物理学者には知られており、また、勿論、1977年から78年のアティヤの所見を聞いて以来、私はずっとラングランズ対応のあるバージョンがモントネン-オリープ双対性に関連付けられるかもしれないということに気がついていました。しかし、ベン-ツピがT-双対性が幾何学的ラングランズ双対性そのものではなく、その“近似”にすぎないと主張していた事実はどうなるのでしょうか？ある時点で私は、その理由は単にベン-ズヴィが間違った複素構造を使っていたからではないかと思い始めました。私の考えは、ヒッチンのモジュライ空間の同じT-双対性を違う角度から見たら、ある複素構造のB-モデルとの間のミラー対称性と、あるシンプレックス構造のA-モデルとの間のミラー対称性が与えられるのではないか、というものでした。このミラー対称性は、真の幾何学的ラングランズ双対性であり、近似ではないと思われました。実際は、幾何学的ラングランズ対応に

ついてアントン・カプスティンと一緒に仕事を始めた理由は、彼が前に2次元双対性での一般化された複素幾何を研究していたからです。その一般化された複素幾何の世界では、双対性のファミリーが縮退していることがあり、またミラー対称性が正則な双対性に縮退していることがあります。

こう考え始めると、すぐに、幾何学的ラングランズ双対性が実は正則な双対性に縮退することがあるミラー対称性であり、そしてこれがベン-ツピが私たちに教えた近似であることが、非常に腑に落ちました。私はそれが正しいと確信しました。しかし、まだ幾つかハードルを越えなければなりません。最も困難だったことは、既にお話ししました。ヘッケ作用素無しではラングランズ対応はうまく扱えません。ですから、ゲージ理論のトホーフト作用素を用いてヘッケ作用素を物理的に解釈することが必要でした。また、複素多様体 M の余接バンドルのA-モデルを、 M 上の微分作用素を用いてどのように解釈するか知ることも必要でした。これは実のところ、以前カプスティンがやったこととかなり近いことでした。ひとたびこれらの点が理解されると、物理学者である私にとって、幾何学的ラングランズ対応が何かということは、かなりの程度明らかでした。

しかし、それを論文にするのは非常に困難で、約1年かかりました。私は、その間、「人生の意義を悟ったのに、誰にもそれを説明できない」かのように感じました。そして、次の理由で、私は未だにある意味でそのように感じています。弦理論あるいはゲージ理論の双対性を予備知識としてもつ物理学者は、幾何学的ラングランズ対応に関する私とカプスティンの論文を理解できますが、話が複雑すぎるので、大部分の物理学者は本当に面白いとは思わないでしょう。一方、数学者には面白いトピックですが、彼らには場の量子論と弦理論の深い予備知識はなじみがなく（また厳密に定式化することが難しいので、）理解は困難です。残念な

がら、あのカプスティンと共著の論文は、数学者にとってかなり長い間、謎に包まれたままとなるかもしれません。**山崎** それにはもう10年か15年待たないといけないかもしれませんね。

ウィッテン 本当にそうかもしれません。短期的には、どのような進展があればゲージ理論による幾何学的ラングランズ対応の解釈が数学者にとって理解しやすくなるか、それを知るのには実は非常に難しいと思います。なぜ私がコバノフ・ホモロジーに興味するかというと、実はそれが一つの理由なので、コバノフ・ホモロジーと幾何学的ラングランズ対応に対する私のアプローチに用いる内容には同じものが多いのですが、コバノフ・ホモロジーの場合には、数学者がそれを面白いと思うならば、近い将来このアプローチを理解できることは、かなり可能性がありそうだと思います。私はコバノフ・ホモロジーの方が理解しやすいと信じています。もし賭けるなら、私が生きているうちにゲージ理論とコバノフ・ホモロジーが数学者に認識され、高く評価されるのを見るチャンスは相当あると思います。ゲージ理論と幾何学的ラングランズ対応の場合に同様のことを見るためには、運が良くなければならぬでしょう。単に個人的な憶測ですが。

戸田 あなたのS-双対性と幾何学的ラングランズ対応に関するアイデアは、本当の（数論的な意味での）ラングランズ対応に何か応用を与えるとお考えでしょうか？

ウィッテン それは、はるか彼方のことだと思います。私個人にとっては、いつか将来、数論が物理と接点をもつことは夢ですが、すぐそうなることはなさそうだと思います。

物理で特定の数論の公式が現れる分野はいろいろあり、それらは、いつか夢が実現する糸口なのかもしれません。しかし、私が本当に面白いと思うには、数論が何とかしてもっと組織的に物理に入り込むことが必要でしょう。多少なりともアドホックな形で物

理の計算から現れる特定の公式には、そんなに興味はありません。私を興奮させるには、数論が物理とずっと統合されることが必要ですが、すぐにそうなるとは思いません。

私の仕事では、ラングランズ対応の幾何学的な形式に集中しました。なぜなら、手近にあった物理に基礎を置く手段を用いて本当に理解する希望があると分かったからです。数論のラングランズ対応に対して、いつか同様のことが起きることがあるかもしれませんが、多分、欠けていることが数多くあり、最初何から始まるべきかを私たちは知らないのです。私が前進することができた理由は、数論のラングランズ対応を理解しようとするよりは、もっと狭いところに集中したからだと感じています。

戸田 私にとっては、数論と物理はかけ離れた研究対象の様に見えるので、S-双対性と幾何的ラングランズ対応の関係は非常に驚きでした。

ウィッテン それでも、いつか重要な手がかりと見なされるかもしれない多くの進展がありました。最も奥深いものの一つは、ざっと15年前にサブディープ・セティとマイケル・グリーンによって始められ、その後グリーンが多くの共同研究者と一緒に続けました。最初の仕事で、セティとグリーンは10次元のIIB型超弦理論の、ある低エネルギー R^4 相互作用を理解しようとしていました（ここで、 R はリーマン・テンソルです）。私に言わせれば、彼らは驚くべき発見をしたのです。あるウェイト $3/2$ の非正則アイゼンシュタイン級数により答えが与えられたのです。私の数論に関する知識は非常に表面的ですが、この種のこのの方が、通常2次元共形場理論に現れる古典的なモジュラー形式の種類よりも、現代の数論研究者の興味にずっと近いと思います。

大栗 このように、完全なモジュラー性を持っていないものは、数論にも登場しますね。

ウィッテン その通りです。数論研究

者が好むことが数多く物理に登場し、私自身の仕事にさえ、幾つか現れました。弦理論の研究者として私たちが研究する物理理論の中には、数論的に興味のあるものもあります。それらは数論についての情報を何かもっていますが、個人的には、私が近い将来、本当に数論と組織的に接点をもつ機会があるとは思えません。私には、そういう接点を持つとはどういうことかを定式化することさえできないのです。ですから、「私たちが何ができないか」すらお話しすることさえできません。そういうことをするには、今は未だ時宜を得ていないと思います。

とにかく、私が個人的には数論よりもむしろ幾何学的ラングランズ対応に集中した理由ですが、幾何学的ラングランズ対応も十分難しいものでした。それを理解するのは大変な努力を要しましたが、それを理解したら、表現論の幾何学的な側面を含め、数学者がしている多くのことが、物理の一部としてずっと分かり易くなると思います。例えば、私には、昨日京都賞のワークショップで中島 啓さんが説明されたことはよくわかりませんでした。理解するには、幾何学的ラングランズ対応を研究した後で明らかになるであろうことが幾つか必要なかもしれません。保証はできませんが、やってみる価値はあります。

中島さんは全体像を説明する時間がありませんでしたが、一つ明らかだったことは、講演の最後にアフィン・グラスマニアンについて話していたことです。トホーフト作用素の同型類はアフィン・グラスマニアンのサイクルに随伴するので、数学者がアフィン・グラスマニアンについて話すのを聞くと、恐らく、少なくとも話しの一部は、トホーフト作用素を使って考えたいと思うでしょう。保証はできませんが、中島さんが話していたことを物理学者の観点から理解することは、明らかに試みる価値があるだろうと思います。

とにかく、物理の観点から幾何学的表現論をもっと理解するために、もっ

と多くのできることを、すべきことがあります。事実、幾何学的ラングランズ対応に関するベイリンソンとドリinfeldの最初の仕事の一部は、まだ私の満足する形では理解されていません。ここで私は、あるB-プレーン（ベイリンソンとドリinfeldの言葉でoperに随伴するもの）に双対なA-模型を構成するための、彼らが臨界レベル（レベル $-h$ 、ここで h は双対コクセター数）と呼ぶものに共形場の理論を使うことを考慮しています。数年前にダヴィデ・ガイオットと私は、電磁双対性のoperの代数多様体に対する作用について、適切な理解を得ましたが、その共形場理論との関係について、私は未だに理解したと本当に思っています。しかし、過去数年間、4次元超対称ゲージ理論とそれに関連する6次元理論について研究している物理学者は、臨界レベルでの共形場理論の役割を含む幾つかの発見をしました。ですから、今はこの点を解決する適切な時期なのかもしれません。

大栗 後10分ほどですが、最後に質問したいことはありますか。

数学者と物理学者の交りのある交流とは

戸田 一般的な質問があるのですが、あなたはどのような問題を数学者に解決して欲しいと思っていますか？

ウィッテン 代数幾何学者が研究する問題は、物理学者によって研究されている双対性を含め、数多くあります。その多くについては、私は最近の進展について詳しくないので、余り助言はできません。幾つかの場合については、かなり以前に物理学者がしたこと、今でも非常に意味のあることを理解しようと苦労しているところ、ほんの一つだけ例を挙げますと、ゴパクマー-バッファと大栗-バッファの公式は代数幾何学者に対して非常に影響を及ぼしてきましたが、物理学者として、私はそれらを理解したと満足したことはありません。ですから、昨年、実は私は学生のコラ・デドゥシ

エンコとかなりの時間を使って、これらの公式を理解しようとしていました。私は、この仕事で、あなたの質問に答えることを試みようとして答える前に、理解しておかなければならない宿題を幾つかやっています。

幸い、私たちは、ゴバクマー-バッファと大栗-バッファの公式についての論文を、ほぼ完成させたところです。**大栗** 来週、Kavli IPMUでお話される予定になっていますね（その後、論文として発表された：<http://arxiv.org/abs/1411.7108>）。

ウィッテン 戸田さんの質問に戻ると、現在興味をもたれている多くの分野があって、多分私には有益な助言はできないのですが、代数幾何学者に実は一つだけちょっとしたアドバイスをしたいと思います。是非、超リーマン面を推奨したいと思います。奥深い理論があると確信しています。それがすぐ現れるか保証はできませんが、もし十分な数の研究者が興味を持ってくれば、多分その場合に限って奥深い理論が短期的に発展することでしょう。保証できませんが、ひょっとすると、次の春に私たちがサイモンズ・センターで開催するワークショップが、その手助けになるかもしれません。

大栗 25-30年前に、超弦理論の摂動展開の有限性や宇宙項の消滅について研究がなされていたときには、満足な結果ではありませんでした。完全な理解は、超リーマン面の幾何学についての、あなたの正確な記述があって、可能になりました。

ウィッテン 大栗さん、ありがとうございます。あなたがそう考えてくれて、私はうれしく思います。超リーマン面を表に出さずに、全てをpicture-changing operatorなどを用いて記述することが可能なため、必ずしも物理学者全員が賛成というわけではありません。そういう風になると、公式の意味を適切に理解しないことになると、私は個人的には考えますが、必ずしも全員が賛成というわけではありません。

1980年代に超リーマン面の理論の進展が止まった一つの理由は、物理学者が超リーマン面を表に出さない部分的理解に満足したためだったと思います。この課題には素晴らしい美しさがあるのに、物事をそのように中途半端に理解しようとすると、見逃してしまいます。私はそれがすごく気になって、超リーマン面を用いて詳細を記述するため、今までに数年を費やしました。

私が説明しようとしてきた類いの詳細に、多くの物理学者が実際興味をもってくれるかどうか、これまでははっきりしないように見えます。ですから、私の希望することの一つは、数学者が超リーマン面の理論の進展に興味をもってくれることです。私には保証できませんが、彼らはきっとそうしてくれるだろうと思います。

大栗 弦理論の摂動論のより正確な理解から、物理についての新しい洞察が得られると期待されますか。

ウィッテン その答えは、物理についての洞察という言葉であなたが何を意味されているかによるかもしれません。弦の摂動論を、超リーマン面のモジュライ空間での積分によって定式化すれば、それが何を意味するのかをより良く理解できるようになると思います。これは洞察といえるでしょう。しかし、私たちの摂動論の理解の仕方に超リーマン面を取り入れることが、例えば、非摂動的問題、あるいは弦理論の対称性のより良い理解、その他の概念の助けになるかということ、今のところその証拠はありません。

山崎 最後の質問です。あなたは数理論物理の分野で研究されてきて、数学者と多く議論されていますし、数学の論文も書かれていますね。

ウィッテン そうですね、私が数学の論文を書くのは、私が実際にできることが物事を分かり易くするだろうという、非常に特殊な場合です。最近の例では、超リーマン面のモジュライ空間に関する基礎的な問題についてのロン・ドナギとの仕事、それから既に述べましたが、ナーム極境界条件につい

てのラフェ・マゼオとの仕事があります。

山崎 なるほど。それでは、物理学者が数学者と実りのある研究をしたいとき、何かアドバイスはあるでしょうか？
ウィッテン それは本当に難しいですね。通常、厳密な証明を与えるには、非常に綿密な方法が必要とされます。それは物理学者には難しいことです。私自身も数学的な証明を与えたことはありますが、理解のうえで何が本当に欠けているけれど、実はとても簡単なことで、適切な共同研究者がいれば私が役に立てる、と思った非常に特殊な場合のみです。物理学者の中には、特定の分野でもっと詳細に立ち入り、厳密な証明のための技術を学びたいという人もいます。しかし、大多数の物理学者は私が選んだような非常に特殊な場合だけで満足するし、そのような場合にだけうまくいくのだと思います。

山崎 なるほど。あなたの多くの研究において、数学者との対話がインスピレーションになったというのは本当でしょうか？

ウィッテン 普通、それが起きるのは、数学者がしたことが、物理的にはよく理解されておらず、私には意味がつかないと思えたときです。既に一つ、体積予想に関係した場合についてお話ししました。私は、何年もの間、この分野の結果が理解できませんでした。複素臨界点が指数関数的に増大する寄与をしていたからです。私は前に進めなくて、ずっと放っておきました。

遂に、2009年の夏、私はボンのハウスドルフ研究所で開催されたチャーン-サイモンズ理論20周年記念の国際会議に参加し、体積予想に関するもっと多くの講演を聞きました。私には、なぜ指数関数的に大きな寄与が入り込むのか理解できず全く困惑していました。これに対して私が見つけた解答は、本当に役に立つことが分かったので、今となっては、この問題についてそれ程にも悩んだことが間違っていたと感じています。

山崎 なるほど、その場合、駒が正しい場所がないという感覚があなたをある疑問へと導き、その疑問をあなたは最終的に解き、今度はそれが新しい発展を生んだわけですね。

ウィッテン そうです。もう一つの場合は、ベイリンソンとドリンフェルトが将棋の駒を盤の上に無秩序に置いたと思ったときでした。

学生へのメッセージ

大栗 コマは間違った置かれ方をしているかもしれませんが、違う次元から見ると、ピッタリ並んでいるのかもしれないですね。

私にも、最後の質問をさせてください。江口 徹さんが20年前にインタビューをしたときには、数学と物理学の境界領域の展望についての質問がありました。そのときには、この領域は非常に力強く発展しており、その勢いは当分続くだろうとおっしゃっていました。過去20年は、まさしくその通りになりました。そこで、私の質問は、次の20年はどうなるだろうというものです。この記事を読んでいる若い学生に、この分野の将来についてアドバイスをいただけますか。

ウィッテン まず第一に、過去20年間、この数学と物理の非常に豊かな交流が続いただけでなく、この分野がとても多様な方面に広がり、しばしば興奮するような発見がありました。この分野はあまりに様々な方向に発展しているため、私自身そのほんの少ししか理解できないでいますが。

これが続いてゆくことは確実だと思います。場の量子論と弦理論には、数学的に豊かな秘密が隠されていると信じているからです。これらの秘密の幾つかが表面に現れるときには、物理学者には、しばしば驚きとして現れます。それは、私たちは実は弦理論を物理として適切に理解してはいないからです。私たちは、その背後に潜む核心的な概念を理解していません。また、より基本的なレベルでは、数学者は未だ

場の量子論を完全に把握することができておらず、従って、彼らにとっても、そこから現れることは驚きです。ですから、これら両方の理由により、物理と数学で生み出される知識は長い間驚きであり続けると思います。

この分野には、若い人たちが参入し、これらがどんな意味を持っているのかを説明する、ワクワクするような機会がたくさんあります。私たちは、まだきちんと理解していないのです。異なる弦理論が非摂動的対称性により統一され、また、弦理論はある意味で本質的に量子力学的であるということが明らかになった1990年代に、私たちはそれまでより広い展望を得ました。しかし、私たちは、まだ一つの対象の異なる側面を研究しているのに過ぎず、その核心的な基本原理は明らかになっていません。ですから、今日の若者により、もっと大きな発見が成し遂げられる機会があります。しかし、では具体的にどのような方向を研究したらよいかという問いでしたら、その答を知っていたら、私自身そちらに向かっていくことでしょう。

大栗 長時間にわたってお話いただき、ありがとうございます。とても楽しかったです。京都賞受賞おめでとございます。

ウィッテン 京都賞について、親切なお言葉をいただき、ありがとうございます。また、この座談会の議論により、過去20年間に私たちがどれだけ進歩したのか思い出すことができました。ことにも感謝します。

大栗 では、また20年後にこのような座談会を開いて、これから20年間の発展を振り返ることにしましょう。

ウィッテン そうしましょう。そのためには、私たち皆、きちんとエクササイズをして、健康を保つ必要がありますね。

Mini-Workshop: 量子原始形式理論に向けて

齋藤 恭司 さいとう・きょうじ

Kavli IPMU主任研究員

2014年10月8日から10日まで、Kavli IPMUと文部科学省博士課程教育リーディングプログラム「数物フロンティア・リーディング大学院」の共同によるミニ・ワークショップ「量子原始形式理論に向けて」がKavli IPMUで開催されました。河野俊文と齋藤恭司が世話人を務めました。このミニ・ワークショップは、原始形式の量子化の理解につながる可能性をもつ、原始形式の周期写像に関連した最近の発展を取り上げることを目的とするものでした。以下に、スケジュールと講演内容を記します。

Oct.	10:00-11:30	13:30-15:00	15:30-17:00
8	Kapranov1	岩木 1	池田 1
9	池田 2	Kapranov2	岩木 2
10	岩木 3	池田 3	Kapranov3

池田暁志 (東京大学数理解析研究科):
 A_n クイバーに付随した N -カラビ-ヤウ圏の安定性条件と周期写像

最近、BridgelandとSmithは単純零点を持つ様な有理二次微分を用いることにより、ある3-カラビ-ヤウ圏の安定性条件を構成した。この講演では、彼らの結果を高次元のカラビ-ヤウ圏に一般化して A_n クイバーに付随した N -カラビ-ヤウ圏の安定性条件を A_n 型特異点の普遍変形空間のディスクリミナントの補集合の普遍被覆として記述した。特に、 N -カラビ-ヤウ圏の安定性条件のセントラル・チャージは二次微分の周期達で構成される。

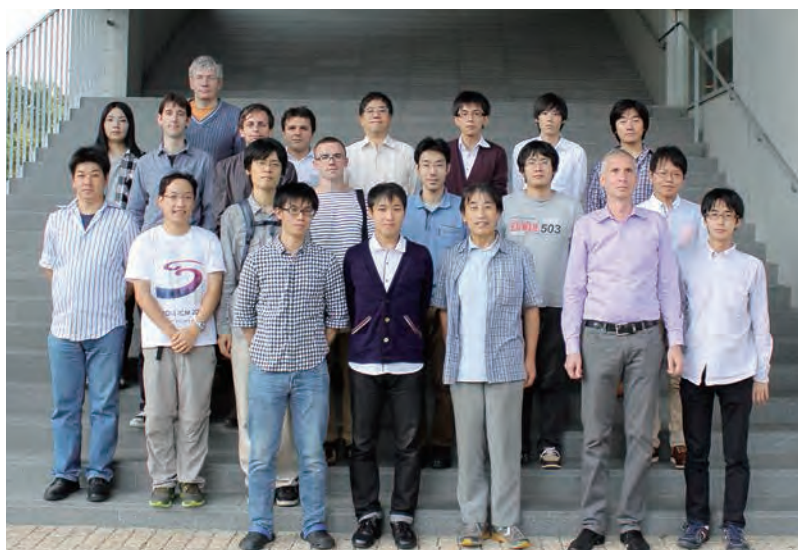
岩木耕平 (京都大学数理解析研究所):
完全WKB解析の理論とそのクラスター代数との関係

完全WKB解析とは複素領域で定義された(大きいパラメータを含む)微分方程式の大域的な研究に有効な方法である。他方、クラスター代数は生成系を固定した有理関数体のある特別な部分可換代数である。この講演では、まず完全WKB解析の解説を与えた。第三講で完全WKB解析におけるストークス・グラフに付随したクイバーにより定義される隠されたクラスター代数について説明した(T. Nakanishiとの共同研究)。そこではVorosシンボル達がクラスター代数を生成するクラスター変数をなす。

Mikhail Kapranov (東京大学 Kavli IPMU):

第二 polytope と Landau-Ginzburg 模型

点配図の第二 Polytope は、元来、多値ディスクリミナントの Newton polytope を記述するために導入された。点配図は多項式のモノミアル達の巾指数として現れる。この講演では M. Kontsevich や Y. Soibelman 等との共同研究に基づき、モース関数の臨界点達によって複素平面内に構成される新しい第二 polytope について討論した。それらの polytope に対して Gaiotto、Moor、及び Witten の仕事により提案された変形論的 Picard-Lefschetz 理論の代数的枠組みを与えるようなホモトピー・リー代数が構成される。



CLASSとMontePythonに関するワークショップ

小松 英一郎 こまつ・えいいちろう

マックス・プランク宇宙物理学研究所ディレクター / Kavli IPMU客員上級科学的研究員

10月27日から31日に渡り、線形ボルツマンコード“CLASS”とマルコフチェーンモンテカルロコード“MontePython”を習得するためのワークショップを開催しました。講師には、これらのコードの著者であるJulien Lesgourgues氏と、彼のチームメンバーであるBenjamin Audren氏とThomas Tram氏を招きました。現代宇宙論の研究には、宇宙論的線形摂動論の計算に線形ボルツマンコードを用い、理論予言と観測データを比べて最適な宇宙論パラメータとその信頼領域を決めるのにマルコフチェーンモンテカルロを用いるため、これらのツールは宇宙論研究にとって欠かすことができません。しかし、これらのツールを自作するのは時間がかかるため、すでに用意されたツールを使いこなすことで研究の効率が上がります。以前は、CMBFASTやCAMBといった線形

ボルツマンコード、およびCosmoMCといったマルコフチェーンモンテカルロコードが主流でしたが、これらのコードをダウンロードして、自力で理解し、使いこなすには莫大な時間がかかっていました。そこで今回、Lesgourgues氏のチームにより開発された、ユーザーフレンドリーな最新のコード“CLASS”と“MontePython”を著者から直接学ぶことで、国内の学生や若手研究者が最新のコードに触れ、使いこなせるようになる機会を設けました。全国から42名の参加者が集まり、活気あるワークショップとなりました。多くの参加者が熱心に質問し、与えられた例題を真剣にこなしたため、毎日16:30に終わるはずのスケジュールが、(セミナー室を追い出される)18:00まで続き、講師陣も、その熱意に圧倒されるほどでした。参加者に感謝するとともに、へとへとになるま

でがんばってくれた講師陣にも感謝します。今回のワークショップは、国内の若手研究者に大きなインパクトがあったようで、これからの発展が楽しみです。大成功に終わったワークショップですが、一つ重要な改善点があります。それは、女性の参加者が全体の1割以下にとどまったことです。tennetと理論懇のメーリングリストを何度も用い、全国に参加を呼びかけましたが、不思議と女性の学生や研究者の参加者は増えませんでした。今のシステムに何か根本的な問題があるのかもしれない、今後は、さらに積極的に、女性参加者の増加に取り組む必要があると考えさせられました。このワークショップの開催を可能にしてくれたKavli IPMUのスタッフ陣と費用のサポートに感謝します。



Kavli IPMU–RIKEN iTHES–Osaka TSRP Symposium Frontiers of Theoretical Science–MATTER, LIFE and COSMOS–

多田 司 ただ・つかさ

理化学研究所副主任研究員

“Frontiers of Theoretical Science–MATTER, LIFE and COSMOS–”と題されたシンポジウムが、11月6日カブリ数物連携宇宙研究機構のレクチャーホールで開催されました。このシンポジウムはカブリ数物連携宇宙研究機構、理化学研究所理論科学連携研究推進グループ（RIKEN iTHES）および大阪大学理論科学研究拠点（Osaka TSRP）の三者の共催によるものです。これら三者の研究機関間では、カブリ数物連携宇宙研究機構と理化学研究所理論科学連携研究推進グループ、および理化学研究所理論科学連携研究推進グループと大阪大学理論科学研究拠点の間にそれぞれ研究協力協定が結ばれており、今回のシンポジウムは広範な科学研究の分野を対象として理論研究を行っているこれらの研究機関相互の研究協力

体制が具体的に結実した最初の例と言えます。

シンポジウムでは初めに理化学研究所理論科学連携研究推進グループの初田哲男グループディレクターが各研究機関の紹介とシンポジウムの趣旨を説明した後、文部科学省研究振興局基礎研究振興課の行松泰弘課長が挨拶に立たれました。

引き続き行われた最初の講演はカブリ数物連携宇宙研究機構およびカリフォルニア工科大学の大栗博司教授による弦理論に関するもので、カブリ数物連携宇宙研究機構の村山斉機構長もヒッグス機構に関する講演を行いました。

理化学研究所からはFranco Nori GD および杉田有治主任研究員がそれぞれ量子回路と生命系のシミュレーションの講演を行ったほか、大阪大学から藤本仰一准

教授が理論生物学の講演を行いました。

シンポジウムはカブリ数物連携宇宙研究機構およびマックスプランク協会の小松英一郎教授の初期宇宙と宇宙背景放射の観測に関する講演で盛会のうちに締めくくられました。シンポジウムではこの他に次の若手研究者による講演も行われました：Mauricio Romo、Jonathan Malts、難波 亮（Kavli IPMU）、北沢正清、松尾信一郎（大阪大学）、和南城伸也、瓜生耕一郎、紙屋佳知（理研）。

それぞれの講演のあとには活発な質問と討議が行われ、研究者同士の議論は昼食の席上、休憩時間またシンポジウム後に行われた懇親会でも続けられました。今回のシンポジウムの成功により、今後これら三者の間での研究協力が一層の実りをもたらすものと期待されます。



The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG24)

齋藤 亮 さいとう・りょう

京都大学基礎物理学研究所博士研究員

難波 亮 なんば・りょう

Kavli IPMU博士研究員

藤田 智弘 ふじた・ともひろ

Kavli IPMU大学院生

向山 信治 むこうやま・しんじ

京都大学基礎物理学研究所教授 / Kavli IPMU客員上級科学研究員

2014年11月10日から14日にかけて研究会“The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG24)”が、カブリ数物連携宇宙研究機構において開催されました。この研究会は、相対論や重力をいろいろな側面から総合的に考えるという趣旨のもと1991年から毎年日本で開催されている国際研究会のシリーズです。以下に研究会の概要を述べます。

近年、宇宙や天体に関する観測は目覚ましい発展を遂げています。衛星による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の観測は、非常に精密な宇宙論的パラメーターの値を与えました。また、地上実験によるCMBの偏光の観測は、重力波の存在について様々な示唆を与えました。重力波の直接検出においてはいくつものプロジェクトが計画立案され、重力波干渉計などの建造がすでに始まっています。また、天体などから発生するニュートリノの探索や暗黒エネルギーの性質をより詳しく調べる観測も進んでいます。

一方、理論的側面からすると、原始重力波の存在量が適切な値になるような、多くのインフレーション模型が研究されてきました。近年理論的整備がなされてきたbigravityやmassive

gravityの模型による原始重力波の見積もりはその一例です。また、新たなスカラーテンソル理論が提案されたり、様々な時空、次元におけるブラックホールの性質が調べられるなど、修正重力理論や弦理論、量子重力、数学的側面から捉えた相対性理論などの様々な分野において興味深い発展がありました。

今回のJGRG24には15カ国から約180人が参加し、上に述べたような観測・理論両面にわたる様々な事柄に関

して、9件の招待講演と67件の依頼講演、38件のポスター発表が行われました。発表のトピックは暗黒物質、アクシオン宇宙論、弦理論、ブラックホール、修正重力理論、重力波実験、星形成、CMB、大規模構造、位相欠陥、インフレーション、重力レンズ、ニュートリノなど多岐にわたり、それぞれについて熱心な議論が何度も交わされました。また、研究会の最後には数名の選ばれた若手研究者・学生に発表賞が贈られました。



Workshop

強い重力レンズからみた銀河研究と宇宙論

大栗 真宗 おおぐり・まさむね

東京大学理学系研究科助教 / Kavli IPMU 准科学的研究員

暗黒成分が卓越する宇宙において、暗黒成分を直接「見る」ことができる重力レンズの重要性はますます高まっています。重力レンズの中でも、とくに効果の強い場合に相当する強い重力レンズは、暗黒物質の小スケール分布や増光を利用した遠方天体の研究に威力を発揮し、またそのシンプルな物理から宇宙論パラメータの決定にも重要な役割を果たしつつあります。このような背景のもと、11月17日から21日までの5日間にかけて「強い重力レンズからみた銀河研究と宇宙論」を開催しました。強い重力レンズに特化した研究会は珍しかったため多くの参加申し込みがあり、最終的に参加者は約70名、内50名近くが日本国外からの参加という国際色豊かな研究会となりました。

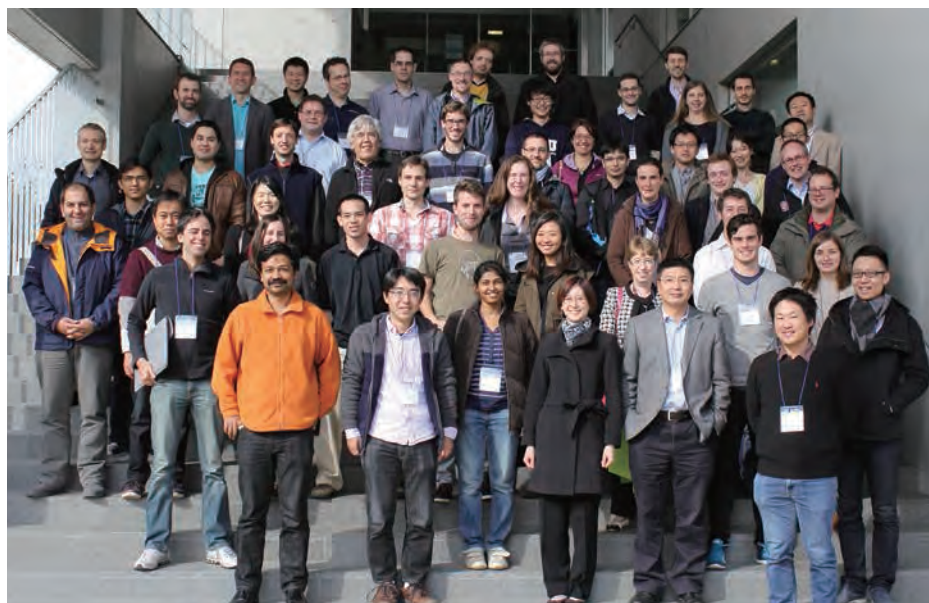
この研究会では各曜日にそれぞれテーマを設定して、集中的な議論を行いました。月曜日は特に時間の遅れを用いた宇宙論、火曜日は暗黒物質の小スケール分布とソース天体の構造、水曜日は銀河と銀河団の構造、木曜日は遠方銀河、金曜日は重力レンズ探索についての多くの講演が行われました。またこの研究会の特色として、参加者による通常の講演に加えて、

各日の最後一時間ほど全体議論の時間を設け、その日のテーマについて自由に議論を行った点にあります。主要な論点の例としては、シミュレーションや模擬データの役割がありました。

強い重力レンズ観測は観測量が限られるため、そこから得られる制限が無バイアスかを確認する上で、また誤差を正しく評価する上で、模擬データのブラインド解析の重要性が指摘されましたが、一方で非常に詳細な重力レンズモデル構築は時間もかかるためそのような試みが実際的に有効ではないかもしれないという指摘もありました。また強い重力レンズはこれまでは少数の興味深い天体を詳細に調べるアプローチが主でしたが、今後は大規模

サーベイにより何百という重力レンズ天体が一気に見つかるかと期待され、その中で探索や解析をどのように自動化して効率よく行うかという点も詳しく議論されました。議論は批判的ですが友好的な雰囲気のもと進み、設定した一時間の時間があっという間に感じられるほど充実したものでした。

研究会の運営にあたっては組織委員の小松英一郎、アヌプリータ・モレ、スルド・モレ、シェリー・スコ(ASIAA)、高田昌広の尽力が必要不可欠でした。また開催にあたってお世話になったカブリIPMUの事務スタッフの皆様、特に市川尚子さんに感謝します。



佐藤勝彦客員上級科学研究员、2014年度文化功労者に選ばれる

本機構発足以来2010年度末まで主任研究員を務められ、現在客員上級科学研究员の佐藤勝彦自然科学研究機構長が「宇宙物理学・宇宙論・学術振興」の功績で2014年度文化功労者の顕彰を受けました。



佐藤勝彦さん

立川裕二科学研究员、第29回西宮湯川記念賞を受賞

東京大学理学部物理学学科准教授でKavli IPMU科学研究员の立川裕二さんが「次元の異なる場の量子論の間に成り立つ対応関係の発見」により第29回西宮湯川記念賞を受賞しました。



立川裕二さん

中家 剛客員上級科学研究员、2014年度仁科記念賞を受賞

京都大学理学研究科教授で本機構客員上級科学研究员の中家 剛さんが、高エネルギー加速器研究機構の小林隆教授と共にT2K長基線ニュートリノ実験における「ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現現象の発見」により、2014年度仁科記念賞を受賞しました。



中家 剛さん

戸田幸伸准教授、第11回（平成26年度）日本学術振興会賞を受賞

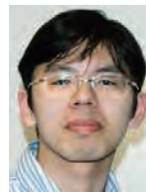
本機構准教授の戸田幸伸さんは、「接続層の導来圏と数え上げ不変量」の研究に関する業績により、第11回（平成26年度）日本学術振興会賞を受賞しました。



戸田幸伸さん

高柳 匡客員上級科学研究员、2015 New Horizons in Physics Prize受賞

京都大学基礎物理学研究所教授でKavli IPMUの客員上級科学研究员を兼ねる高柳匡さんが、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校准教授の笠 真生（りゅう しんせい）さんと共に「場の量子論と量子重力におけるエントロピーに関する基本概念」により2015年のNew Horizons in Physics Prizeを受賞しました。



高柳 匡さん

この賞は2012年にロシア人の物理学者でソーシャル・メディア投資家、ユリ・ミルナーがBreakthrough Prize in Fundamental Physicsを創設した際、若手研究者向けに設けられたものです。

ロバート・クインビー客員科学研究员、2015 Breakthrough Prize in Fundamental Physics受賞

2015年のBreakthrough Prize in Fundamental Physicsは宇宙の加速膨張を発見したSaul PerlmutterとSupernova Cosmology Project Team、及びBrian Schmidt、Adam RiessとHigh-Z Supernova Teamに与えられましたが、2014年8月末まで当機構の博士研究員を務め、現在サンディエゴ州立大学准教授・同大学ラグナ山天文台長、本機構客員科学研究员のロバート・クインビーさんはSupernova Cosmology Project Team



ロバート・クインビーさん

のメンバーであったため、受賞者の一員となりました。

ロジャー・ウェンデル准科学研究员、第9回日本物理学会若手奨励賞受賞

東京大学宇宙線研究所助教で本機構の准科学研究员を務めるロジャー・ウェンデルさんが第9回（2015年）日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。スーパーカミオカンデ実験から報告された“Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande”, [Physical Review Letters **110**, (2013) 181802として出版] に対する貢献が評価されたものです。



ロジャー・ウェンデルさん

フランス・コルドバ米国国立科学財団（NSF）長官、Kavli IPMUを訪問

2014年10月3日にNSF（米国国立科学財団）長官のフランス・コルドバさんがグラハム・ハリソンNSF国際統括プログラム・マネージャー、ケリーナ・クレイグ-ヘンダーソンNSF東京事務所長と共にIPMUを訪問され、村山機構長からこれまでにNSFの助成金を受けた研究者を受入れた実績を含め、機構の研究活動についての説明を聞き、基礎科学の支援に対する率直な意見を交わしました。

その後、藤原交流広場における研究者のティータイムに参加され、各国から集まった若い研究者、特にご自身が宇宙天文観測分野の研究者として科学的貢献をされたことから女性天文学者との交流を楽しまれた様子でした。



ティータイムで歓談する（左から）NSFのフランス・コルドバ長官、Kavli IPMU博士研究員のクレア・ラックナー、同エドモンド・チャン、村山機構長

村山機構長が国連本部でスピーチ

今年1954年に発足したCERN（欧州合同原子核研究機関）が60周年を迎えましたが、一連の記念行事の最後を締めくくる「CERN：平和と発展のための科学の60年一人と文化を結びつける上での科学と政府間科学機関の役割」が2014年10月20日にニューヨークの国連本部経済社会理事会会議場で開催され、村山機構長が「平和と発展のための科学：今日と明日」と題して基調講演を行いました。プログラムは潘 基文国連事務総長、CERNのロルフ・ホイヤー所長らのスピーチ、ノーベル平和賞受賞者のコフィ・アナン前国連事務総長、ノーベル物理学賞受賞者のカルロ・ルビア元CERN所長、村山機構長らの基調講演などで構成されました。

村山機構長の基調講演の様子とその全文については、本誌の表紙と38-40ページをご覧ください。

柏キャンパス一般公開

2014年10月24日（金）、25日（土）の2日間、東京大学柏キャンパス一般公開「探究心と好奇心～もっと身近に感じる科学～」が開催されました。

Kavli IPMUは研究棟を会場に、初日に羽澄昌史教授の「宇宙の始まりを探る—LiteBIRD 衛星に向けて」、2日目に村山機構長の「チーバ君も一緒！村山先生から宇宙の話をお聞かせ!!」と題する講演、2日間の企画として、展示による研究紹介、数学パズル、「宇宙の始まりの物語3D」のビデオ上映、研究棟見学ツアー、サイエンス温泉を実施し、いずれも好評でした。2日間の来場者数はキャンパス全体で約8,000人、Kavli IPMUには2,000人以上が訪れました。（サイエンス温泉とは何かは、次の項を参照して下さい。）



セミナー室で行われた研究紹介と数学パズル



講演する羽澄教授



村山機構長の講演には千葉県キャラクター、チーバ君も登場

サイエンスアゴラ2014に「サイエンス温泉」出展

東京のお台場地域で2014年11月7～9日に開催されたサイエンスアゴラ2014で、Kavli IPMUからの参加企画として11月9日に日本科学未来館会場の7階未来館ホールで「サイエンス温泉～サイエンスとアート、実は結構似たもの同士?!～」を行いました。

サイエンスアゴラは子ども向けの理科実験、トップ科学者との対話、市民参加の科学議論など、誰もが参加でき、科学と社会の関係をつくるイベン

トです。ここで、イギリスが発祥とされる“サイエンスカフェ”を日本式に翻案した“サイエンス温泉”では、登壇者の現代美術作家（画の浅井裕介さん）と最先端の若手サイエンティスト（Kavli IPMUの山崎雅人助教）が浴衣をはおって、会場の参加者30人強も特製 Kavli IPMU 温泉タオルを首にかけ、温泉場というゆるい雰囲気醸し出す中で、「対象に迫る方法」という固いテーマを題材に、真摯にトークを行いました。サイエンティストとアーティスト、それぞれの立場から複雑な世界の一端に迫る取り組み方とその類似性を目の当たりにした来場者からは質問が相次ぎ、時間が惜しまれながら幕を閉じました。



サイエンス温泉風景

Kavli IPMU/CRR合同一般講演会「宇宙を捉える—暗黒物質の正体に迫る—」

2014年11月15日、東京大学駒場キャンパスの21 Komaba Center for Educational Excellence (KOMCEE、理想の教育棟) Westレクチャーホールで11回目となるKavli IPMUと宇宙線研究所共催の一般講演会「宇宙を捉える—暗黒物質の正体に迫る—」を開催しました。プログラムは「暗黒物質」を理論家、実験家それぞれが解説するもので、理論家の松本重貴 Kavli IPMU准教授が「暗黒物質の正体について」と題して現在の暗黒物質研究を概観、続いてKavli IPMUの科学研究员でもある実験家の山下雅樹宇宙線研究所特任准教授が「地下からさぐる暗黒物質」と題して実際にXMASS実験に携わる立場から講演を行いました。その後、2人の講師によるざっくばらんなミニ座談会「暗黒物質っておもしろい?」、講

師を囲んでのティータイムと盛りだくさんの内容で約200人の来場者は満足気でした。

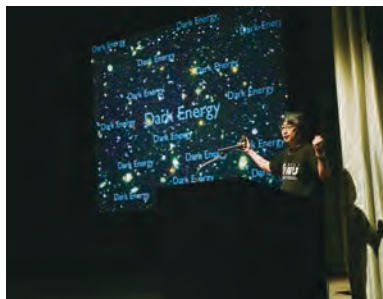


山下准教授(左)と松本准教授(右)

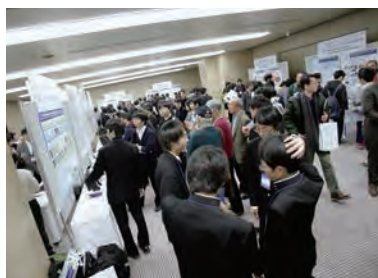
第4回WPI合同シンポジウム「サイエンスがつなぐキミのミライ」

2014年12月13日、有楽町朝日ホールにおいて、第4回世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)合同シンポジウム「サイエンスがつなぐキミのミライ」が開催されました。このシンポジウムは、次代を担う高校生を対象に最先端の科学とその魅力を伝えるために毎年行われてきており、今回はKavli IPMUが運営を担当しました。参加者は、一般参加を含め約400名でした。

シンポジウムは、濱田純一東京大学総長と常磐 豊文部科学省研究振興局長の挨拶で始まり、WPI全9拠点から若手研究者一人ずつが出演し自分の研究を紹介するビデオの上映に続いてWPI拠点の研究者3名の講演と高校生による研究発表が行われました。講演者の一人はKavli IPMUの村山機構長で、「宇宙に終わりはあるのか」について話しました。また、展示ブース会場で各WPI拠点の研究紹介と高校生による研究発表が行われました。



講演する村山 Kavli IPMU 機構長



賑わう展示ブース会場

サンタクロース一家がどんぐり保育園にやってきました

柏キャンパスに設置されているどんぐり保育園には毎年12月のクリスマス会にKavli IPMUからマーク・ベイギンス教授が扮するサンタクロースがやってきます。今年は教授夫妻と息子のイザク君がサンタクロース一家になって訪れ、園児と楽しい一時を過ごしました。



マーク・ベイギンス教授一家と職員の皆さん

人事異動

昇任

Kavli IPMU助教のトードル・ミラノフさんが2014年12月1日付けでKavli IPMU准教授に昇進されました。



トードル・ミラノフさん

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU在任期間です。]

Marcus Wernerさん [2011年10月1日—2014年12月31日]、Kavli IPMU博士研究員からケンブリッジ大学理論宇宙センター/応用数学・理論物理学科に客員研究員として滞在後、2015

年4月1日より京都大学基礎物理学研究所助教へ。

横崎 統三さん [2012年4月1日—2014年10月31日]、日本学術振興会特別研究員からローマ大学「ラ・サピエンツァ」博士研究員へ。



ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の発見

中家 剛 京都大学大学院理学研究科教授、Kavli IPMU客員上級科学的研究員

大強度陽子加速器施設J-PARCで行っているT2K実験で、新しいタイプのニュートリノ振動が発見されました。T2KはTokai-to(2)-Kamiokaの略で、東海村でミューニュートリノビームを生成し、295km離れた神岡町にあるスーパーカミオカンデで観測します。T2K実験は、2011年に電子ニュートリノ出現の兆候をとらえ、第3番目のニュートリノ混合角 θ_{13} が大きいということを世界で最初に発表しました。その後、実験を継続し2013年には 7σ を超える確証度で電子ニュートリノ出現を確立しました。この発見により、次はニュートリノ振動で粒子と反粒子の対称性（CP対称性）の測定が可能性となります。今後は、T2K実験のビーム強度を上げてCPの破れに迫る予定です。そして、最終的には超大型ニュートリノ測定器ハイパーカミオカンデを使った実験で、CPの破れが確立するでしょう。

