

# KAVLI IPMU NEWS

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

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

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

**Feature** The Life and Death of Galaxies  
**Round Table** Conversation with Nathan Seiberg



34

No. June 2016

# Kavli IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**  
The Life and Death of Galaxies  
Kevin Bundy
- 10 **Our Team** Dmitry Chernyak  
Shigeki Inoue  
Chen Jiang  
Yin Li  
Taira Oogi  
Yasuhito Sakaki  
Ichiro Takahashi
- 13 **Tea Break**  
In Search of Solitons in Amsterdam  
Alexander A. Voronov
- 14 **Round Table Talk**  
Conversation with Nathan Seiberg  
Nathan Seiberg  
Hiroshi Ooguri  
Yuji Tachikawa
- 26 **Workshop Report**  
PhyStat-v Workshop on Statistical Issues in  
Experimental Neutrino Physics  
Mark Hartz
- 27 **Workshop Report**  
Higher Residue Week, 2016  
Todor Milanov
- 28 **News**
- 32 **Seiberg Duality** Yuji Tachikawa

## Japanese

- 33 **Director's Corner** 村山 斉  
近況
- 34 **Feature**  
銀河の生い立ちと死  
ケビン・バンディ
- 40 **Our Team** デイミトロ・チュルニアク  
井上 茂樹  
江 辰  
李 寅  
大木 平  
坂木 泰仁  
高橋 一郎
- 43 **Tea Break**  
アムステルダムで出会ったもの  
アレクサンダー A. ヴォロノフ
- 44 **Round Table Talk**  
ネイサン・ザイバーク教授に聞く  
ネイサン・ザイバーク  
大栗 博司  
立川 裕二
- 55 **Workshop Report**  
PhyStat-v Workshop on Statistical Issues in  
Experimental Neutrino Physics  
マーク・ハーツ
- 56 **Workshop Report**  
Higher Residue Week, 2016  
トードル・ミラノフ
- 57 **News**
- 60 **ザイバーク双対性** 立川 裕二



Kevin Bundy has been an assistant professor at the Kavli IPMU since 2011. Before moving to Japan, he was a Hubble Postdoctoral Fellow at UC Berkeley and previous to that, a Reinhardt Postdoctoral Fellow at the University of Toronto. A native of Southern California, he completed his Ph.D. at Caltech in 2006. Bundy's research utilizes new "Big Data" survey programs combined with observations from premier telescopes to probe the physical processes responsible for the growth and evolution of galaxies over the last 10 billion years.

ケビン・バンディ：Kavli IPMU 助教。南カリフォルニア出身。2006年にカリフォルニア工科大学より Ph.D. を取得後、同大学で博士研究員、トロント大学で Reinhardt Postdoctoral Fellow、カリフォルニア大学パークレー校で Hubble Postdoctoral Fellow を経て、2011 年より現職。新しい「ビッグデータ」サーベイプログラムと主要な望遠鏡による観測とを組み合わせ、過去 100 億年に渡って銀河の成長と進化の原因となった物理過程を研究している。

# Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU  
Hitoshi Murayama



May 24: Giving an opening talk titled, "Frontier Science and World Peace," at the Symposium on Science and Technology Diplomacy – A New Direction for Japan's Diplomacy through Science and Technology– (see p. 28). (Courtesy of the Ministry of Foreign Affairs of Japan)



May 30: Giving a talk at the international conference "PhyStat-v 2016" held at Kavli IPMU (see p. 26).



June 19 : Kavli IPMU Public Lecture, "Lisa's Scientific Exploration - Dark Matter and the Dinosaurs" (see p. 30). In discussion with Lisa Randall, Professor of Harvard University.



From left to right, fellow speaker Shinji Mukohyama, Professor of Kyoto University, Lisa Randall and Hitoshi Murayama.



Interpreting Lisa's talk to the audience in Japanese.

# The Life and Death of Galaxies

While they may seem almost simplistic, questions like “How do galaxies grow?” and “How do they die?” are not only fundamental but capture many of the most important current problems in the topic of galaxy formation. In seeking answers to these questions, astronomers hope to uncover the nature of physical mechanisms that drive the initial formation and evolutionary history of galaxies, including our own Milky Way.

While there are many promising paths for insights into these questions, I would like to address two new kinds of observational data sets that have great potential by offering unprecedented statistical power to analyses of the galaxy population.

The first is a technological breakthrough that brings a 50-fold increase in our ability to collect *spatially-resolved* spectroscopic observations. Imagine the equivalent of a medical CAT scan for a galaxy — a 3D “datacube” describing the spectrum at every location, with the power to decompose the galaxy into its primary constituents, stars and gas, and to reveal the detailed nature of those constituents. Now imagine obtaining these galaxy “CAT scans” for thousands of nearby galaxies. The ongoing MaNGA Survey (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory), of which I am the Principal Investigator, aims to eventually cover 10,000 galaxies by the time it finishes in 2020, but even today, it is the largest survey of this kind. This rich data set is helping us catch evolutionary mechanisms “in the act,”

including our 2016 discovery of an entirely new class of galaxy that we call “red geysers” which offer a valuable clue to the mystery of how dead galaxies stay dead.

The second advance is deep imaging across very large portions of the sky, exemplified by surveys like the Subaru Telescope’s Hyper Suprime-Cam, also led here at the Kavli IPMU. These imaging surveys will catalog huge numbers of galaxies (tens of millions) over a vast range in cosmic time. For the first time, it will be possible to chart the evolving galaxy population over the last 6-8 billion years with high precision, illuminating patterns of growth and pathways of evolution that will constrain the underlying physical processes that drive them.

## Understanding Galaxy Death with MaNGA

For most of their lives, galaxies are lush environments for turning gas into stars. Until suddenly, they aren’t. Over the last few billion years, a mysterious kind of “galactic warming” has turned huge numbers of galaxies into deserts devoid of fresh young stars. It seems we are living through an era marked by the “death” of star formation in galaxies. Our Milky Way, itself, is heading down the path toward extinction (but not to worry, it still has a couple billion years to go!). The puzzle has been figuring out what keeps the gas in these dormant galaxies too hot and energetic to form stars.

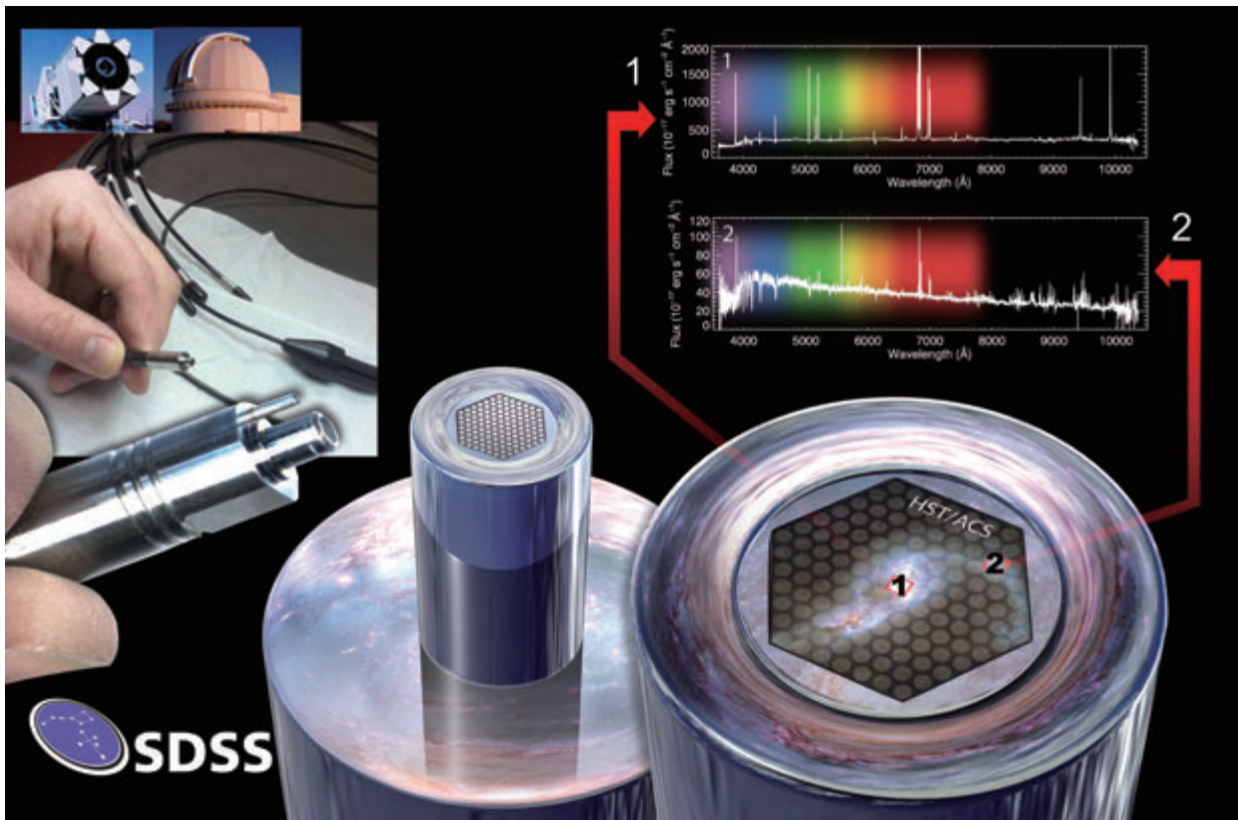


Figure 1. Illustration of MaNGA's fiber-bundle technology. Using a tightly packed hexagonal array of optical fibers, spectroscopic measurements can be obtained across the full face of target galaxies. For a given pointing on the sky, MaNGA deploys 17 such fiber-bundles which are positioned on targets by plugging them into a custom-drilled aluminum plate. (Credit: SDSS)

One problem in solving this mystery has been that current galaxy surveys are too small to overcome statistical uncertainties and establish definitive links between evolving populations. The evolving density of any population has never been measured to better than 20-30% and the situation worsens at high masses where samples are more complete but galaxies are increasingly rare. For the first time, wide-field surveys like the HSC Survey (see below) will make it possible to equate the diminishing numbers of one population (e.g., star-forming galaxies) with the rising occurrence of another (e.g., dormant disk galaxies). Establishing the pathways that lead to galaxy death will help us test global predictions of the various mechanisms involved.

But to fully diagnose what ails dying galaxies, we must peer inside them and study their inner

workings. This is one of several motivations for the MaNGA Survey, a core program in the current-generation Sloan Digital Sky Survey-IV (SDSS-IV) that began in 2014 and will complete observations in 2020. As shown in Figure 1, MaNGA works by bundling together sets of optical fibers into tightly-packed arrays, enabling spectral measurements across the face of each of ~10,000 nearby galaxies. Because the life story of a galaxy is encoded in its internal structure—a bit like the way the life story of a tree is encoded in its rings — MaNGA is allowing us to map out the distribution of the fundamental galactic building blocks: the dark matter whose gravity binds the galaxy, the gas from which stars form, the stars themselves, and the chemical elements that these stars produce in their nuclear furnaces and then return to the galaxy during their

explosive deaths. We are mapping out both the history of the formation of stars and the motions of the stars and gas at each location in the galaxy.

## The Mysterious “Red Geysers”

With the first year of MaNGA galaxy observations in hand, Edmond Cheung, a Kavli IPMU postdoctoral fellow, and I began poring over the maps of quiescent, so-called “red and dead” galaxies in the sample, a population devoid of star formation that accounts for roughly 30-40% of the galaxies MaNGA is targeting.

In recent years, it had become clear that quiescent galaxies often contain ionized gas, so the question was what prevents this gas from eventually cooling and condensing to form new stars. And with plenty of fresh gas in the universe trickling into galaxies all the time, one would expect “rejuvenation” of star formation to be more common. Even a smattering of new star formation would be apparent in these galaxies because fresh young stars are so much hotter (and bluer in color) than their elderly counterparts. Instead, once extinguished, star formation seldom appears to return.

The MaNGA maps confirmed the widespread presence of ionized gas in red and dead galaxies, but an intriguing spatial pattern caught Edmond’s attention. Soon, we began to notice this pattern appearing in quite a few examples. It looked like

irregular, bisymmetric streams of gas, outflowing from the central galaxy nucleus. Intrigued but skeptical, we named these objects “red geysers.” Red because they lived in non-star-forming galaxies, characterized by red colors, and “geysers” because they looked like outflows of material.

For over a decade, it has been realized that one way to solve the mystery of galaxy death was to invoke the potential power of a central supermassive black hole. If the energy liberated from even small amounts of material encircling such a black hole could somehow be injected into the galaxy’s ambient gas, distributed over much larger scales, this could be the heating source needed to keep hot gas from cooling and forming stars. The question was whether such a mechanism existed. Edmond and I wondered if red geysers held the answer.

With a sample of 8-10 red geysers to study, we chose to focus on a galaxy we nicknamed, Akira, after the famous Japanese manga character (an homage to our home institution in Japan and to the inspiration for the name of the MaNGA survey). In the previous color imaging, Akira appears to be a typical and unremarkable elliptical galaxy with no ongoing star formation. It is interacting, however, with a much smaller star-forming companion (we named this galaxy Tetsuo), as evidenced by long tidal tails that emanate from Tetsuo and connect the two galaxies (Figure 2).

The MaNGA data, however, reveal Akira to be

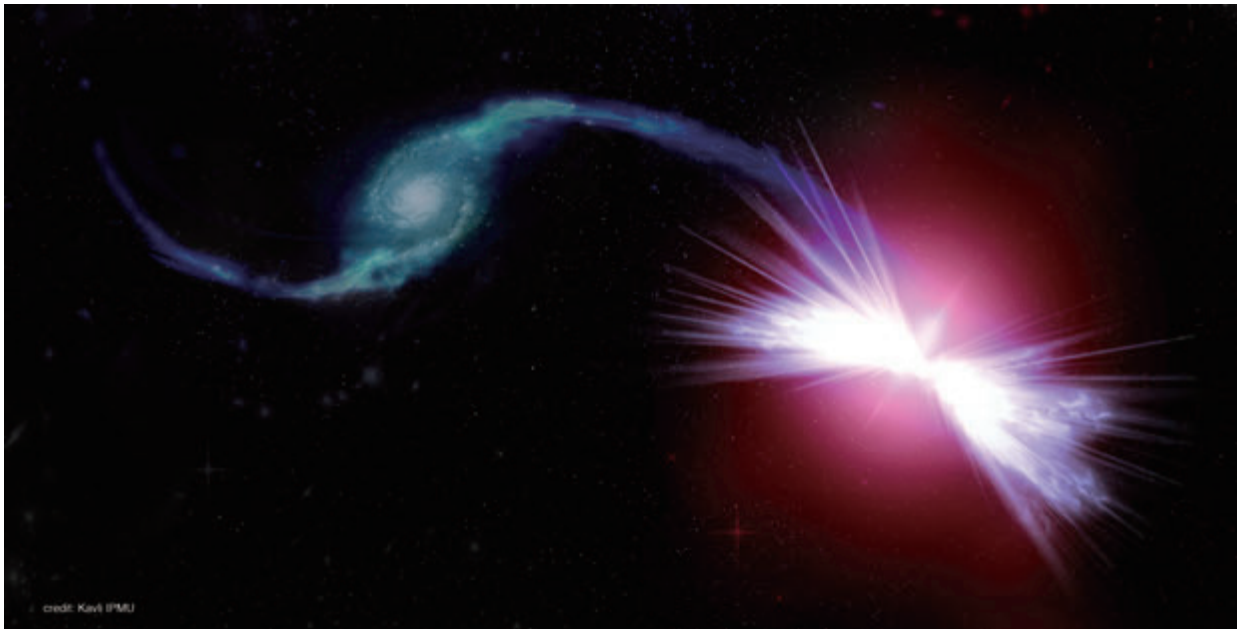


Figure 2. An artist's impression of the prototypical “red geyser” Akira (right) and its companion Tetsuo (left) in action. Akira's gravity pulls Tetsuo's gas into its central supermassive black hole, fueling winds that have the power to heat Akira's gas. The action of the black hole winds prevents a new cycle of star formation in Akira. (Credit: Kavli IPMU)

much more active and interesting than it would appear on first glance. The ionized gas map exhibits the tell-tale outflow-like pattern, but by studying the motion of this gas we proved that it was entirely decoupled from the motions of stars and, furthermore, that the gas was moving at sufficient speeds that much of it was likely to escape the confines of its host galaxy. These arguments demonstrate that Akira and red geysers in general harbor winds, likely driven by central supermassive black holes.

Other kinds of MaNGA maps reveal a second component of much colder gas in Akira that we believe was accreted from the smaller, star-forming companion. We performed some simple calculations to demonstrate that this gas should be cooling and forming stars at a rate that is not detected. What is more, the heating power of the red geyser wind appears sufficient to balance the cooling rate. We therefore argue that red geysers represent an important process in action: the triggering of a black

hole wind that deposits heat into the surrounding gas and thereby keeps dead galaxies from rejuvenating and forming new stars.

In May 2016, our work on this exciting discovery was published in the journal *Nature* (Cheung et al. 2016, *Nature*, **533**, 504). Following press releases by the Kavli IPMU and SDSS, more than 100 articles appeared in news outlets around the world including the *PBS NewsHour* website and *The Asahi Shimbun* (朝日新聞).

## How Do Galaxies Grow?

Turning from death to growth, a fundamental prediction of our standard cosmological framework is that structures in the universe grow “hierarchically.” While galaxies represent incredibly massive structures — our Milky Way has the mass equivalent to  $10^{11}$  Suns — they are a factor of 30 or more smaller compared to the amount of mysterious dark matter that envelopes them in a gravitationally bound

system that we call a dark matter halo. From the cosmological standpoint, the growth of structure is therefore dominated by dark matter, and so a simple way to express hierarchical growth is to say that, at any given time, the largest dark matter halos are the most recent ones to form and do so through the merging of smaller halos. The question is whether galaxies follow this pattern as well.

Naively, we would expect the answer to be yes. After all, galaxies, residing at the centers of their dark matter halos, are largely pulled around by the dark matter. If halos merge, galaxies should merge. And if we can approximate the galaxy's total mass from the amount of light it emits, we would expect distributions of the stellar mass,  $M_*$ , in galaxies to evolve hierarchically. The most massive galaxies today should have assembled their stars recently.

Strangely, some recent studies have claimed the *opposite* trend, finding that massive galaxies were first assembled long ago while the number of low-mass galaxies increases with time. Because a concordance of observational constraints has confirmed hierarchical models of the cosmic growth of structure, it appears we do not understand how galaxies grow inside their dark matter halos.

This confusion points to a major challenge: We currently lack definitive measures of galaxy growth rates, especially in the last half of cosmic history. The problem is that previous galaxy samples have been built from surveys of only 0.01% of the sky, the

equivalent area of about 10 full moons. While they reach great distances, these “pencil beam” surveys are too small to provide adequate statistics. As they pierce the “cosmic web” and intersect overdensities and voids, the statistical properties of the recovered samples bounce around, painting an uncertain picture about the true, underlying distribution of galaxy properties.

## A Powerful Role for the Subaru Telescope

In the coming years, new, panoramic wide-field surveys will for the first time sample the cosmic volumes necessary to measure galaxy growth, ushering in a new era of high-precision galaxy evolution studies. In the longer term, facilities like Euclid and LSST will provide unprecedented statistical power. But, major advances are possible sooner with instruments like Hyper Suprime-Cam (HSC), which is carrying out an unprecedented imaging survey. The “Wide-layer” component of this survey reaches image depths capable of detecting galaxies when the universe was less than half its current age. But instead of covering an area of only a few square degrees as in past surveys, HSC-Wide will span 1400 deg<sup>2</sup>, the equivalent area of 5600 full moons tiled across the sky!

Having started in 2014, the HSC survey is 10-20% complete and yet, we are already learning that addressing the question of galaxy growth



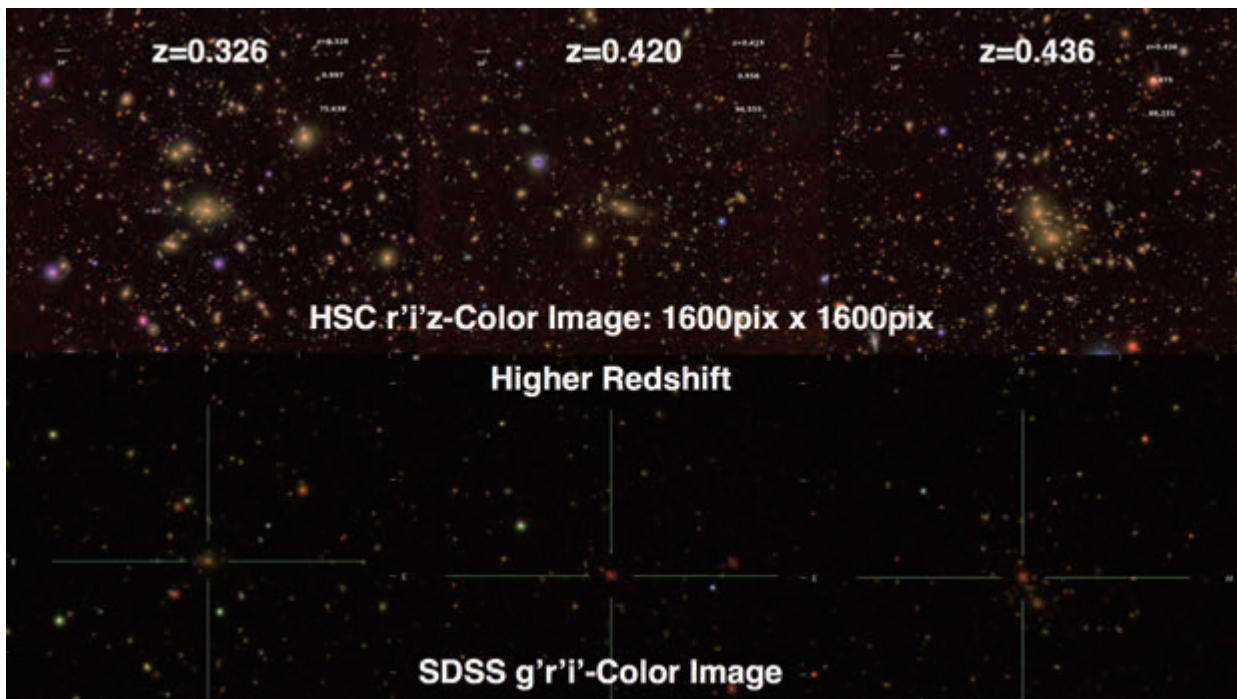


Figure 3. A comparison of deep HSC images (top row) to shallower Sloan Digital Sky Survey images (bottom row) for three massive galaxies at redshifts ( $z$ ) of 0.3-0.4 (roughly 3-4 billion years ago). The greater image depth of HSC captures more features, including the fuzzy outskirts of massive galaxies, which may account for much of the mass. (Credit: Song Huang)

requires not only the power of large statistically representative volumes, but also imaging depths that are sensitive to the outer regions of massive galaxies. The comparison between HSC images and the previous, shallower images from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) reveal this clearly in Figure 3.

While the fuzzy outskirts of massive galaxies may be intrinsically faint, they extend far beyond the central confines of the galaxy and, when added up, contain a significant number of stars and mass. Thus the lack of galaxy growth observed in previous, much smaller surveys may also owe to the fact that we have *missed* the outskirts, where this growth may occur.

In the near future, HSC is poised for a breakthrough in this topic. First, it will be possible to revisit previous measurements of the stellar mass of galaxies. In many cases, these estimates will be

revised upwards thanks to HSC's ability to measure stars in the outskirts. Second, as the survey matures, we will soon have the samples needed to address previous statistical limitations and chart the rate of growth at high precision. On the question of whether galaxies grow hierarchically, the jury is still out. But with HSC making sure-footed progress, stay tuned to find out!

# Our Team

## Dmitry Chernyak

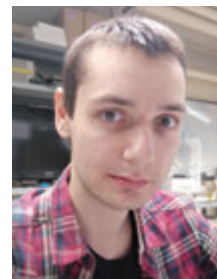
Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

As a member of KamLAND collaboration I participate in search for neutrinoless double beta decay. Observation of such extremely rare nuclear process will allow to establish the Majorana nature of neutrino, and help to determine the neutrino-mass hierarchy and estimate the effective Majorana mass of neutrino.

KamLAND-Zen is the world's most sensitive experiment (as of May 2016) to search for neutrinoless double beta decay. It uses liquid

scintillator loaded with enriched xenon to study double beta decay of Xenon-136. My research efforts will be focused on improvements of the KamLAND-Zen sensitivity towards the inverted mass hierarchy region as well as other projects.



## Shigeki Inoue

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I have been studying theoretical galactic astrophysics, mainly with numerical simulations and analytic calculations. Especially, my recent interest is in physical processes of high-redshift galaxies in their formation stages and how the formative galaxies are connected to the Milky Way in the current universe. Although I will keep studying galaxies, I am going to start out on a new field: the first stars! It will be so

exciting for me to dive into a new project in a new environment.



## Chen Jiang

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interest lies in algebraic geometry. More specifically, I am working on birational geometry, which focuses on classification of algebraic varieties under birational equivalence. In particular, I am interested in boundedness problems in birational geometry, including boundedness of varieties of Fano type and birationality problem. Most of my work are related to Fano threefolds and I showed that singular Fano threefolds form a birationally bounded family.



Also I investigated boundedness of invariants related to Fano varieties, such as pluricanonical systems, anti-canonical volumes, alpha-invariants, Chern classes, and so on.

## Yin Li

Research Field: **Theoretical Physics and Cosmology**

Postdoc

My research interests lie in constraining fundamental physics and cosmology using the large-scale structure of the universe, given the wealth of information contained in current and upcoming surveys. Recently I have been focusing on studying the impact on the large-scale structure probes due to matter distribution that goes beyond the survey scale, known as the super-sample effect. This novel effect introduces additional covariance in the data, and requires new parameters to be introduced when



extracting cosmological information. I am looking forward to continuing exploring this and other projects with Kavli IPMU researchers, while seeking to form new collaborations on a broader range of topics.

## Taira Oogi

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research focuses on exploring the galaxy formation and evolution processes. I am especially interested in the mass and size evolution of early-type galaxies. I have shown that dry mergers between early-type galaxies are an important process for the size evolution with N-body simulations. I am also interested in the formation and evolution of quasars and supermassive black holes, which reside at the



center of almost all massive galaxies.

I am investigating the statistical properties of quasars using a semi-analytic model of galaxy formation.

Our Team

## Yasuhito Sakaki

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

Though the Standard Model in particle physics describes microscopic phenomena very well, it is not perfect. My research focuses on how we examine physics beyond the Standard Model using information derived from collider experiments to its fullest extent. I am especially interested in creating methods using information, e.g., the internal structure of quark and gluon jets which are copiously produced in high-energy experiments. Precise understanding of the quantum chromodynamics describing jet properties and the data related to the



internal structure of jets are needed to improve these methods. In order for methods using detailed jet properties to become standard in future experiments, I think it would be necessary to demonstrate their usability in many cases.

## Ichiro Takahashi

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I have been researching the variable objects (mainly transients) in multiple wavelengths. My interest is to derive a physical description of them from light curves and spectra.

I have examined the origin and geometric description of gamma-ray bursts and neutron stars using a time series of X-ray spectra. In the meanwhile, I have developed and operated optical instruments for examining GRB afterglow and supernovas.



At Kavli IPMU, I will research transients such as supernovae using Subaru/HSC data, and visualize the big data of Subaru/HSC.

Mathematics Group



# In Search of Solitons in Amsterdam

Alexander A. Voronov

Professor, School of Mathematics, University of Minnesota  
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

I was spending the Spring Break at a conference on “Higher Structures” at MPIM Bonn. On the way there I stopped by in Amsterdam for a refreshing stroll along the canals in the crisp spring air. That was worth it, as I came across an amazing treat, see the pictures. It is the offices of Korteweg<sup>\*1</sup> and de Vries,<sup>\*1</sup> moreover, not in a random place but in Vincentiushuis! Note, that my home Department of Mathematics at the University of Minnesota is located in Vincent Hall. Inspired, I started looking for the names of Kadomtsev<sup>\*2</sup> and Petviashvili<sup>\*2</sup> written on nearby buildings, but could not find them. I guess, I should wait till I visit Moscow or Tbilisi.



<sup>\*1</sup> In 1895, D.J. Korteweg and G. de Vries derived a non-linear partial differential equation which describes weakly non-linear shallow water waves. It is called the Korteweg-de-Vries equation, or KdV equation, and is well-known among Kavli IPMU mathematicians and theoretical physicists. Solutions of the KdV equation tend to decompose at large times into a collection of solitary waves, called solitons.

<sup>\*2</sup> In 1970, physicists B.B. Kadomtsev and V.I. Petviashvili derived the Kadomtsev-Petviashvili equation, or KP equation, which is a natural extension of the 1-dimensional KdV equation. As the KP equation is the simplest equation obtained from a certain system of infinitely many non-linear partial differential equations, this system is called the Kadomtsev-Petviashvili hierarchy, or KP hierarchy. In 1981, the fundamental structure of the KP hierarchy was described by the Japanese mathematician Mikio Sato in terms of an infinite dimensional Grassmann variety, called the Sato Grassmannian. “Kadomtsev” is a surname which one may find in Russia, and “Petviashvili” is a surname typical for Georgia.

# Round Table Talk: Conversation with Nathan Seiberg

## Nathan Seiberg

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

## Hiroshi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

## Yuji Tachikawa

Kavli IPMU Professor

**Ooguri:** Over the past few decades, there have been remarkable developments in quantum field theory and string theory, and you have made significant contributions to them. There are many ideas and techniques that have been named after you, such as the Seiberg duality in  $4d N=1$  theories, the Seiberg-Witten solutions to  $4d N=2$  theories, the Seiberg-Witten map of noncommutative gauge theories, the Seiberg bound in the Liouville theory, the Moore-Seiberg equations in conformal field theory, the Affleck-Dine-Seiberg superpotential, the Intriligator-Seiberg-Shih metastable supersymmetry breaking, and many more. Each one of them has marked important steps in our progress.

Today, we would like to look back on the history and hear from you how you made these discoveries and your perspective on the future development of quantum field theory and string theory.

**Seiberg:** Before we start, I would like to thank you very much for your invitation and for your kind words. The hospitality at Kavli IPMU during my visit here has been fantastic. The



Hiroshi Ooguri

Nathan Seiberg

Yuji Tachikawa

two of you, the Director, the rest of the faculty and postdocs, and the administrative staff have gone out of their way to help me and to make the visit successful and productive – it is quite amazing. I don't remember being treated like this, so I'm very thankful and embarrassed.

**Ooguri:** Thank you for your kind words.

You received your Ph.D. at the Weizmann Institute in 1982 and immediately went to the Institute for Advanced Study in Princeton as a postdoc.

**Seiberg:** That's right, I came there for my postdoc.

**Ooguri:** That was before my time. I became a graduate student in 1984, and I remember reading your papers intensely after the so-called first superstring revolution since I wanted to catch up with what was known

about supersymmetry. You started to work on supersymmetry almost immediately or maybe a year after you went to the Institute, is that right?

**Seiberg:** Almost immediately. I remember studying supersymmetry during the 1982/83 Christmas break.

**Ooguri:** So, you changed the direction of your research completely after arriving the Institute. I understand that, at the Weizmann, you were working on model building, something related to technicolor.

**Seiberg:** Yes, it was not successful. So when I moved to my postdoc position, I thought I should change direction and I thought that supersymmetry was interesting.

**Ooguri:** What did you find most interesting about supersymmetry at that time?

**Seiberg:** Supersymmetry looked like an interesting intellectual structure,

which might also be relevant for phenomenology. Michael Dine had been working on supersymmetry before and he encouraged me to learn it. He recommended that I study the Wess and Bagger book, which was still in preprint form. (Julius Wess had just completed a series of talks at Princeton the year before. And Jonathan Bagger, who was a student at the time, took notes, which eventually became the famous book.)

**Ooguri:** Was Michael (Dine) also a postdoc there?

**Seiberg:** Michael was a 5-year member at IAS and I came in as a fresh postdoc. He took me under his wings and became my mentor. He had a huge impact on me. Our first project was about the dynamics of supersymmetric QCD. It's hard to imagine now how confusing it was at the time.

**Tachikawa:** Then came your paper with Ian Affleck and Dine on supersymmetry breaking.

**Seiberg:** The first paper we wrote was with Anne Davis, where we wrote the superpotential based on symmetries. Even that was not obvious at that time. Crucial earlier work on the subject had been done by Edward Witten.

**Ooguri:** Are you talking about Witten's paper on the index?

**Seiberg:** There were two papers. One about the index and the other was called dynamical supersymmetry breaking. I remember studying these papers very carefully because they were full of wonderful things. In particular, the behavior of supersymmetric Quantum Chromo Dynamics with massive quarks was analyzed. However, at the time there was no coherent picture about the behavior of the theory when the quark masses vanish. We wrote a

paper with Anne about the analysis of the flat directions of the theory and we argued that a certain superpotential should be generated there. Our analysis was based on consistency conditions and the symmetries of the problem, but we did not prove that this superpotential is indeed generated.

### Supersymmetry and Non-Renormalization of Superpotential

**Seiberg:** Then Anne left and we started working with Ian Affleck. That summer we wrote a paper showing that in some circumstances this superpotential is generated by instantons. This was very surprising at that time because people had believed that the non-renormalization theorem was exact and was also true non-perturbatively.

**Ooguri:** Were you convinced that the standard argument was wrong?

**Seiberg:** Most of the previous arguments for the non-renormalization theorem were based on Feynman diagrams and were intrinsically perturbative. They did not apply to instantons. I remember that the instanton computation itself took maybe a week. Then it took another two months to go through all the arguments in the literature and to debug them.

So we wrote a short letter and then we wrote a longer paper deriving the superpotential...

**Tachikawa:** This is the Affleck-Dine-Seiberg superpotential.

**Seiberg:** We showed that, depending on the number of flavors and colors, it is generated by instantons or by gluino condensation. For more flavors, no superpotential is generated and the vacuum degeneracy of the massless theory is not lifted. For me,

this was the biggest surprise. These are quantum field theories with several ground states.

**Ooguri:** Continuously many ground states parameterized by the moduli space.

**Seiberg:** For me that was shocking.

**Ooguri:** So, some of the very important concepts in supersymmetric theory appeared within a year or so.

**Seiberg:** There were precursors of that in previous papers, primarily several papers by Edward Witten and in particular, a paper by Ian Affleck, Jeffrey Harvey and Edward Witten, which had analyzed the same problem in 2+1 dimensions.

We also spent some time trying to build models of particle physics phenomenology. So we were primarily interested in breaking supersymmetry. The theories with a moduli space of vacua were a nuisance. They could not be used for that purpose.

Then in the summer of 1984 Michael Green and John Schwarz wrote their revolutionary paper and the physics world changed overnight.

### First Superstring Revolution in 1984

**Ooguri:** When did you hear about it?

**Seiberg:** I heard about it in late August or early September. Everybody was talking about this fantastic breakthrough, but none of us, the postdocs, had any idea what the breakthrough was about. There was some mysterious theory, string theory that we had never heard about. This was something that the older people had worked on and abandoned. They thought, "This was a failed attempt and younger people should not learn about it."

Ian Affleck left for a year in Paris, and Michael Dine and I had to decide, "Are we going to pursue our work

on supersymmetric gauge theories, or are we going to study this new thing?” And we decided to study string theory. That fall David Gross gave a fantastic string theory course at Princeton University, mostly in order to educate the young people. The course was very popular and it was attended by all the postdocs at the university, all the postdocs at the Institute, all the students, and many faculty members. It was given in a huge lecture hall.

**Tachikawa:** Was it before the heterotic string was constructed?

**Seiberg:** During that fall the heterotic string was constructed, Calabi-Yau compactifications were discovered, and many other major developments happened. Many of us felt very difficult to keep up. As we were learning the basic material, like the bosonic string, many new discoveries took place.

**Tachikawa:** Did David Gross cover all of those latest developments during the course?

**Seiberg:** His course was mostly about the bosonic string.

**Tachikawa:** Were notes of this course ever published in some form? That might also be an interesting historical document.

**Seiberg:** I think David followed the available reviews at the time. Later, when I was at the Weizmann Institute in Israel and then at Rutgers, I taught string theory and I used my notes from that course, expanded them and updated them.

During the following years Michael Dine and I continued to collaborate on string theory.

**Ooguri:** Even though you put your work on supersymmetry aside, some of your works in string theory in the following few years were clearly taking advantage of tools that you

had developed, such as your work on worldsheet instanton.

**Seiberg:** Sure, that is true, without doubt. In particular, thinking about moduli space of vacua, looking for non-perturbative effects that can lift the degeneracy, and controlling them by holomorphy were central in our work on string theory.

A typical interesting example of that occurs in various instanton computations. There the real part of the answer, which is the instanton action, is combined with an imaginary part, which is the topological charge, to give a holomorphic answer. This guarantees that the instanton can contribute to the superpotential. At that time, it looked like a complete magic. Affleck, Harvey, and Witten noticed it in 2+1 dimensional field theories, Affleck, Dine, and I saw it in 3+1 dimensional field theories, and then the same thing happened in worldsheet instanton contributions to the spacetime superpotential in string theory. Every time we saw that, it looked like a miraculous consistency condition, and we did not know a deep underlying reason why this occurred. Of course, today this is completely understood.

During that time Michael and I tried to understand various phenomena in string theory from a macroscopic perspective. We asked ourselves how to describe them from a perspective of a low-energy observer. And we tried to summarize many results obtained by worldsheet techniques in a spacetime effective action and in particular, in the spacetime superpotential. Our motivation was to see to what extent string theory can lead to phenomena that a low-energy observer would be surprised by. If I recall correctly, many of the “miraculous” results that people had

found using microscopic (worldsheet) reasoning turned out to have simple macroscopic explanations.

In fact, this line of investigation helped uncover a number of interesting and subtle effects in the worldsheet technology. In hindsight, the main tool we used was the constraints from holomorphy of the spacetime superpotential, which is associated with spacetime supersymmetry. It is not manifest in the worldsheet computations and therefore, it leads to powerful constraints on the allowed answers.

**Ooguri:** I think one of your papers had a title which actually expressed that point of view: “Microscopic knowledge from macroscopic physics in string theory.”

This was the opposite of what most of the other people were doing, to try to derive macroscopic results from a microscopic description. You advocated that generic properties of the low-energy effective theory can help elucidate some of the microscopic properties.

**Seiberg:** That's right because some of the symmetries are manifest in the low-energy theory, but are not manifest in the short-distance computation. An example of that is the string non-renormalization theorem. The original proof was based on worldsheet methods, but it was not sensitive enough to detect some subtleties associated with contact terms. Michael and I found another proof, which was based on the holomorphy of the spacetime superpotential. That macroscopic proof was totally conceptual and very elementary. And it pointed to special situations where nontrivial renormalization could take place. This was discussed in a later paper with Michael Dine and Edward Witten.



This was puzzling because the worldsheet methods suggested that there are no such special situations. A detailed analysis of this case has shed new light on the worldsheet methods and uncovered the significance of contact terms, which had been ignored in earlier work.

By having a simpler proof, you sometimes understand what really goes into it. If you have something very complicated with a lot of moving parts and it's not quite clear what is and what is not essential, it's hard to see how to go around a proof. But with a simple proof, it was clear. This was another example of how the low-energy description points to a loophole.

### Conformal Field Theories and Topological Field Theories

**Ooguri:** Some of your works also had very deep and broad impacts in mathematics, such as your classification of conformal field theory and polynomial equations, which characterize fusion and modular invariance, with Gregory Moore.

These works also had impacts on physics, for example in topological phases in condensed matter physics. So, deep mathematical structures that came out from quantum field theory have had broad applications.

Your work with Greg on the classification of conformal field theory appeared just before I arrived at the Institute. Could you tell us how this work came about?

**Seiberg:** From my perspective it started with the work of Daniel Friedan and Stephen Shenker. (Greg Moore had related ideas independently.)

**Ooguri:** They advocated the idea of the space of all conformal field theories.

**Seiberg:** They had a picture in terms of a certain vector bundle over Riemann surfaces, which at that time I did not understand at all. I didn't even see what they had in mind or where they were heading. Then another piece of this story came with the work of Erik Verlinde. He visited Princeton and he gave a talk on what is known today as the Verlinde algebra and the Verlinde Formula. He described the fusion rules of a rational conformal field theory in terms of integers satisfying certain properties and he suggested that the modular transformation matrix  $S$  should diagonalize them. That was stunning. I still do not understand how he got this fantastic insight.

So, with Greg Moore, we tried to understand Verlinde's work. After making some progress we came across papers by Yukihiro Kanie and Akihiro Tsuchiya, which were very mathematical. (Yesterday I was very pleased to meet Tsuchiya for the first time.) But we managed to extract from these papers some simple concepts that we could use. We studied the properties of the transformations of conformal blocks in a rational conformal field theory and showed that they are characterized by a finite set of data. Furthermore, that data had to satisfy a number of highly constraining consistency conditions, which were given by some polynomial equations. In fact, these conditions were so over-constraining that it looked surprising that they have any solutions.

One outcome of these polynomial equations was that we could prove Verlinde's conjecture about the relation between the fusion rules and the modular matrix  $S$ . I am still amazed by his intuition. How did he come up with this conjecture?

Although we had a clear and consistent structure, at the time we had no idea what the proper mathematical setting for it was. Useful conversations with David Kazhdan and Pierre Deligne pointed us to the connection to category theory. Of course, at that point in time we did not know anything about category theory. I remember very vividly how I looked at the book that Kazhdan recommended and I said "What am I going to do with this?" And I left for the day. Fortunately, I was working with Greg... The following morning, he gave me a beautiful lecture summarizing all we needed to know from that book.

**Ooguri:** That's typical of Greg.

That was before Witten's Paper on the Jones polynomial. I remember reading your papers on the classification of rational conformal field theories just before I came to the Institute.

**Seiberg:** I don't remember all the details, but I think there were several different lines of investigation of seemingly unrelated problems, which came together. One of them was rational conformal field theory, starting with Friedan and Shenker, Verlinde, and our work. Witten was interested in the Jones polynomials. We wrote a series of papers in the spring and summer of 1988. Witten's paper came out in the fall of 88.

**Ooguri:** Were there interactions between the two directions of research?

**Seiberg:** I do not know to what extent Witten was influenced by our work. He definitely referred to it in his paper. But it is clear that his point of view, based on a three-dimensional picture was broader, more general and had deeper insights. We had a sequence of transformations in two dimensions,



but we did not realize that we should have thought of it as a theory in three dimensions.

**Ooguri:** In fact, when Witten calculated Wilson loop expectation values, he reduced it to the two-dimensional problem and used the modular transformation and fusion language.

**Seiberg:** But he also used certain intrinsically three-dimensional operations. And, of course, he also had a beautiful description of it in terms of a Chern-Simons Lagrangian.

**Ooguri:** But, nowadays this is used for theories without Lagrangians. So it's coming back to where you were.

**Seiberg:** Yes, but you still have to assume that there is a three-dimensional Lorentz invariant and even topologically invariant theory underlying the whole structure. In practice, when you compute something, it is not that different from the computations that we did. But we didn't have the better conceptual picture.

Then we tried to complete the dictionary between our earlier work on rational conformal field theory and Witten's Chern-Simons picture. That took another year. After that, Greg

moved to Yale and there he did what I think is the nicest application of that body of work. Together with Nicholas Read they found the Moore-Read state.

#### Clarifying the Liouville Theory

**Ooguri:** It has had a direct application to condensed matter physics.

Another thing that I wanted to ask you about in this period, before the second superstring revolution, is about your work on the Liouville theory. This was a very confusing subject for many years, and many wrong things had been said about it.

I remember, you came to Kyoto and gave a set of lectures solving many of the confusions in Liouville theory, putting everything in order. You threw out many wrong statements, and what you picked turned out to be all correct. How did you do that?

**Seiberg:** It bothered me that this conformal field theory does not satisfy the general axioms of a conformal field theory. So it was natural to ask how to relax the axioms such that a coherent picture emerges.

**Ooguri:** The Liouville theory is non-standard in many ways. The notion

of vacuum in the Liouville theory is very confusing, for example. There are states which do not belong to Hilbert Space but still have roles in the theory. You put everything in a meaningful package.

**Seiberg:** Thank you.

**Ooguri:** No, I'm not just complimenting you. I just wanted to hear how you did it.

**Seiberg:** Well, it was very confusing and I remember asking myself these questions.

Earlier Knizhnik, Polyakov, and Zamolodchikov wrote a beautiful paper about two-dimensional gravity. Immediately afterwards, David and Distler and Kawai gave a Liouville interpretation of their results. Then Douglas and Shenker, and Brezin and Kazakov, and Gross and Migdal used a matrix model to describe two-dimensional gravity and their answers were extremely simple and beautiful. In view of that I felt that even though Liouville theory might not satisfy all the standard axioms of a conformal field theory, it should still be a sensible theory. This motivated me to look into it in detail.

In addition to the data from the matrix model there was also a huge literature on the semi-classical Liouville theory. There were many things that had to work and so I just tried to make it work. Then I continued following on that with Greg – we had a very productive time trying to make this connection between the matrix model and Liouville theory more precise.

Of course, since then our understanding of the theory was completely transformed by the work of Dorn and Otto, and the Zamolodchikov brothers and others who found the exact solution of Liouville theory.

## Power of Holomorphy

**Ooguri:** After that, you went back to the supersymmetric field theory in the early 1990s – maybe a couple of years before the second superstring revolution. Did you foresee anything coming? I am asking this since what you did in these few years in the early 1990s on supersymmetry turned out to play essential roles in the developments of the second revolution. What motivated you to come back to the supersymmetric field theory?

**Seiberg:** I was working on conformal field theory and two-dimensional gravity, and I felt that it was time to change. So I worked with Yossi Nir on model building – theories of quark and squark masses. And then I learned of a new paper by Michael Dine and Ann Nelson on gauge mediation of supersymmetry breaking. (Later they collaborated also with Shirman and with Nir.) They decided to take up the same question about supersymmetry breaking that Michael, Ian, and I had dropped when string theory came along.

**Ooguri:** So, this was a continuation of your work with Affleck and Dine. Was it roughly 10 years after that?

**Seiberg:** Indeed. They did their work in 1992-1993.

Ann visited Rutgers and we talked a lot. At that time, I was tired of supersymmetry and I didn't want to go back to that topic. But she succeeded to push me back into it...

**Tachikawa:** You didn't want to go back? That's surprising.

**Seiberg:** I did not want to go back because I thought "Okay, I've already worked on this, I want to do something new."

Ann visited us at Rutgers and gave talks about her work with Michael

Dine, which were very stimulating for me. We started talking and eventually we wrote a paper about the relation between R-symmetry and supersymmetry breaking. (Some people refer to it as the Nelson-Seiberg theorem.) This followed an observation Ian, Michael, and I had made 10 years earlier, and it turned it into a more concrete and much clearer principle.

**Ooguri:** This was the beginning of the modern approach to supersymmetric field theory.

**Seiberg:** This was one element. The second element was influenced by my work with Yossi Nir, where we used spurions and the fact that the superpotential had to be holomorphic in them.

**Ooguri:** Was that the first time the spurion technique was used in supersymmetric theory?

**Seiberg:** Spurions had appeared earlier, especially in the context of supersymmetry breaking. I think the new point here was to view all the ordinary supersymmetric coupling constants as spurions by viewing them as background superfields. And the main application was to derive the non-renormalization theorem.

**Ooguri:** Were you the one who introduced this technique in supersymmetric theory?

**Seiberg:** I am not sure about that. But perhaps that was the first time all the coupling constants were viewed as background fields in the context of a supersymmetric theory. I remember that within hours or so after I thought of it many things fell into place.

I'd like to offer a historical perspective. Before the 1980s there was a clear understanding that the behavior of quantum field theory satisfies some genericity requirement.

Murray Gell-Mann described it as the Totalitarian Principle: "Everything not forbidden is compulsory." 't Hooft described the same thing as "naturalness" – parameters take natural generic values unless there is a good reason, e.g. a symmetry, not to do that. But then, supersymmetric theories seemed to violate that principle. The superpotential is not renormalized and can be non-generic. This looked strange and the cancellations behind it seemed miraculous. Then, when it was realized that non-perturbative effects violate the perturbative non-renormalization theorem, it became clear that we need an organizing principle. In other words, to what extent are the genericity properties of quantum field theory true in supersymmetric theories?

The modern point of view, based on holomorphy of the superpotential vindicated Gell-Mann's principle and is consistent with 't Hooft's naturalness. The superpotential is subject to the same genericity properties as every other term, except that when we use this genericity we should also take its holomorphy into account. For this reason, I picked the title of my paper "Naturalness versus supersymmetric non-renormalization theorems."

For me that was very satisfying. Many different computations and many different phenomena were understood together using one organizing principle. I felt like I had been circling around this for years and all of a sudden it all came together. It was clear that that was the right way to think about it.

**Ooguri:** When did you come to appreciate the importance of holomorphy?

**Seiberg:** The appreciation of the power of holomorphy of the

superpotential occurred to me gradually during these years. We have seen many examples of computations of a superpotential, where the real part and the imaginary part were computed independently, and surprisingly the result turned out to be holomorphic. At the time this looked like a miracle and a non-trivial consistency check of the computation.

Using this for a non-renormalization theorem was also not completely new. For example, Edward Witten argued for a perturbative non-renormalization theorem in the string worldsheet using holomorphy and Michael Dine and I used similar reasoning about string perturbation theory. In those cases, the holomorphic dependence was on fields, not parameters (although these were parameters in the worldsheet theory). Holomorphic dependence on parameters in 3+1 dimensional field theory also appeared in papers of Victor Novikov, Mikhail Shifman, Arkady Vainshtein, and Valentin Zakharov and in an unpublished work that Joe Polchinski and I did. And I must be forgetting other examples.

**Ooguri:** That was in the summer of 1993. But, in the late 1980s, you were essentially using it, weren't you?

**Seiberg:** Indeed, I use it. But at the time I did not view it as the underlying organizing principle.

**Ooguri:** That's interesting because that was also the year I wrote this paper with Bershadsky, Cecotti, and Vafa on topological string theory, which also used the holomorphy and its relation to supersymmetry to derive the recursion relation, the so-called BCOV equation.

**Seiberg:** Your paper was a milestone. It clarified many issues and it led to many significant consequences.

But this was a separate line of development. It is surprising and interesting that similar ideas came up independently in different contexts at more or less the same time.

As we discuss historical developments in science I am reminded of the famous Kurosawa movie *Rashomon*.

**Tachikawa:** It is based on a book by Akutagawa that we studied in school...

**Seiberg:** I am not familiar with the book, but I really like the movie. One lesson from that story is that different people view the same reality differently. This is common in the history of science. There are several lines of development and they are typically motivated by different questions. So if you interview another researcher who worked at the same time, you are likely to hear a completely different version of the events. And it is not that one description is more correct than another. They simply reflect different perspectives.

Going back to your question, at the time I was mostly interested in four-dimensional quantum field theory. The idea that you could say anything about the non-perturbative behavior of four-dimensional quantum field theory was totally unimaginable.

**Ooguri:** Right. You would not have expected that there would be analytic control over any non-perturbative physics in four dimensions.

**Seiberg:** With the understanding of holomorphy as an organizing tool all of a sudden things became clear and easy.

**Ooguri:** So, that became the guiding principle.

**Seiberg:** When you have a new tool you should be maximally ambitious. I remember that I thought, "We

should be able to address all the open questions in quantum field theory using holomorphy."

As a first step I looked back at the supersymmetric version of Quantum Chromo Dynamics. With Ian and Michael, we had understood the behavior of the theory for small number of flavors, so I wanted to understand what happens with more flavors. Armed with the new perspective and new tools I realized that although the vacuum degeneracy of the classical theory is not removed in the quantum theory, extremely interesting effects are still present. For example, the complex structure of the moduli space of vacua can be deformed in the quantum theory. In other cases, there are new massless composite particles. That was surprising. Until then it had been believed that with strong dynamics the theory is gapped or has some massless Nambu-Goldstone bosons. Here, on the other hand, there can be massless composites that are not associated with spontaneous symmetry breaking. Later, this observation strongly motivated the understanding of the long distance behavior of  $N=2$  theories (where there are massless monopoles) and other  $N=1$  theories (where there are massless composite gauge fields, massless glueballs, massless exotics, etc.).

Then I started working with Ken Intriligator and Robert Leigh on increasingly more complicated models and we saw that the new techniques are very powerful leading to many new exact results.

Then Ashoke Sen wrote an extremely interesting paper...

**Ooguri:** Are you talking about his work on monopoles?

## Duality and Seiberg-Witten Solutions

**Seiberg:** Yes. I am referring to Sen's paper establishing the existence of a charge-2 monopole in  $N=4$  supersymmetric theories. That paper removed a real obstruction to duality. People had thought about duality before that paper. I think it was Witten who emphasized the importance of this charge-2 monopole. And it was believed that such a monopole does not exist and therefore the whole idea of duality had to be wrong. Sen's paper found that monopole and overnight it was clear that duality must be right.

**Ooguri:** Since Yuji is here, maybe one of us should explain it to him. In early 1990, not too many people believed in the electric-magnetic duality, the S-duality.

**Tachikawa:** Yes, I came too late to this part of the party.

**Ooguri:** There was of course the work by, I think, Montonen and Olive and then Olive and Witten, and...

**Tachikawa:** Goddard, Nuyts and Olive?

**Ooguri:** Right. But, when I read the Olive-Witten paper in the late 1980s, I had an impression that rather than giving evidence for duality, they were actually explaining why this miraculous formula works without duality – everything comes from supersymmetry.

Now we use it to motivate duality. But at that time, it was basically explaining that you don't need duality.

**Seiberg:** They considered states in small representations of the supersymmetry algebra. Today we refer to such states as BPS states. And they explained many of the special properties of these states as following from this fact. Since these special properties had a rational explanation,

everyone thought that this should not be used as evidence for duality.

In addition, duality demanded the existence of a certain bound state of two monopoles in  $N=4$  theories. And it was thought that such a state does not exist...

**Ooguri:** Yes, but then, Ashoke's demonstration of the bound-state was...

**Seiberg:** ...a phase transition. Before that paper duality was viewed as some technicality. Some things look as if they're dual, but there is no reason to believe this duality was an exact statement. Then, overnight it became obvious that duality is crucial.

**Ooguri:** Did it convince you that duality is actually a real phenomenon in quantum physics?

**Seiberg:** I was immediately convinced that it was true in  $N=4$  theories. But I did not imagine that it will play such a crucial and central role as it later turned out to do.

And then I started collaborating with Edward Witten on the  $N=2$  supersymmetric theory.

**Ooguri:** Were you interested in  $N=2$  theory before you started collaborating with Witten?

**Seiberg:** Yes. I viewed it simply as another theory with  $N=1$  supersymmetry. And as I was working out examples of increasing complexity with  $N=1$  supersymmetry, this was a natural member of that list. Also, it was clear that the pure gauge  $N=2$  theory has massless photons and the pure gauge  $N=1$  theory was expected to confine. So I was hoping that a better understanding could explain the mechanism for confinement.

**Ooguri:** And, you did. Did you think that you had a better chance of doing that in the  $N=2$  case, as opposed to  $N=1$ ?

**Seiberg:** I was viewing it more as

a special case of  $N=1$ . The specific properties of  $N=2$  are nice and allow you to compute additional quantities. But for the question of confinement they are not essential.

If you go back some time – I think it was in the fall of 1987 – Witten wrote a paper explaining Donaldson theory as a twisted version  $N=2$  supersymmetric Yang-Mills theory. It made Donaldson theory accessible to physicists. But it didn't solve that mathematical problem.

**Ooguri:** It gave a physical interpretation of the mathematical problem.

**Seiberg:** But I am told by mathematicians that from their viewpoint it didn't solve the problem, because at the end of the day you had to do exactly the same computations that Donaldson did anyway.

However, viewed more broadly, this is an amazing paper. In this paper Edward Witten introduced the notion of a Topological Quantum Field Theory. This is an extremely deep idea with far reaching consequences both in mathematics and in physics.

When I heard about that work I used my tool-kit of instanton technology to write a short note on the  $N=2$  theory thinking about its moduli space of vacua and showing how the metric is corrected asymptotically. I didn't even want to publish that paper because I did not think it was interesting. Edward encouraged me to publish it. In fact, in his paper on Donaldson theory, he said that the ideas in that paper may well be important for further developments of the theory. He was completely right about that. That was in 1988.

**Ooguri:** That turned out to be the starting point and the boundary condition of what is now called the

Seiberg-Witten solution.

**Seiberg:** Yes. I wrote the paper on the “Behavior at Infinity” but I didn’t pursue it. Then, in 1994 when I came back to supersymmetric theories, I remembered my 1988 paper. I knew that the vacuum degeneracy was not lifted and an infinite series of instantons corrected the metric on the moduli space of vacua. The question was how to evaluate it and how to sum up the series.

As I said, at the time Ken Intriligator, Rob Leigh, and I were collaborating. We wrote a paper studying various models in which the superpotential is given by an infinite sum of instantons. We succeeded to sum up the infinite series in an explicit closed-form formula using the knowledge of the singularities of the superpotential and its asymptotic behavior, combined with its holomorphy. So I was optimistic that the same thing could be done also in the  $N=2$  theory.

When I started collaborating with Witten progress came in a stunning rate. Within weeks we had the complete solution of the pure gauge theory and the theory with matter. All sorts of interesting physical phenomena were elucidated including confinement and chiral symmetry breaking.

Witten immediately realized that it would help simplifying the problem with four-dimensional topology. But, I was more interested in understanding the dynamics of four-dimensional quantum field theory.

Immediately afterwards, I wrote the paper on duality in  $N=1$ . In that paper a dual description of  $N=1$  supersymmetric gauge theories was presented. This work taught us many lessons. First, it was realized that electric-magnetic duality is ubiquitous.  $N=1$  theories are more generic than

$N=4$  and  $N=2$  theories, and they exhibit similar dualities. Second, here one finds weakly coupled composite gauge fields. This underscores the fact that gauge symmetries are not fundamental. This point had been known before, mostly in the context of Abelian gauge theories, but here it was more dramatic.

In the meantime, Witten wrote the paper on the connection of our solution of  $N=2$  supersymmetric gauge theories to four-dimensional topology.

**Ooguri:** Yes, which is now called the Seiberg-Witten equation. It turned out to be more powerful than the original Donaldson theory.

**Seiberg:** Physically, it is very clear because many of the complications of Donaldson theory were associated with small instantons. And every time you have a computation associated with a new manifold you have to control the same small instantons. What the renormalization group allows you to do is to compute the small instantons once and for all in flat space and to find an effective theory without them. Then you can place that effective theory on the curved space of interest. Since this effective theory no longer has these small instantons, many of the complications in the original theory are no longer present. So that’s the reason it was...

**Ooguri:** In the effective theory it’s already built-in, so you don’t...

**Seiberg:** It’s already built-in and you don’t need to worry about that. In fact, the low-energy theory doesn’t have small instantons. So that’s what made these equations so much more powerful.

**Ooguri:** [Looking over to Tachikawa] Were you in high school in 1995?

**Tachikawa:** Yes. Well, that’s about when I first heard your name.

**Ooguri:** You told me that you heard about the Seiberg-Witten theory by reading a popular mathematics magazine.

**Tachikawa:** Yes, there was an interview of Edward Witten by Tohru Eguchi in Kyoto. That was I think, early 1994.

**Ooguri:** That’s correct. Witten came to give a public lecture in Kyoto sponsored by a Japanese company, and I was involved in coordinating that.

**Tachikawa:** Edward told Tohru that he was extremely excited about the work he was doing with you – without explaining much. But that was published in this popular Japanese magazine in the summer of ’94...

**Ooguri:** Before the paper appeared. It was the first printed announcement of the result.

**Tachikawa:** Then, Japanese mathematicians like Fukaya got very interested in Seiberg-Witten theory. And Fukaya started to write a series of introductory articles about the Seiberg-Witten theory from mathematics point of view in that popular mathematics magazine. So for the first few years, I thought of the Seiberg-Witten theory as a purely mathematical thing.

I only learned about the physical part of the Seiberg-Witten theory after I started learning supersymmetric theory and finally I came across the review article by Peskin.

**Seiberg:** The TASI Lecture?

**Tachikawa:** Yes, TASI Lecture. And then I finally understood what Seiberg duality was, from the physics point of view. That was already 2003 or 2004. That’s a long time to come.

## Second Superstring Revolution in 2005

**Ooguri:** When did you hear about

Witten's breakthrough in string duality?

**Seiberg:** He told me bits and pieces of it as he was working. And then I heard the final version when he gave the talk at USC.

**Ooguri:** At the Strings 1995 Conference.

**Seiberg:** I was on sabbatical at the Institute at that time. We spoke the week before the conference and he told me that some of these things would actually work. But it was still very, very different from what he presented at the talks. I was stunned in the talk. I was supposed to give the talk after him and I felt, "What am I doing here?"

**Tachikawa:** What did you talk about?

**Seiberg:** I talked about field theory duality, which was a few months old and most people had not known about it at that time, so I thought I had a good talk to present. But after Witten presented his picture of string duality it seemed that my talk was already obsolete.

**Ooguri:** That was a stunning talk, I remember.

**Seiberg:** In his lecture he spelled out almost the entire picture.

I got on the stage and being very embarrassed I said, "I feel like I should drive a truck." Then I gave my talk. I don't remember the rest of it, but I am told that John Schwarz, who was the third speaker in the session, started his talk by saying: "If Nati has to drive a truck, I should drive a tricycle."

**Ooguri:** The field really made a phase transition in that year. Many of the ideas that you developed in quantum field theories, supersymmetric theories are now incorporated into it.

**Seiberg:** Witten described the many developments leading to this point as spokes of a wheel. So this was one spoke – supersymmetry, BPS, moduli



space of vacua, degrees of freedom at strong coupling, etc.

But there were also other lines of development. The work on 11-dimensional supergravity of Michael Duff, Christopher Hull, Paul Townsend, and others was crucial. And the study of supergravity solutions of various solitons and extended objects by Gary Horowitz, Andrew Strominger and others was also essential.

So there were many different developments that came together and the string duality picture put them all in a coherent picture. I think they enhanced each other because some aspects were clear from one point of view and other aspects were clear from another point of view. Together they combined to a complete and coherent picture.

**Ooguri:** Yuji, which year did you go to the Institute?

**Tachikawa:** That was 2006. I only joined this string theory community long after all of the things you were discussing. Whenever I hear about the glory days of 1984 or 1995, I always envy...

**Ooguri:** This will repeat itself. For example, when I was a graduate

student, I studied Coleman's lecture notes, where he described – I quote, "the glorious victory parade, full of wonderful things brought back from far places to make the spectator gasp with awe and laugh with joy." These discoveries happened in the 1970s, and I missed all...

**Seiberg:** And in the 1970s, they talked about the glorious parade of ideas in the 1930s and 1920s. It is always like that.

There is no sign that this sequence of exciting discoveries will slow down. And based on past experience, I expect that this will happen again and again. And, as always, I expect it to happen in surprising ways.

There is always somebody working on a project that most people think is totally uninteresting and unmotivated. Then that project turns out to be a real breakthrough.

For that, we just need to keep an open mind and be accepting of other ideas. We should have this liberal point of view. Let everybody do what they are doing and encourage diversity. If everybody is working on the same problem, we will not have these ideas from left field that we really need.

## Unity of Science

**Tachikawa:** Can I jump 20 years from 1996 to 2016?

**Seiberg:** Please.

**Tachikawa:** So you recently wrote a paper on condensed matter physics, which you will talk about tomorrow. What motivated you to get into this subject?

**Seiberg:** This is a fascinating topic. The condensed matter physicists have made incredible discoveries. I would like to understand them.

I'm a firm believer in the unity of science. I don't like it when people are put in boxes: one of them is a particle physics phenomenologist, another one is a string theorist, and another one is a condensed matter physicist. We are theoretical physicists and there are no clear boundaries between the different sub-disciplines. Instead, over the years we have seen a lot of cross-fertilization from one field to another.

Hiroshi and I have just returned from a symposium in Chicago celebrating Yoichiro Nambu's career. The importance of interdisciplinary physics was very visible there. Nambu's work is a perfect example of ideas from one branch of physics imported into another branch of physics leading to enormous impact and to useful cross-fertilization between fields. This is clearly demonstrated by his most famous paper with Giovanni Jona-Lasinio, "Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity."

Going back to your question about my current work on the topological phases of matter, I am simply trying to learn these beautiful ideas. These are fantastic phenomena that field theory exhibits, and I think that every field theorist must understand them.

In addition, it is satisfying that these phenomena appear in the real world and are connected to real materials.

**Ooguri:** You can test these ideas with experiments.

**Seiberg:** And it is likely that these new ideas will also lead to new insights in quantum field theory, which then could be brought back to high-energy physics and string theory.

Many of the ideas in the study of topological phases of matter started in high-energy physics. For example, anomalies, Callan and Harvey's anomaly inflow, braiding statistics, Witten's topological quantum field theory and others are the main tools that are being used.

So I think there's a potential for high-energy theorists to do something useful here. There are clear indications that a lot more can still be done. And I hope that I'll be able to contribute. But at the very least, I'll learn something new and it is always refreshing to learn new things.

**Ooguri:** This time, non-supersymmetric theories.

**Seiberg:** I have worked in the past on related topics like topological theory in connection with rational conformal field theory. So I think I have some tools that could be helpful.

In general, there is no guarantee that any research project or direction will be successful. I always tell my students and postdocs, "Doing research is a risky endeavor. There is no guarantee of success. You must try many things hoping that one of them succeeds. But you should be ready to accept that most of them will fail. We do that for the few successful days in which we learn something new."

## We Cannot Predict the Outcome

**Ooguri:** Before we finish, I have one

more question to ask. You have been very successful in running research groups and mentoring students and postdocs. What do you think would make successful research groups?

**Seiberg:** First, I should not get the credit for that. Whenever I was in a research group I had many colleagues, who made essential contributions to the scientific atmosphere and to running the group.

Here at Kavli IPMU you clearly do the right thing. You have an excellent vibrant group here. Some of the world leaders are here at Kavli IPMU. These are people, whose papers I always study carefully. In the last few days I have watched the group function and I found it a real pleasure. I have attended interesting talks and I have participated in stimulating conversations. So all I can say is keep doing what you are doing.

As a general advice, I would suggest to create a stimulating environment by creating a diverse group of people. There should be people of different seniority level, of different talents, of different kinds of expertise, and of different backgrounds. For example, there should be mathematically oriented individuals, people with good physical intuition, good calculators, etc.

I would encourage everyone to interact with each other and to talk about their research. So that when a question arises, there will always be somebody who can find the answer.

There is also a question of how to select postdocs. I don't think there's a clear predictor for a postdoc success. Instead, I think we should not attempt to make the perfect selection, because this is impossible. We should simply attempt to collect a diverse group of researchers and to create for them the right atmosphere.



Another suggestion is to ask the postdocs what they think would help them.

**Tachikawa:** When I was at the Institute you suggested to me to have a meeting of the postdocs with Pizza...

**Seiberg:** I think this was your idea.

**Tachikawa:** Was it mine? Anyway, eventually we started a “Pizza Discussion” every week in the afternoons.

**Ooguri:** No faculty?

**Seiberg:** The faculty were not allowed.

**Tachikawa:** Right. That was a lot of fun.

Can you offer some vision for the future?

**Seiberg:** Some people think that researchers should have 5-year programs – like in the old Soviet Union – where everything is planned in advance. Solve this problem and then move to the next problem and then...

**Tachikawa:** We still have that system in Japan.

**Seiberg:** That might make some sense for experimentalists. But theorists’ progress is more like a random walk. Theorists are stimulated by many sources. They listen to seminars, participate in informal discussions, read papers, etc. This impacts their research direction in unexpected ways. It might even lead them to abandon their existing line of research and to start another one. And even within a given project, in most cases the outcome of the research could not be anticipated from the beginning.

In our conversation about my research path I shared with you some examples of such unexpected results from my own experience.

So there is no way I could outline what I’ll be doing in the next five years – this is ridiculous.

**Ooguri:** Well, your example shows

that you followed your nose and pursued things you were interested in, like techniques in supersymmetric theory, which later turned out to be very useful.

**Seiberg:** I think I was lucky. I did not have a long-term plan, maybe a year in advance but not more than that. Well, I think the same is true for your papers. There was no way you could predict 2 or 3 years ago the topics you are interested in today.

The reason research is interesting is because we’re surprised by the answers. If we could predict the answers, we would not be surprised by them. Almost by definition, we cannot predict the outcome. So we should not attempt to do that.

Pursue what you’re interested in, keep working hard, pay attention to what’s going on around you and be flexible – these are the rules. Sometimes it works, sometimes it doesn’t.

# PhyStat- $\nu$ Workshop on Statistical Issues in Experimental Neutrino Physics

Mark Hartz

Kavli IPMU Assistant Professor

The PhyStat- $\nu$  workshop on statistical issues in experimental neutrino physics attracted over 90 particle physicists and statisticians from around the world to Kavli IPMU on May 30-June 1, 2016. The workshop focused on the statistical methods used to interpret data from current and future neutrino experiments.

The discovery of neutrino masses through the phenomenon of neutrino oscillations opened a new window to physics beyond the standard model and led to the 2015 Nobel Prize awarded to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald. Neutrino experiments now aim to further understand the phenomenon of neutrino oscillations and the mechanism by which neutrinos obtain their very small masses. Outstanding questions include: do neutrinos and antineutrinos oscillate differently (so-called CP violation), is the neutrino its own anti-particle, what is the ordering of masses for the three neutrinos, will precision measurements of the parameters governing oscillations indicate an underlying symmetry involved in the generation of neutrino masses?

To study these outstanding questions, neutrino physicists are building ever more complex

experiments that require significant human and monetary resources. Therefore, it is critical to maximize the information extracted from these experiments while also ensuring that inferred information on neutrino model parameters and choices between models are statistically sound. The PhyStat- $\nu$  workshop addressed three major statistical issues: event classification, parameter estimation and model selection.

Event classification refers to the process by which physicists interpret raw data observed in detectors as physical processes. For example, a pattern of light observed in a neutrino detector may be interpreted as one or more charged particles propagating through the detector medium and producing Cherenkov light. New techniques that can maximize the information extracted from the raw data were presented, including boosted decision trees and a non-parametric Bayesian event reconstruction.

Parameter estimation involves the inference of allowed values for model parameters given the data that is observed. Both classical and Bayesian

methods were presented at PhyStat- $\nu$  with a focus on challenging cases such as parameters with physical bounds and deciding between a two-sided or one-sided interval for a parameter.

The topic of model selection received significant attention since the next generation of experiments will measure the hierarchy of neutrino masses, which has two options, normal or inverted hierarchy. Since this measurement involves a discrete choice rather than a continuous parameter, naive expectations for what constitutes a significant result can be wrong. The methods of model selection in both the classical and Bayesian approaches were discussed and comparisons were made to a similar discrete choice made with LHC data, the determination of the Higgs boson candidate spin-parity.

The PhyStat- $\nu$  workshop at IPMU was the first PhyStat workshop in the field of neutrino physics and laid the groundwork for future workshops on statistical methods in experimental neutrino physics. A second PhyStat- $\nu$  workshop will be held at Fermilab on September 19-21.



# Higher Residue Week, 2016

Todor Milanov

Kavli IPMU Associate Professor

The “Higher Residue Week, 2016” at Kavli IPMU took place from June 6 to 10, 2016. The event started with a two-day mini-workshop and it continued as a series of lectures by Dmytro Shklyarov (TU Chemnitz). The main goal of the workshop was to present the recent work of Shklyarov who has introduced Hodge-like structures of dg-categories motivated by Kyoji Saito’s theory of primitive forms. The notion of a primitive form was invented by K. Saito during his visit to Harvard in 1980. The main motivation is to provide a generalization of the classical period map for Riemann surfaces in the settings of Singularity Theory, i.e., the study of isolated critical points of holomorphic functions.

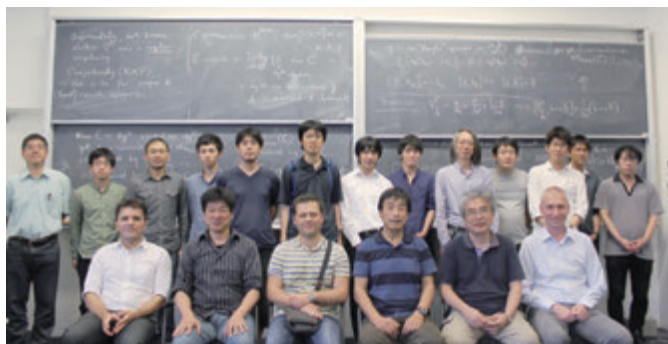
The importance of K. Saito’s work increased significantly in the early 90s when Alexander Givental and Maxim Kontsevich noticed that the theory of primitive forms provides the key

concepts to state mirror symmetry and it can be used in symplectic geometry to compute Gromov-Witten invariants of compact Kahler manifolds. Mirror symmetry consists of finding a triple of an affine manifold  $Y$ , a holomorphic function  $f$  on  $Y$ , and a primitive form  $\omega$ . The key ingredient in Saito’s theory is the so-called *Higher Residue Pairing*. This is a certain non-degenerate bi-linear pairing defined on the twisted de Rham cohomology of  $Y$  via a sequence of residues. The primitive form is a special cohomology class satisfying an infinite system of bi-linear relations. The key observation of Givental is that the oscillatory integral built from  $f$  and  $\omega$  coincides with what he called the  $J$ -function, i.e., a certain generating series of genus-0 Gromov-Witten invariants.

The main contribution of Shklyarov is that by studying the category of matrix factorizations he found a categorical interpretation of the

twisted de Rham cohomology and the Higher Residue Pairing. In particular, the ideas and the concepts of K. Saito’s theory could be extended in much more general settings. As an application, Shklyarov also gave a talk during the mini-workshop based on his solution of a conjecture of Anton Kapustin and Yi Li, which implies the existence of an interesting  $A$ -infinity structure.

During the workshop, Hiroshi Ohta explained his joint work with Kenji Fukaya, Kaoru Ono and Yong-Geun Oh in open Gromov-Witten theory, which provides yet another tool to construct  $A$ -infinity structures and primitive forms. The workshop made an interesting contribution to understanding the big puzzle of mirror symmetry and primitive forms. Many ideas were exchanged and most importantly several possible directions for further investigations were clearly outlined.



## Director Murayama Speaks at Symposium on Science and Technology Diplomacy

Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama spoke about science and technology diplomacy at an event attended by senior government officials and academics at the National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS) in Tokyo on May 24, 2016.

Hosted by the Cabinet Office, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Ministry of Economy, Trade and Industry, and GRIPS, the symposium was an opportunity to discuss the current state and future of science and technology in diplomacy, taking into account the G7 Ise-Shima Summit that took place from May 26-27.

Murayama pointed out that international organizations such as CERN and a synchrotron light source SESAME under construction in Jordan have led world peace efforts by allowing scientists from different countries to work together. He called on government officials to allow Japan to share its knowledge with other countries, and support future fundamental science projects to further contribute to world peace.

Other notable talks included a welcoming from Minister of Foreign

Affairs Fumio Kishida, a speech from Science and Technology Advisor to the Minister of Foreign Affairs Teruo Kishi, and a panel discussion on “A New Direction for Japan’s Diplomacy through Science and Technology” between distinguished guests, including Murayama, to debate how Japan’s science and technology can better contribute to the global society.



Hitoshi Murayama (far right) with other panelists (Courtesy of the Ministry of Foreign Affairs of Japan)

## Takaaki Kajita and Hirosi Ooguri Receive Chunichi Cultural Award

The University of Tokyo’s Institute for Cosmic Ray Research Director and Kavli IPMU Principal Investigator Takaaki Kajita, and California Institute of Technology’s Walter Burke Institute for Theoretical Physics Director and Kavli IPMU Principal Investigator Hirosi Ooguri were honored at the 69th Chunichi Cultural Awards at a ceremony in Nagoya on June 3, 2016.

The Chunichi Cultural Awards were established by the Chunichi Shimbun in 1947 to commemorate the enactment of the Constitution of Japan, and they recognize individual and group contributions to the arts, humanities, and natural and social sciences.

Kajita was recognized for his Nobel



Takaaki Kajita



Hirosi Ooguri

prize-winning work “discovering that neutrinos have mass, and for discovering neutrino oscillations” using the Kamiokande and Super-Kamiokande detectors located 1000m underground in the Kamioka Mine in central Japan.

Ooguri was recognized for his work “developing cutting edge theories by implementing modern mathematics into elementary particle theory,” which includes using modern mathematics to create new superstring theories to help solve fundamental problems in physics.

## Hirosi Ooguri Elected to the American Academy of Arts and Sciences

Hirosi Ooguri was named a new member of the American Academy of Arts and Sciences, it was announced on April 20, 2016.

The academy was established in 1780, making it one of the oldest in the United States, and is considered to be one of the most prestigious honorary societies. Its members have made significant accomplishments in academia, arts, business, and politics.

The 213 new members announced this year will be inducted at a ceremony at the academy’s headquarters in Cambridge, Massachusetts on October 8.

## Science Movie “The Man from the 9 Dimensions” Supervised by Ooguri Receives an Award at 2016 IPS Fulldome Festival

The International Planetarium Society (IPS) awarded this year’s Best Educational Production Award to the 3D dome theater movie “The Man from the 9 Dimensions.” It was announced at the IPS Fulldome Festival 2016, held in Brno, Czech Republic from June 15 to 17.

The movie was supervised by Hiroshi Ooguri, and was produced by Japan's National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan). It had just opened to the public in April this year. Directed by noted horror film director Takashi Shimizu, the movie explores the Theory of Everything and follows a group of physicists in pursuit of T.o.E – a man of mystery. T.o.E. takes his pursuers to a world of superstring theory, a leading candidate for the Theory of Everything.

The IPS Fulldome Festival showcased 66 dome theater movies from 15 countries. The Best Education Production Award is the only prize chosen by an international jury. The judges commented that the Man from the 9 Dimensions “is a piece that sparks curiosity, and provides fresh insight into the complex and deep subject that is the Theory of Everything.” A prize ceremony was held in Warsaw, Poland on June 23 — the last day of the IPS Warsaw Conference.



Movie poster for Miraikan's "The Man from the 9 Dimensions" (Credit: Miraikan)

### General Theory of Relativity Holds True 13 Billion Light Years from Earth

A team led by Kavli IPMU Postdoctoral Researcher Teppei Okumura and Kavli IPMU Assistant Professor Chiaki Hikage, together with University of Tokyo Department of Astronomy Professor Tomonori Totani, have found that 13 billion light years

from Earth, Einstein's general theory of relativity still holds true.

The scientists first used data from the FastSound galaxy survey, collected using the Subaru Telescope, to analyze the velocity and clustering of more than 3000 galaxies about 13 billion light years away, and created a 3D map of the distant universe. By studying the galaxy map in more detail, the researchers managed to calculate the rate at which the distant universe was expanding due to gravity, and found that it was in agreement with the general theory of relativity within experimental uncertainty. This result confirmed the general theory of relativity is correct, and supports the idea that the expansion of the universe could be explained by a cosmological constant which Einstein had proposed.

The results were published online in *Publications of the Astronomical Society of Japan* on April 26, and scientists in the future will need to consider this outcome when developing new models.

### Supermassive Black Hole Wind Can Stop New Stars from Forming

Kavli IPMU Postdoctoral Researcher Edmond Cheung and Kavli IPMU Assistant Professor Kevin Bundy have led an international collaboration that discovered a new class of galaxies called red geysers, where supermassive black hole winds are energetic enough to heat the surrounding gas and suppress star formation. As part of the MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory) project using the Sloan Digital Sky Survey telescope and its spectrograph attachment, the team caught red geyser galaxies heating gas within its host galaxy. Despite the fact these galaxies had

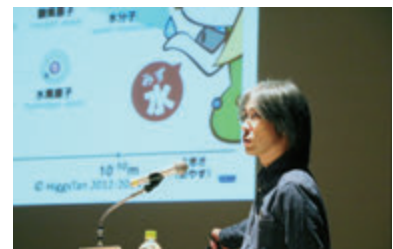
enough gas for star formation, the wind from the black hole would create an environment too hot for star formation.

The study was published online in *Nature* on May 26, 2016. Also, in this issue of the *Kavli IPMU News*, Kevin Bundy explains this study, see pp. 4-9.

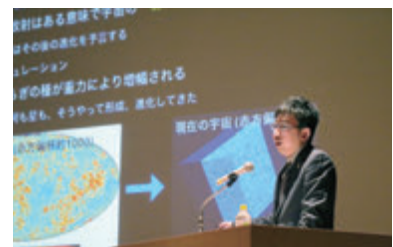
### Kavli IPMU and ICRR Co-Host Public Lecture "Decoding the Universe"

More than 280 young teenagers and adults took part in the 14th Kavli IPMU and Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) public lecture "Decoding the Universe" at Amuser Kashiwa in Kashiwa city on April 16, 2016.

Following a welcoming from ICRR Director Takaaki Kajita, ICRR Associate Professor and Kavli IPMU Scientist Yoshinari Hayato gave a talk titled "Neutrinos: What we've learned, and what remains a mystery." He explained what neutrino oscillations were, their interesting properties, and about the research being carried out at the Super-Kamiokande.



Yoshinari Hayato giving a talk.



Takahiro Nishimichi giving a talk.

Then, Kavli IPMU Assistant Professor Takahiro Nishimichi gave

a talk titled “Subaru Telescope: Using big data to uncover the dark properties of the Universe.” He talked about topics in precise cosmological theory needed to correctly interpret huge amounts of data from the Hyper-Suprime Cam attached to the Subaru Telescope in Hawaii. He also said “Big-Data Astronomy” using statistical methods and super computers to deal with astronomical big data from observations, is becoming important in astronomy.

Afterwards, the audience was invited to the hall's foyer to chat and discuss ideas with the speakers.

### Kavli IPMU Public Lecture Held with Lisa Randall

On June 19, 2016, Harvard University Professor of Physics Lisa Randall delivered her lecture in the 21 Komcee Lecture Hall at the Komaba campus of the University of Tokyo, where 200 people attended the full house event.

To begin, Shinji Mukohyama, Professor at the Kyoto University Research Institute for Fundamental Physics and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist, delivered a lecture titled “Beyond the Imagined 4th Dimension.” He explained that from superstring theory — which is thought to be the ultimate theory because it can describe all of the forces of nature, including gravity — extra dimensions beyond the 4-dimensional spacetime are derived. However, as the justification for such extra dimensions cannot be observed, theories have emerged such as that extra dimensions are compactified in such a way that at every point in the 4-dimensional spacetime, there exists a small circle, and that the visible 4-dimensional spacetime clings to a brane inside a higher-dimensional

space.

Next, Lisa Randall delivered a lecture titled “Dark Matter and the Dinosaur Extinction.” Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama, who also provided extended commentary on the points raised, interpreted Randall's presentation into Japanese. Randall raised a new theory — which was introduced in her recently published book for the general public — where a comet collides with the dark matter found in our Milky Way Galaxy, causing the object to impact with the Earth, and possibly resulting in the extinction of dinosaurs.

A question and answer session followed the lectures. Murayama asked questions sourced from the audience — which had been written on post-it notes stuck to a whiteboard — to which the



Shinji Mukohyama giving a talk



Lisa Randall giving a talk, interpreted by Hitoshi Murayama



(From left) Shinji Mukohyama, Lisa Randall, and Hitoshi Murayama answer questions submitted by the audience

presenters gave answers. Even after the event, the speakers made themselves available, and were surrounded by many inquirers.

### Kavli IPMU Seminars

1. “Cross correlations with CMB secondaries: constraining cosmological parameters and cluster astrophysics”  
Speaker: Nicholas Battaglia (Princeton U)  
Date: Apr 05, 2016
2. “Moduli spaces in gauged linear sigma model (GLSM)”  
Speaker: Yongbin Ruan (U Michigan)  
Date: Apr 05, 2016
3. “Self-consistent Calculation of the Sommerfeld Enhancement”  
Speaker: Ryosuke Sato (Weizmann Inst)  
Date: Apr 06, 2016
4. “The edge of darkness, and other halo surprises”  
Speaker: Benedikt Diemer (Harvard U)  
Date: Apr 07, 2016
5. “Affine actions from 3-fold flops, and tilings of the plane”  
Speaker: Michael Wemyss (U Edinburgh)  
Date: Apr 08, 2016
6. “The Future of Cosmology with the CMB”  
Speaker: Krzysztof Gorski (JPL / Kavli IPMU)  
Date: Apr 08, 2016
7. “Special subspaces in symplectic vector spaces”  
Speaker: Alan Weinstein (UC Berkeley)  
Date: Apr 11, 2016
8. “Difference Imaging: Algorithms, Problems, and some Possible Solutions”  
Speaker: Robert Lupton (Princeton U)  
Date: Apr 12, 2016
9. “On dark mesonic realization of the SIMP scheme”

- Speaker: Min-Seok Seo (IBS)  
Date: Apr 12, 2016
10. "Modular forms, new Cardy formulas, and black hole entropy"  
Speaker: Edgar Shaghoulian (UCSB)  
Date: Apr 13, 2016
11. "A Higgsion study on the 750 GeV Di-photon Resonance and 125 GeV SM Higgs boson with the Higgs-Singlet Mixing"  
Speaker: Po-Yan Tseng (Natl. Tsing Hua U, Taiwan)  
Date: Apr 13, 2016
12. "Dark energy science from CMB lensing and cross-correlations"  
Speaker: Mathew Madhavacheril (Stoney Brook U)  
Date: Apr 14, 2016
13. "Geometric and algebraic Poisson modules"  
Speaker: Alan Weinstein (UC Berkeley)  
Date: Apr 14, 2016
14. "Deformed special geometry and topological string theory"  
Speaker: Gabriel Lopes Cardoso (Instituto Superior Técnico)  
Date: Apr 19, 2016
15. "Affine braid groups of classical types, Baxterization and integrable systems"  
Speaker: Anatol Kirillov (RIMS, Kyoto)  
Date: Apr 20, 2016
16. "Path toward next-generation CMB missions"  
Speaker: Akito Kusaka (LBNL)  
Date: Apr 20, 2016
17. "Galaxies, dark matter haloes and how efficient galaxy formation really is: new results from the UltraVISTA survey"  
Speaker: Henry McCracken (IAP)  
Date: Apr 21, 2016
18. "High energy particle collision and collisional Penrose process near a Kerr black hole"  
Speaker: Kota Ogasawara (Rikkyo U)  
Date: Apr 22, 2016
19. "Entanglement entropy and higher genus partition function in  $AdS_3/CFT_2$ "  
Speaker: Jie-qiang Wu (Peking U)  
Date: Apr 26, 2016
20. "Different aspects of Anisotropic Inflation: From Theoretical side to Observation"  
Speaker: Razieh Emami (HongKong U)  
Date: Apr 26, 2016
21. "Future prospects of neutrino oscillation study"  
Speaker: Osamu Yasuda (TMU)  
Date: Apr 27, 2016
22. "The problem of the Mass in SM and Beyond"  
Speaker: Luca Merlo (Instituto de Física Teórica, Madrid)  
Date: Apr 27, 2016
23. "The gas-galaxy-halo connection"  
Speaker: Jean Coupon (U Geneva)  
Date: Apr 28, 2016
24. "Grand Unification and Supersymmetry at High Scales"  
Speaker: Wilfried Buchmüller (DESY)  
Date: May 09, 2016
25. "Recent developments in 2d (0,2) theories"  
Speaker: Eric Sharpe (Virginia Tech)  
Date: May 10, 2016
26. "The Distant Universe Revealed by Hubble Space Telescope"  
Speaker: Robert Williams (Space Telescope Science Inst)  
Date: May 11, 2016
27. "Orbit method and characters of representations"  
Speaker: Yoshiki Oshima (Kavli IPMU)  
Date: May 12, 2016
28. "Cosmic Microwave Background: Neutrino & GUT-Scale Physics from the Cosmos"  
Speaker: John Carlstrom (U Chicago)  
Date: May 13, 2016
29. "Quest for Dark Matter"  
Speaker: Satoshi Shirai (DESY)  
Date: May 16, 2016

30. "K-theoretic mirror formulae"  
Speaker: Valentin Tonita (Humboldt U)  
Date: May 17, 2016

## Personnel changes

### Promotion

Yuji Tachikawa, who was at the Kavli IPMU as Assistant Professor between November 2010 and March 2012, became Kavli IPMU Professor on April 1, 2016, following his term as University of Tokyo Graduate School of Science Associate Professor.



Yuji Tachikawa

Tachikawa speaks of his aspiration, "Assuming I would live to 65 or something, I have already spent a third of my research career. This was a surprising realization that came to me when I got rehired by IPMU. Hopefully I can have as much fun as possible in the next 30 years."

### 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 Professor Krzysztof Gorski [February 8, 2016 – April 15, 2016] returned to the California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory as Senior Research Scientist.

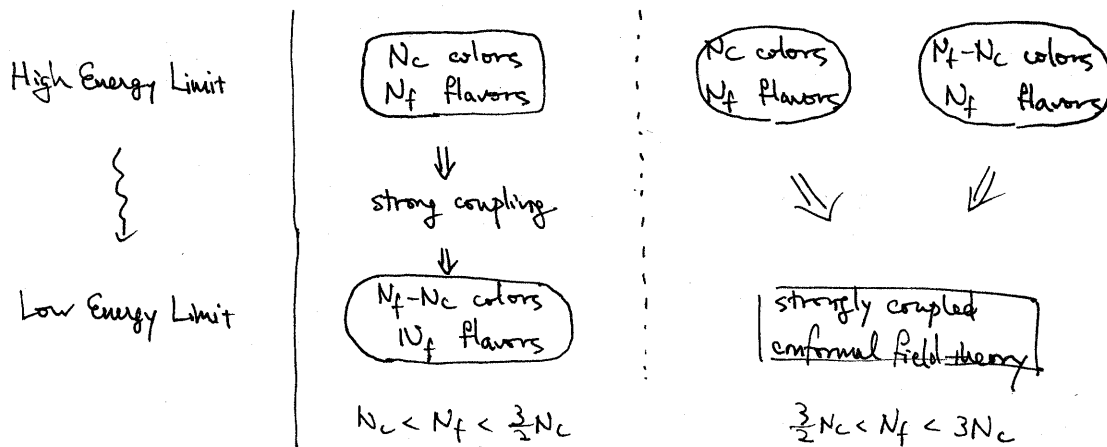
Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Lluís Martí Magro [April 1, 2013 – April 30, 2016] moved to The University of Tokyo Institute for Cosmic Ray Research as a Project Assistant Professor.

# Seiberg Duality

Yuji Tachikawa

Kavli IPMU Professor

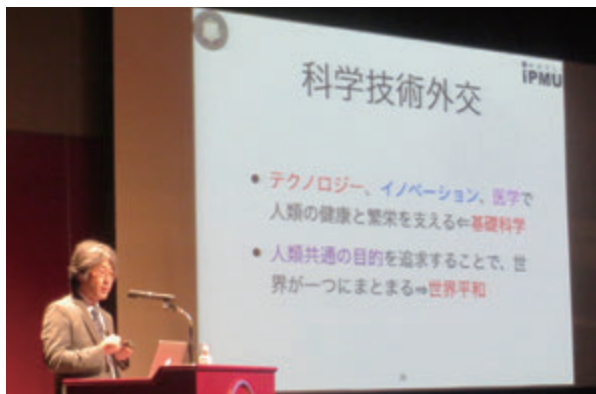
The way quarks are bound to nucleons is described in principle by Quantum Chromodynamics (QCD). The real QCD has three colors and three light flavors, called up, down, and strange. It is a basic unanswered question to find the behavior when the number of colors and flavor are changed. Seiberg solved this question in the supersymmetric case, by introducing his duality in 1994. The basic statement is the equivalence of the theory with  $N_c$  colors and  $N_f$  flavors and the theory with  $N_f - N_c$  colors and  $N_f$  flavors, but the equivalence appears in different physical guises depending on the ratio of  $N_c$  and  $N_f$ , as shown in more detail in the figure below. This discovery of Seiberg duality was a seminal, decisive step that gave rise to the modern non-perturbative study of supersymmetric field theories in general.





# 近況

Kavli IPMU 機構長  
村山 斉 むらやま・ひとし



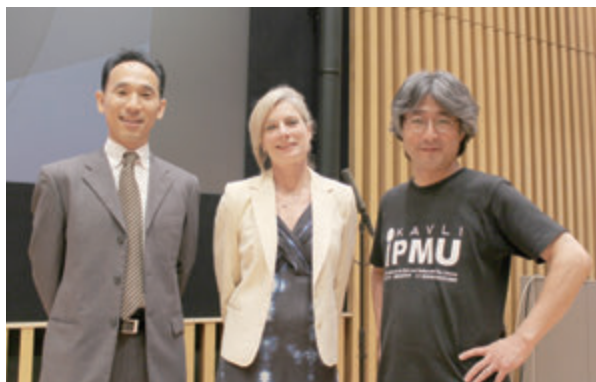
5月24日：東京都港区の政策研究大学院大学にて開催された「科学技術外交シンポジウム」にて、「科学技術外交と平和」のタイトルで基調講演を行う（本誌57ページ）。（写真提供：外務省）



5月30日：カブリIPMUにて開催された国際研究会“PhyStat-v 2016”にて講演（本誌55ページ）。



6月19日：東京大学駒場キャンパスにて開催されたKavli IPMU一般講演会「ランドール博士の科学的探索」にて、ハーバード大学教授リサ・ランドールさんと（本誌59ページ）。



左から、もう一人の講演者、京都大学教授の向山信二さん、ランドールさん、村山機構長。



解説をまじえて、参加者のためにランドールさんの講演を日本語逐次通訳。

Director's  
Corner

## 銀河の生い立ちと死

単純化しすぎているように思えるかもしれませんが、「銀河はどのように成長するのだろうか?」と「銀河はどのようにして死ぬのだろうか?」といったような質問は、根本的なだけでなく、銀河形成というテーマにおける現在の最も重要な問題の数多くを捉えたものとなっています。天文学者はこういった質問に答えようとしていますが、そうすることによって私たちの住む天の川銀河を含む銀河の形成と進化史の原動力となる物理的な機構の本質を解明したいと望んでいます。

これらの質問に対する洞察を得るためには多くの有望な道筋がありますが、ここでは銀河種族の解析で史上初の大統計を達成することで、研究を大きく進展させる可能性を持つ2種類の新しい観測データについて取り上げたいと思います。

まず最初に、空間分解分光観測のデータ収集能力を50倍に高めた技術的なブレイクスルーについて取り上げます。銀河に対して、医学のCTスキャン(コンピュータ断層撮影)に相当するものを想像して下さい。それは、銀河の各場所における分光データ、いわゆる「3次元データ」で、銀河をその主要な成分である、星とガスに分解し、それぞれの性質の詳細を明らかにすることを可能にします。さらに、この銀河のCTスキャンを何千個もの近傍銀河に対して行い、そのデータを手に入れることを想像して下さい。私が中心研究者を務めている、現在実施中のMaNGAサーベイ(Mapping

Nearby Galaxies at Apache Point Observatory、アパッチ・ポイント天文台における近傍銀河のマッピング)は、2020年に終了するまでには最終的に10,000個もの銀河の分光観測を目指しており、すでにこの種の分光観測では世界最大のサーベイになっています。この豊富なデータは進化の機構が働いている現場を捕らえるのに役立っており、その一例としては、私たちが2016年に発見し、「red geyser (レッドガイザー、赤い噴泉)」と呼んでいる全く新しい種類の銀河は、なぜ星形成を停止した「枯渇した」銀河がその状態のままであるのか? という謎に対する貴重な手掛かりを与えてくれました。

二つ目の進展は非常に広い天域に渡る深いイメージング(撮像)観測であり、典型的な例としてはやはりKavli IPMUがリードしている、すばる望遠鏡のハイパーシュプリーム・カムのようなサーベイ観測があります。こういった深い撮像サーベイは、138億年の宇宙の歴史に渡り数千万個もの銀河のカタログを作成することを可能にします(遠方の宇宙を撮像することは、昔の宇宙の姿を見ることと等価です)。このデータで初めて、宇宙史の約60~80億年前から現在までのあいだの銀河の成長史、異なる種族への経路史を高精度で描き出すことが可能となり、それを引き起こす物理過程に制限を与えることができます。

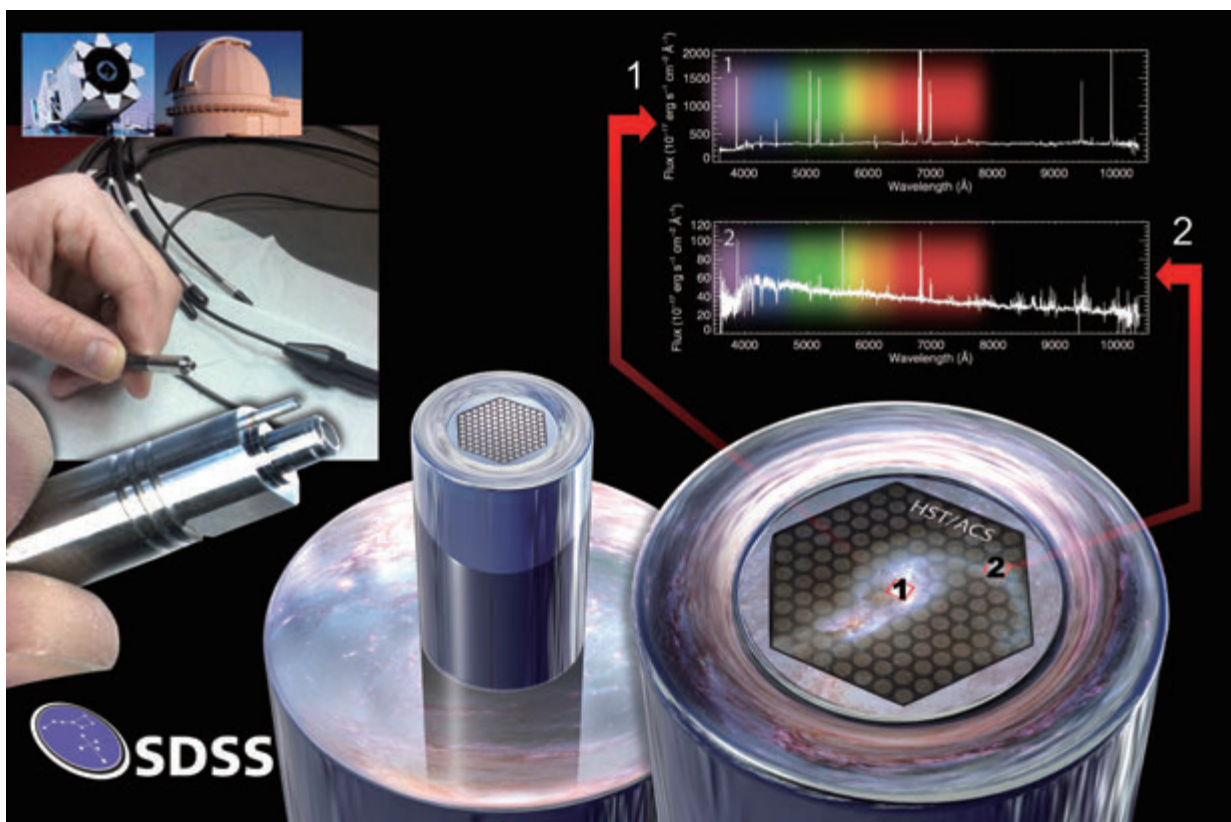


図1 MaNGAのファイバー束技術の図解。六角形配列に並べた光ファイバー束を用いて標的銀河の全面に渡る分光観測が可能となる。MaNGAは天球上の与えられた方向の観測で、このようなファイバー束17本を標的銀河の位置に個別に穴をあけたアルミニウム板の穴に挿入して配置する。(Credit: SDSS)

## MaNGA により銀河の死を理解する

銀河は、その生涯の大部分に渡って、ガスを星に転換する最高の環境を与えています。しかし、それが突然その役目を終えてしまうことが分かってきました。数10億年前から現在までのあいだに、正体不明の「銀河の温暖化」のようなものが、極めて多数の銀河を、生まれただの若い星を含まない「砂漠」に変えてしまいました。現在の宇宙は、多くの銀河で星形成が枯渇した（死を迎えた）時代にあるように見えます。私たちの天の川銀河系自身も砂漠への道を辿っています。（しかし、心配することはありません。それはまだ数10億年も先の話です。）どのような物理過程が、これらの冬眠状態にある銀河内のガスを加熱し、あるいは

吹き飛ばし、見かけ上星形成を止めているのか、という問題は長年謎でした。

この謎を解く上での一つの問題は、現在の銀河のサーベイ観測は規模が小さ過ぎるため、統計的不確定性を克服して、進化する種族の間の明確な相互関係を確立することができないことでした。どの種族も個数密度の時間進化はこれまで20～30%より良い精度で測定されたことはなく、質量の大きい銀河は、（相対的に明るいので）より完全なサンプルが得られるのですが、そのような銀河は稀な銀河であるため、この状況は悪化していました。後で述べるHSCサーベイのような広域サーベイによって、一つの種族（例えば星形成銀河）の個数の減少が他の種族（例えば休眠中の円盤銀河）の個数の増加に等しいかどうかを検証するこ

とを初めて可能とします。銀河の死に至る経路を確立することは、様々な機構を含む包括的な予言をテストする上で役立ちます。

しかし、死に瀕している銀河の病の原因を完全に診断するためには、その内部を注意深く観察し、内部の仕組みを調べなければなりません。これがMaNGAサーベイの目的の一つで、MaNGAは2014年に開始し、2020年にそのサーベイを完結する第4期スローン・デジタル・スカイ・サーベイの中心的なプロジェクトの一つです。MaNGAは図1に示すように光ファイバーを密接に束ね、約10,000個の近傍銀河の各々を空間分解し、その全面を分光観測することを可能とするものです。ある銀河の進化史はその内部構造に情報が刻み込まれています。例えば、これは樹木の一生がその年輪に刻まれていることに似ているでしょう。このため、MaNGAによって銀河の基本的な構成要素の空間分布をマッピングすることを可能にします。すなわち、銀河内の星々をばらばらにせず、結びつけておくダークマターの分布、星を形成する原料となるガスの分布、星々の分布、星の内部の核融合で作られ、星の最後の爆発（超新星）で銀河にまき散らした化学元素の分布です。MaNGAのデータにより、個々の銀河内の空間的な位置における星形成、また星とガスの運動を精密にマッピングできるのです。

## 謎の「レッド・ガイザー」

MaNGAの最初の1年の銀河観測データを手にして、Kavli IPMU博士研究員のエドモンド・チャンと私は、サンプルの中の「赤い色で、星形成をしていない」銀河の分光データをじっくりと調べました。これは、MaNGAが分光ターゲットにした銀河のうちの約30～40%を占める種族の銀河サンプルです。

近年、星形成が止まった銀河でも、（ガスが枯渇しているのではなく）しばしば電離したガスを含んでいることが判明していました。つまり問題は、このガスがやがて冷却し、収縮し、新しい星を形成することを

妨げているものは何かということです。宇宙に大量に存在する新鮮なガスが常に銀河に少しずつ流れ込むことから、星形成の「復活」がもっと頻繁に起こっても良いと考えられます。生まれたての若い星は年老いた星よりも非常に熱く、より青く光るため、これらの銀河ではほんの少しの新しい星形成が起こっても、観測でわかります。ところが、ひとたび終わってしまった星形成が再び始まることはほとんど見つかっていません。

MaNGAのマップは、赤くて星形成をしていない銀河にもイオン化したガスが広範に存在していることを確認しましたが、エドモンドは興味深い空間的なパターンが存在することに注目しました。すぐに私たちは多くの銀河にこのパターンが見られることに気が付きました。それは、銀河の中心核から流れ出している不規則な左右対称のガス流のように見えるパターンです。私たちは、興味をそそられる一方、懐疑的なところもあったのですが、これを「レッドガイザー」と呼ぶことにしました。星形成をしていない特徴的な赤い色の銀河にみられることから「レッド」で、物質が流れ出しているように見えるので「ガイザー（噴泉）」です。

この10年のあいだに銀河の死の謎を解く一つの方法として考えられていたのが、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの巨大なパワーを利用することで。もしこのブラックホールの周りを回転する物質のほんの一部からでも解放されたエネルギーが、何らかの方法ですっと大きなスケールで銀河を取り巻くガスに注入されれば、これはガスを暖める熱源となり、ガスから星を形成することを妨げることができます。問題は、このような機構が存在するかどうかです。エドモンドと私は、レッドガイザーが答を持っているのではないかと思いました。

8～10個のレッドガイザーとして調べるべきサンプルから、私たちは（日本にある私たちの研究機関とMaNGAサーベイという絶妙な名前に対するオマージュとして）日本の漫画の有名な登場人物の名をとっ

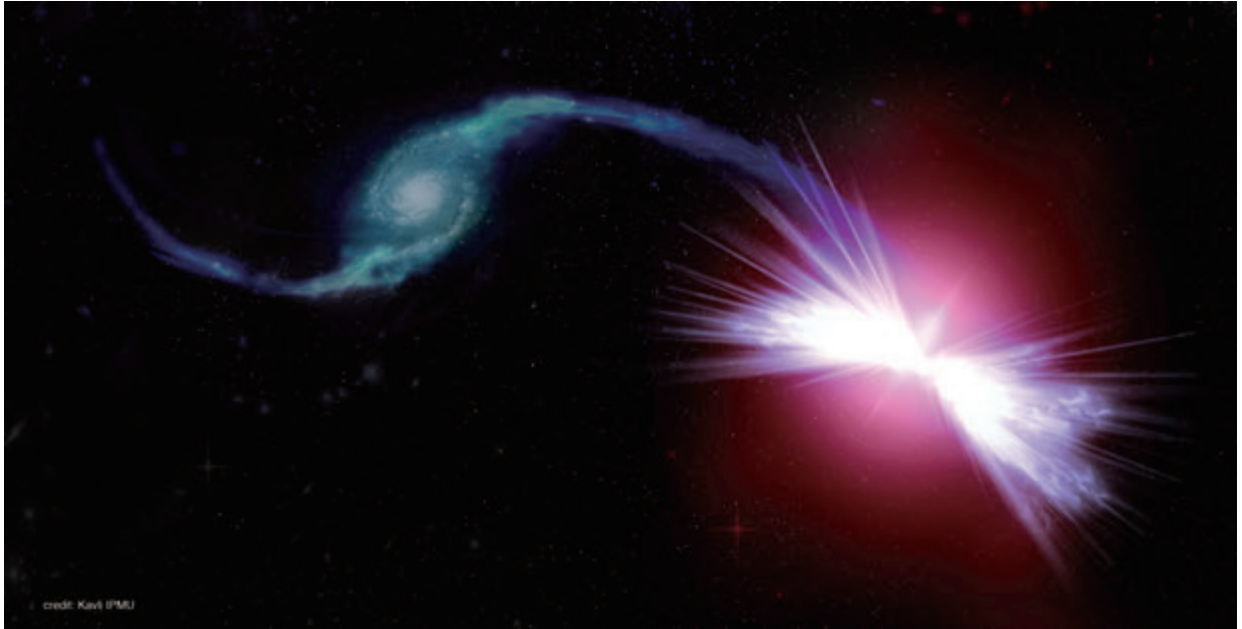


図2 典型的な「レッドガイザー」のアキラ(右)と相互作用しているテツオ(左)のイメージ図。テツオのガスがアキラの重力により、アキラの中心にある超巨大ブラックホールに引き込まれ、アキラのガスを加熱する力を持つ風を生み出している。ブラックホールから吹き出す風の作用によりアキラでの新たな星形成サイクルが妨げられている。(Credit: Kavli IPMU)

てアキラと名付けた銀河を選び、これに焦点を合わせて研究しました。以前に取られた多色のイメージングの画像では、アキラは星形成をしていない典型的かつ平凡な楕円銀河に見えました。しかし、アキラは質量がずっと小さな、星形成をしている(私たちがテツオと名付けた)銀河と相互作用しており、テツオから派生し、2つの銀河を結ぶ長い潮汐構造(tidal tail)によってそれが分かります(図2参照)。

しかし、MaNGAのデータは、アキラが一見したよりもはるかに活動的で興味深いことを明らかにしています。イオン化したガスのマップは流れ出しているようなパターンを見せていますが、私たちはこのガスの運動を調べ、完全に星の運動とは切り離されていること、さらに十分な速度で運動しているため、恐らく将来ほとんどのガスが銀河から逃げ出していくことを見つけました。これらの議論は、アキラおよびレッドガイザーに、一般的に中心にある超巨大ブラックホール

が吹き出す風が内在する可能性があることを示すものです。

MaNGAの他の種類のマップは、アキラの中に第2の成分としてずっと冷たいガスの存在を明らかにしています。私たちは、それが相棒の小さな星形成銀河から降り積もったものと信じています。私たちの簡単な評価から、このガスが冷えて星を形成しているが、その頻度は検出されない程度のはずであることが分かりました。さらに、レッドガイザーの風の加熱パワーは冷却率と釣り合うのに十分であるように見えます。従って、私たちはレッドガイザーが活動中の重要な過程であり、ブラックホールからの風が周囲を取り巻くガスを加熱し、赤い銀河が新しい星を形成することを妨げていると考えています。

2016年5月にこのエキサイティングな発見についての私たちの論文が *Nature* に出版されました (Cheung et al. 2016, *Nature*, **533**, 504)。Kavli

IPMUとSDSSによるプレスリリースの後では、*PBS NewsHour*のウェブサイトと朝日新聞を含む全世界で100以上の報道機関がこのニュースを伝えました。

## 銀河はどのように成長するのか?

ここで話題を死から成長へ変えると、標準的宇宙論の枠組みの基本的予言によれば、宇宙の構造は「階層的」に成長します。銀河は信じがたいほど巨大な質量を持つ構造ですが—私たちの天の川銀河の質量は太陽 $10^{11}$ 個分に相当します—銀河を包み込んでダークマターハローと呼ばれる重力的な結合系を作っている謎のダークマターの質量と比較すると30分の1かそれ以下なのです。そのため、宇宙論的な観点からは構造の成長はダークマターに支配されており、従って階層的成長を簡単に言い表すと、どの時間においても最大のダークマターハローが最も新しく形成される構造であり、より小さなハローの合体によって形成されます。問題は、銀河もまたこのパターンに従うのかどうかです。

ナイーブには答はイエスと予想されます。結局、ダークマターハローの中央に位置している銀河は、概ねダークマターに引きずり回されます。もしハローが合体すれば銀河も合体するはずで、そして、もし銀河の全質量を銀河が放射する光量で近似できるとすると、銀河内の恒星質量 $M_*$ の分布は階層的に進化すると予想されます。現在最も重い銀河は、自分自身に属する星を最近集積したはずで、

不思議なことに、最近の研究には「逆の」傾向を主張するものがあり、重い銀河が遠い昔最初集積し、一方、時間の経過と共に低質量の銀河が増えることを見出しています。観測による制限が一致することにより、宇宙の構造成長の階層模型が確かめられたことから、私たちはダークマターハロー中で銀河がどのように成長するか理解していないように見えます。

この結論は、非常に難問、すなわち、現在私たちは銀河の成長率について、特に宇宙史の後半において決

定的な基準を持っていないことを示しています。問題は、これまで観測された銀河のサンプルは、満月の約10倍の面積に相当する、天球のたった0.01%のサーベイに基づくことです。距離については非常に遠方まで達してはいますが、これらの「ペンシルベニア」サーベイは小さ過ぎて十分な統計が得られません。また、「宇宙のクモの巣」と呼ばれる銀河のネットワークを貫いて、密度の非常に高い部分や銀河がほとんど存在しないポイドと交差するため、得られたサンプルの統計的性質はばらつきが大きく、銀河の性質についての本当の分布をあいまいな画像としてしか見せてくれません。

## すばる望遠鏡の強力な役割

今後数年で、新しい広視野カメラによる広域サーベイにより、「宇宙全体で平均的な」銀河の成長史を測定するために、(宇宙の代表的な構造をすべて含む)宇宙論的体積に渡り銀河をサーベイし、高精度の銀河進化史の研究をする新たな時代を迎えます。長期的には欧州宇宙機関のEuclid(ユークリッド)衛星や米国のLSST(大型シノプティック・サーベイ望遠鏡)のような施設が前例のない大統計の観測データを提供することになります。しかし、その前に、前例のない規模の撮像サーベイを実施するハイパーシュプリーム・カム(HSC)のような装置によって大きな進展が可能となります。HSCのサーベイプログラムのうち、宇宙論的体積をカバーする広天域サーベイは、宇宙の年齢が現在の半分以下の時代の銀河を検出する能力のある撮像の深さに届きます。しかし、過去のサーベイのようにたった数平方度をカバーする代わりに、HSC-Wideは天球の1400平方度に渡る、満月5600個分相当の面積をカバーします。

2014年にスタートしたHSCのサーベイは、まだ10~20%を終えたところですが、既に私たちは銀河の成長についての問題に取り組むには、宇宙全体を統計的に代表するのに十分な体積をカバーするだけではな

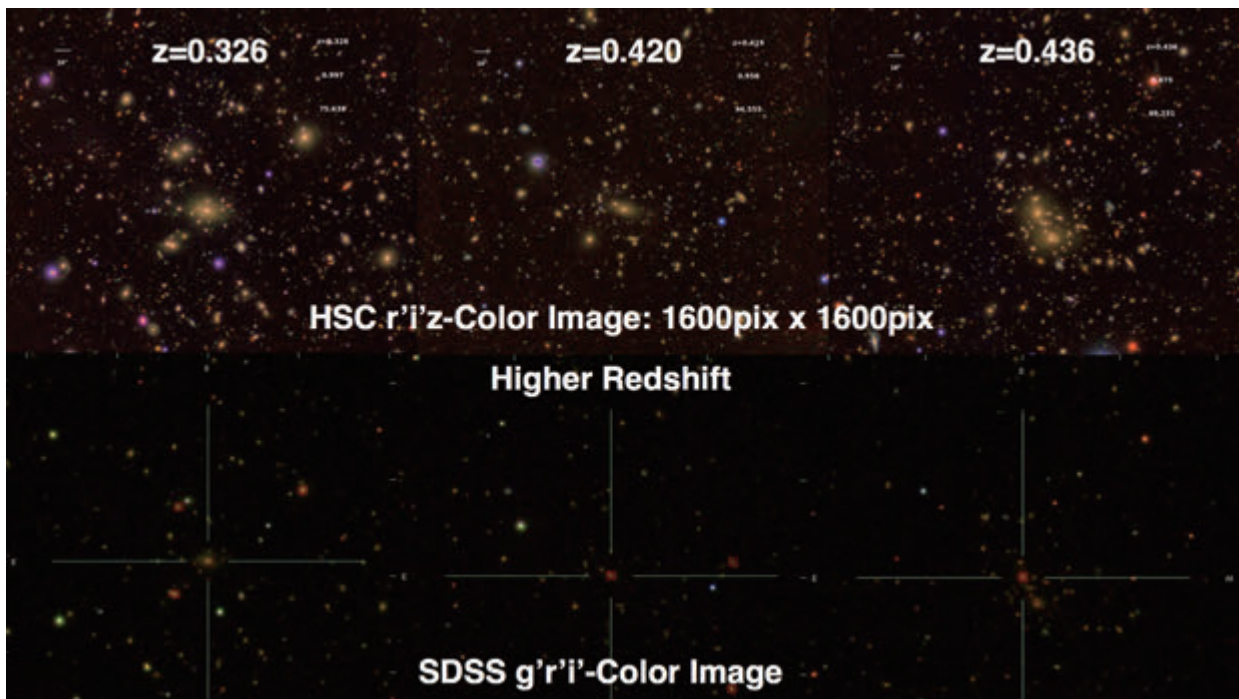


図3 赤方偏移 ( $z$ ) が 0.3 ~ 0.4 (およそ30 ~ 40億年前) の3つの巨大銀河について、HSCの深い画像(上)とそれより浅いスローン・デジタル・スカイサーベイの画像(下)の比較。HSCのより深い画像は、巨大銀河の質量のかなりの部分を占めるぼやとした外縁部など、より多くの形態を捉えている。(Credit: Song Huang)

く、巨大銀河の外部領域に感度を有する深さの撮像も必要であることが分かっています。HSCの画像と過去に行われた、より浅いスローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) の画像を比較した図3を見ると、これがはっきり分かります。

巨大銀河のぼやとした外縁部は、本質的に暗いかもしれませんが、銀河の中心領域よりずっと遠くまで広がっていて、合計するとかなりの星と質量を含んでいます。従って、過去のずっと小規模のサーベイで観測された、銀河の成長が不十分であるという点も、成長が起きるかもしれない外縁部を「見落としていた」という事実によるのかもしれませんが。

近い将来、HSCはこのトピックにおけるブレークスルーを起こす態勢にあります。第1に銀河の星質量の過去の測定に立ち戻ることが可能です。多くの場合、外縁部の星を測定するHSCの能力のおかげで銀河の

星質量の推定値は大きい方に改訂されるでしょう。第2に、サーベイの成熟に伴い、間もなく私たちは過去の統計の不足による限界に対処し高精度で成長率を示すために必要なサンプルを手に入れます。銀河が階層的に成長するかどうかという問題については、まだ最終的な評価は定まっていません。しかし、HSCは確かな足取りで進んでいますので、結果を乞うご期待!

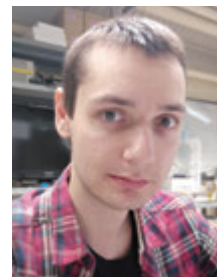
# Our Team

## ディミトロ・チュルニアク Dmitry Chernyak 専門分野: 実験物理学

博士研究員

カムランド共同研究グループのメンバーとして私はニュートリノを出さない二重ベータ崩壊の探索に参加しています。この極めて稀な原子核の崩壊が観測されればニュートリノがマヨラナ粒子であることが確立し、ニュートリノ質量の階層性の決定とニュートリノの有効マヨラナ質量の推定に役立つ情報を与えます。

カムランド-禅はニュートリノを出さない二重ベータ崩壊の探索に（2016年5月現在）世界最高の感度を有する実験です。この実験ではキセノン136の二重ベータ崩壊を研究するため、同位体濃縮キセノンを溶解し



た液体シンチレーターを用いています。私は、逆質量階層領域に対して（また同時に他の研究課題に対しても）カムランド-禅の感度を改善することに努力を集中します。

## 井上 茂樹 いのうえ・しげき 専門分野: 天文学

博士研究員

私はこれまで、主に数値シミュレーションや解析計算を用いて、銀河形成過程に関する理論研究に従事してきました。特に、遠方宇宙での形成期の円盤銀河の形成プロセスを明らかにし、それがどのように我々の住む今の天の川銀河に繋がるのか、ということに興味を持って研究を行ってきました。今後も銀河に関する研究も続ける予定なのですが、カブリ数物連携宇宙研究機構では、新しく初代星の形成に関する研究をスタ



ートさせるつもりです。新しい研究環境で、研究の内容も心機一転ということで新しい世界に挑戦していきたいと思います。



## 江 辰

ジャン・チェン 専門分野: 数学

博士研究員

私は代数幾何学、特に双有理同値のもと代数多様体を分類することを目的とする、いわゆる双有理幾何に興味を持っています。その中でも、Fano多様体の有界性や双有理性問題などの有界性問題を研究しています。私の研究のほとんどはFano 3次元多様体に関連したもので、特異Fano 3次元多様体は（双有理同値を無視すると）有界な族をなしていることを示しました。また、Fano多様体に関連する不変量（たとえば多重標準形、



反標準体積、アルファ不変量、チャーン類など）の有界性についても研究しています。

## 李 寅

リ・イン 専門分野: 理論物理学及び宇宙論

博士研究員

私は、現在および今後のサーベイ観測が有する豊富な情報を念頭に、宇宙の大規模構造から基礎物理および宇宙論を制限する可能性に興味があります。最近、サーベイ領域を超える長さスケールの物質分布が大規模構造の観測量に及ぼす影響を集中的に研究しています。この効果は、“super sample (超サンプル)”効果として知られるようになってきました。この新しい効果は宇宙論観測量の統計誤差に寄与し、あるいは観測量から宇宙論パラメータを引き出すときにこの効果を考慮



する必要があります。私はKavli IPMUの研究者と共にこの研究をさらに発展させること、また同時に新しい研究課題について新たな共同研究を立ち上げることを楽しみにしています。

## 大木 平

おおぎ・たいら 専門分野: 天文学

博士研究員

私は銀河の形成・進化に興味を持ち、特に早期型銀河の進化を明らかにしようと研究をしてきました。これまでに、N体シミュレーションを用いて、早期型銀河の進化において、早期型銀河同士の合体が重要な役割を果たしていることを示しました。また、銀河中心の超大質量ブラックホールやクェーサーの形成機構についても研究をしています。これらを宇宙論的銀河形成の枠組みで理解するため、銀河形成の準解析的モデルを構築し、特にクェーサーの統計的性質を調べてい



ます。

今後は Kavli IPMUで宇宙の大規模構造を手がかりにし、観測的宇宙論の研究も行っていきたいと考えています。

Our Team

## 坂木 泰仁 さかき・やすひと 専門分野: 理論物理学

博士研究員

素粒子物理学における標準模型はマイクロな現象を非常に良く記述していますが完璧ではなく、その枠組みを超えた物理の発見が望まれています。私はどのようにしてコライダー実験で得られるデータを最大限に利用し新しい物理を探索するか、というテーマで研究を行っています。特に、高エネルギー実験において多く生成されるクォーク・グルーオンジェットの詳細な内部構造などの情報を利用した手法を考案しています。その手法の発展のために、ジェットを記述する量子色力学の詳細な理解と、内部構造に関するデータ



が必要になると考えています。この先、ジェットの詳細な情報を用いた手法がスタンダードになるためにも、その有用性を多く示す事が重要だと考えています。

## 高橋 一郎 たかはし・いちろう 専門分野: 天文学

博士研究員

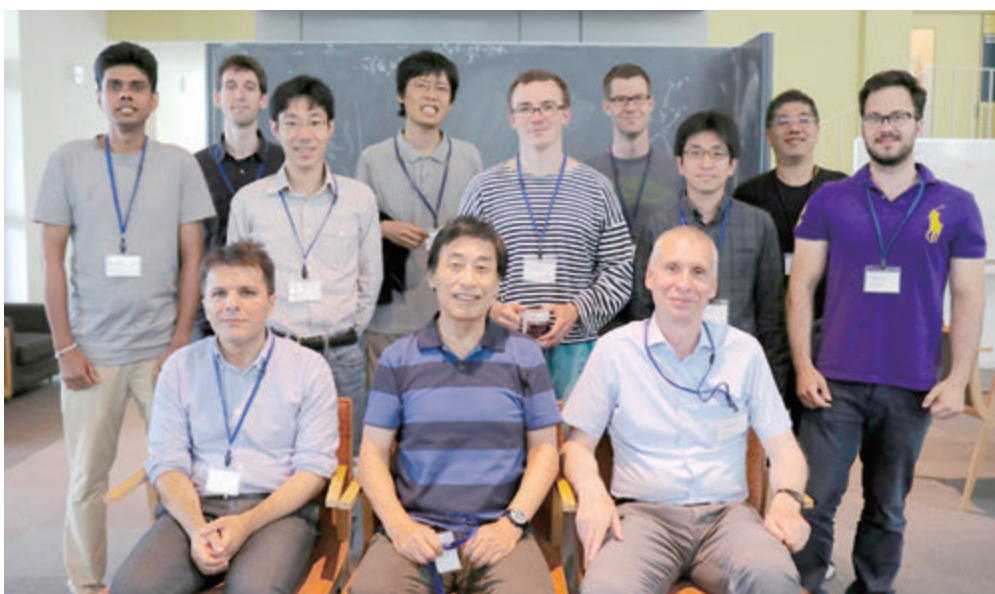
私は変光天体、主に突発天体の研究を複数の波長帯域で行ってきました。変動するライトカーブやスペクトルからこれらの物理的描像を導き出すことに興味があります。

これまでに、私はガンマ線バーストや中性子星の時系列X線スペクトルの解析からそれらの起源や幾何学的描像を調べると共に、GRB残光や超新星をターゲットとした小型の可視光観測システムの開発、運用をしてきました。



Kavli IPMUでは、すばるHSCのデータを使った超新星などの突発天体の研究や、すばるHSCのビッグデータの可視化に取り組んでいきます。

数学グループ



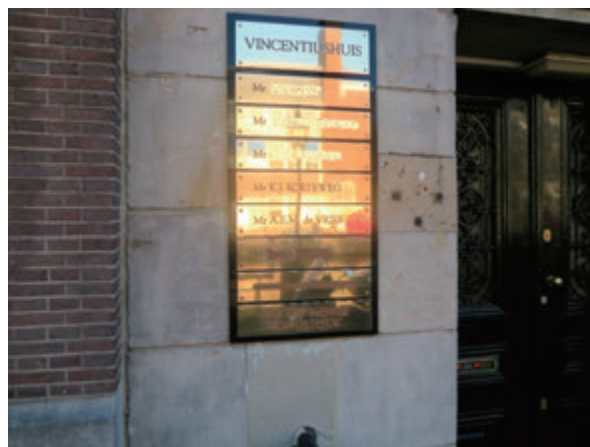
## アムステルダムで出会ったもの

### アレクサンダー A. ヴォロノフ

ミネソタ大学数学科教授、Kavli IPMU客員上級科学的研究員

春休みにドイツのボンにあるマックス・プランク数学研究所で行われた「高次構造」に関する国際会議に出席した時のことです。途中、アムステルダムに立ち寄り、さわやかな春の空気を満喫しながら運河に沿って心地よい散歩を楽しみました。実は、この散歩は単なる散歩ではなく、価値のある散歩だったのです。というのは、滅多に見られないようなものに偶然出くわしたからです。写真をご覧ください。それはコルトヴェーグ<sup>\*1</sup>さんのオフィスとドフリース<sup>\*1</sup>さんのオフィスで、その上、何の特徴もない住所ではなく、Vincentiushuis<sup>\*2</sup>の中だったのです！ 実を言うと、私の本務先であるミネソタ大学の数学教室はVincentホールの中にあるのです。これに触発されて、私はその近くのビルの表札にカドムツェフ<sup>\*3</sup>さんとペトヴィアシヴィリさん<sup>\*3</sup>の名前を探し始めたのですが、見つ

けることはできませんでした。多分、モスクワかトビリシに行くまで待たなければならないかと思います。



<sup>\*1</sup>Kavli IPMUの数学者と理論物理学者にはおなじみのKortevæg-de-Vries方程式、略してKdV方程式と呼ばれる非線形波動を記述する非線形偏微分方程式は、1895年にD.J. KortewegとG. de Vriesにより定式化された。KdV方程式の解は、時間の経過と共に複数のソリトンと呼ばれる孤立波の集まりに分かれる傾向がある。

<sup>\*2</sup>VincentiusはVincentのラテン語表記。huisはオランダ語で英訳はhouse。

<sup>\*3</sup>1970年に物理学者B.B. KadomtsevとV.I. Petviashviliが1次元のKdV方程式の自然な拡張であるKadomtsev-Petviashvili方程式、略してKP方程式を導いた。KP方程式は、ある無限個の非線形偏微分方程式系から得られる最も簡単な方程式であることから、この方程式系をKadomtsev-Petviashvili階層、略してKP階層と呼ぶ。1981年に日本の数学者、佐藤幹夫により、佐藤のグラスマン多様体と呼ばれる無限次元グラスマン多様体を用いてKP階層の基本的な構造が解明された。Kadomtsevはロシアに見られる姓であり、一方Petviashviliはグルジア人の典型的な姓である。トビリシはグルジアの首都。

# Round Table Talk : ネイサン・ザイバーク教授に聞く

ネイサン・ザイバーク Nathan Seiberg  
プリンストン高等研究所教授

大栗 博司 Hirosi Ooguri  
Kavli IPMU 主任研究員

立川 裕二 Yuji Tachikawa  
Kavli IPMU 教授

**大栗** 過去数十年の間に場の量子論と弦理論は著しい進展を遂げ、その中で、あなたは重要な貢献をされました。4次元 $N=1$ 理論のザイバーク双対性、4次元 $N=2$ 理論のザイバーク-ウィッテン解、非可換空間上のゲージ理論のザイバーク-ウィッテン・マップ、リウビル理論のザイバーク限界、共形場理論のムーア・ザイバーク方程式、アフレック-ダイン-ザイバークのスーパーポテンシャル、等々、数多くのアイデアと方法にあなたの名前が付けられています。その一つ一つが私たちの進展の重要なステップとなってきました。

今日は、この歴史を振り返り、あなたがどのようにしてこれらの発見を成し遂げられたのか、また場の量子論と超弦理論の将来の発展についての展望を伺いたいと思います。

**ザイバーク** 本題に入る前に、招待していただいたことと温かい言葉をいただいたことにお礼を申し上げたいと思います。Kavli IPMUに滞在中の厚遇には全く感激しています。お二人をはじめ、機構長、他の研究者とポストドク、事務職員の皆さんも私の世話をし、私の訪問がうまくいって実り多いものになるように尽力して下さっています。素晴らしかったです。これまでこのようなもてなしを受けた覚えがありません。ですからとても感謝していると同時に戸惑っています。



大栗 博司

ネイサン・ザイバーク

立川 裕二

**大栗** ご丁寧ありがとうございます。

あなたは1982年に博士の学位をワイツマン科学研究所から授与されて、すぐにポストドクとしてプリンストン高等研究所（高等研）に行かれたのですね。

**ザイバーク** その通りです。ポストドクとして行きました。

**大栗** 私が研究者になる前のことでした。私は1984年に大学院生になりましたが、いわゆる第1次超弦理論革命の後、超対称性について知られていたことに追いつきたくてあなたの論文を熱心に読んだことを覚えています。あなたは高等研に行かれてほとんどその直後か、あるいは多分1年後に超対称性について研究を始められたのではないのでしょうか？

**ザイバーク** ほとんどすぐに始めました。1982年から83年にかけてのクリスマス休暇中に超対称性の研究をしたことを覚えています。

**大栗** それでは高等研に到着後、完全に研究の方向を転換されたのですね。あなたはワイツマン科学研究所では何

かテクニカラーに関連した模型の構築をなさっていたと伺っています。

**ザイバーク** そうなのですが、うまくいきませんでした。それで、ポストドクになった機会に、方向を転換するべきだ、そして超対称性が面白そうだと考えたのです。

**大栗** その当時、あなたが超対称性について一番面白いと思われたのは何だったのでしょうか？

**ザイバーク** 超対称性は、興味深い知的構造であり、現象論にも関連があるかもしれないと思いました。マイケル・ダインは、以前から超対称性を研究しており、それを私が勉強するのを励ましてくれました。彼は、まだプレプリントの形だったベスとバガーの本を勉強するように薦めてくれました。（ユリウス・ベスはその丁度1年前にプリンストンでの一連の講演を終えたところでした。その時学生だったジョナサン・バガーがノートを取り、結局それが有名な本になったのです。）

**大栗** マイケル（ダイン）もそこでポストドクをしていたのですか？

**ザイバーク** 高等研でマイケルは5年任期の所員でした。私は新任のポストドクとして着任したのです。彼には大変お世話になりました。私のメンター(指導者)になってくれたのです。彼からは大きな影響を受けました。私たちの最初の研究課題は超対称QCD(量子色力学)のダイナミクスに関するものでした。当時その理解がどんなに混乱していたか、今では想像することさえ困難です。

**立川** それからあなたが超対称性の破れに関する論文をイアン・アフレックとダインとの共著で発表したのですね。

**ザイバーク** 私たちが書いた最初の論文はアン・デイビスとの共著で、超対称性に基づくスーパーポテンシャルについて書きました。当時はそれさえも自明ではなかったのです。その主題に関しては、それ以前にエドワード・ウィッテンが重要な仕事をしていました。

**大栗** ウィッテンの指数に関する論文のことを仰っているのですか？

**ザイバーク** 2つの論文がありました。一つは指数について、もう一つはダイナミカルな超対称性の破れと呼ばれるものです。これらの論文は素晴らしい内容に満ち溢れたものでしたので、非常に注意深く勉強したことを覚えています。特に、クォークが有限な質量を持つ超対称量子色力学の振る舞いが解析されていました。しかし、当時はクォークの質量が0の場合の理論の振る舞いについて、矛盾のない描像は存在していませんでした。私たちはアンと共に理論の(ポテンシャルの)平坦な方向を解析した論文を書き、そこではあるスーパーポテンシャルが生成されるであろうという議論をしました。私たちの解析は問題の無矛盾条件と対称性に基づくものでしたが、このスーパーポテンシャルが実際に生成されることは証明しませんでした。

### 超対称性とスーパーポテンシャル

**ザイバーク** その後アンが去り、私たちはイアン・アフレックと一緒に研究

を始めました。その夏、私たちはこのスーパーポテンシャルがある状況下でインスタントンによって生成されることを示す論文を書きました。当時は、非くりこみ定理\*は厳密であり、また非摂動的に正しいと信じられていたため、これは非常に驚くべきことでした。

**大栗** あなたは通常の議論が間違っていると納得したのですか？

**ザイバーク** 非くりこみ定理についてほとんどの過去の議論はファインマン・ダイアグラムに基づくもので、本質的に摂動的なものでした。それはインスタントンには適用されません。インスタントンの計算自体はおそらく1週間かかったと記憶しています。それから文献に載っている全ての議論を調べ、その誤りを修正するのに更に2か月かかりました。

そして、私たちは短いレターを書き、その後スーパーポテンシャルを導く長い論文を書きました。

**立川** それがアフレック-ダイン-ザイバーク-スーパーポテンシャルですね。

**ザイバーク** フレーバーとカラーの数によりますが、インスタントンあるいはグルーノの凝縮によって生成されることを示しました。フレーバーの数ももっと多いとスーパーポテンシャルは生成されず、質量0の理論の真空の縮退は解けません。私にとってこれは最大の驚きでした。これらは幾つかの基底状態を持つ場の量子論です。

**大栗** モジュライ空間をパラメータとする連続無限個の基底状態ですね。

**ザイバーク** 私にとってはとても驚きでした。

**大栗** ということは、超対称性理論の非常に重要な概念の幾つかが1年内外で現れたわけですね。

**ザイバーク** それ以前の論文に前触れがありました。主にはエドワード・ウィッテンの数篇の論文と、特に2+1次元で同じ問題を解析したイアン・アフレック、ジェフリー・ハーベイ、エドワード・ウィッテンの論文でした。

また、私たちはある程度の時間を費やして素粒子の現象論的モデルの構築を

試みました。ですから、主には超対称性を破ることに興味を持っていたのです。真空のモジュライ空間を持つ理論は困りものでした。その目的に使えなかったのです。

そして、1984年の夏にマイケル・グリーンとジョン・シュワルツが革命的な論文を書き、一夜にして物理の世界が変わりました。

### 1984年の第1次超弦理論革命

**大栗** それについてお聞きになったのは、いつのことでしたか？

**ザイバーク** 8月末か9月初めでした。誰もがこの素晴らしいブレイクスルーについて話していましたが、私たちポストドクは、誰一人としてそのブレイクスルーとは何のことも分かっていませんでした。それまで私たちが聞いたことのなかった弦理論という何か謎めいた理論でしたが、これは何か古手の人たちが研究し、放り出したもののようなものでした。彼らは「これはうまくいかなかった試みだから、若手は学ぶべきではない」と考えたのです。

イアン・アフレックは1年間パリに行っていて、マイケル・ダインと私は「このまま超対称ゲージ理論の研究を追及しようか、それともこの新しい理論を研究しようか？」決めなければなりません。そして、弦理論を研究することに決めたのです。その秋、デイビッド・グロスが主として若手の教育のため、プリンストン大学で素晴らしい弦理論の講義を行いました。その講義は非常に人気があり、プリンストン大学と高等研の全ポストドク、学生全員、教員多数が聴講しました。講義は巨大なレクチャーホールで行われました。

**立川** それはヘテロティック弦理論が構成される前でしたか？

\* 量子力学や場の量子論において、ある物理量の値が量子補正を受けないという主張は、「非くりこみ定理」と呼ばれる。非くりこみ定理があてはまる量は、古典極限で計算することができる。ここで問題になっているスーパーポテンシャルの場合、摂動展開では非くりこみ定理が成り立っていたが、インスタントン効果まで考えると量子補正を受け、非くりこみ定理は破れていた。

**ザイバーク** その秋の間にヘテロティック弦理論が構成され、カラビヤウ・コンパクト化が発見され、その他多くの主要な発展がありました。私たちの多くは、遅れずについて行くことに非常な困難を感じていました。私たちがボゾンの弦のような基礎的な題材を勉強していた間に、数多くの新たな発見がなされました。

**立川** デビッド・グロスは講義の間にそういった最新の発展全てをカバーしたのでしょうか？

**ザイバーク** 彼の講義は、主としてボゾンの弦に関するものでした。

**立川** その講義ノートはこれまでに何らかの形で出版されましたか？興味深い歴史的な資料になるかもしれません。

**ザイバーク** デビッドは当時入手できたレビュー論文に従ったと思います。後に、私がイスラエルのワイツマン科学研究所、それからラトガーズ大学にいた時に弦理論を教えましたが、デビッドの講義を聞いた時の私のノートを基に、内容を拡充し、かつ最新版に改訂して使いました。

話を1984年に戻すと、その後何年かの間、マイケル・ダインと私は弦理論について共同研究を続けました。

**大栗** あなたは超対称性に関する研究を脇に置いたわけですが、それにもかかわらず、その後数年の間に行った弦理論に関する研究では、明らかにご自身が開発されたツールを利用されたものがあります。たとえば、世界面インスタントンに関する研究です。

**ザイバーク** 間違いなくその通りです。特に、真空のモジュライ空間についての考察、縮退を解くことのできる非摂動効果の探求、それらの正則性による制御は私たちの弦理論に関する研究で最も重要なものでした。

その典型的で興味深い例が種々のインスタントンの計算に現れます。その答えの実数部がインスタントン作用で、虚数部がトポジカル・チャージですが、実数部と虚数部を組み合わせると正則解を与えます。これによりインスタントンがスーパーポテンシャル

に寄与できることが保証されます。当時は全く魔法のように見えました。アフレックとハーベィとウィッテンは2+1次元の場の理論でそれに気が付き、私は3+1次元の場の理論で見つけ、その後弦理論の4次元時空におけるスーパーポテンシャルに対する世界面インスタントンの寄与で同じことが起きたのです。そういうことが起きる度に、まるで奇跡的につじつまが合っているように見えました。私たちはなぜそれが起きたのか、深遠な根本的理由を知りませんでした。勿論、現在は完全に理解されています。

その間、マイケルと私は弦理論における様々な現象を巨視的な観点から理解しようと試みました。私たちの問いは、低エネルギーの観測者の視点でそれらを記述するにはどうすれば良いかということです。そして私たちは時空の有効作用と、特に4次元時空におけるスーパーポテンシャルに関して世界面の方法により得られた多くの結果を取りまとめようと試みました。弦理論は低エネルギーの観測者が意外に思うような現象をどの程度まで導くことができるか調べようということが動機でした。記憶が正しければ、微視的な(世界面の)論法を用いて見出された多くの「奇跡的な」結果が、簡単に巨視的に説明されることが分かりました。

実際、研究をこのように進めたことが、世界面の方法に存在する数多くの興味深く微妙な効果を明らかにする上で役立ちました。結局、主として私たちが用いたツールは、時空の超対称性に伴う4次元時空におけるスーパーポテンシャルの正則性でした。これは世界面の計算では表に現れないことであり、従って許される解についての強力な制限を導きます。

**大栗** あなたの論文で『弦理論における巨視的な物理から得られる微視的な知見』という表題のものがありますが、その観点を如実に表していると思います。

これは他の人たちのほとんどがしている、微視的な記述から巨視的な結果を導こうということと逆でした。あな

たは低エネルギー有効理論の一般的な性質が微視的な性質の幾つかを説明するうえで役立ち得るということを主張されました。

**ザイバーク** その通りです。なぜなら対称性には低エネルギー理論では明らかなのに短距離の計算では表に現れないものがあるからです。弦理論の非くりこみ定理がその一例です。その元々の証明は世界面の方法に基づくものでしたが、コンタクト項に関連した微妙な点を見抜くには感度が十分ではありませんでした。マイケルと私は4次元時空におけるスーパーポテンシャルの正則性に基づく別の証明を見出しました。その巨視的な証明は全く概念的であり、非常に初等的なものです。そして、非自明なくくりこみが生じるかもしれない特殊な状況を指し示していました。これは後にマイケル・ダインとエドワード・ウィッテンの論文で議論されました。

これには困惑させられました。世界面の方法はそういう特殊な状況はないということを示唆していたからです。この問題の詳細な解析が世界面の方法に新たな光を当て、先行研究では無視されていたコンタクト項の重要性を明らかにしました。

より簡単な証明は、時にその本当の内容を理解させてくれます。もし動かせる部分が非常に多い何かとても複雑な問題があり、何が本質的で何が本質的でないかよく分からないとすると、どうやって証明するか見通すのが困難です。しかし、簡単な証明では、それははっきりしていました。これは低エネルギーの記述がどのように抜け道を指し示すのかというもう一つの例です。

#### 共形場理論とトポジカルな場の理論

**大栗** また、あなたの研究には、グレゴリー・ムーアと共同でなされた、共形場理論の分類や、フュージョンとモジュラー不変性を特徴づける多項式方程式系の発見など、数学に非常に深く広い影響を与えたものがあります。

また、それらは物理学にも影響を与えていて、物性論（凝縮系物理）におけるトポロジカル相がその一例です。ですから、場の量子論から導かれる深遠な数学的構造は広く応用されてきました。

グレッグと一緒に研究された共形場理論の分類は、私が高等研に着任する直前に発表されました。この研究が行われた経緯を伺いたいと思います。

**ザイバーク** 振り返って見ると、その研究はダニエル・フリーダンとシュテファン・シェンカーの研究から始まったのです。（グレッグ・ムーアは、それと独立に関連したアイデアを持っていました。）

**大栗** 彼らは全ての共形場理論の空間という考えを提唱しました。

**ザイバーク** 彼らはリーマン面上のあるベクトル束を用いた描像を持っていましたが、当時私には全く理解できませんでした。私には彼らが何を考えているのか、あるいは彼らがどこを目指しているのかさえ分かりませんでした。その後、エリック・フェアリンデの研究がこの話の一場面として登場しました。彼はプリンストンを訪れて、現在ではフェアリンデ代数とフェアリンデ公式として知られていることについて講演したのです。彼は有理共形場理論のフュージョン則をある性質を満たす整数によって記述し、モジュラー変換行列 $S$ がそれらを対角化するはずであると示唆しました。それは素晴らしいものでした。彼がどのようにこの素晴らしい洞察を得たのか、私は未だに分かりません。

それでグレッグ・ムーアと一緒にフェアリンデの仕事を理解しようと試みました。ある程度進展した後、偶然私たちは蟹江幸博と土屋昭博の論文を見つけました。（昨日初めて土屋さんに会って、とてもうれしかったです。）その論文は非常に数学的なものでしたが、何とか私たちは自分たちが使える簡単な概念を抽出することができました。私たちは有理共形場理論における共形ブロックの変換の性質を調べ、そ

れらが有限個のデータのセットにより特徴付けられることを示しました。さらに、そのデータは数個の多項式で与えられる多数の極めて制限の強い無矛盾条件を満足しなければなりません。実はこれらの制約条件の数が余りに多すぎるので、解の存在は驚くべきことに思われました。

これらの多項式から得られた結果の一つは、フュージョン則とモジュラー行列 $S$ との間の関係についてのフェアリンデの予想を証明できたことでした。私には彼の直観は未だに驚きです。どうやって彼はこの予想を考えついたのでしょうか？

私たちは明確で矛盾のない構造を手にしたにもかかわらず、当時はそれを与える厳密な数学的枠組みが何なのか、全く考えつきませんでした。私たちの注意を圏論に向けてくれたのは、デイビッド・カジュダンおよびピエール・ドリーニュとの有益な会話でした。勿論、その時点では私たちは圏論について何も知識を持ち合わせていませんでした。カジュダンが薦めてくれた本をぱらぱらと見た時のこと、それから「こんな本をどうやって読んだらいいんだ？」と自問したことなど、今でも実に生き生きと思い浮かびます。その日はそのまま帰りました。幸いなことに私はグレッグと一緒に仕事をしていました。翌朝、彼は我々がその本から知る必要のあること全てを要約した見事な講義を私にしてくれたのです。

**大栗** グレッグらしいですね。

それはウィッテンのジョーンズ多項式に関する論文が出る以前でした。私は高等研に行く直前にあなたの有理共形場理論の分類についての論文を読んだことを覚えています。

**ザイバーク** 細部に渡って全てを覚えているわけではありませんが、一見無関係な問題を扱う異なる系統の研究が幾つかあって、それらが一体となったのです。その一つは有理共形場理論で、フリーダンとシェンカー、フェアリンデ、それから私たちの仕事が始まります。ウィッテンはジョーンズ多項

式に興味を持っていました。私たちは1988年の春と夏に一連の論文を書きました。ウィッテンの論文は1988年の秋に出ました。

**大栗** その2つの方向の研究に交流はありましたか？

**ザイバーク** ウィッテンがどの程度私たちの研究に影響を受けたのか、私は知りません。彼は論文の中ではっきり私たちの研究に言及しています。しかし、3次元の描像に基づく彼の考え方は、より広く、より一般的で、より深い洞察力を持っていました。私たちは2次元で一連の変換を行いました、それを3次元の理論と考えるべきであったことは認識していませんでした。

**大栗** 実際は、ウィッテンはウィルソン・ループの期待値を計算する際に、それを2次元の問題に還元し、モジュラー変換とフュージョンの言葉を使いましたね。

**ザイバーク** しかし、彼は、本質的に3次元性を用いるような操作も用いました。そして、勿論、彼はチャーン-サイモンズ・ラグランジャンによる美しい記述も行っています。

**大栗** しかし、現在ではラグランジャンを持たない理論にも使われています。ですから、あなたたちの到達点に戻ってきているともいえます。

**ザイバーク** その通りですが、それでも全構造の裏には、3次元のローレンツ不変な理論、それからトポロジカルに不変な理論さえ潜んでいることを仮定しなければなりません。実際問題としては、何かを計算する際、私たちがした計算とそれほど違いがあるわけではありません。しかし、私たちの概念的描像の方が優れているというわけではないのです。

それから私たちは有理共形場理論に関する自分たちの研究とウィッテンのチャーン-サイモンズ描像の間の辞書を完成させようと試みました。それには1年かかりました。その後グレッグはイエール大学に移り、私が思うに一連の研究の最も素晴らしい応用を成し遂げました。ニコラス・リードと共に



ムーア・リード状態を発見したのです。

### リウビル理論の解明

**大栗** それは物性物理学に対して直接的に応用されてきましたね。

第2次超弦理論革命以前のこの時期にあなたがなさった別のことを伺いたいのですが、それはリウビル理論に関する研究です。これは長年に渡り非常に混乱が続いた研究課題で、間違ったことが数多く唱えられました。

私は、あなたが京都に来られてリウビル理論に関する混乱の多くを解決する一連の講義を行い、全てをきちんと整理されたことを覚えています。あなたは多くの間違った説を捨て去り、あなたが選んだものは後で全部正しいとわかりました。どのようにしてそれをなさったのですか？

**ザイバーク** この共形場理論が共形場理論の一般的公理を満足しないことに悩まされました。従って、つじつまの合った描像が得られるようにするには、どのように公理を緩めれば良いのかを問うことは自然なことでした。

**大栗** リウビル理論は多くの点で、普通の理論とは違います。例えば、リウビル理論の真空の概念は非常に混乱を生じさせるものです。ヒルベルト空間に属さない状態が存在しますが、それでも理論の中で果たす役割があります。あなたは、混乱していたところを一挙に整理して判りやすくしました。

**ザイバーク** ありがとうございます。

**大栗** いえ、単なるほめ言葉ではなく、

あなたがどのようにしてそれをなさったのか伺いたかったのです。

**ザイバーク** まあ、非常に混乱していました。これらの問題を自分に問いかけてみたことを覚えています。

以前にクニズニク、ポリヤコフ、ザモロヂコフが2次元重力についての美しい論文を書きました。その直後に彼らの結果のリウビル理論による解釈をデイビッドとディストラー、および川合が与えました。それからダグラスとシェンカー、ブレジンとカザコフ、それからグロスとミグダルが2次元重力を記述するために行列模型を使いました。彼らの答えは極めて単純で美しいものでした。それ故に、私はたとえリウビル理論が共形場理論の一般的公理を全ては満足しないかもしれないにもかかわらず、何か意義のある理論であろうと感じました。これが動機となって詳しく調べたのです。

行列模型からのデータに加えて、半古典的なリウビル理論についても膨大な文献がありました。うまく行くはずだがうまく行っていないものが沢山あったので、ただ、なんとかうまく行かせようとしただけです。そして、その続きの仕事をグレッグと共に行いました。私たちは行列模型とリウビル理論の間のこの関係をより正確なものにしようと試みて、非常に実り多い時を過ごしました。

勿論、それ以来、この理論に関する我々の理解は、リウビル理論の厳密解を見出したドーンとオットー、ザモロヂコフ兄弟、その他の研究により完全

に変わってしまいました。

### 正則性の威力

**大栗** その後、あなたは1990年代初めに、多分第2次超弦理論革命の前の2年間、超対称場の理論に立ち返られました。何か起きることを予期されたのでしょうか？ これをお聞きするのは、あなたが1990年代初めの数年間、超対称性についてなさった仕事が、第2次革命の進展の中で本質的な役割を果たすことになったからです。あなたが超対称場の理論に立ち返られたのは、何が動機だったのでしょうか？

**ザイバーク** 私は共形場理論と2次元重力を研究していましたが、そろそろ研究テーマの変え時だと思ったのです。それで、ヨッシ・ニルと一緒にクオークとスクオークの質量についての理論模型を構築する研究をしました。それからマイケル・ダインとアン・ネルソンの超対称性の破れのゲージ伝達に関する新しい論文のことを知りました。(後に、彼らはシャーマンとも、またニルとも共同で研究しました。) 彼らは、弦理論が現れた時マイケルとイアンと私が打ち切った超対称性の破れについての問題と同じ問題を取り上げることにしたのです。

**大栗** では、それはあなたがアフレックとダインと一緒になさった研究の続きというわけですね。そのおよそ10年後でしたか？

**ザイバーク** その通りです。彼らは1992年から1993年にその仕事をしました。

アンはラトガーズを訪れ、私たちは色々議論しました。当時私は超対称性に飽き飽きしており、その研究に引き返したいとは思っていませんでした。しかし、彼女は私をその研究に引き戻すことに成功したのです。

**立川** 引き返したくなかったのですか？ それはびっくりです。

**ザイバーク** 引き返したいとは思いませんでした。「もうこの研究は済ませたので、何か新しいことを始めたいも



のだ」と思っていたのです。

アンはラトガーズに私たちを訪ね、マイケル・ダインと一緒にいった研究について話しました。それは私にとって非常に刺激的でした。私たちは議論を始め、やがてR対称性と超対称性の破れの関係についての論文を書きました。(それはネルソン-ザイバークの定理と呼ばれることがあります。)これは10年前にイアンとマイケルと私が考えたことの続きで、それをより具体的にでもっとはっきりした法則に変えたのです。

**大栗** それを超対称場の理論に対する現代的アプローチの始まりでした。

**ザイバーク** それは要素の一つでした。2つ目の要素は私のヨッシ・ニルとの研究に影響されたもので、私たちはスプリーオンと、スーパーポテンシャルがスプリーオンに関して正則でなければならないという事実を用いました。

**大栗** それを超対称性理論でスプリーオンの方法が用いられた最初でしたか?

**ザイバーク** スプリーオンが現れたのは、特に超対称性の破れとの関連ではもっと前でした。ここで新しい点は、通常の超対称場の結合定数を全て背景超対称場とみなすことにより、スプリーオンとして扱うことであつたと思います。その主たる応用は非くりこみ定理を導くことでした。

**大栗** この方法を超対称性理論に導入したのはあなただったのですか?

**ザイバーク** そうだったかどうか、よく分かりません。しかし、超対称性理論の関連で全ての結合定数を背景場とみなしたのは、恐らくそれが最初でした。私は、それを思いついてから数時間ほどの間に多くのことがジグソーパズルを完成させるようにびったり収まったことを覚えています。

ここで歴史をたどってみたいと思います。1980年代以前に場の量子論の振る舞いがある一般的な要請を満たすことがはっきり理解されていました。マレー・ゲルマンはそれを全体主義原理「禁止されないものは全て義務である。」と述べました。同じことをトホ

ーフトは「ナチュラルネス」、すなわちパラメータは対称性のような正当な理由によって禁止されない限り、自然で一般的な値を取ると述べました。しかし、超対称性理論はその原理に反するように見えました。スーパーポテンシャルはくりこみができず、一般的でない値を取り得ます。これは奇妙に見え、一般的でない値を取る原因である相殺が起きることは奇跡的に思えました。その後、非摂動効果が摂動的非くりこみ定理に反することに気がついた時、一定の理解の枠組み(organizing principle)の必要性がはっきりしました。言い換えると、「超対称性理論において場の理論の一般的性質がどの程度まで真なのか?」ということです。

スーパーポテンシャルの正則性に基ついた現在の見方はゲルマンの全体主義原理の正当性を立証し、トホーフトのナチュラルネスとも合っています。スーパーポテンシャルは他の全ての項と同じ一般的性質を持ちますが、一つ違う点があり、それは一般的性質を使う場合、同時に正則性を考慮しなければならないことです。この理由により、私は論文の題目として『「ナチュラルネス」対「超対称非くりこみ定理」』を選びました。

それは私にとって非常に満足のゆくものでした。多くの異なる計算結果と多くの異なる現象が一つの理解の枠組みを用いて同時に理解されたのです。何年もの間堂々巡りをしたあげく、突然全てが一つに纏まったように感じました。これが正しい考え方であることは明らかでした。

**大栗** 正則性の重要性を認識されたのは何時のことだったのでしょか?

**ザイバーク** 私は何年かに渡って徐々にスーパーポテンシャルの正則性の威力を認識したのです。私たちはスーパーポテンシャルの計算で、実数部と虚数部を独立に計算した結果が驚くべきことに正則であると分かった例を数多く見てきました。その当時は、これは奇跡であり、計算の無矛盾性の非自明なチェックのように見えました。

また、これを非くりこみ定理に用いることは、完全に新しいわけではありません。例えば、エドワード・ウィッテンは世界面上の弦理論の摂動的非くりこみ定理に対して正則性を用いて議論し、マイケル・ダインと私は弦理論の摂動定理について同様の論法を用いました。これらの場合、場に関しての正則性であつて、パラメータに関しての正則性ではありません(但し、時空の場は世界面上の理論ではパラメータになるのですが)。また、3+1次元の場の理論におけるパラメータに関する正則性は、ビクトル・ノビコフ、ミハイル・シフマン、アルカディ・ヴァインシュタイン、ヴァレンティン・ザハロフの各論文、それから印刷公表はしていませんがジョー・ポルチンスキーと私が行った研究にも登場しました。他にも例があると思いますが、私が忘れてに違いありません。

**大栗** それは1993年の夏のことですね。しかし、あなたは1980年代末にも本質的にはそれを使っていませんか?

**ザイバーク** その通り、使いました。しかし、当時は理解の枠組みと呼ぶに値する根本的なものとは見ていませんでした。

**大栗** 興味深いお話です。というのも、私がベルシャドスキー、チェコッティ、ヴァッファとトポロジカルな弦理論についての論文を書いたのもその年(1993年)で、その論文もいわゆるBCOV方程式と呼ばれる漸化式を導くために正則性とその超対称性との関係を用いました。

**ザイバーク** あなたたちの論文は一つの節目でしたね。多くの問題点を明らかにし、多くの重要な結果に導きました。しかし、それは別系統をたどった発展でした。同じようなアイデアが独立に異なる文脈でほとんど同時期に現れたことは驚きであり、また興味深いことです。

私たちは科学における歴史的発展を議論しているところですが、私は有名な黒沢監督の映画、『羅生門』を思い

出しました。

**立川** その映画の原作は芥川の小説ですね、日本では学校で教わります。

**ザイバーク** 私はその本のことは良く知りませんが、映画は大好きです。そのストーリーの教訓の一つは、同じ事実であっても人が違うと違って見えるということです。これは科学の歴史にも共通することです。幾つか別系統の発展があり、典型的にはそれぞれが異なる問題を動機としています。従って、同じ時期に研究した別の研究者をインタビューすると、恐らくある出来事の完全に違うバージョンの話の聞くことになるでしょう。そして、どちらかの話がもう一方のよりも正しいのだということはありません。単に両方とも違う見方を反映しているだけなのです。

あなたの質問に戻りますと、当時私は主として4次元の場の量子論に興味を持っていました。しかし、4次元の場の量子論の非摂動的な振る舞いについて、何か言うことができるという考えは全く想像もつきませんでした。

**大栗** その通りです。4次元で解析的に理解できる非摂動的物理があるとは予想外でした。

**ザイバーク** 正則性が理解の枠組み作りのためのツールであるということが理解されると共に、突然物事が明らかで容易になりました。

**大栗** 従ってそれが指導原理となりました。

**ザイバーク** 新しいツールを手に入れた時は、最大限野心的であるべきです。「正則性を用いて場の量子論の未解決の問題全てに取り組むことができるだろう。」と考えたことを覚えています。

まず第1段階として私は量子色力学の超対称版を振り返ってみました。以前、イアンとマイケルと共にフレーバーの数が少ない場合については、理論の振る舞いを理解したので、私はフレーバーの数が増えた場合に起きることを理解したいと思いました。新しい考え方や新しいツールという武器により、私は古典論での真空の縮退が場の量子論でも解けないが、それでも極め

て興味深い効果があることに気がつきました。例えば、真空のモジュライ空間の複素構造が量子論では変形を受けます。他の場合には、新しい質量0の複合粒子が現れます。それは驚きでした。それまでは、強い相互作用の力学により理論にはエネルギーギャップが存在する、あるいは質量0の粒子は全て自発的対称性の破れに対応する南部-ゴールドストーン・ボゾンであると信じられていたのです。それに対して、この場合は自発的対称性の破れと関連のない質量0の複合粒子が存在し得るのです。この事実は、後に $N=2$ 理論(質量0のモノポールが存在)および他の $N=1$ 理論(質量0の複合ゲージ場、質量0のグルーボール、質量0のエキゾチック粒子、等々が存在)の長距離での振る舞いを理解する強い動機となりました。

その後、私はケン・イントリリゲータ、ロバート・リーと共に益々複雑な模型の研究を始め、新しい方法は非常に強力で多くの厳密な結果を導くことが分かりました。

それからアショク・センが極めて興味深い論文を書きました。

**大栗** 彼のモノポールの研究の話ですか？

#### 双対性とザイバーク-ウィッテン解

**ザイバーク** そうです。 $N=4$ 超対称性理論で磁荷2のモノポールの存在を確立したセンの論文についての話です。その論文は双対性に対する真の障害を取り除きました。その論文の前に双対性について考えた人達がいました。磁荷2のモノポールの重要性を強調したのはウィッテンだったと思います。そして、そのようなモノポールは存在しない、従って双対性の考えは全く間違っていると信じられていました。センの論文はそのモノポールを見出したもので、一夜にして双対性は正しいに違いないということが明らかになりました。

**大栗** ここに立川さんがいるので、私たちのどちらかがその説明をした方が

良いのではないのでしょうか。1990年初めには電磁双対性、つまりS-双対性を信じた人は余り多くありませんでした。

**立川** そうですね、弦理論の研究をパーティだとすると、僕は随分遅れて参加したことになります。

**大栗** 勿論、モントネンとオリープの研究があったと思います。それからオリープとウィッテン、そして…

**立川** ゴダード、ニュイツ、オリープですか？

**大栗** そうです。しかし、1980年代の末にオリープとウィッテンの論文を読んだ時、私は彼らが双対性の証拠を示すよりも、この奇跡的な公式は双対性を仮定しなくても説明できるのだと言っている印象を持ちました。すなわち、全ては超対称性で説明できるのだと。

現在、私たちはそれを、双対性を動機づけるものとして使います。しかし、当時は、基本的に双対性は必要ないと説明するものでした。

**ザイバーク** 彼らは超対称代数の小さな表現に属する状態を考えました。そのような状態を現在ではBPS状態と呼んでいます。彼らはこれらの状態の特別な性質の多くを表現が小さいという事実から得られるものとして説明しました。これらの特別な性質が合理的に説明されたため、誰もがこれを双対性の証拠として用いるべきではないと考えました。

加えて、双対性は $N=4$ 理論で2つのモノポールの束縛状態の存在を要求しました。そして、そのような状態は存在しないと考えられたのです。

**大栗** そうでした。しかしそこでアショクが束縛状態があると示したことは…

**ザイバーク** 研究の上の相転移だったのです！その論文以前は、双対性は細かい専門的なことで余り重要ではないとみなされていました。何かが双対であるかのように見えても、その双対性が厳密に成り立つと信じる理由がないからです。その後、一夜にして双対性の重要性が明らかになりました。

**大栗** アショクの論文で、量子物理で

は双対性が現実に起こると納得しましたか？

**ザイバーク** 直ちに私は $N=4$ 理論では双対性は事実だと納得しました。しかし、後に分かったように、それがこれほど重要で中心的な役割を果たすことになろうとは、その時は想像もしてませんでした。

その後、私はエドワード・ウィッテンと共同して $N=2$ 超対称性理論の研究を開始しました。

**大栗** ウィッテンとの共同研究開始前から $N=2$ 理論に興味をお持ちでしたか？

**ザイバーク** はい。私はそれを単に $N=1$ 超対称性を持つ理論のひとつと考えていました。そして、 $N=1$ 超対称性で益々複雑な例を解析していたところでしたので、そのリストの一項目として自然に現れたのでした。また、純粋な $N=2$ ゲージ理論が質量0の光子を持つことは明らかで、純粋な $N=1$ ゲージ理論は閉じ込めが期待されました。ですから、より良く理解することにより閉じ込め機構を説明できると期待していました。

**大栗** そして、あなたが実際にそれをなさったのですね。 $N=1$ ではなく、 $N=2$ の場合について説明する方がうまくいく可能性が高いと考えられたのですか？

**ザイバーク** それよりも、 $N=1$ の特別な場合と考えていました。 $N=2$ に特有な性質により、うまい具合にもっといろいろな量を計算できます。しかし、閉じ込めの問題については、それが本質的なものではありません。

少し遡ると -1987年の秋だと思えますが、ウィッテンがドナルドソン理論を $N=2$ 超対称ヤン-ミルズ理論をツイストしたものとして説明する論文を書きました。そのおかげで物理学者がドナルドソン理論を理解しやすくなりました。しかし、その論文はドナルドソン理論を解くことにはなりませんでした。

**大栗** 数学的問題の物理的解釈を与えたわけですね。

**ザイバーク** しかし、数学者から聞いて

た話では、彼らの観点からは問題の解決にはならないということでした。なぜなら、やはり結局のところドナルドソンがしたのと全く同じ計算をしなければならぬからです。

それでも、もっと広い目で見ればこれは驚くべき論文です。エドワード・ウィッテンはこの論文でトポロジカルな場の量子論の概念を導入しました。これは数学と物理学の両方にとって、広範な影響力を持つ結果を伴う極めて奥深いアイデアなのです。

その研究について話を聞き、私はインスタントの方法という自分のツールキットを用いて $N=2$ 理論に関してその真空のモジュライ空間について考察し、その計量が漸近的にどのように補正を受けるかを示した短い論文を書きました。私はその論文が興味のあるものとは考えず、出版したいとさえ思いませんでした。しかし、エドワードはそれを出版するように私を励ましたのです。実際、彼はドナルドソン理論に関する論文の中で、私のその論文のアイデアは、理論のさらなる発展にとって重要かもしれないと言いました。このことについては、彼は完全に正しかったのです。1988年のことでした。

**大栗** それが現在ザイバーク-ウィッテン解と呼ばれているものの出発点になり、実際解をみつめる際の境界条件となったのでした。

**ザイバーク** そうです。私は『無限遠における振る舞い』についての論文を書きましたが、それを追及することはしませんでした。その後、1994年に超対称性理論に戻った際に自分の1988年の論文を思い出しました。私は真空の縮退は解けず、インスタントの無限級数が真空のモジュライ空間の計量を補正することを知っていました。問題は、どのようにしてそれを評価するのか、またどのようにして級数を足し上げるのかということでした。

先ほど言ったように、その時ケン・イントリリゲータとロブ・リーと私は共同で研究していました。私たちはス

ーパーポテンシャルがインスタントの無限和で与えられる模型をいろいろ研究して論文を書きました。私たちはスーパーポテンシャルの特異点および漸近的な振る舞いが判っていることから、正則性と組み合わせることによって無限級数の和を明示的に閉じた式で書き下すことに成功しました。そこで、私は $N=2$ 理論でも同じことができるだろうと楽観的でした。

私がウィッテンとの共同研究を開始すると、大変な速さで進展し始めました。数週間以内に純粋なゲージ理論と物質がある場合の理論の完全な解が得られました。閉じ込めとカイラル対称性の破れを含むあらゆる種類の興味深い物理現象が明らかになりました。

ウィッテンは、直ちにこの解が4次元のトポロジーを持つ問題を単純化するのに役立つであろうと気が付きました。しかし、私は4次元の場の量子論の力学を理解することにもっと興味がありました。

その後すぐに私は $N=1$ での双対性について論文を書きました。その論文では $N=1$ 超対称ゲージ理論の双対な記述が提示されています。この研究は多くの教訓を与えてくれました。第一に、電磁双対性が普遍的であることが分かりました。 $N=1$ 理論は $N=4$ および $N=2$ 理論よりも包括的で、同じような双対性を示します。第2に、この場合には弱結合の複合ゲージ場が存在します。これはゲージ対称性が基本的なものではないという事実を強調するものです。この点は、以前に主としてアーベリアンゲージ理論において知られていましたが、この場合にもっと劇的なものでした。

この間、ウィッテンは私たちの $N=2$ 超対称ゲージ理論の解を持つ4次元トポロジーとの関係について論文を書きました。

**大栗** そうですね。現在それはザイバーク-ウィッテン方程式と呼ばれています。それは出発点のドナルドソン理論よりも強力であることが分かりました。

**ザイバーク** それは物理的には非常に

はっきりしていて、ドナルドソン理論の複雑な点の多くは小スケールのインスタントンに伴うものだからです。そして、新しい多様体に関連した計算をする度に同じ小スケールのインスタントンを制御しなければなりません。くりこみ群を使えば、平坦な空間で小スケールのインスタントンを一度だけ計算すれば良くて、あとはそれらが出てこない有効理論が得られます。それから考えている曲がった空間にその有効理論を適用できます。この有効理論は、もはや小スケールのインスタントンを持たないので、出発点の理論に存在した多くの複雑な点はもう存在していません。ですから、その理由で…

**大栗** 既に有効理論に組み込まれているので…

**ザイバーク** すでに組み込まれているので、もう気にしないで済みます。実際、低エネルギーの理論は小スケールのインスタントンを持ちません。それがこの方程式を極めて強力なものとしている理由です。

**大栗** 立川さんは1995年には高校生でしたか？

**立川** はい。ザイバークという名前を初めて聞いたのがその頃です。

**大栗** ザイバーク-ウィッテン理論のことを数学の一般向けの雑誌で知ったと聞きましたが…

**立川** ええ、京都で江口徹さんがエドワード・ウィッテンをインタビューしました。1994年の初めだと思います。それが『数学セミナー』誌に載ったのを read したので。

**大栗** その通りです。日本の会社の後援でウィッテンが京都に来て、一般向けに講演をしました。私はその手配に関わりました。

**立川** エドワードは江口さんに、その時あなた (Seiberg) としていた研究に極めて興奮していると話しました — それほど説明はありませんでしたが。例の日本の一般向けの雑誌に、1994年の夏の発行ですが、そのことが載っています。

**大栗** 論文が出る前でしたね。その結

果が印刷の形で報告されたものとしては最初でした。

**立川** それから深谷さんらの日本の数学者がザイバーク-ウィッテン理論に非常に興味を持ちました。そして、深谷さんがその数学の一般向けの雑誌に、数学の観点からザイバーク-ウィッテン理論についての入門的な論文をシリーズで書き始めました。それで、私は最初の何年かはザイバーク-ウィッテン理論は純粋数学とっていました。

やっとザイバーク-ウィッテン理論の物理的な部分を学んだのは、超対称性理論の勉強を始め、結局ベスキンのレビュー論文に出会った後のことでした。

**ザイバーク** TASI (Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics) 講義録ですか？

**立川** はい、TASI 講義録です。それでやっと物理の観点からザイバーク双対性とは何か理解しました。既に2003年か2004年になっていました。長いことかかったものです。

#### 2005年の第2次超弦理論革命

**大栗** ウィッテンの超弦理論の双対性でのブレークスルーについて聞いたのはいつでしたか？

**ザイバーク** 彼は、それについて研究中に少しずつ私に話してくれました。それから彼が南カリフォルニア大学で講演した時に最終版を聞きました。

**大栗** 1995年の超弦理論国際会議でした。

**ザイバーク** その時、私はラトガースから研究休暇を取り、高等研に滞在中でした。私たちは国際会議の前の週に議論し、彼はその研究のある部分はどうまくゆくだらうと私に話してくれました。しかし、それは彼の講演の発表内容とはまだ全く異なるものでした。私は彼の講演を聞いて唖然としました。私は彼の後で講演することになっており、「こんな話のあとで私は何をすれば良いのだろうか？」と思いました。

**立川** 何について講演したのですか？

**ザイバーク** 場の理論の双対性について

話しましたが、それはまだ数か月しか経っていない話で、その時点でほとんどの人たちはそれを知らなかったわけですから、私は講演するのに良いテーマだと考えたのです。しかし、ウィッテンが彼の超弦理論の双対性についての描像を発表した後では、私の講演は既に時代遅れに思えました。

**大栗** あれは素晴らしい講演でした。良く覚えています。

**ザイバーク** 彼はその講演でほとんど全体像と言えるものをはっきりと説明しました。

私は壇壇に上がりましたが、非常に困惑してこう言いました。「トラックを運転しなければいけない気分です。」それから講演しましたが、その後のことは覚えていません。しかし、そのセッションの3番目の講演者だったジョン・シュワルツが「もしナティ (ザイバーク) がトラックを運転しなければならないなら、私は三輪車を運転しなければならない。」と言って講演を始めたと言いました。

**大栗** その年、この分野は本当に相転移を起こしました。あなたが場の量子論、超対称性理論で発展させた多くのアイデアがそれに組み込まれました。

**ザイバーク** ウィッテンはその点に導いた多くの発展を車輪のスポークに例えました。超対称性、BPS状態、真空のモジュライ空間、強結合領域での自由度など、これをまとめたのが一本のスポークです。

しかし、また別系統の発展がありました。11次元の超重力に関するマイケル・ダフ、クリストファー・ハル、ポール・タウンゼント、その他の研究は極めて重要でした。そして、ガリー・ホロビッツ、アンディー・ストロミンジャー、その他の超重力の解の種々のソリトンや広がりを持ったオブジェクトの研究も本質的でした。

ですから、同時に起きた多くの異なる発展があり、それら全てを矛盾のない描像に収めたものが超弦理論の双対性の描像だったのです。私はそれらが互いを進歩させ合ったのだと思いま

す。なぜなら、一つの観点から見るとある側面が明らかであり、別の観点からみると他の側面が明らかであったからです。それらが全体として結びついて、完全で矛盾のない描像になったのです。

**大栗** 立川さん、あなたが高等研に行ったのは何年でしたか？

**立川** 2006年でした。私は今議論されたようなこと全てが起こったずっと後になって、やっと超弦理論のコミュニティーに加わりました。1984年や1995年の輝かしい時代のことを聞く度に、いつもうらやましく思います。

**大栗** そういうことは繰り返すものです。例えば、私は大学院生の時にコールマンの講義録を勉強しましたが、彼の言葉を引用すると、「遠い彼方から持ち帰った数々の豪華な品々に彩られた栄光の祝勝パレードに、観客は畏敬の念に息をのみ、歓呼の声を上げた。」これらは全て1970年代に発見され、私は全部間に合いませんでした。

**ザイバーク** そして1970年代には、1930年代と1920年代に起きたアイデアの栄光のパレードについて語られました。いつもそういう風なのです。

このような劇的な発見の連鎖が減速する兆候はありません。そして、過去の経験に基づけば、これは今後も何度も起きることだと思います。それから、これまでいつもそうだったように、思いもよらない驚くような起き方をしたいと思います。

いつでも、ほとんどの人が全く興味を持たず、なぜ面白いのかもわからないようなテーマで研究している人がいます。そういう研究が真のブレークスルーをもたらすということがあります。

そのためには、私たちは常に柔軟な精神を持って違う考えを受け入れることが本当に必要なのです。私たちはこの自由な考え方を持つべきなのです。誰でもやっていることはそのままやらせてあげ、多様性を奨励しましょう。もし誰もが同じ問題を研究しているとすると、思いがけないところから私たちが本当に必要とするアイデアを得



るといことはなくなるでしょう。

#### 科学の統一

**立川** 1996年から2016年まで20年飛んでも良いですか？

**ザイバーク** どうぞ。

**立川** では、あなたは最近物性物理について論文を書き、明日の講演ではその話をされます。何が動機となってこの研究テーマに興味を持つようになったのですか？

**ザイバーク** この話題はとても魅力的です。物性物理学者は信じられないようなことを発見しました。それを理解したいのです。

私は科学がすべて繋がっていることを固く信じています。素粒子現象論、弦理論、物性物理学というように、それぞれ違う箱に理論物理学者を分類するのは嫌いです。私たちは理論物理学者であって、理論物理学を細分化した異なる分野間にはっきりした境界はありません。それよりも、過去何年にもわたり、ある分野から別の分野へといった交流が数多く見られました。

大栗さんと私はシカゴ大学での南部陽一郎さんの業績を讃えるシンポジウムから戻ったばかりです。学際的な物理学の重要性が非常に良く分かるシンポジウムでした。南部さんの研究は、物理学の一つの分野から別の分野へと輸入されたアイデアが巨大な衝撃を与え、分野間の有益な相互交流につながった好例です。これは、ジョバンニ・ヨナラシニオと共著の彼の最も有名な

論文『超伝導とのアナロジーに基づく素粒子の力学模型』にはっきりと示されています。

私が現在行っている物質のトポロジカル相に関する研究について聞かれたことに戻ると、単に美しいアイデアを調べようとしているだけです。これらは場の理論が示す素晴らしい現象で、場の理論の研究者は誰もが理解しなければならないことであると思います。加えて、これらの現象が現実の世界に現れ、現実の物質と結びついていることは、満足感を与えてくれるものです。

**大栗** しかも、実験でこれらのアイデアを検証できるわけですから。

**ザイバーク** それから、これらの新しいアイデアは場の量子論における新たな洞察にも導いてくれると思われ、その後それを高エネルギー物理や弦理論に持ち帰ることができるかもしれないのです。

物質のトポロジカル相の研究におけるアイデアの多くは高エネルギー物理に端を発したものです。例えば、アノマリー、キャランとハーベィのアノマリーの流入、組みひも群の統計、ウィッテンのトポロジカルな場の量子論、その他が主なツールとして使われています。

ですから、ここでは高エネルギー物理学の理論家が役に立つ仕事をする可能性があると思います。まだもっと多くのことができるという明らかな兆候があります。しかし、最低限でも何か新しいことを学ぶことになり、新しいことを学

ぶといつも気分爽快になります。

**大栗** 今回は超対称性を持たない理論ですね。

**ザイバーク** 以前、有理共形場理論に関連したトポロジカルな理論のように、関係のあるテーマを研究したことがあります。ですから、役に立つかもしれないツールを私は幾つか持っていると思います。

一般的に、どんな研究課題、あるいは研究の方向にも成功する保証はありません。私の学生やポスドクにいつもこう言います。「研究はどんなに努力してもリスクがつきまとう。成功の保証はない。一つの成功を期待して多くのことを試してみるべきである。しかし、そのほとんどがうまくいかないことを受け入れる覚悟が必要だ。うまく何か新しいことを知るほんのわずかの日々のためにそうするのだ。」

#### 成果は予測できない

**大栗** 座談会を終える前に、もう一つ伺いたいことがあります。あなたは、研究グループの運営と学生およびポスドクに対する指導・助言を非常にうまくやってこられました。研究グループを成功させるものは何だとお考えですか？

**ザイバーク** 第一に、私がお名前をいただくわけにはいきません。私が研究グループにいる時はいつも多くの同僚と一緒に、彼らが科学的な雰囲気とグループの運営に本質的な貢献してくれました。

Kavli IPMUであなた方がしていることは、明らかに正しい。ここには優れた、活気にあふれたグループがあり、世界的なリーダーの何人かが Kavli IPMU にいます。私がいつも注意深く読むような論文を書く人々です。過去数日、私はそのグループの活動を見てきましたが、それは本当に楽しいことでした。興味深いセミナーを聞いて、活気のある議論に加わりました。ですから、私が言えることは、今の活動を続けるようにということが全てです。

一般的なアドバイスとしては、多様

な研究者のグループを作って活気のある環境を作り出すということです。異なる身分、異なる才能、異なる種類の専門技術、異なる経歴を持つ人たちがいるべきです。例えば、数学的なことを指向する人々、優れた物理的直観を持つ人々、計算の得意な人々、等々です。

皆が互いに交流し、研究について議論することを奨めたいと思います。何かが問題になった時、いつも誰か答えを見つけられる人がいるようにです。

どうやってポスドクを選ぶかという問題もあります。どのポスドクが成功するかどうか、はっきり予言できる人はいないと思います。それより、完璧な選び方をしようとするべきではないと考えます。それは不可能ですから。単に多様な研究者のグループを集め、彼らのために適切な雰囲気を作り出すことを試みるべきです。

もう一つのアドバイスは、ポスドクに何が自分たちにとって役に立つと思うのか、聞いてみることです。

**立川** 私が高等研にいた時、ポスドクがピザを食べながらミーティングをしようかとあなたが私に提案されたことがありました。

**ザイバーク** それはあなたのアイデアだったと思いますよ。

**立川** そうでしたっけ？ いずれにしても、私たちはそのうちに毎週午後の『ピザ談話会』を始めました。

**大栗** 教員は出なかったのですか？

**ザイバーク** 教員は出ることは許されませんでした。

**立川** そうでした。あれはとても面白かったです。

さて、何か将来のビジョンをお聞かせいただけますか？

**ザイバーク** 研究者は全てを事前に予定した5年計画を持つべきだと考える人たちがいます。旧ソビエト連邦のように。この問題を解いて、次の問題に移り、そして…

**立川** 日本ではまだそのシステムがあります。

**ザイバーク** それは実験研究者に対し

てはいくらか意味があります。しかし、理論家の進歩はもっとランダムウォークに似ています。理論家は色々なところから刺激を受けます。セミナーを聞き、インフォーマルな議論に加わり、論文を読み、等々です。これは彼らの研究の方向に予測できないような影響を与えます。場合によっては彼らが現在行っている研究の方向をあきらめて新たに別の方向を目指すようなことさえあるかもしれません。既定の研究プロジェクトの中でさえ、大抵の場合、研究成果は初めから予測できるものではありません。

この座談会では私の研究の過程を振り返って話しましたが、私自身の経験からこのような予期しなかった結果になった幾つかの例を共有しました。

ですから、これから5年間に私が何を研究するか、お話しすることは不可能なのです。そうしたらおかしなことになります。

**大栗** そうですね、あなたの実例は、後で非常に有用なことが分かった超対称性理論における方法のように、直観に従って興味を持ったことを追及したことを示してくれています。

**ザイバーク** 私は運が良かったと思います。私は長期に渡る計画を持ちませんでした。多分1年前かあるいはそれ以下でした。あなたの論文でも同じことではないかと思います。現在あなたが興味を持っているテーマを2、3年前に予想はできなかったはずですよ。

研究が面白い理由は、その答えに驚かされるからです。もし答えを予言できたら驚かされることにはならないでしょう。ほとんど当然なことですが、成果を予測することはできません。ですから、そうしようとするべきではないのです。

興味を持ったことを追及し、一所懸命研究を続け、自分の周りで起きていることに注意を払い、柔軟であること。これらがルールです。それでうまくいくこともあり、そうはいかないこともあります。

# PhyStat-v Workshop on Statistical Issues in Experimental Neutrino Physics

マーク・ハーツ Mark Harz

Kavli IPMU 助教

2016年5月30日から6月1日まで Kavli IPMUで開催されたニュートリノ物理実験における統計的な問題に関するワークショップ、PhyStat-vには、世界中から90名を超える素粒子物理の研究者と統計の研究者が参加しました。このワークショップは、現在および将来のニュートリノ実験から得られるデータの解釈に利用される統計的方法を主題とするものでした。

ニュートリノ振動現象によるニュートリノの質量の発見は、素粒子の標準模型を超える物理への新たな窓を開き、梶田隆章、アーサー B. マクドナルド両氏に2015年のノーベル賞をもたらしました。現在、ニュートリノ実験は、ニュートリノ振動現象およびニュートリノが他の素粒子に比べて極めて小さい質量を獲得するメカニズムについて、さらなる理解を得ることを目指しています。未解決の問題には、次のようなものがあります。ニュートリノと反ニュートリノの振動は異なるか（いわゆるCPの破れ）？ ニュートリノは自分自身の反粒子か？ 質量の固有状態のニュートリノは3種類あるが、その質量の

順番は？ 振動を支配するパラメータの精密測定により、ニュートリノの質量行列に潜む対称性が見られるか？

こういった未解決の問題を調べるため、ニュートリノ物理の研究者は、ますます複雑化した大規模な人的、予算的資源を必要とする実験を実施しています。従って、実験から最大の情報を得ることと、推定されたニュートリノモデルのパラメータについての情報およびモデルの選択の統計的健全性を保証することが重要です。PhyStat-vワークショップは3つの主要な統計的問題、すなわち、事象の分類、パラメータの推定、モデルの選択について取り組みました。

事象の分類とは、物理学者が検出器で測定された生データを物理過程として解釈する手順のことです。例えば、ニュートリノ検出器中で観測された光のパターンは、1個または2個以上の荷電粒子が測定器の物質中を伝播してチェレンコフ光を放射したと解釈することができます。このワークショップでは、boosted decision tree およびノンパラメトリックベイズ事象再構成など、生データから引き出す情報を最大化できる新しい方

法が発表されました。

パラメータ推定は、観測されたデータが与えられた時にモデルのパラメータに対して許される値を推定することを意味します。PhyStat-vでは、古典的方法とベイズ法の両方について、パラメータに物理的な限界がある場合や、パラメータに対する信頼区間として両側、片側のどちらを選ぶか決める場合のような難しい場合に焦点を合わせた発表がありました。

モデルの選択というテーマは、次世代の実験が順階層と逆階層の二つの選択肢が存在するニュートリノの質量階層を測定することから、多大な注目を集めました。この測定は連続的なパラメータの測定ではなく離散的な値の決定を必要とするため、何が有意な結果となるかをナイーブに予想すると間違える可能性があります。古典的方法とベイズ法の両方によるモデル選択の方法が議論され、LHCのデータを用いてヒッグス粒子候補のスピン・パリティを決定した、同じような離散的値の決定との比較が行われました。

Kavli IPMUで開催されたPhyStat-vワークショップはニュートリノ物理分野で最初のPhyStat-vワークショップで、ニュートリノ実験における統計的方法について将来行われるワークショップの礎をつくりました。第2回PhyStat-vワークショップは9月19日から21日にアメリカのフェルミ国立加速器研究所で開催される予定です。



# Higher Residue Week, 2016

トードル・ミラノフ Todor Milanov

Kavli IPMU 准教授

2016年6月6日から10日まで Kavli IPMU にて“Higher Residue Week, 2016”が開催されました。前半の2日間には研究会が行われ、後半の3日間には Dmytro Shklyarov (ケムニッツ工科大学) による連続講義が行われました。この研究会および連続講義の主目標は、Shklyarov の最近の研究成果の解説でした。Shklyarov は斎藤恭司 (Kavli IPMU) による原始形式の理論に触発されて、 $dg$  圏の Hodge-like 構造を導入しました。斎藤が原始形式という概念を導入したのは1980年にハーバード大学に滞在していたときでした。その主な目的はリーマン面の周期写像の理論の一般化で、原始形式は正則函数の孤立特異点に対し定義されます。

斎藤の理論は、1990年代の Alexander Givental や Maxim Kontsevich の研究

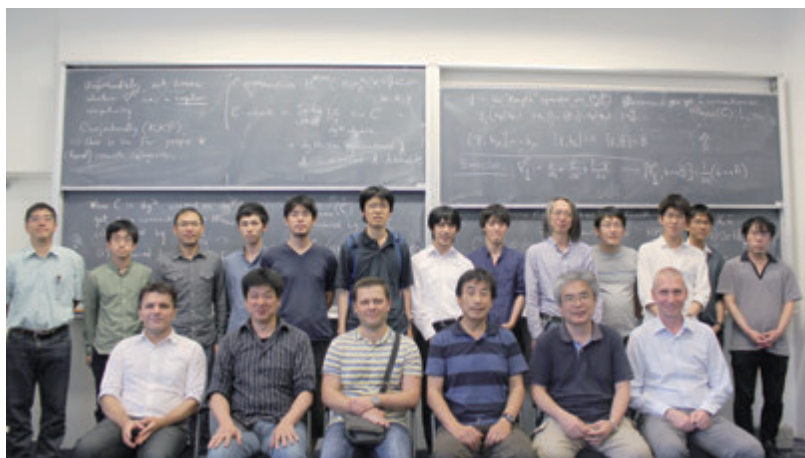
(ミラー対称性やシンプレクティック幾何の Gromov-Witten 不変量の計算など) において非常に重要な役割を果たしました。ある文脈ではミラー対称性はアフィン多様体  $Y$ 、正則函数  $f: Y \rightarrow \mathbb{C}$ 、原始形式  $\omega$  を見つける事に相当します。斎藤の理論により  $Y$  の twisted de Rham cohomology 上に *Higher Residue Pairing* と呼ばれる非退化双線型形式が定義されます。定義には residue の列を用います。すると原始形式  $\omega$  は無限個の双線型関係式を満たし、 $f$  と  $\omega$  から構成される振動積分は Givental の定義した  $J$  函数 (種数 0 の Gromov-Witten 不変量の母函数) に一致します。

Shklyarov は matrix factorization の圏を研究し、斎藤の twisted de Rham cohomology および Higher Residue

Pairing に圏論的解釈を与えました。より正確には斎藤の理論の一部に圏論的一般化を与えました。その応用として Shklyarov は、ある  $A$  無限圏の構成を含む Anton Kapustin と Yi Li の予想を証明しました。

また研究会では、太田啓史 (名古屋大学) により、深谷賢治、小野薫、Yong-Geun Oh との共同研究 (Lagrange 部分多様体の  $A$  無限圏に関する理論) が解説されました。これは、ある状況では原始形式との関連が期待されず。この研究会全体を通じ、ミラー対称性および原始形式に関する研究の現状および今後の課題に関する活発な議論が行われました。

(訳者：今城洋亮 Kavli IPMU 博士研究員)





## 村山機構長 科学技術外交シンポジウムで講演

2016年5月24日に Kavli IPMU の村山機構長が、東京都港区の政策研究大学院大学で開催された「科学技術外交シンポジウム」において基調講演を行いました。

このシンポジウムは、5月26日、27日に伊勢志摩G7サミット会合が開催される機会を捉え、我が国の科学技術外交の在り方や方向性について議論することを目的として、内閣府と外務省、文部科学省、経済産業省、政策研究大学院大学、科学技術振興機構などの共催で開催されたものです。

村山機構長は、基礎科学では一つの研究目標に向かって出身国が異なる研究者が協力しており、そうした姿勢が世界平和に繋がることを欧州原子核研究機構（CERN）やヨルダンの放射光施設 SESAME の事例を用いて紹介し、日本も、これまで培ってきた基礎科学分野における技術力や今後の実験設備建設により世界平和に貢献でき得ることを指摘しました。

シンポジウムでは、岸田文雄外務大臣が挨拶を行ったほか、岸輝雄外務大臣科学技術顧問による講演や村山機構長も含めた有識者による「科学技術外交を通じた日本外交の新たな方向」をテーマとするパネルディスカッションが行われ、日本が持つ科学技術の力をどのように発揮し、世界に貢献していくかといった内容を中心に話題提供がありました。



パネリストとして登壇した村山機構長(写真右端)。(写真提供：外務省)

## 梶田隆章主任研究員と大栗博司主任研究員が中日文化賞を受賞

東京大学宇宙線研究所所長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる梶田隆章さんとカリフォルニア工科大学ウォルター・パーク理論物理学研究所長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる大栗博司さんが第69回中日文化賞の受賞者に選ばれ、2016年6月3日に名古屋市の中日パレスで授賞式が行われました。

中日文化賞は、中日新聞社が日本国憲法の施行を記念して1947年に設立した賞で、学術や芸術分野で優れた業績を挙げ、文化の向上に寄与したとされる個人や団体へ贈られてきました。

梶田さんの受賞理由は、岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下1000 mにあるカミオカンデと後継のスーパーカミオ



梶田隆章さん



大栗博司さん

カンデ検出器により大気ニュートリノ振動現象を捉え、ニュートリノが質量を持つ決定的な証拠を示し、2015年のノーベル物理学賞受賞につながった「素粒子ニュートリノに質量があることを示すニュートリノ振動の発見」です。

また、大栗さんの受賞理由は、現代数学の成果を使って場の理論や超弦理論の新しい理論的手法を開発し、物理学の基礎的問題の解決につなげた「素粒子論に現代数学を取り入れた最先端理論の開発」です。

## 大栗博司主任研究員、アメリカ芸術科学アカデミー会員に選ばれる

2016年4月20日、大栗博司さんがアメリカ芸術科学アカデミー（The American Academy of Arts and Sciences、略称AAAS）会員に選出されたことが発表されました。

アメリカ芸術科学アカデミーは1780年に創設された米国最古の学会のひとつで、歴代の会員には学術、芸術、ビジネス、政治など幅広い分野から選ばれた会員が名を連ねており、同アカデミーの会員となることは米国で非常に名誉なこととされています。

今回選出された新会員213名の就任式典は2016年10月8日にAAASの本部があるマサチューセッツ州のケンブリッジで行われます。

## 国際プラネタリウム協会フルドームフェスティバル2016で大栗博司主任研究員監修の『9次元からきた男』が受賞

『9次元からきた男』は、2016年4月

に日本科学未来館のプラネタリウムにおいて新しく一般公開された3Dドーム映像作品で、同館が企画・製作等を担当、ホラー映画で著名な清水崇さんが監督、大栗博司さんが監修を務めました。この作品は物理学研究の究極目標である「万物の理論 (Theory of Everything)」をテーマに、謎の男 T.o.E. (トーエ) とそれを追う科学者達の物語を通して、「万物の理論」の有力な説とされる「超弦理論」の世界観を伝えるものです。

この作品が、国際プラネタリウム協会 (IPS) が主催し6月15日から17日の3日間、チェコのブルノ天文台で開催されたIPS フルドームフェスティバル 2016において、最優秀教育作品賞 (Best Educational Production Award) を受賞し、ポーランドのワルシャワ市で開かれる IPS ワルシャワ会議の最終日である6月23日に授賞式が行われました。

IPS フルドームフェスティバル 2016 では、15ヶ国から集まった66作品のドーム映像作品が上映されました。最優秀教育作品賞は国際審査委員会が選ぶ最も権威ある賞で、「私たち、宇宙、『究極の理論』に関する、最も複雑かつ深遠な疑問に新鮮な見方を提供し、好奇心を刺激した」ことが評価されました。



日本科学未来館ドームシアター最新作『9次元からきた男』のポスター (Credit: Miraikan)

### 130億光年彼方の宇宙でも一般相対論が成り立つことを確認

Kavli IPMU 博士研究員の奥村哲平さん、Kavli IPMU 助教の日影千秋さん、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻教授の戸谷友則さんを中心とする国

際研究グループは、130億光年彼方の宇宙でも一般相対論が成り立つことを確認しました。

研究グループは、まず、すばる望遠鏡を用いた FastSound (ファストサウンド) という銀河サーベイにより、平均して130億光年の遠方宇宙にある約3000個の銀河の距離を測定し、宇宙3次元地図を完成させました。さらに、地図中での銀河の運動を詳しく調べ、重力によって大規模構造が成長していく速度を測定しました。130億光年という遠方の宇宙でこの速度を測定したのは世界で初めてのことです。そして、そのような遠方の宇宙でも構造形成の速度がアインシュタインの一般相対論の予想と誤差の範囲で一致することを確かめました。現在の加速膨張宇宙は、アインシュタインが導入した宇宙定数を考慮することにより、一般相対論で説明できることが知られています。今回の観測結果は、この宇宙モデルにさらなる支持を与えるものです。

本研究成果は日本天文学会の発行する欧文研究報告誌 *Publications of the Astronomical Society of Japan* のオンライン版に2016年4月26日付で掲載されました。

### 超大質量ブラックホールからの風が星形成を妨げる様子を捉える

Kavli IPMU 博士研究員のエドモンド・チャンさんと Kavli IPMU 助教のケビン・バンディさんらを中心とする国際研究グループは、アメリカのニューメキシコ州にあるスローン財団望遠鏡に取り付けた新型分光器を用いた MaNGA (アパッチ・ポイント天文台近傍銀河地図作成) プロジェクトにより、星形成が行われておらず中心部の超大質量ブラックホールから風が吹き出すという特徴を持ったレッドガイザー (red geyser) と呼ばれる種類の銀河を観測し、銀河中心の超大質量ブラックホールからの風が銀河中のガスを暖めている様子を捉えました。

これは、星形成に必要なガスが充分存在しても、超大質量ブラックホール

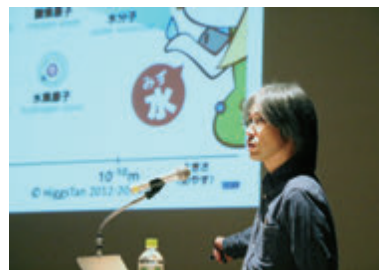
からの風が銀河中のガスを暖めることで星形成が妨げられる、という説を支持するものです。

本研究成果は科学雑誌 *Nature* のオンライン版に2016年5月26日付で掲載されました。また、本誌34~39ページにこの記事の詳しい解説が掲載されています。

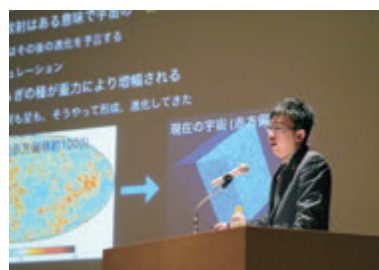
### Kavli IPMU / ICRR 合同一般講演会「宇宙を読み解く」開催

2016年4月16日、千葉県柏市のアミュゼ柏にて「宇宙を読み解く」を主題に、今回で14回目となる Kavli IPMU と東京大学宇宙線研究所共催の一般講演会が開催され、中高生を含む約280名が参加しました。

梶田隆章宇宙線研究所長による開会の挨拶に続き、宇宙線研究所准教授で Kavli IPMU 科学研究員を兼ねる早戸良成さんが「ニュートリノ—明らかになってきた性質と残された謎」と題して、ニュートリノ振動といったニュートリノの不思議な性質や、これまでにスーパーカミオカンデで行われてきた研究などについて解説しました。



講演する早戸さん



講演する西道さん

その後、Kavli IPMU 助教の西道啓博さんが「すばる望遠鏡—ビッグデー

タから迫る宇宙のダーク成分」と題して、ハワイのすばる望遠鏡に取り付けた Hyper-Suprime Cam（超広視野主焦点デジタルカメラ）より得られる膨大なデータを正しく解釈するために必要な精密理論の研究の話題を中心に、観測データが膨大な量になりつつある天文学研究において、統計学的手法やスーパーコンピュータを用いたビッグデータ天文学が重要になってきていることを紹介しました。

講演終了後、ロビーで講師を囲む懇談会が催され、熱心に講師に質問する参加者の姿が見られました。

### Kavli IPMU 一般講演会「ランドール博士の科学的探索」開催

2016年6月19日に東京大学駒場キャンパスの21 Komcee レクチャーホールにおいて、一般講演会「ランドール博士の科学的探索」が開催され、200名の会場は満員となりました。

まず、京都大学基礎物理学研究所教授で Kavli IPMU 客員上級科学的研究員を兼ねる向山信治さんが「4次元を超えるかもしれない宇宙」と題して講演を行い、重力も含め全ての力を記述できるように究極の理論とされる超弦理論では4次元時空以上の次元が導き出されることを紹介しました。しかしそうした次元が見えない理由として、コンパクト化という4次元時空の中でそれ以上の次元が小さく丸まっているという説や、4次元時空がプレーンと呼ばれる膜状のものに張り付いていて、4次元時空以上の次元の中に浮いているような状態となっているために、我々からは見えないという説を紹介しました。

続いてハーバード大学教授のリサ・ランドールさんが「ダークマターがたなぐ宇宙・地球・生命—ダークマターと恐竜絶滅」と題して講演し、最近出版した一般向け書籍でも言及している、我々の天の川銀河に存在する新種のダークマターによって彗星軌道が影響を受け、恐竜絶滅が引き起こされた可能性があるという新説について紹介

しました。ランドールさんの講演では、Kavli IPMU の村山機構長が解説を交えつつ日本語の逐次通訳を行いました。

2つの講演の後にはQ&Aセッションが行われ、ホワイトボード一杯の会場から集まった付箋に書かれた質問を村山機構長が選んで2人の講師に投げかけました。閉会後も講師を囲み質問を行う参加者の姿が多数見られました。



講演する向山さん



講演するランドールさんと逐次通訳を行う村山機構長



参加者からの質問に答えるQ&Aセッション。左から向山さん、ランドールさん、村山機構長

勤務していた立川裕二さんが、東京大学大学院理学系研究科准教授を経て、2016年4月1日付で Kavli IPMU 教授に昇任されました。

立川さんは次のように抱負を語っています。「短いようで長い四年間の本郷勤務の後、柏に戻って参りました。IPMU 建物前の並木の枝ぶりは心なしか四年前より立派になったように思いますが、私の方はどうでしょうか。木の生長はすぐにはわかりませんが着実です。私もそのように、慌てず、のんびり、しかし、しっかりと、研究を続けていきたいと思えます。」

### 帰任・転出

次の方々が帰任・転出しました。[括弧内は Kavli IPMU 在任期間です。]

Krzysztof Gorskiさん [2016年2月8日 - 2016年4月15日]、任期満了にて Kavli IPMU 教授からカリフォルニア工科大学・ジェット推進研究所上級科学的研究員へ帰任。

Lluís Martí Magroさん [2013年4月1日 - 2016年4月30日]、Kavli IPMU 博士研究員から東京大学宇宙線研究所特任助教へ転出。

### 人事異動

#### 昇任

2010年11月から途中プリンストン高等研究所への4ヶ月の異動期間をはさみ、2012年3月まで助教として Kavli IPMU に



立川裕二さん



## ザイバーク双対性

立川 裕二

Kavli IPMU 教授

クォークが束縛されて核子になる様子は原理的には量子色力学 (QCD) で記述されます。現実のQCDには「色」が三色、軽いクォークの「香り」がアップ・ダウン・ストレンジの三種類ありますが、色および香りの数を変えた場合の一般的な挙動はQCDの重要な未解決問題です。この問題は、超対称性を加えた超QCDにおいては、1994年にザイバークが新たな双対性を導入することで解決しました。色の数が  $N_c$ 、香りの数が  $N_f$  である理論が、色の数が  $N_f - N_c$ 、香りの数が  $N_f$  である理論と等価になる、というのが双対性の基本的な主張で、その物理的な現れは  $N_c$  と  $N_f$  の比によって異なります。詳細は図をご覧ください。その後の超対称性理論の研究の出発点となった、大発見でした。

